

Schlussbericht

zum Verbundvorhaben

Entwicklung automatisierter Pheromonfallen für die Überwachung von Schadinsekten und Quarantäneschädlingen



Teilvorhaben 1: Anforderungsdefinition und Durchführung der Labor- und Freilandtests

Zuwendungsempfänger: Nordwestdeutsche Forstliche Versuchsanstalt

Förderkennzeichen: 2220WK38A4

Laufzeit: 01.07.2021 bis 31.03.2025

Teilvorhaben 2: Konzeption und Versuchsmusteraufbau

Zuwendungsempfänger: Fraunhofer-Institut für Fabrikbetrieb und –automatisierung IFF

Förderkennzeichen: 2220WK38B4

Laufzeit: 01.07.2021 bis 31.12.2024

Monat der Erstellung:

Februar 2025

Datum der Veröffentlichung:

3. Juli 2025

Erstellt durch:

Dr. Pavel Plašil, Nordwestdeutsche Forstliche Versuchsanstalt (NW-FVA)

Dr. Ina Ehrhardt, Fraunhofer-Institut für Fabrikbetrieb und –automatisierung (IFF)

Weitere Autoren:

Robert Fritz (NW-FVA), Martin Kirch (IFF), Mike Kuschereitz (NW-FVA), Matthias Neitzel (IFF),
Dr. Martin Rohde (NW-FVA), Denny Schmelz (IFF), Hannes Vogel (NW-FVA)



Gefördert durch:



Bundesministerium
für Ernährung
und Landwirtschaft

Bundesministerium
für Umwelt, Naturschutz
und nukleare Sicherheit

aufgrund eines Beschlusses des Deutschen Bundestages

Das diesem Bericht zugrundeliegende Vorhaben wurde aufgrund eines Beschlusses des Deutschen Bundestages mit Mitteln des Bundesministeriums für Ernährung und Landwirtschaft (BMEL) und des Bundesministeriums für Umwelt, Naturschutz und nukleare Sicherheit (BMU) über die Fachagentur Nachwachsende Rohstoffe e.V. (FNR) als Projektträger für den Waldklimafonds unterstützt. Die Verantwortung für den Inhalt dieser Veröffentlichung liegt beim Autor

INHALTSVERZEICHNIS

I. ZIELE	3
1. Aufgabenstellung	3
2. Stand der Technik	5
3. Zusammenarbeit mit anderen Stellen	10
II. Ergebnisse	11
1. Erzielte Ergebnisse	11
AP 1: Anforderungsanalyse für automatisierte Fangsysteme	11
AP 2 – Konzeptentwicklung, Priorisierung von Umsetzungsvarianten und Komponentenauswahl sowie Versuchsplanung	26
AP 3 – Entwicklung von Funktionsmustern zur Untersuchung der Lösungsansätze in Laborversuchen	51
AP 4 – Zusammenführung zum Versuchsmuster „Automatische Falle“	86
AP 5 – Erprobung und Evaluierung der „Automatischen Falle“	91
AP 6 – Erfolgskontrolle, Dokumentation und Ausblick	117
AP 7 – Projektmanagement und Öffentlichkeitsarbeit	127
2. Verwertung	133
3. Erkenntnisse von Dritten	135
4. Veröffentlichungen	137
ANHANG	138
Teilvorhaben 2220WK38A4 - Anforderungsdefinition und Durchführung von Labor- und Freilandtests	138
1. Ziel und Gegenstand des Teilvorhabens	138
2. Bearbeitete Arbeitspakete	138
3. Wesentliche Ergebnisse des Teilvorhabens	141
Teilvorhaben 2220WK38B4 - Konzeption und Versuchsmusteraufbau	148
1. Ziel und Gegenstand des Teilvorhabens	148
2. Bearbeitete Arbeitspakete	148
3. Wesentliche Ergebnisse des Teilvorhabens	151
Literatur- und Quellenverzeichnis	160
Abbildungsverzeichnis	164
Tabellenverzeichnis	167

SCHLUSSBERICHT

I. Ziele

Unter den bestehenden Klimaveränderungen können sich Schadinsekten im Wald massiv vermehren und enorme Zerstörungen verursachen. Die Überwachung von Forstschädlingen ist daher wichtig, um ihre Reproduktion zu kontrollieren und Waldflächen vor größeren Schäden zu schützen. Eine der effektivsten Methoden dazu ist die Insektenüberwachung mittels Pheromonfallen. Die dazu bisher verwendeten traditionellen Fallensysteme für die Überwachung waldschutzrelevanter Schmetterlingsarten sind in mehrerlei Hinsicht unzulänglich und sollen mit dem Vorhaben modernisiert werden.

Das Projektvorhaben „DiMoTrap“ zielte darauf ab, die Dauerüberwachung von forstrelevanten Schadinsekten durch innovative technische Lösungen zu verbessern. Dies soll dazu beitragen, produktive Wälder zu erhalten und die Versorgung mit Holz langfristig zu sichern. Im Mittelpunkt stehen neuartige automatisierte Pheromonfallen, die für die Überwachung forstschädlicher Schmetterlingsarten im Pflanzenschutz eingesetzt werden können.

1. Aufgabenstellung

Aufgabe im Projekt war es, "digitale" Fallensysteme zu entwickeln, die auf modularen Komponenten zur (1) gezielten, artspezifischen Abgabe von Pheromonen bzw. Lockstoffen an die Umwelt, (2) Detektion und Zählung der Fänge bzw. Zielorganismen, (3) Daten-(vor-)verarbeitung und automatisierten Datenweitergabe an zuständige Stellen zur Auswertung sowie auf (4) Komponenten zur Energieversorgung der Systeme im Freiland basieren.

Im Fokus der Entwicklung von Fallensystemen standen dabei ausgewählte Schmetterlingsarten, die zu den häufigsten Schaderregern in den Kiefern- und Eichenbeständen zählen. Als Modellinsekten waren Schwammspinner (*Lymantria dispar*) und Forleule (*Panolis flammea*) vorgesehen.

Das Projekt „DiMoTrap“ wurde in sieben Arbeitspakete gegliedert und umgesetzt, um automatisierte Fallensysteme zur Überwachung forstschädlicher Schmetterlinge zu entwickeln.

AP 1 – Anforderungsanalyse für automatisierte Fangsysteme

Ziel des AP ist ein konkreter Anforderungskatalog für ein breit einsetzbares automatisiertes Fallensystem. Mit Hilfe einer umfangreichen Analyse aller Ausgangs- und Randbedingungen, insbesondere aus Anwendersicht, werden quantifizierte Parameter als Voraussetzung für die Systementwicklung zusammengefasst. Die Beschreibung erfolgt in Form eines Anforderungskatalogs (sog. Lastenheft). Im Rahmen dieses AP sind folgende Aufgaben vorgesehen:

- Ermittlung der Ausgangsbedingungen,
- Präzisierung der Anforderungen an einzelne Komponenten und das Gesamtsystem
- Priorisierung der Zielstellungen mit Fokus auf Falter-Schädling,
- Definition von Anwendungsszenarien,
- Überarbeitung und Anpassung des Anforderungskatalogs in Abhängigkeit von Erkenntnissen aus anderen AP.

AP 2 – Konzeptentwicklung, Priorisierung von Umsetzungsvarianten und Komponentenauswahl sowie Versuchsplanung

Im Rahmen von AP 2 werden für die ermittelten Anforderungen technische Umsetzungsvarianten ermittelt und auf Realisierbarkeit geprüft. Auswahl und Festlegung geeigneter, möglicherweise bereits verfügbarer technischer Module, deren Weiterentwicklung oder Anpassung sowie die Kombination und technische Abstimmung der Bauteile zueinander werden definiert. Der priorisierte Anforderungskatalog für die Teilsysteme soll so beschaffen sein, dass er als Grundlage die Entwicklung breit verwendbarer Fangsysteme mit verschiedenen Lockstoffen ermöglicht.

Im Rahmen dieses AP sind folgende Aufgaben vorgesehen:

- Technische Konzeptentwicklung,
- Priorisierung von Umsetzungsvarianten und Komponentenauswahl,
- Aufwand-Nutzen-Vergleich für Umsetzungsvarianten sowie

- Festlegung von Versuchsflächen für Freilandprüfungen und Versuchsplanung (Festlegung von Indikatoren zur Messung und Erfolgsbewertung).
-

AP 3 – Entwicklung von Funktionsmustern zur Untersuchung der Lösungsansätze in Laborversuchen

Ziel des AP ist die Überprüfung der Lösungsansätze aus der Konzeptionsphase. Einzelne Teilkomponenten und Lösungsmethoden werden in Versuchsaufbauten überprüft und technische Parameter ermittelt. Daraus resultiert eine Abschätzung der Erreichbarkeit der angestrebten Projektziele. Die Laborversuche werden mit ersten Freilandversuchen verbunden, sofern die erforderliche Testumgebung im Labor nicht zur Verfügung steht. Die Konzeption der Einzelkomponenten und des zu entwickelnden Funktionsmusters wird anhand der Erkenntnisse aus den Laborversuchen angepasst.

Im Rahmen dieses AP sind folgende Aufgaben vorgesehen:

- Bau von Funktionsmustern für die Einzelkomponenten
- Konzeption von Testumgebungen
- Laboruntersuchung der Teilanforderungen
- Erste Freilandprüfungen für einzelne Systemkomponenten
- Erfolgskontrollen und Optimierungen
- Anpassung des Systemkonzepts

AP 4 – Zusammenführung zum Versuchsmuster „Automatische Falle“

Ziel des AP ist die Zusammenführung aller Versuchsmuster und Funktionalitäten der einzelnen Komponenten zu einem Versuchsmuster der digitalen Falle. Der Aufbau erfolgt modular, so dass leichte Anpassungen an die unterschiedlichen Anforderungen realisiert werden können, die sich aus den Zielstellungen des Vorhabens ableiten (z. B. Bandbreite der Schädlinge). Schaffung der Voraussetzungen für einen kontinuierlichen autonomen Versuchsbetrieb.

Im Rahmen dieses AP sind folgende Aufgaben vorgesehen:

- Lösungsauswahl und Konzeption des Versuchsmusters
- Bau von für die Tests ausreichend robusten Komponenten
- Technische Zusammenführung der Komponenten zum Versuchsmuster „Automatische Falle“
- Testkonzept
- Inbetriebnahme des Funktionsmusters (Parametereinstellung, Kalibrierung, ...)
- Technische Funktionstests des komplexen Aufbaus

AP 5 – Erprobung und Evaluierung der „Automatischen Falle“

Ziel von AP 5 ist die Überprüfung des Versuchsmusters „Automatische Falle“ unter Labor- und Feldbedingungen und die Anpassung der Komponenten an die praktischen Erfordernisse. Eine Methodik zur Nutzung des Systems unter Einhaltung der Zielparameter wird auf der Basis von Versuchen entwickelt. In Versuchen werden Einsatzdaten des „Automatischen Fallensystems“ ermittelt und mit den technischen und anwendungsbezogenen Zielstellungen abgeglichen. Referenzwerte liefern u. a. konventionelle Fallen in typischen bzw. den Testbedingungen entsprechenden Überwachungssituationen.

Im Rahmen dieses AP sind folgende Aufgaben vorgesehen:

- Konzeption von Testszenarien und Prüfbedingungen
- Erprobung unter praxisnahen Bedingungen
- Erhebung von Betriebsdaten, Überprüfen der Bedienbarkeit in der forstlichen Praxis
- Freilandprüfungen
- Ergebnisauswertung und Parametervergleich
- Systemanpassung und Systemoptimierungen

AP 6 – Erfolgskontrolle, Dokumentation und Ausblick

AP 6 umfasst die laufende Dokumentation der Projektergebnisse und den Vergleich des Ist-Standes mit den Zielstellungen. Die Versuchsaufbauten, die Vorgehensweise, die erreichte Parameterwerte und die Bewertungskriterien werden dokumentiert. Auf der Basis der erzielten Ergebnisse werden ein Ausblick auf mögliche neue Forschungsschwerpunkte gegeben und Möglichkeiten für die Umsetzung der Ergebnisse in die forstliche Praxis aufgezeigt.

Ein wichtiger und integraler Bestandteil von AP 6 ist die Einbeziehung von Fallenherstellern bzw. -anbietern in das Projekt, um Weiterentwicklungen und eine spätere Markteinführung entsprechender Lösungen zu unterstützen. Hierzu werden nach Vorliegen erster gesicherter Erkenntnisse zu Aufbau und Zusammenwirken der ausgewählten Komponenten sowie aus den Funktionstests im Feld ein bis zwei Praxisworkshops mit entsprechenden Herstellern bzw. Anbietern durchgeführt. Zielstellungen dieser Workshops sind einerseits die Vorstellung und Information der Hersteller bzw. Anbieter über Ziele und Fortgang der Entwicklungen und andererseits die frühzeitige Einbeziehung interessierter Unternehmen in die an das Projekt anschließenden Phasen der Prototypenentwicklung sowie der Etablierung auf dem Markt. Im Rahmen der Workshops sollen u. a. Chancen und Risiken der beteiligten Unternehmen hinsichtlich digitaler Fallensysteme ermittelt werden.

Im Rahmen dieses AP sind folgende Aufgaben vorgesehen:

- Dokumentation von Versuchsaufbauten und -mustern,
- Beschreibung der experimentellen Erprobung,
- Beschreibung von Messvorschriften und Methoden,
- Vergleich des Arbeitsstandes mit den Zielstellungen,
- Aufzeigen des zukünftigen Entwicklungsbedarfes, Einbeziehung von potenziellen Fallenherstellern bzw. -anbietern mittels Workshops,
- Beschreibung erforderlicher Schritte zur Umsetzung in die forstliche Praxis (Marktreife)

AP 7 – Projektmanagement und Öffentlichkeitsarbeit

Ziel von AP 7 ist die Sicherstellung eines reibungslosen Projektablaufes. Hierbei müssen sowohl die Arbeiten verschiedener Fachexperten innerhalb der beteiligten Forschungseinrichtungen als auch die Zusammenarbeit zwischen beiden Einrichtungen im Sinne des Projektfortschritts und -erfolgs kontinuierlich aufeinander abgestimmt werden. Ergänzend umfasst dieses Arbeitspaket Maßnahmen zur Öffentlichkeitsarbeit und zum Transfer der Projektergebnisse.

Im Rahmen dieses AP sind folgende Aufgaben vorgesehen:

- Berichtswesen,
- Change-Management,
- Koordination der Einzelaktivitäten.

2. Stand der Technik

Der Stand der Technik bei automatisierten Pheromonfallen hat in den letzten Jahren erhebliche Fortschritte gemacht, insbesondere im Bereich der Sensortechnik und der Datenverarbeitung. Im Folgenden wird der Stand der Technik zum Zeitpunkt des Projektbeginns erläutert. Der Stand der Technik zum Zeitpunkt des Projektabschlusses ist in Kapitel II.3 dargestellt.

Stand der Technik zum Zeitpunkt des Projektantrags im Jahr 2021

Unter bestehenden Klimaveränderungen können sich schädliche Insekten massiv vermehren und enorme Zerstörungen in der Forst- und Landwirtschaft verursachen. Insekten sind einer der wichtigsten Faktoren, die das Bestehen von Wäldern und die Erträge in der Landwirtschaft bedrohen. Obwohl dies in der Öffentlichkeit nicht sehr bekannt ist, verursachen Insekten mehr Schäden als Waldbrände und leider werden diese meist erst sichtbar, nachdem sie das Ausmaß einer epidemischen Invasion erreicht haben. Die Überwachung von Insekten ist wichtig, um ihre massive Reproduktion zu kontrollieren und forst- und landwirtschaftliche Flächen vor größeren Schäden zu schützen. Es gibt eine Reihe von Methoden, die zur Überwachung eingesetzt werden können, aber eine der effektivsten Methoden ist die Verwendung von Pheromonfallen.

Pheromone sind oft artspezifische (Wyatt 2017) natürliche Substanzen, die von speziellen Drüsen im Abdomen von Insekten produziert werden. Insekten produzieren Pheromone, um einen Partner anzulocken, um Futterwege zu markieren usw. Die chemischen Bestandteile der Pheromone von zahlreichen Insektenarten sind identifiziert worden, können synthetisch hergestellt und in künstliche Köder eingebaut werden. Diese Köder locken, wenn sie in Pheromonfallen gelegt werden, männliche Insekten an und bieten ein relativ spezifisches und kostengünstiges Überwachungssystem. Es können in einer Falle auch Köder für mehrere Arten kombiniert werden, um eine breite Palette von Arten zu fangen (Poland & Rassati 2019). Dabei ist es auch wichtig, den Anziehungsbereich der Köder zu berücksichtigen, der je nach Ködertyp und Zielinsekt sehr unterschiedlich sein kann (Schlyter 1992, Dodds und Ross 2002, Dunn et al. 2016, Hanula et al. 2016).

II.1.1. Stand der Wissenschaft und Technik in der Forstwirtschaft

Die Überwachung der Populationsentwicklung von Schadinsekten in der Forstwirtschaft erfolgt mit Hilfe mehrerer Methoden, gestaffelt anhand der Entwicklungsstadien der Insekten. Die Überwachung der wichtigsten Schaderreger in den Kiefern- und Eichenwäldern mit Hilfe von Pheromonfallen ist ein Kernbestandteil des integrierten Pflanzenschutzes bzw. der guten fachlichen Praxis nach Pflanzenschutzgesetz (PflSchG vom 06.02.2012). Der Einsatz von Pflanzenschutzmitteln im Wald ist in der Regel das letzte Mittel zur Abwendung eines bestandesbedrohenden Schädlingsbefalls.

Bei verschiedenen Forstschädlingen beruht die laufende betriebliche Überwachung in der Latenz und Progradation grundsätzlich auf dem Fang von Insekten mit Lockstofffallen. Vor allem in Kiefernwäldern sind es die Forleule (*Panolis flammea*), der Kiefernspinner (*Dendrolimus pini*) und die Nonne (*Lymantria monacha*). In mit Eiche bestockten Gebieten handelt es sich um Schwammspinner (*Lymantria dispar*) und Eichenprozessionsspinner (*Thaumetopoea processionea*) ggf. Eichenwickler (*Tortrix viridana* L.).

Das derzeit verwendete Fangsystem ist die Variotrap-Trichterfalle zum Fang von Schmetterlingen. Das System wird seit Jahrzehnten nahezu unverändert eingesetzt und ist mit diversen Problemen behaftet. Die aktuellen Trägermaterialien der Pheromondispenser oder auch -köder bestehen aus Kunststoff oder Kautschuk und geben über unregelmäßige Verdunstung oder semipermeable Membranen laufend Lockstoffe ab. Unabhängig davon weist das Fangsystem grundsätzliche Schwächen auf. So ist die kontinuierliche Abgabe von Pheromonen unabhängig von Tageszeit oder Schädlingsflugaktivität. Dabei sind alle oben genannten Falterarten dämmerungs- bzw. nachtaktiv (Schwerdtfeger 1970) und ein Großteil des Pheromons wird daher außerhalb der Flugzeit freigesetzt.

Darüber hinaus ist die kontinuierliche Freisetzung der Pheromone witterungsabhängig (abhängig von Lufttemperatur und -feuchte) und zudem ungleichmäßig, abhängig von der Flüchtigkeit der Pheromonkomponenten und vom Dispensertyp (Benelli et al. 2019). Die Abgabe von Lockstoffen über Kunststoffe ist grundsätzlich nicht optimal, da sie nicht konstant, sondern exponentiell abnehmend ist und sich die Fangdynamik der Fallen dadurch auf die ersten Tage bzw. Wochen nach der Installation konzentriert. Im Vergleich dazu wäre eine gleichmäßige bzw. gesteuerte Pheromonfreisetzung, angepasst an Schädlingsaktivität und Witterungsbedingungen, von großem Vorteil. Für die meisten forstlich relevanten Insekten sind artspezifische Mehrkomponentenlockstoffe im Einsatz, wobei alle Komponenten durch dieselbe Membran abdunsten müssen. Daraus resultiert eine nur begrenzt interpretierbare Fangleistung der einzelnen Falle bei vergleichsweise hohem Betreuungsaufwand, hohem und unregelmäßigem Pheromonverbrauch und räumlich begrenzter Aussagekraft.

Der Fangerfolg der Falle und das Überschreiten von Warnschwellen, die zur Auslösung weiterer Schritte in der Überwachungs- und Bekämpfungsstrategie wichtig sind, werden bislang erst zum Zeitpunkt der manuellen Kontrolle des Fangbehälters vor Ort und nach manueller Auszählung der Fänge erkennbar. Der erhebliche Zeitversatz zwischen Datenakquise und Datenauswertung führt generell zu Verzögerungen bei der Implementierung von Entscheidungsprozessen und die Datenschärfe ist meist auf eine bis zwei Wochen begrenzt. Der Vergleich des Fangverlaufes an verschiedenen Standorten ist bei aktuellen Verfahren ohnehin nicht möglich, da die regelmäßigen Fallenkontrollen auf allen Überwachungsstandorten nicht am selben Tag stattfinden. Zum Teil kommt es in den Forstbetrieben zunehmend dazu, dass die zeitaufwendige Überwachung mit Hilfe von Pheromonfallen unter aktuell steigenden Reviergrößen und Aufgabenumfang nicht optimal verläuft oder sogar nicht mehr stattfinden kann.

Die traditionellen im forstlichen Anwendungsumfeld verwendeten Pheromonfallensysteme erfordern einen erheblichen personellen und damit auch finanziellen Aufwand bei der laufenden Überwachung (regelmäßiges Zählen der gefangenen Schadinsekten alle 7 bis 10 Tage) und Wartungsarbeiten. So ist beispielsweise bei Einsatz dieser Fallensysteme fachkundiges Personal zum Auszählen der Fänge und zur Identifikation von Nichtzielorganismen notwendig. In Abhängigkeit von den Fallenstandorten (unwegsames Gelände, Steilhang etc.) ist zu beobachten, dass zusätzlich der Wartungsaufwand für die eingesetzten Fallen ansteigt. Darüber hinaus kann ein potenzieller Informationsverlust bei unregelmäßiger Kontrolle und aufgrund von fehlerhafter Handhabung bzw. Auszählung (in der Progradationsphase einer Massenvermehrung ist das Risiko besonders hoch) und Dateneingabe u. U. zu nicht wiederherstellbaren, erheblichen wirtschaftlichen Folgen führen.

Beim Fang von Schmetterlingen ist es sehr nachteilig, dass die gefangenen Tiere in den Fallen flattern, was zum einen zur Anlockung von Räubern (z. B. Fledermäusen) führen kann, die dann möglicherweise ebenfalls in der Falle gefangen werden. Zum anderen werden auch nah verwandte Arten angelockt, die nach dem Fang durch das so genannte „Abflattern“ (Verlust der arttypischen Flügelzeichnung) schwierig oder gar nicht mehr von den Zielarten zu unterscheiden bzw. nicht mehr bestimmbar sind, wodurch die Auswertung der Fangergebnisse u. U. auch mit einer gewissen Fehlerquote behaftet wird. Eine gute Bestimmung und rasche Tötung der durch die Sexuallockstoffe angelockten und gefangenen Zielorganismen (in diesem Falle forstschädliche Schmetterlinge) ist aus diesen Gründen eine wichtige Funktion, die bei der Entwicklung der Komponenten der automatischen Pheromonfalle beachtet werden muss. Durch die Weiterentwicklung hin zu automatisierten Fangsystemen soll der Aufwand im Gelände, der auch mit erheblichen Kosten verbunden ist, verringert und

die Funktionalität der Fallen zeitgleich erheblich verbessert werden. Die in diesem Antrag angestrebten automatischen Fallensysteme werden bereits seit einigen Jahren in der Landwirtschaft erfolgreich angewendet.

II.1.2. Stand der Wissenschaft und Technik in der Landwirtschaft

In der Landwirtschaft, einem dem forstwirtschaftlichen vergleichbaren Anwendungsbereich, spielen Fallen mit Pheromon- oder Nahrungslockstoffen in Bezug auf die Überwachung der Populationsentwicklung (Potamitis et al. 2017) sowie zur Bekämpfung von Schädlingspopulationen (Carde & Minks 1995, Guarnieri et al. 2011, Witzgall et al. 2010, Yalcin 2015, Potamitis et al. 2017, Benelli et al. 2019) ebenfalls eine bedeutende Rolle als ein Bestandteil des integrierten Pflanzenschutzes (Holguin et al. 2010).

Bei der Schädlingsbekämpfung werden die Pheromonlockstoffe zur Verwirrung und somit zur Unterbrechung der Paarung bestimmter Insektenschädlinge in unterschiedlichen landwirtschaftlichen Kulturen (z. B. Wein-, Obst- und Gemüsebau) angewendet (Benelli et al. 2019). Das Verfahren hat keine negativen Auswirkungen auf Nichtzielorganismen und damit ist es mit den Zielen des integrierten Pflanzenschutzes kompatibel (Welter et al. 2005, Witzgall et al. 2010, Ioriatti et al. 2012, Ioriatti & Lucchi 2016). Diese Methode kommt weltweit auf mehr als 800.000 ha in der Landwirtschaft zum Einsatz (Benelli et al. 2019). In der Europäischen Union (Italien, Spanien, Frankreich und Deutschland) werden damit etwa 300.000 ha Weinberge behandelt, um den Bekreuzten Traubenwickler, *Lobesia botrana* (Denis & Schiermüller) (Schmetterlinge: Tortricidae), zu bekämpfen (Benelli et al. 2019). Für die Freisetzung der Sexuallockstoffe werden Aerosolspender angewendet. Sie können dabei so programmiert werden, dass die Lockstoffe zu ausgewählten Zeiten und Intervallen, wenn die Zielart aktiv ist (Ioriatti & Lucchi 2016, Lucchi et al. 2018), freigesetzt werden und damit effizienter sowohl von der Wirkung als auch von den Kosten her sind (Benelli et al. 2019). Darüber hinaus bieten die Aerosolgeräte einen besseren Schutz der Pheromone vor Umweltfaktoren (Benelli et al. 2019). Es gibt derzeit ferngesteuerte Pheromondispenser (www.semios.com), die mit einer Reihe von Sensoren ausgestattet sind, die Wetterdaten sammeln und dabei helfen können, Entscheidungen über den optimalen Zeitpunkt für maximale Leistung zu treffen (Benelli et al. 2019). Kombiniert man diese Daten mit denen aus anderen Quellen, z. B. aus mit Kameras ausgestatteten Fallen zur Überwachung der Schädlingsaktivität (Lucchi et al. 2018), ist es möglich, einen Echtzeit-Datenstrom zu erzeugen, der bei Bedarf ferngesteuerte Aerosolspender zum Versprühen von Pheromonen aktiviert (Kshetri 2017) bzw. die Pheromonfreisetzungsraten über die Zeit frei abgestimmt werden (Benelli et al. 2019).

Eine Überwachung von Schädlingen und eine Entscheidungshilfe, wann und wo Pflanzenschutzsätze stattfinden müssen, können automatisierte Pheromonfallensysteme bieten (Severtson et al. 2018). Die ersten automatischen Fallen, die mit bioakustischen Sensoren, Bildsensoren oder mit Leuchtdioden und dem dazugehörigen Empfangssensor ausgestattet waren, wurden für den automatischen Fang von Käfern (Coleoptera) entwickelt (Sciarretta & Calabrese 2019). Dabei wurden aufgrund der Fortbewegung und Nahrungsaufnahme (Kauen) im Getreide bioakustische Vibrationen aufgenommen (Sciarretta & Calabrese 2019). Frühere Sensoren wurden an passiven Kornprobenfallen angebracht, um eine kontinuierliche Überwachung von Getreidekäfern in großen Mengen gelagerter Produkte zu ermöglichen (Shuman et al. 1996).

Einer der ersten Anwender von Kamerasystemen für die Zählung und Bestimmung der Insektenarten in den Insektenfallen war Kondo et al. (1994). Dabei wird je nach Automatisierungsstufe nach semiautomatischen (Guarnieri et al. 2011, Rassati et al. 2016, Ünlü et al. 2019) und vollautomatischen (Okuyama et al. 2011, Fukatsu et al. 2012, Priya et al. 2013, Upadhyay & Ingole 2014, Ding & Taylor 2016, Goldshtein et al. 2017) Systemen unterschieden (Sciarretta & Calabrese 2019). Die ersten halbautomatischen Fallen mit Bilderkennung wurden für holzbohrende Käfer genutzt (Sciarretta & Calabrese 2019). Später wurden automatische bildbasierte Fallen für kleinere Insekten in Gewächshäusern entwickelt (Sciarretta & Calabrese 2019). Im Falle eines vollautomatischen Systems werden die Zielinsektenarten im Bild durch Bildklassifikationsalgorithmen erkannt und gezählt, die meist auf einem neuronalen Netzwerkmodell basieren, das von maschinellem Lernverfahren profitiert (Thulasi et al. 2013, Xie et al. 2015, Xie et al. 2018, Ding & Taylor 2016, Kalamatianos et al. 2018). Ding und Taylor (2016) schlugen ein neuronales Netzmodell vor, das auf der Deep Learning Informationsverarbeitung (Lecun et al. 2015) basiert, um die Anzahl der Motten zu bestimmen und sie zu klassifizieren. Im Falle eines vollautomatischen Bilderkennungssystems wurde nach Yalcin (2015) bei einer Kombination verschiedener Merkmalsextraktionsmethoden (Größe, Proportionen etc.) eine Übereinstimmung beim Falterfang von 88 % erreicht. Xie et al. (2015) kombinierten eine Kodierungstechnik für die Kodierung von Insektenbildern mit einer Mehrkernlernertechnik, um ein Insektenerkennungssystem zu konstruieren, das bei 24 gängigen Insekten in Nutzpflanzenfeldern eine mittlere Genauigkeit von 85,5 % erreichte (Everingham et al. 2015). Für die Überwachung von Mittelmeerfruchtfliege, *Ceratitis capitata* (Wiedemann) und Olivenfruchtfliege, *Bactrocera oleae* (Gmelin) (beide Arten Zweiflügler: Tephritidae) wurde eine drahtlose automatische Falle entwickelt, indem ein mit den spezifischen Pheromon-Lockstoffen geködertes McPhail-Modell modifiziert wurde, das mit einer Kamera zur Aufnahme von Insektenbildern ausgestattet war (Sciarretta & Calabrese 2019).

Eine automatische Pheromonfalle zum Zählen der Bohnenwanze *Riptortus clavatus* (Thunberg) nutzte ein anderes Detektionssystem, das aus zwei im gleichen Abstand der Größe des Insekts angeordneten Walzen bestand; das Insekt berührte beide dann beim Eindringen und erzeugte so einen Lichtbogen. Die Zählungen wurden mit Hilfe eines an die Falle angeschlossenen Mobiltelefons übertragen (Tabuchi et al. 2006).

Bei den Schmetterlingen (Lepidoptera) wurden verschiedene automatische Pheromonfallen auf Apfelplantagen zur Überwachung von Apfelwickler, *Cydia pomonella* (L.) etabliert. Verschiedene Systeme wie z. B. optische oder optoelektrische Sensoren zur Erkennung und Auszählung der Falter kamen zum Einsatz (Holguin et al. 2010, Guarnieri et al. 2011). Dabei wird die Art und Anzahl des eindringenden Insekts anhand seines Flügelschlags (wie beim McPhail-Typ und bei Moskitofallen) als biometrische Signatur (Analyse des Lichtflusses, der von Flügelschlägen unterbrochen wird) erkannt (Potamitis & Rigakis 2015, Potamitis et al. 2017). Das System ist sehr genau; bei automatischen Zählungen von sieben adulten Käferarten in drei Fallentypen wurde eine Genauigkeit von 98-99 % im Vergleich mit der tatsächlich nachgewiesenen Anzahl in jeder Falle erreicht (Potamitis et al. 2017).

Ein weiteres Gerät namens Spensa Z-Falle wurde mit einem elektrischen Gitter ausgestattet, das einen Bioimpedanzsensor enthält, der mit Algorithmen für den Apfelwickler *Cydia pomonella* (Lepidoptera: Tortricidae) programmiert wurde (Wilson 2016). Die Motten des Apfelwicklers, die in die Falle eindringen und das elektrische Gitter berühren, werden durch einen Stromschlag getötet und fallen in den Fallenbehälter darunter (Wilson 2016). Sciarretta und Calabrese (2019) beschrieben die Z-Falle als ein System, das mit einer Metallspule ausgestattet ist, die in der Lage war, die in die Falle fliegenden Insektenarten zu identifizieren, basierend auf der Menge des elektrischen Stroms, der entladen wird, wenn ein Insekt die Spule berührt. Von Wilson (2016) wurde nach weiterer Anpassung der automatischen Z-Fallen die Übertragung auf in der Forstwirtschaft mit Hilfe von Pheromonen überwachte Insekten wie den Schwammspinner (*Lymantria dispar* L.) empfohlen.

Für die Zählung des Asiatischen Baumwollwurms, *Spodoptera litura* (F.) (Schmetterlinge: Noctuidae) wurde ein mit Infrarotsensoren ausgestattetes automatisches Überwachungsgerät vorgestellt (Shieh et al. 2011). Viele weitere Forschungen konzentrierten sich auf die Entwicklung von automatisierten Überwachungsinstrumenten für Fruchtfiegen. Ein elektronisches Gerät für die Überwachung der Orientalische Fruchtflye, *Bactrocera dorsalis* (Hendel) (Zweiflügler: Tephritidae) setzte einen Infrarot-Unterbrechungssensor ein, um die angelockten Fliegen zu zählen, die durch einen elektronischen Trichter in die mit dem Lockstoff Methyleugenol geköderte Falle eindringen (Jiang et al. 2008, Deqin et al. 2016). Mit Hilfe einer Lichtschranke werden entweder eintretende oder herabfallende Insekten in verschiedenen Arten von Fallen (z. B. Rüsselkäferfalle, Bodenfalle, Trichterfalle) gezählt. Die Lichtschranken werden auch bei elektronischen Toren in Bienenstöcken verwendet. Ein Infrarotlicht geringer Leistung und eine gekoppelte Fotodiode bilden einen Lichtbogen, der den Eingang der Falle verdeckt. Der Lichtfluss wird durch ein eintretendes Insekt unterbrochen und dieses somit gezählt (Potamitis et al. 2017). Automatische Fallen auf der Basis von Infrarotsensoren wurden auch für die Überwachung von *Ceratitis capitata* (Zweiflügler: Tephritidae) entwickelt (Goldshtein et al. 2017).

Die Literaturrecherche ergab eine größere Anzahl von Beispielen verschiedener Entwicklungen automatischer Pheromonfallensysteme und deren erfolgreicher Tests. Hierzu zählen insbesondere Fangsysteme für Schmetterlingsarten (Lepidoptera), wie:

- *Cydia pomonella* (Apfelwickler; Holguin 2010, Guarnieri et al. 2011),
- *Spodoptera litura* (Asiatischer Baumwollwurm; Shieh 2011),
- *Lobesia botrana* (Bekreuzter Traubenwickler; Ünlü et al. 2019),
- *Eoreuma loftini* (Mexikanischer Reisbohrer; Wilson 2016),
- *Helicoverpa punctigera* (Einheimischer Knospenwurm; Severtson et al. 2018),
- *Plutella xylostella* (Kohlmotte; Severtson et al. 2018),

auch Fangsysteme für Zweiflüglerarten (Diptera), wie:

- - *Dacus ciliatus* (Äthiopische Fruchtflye; Nestel et al. 2019),
- - *Bactrocera dorsalis* (Orientalische Fruchtflye; Jiang et al. 2008, Okuyama et al. 2011, Deqin 2016),
- - *Ceratitis capitata* (Mittelmeerfruchtflye; Thulasi 2013, Shaked et al. 2017),
- - *Bactrocera oleae* (Olivenfruchtflye; Thulasi 2013, Potamitis et al. 2014)
- oder Fangsysteme für Käferarten (Coleoptera), wie:
- - *Rhynchophorus ferrugineus* (Roter Palmen-Rüsselkäfer; Quarantänestatus in der EU; Potamitis & Rigakis 2015).

Die Anzahl der fremden Schädlinge, die in neuen Umgebungen ankommen und sich dort niederlassen, wird in den kommenden Jahren weiter steigen (Haack & Rabaglia 2013). In dieser Hinsicht ist die Früherkennung von gebietsfremden und Quarantäne-Arten von entscheidender Bedeutung, um das Risiko biologischer Invasionen zu verringern (Haack & Rabaglia 2013). Die Überwachung invasiver Insekten umfasst auch einen umfangreichen Einsatz von Köderfallen, sowohl an den Eingangspunkten für importierte Waren, um Insekten zu fangen, bevor sie sich etablieren, als auch im Zusammenhang mit der Überwachung und weiteren

Eindämmung (Poland & Rassati 2019). In diesen Fällen müssen die Fallen häufig überwacht werden, da bei der Entdeckung einer Quarantäne-Art sofort spezifische Maßnahmen ergriffen werden müssen (Rassati et al. 2016). Hier können automatisierte Fallen zusammen mit anderen Technologien eine wichtige Rolle bei der Reduzierung der Reaktionszeiten spielen (Sciarretta & Calabrese 2019). Die Beobachtung und Überwachung von invasiven Arten ist als phytosanitäres Instrument von enormer Bedeutung und in vielen Ländern werden große Gebiete überwacht.

Im Rahmen der Überwachung der Populationsentwicklung von Schädlingen mit Hilfe von Pheromonfallen wurden die zeitaufwendigen manuellen Kontrollen durch eine Technologie mit intelligenten Fallen ersetzt, die hochauflösende Informationen über Insektenpopulationen in Echtzeit liefern (Potamitis et al. 2017) und dadurch den integrierten Pflanzenschutz unterstützen (Holguin et al. 2010). Automatische Fallensysteme mit drahtlosen Kommunikationsmodulen haben einige deutliche Vorteile im Vergleich zur manuellen Überwachung. Sie können an verschiedenen Standorten gleichzeitig Insektenpopulationen 24 Stunden am Tag überwachen (jede Zählung ist mit einer Zeitangabe und GPS-Daten mit Position der Falle versehen). Alle Zählungen werden aufgezeichnet und können dauerhaft in einem Cloud-Service gespeichert werden (Potamitis et al. 2017). Dies ermöglicht die Bestimmung des genauen Beginns eines Befalls und rechtzeitige Bekämpfungsmaßnahmen (Potamitis et al. 2017). Die Einführung von automatischen Überwachungsfallen kann auch zur Reduktion der Bekämpfungsaktionen bzw. der Menge des angewendeten Pflanzenschutzmittels führen (Holguin et al. 2010, Goldshtein et al. 2017).

Darüber hinaus können die Daten aus der automatisierten Schädlingsüberwachung über die langfristige Populationsverteilung und mit Sensoren erfasste ökologische Parameter gespeichert werden. So können sie später helfen, die Populationsdynamik des Schädlings zu verstehen und prädiktive Modelle für statistische Schätzungen zu verwenden, um Risiken eines Befalls, seine Entwicklung und die Möglichkeit künftiger Ausbrüche zu verstehen (Potamitis et al. 2017). Des Weiteren führt die weitere Auswertung z. B. zur Rationalisierung von Datenerfassung und Datenverwaltung (Potamitis et al. 2017). Die Fallen könnten aufgrund einer geringeren Kontrolle der Fallen auf dem Feld eine Reduzierung der Personalkosten ermöglichen (Ünlü et al. 2019). Die Flexibilität des Systems erlaubt auch eine Erhöhung der Überwachungshäufigkeit, so dass das System nicht nur für Feldanalysen, sondern auch für Forschungsuntersuchungen genutzt werden kann (d. h. bessere Ermittlung der Flugstunden der Männchen bei Anwendung von Paarungsunterbrechungen mit Puffern oder zeitgesteuerten Pheromonspendern usw.) (Guarnieri et al. 2011).

Vom elektronischen und informatischen Standpunkt aus gesehen sind automatische Fallen eine ausgereifte und zuverlässige Technologie (Sciarretta & Calabrese 2019). In den letzten Jahren haben die elektronischen Bauteile immer höhere Leistungen und niedrigere Kosten erreicht (Potamitis et al. 2017), was eine Miniaturisierung der Komponenten ermöglicht (Sciarretta & Calabrese 2019). Daher ist die automatische Falle selbst nicht sehr teuer und die Arbeitskosten werden stark reduziert (Wilson 2016, Ünlü et al. 2019, Sciarretta & Calabrese 2019). Mittlerweile beweisen einige Studien die Anwendbarkeit zur automatischen Systeme der Überwachung von Schadinsekten im Freiland (Priya et al. 2013, Upadhyay & Ingole 2014).

Die Stromversorgung der automatisierten Fallensysteme wird mit Solarpanelmodulen und wiederaufladbaren Batterien sichergestellt, um das Ziel der Langzeitüberwachung zu erreichen (Shieh et al. 2011, Facello & Cavallo 2013, Rassati et al. 2016, Ünlü et al. 2019). Nach Potamitis et al. (2017) beträgt der Energiebedarf der Picusan/Lindgren-Falle 3,5 Monate mit einer einzigen wiederaufladbaren Lithium-Batterie mit 3,7/3000 mAh und für die Getreidefalle 2,5 Monate mit einer 3400 mAh-Batterie. Es ist eine ermutigende Tatsache, dass aufgrund der leistungsschwachen Elektronik ein langfristiger autonomer Einsatz möglich ist.

Beispiele für vollautomatische Fallen vor allem für Motten- oder Fruchtflyeschädlinge mit unterschiedlicher Sensortypologie sind derzeit auf dem Markt erhältlich (www.trapview.com; www.insectslimited.com). Da die Hersteller dieser Systeme ihre Produktion außerhalb von Deutschland betreiben, ist deren Einbeziehung in unser Projekt nicht möglich. Wie bei anderen Informationstechnologien ist eine Aussicht auf eine breite Anwendung intelligenter Fallen in der landwirtschaftlichen Praxis in naher Zukunft sehr wichtig (Sciarretta & Calabrese 2019).

3. Zusammenarbeit mit anderen Stellen

Innerhalb des Projekts wurde neben den Verbundpartnern mit weiteren Institutionen zusammengearbeitet. Als assoziierter Partner begleitete die Bayerische Landesanstalt für Wald und Forstwirtschaft (LWF) die Arbeiten im Projektverlauf beratend. Im Rahmen der Zusammenarbeit erfolgten ein regelmäßiger Erfahrungsaustausch zu den Entwicklungsschritten und eine gemeinsame Überprüfung der Ansätze. Darüber hinaus wurden die Erfahrungen aus vergangenen Entwicklungsarbeiten zu automatisierten Aufnahmesystemen und zur Optimierung der im Test befindlichen Prototypen weitergegeben. Die Zuchtmethodik für die Spezies Schwammspinner (*Lymantria dispar*) wurde in Kooperation mit dem assoziierten Projektpartner des LWF Bayern und der Universität für Bodenkultur Wien entwickelt.

Des Weiteren unterstützte die LWF die Arbeiten im AP 6 „Erfolgskontrolle, Dokumentation und Ausblick“. Dies betraf insbesondere die Abschätzung von kurz- und mittelfristigen Potenzialen des Einsatzes digitaler Fallen zur Überwachung forstschädlicher Schmetterlingsraten in Bayern und angrenzenden Regionen (z. B. Tschechien).

Die Tagung „Sektion Waldschutz“ fand im Zentrum für Wald und Holzwirtschaft im Frühjahr 2023 in Arnsberg statt. Das Format richtete sich an Experten aus dem Bereich Waldschutz. Neben den Trägerländern der NW-FVA waren andere Bundesländer wie bspw. Sachsen, Brandenburg und Bayern, sowie weitere universitäre und öffentliche Forschungseinrichtungen (z. B. TU Dresden, Julius Kühn-Institut Quedlinburg) vertreten. Das Projekt wurde auch in andere Arbeitsgruppen integriert. So war das Projekt in die AG Pheromone sowie in die AG Schmetterlinge und Hautflügler eingebunden.

Des Weiteren fand ein Treffen mit der Firma Embever statt (vgl. AP 7). Das Unternehmen bietet ein Dashboard an, das die Analyse von Daten aus der Borkenkäferfalle von Vitasec ermöglicht. Im Gespräch ging es darum, die Datenübertragung zu klären und Möglichkeiten für eine gemeinsame Weiterentwicklung bzw. Kooperation zu identifizieren.

II. Ergebnisse

1. Erzielte Ergebnisse

Auf den folgenden Seiten werden die im Projekt erzielten Ergebnisse geordnet nach Arbeitspaketen dargestellt. Dabei wird auf die wichtigsten Ergebnisse eingegangen und deren Bedeutung im Kontext der Projektziele erläutert.

AP 1: Anforderungsanalyse für automatisierte Fangsysteme

Ausgangspunkt der Arbeiten bildete eine zu Projektbeginn zunächst lose Sammlung verschiedener Anforderungen, Einflussfaktoren und Rahmenbedingungen für die Entwicklung automatisierter Fallensysteme, die im Rahmen von Expertenbefragungen gewonnen wurden. Im Rahmen dieser Ersterhebung von Informationen wurden u. a. folgende Fragen gestellt:

- Welche Funktionen benötigt eine automatisierte Pheromonfalle?
- Welche Anforderungen an die automatisierte Pheromonfalle gibt es darüber hinaus?
- Welchen Praxisanforderungen sollte eine „neuartige“ Falle gerecht werden?
- Welche Einflussfaktoren sind (auch bei herkömmlichen Fallen) zu berücksichtigen?
- Welche Anwendungsrestriktionen und Handhabungsanforderungen gibt es?
- Welche Störgrößen bzw. -faktoren sind (auch bei herkömmlichen Fallen) bekannt und zu berücksichtigen?
- Wie verhalten sich die Zielobjekte vor, bei und nach Eintritt in die Falle?

Die anhand dieser Ersterhebung gewonnenen Aussagen zu Anforderungen unterschiedlichster Art wurden als Basis für den zu erstellenden Anforderungskatalog dokumentiert und mit ersten Zielgrößen im Sinne einer Wunschvorstellung versehen, die im weiteren Verlauf der Anforderungsanalyse geprüft und korrigiert bzw. angepasst werden sollten. Beispielhaft wurden die folgenden Faktoren dokumentiert:

- **Kostenrahmen:** Die Kosten des vollständigen und funktionstüchtigen Versuchsmusters sollten 400 € nicht übersteigen.
- **Robustheit, Lebensdauer:** Das Fallensystem sollte robust ausgeführt sein und über eine Nutzungsdauer von mindestens 3 Jahren / Entwicklungszyklen zuverlässig eingesetzt werden können.
- **Wartungsfreie Laufzeit:** Das Fallensystem sollte über einen Zeitraum von mindestens 4 Wochen wartungsfrei im Freiland verbleiben können.
- **Einfache Handhabung:** Datenaufnahme, Bedienung und Wartung sollten durch eine Person durchführbar sein.
- **Witterungsbeständigkeit:** Das Fallensystem sollte wasserdicht, frost- und hitzebeständig ausgeführt sein.
- Vermeidung von Beifängen: Zielwert: 100 %.
- Vermeidung von Verwesung / Verwesungsgeruch: Zielwert: 100 %.
- Vermeidung des Abflatterns der gefangenen Falter: Zielwert: 100 %.
- **Befestigungssicherheit:** Es sollte eine sichere Aufhängung (z. B. Dreipunkt-Aufhängung) gewährleistet werden, die Falle sollte möglichst frei hängen und den Baumstamm nicht berühren (Abstand Falle-Stamm: min. 20 cm).
- **Fangbehälter und/oder direkte Abtötung:** Der Einsatz selektiver Insektizide soll ausgeschlossen werden.
- eine **Übertragbarkeit der Lösung auf andere Zielarten**, wie Kiefernspinner und Nonne sollte möglich sein.
- **Robustheit:** bei Einsatz der Falle sollten Störfaktoren wie Diebstahl / Vandalismus, die Frequentierung durch Fraßfeinde und die Erreichbarkeit für Säugetiere standortabhängig ausgeschlossen werden.
- Identifikation der anfliegenden Zielorganismen: Artspezifische Erkennungsrate bis ca. 80 %
- **Pheromonabgabe:** Steuerbarkeit und konstante Abgabe der abgegebenen Pheromonmengen (Funktionsbereich ca. 1-100 ng) sowie eine Abgabe in Abhängigkeit der klimatischen Umweltbedingungen (Temperatur, Feuchte).
- **Zählen der Zielorganismen:** Zählen der anfliegenden Zielorganismen, Vermeidung von Doppelzählungen.
- **Abtötung der Zielorganismen:** Zuverlässige Abtötung ohne Verwesungsgeruch oder Abflattern und ohne den Einsatz selektiver Insektizide.

Eine nähere Betrachtung der vorgenannten (Wunsch-)vorgaben ließ erkennen, dass für weitere Konkretisierungen und Priorisierungen für die Entwicklungsphase eine Unterscheidung in „modulspezifische,

d. h. funktionale Vorgaben“, „Vorgaben für das Gesamtsystem“ sowie „Vorgaben für den Einsatz bzw. die Anwendung der Falle“ unterschieden werden muss. Während die zu erreichenden funktionalen Anforderungen für die Entwicklungsarbeiten eine hohe Bedeutung haben, werden beispielsweise Vorgaben für den Einsatz der Falle in der praktischen Anwendung, wie z. B. deren Befestigung im Feld, lediglich sekundär einfließen.

Auch die vorgegebenen (Wunsch-)Zielgrößen, wie z. B. eine 100 %-ige Vermeidung von Beifängen wurde als diskussionswürdig eingeschätzt. Für eine weitere Konkretisierung der genannten Wünsche und die Ableitung von darauf basierenden Anforderungen sowie deren Priorisierung für eine spätere exemplarische Umsetzung war es erforderlich, die Ausgangssituation sowohl forstfachlich als auch technisch weiter aufzuarbeiten.

Ermittlung der Ausgangsbedingungen

Ausgehend von der vorgenannten Zielstellung des Vorhabens, eine technologische Lösung für ein automatisiertes Fangsystem zu erarbeiten, wurden daher einerseits die forstfachlichen und andererseits technische Grundlagen gezielt aufgearbeitet, um die Arbeiten im Projekt anhand des aktuellen Standes des Wissens zu fokussieren und zu konkretisieren. Zur Aufarbeitung der forstfachlichen Rahmenbedingungen diente eine umfassende Literaturrecherche, die durch eine systematische Zusammenstellung projektrelevanter Technologien und deren Möglichkeiten und Grenzen bei Verwendung ergänzt wurde.

Literaturanalyse

Im Rahmen der Aufarbeitung forstfachlicher Grundlagen wurde der Fokus auf die Ermittlung bekannter Ansätze und Erkenntnisse zu verschiedenen inhaltlichen Schwerpunkten mit direktem oder indirektem Projektbezug gelegt. Die im Folgenden formulierten Themen bildeten den Rahmen der Untersuchung durch die NW-FVA:

- Biologie und Morphologie der Zielarten Schwammspinner, Forleule, Nonne und Kiefernspinner,
- Überwachungspraxis forstschädlicher Schmetterlingsarten mit Pheromonfallen in Deutschland und weltweit,
- Grundlagen der Biochemie von Insektenpheromonen,
- Pheromonsynthese der Zielarten Schwammspinner, Forleule, Nonne und Kiefernspinner,
- Kommunikation, Signalübertragung und Verhaltenssteuerung durch Schmetterlingspheromone,
- Relevante Versuchsanordnungen in der Arbeit mit Pheromonfallen für die Zielarten Schwammspinner, Forleule, Nonne und Kiefernspinner,
- Automatische Pheromonfallen in der Landwirtschaft: Prototypentwicklung und marktreife Modelle,
- Pflanzenschutzmittel in forstlichen Pheromonfallen und deren Alternativen,
- Technische Ansätze zur automatisierten Spezieserkennung von Schmetterlingen,
- Grundlagen des Aufbaus und Effizienzvergleich marktgängiger Schmetterlings-Pheromonfallen Schwammspinner, Forleule, Nonne und Kiefernspinner unter Einbezug der verwendeten Pheromone,
- Fangverhalten konventioneller Pheromonfallen der Zielarten Schwammspinner, Forleule, Nonne und Kiefernspinner sowie das typische Auftreten artspezifischer Beifänge.

Ergänzend wurden im Rahmen einer entsprechenden Recherche bestehende Patente auf Mechanismen zur Pheromonabgabe sowie relevante Patentklassen zum Anlocken, Fangen und Abtöten von Insekten ermittelt und Informationen zu den wesentlichen biologischen und morphologischen Merkmalen der Zielorganismen zusammengestellt.

Die Ergebnisse dieser Arbeiten wurden dokumentiert. Bei der Zusammenfassung standen dabei typische Unterscheidungsmerkmale wie charakteristische Bewegungsmuster, artspezifische Flügelzeichnungen und Flügelschlagfrequenzen sowie die Darstellung der Entwicklungszyklen für die für das Projekt definierten Zielarten Schwammspinner (*Lymantria dispar*) und Forleule (*Panolis flammea*) im Mittelpunkt. Während es sich bei dem Schwammspinner um eine polyphage Art handelt, die Wirtsbäume der Gattung Eiche (*Quercus spp.*) bevorzugt, konzentriert sich das Fraßgeschehen bei der Forleule vornehmlich auf die Gemeine Kiefer (*Pinus silvestris*). Anhand langjähriger Überwachungsdaten konnten für Fallensysteme mögliche artspezifische Beifänge identifiziert und zu erwartende Beifangraten ermittelt werden.

Aufgrund der aktuell stark rückläufigen Populationsentwicklung dieser beiden Schmetterlingsarten, wurden mit dem Kiefernspinner (*Dendrolimus pini*) und der Nonne (*Lymantria monacha*) zwei weitere Arten als potenziell für Untersuchungen im Projekt geeignete Zielspezies identifiziert, die in die Analyse der Ausgangsbedingungen somit ebenfalls einbezogen wurden. Gegen Ende des Berichtszeitraumes 2022, wurden zusätzlich die beiden der Eichenfraßgesellschaft angehörigen Winter-Schmetterlingsarten Kleiner Frostspanner (*Operophtera brumata*) und Weißgrauer Breitflügelspanner (*Agriopis leucophaearia*) in die Betrachtung einbezogen. Diese Arten kommen standortabhängig in relativ hohen Falterzahlen vor und werden

bisher nicht mit Pheromonfallen, sondern im Rahmen eines Leimringmonitorings überwacht. Da die Flugzeiten der Spezies in die Wintermonate fallen, eignen sie sich sehr gut, um ergänzende Freilandversuche mit Pheromonfallen durchzuführen. Während Pheromonköder für den Kleinen Frostspanner am Markt verfügbar sind, wurden die Köder des Weißgrauen Breitflügelspanners erstmals über das Pflanzenschutzinstitut der ungarischen Agrarforschungsbehörde beschafft. Weitere Argumente für die Erweiterung der ausgewählten Modellspezies liegen in den spezifischen Eigenschaften der artspezifischen Sexualpheromone und in der Eignung der eingesetzten Pheromonköder für den Einsatz in einem automatischen Fallensystem. Durch ein breiteres Spektrum von Zielarten in dieser ersten Projektphase wird die spätere Übertragbarkeit des Fallensystems auf weitere forstschädliche Schmetterlinge gewährleistet. Dabei stellen neben dem Anlockungsprozess über Sexualpheromone auch das Flugverhalten, die Flugzeiten und die Körpergröße, die grundsätzlich zu berücksichtigenden artspezifischen Merkmale dar. Die Anpassung der zu entwickelnden Fallenmodule auf mehrere Arten gewährleistet sowohl räumlich als auch zeitlich einen größeren Spielraum bei der Planung und Durchführung von Freiland-, Semifreiland- und Laboruntersuchungen.

Die den Untersuchungen im Rahmen des Verbundprojekts im Weiteren zu Grunde gelegten forstschädlichen Schmetterlingsarten sind in Abbildung 1 dargestellt.

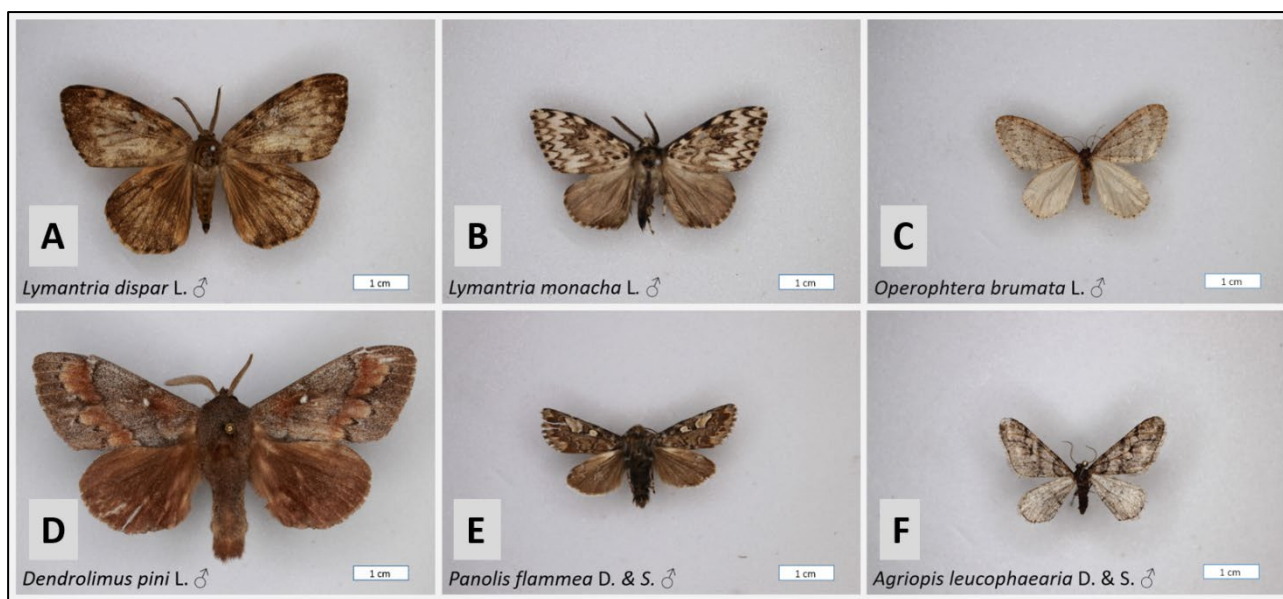


Abbildung 1: Die Zielarten im Projekt PherUbS/DiMoTrap: Schwammspanner (A), Nonne (B), Kleiner Frostspanner (C), Kiefernspinner (D), Forleule (E) und Weißgrauer Breitflügelspanner (F)

Übersicht über Technologien

Parallel zur Schaffung der forstfachlichen Grundlagen im Projekt wurden die technologischen Ausgangsbedingungen systematisiert und aufgearbeitet. Hierzu wurden durch das Fraunhofer IFF Möglichkeiten und Grenzen verschiedener technischer Varianten systematisch aufbereitet und dokumentiert.

Die Arbeiten waren verbunden mit der Zielstellung, anhand einer geeigneten Übersicht über Basisfunktionalitäten und technische Umsetzungsoptionen eine geeignete Grundlage für die Diskussion und Auswahl von Umsetzungsvarianten unter Berücksichtigung eingangs nur grob erfasster Anforderungen an die automatische Falle zu schaffen. In einem nachgelagerten, iterativen Prozess sollten dabei relevante Verfahren und Technologien unter Berücksichtigung des Einsatz-/Anwendungsgebietes selektiert und die Anforderungen weiter priorisiert werden.

Die Sammlung technischer Ansätze (Verfahren) und von Beispielen technischer Komponenten erfolgte für die definierten Kernfunktionen der Falle (Locken, Zählen, Datenerfassung und -übertragung sowie Energieversorgung) zunächst ohne Ausschluss von Optionen, d. h. auch zunächst abwegig erscheinende technische Ansätze wurden miterfasst. Abbildung 2 und Abbildung 3 zeigen beispielhaft Auszüge aus diesem Arbeitsschritt.

Abgabe-Verfahren	Technik/Komponenten	Möglichkeiten	Grenzen
zerstäuben	Düse und Druckbehälter oder durch temporäre Druckerzeugung	Individuelle Ausbringung nach Bedarf,	Bei Aufbringen auf Träger wirkt Pheromon nach
träufeln	Pipetten und Druckerzeugung	Individuelle Ausbringung nach Bedarf	Bei Aufbringung auf Träger wirkt Pheromon nach
„mechanisch“ (Klappe)	Elektro-mechanischer Antrieb	Zeitgesteuerte Ausbringung	Mit zunehmender Anwendungsdauer Reduzierung der Intensität
Dochtsystem/ Membransystem Vorschub mechanisch	Elektro-mechanischer Antrieb, evtl kombiniert mit Klappe	Zeitgesteuerte und nahezu konstante Pheromonkonzentration über längeren Zeitraum	
Blister	Elektro-mechanischer Antrieb, ggf. kombiniert mit mech. Auswurf	Abgabe, Verwendung herkömmlicher Köder	

Abbildung 2: Übersicht über (verfahrens-)technische Ansätze für die Pheromonabgabe (Arbeitsstand zum Locken der Schädlinge)

Verfahren	Technik	Bemerkung
Optisch (Licht)	(Doppel-)Lichtschranke, Lichtgitter	keine Arterkennung, daher bei Abtöten auch Nichtschadinsekten betroffen, mehrfache Zählung durch Ein-Ausfliegen der Falter ist zu verhindern (andere Komponenten)
Fotooptisch, Spektralanalyse	Kamera	hoher Energiebedarf, teuer, Voraussetzung genaue Informationen zu (verschiedenen) Spezies zum Anlernen der KI (z.B. Verhalten, Aussehen, ...), Weitere Risiken: erforderliche Beleuchtung, Verschmutzungen, ...
Kapazitiv	Kondensator (Näherungssensorik)	keine Arterkennung, kurze Abstände (N.N.), nur 1-bit-Info
Passiv-Infrarot	Pyrosensor, PIR-Sensor	träge, externe Störquellen; keine Arterkennung, daher bei Abtöten auch Nichtschadinsekten betroffen, mehrfache Zählung durch Ein-Ausfliegen der Falter ist zu verhindern (andere Komponenten)
Mechanisch (bspw. Drehkreuz)	Schalter	Keine Art- jedoch Richtungserkennung möglich, robust, jedoch (technisch/konstruktiv) aufwendig, Individuallösung
Akustik	Mikrofon, Vibrationsmesser	Günstig, ggf. externe Störquellen berücksichtigen, mehrfache Zählung verhindern
Wiegen	Wägezelle	Günstig; Herausforderungen: komplexe Konstruktion, Objektpositionierung, Verschmutzung, ...

Abbildung 3: Übersicht über (verfahrens-)technische Ansätze für die das Zählen der Fänge (Arbeitsstand)

In einem weiteren Detaillierungsschritt wurden ausgewählte technische Spezifika sowie Vor- und Nachteile des jeweiligen Ansatzes für die Umsetzung von Funktionen der Falle aufbereitet (vgl. Abbildung 4).

Möglichkeiten und Grenzen verschiedener technischer Varianten

Zählen der Fänge

Optisches Verfahren (Kamera)

Sensor: CMOS-Kamera, Farbe

Auflösung / fs / n: 1-12MP / 20-40 Hz / 1

Weitere Komponenten: Beleuchtung (Blitz), Objektive

Arterkennung: ja

Richtungserkennung: ja

Methode/Technologie: (KI-)Bildauswertung

Vorteile: präzise Informationen

Nachteile: hoher Energiebedarf, teuer, aufwändig

Hinweis: Voraussetzung genaue Informationen zu (verschiedenen) Spezies zum Anlernen der KI (z.B. Verhalten, Aussehen, ...)
Weitere Risiken: erforderliche Beleuchtung, Verschmutzungen, ...



Allied Vision (AVT) Oscar F-810C



BMP-Raspberry-Kameramodul

25

© Fraunhofer

intern

Fraunhofer IFF

Abbildung 4: Beispiel - Möglichkeiten und Grenzen (foto-)optischer Verfahren zum Zählen von Fängen

Die im Ergebnis dieser Arbeiten zusammengefassten technischen Grundlagen wurden in zwei Präsenzterminen sowie in mehreren Abstimmungsgesprächen der Projektpartner per Videokonferenz und fernmündlich mit den Ergebnissen der forstlichen Betrachtung der Ausgangslage zusammengeführt und abgestimmt.

Präzisierung der Anforderungen an einzelne Komponenten und das Gesamtsystem

Im nächsten Schritt wurden die Anforderungen im direkten Zusammenhang mit den Möglichkeiten, die verschiedene konkrete technologische Lösungen bieten, durch die Projektpartner gemeinsam evaluiert. Hierbei wurden technologische Ansätze für weitere Betrachtungen ausgewählt oder ausgeschlossen und die Anforderungen präzisiert.

Strukturiert wurden die Arbeiten dieser Projektphase anhand der folgenden (technischen) Funktionen einer automatisierten Falle (1) „Pheromonabgabe“, (2) „Zählen der Fänge mittels Sensorik“ und (3) „Energieversorgung“, (4) „Datenübertragung“ und (5) „Abtötung von Schadinsekten“.

Pheromonabgabe

Die technische Umsetzung eines automatisierten Pheromonabgabe-Mechanismus ist Bestandteil von Modul 1: Fangmodul. In die Abwägung von alternativen technischen Lösungen zur Pheromonabgabe wurden auf Basis der durch das IFF erarbeiteten Technologieübersicht u. a. folgende Ansätze diskutiert:

- Das Zerstäuben mittels einer Düse und eines Druckbehälters oder durch eine temporäre Druckerzeugung,
- Das Träufeln mittels eines Mikroventils oder einer Pipette,
- Das Ausbringen eines Pheromon-Lösungsmittel-Gemischs mittels einer Mikropumpe oder Mikrodüsen,
- Der Einsatz eines Docht- / oder Membransystems mit mechanischem Vorschub in Kombination mit einem Klappenverschluss,
- Die Förderung eines Pheromon-Lösungsmittel-Gemischs mittels einer Mikroendlosförderschnecke oder eines Mikroendlosförderkolbens sowie
- Das automatisierte mechanische Ausbringen (vakuumverpackter) Pheromonköder (z. B. Blister)

Untersuchte Varianten der zugehörigen Pheromonspeicherung lagen in:

- Der Speicherung einer Pheromonlösung in einem drucklosen oder druckbasierten Behälter,
- Der Verwendung von mit einem Pheromon beladenen Trägermaterialien.

Im Ergebnis der Abwägung der Vor- und Nachteile verschiedener Varianten wurden insbesondere die Ansätze eines drucklosen Systems zur Abgabe einer Pheromonlösung mittels Mikropumpe sowie die automatisierte mechanische Abgabe eines festen Pheromonködors (Blistersystem) für weitere Betrachtungen priorisiert.

Vor dem Hintergrund der durchgeführten Literaturrecherchen und der bestehenden Erfahrungen zum Thema Pheromonköderanalysen an der NW-FVA wurde dabei jedoch deutlich, dass für aussagekräftige Untersuchungen bzgl. der Fragestellung der mit diesen technischen Ansätzen zu erreichenden Lockwirkung im Rahmen der vorgesehenen Feldtests der Einsatz aufwendiger Analysemethoden wie GC (Gaschromatographie) und MS (Massenspektrometrie) unerlässlich ist.

Hintergrund dieser Feststellung ist, dass jede Änderung des Trägermediums, des Lösungsmittels oder Pheromon-Lösungsmittel-Gemischs und jede Verwendung von pheromonhaltigen Flüssigkeiten zwangsläufig mit einer Änderung der Pheromonabgabegeräte, der Pheromon-Beladung des Trägermediums und einem veränderten zeitlichen Verlauf der Pheromonabgabe einhergeht. Alle technischen Ansätze, die eine solche Änderung der Pheromonabgabe gegenüber herkömmlichen Verfahren zur Folge haben, können aus wissenschaftlicher Sicht im Grunde nur unter Durchführung aufwendiger GC / MS-Analysereihen überprüft werden. Hierzu gehören sowohl Versuchsreihen zur Bestimmung der Pheromonabgabegeräte, der Pheromonbeladung sowie zu dem Zeitverlauf der Pheromonabgabe über die Dauer eines Überwachungsintervalls von 8-12 Wochen.

Eine Alternative dazu besteht darin, die Pheromonlockwirkung im Freiland, beispielsweise in Relation zum Einsatz konventioneller, etablierter Pheromonköder in der herkömmlichen Variotrap-Trichterfalle zu untersuchen, wobei die Aussagekraft dieser Untersuchungen von einer Vielzahl möglicher Einflussfaktoren und der entsprechenden Stichprobe abhängt.

Der Bedarf einer Umsetzung von Versuchs-Zeitreihen mit der GC / MS-Technologie war einerseits zum Zeitpunkt der Antragstellung des Forschungsvorhabens in der Form nicht vorhersehbar und entsprechend wurde der mit solchen Versuchen verbundene hohe Aufwand an Zeit und Ressourcen kostenseitig nicht

eingepplant. Andererseits muss der aus solchen Untersuchungen potenziell erwachsende Nutzen zudem vor dem Hintergrund verfügbarer, gut wirksamer Pheromonköder für alle gängigen forstschädlichen Schmetterlingsarten in Frage gestellt werden. Ein weiteres, entscheidendes Argument, welches insbesondere gegen die Entwicklung individueller, spezieller oder veränderter Pheromonköder gesehen wurde, ist die Zielsetzung das zu entwickelnde „Digitale Fallensystem“ nach Projektende perspektivisch zur Marktreife weiterzuentwickeln.

Als Vorschlag für den mechanischen Pheromonabgabe-Mechanismus wurde daher die Nutzung etablierter, d. h. der für die Vario-Trap-Falle bislang genutzten Pheromonköder eingebracht. Ein Lösungsansatz, der auf dem einer automatisierten, zeitlich versetzten Ausbringung dieser Köder basiert, würde insbesondere folgende Vorteile bieten:

- Die zu erwartenden Pheromon-Abgabemengen im Zeitverlauf sowie das ‚Abnutzungsverhalten‘ des Pheromon-Köders sind bekannt und erfordern keine weiteren Untersuchungen durch Verfahren der Gaschromatographie und Massenspektrometrie.
- Zusammensetzung, Qualität und damit die zu erwartende Lockwirkung der abgegebenen Pheromon-Duftspur sind bekannt und erfordern keine weiteren Untersuchungen durch Verfahren der Gaschromatographie und Massenspektrometrie.
- Die verwendeten Köder sind marktgängig und in den Beschaffungsstrukturen der forstlichen Landesanstalten etabliert, d. h. die Identifikation geeigneter Lockstoff-Anbieter wie auch die Nachfrage nach einem automatisierten Fallensystem in der Forstpraxis würden durch den Einsatz bereits etablierter Pheromonköder bei einer späteren Markteinführung vereinfacht.
- Ein technischer Ansatz zur Realisierung der Steuerbarkeit des Pheromonabgabe-Verhaltens könnte in der Implementierung einer abgedichteten Kapselung in Verbindung mit einem elektronisch angesteuerten mechanischen Ausbringungsmechanismus liegen.

Abbildung 5 zeigt eine Übersicht der im Rahmen der laufenden Überwachung in den Trägerländern der NW-FVA etablierten Pheromon-Köder.

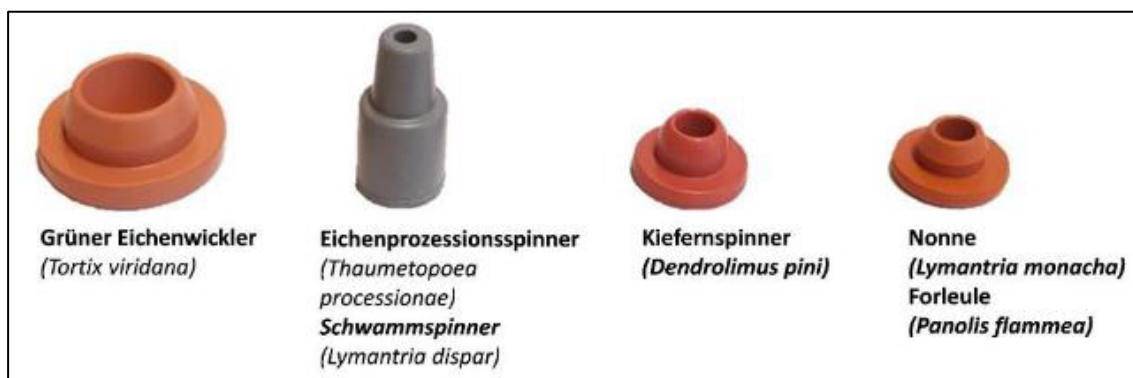


Abbildung 5: Im Rahmen der laufenden Überwachung forstlicher Schadschmetterlinge etablierte Pheromon-Dispenser

Für die konstruktive Gestaltung dieser Umsetzungsvariante zur „Pheromonabgabe“, d. h. einer gesteuerten mechanischen Ausbringung von Feststoffködern, wurde die Anforderung formuliert, dass nach Möglichkeit die in Abbildung 5 dargestellten Ködergrößen eingesetzt werden können.

Ein weiterer wichtiger, in den Diskussionen herausgestellter Aspekt wurde in der zu erreichenden Robustheit des Pheromonabgabe-Mechanismus gesehen. Die Umgebungsbedingungen im Freiland erfordern eine hohe Toleranz der technischen Bauteile in Bezug auf die Witterung (Temperatur, Niederschlag, Feuchte), in Hinsicht auf Verschmutzungen (Staub, Laub, biologische Rückstände) sowie aufgrund der Anwesenheit verschiedenster Wildtiere, welche die Falle in ihrer Funktion behindern oder stören können (Insekten, Fledermäuse, Säugetiere, Vögel). Daraus resultierend wurde die Anforderung formuliert, für weitere Entwicklungen möglichst einfachen und widerstandsfähigen technischen Lösungen bzw. Bauteilen den Vorrang zu geben.

Im Hinblick auf die Formulierung und Priorisierung von Anforderungen an die Falle wurden des Weiteren folgende Feststellungen getroffen:

- Die Menge der abzugebenden Pheromone bewegt sich im Bereich sehr geringer Stoffmengen (Mikro-Nanogramm). Eine Überdosierung der Abgabemengen sollte möglichst ausgeschlossen werden, um eine damit einhergehende, je nach Schmetterlingsspezies, repellente Wirkung zu vermeiden.
- Die Frage der zur Pheromonabgabe benötigten Energiemenge konnte zum aktuellen Zeitpunkt nicht abschließend geklärt werden. Sie wurde in Relation zu den anderen technischen Komponenten

(Mikrocomputer, Sensorik) jedoch als niedrig eingeschätzt und hängt i. W. generell von der Frage ab, ob und wie häufig die hierbei eingesetzten Technikkomponenten aktiv angesteuert werden müssen.

Zählen der Fänge mittels Sensorik

Wiederum auf Grundlage der Sammlung technischer Ansätze (Verfahren), die mit Beispielen technischer Komponenten und Bauteile unterlegt war, erfolgte die Abwägung von alternativen technischen Lösungen zur Umsetzung der Funktion „Zählen der Fänge mittels Sensorik“ unter Einbeziehung der forstfachlichen Erkenntnisse. Auf Basis der vorab ebenfalls formulierten Wunschvorstellungen hinsichtlich der Fallenfunktionen wurden dabei folgende Ziele unterschieden:

1. die Anwesenheitserkennung von Organismen,
2. die Arterkennung von Zielorganismen und
3. die Erkennung der Bewegungsrichtung von Organismen.

Ausgewählte Erkenntnisse der Betrachtungen und Diskussionen verschiedener Ansätze für einen sensorbasierten Zählmechanismus werden im Folgenden vorgestellt.

Fotooptisch, optisch-spektral

Grundsätzlich wäre dieses Verfahren für alle vorgenannten Ziele 1-3 geeignet. Aufgrund der Nachteile, wie hoher Wartungsintensität, hohem Energiebedarf und relativ hohen Kosten sowie der Schwierigkeit, geeignete Merkmale zur Identifizierung der Falter mit dem Verfahren zu definieren und diese anhand dieser zuverlässig zu erkennen bzw. automatisch zu interpretieren (z. B. durch Anlernen einer KI) wurde die Praktikabilität als niedrig eingeschätzt. Auch Herausforderungen, die mit einer zu erwartenden Verschmutzung unter Freilandbedingungen verbunden sind und eine voraussichtlich eher geringe Robustheit gegen dieselben führten dazu, diesen Ansatz zunächst zu verwerfen. Unbenommen von dieser Festlegung blieb, optische Verfahren in der Testphase bedarfsweise zu Dokumentationszwecken, d. h. zur externen Beobachtung von Versuchsaufbauten einzusetzen.

Optisch (Licht)

Der Einsatz einer lichtbasierten Sensorik weist Vorteile durch Verfügbarkeit bei geringen Kosten, hohe Messfrequenzen, vielfältige Anordnungsmöglichkeiten und somit fallweise Informationen zur Anwesenheits- und Richtungserkennung auf, wenn mehrere Sensoren geeignet angeordnet werden. Eine Arterkennung ist mit diesen Verfahren jedoch nicht möglich.

Für weitere Betrachtungen und für den Aufbau von Versuchsanordnungen wurde dieses Verfahren priorisiert. Als Anforderung wurde dabei formuliert, dass ein mehrfaches Auslösen des Zählimpulses durch dasselbe Individuum (Falter) durch die Anordnung der Sensorik sowie die Steuerung vermieden werden sollte. Der Aspekt, dass bestimmte Wellenlängen des Lichts möglicherweise repellent auf einzelne Schmetterlingsspezies wirken könnten, sollte bei der Auswahl geeigneter Sensoren und bei den Tests späterer Versuchsaufbauten beachtet werden.

Kapazitiv

Messungen (Zählungen) mit kapazitiven Näherungssensoren, die den Vorteil haben, dass keine direkte Berührung der Messoberfläche notwendig ist und die kostenadäquat verfügbar sind, basieren auf Änderungen eines elektrischen Feldes. Eine Arterkennung ist dabei nicht möglich, eine Erkennung der Bewegungsrichtung von Zielobjekten unter bestimmten Bedingungen ist jedoch grundsätzlich möglich. Je nach Sensorgröße und Leistung des elektrischen Feldes sind dabei allerdings kurze Abstände bis unter 1 cm Entfernung des Zielobjektes zur Sensoroberfläche notwendig. Dieser Nachteil gegenüber optischen (lichtbasierten) Sensoren führte zu der Festlegung, diesen Ansatz zunächst nicht weiter zu verfolgen. Sollten sich im Verlauf der Untersuchungen und Entwicklungen von Komponenten auf Basis eines lichtbasierten Verfahrens Verbesserungsanforderungen ergeben, die unter Einsatz eines/mehrerer zusätzlicher kapazitiver Sensoren erzielbar sind, könnte dieser Ansatz jedoch wieder aufgegriffen werden.

Passiv-infrarot

Passiv-infrarote Sensorik bietet grundsätzlich die Möglichkeit, auch geringe Mengen an Infrarotstrahlung (Wärmestrahlung) z. B. durch Pyro- oder PIR-Sensoren zu erfassen. Ein ausschließender Nachteil für das Zählen von Fängen liegt jedoch in der Trägheit dieser Systeme, die maximal ca. eine Messung je Sekunde zulassen und weder eine Art- noch eine Richtungserkennung des registrierten Insekts gewährleisten können. Der Ansatz wurde auch vor dem Hintergrund möglicherweise auftretender Mehrfachzählungen, der potenziellen Anwesenheit von Nichtzielorganismen und möglicher externer Störquellen für eine weitere Betrachtung nicht priorisiert und verworfen.

Weitere Ansätze zum Zählen der Fänge, die beispielsweise auf *mechanischen Verfahren* (Implementierung eines Drehkreuzes), dem Einsatz von *Kontaktelektroden*, auf *akustischen Verfahren*, mit denen anfliegende Zielspezies bereits im Flug an ihren Eigen- und ihren Flügelschlagfrequenzen zu erkennen wären, oder Verfahren zur Identifikation der Zielobjekte anhand einer *Massebestimmung durch Wägung* basieren, wurden in dieser Projektphase für die weiteren Betrachtungen aus verschiedenen Gründen ausgeschlossen oder ganz verworfen. Beispielhafte Ausschlusskriterien waren hohe konstruktive Aufwände (z. B. mechanisches Drehkreuz, Massebestimmung durch Wägung) und mangelnde Praktikabilität und Robustheit bzw. Störanfälligkeit (akustische Verfahren, Kontaktelektroden).

Energieversorgung

Zur Konkretisierung der Anforderungen an die Komponenten zur Energieversorgung der Falle wurden folgende, in der Übersicht möglicher Technologien vorgestellte Ansätze aus technischer und forstfachlicher Sicht evaluiert:

- Chemische Verfahren als Energiespeicher (Akkumulator),
- Photo-elektrische Erzeugung in Verbindung mit chemischer Speicherung (Solarzelle in Kombination mit einem Akkumulator),
- Mechanische Energieerzeugung durch Spannung, Druck, Gewichtskraft oder Wind.

Während die Nutzung von Spannungsenergie, Druck und Gewichtskraft bereits im ersten Schritt als nicht praktikabel verworfen wurde, wurde die Energieerzeugung durch die Nutzung von Windkraft als interessante Alternative näher betrachtet, da hier auf relativ kleinem Raum eine relativ hohe Energieausbeute erzielt werden könnte. Diese könnte zwar die Laufzeit des Pheromonfallensystems bis hin zur Autarkie verlängern, der Energieertrag ist jedoch nicht linear vorhersehbar. Die rotierenden Arme des Windrads können durch visuelle und akustische Signale aus forstlicher Sicht die Einsatzbedingungen der Falle deutlich ändern bzw. zu einer repellenten Wirkung auf Wildtiere führen. Zudem ist auf forstlichen Flächen in Bodennähe mit deutlich verminderten Windgeschwindigkeiten zu rechnen, sodass sich der Einsatz eines Windrades in der Regel erst in größerer Höhe rentieren würde. Diese Variante wurde daher als nicht praktikabel verworfen.

Der Einsatz eines Akkumulators (chemische Energiebereitstellung) wurde hingegen fest als Systembestandteil definiert, um die Versorgungssicherheit des Fallensystems im Überwachungszeitraum zu gewährleisten. Ausgehend von möglichen Risiken des Einsatzes von Akkumulatoren im Wald wurde die Anforderung formuliert, Brandgefahren durch Auswahl eines kostenintensiveren, nicht selbstentflammenden Akku-Typs (Lithium-Eisenphosphat-Akku) weitgehend auszuschließen.

Die Frage, ob und inwieweit eine geeignete Dimensionierung des Akkumulators erlaubt, einen kompletten Überwachungszeitraum abzudecken, konnte zum Zeitpunkt der Diskussion noch nicht abgeschätzt werden. Einflussgrößen auf die Laufzeiten haben die einzelnen Komponenten der Falle und deren individuelle Verbrauchswerte sowie die mittels Steuerung erreichbaren Betriebs- und Standby-Energiebedarfe. Für den Energiebedarf der Falle wurde grundlegend ermittelt, dass der Standby-Energiebedarf wesentlichen Einfluss auf die Laufzeit hat. Im Rahmen der Entwicklungen ist dieser demnach besonders zu beachten und zu reduzieren, da die Anforderung formuliert wurde, dass die Energieversorgung der Falle so zu dimensionieren ist, sodass eine autarke Versorgung der Falle über einen möglichst langen, im besten Fall kompletten Überwachungszeitraum gesichert ist.

Der Einsatz eines den Akkumulator ergänzenden Photovoltaik-Moduls ist geeignet, zu einer Reduktion der Anschaffungskosten und des verbauten Gewichts des Akkumulators beizutragen. Unter Idealbedingungen kann durch eine Solarfläche von 0,7 bis 1 m² etwa 100 Watt erzeugt werden. Bei Beschattung fällt die Energieausbeute, ein Ertrag von 30-40 % ist möglicherweise jedoch auch auf forstlichen Flächen realisierbar. Diese Option kann die Laufzeit der Falle sinnvoll bis hin zu einer autarken Energieversorgung steigern. Nachteile liegen in dem relativ hohen Platzbedarf, den Kosten und den unter Freilandbedingungen zu erwartenden Unsicherheiten hinsichtlich Verschmutzung und Manipulation durch Waldbesucher und / oder Wildtiere.

Datenübertragung und -speicherung

Wesentlicher Bestandteil einer digitalen Pheromonfalle sind Komponenten zur digitalen Erfassung, Speicherung und Übertragung von Fangdaten im Einsatzzeitraum (Überwachungszeiträume) sowie zur Steuerung der einzelnen Funktionen der Falle. Die Ermittlung entsprechender Technologien erfolgte im Zeitraum 2021-2022 zunächst nur konzeptionell.

Eine Auswahl entsprechender Komponenten zur Daten-(vor-)verarbeitung und zur mobilen Übertragung an zuständige Stellen zur Auswertung, die für die:

- in-situ zur Steuerung der Falle sowie zur
- Sammlung und Übertragung von Informationen zu den Fängen

erforderlich sind, wurde aufgrund einer Vielzahl von Abhängigkeiten, die zu den für andere Funktionen der Falle eingesetzten Komponenten bestehen, zu diesem Zeitpunkt noch nicht vorgenommen.

Marktüblich und -verfügbar sind für die Umsetzung dieser Funktionen zahlreiche Komponenten die geeignet sind, mit geeigneten Leistungsmerkmalen unterschiedlichste Anforderungen zu erfüllen. Diese (insbesondere technischen) Anforderungen konnten derzeit noch nicht abschließend formuliert werden und wurden auf einen späteren Zeitpunkt verschoben.

Grundlegend wurden für die Aufnahme in den Anforderungskatalog jedoch die:

- automatische Erfassung und Auswertung von Informationen zur Funktionsbereitschaft (wie z. B. Füllstände, Energie o. Pheromone) sowie
- die Registrierung und Übermittlung von Daten zum Zielobjekt (Anzahl, ggf. das Überschreiten von Warnschwellen)

als Erfordernis formuliert.

Ob und inwieweit Verfahren zur funkbasierten Datenübertragung und/oder der Austausch von Datenträgern letztlich geeignete Optionen für eine Weitergabe von mit der Falle ermittelten Fangzahlen sind, soll im Rahmen der weiteren Konzeption mit vorhandenen Rahmenbedingungen aus technischer und forstfachlicher Sicht weiter abgeglichen werden. Die konkrete Betrachtung dieser und weiterer Fragestellungen zur Auswahl von Komponenten zur Steuerung der Falle sowie zur Sammlung und Übertragung von Informationen zu den Fängen und die weitere Priorisierung von Anforderungen ist im weiteren Projektverlauf und nach Auswertung weiterer Tests zu erwarten.

Abtötung von Schadinsekten

Für den Einsatz eines „digitalen Fallensystems“ in der Praxis wurde der Wunsch formuliert, gefangene Zielorganismen nach Eintritt in die Falle zu erfassen und danach ohne den Einsatz selektiver Insektizide abzutöten. Ob und inwieweit hierzu eine technische Lösung erforderlich und Bestandteil der Konzeption von Automatisierungslösungen sein sollte, wurde im Berichtszeitraum beleuchtet. Grundlage bildete die Übersicht über konzeptionell aus technischer und forstfachlicher Sicht denkbare Ansätze.

Folgende Varianten wurden ermittelt und wie im Folgenden dargestellt bereits einer Erstbewertung unterzogen.

Abtöten mit Öl

Bei Verzicht auf selektive Insektizide stellt der Einsatz von Speiseöl zur Abtötung eingefangener Organismen ein gängiges Verfahren in der forstlichen Praxis dar. Vorteile sind dabei in der Konservierung der Falter, der Minimierung des Verwesungsgeruchs, der problemlosen Handhabung und in dem geringen Kostenfaktor zu sehen. Der wesentliche Nachteil des Einsatzes von Öl als Fangflüssigkeit besteht in der Erschwerung artspezifischer Erfolgskontrollen, da in Öl gelagerte Organismen nach kurzer Zeit verkleben und eine Zählung oder Bestimmung der Organismen kaum möglich ist, ohne die Tiere zu beschädigen.

Abtöten mit Monoethylenglykol

Als Alternative zu Öl wird im Versuchswesen häufig auf Monoethylenglykol zurückgegriffen. Die Verwendung dieser Substanz als Fangflüssigkeit bietet den Vorteil einer längeren Standzeit und ermöglicht die Durchführung von Erfolgskontrollen der Fänge. Als nachteilig sind die höheren Anschaffungskosten und die Handhabung der als Gefahrenstoff klassifizierten Flüssigkeit zu nennen.

Elektrische Verfahren

Der Einsatz von Strom mittels Kontaktelektroden oder eines Gitternetzes wurde evaluiert und stellt aus biologischer Sicht eine Alternative zur Nutzung von Insektiziden dar. In der praktischen Anwendung sind mit einer derartigen Anordnung jedoch wesentliche konstruktive Hemmnisse verbunden. Eine Modellrechnung hat zudem ergeben, dass der erforderliche Energiebedarf als deutlich zu hoch einzuordnen ist. Die Variante wurde in erster Instanz im Jahr 2021 daher als nicht praktikabel verworfen. Im Berichtszeitraum 2022 wurde der Ansatz des elektrischen Abtötens der Zielorganismen nochmals aufgegriffen, um grundsätzlich zu prüfen, inwieweit elektrische Verfahren bei Faltern, die einen geringen Feuchtigkeitsgehalt haben, anwendbar wären. Die mittels verschiedener Arten elektrischer „Fliegenklatschen“ durchgeführten Versuche zeigten im Ergebnis jedoch, dass der Ansatz einer elektrischen Abtötung der Zielorganismen für weitere Umsetzungen in einer digitalen Falle weiterhin verworfen werden muss. Grundlegende Überlegungen hinsichtlich einer experimentellen Prüfung des Einsatzes von Elektrizität zur Abtötung forstschädlicher Schmetterlinge sind in AP 2 im Kapitel ‚Technische Konzeptentwicklung‘ festgehalten. Die durchgeführten Versuche wurden als Teil

des AP 4 im Kapitel ‚Konzeption von Testumgebungen‘ beschrieben, die daraus abgeleiteten Erkenntnisse sind im Teilkapitel Ergebnisse des Laborversuchs „Abtötung mit Strom“ (AP5) dargestellt.

Einsatz Klebefalle

Die Variante des Abtötens mittels einer Klebefalle könnte ebenfalls ohne Insektizideinsatz auskommen und stellt eine marktgängige und einfache Lösung dar. Aufgrund des zu erwartenden hohen Falteraufkommens einzelner Spezies wurde diese Lösung jedoch bereits als nicht praktikabel eingeschätzt und verworfen.

Abtötung durch Laserstrahlung

In der Landwirtschaft stellt die Schädlingsbekämpfung in Vorratsbehältern mittels Laser- oder Mikrowellenstrahlung einen technischen Lösungsansatz dar, welcher in der jüngeren Vergangenheit von der Laborreife bis zur Praxisreife weiterentwickelt wurde. Dabei kommen selektive Erkennungsalgorithmen mittels Kameratechnik zum Einsatz. Eine erste Modellrechnung zur Evaluierung des hierbei anfallenden Energiebedarfs ergab jedoch, dass dieser Lösungsansatz bei einer Stromversorgung mittels Akku-Technologie nicht darstellbar ist. Dabei wurden die Implementierung aufwendiger Kameratechnik sowie der dabei auflaufende Energiebedarf in der Betrachtung noch nicht berücksichtigt. Die Variante wird daher als nicht praktikabel verworfen.

Im Berichtszeitraum 2022 wurde der Ansatz des Abtötens der Zielorganismen mittels Laser ebenfalls nochmals aufgegriffen, um grundsätzlich zu prüfen, inwieweit dieses Verfahren auch ohne Kameratechnik anwendbar wäre. Die durchgeführten Versuche zeigten im Ergebnis jedoch, dass der Ansatz einer laserbasierten Abtötung der Zielorganismen für weitere Umsetzungen in einer digitalen Falle weiterhin verworfen werden muss. Nähere Ausführungen zu den Versuchen und Erkenntnissen finden sich im Abschnitt zu AP 3 – Entwicklung von Versuchsmustern.

Mechanische Verfahren

Die Implementierung mechanischer Verfahren zur Abtötung eingefangener Organismen stellt grundsätzlich eine realisierbare Alternative zur Abtötung mittels Strom, Laser oder Fangflüssigkeiten bzw. Bioziden dar. In der technischen Umsetzung könnten dabei beispielsweise verschiedene Arten von Vorrichtungen zum Zerquetschen oder Zerdrücken der Zielorganismen in Frage kommen.

- Neben Ansätzen für Fallenkomponenten, die Vorrichtungen für ein Abtöten der Zielorganismen mittels rotierender Klingen, wurden auch Ansätze entwickelt und vorgestellt, die verschiedene Walzen in Betracht zogen. Die entsprechenden konzeptionellen Ansätze werden in Abschnitt zu AP 2 weiter ausgeführt.

Deutliche Nachteile ergeben sich bei diesen Ansätzen jedoch einerseits dadurch, dass sich bewegende Zielorganismen durch eine entsprechende Vorrichtung nur schwer zu erfassen sind. Potenzielle Schwierigkeiten ergeben sich auch daraus, dass es zu Verletzungen der Tiere kommen kann, ohne sie vollständig abzutöten oder Verklemmungen der Schneidmechanismen z. B. durch abgetrennte Flügelteile zu erwarten sind.

Im Zuge der im Verlauf des Berichtszeitraums 2023 weitergeführten Diskussion der potenziellen Ansätze für eine Fallenkomponente zum direkten Abtöten der Zielspezies nach dem Detektieren, zeigte sich in Abstimmungen mit Praktikern, dass eine Abtötung der Zielorganismen nicht zwingend direkt im Anschluss an den Fang bzw. die Detektion erfolgen muss. Aus forstpraktischer Sicht sei es vielmehr nur erforderlich, die Falle in regelmäßigen Abständen zu leeren und dabei sicherzustellen, dass keine lebenden Zielorganismen die Falle wieder verlassen. Die Zielorganismen verharren nach dem Einflug in der Falle und sammeln sich nach dem Verenden im unteren Teil der Falle. Im Ergebnis wurde festgestellt, dass ein Verfahren, welches die sich am Boden der Falle sammelnden Falter in regelmäßigen Abständen durch einen entsprechenden Mechanismus aus der Falle befördert und dabei gegebenenfalls noch final abtötet, potenziell den geforderten Zweck erfüllen kann.

Für den weiteren Projektverlauf wurde daher festgelegt, nicht mehr von einer Komponente zum Abtöten der Zielorganismen zu sprechen, sondern von einer *Komponente zum Leeren der Falle im laufenden Betrieb*.

Erste konzeptionelle Ansätze hierzu werden ebenfalls in Abschnitt zu AP 2 weiter ausgeführt.

Priorisierung der Zielstellungen mit Fokus auf Falter-Schädling

Die für das Projekt definierten Anforderungen hinsichtlich des Funktionsumfangs der zu entwickelnden Fallenlösung wurden anhand der vorgenannten Arbeiten weiter präzisiert und im Hinblick auf die Entwicklung der Komponenten und des späteren Gesamtsystems priorisiert (Anforderungskatalog).

Im Rahmen des Projektvorhabens zur Entwicklung einer modular aufgebauten und autonom einsetzbaren Pheromonfalle sollen folgende Zielsetzungen erfüllt werden:

- Verbesserung der Überwachungsergebnisse von forstlichen Schaderregern durch technische Lösungen,
- Erreichen einer höheren Datenqualität bei niedrigeren Kosten im Vergleich zu konventionellen Pheromonfallen,
- zeitnahe Datenbereitstellung.

Sekundäre Ziele bestehen in der Entwicklung eines praxistauglichen Fallensystems zur Erhaltung produktiver Wälder, der Sicherung der Holzbereitstellung und der Einsparung von CO₂-Emissionen.

Die konkretisierten und priorisierten Anforderungen, die in dieser Projektphase entstanden, werden im Folgenden als Anforderungskatalog der Version 1 (Stand 2021) zusammengefasst. Einzelne Anforderungen wurden den Kategorien „Sollte“- bzw. „Muss“-Kriterium zugeordnet. Diese Einteilung wurde gewählt, um hinsichtlich der Bearbeitung der formulierten Anforderungen einerseits Schwerpunkte hinsichtlich prioritärer Anforderungen zu setzen („Muss-Kriterien“) und andererseits Anforderungen, welche aufgrund konstruktiver, biologischer, technischer oder finanzieller Hemmnisse innerhalb des Projektvorhabens nicht oder nicht vollkommen erfüllt werden können („Sollte-Kriterien“), dennoch soweit wie möglich zu erfüllen. Auch Anforderungen, deren technische Details zum Zeitpunkt der Erstellung des Anforderungskatalogs der Version 1 waren, werden als „Sollte-Kriterien“ geführt.

Anforderungen an die Pheromonabgabe zum Locken der Schädlinge

- gezielt und steuerbar (Muss-Kriterium),
- ausreichende Pheromon-Abgabemengen im Zeitverlauf (Muss-Kriterium),
- Überdosierung der Abgabemengen sollte möglichst ausgeschlossen werden (Muss-Kriterium),
- Einsatz marktgängiger Köder und Ködergrößen (Sollte-Kriterium),
- Hohe Toleranz der technischen Bauteile in Bezug auf die Witterung (Sollte-Kriterium),
- Verwendung von möglichst einfachen und widerstandsfähigen Bauteilen bzw. technischen Lösungen (Sollte-Kriterium).

Anforderungen an das Zählen der Fänge mittels Sensorik

- Zuverlässige Ermittlung von Fangzahlen (Muss-Kriterium),
- Hohe Toleranz der technischen Bauteile in Bezug auf die Witterung (Sollte-Kriterium),
- Verwendung von möglichst einfachen und widerstandsfähigen Bauteilen bzw. technischen Lösungen (Sollte-Kriterium),
- Minimierung von Mehrfachzählungen durch mehrfaches Auslösen des Zählimpulses durch dasselbe Individuum (Muss-Kriterium).

Energieversorgung der Falle

- Gewährleistung einer möglichst autarken Energieversorgung der Falle über einen kompletten Überwachungszeitraum (Sollte-Kriterium).

Fangen und Abtöten der Schädlinge

- Abtötung der Zielorganismen ohne den Einsatz selektiver Insektizide (Muss-Kriterium),
- Vermeidung von Abflattern und Verwesungsgeruch (Sollte-Kriterium),
- Vermeidung von Beifängen (Sollte-Kriterium).

Erfassen und Speichern der Fangzahlen sowie (mobile) Übertragung der Daten

- Gewährleistung von Praxistauglichkeit und Praktikabilität (Sollte-Kriterium),
- Hohe Toleranz der technischen Bauteile in Bezug auf die Witterung (Sollte-Kriterium),
- Ausreichende Rechenkapazität, energiesparender Betrieb, dezentraler Zugriff (Sollte-Kriterium),
- Ausreichende Speicherkapazität für eine Saison (Sollte-Kriterium),
- Plausibilisierung der erfassten Funktionsdaten (Sollte-Kriterium).

Die Anforderungen an das Gesamtsystem wurden wie folgt konkretisiert und priorisiert:

- **Kostenrahmen**
Die Kosten des vollständigen und funktionstüchtigen Versuchsmusters sind zu minimieren. Optionen zur Kostenanpassung in der Praxis sind durch Vorschläge zur modularen Gestaltung vorzuschlagen.
- **Robustheit, Lebensdauer, Befestigungssicherheit**
Das Fallensystem sollte robust ausgeführt sein, über eine Nutzungsdauer von mehr als einer Fangsaison zuverlässig eingesetzt und im Freiland sicher befestigt werden können.
- **Wartungsfreie Laufzeit**
Das Fallensystem sollte über einen adäquaten Zeitraum wartungsfrei im Freiland verbleiben können.

- *Handhabung*
Datenübernahme, Bedienung und Wartung sollten einfach und möglichst durch eine Person durchführbar sein.
- *Robustheit*
Das Fallensystem und seine Komponenten sollten eine hohe Toleranz in Bezug auf die Witterung, Sonneneinstrahlung und externe Einflüsse aufweisen.

Weiteren Aspekten, die im Rahmen der Wunschvorstellungen an ein digitales Fallensystem formuliert wurden, wie Ausschluss von Störfaktoren wie Diebstahl / Vandalismus, Vermeidung der Frequentierung durch Fraßfeinde und der Erreichbarkeit für Säugetiere kann i. W. nur durch Vorgaben für den Praxiseinsatz und geeignete Handhabungsvorgaben Rechnung getragen werden. Die Auswahl des Fallenstandorts bzw. der Fallenstandorte bedingt zudem weitere externe Einflussfaktoren wie die Witterung (Temperatur, Wind, Luftfeuchte), den umgebenden Bestand, die (potenzielle) Lockstoffdispersion und die Befestigungsart und –höhe oder beispielsweise auch die erreichbare Netzabdeckung zur mobilen Übertragung von Fangzahlen. Mit Vorgaben zur Handhabung, dem Arbeitsprozess sowie zur Standortwahl sollte daher eine Minimierung externer Effekte angestrebt werden.

Mit der Formulierung der vorgenannten priorisierten Anforderungen und deren Klassifizierung in Muss- und Sollte-Anforderungen wurden die zu Projektbeginn ermittelten Wunschvorstellungen an die digitale Falle anhand und unter Abgleich wissenschaftlicher, technischer und forstpraktischer Erkenntnisse auf einem Niveau realistischer Vorgaben konkretisiert.

Mit dieser Anforderungsübersicht, die in iterativen Schritten weiterentwickelt wurde, wurde der Meilenstein M1 „Priorisierter Anforderungskatalog“ erreicht. Dieser bildete die fachliche Grundlage weiterer Entwicklungsschritte.

Im Projektjahr 2022 wurden die Arbeiten zur Priorisierung der Zielstellungen mit Fokus auf den Falter-Schädling weitergeführt. Aufbauend auf dem Anforderungskatalog der Version 1 erfolgten Überarbeitungen der Anforderungen anhand der Erkenntnisse mit ersten technischen Versuchsmustern. Im Ergebnis mehrerer modulspezifischer Iterationen wurden Erkenntnisse im Rahmen des Meilensteins M2 „Angepasster Anforderungskatalog“ zusammengefasst. Die Anforderungen wurden hier im Anforderungskatalog der Version 2 wie folgt definiert und priorisiert.

Anforderungen an die Pheromonabgabe zum Locken der Schädlinge

- gezielt und steuerbar (Muss-Kriterium),
- ausreichende Pheromon-Abgabemengen im Zeitverlauf (Muss-Kriterium),
- Überdosierung der Abgabemengen sollte möglichst ausgeschlossen werden (Sollte-Kriterium),
- Einsatz marktgängiger Köder und Ködergrößen (Sollte-Kriterium),
- Hohe Toleranz der technischen Bauteile in Bezug auf die Witterung (Sollte-Kriterium),
- Verwendung von möglichst einfachen und widerstandsfähigen Bauteilen bzw. technischen Lösungen (Sollte-Kriterium).

Anforderungen an das Zählen der Fänge mittels Sensorik

- Zuverlässige Ermittlung von Fangzahlen (Muss-Kriterium),
- Hohe Toleranz der technischen Bauteile in Bezug auf die Witterung (Sollte-Kriterium),
- Verwendung von möglichst einfachen und widerstandsfähigen Bauteilen bzw. technischen Lösungen (Sollte-Kriterium),
- Minimierung von Mehrfachzählungen durch mehrfaches Auslösen des Zählimpulses durch dasselbe Individuum (Muss-Kriterium).

Energieversorgung der Falle

- Gewährleistung einer möglichst autarken Energieversorgung der Falle über einen kompletten Überwachungszeitraum (Sollte-Kriterium).

Fangen und Abtöten der Schädlinge

- Abtötung der Zielorganismen ohne den Einsatz selektiver Insektizide (Sollte-Kriterium),
- Vermeidung von Abflattern und Verwesungsgeruch (Sollte-Kriterium),
- Vermeidung der Zählung von Beifängen (Sollte-Kriterium).

Erfassen und Speichern der Fangzahlen sowie (mobile) Übertragung der Daten

- Gewährleistung von Praxistauglichkeit und Praktikabilität (Sollte-Kriterium),
- Hohe Toleranz der technischen Bauteile in Bezug auf die Witterung (Sollte-Kriterium),
- Ausreichende Rechenkapazität, energiesparender Betrieb, dezentraler Zugriff (Sollte-Kriterium),
- Ausreichende Speicherkapazität für eine Saison (Sollte-Kriterium),

- Plausibilisierung der erfassten Funktionsdaten (Sollte-Kriterium).

Die Anforderungen an das Gesamtsystem wurden wie folgt konkretisiert und priorisiert:

- **Kostenrahmen**
Die Kosten des vollständigen und funktionstüchtigen Versuchsmusters sind zu minimieren. Optionen zur Kostenanpassung in der Praxis sind durch Vorschläge zur modularen Gestaltung vorzuschlagen.
- **Robustheit, Lebensdauer, Befestigungssicherheit**
Das Fallensystem sollte robust ausgeführt sein, über eine Nutzungsdauer von mehr als einer Fangsaison zuverlässig eingesetzt und im Freiland sicher befestigt werden können.
- **Wartungsfreie Laufzeit**
Das Fallensystem sollte über einen adäquaten Zeitraum wartungsfrei im Freiland verbleiben können.
- **Handhabung**
Datenübernahme, Bedienung und Wartung sollten einfach und möglichst durch eine Person durchführbar sein.
- **Robustheit**
Das Fallensystem und seine Komponenten sollten eine hohe Toleranz in Bezug auf die Witterung, Sonneneinstrahlung und externe Einflüsse aufweisen.

Die parallel zu diesen vorbereitenden Tätigkeiten durchgeführten konzeptionellen Arbeiten und Tests zeigten, dass der Anforderungskatalog in zwei Iterationen nicht final abgeschlossen werden kann und fortlaufend weitere Überarbeitungen, Anpassungen und Tests notwendig sind, um die Anforderungen zu konkretisieren.

Beispielhaft für diesen Prozess waren die Entwicklungsarbeiten im Jahr 2022/2023, die auf die Umsetzung der Anforderung einer steuerbaren Flüssigpheromonabgabe mittels Mikropumpe sowie die Überarbeitung eines Mechanismus zur automatisierten Zählung der Zielorganismen ausgerichtet waren. Zeitgleich erfolgte eine Überarbeitung der Ansätze zur Energieversorgung, digitalen Datenerfassung und des Moduls zum automatischen Wechsel von Feststoffködern. Hierbei wurde im Hinblick auf die formulierten Anforderungen bezüglich der Flüssigpheromonabgabe sowohl seitens der NW-FVA durch die Erarbeitung chemischer und biologischer Grundlagen als auch seitens des Fraunhofer IFF hinsichtlich der technischen Umsetzung dieser Komponente ein erheblicher Mehraufwand für die Umsetzung im Rahmen des Projektes deutlich. So standen beide Projektpartner wiederholt vor der Herausforderung, vorhandene personelle und materielle Kapazitäten für die Realisierung der gewünschten Anforderungen aufzuteilen.

Die (zwischenzeitliche) Priorisierung des Aufbaus von Versuchsmustern zur Umsetzung der Funktionen einer definierten Pheromonabgabe und zur automatischen Abtötung hatte zur Folge, dass weitergehende Modulanpassungen wie bspw. ein Feststoffköderwechsel-Mechanismus mit Blistersystem oder erste Ansätze zur Demonstration einer Datenfernübertragungslösung nicht umgesetzt werden konnten.

Vor dem Hintergrund dieser Erfahrungen wurde für den Projektzeitraum 2024 die **Funktion des automatisierten Zählmechanismus als Kernfunktion für Entwicklung und Test** bis zum Projektende vor allen weiteren Fallenmodulen definiert und priorisiert.

Definition von Anwendungsszenarien

Die Definition von Anwendungsszenarien steht in einem engen Zusammenhang mit der konkreten Versuchsplanung und der dafür erforderlichen Bereitstellung von Versuchstieren, welche einerseits im Rahmen einer geplanten Falterzucht oder im Freiland für Tests und Versuche verfügbar sein müssen.

Folgende Schmetterlingsspezies stehen zur Durchführung von Versuchen zur Auswahl (vgl. Kap. 1.2):

- Forleule (*Panolis flammea*),
- Schwammspinner (*Lymantria dispar*),
- Kieferspinner (*Dendrolimus pini*),
- Nonne (*Lymantria monacha*),
- Kleiner Frostspanner (*Operophtera brumata*),
- Weißgrauer Breitflügelspanner (*Agriopis leucophaeria*).

Im Berichtszeitraum 2022 wurden die bereits zu Projektbeginn festgelegten Modellarten um zwei in den Wintermonaten aktive Spezies erweitert; den kleinen Frostspanner und die Weißgrauen Breitflügelspanner.

Grundlegende Fragen zur Definition von Anwendungsszenarien wurden anhand der artspezifischen Flugzeiten / Überwachungszeiträume ausgewählter Schadfalter beantwortet (vgl. Abbildung 6 und 7). Dabei ist zunächst festzuhalten, dass diese Flugzeiten im Laufe der Vegetationsperiode die Versuchszeiträume einschränken. Forschungsgegenstände der geplanten Freilandversuche liegen in:

- der Evaluierung einer kontinuierlichen und gleichmäßigen Pheromonabgabe im Tagesverlauf sowie über die gesamte Überwachungsperiode,

- der Prüfung der Funktionsfähigkeit des eingesetzten Steuerungssystems zur gezielten Pheromonabgabe unter Praxisbedingungen,
- der Funktionsprüfung und Evaluierung des eingesetzten digitalen Zählsystems zur Bestimmung der Anzahl der eingefangenen Falter,
- dem Abgleich von Fangzahlen des Versuchsmusters im Vergleich zu der konventionellen Variotrap-Trichterfalle,
- der Prüfung der Zuverlässigkeit des Fallensystems hinsichtlich einer Vermeidung des Entweichens bereits eingefangener Individuen,
- der Freilassung von Zuchtorganismen im Rahmen von Wiedercang-Versuchen (Mark-Recapture),
- der zuverlässigen digitalen Erfassung und Speicherung der Fangdaten und
- der Prüfung der Funktionsfähigkeit des Systems beim gleichzeitigen Einsatz unterschiedlicher Kombinationen verschiedener Fallenmodule.

Anhand entsprechender Literaturhinweise und aufgrund von Versuchserfahrungen am LWF erfordert ein entsprechender Versuchsteil eine Organismenanzahl von mindestens 1.000 männlichen Faltern. Es ist darauf hinzuweisen, dass bei derartigen Versuchsanordnungen immer mit mehreren externen Effekten wie beispielsweise Wind, Vogelfraß, der Anwesenheit von Naturpopulationen und auch einer gewissen Unsicherheit hinsichtlich des Verhaltens der Zuchttiere einhergeht. Die Anzucht von Faltern der Spezies Schwammspinner wird von der NW-FVA ab dem Berichtszeitraum I / 2022 begonnen.

Im Berichtsjahr 2022 wurden 2 Zuchtdurchläufe durchgeführt (März-Juni und Oktober-Dezember). Ein dritter Zuchtdurchlauf wurde im November begonnen. Die Winterzuchten dienen der Bereitstellung zusätzlicher Versuchstiere während des Winterhalbjahres sowie der Gewinnung weiterer Erfahrungswerte im Umgang mit den Zuchtorganismen.

Diskutiert wurde zudem die Frage der Vermeidung möglicher Störeffekte wie Vandalismus oder Diebstahl bei Freilandversuchen. Es sollte eine Kennzeichnung des Aufbaus als wissenschaftlicher Versuch erfolgen, zusätzlich kann der Aufbau / die Apparatur, jedoch ohne dabei die Funktion zu beeinträchtigen, entsprechend getarnt werden. Abbildung 7 zeigt die farblich gekennzeichneten Flugzeiten der ausgewählten Modellspezies für die Vegetationsperioden der Jahre 2022, 2023 und 2024, welche für die Durchführung von Freilandversuchen in Frage kommen. Das Projekt begann regulär am 1. April 2021 und sollte ursprünglich am 30. Juni 2024 enden. Die Laufzeit wurde jedoch durch zwei kostenneutrale Verlängerungen angepasst. Zunächst um sechs Monate bis zum 31. Dezember 2024. Anschließend wurde das Teilvorhaben 1 - FKZ 2220WK38A4 - um weitere drei Monate bis zum 31. März 2025 verlängert. Somit wurden die innerhalb der Projektlaufzeit verfügbaren Versuchszeiträume verlängert (vgl. Abbildung 6 und Abbildung 7).

	Projektlaufzeit																																			
	2022																		2023												2024					
	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17	18	19	20	21	22	23	24	25	26	27	28	29	30	31	32	33	34	35	36						
Flugzeiten	Jan	Feb	Mar	Apr	Mai	Jun	Jul	Aug	Sep	Okt	Nov	Dez	Jan	Feb	Mar	Apr	Mai	Jun	Jul	Aug	Sep	Okt	Nov	Dez	Jan	Feb	Mar	Apr	Mai	Jun						
Forleule																																				
Schwammspinner																																				
Nonne																																				
Kiefernspinner																																				
Kleiner Frostspanner																																				
Breitflügelspanner																																				

Abbildung 6: Innerhalb der ursprünglichen Projektlaufzeit verfügbare Versuchszeiträume im Freiland für die Schmetterlingsarten Forleule, Schwammspinner, Nonne, Kiefernspinner, Kleiner Frostspanner und Breitflügelspanner

	Projektlaufzeit																																												
	2022												2023												2024												2025								
	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17	18	19	20	21	22	23	24	25	26	27	28	29	30	31	32	33	34	35	36	37	38	39	40	41	42	43	44	45						
Flugzeiten	Jan	Feb	Mar	Apr	Mai	Jun	Jul	Aug	Sep	Okt	Nov	Dez	Jan	Feb	Mar	Apr	Mai	Jun	Jul	Aug	Sep	Okt	Nov	Dez	Jan	Feb	Mar	Apr	Mai	Jun	Jul	Aug	Sep	Okt	Nov	Dez	Jan	Feb	Mar						
Forleule																																													
Schwammspinner																																													
Nonne																																													
Kiefernspinner																																													
Kleiner Frostspanner																																													
Breitflügelspanner																																													

Abbildung 7: Innerhalb der erweiterten Projektlaufzeit verfügbare Versuchszeiträume im Freiland für die Schmetterlingsarten Forleule, Schwammspinner, Nonne, Kiefernspinner, Kleiner Frostspanner und Breitflügelspanner

Die Bereitstellung von Versuchstieren des Schwammspinners ist in den Räumlichkeiten der NW-FVA in Göttingen realisiert worden. Für kleinere Tastversuche wurden ebenfalls Versuchstiere aus der an der NW-FVA etablierten Zucht des Kiefernspinners eingesetzt.

Zur Durchführung der Feldversuche wurden handelsübliche und an der NW-FVA eigens hergestellte Pheromonköder eingesetzt. Die NW-FVA hat diese über mehrere Jahre auf ihre Pheromonbeladung und Pheromonabgaberraten untersuchen lassen. Während für alle genannten Spezies Pheromonköder bereitstehen, liegen artspezifische Pheromone in Reinform ausschließlich für die Spezies Forleule, Nonne und Schwammspinner vor (vgl. Tabelle 1).

Tabelle 1: Überwachungszeiträume im Freiland und Verfügbarkeit von Versuchstieren sowie zum Versuchszeitpunkt am Markt verfügbare, artspezifische Pheromone und Pheromonköder

Spezies	Überwachungszeitraum	Zucht/Versuchstiere	Pheromon vorhanden	Pheromonköder vorhanden
Forleule	01.03. - 31.05.	-	✓	✓
Nonne	01.07. - 31.08.	-	✓	✓
Schwammspinner	01.07. - 31.08.	Planung: 1000 Falter (Juni 23)	✓	✓
Kiefernspinner	01.07. - 31.08.	Dauerhaft ca. 5 Falter/Woche	✗	✓
Kl. Frostspanner	15.10. - 15.12.	-	✗	✓
Weißgrauer Breitflügelspanner	10.02. - 30.03.	-	✗	✓

Die Zielstellung des Zuchtvorhabens liegt darin, einerseits zuverlässig und planbar Versuchstiere für Labor- und Feldversuche bereitzustellen und darüber hinaus spezifische Verhaltensbeobachtungen, welche im Freiland nicht oder nicht wiederholbar durchführbar sind, darzustellen. Die Wahl des Zuchtorganismus ist dabei auf die Spezies Schwammspinner gefallen. In der praktischen Durchführung sind folgende Aspekte besonders zu berücksichtigen:

- Falter des Schwammspinners, welche durchgehend an Kunstfutter gezüchtet wurden, reagieren nicht mehr ausreichend auf Pheromonquellen. Als Lösung bietet sich die Anzucht auf Naturfutter mindestens ab dem 2. / 3. Larvenstadium an.
- Die Larvalentwicklung dieser Spezies ist unter Laborbedingungen gut synchronisierbar. Dies stellt eine wichtige Voraussetzung der Bereitstellung einer bestimmten Anzahl von Versuchstieren zu einem bestimmten Zeitpunkt dar.

Die Zucht wird unter Laborbedingungen in Plexiglaszylindern durchgeführt. Dabei wird die Anzucht aus Eigelegen in Petrischalen mit Kunstfutter umgesetzt, ab dem 2. / 3. Larvenstadium werden die Organismen dann mit Naturfutter (Weißdorn) ernährt. Zuchtdurchläufe außerhalb der Vegetationsperiode werden mit Kunstfutter ernährt und durch die Zugabe von getrocknetem Naturfutter ergänzt. Die Larven werden vom 2. bis zum 4. Larvenstadium in Plexiglaszylindern mit einem Durchmesser von 20 cm und einer Höhe von 30 cm und im 5. / 6. Larvenstadium in Polypropylen-Zylindern mit einem Durchmesser von 30 cm und einer Höhe von 50 cm gehalten. Die Zuchtmethodik für die Spezies Schwammspinner wurde in Kooperation mit den assoziierten Projektpartnern des LWF Bayern und der Universität für Bodenkultur Wien entwickelt. Die in den frühen Larvenstadien eingesetzte Kunstnahrung wurde nach einer 1966 entwickelten Methodik von O'Dell & Rollinson (Technique for rearing the gypsy moth, *Porthetria dispar* on an artificial diet) bereitgestellt.

Überarbeitung und Anpassung des Anforderungskatalogs in Abhängigkeit von Erkenntnissen aus anderen AP

Der Meilenstein M1 „Priorisierter Anforderungskatalog“ wurde im Projektjahr 2021 erreicht. Dieser bildete die fachliche Grundlage der weiteren Entwicklungsschritte. Überarbeitungen der ersten technischen Versuchsmuster in Form weiterer modulspezifischer Iterationen wurden dokumentiert und stellen einen „angepassten Anforderungskatalog“ (Meilenstein M2) dar. Die Arbeiten des Projektjahres 2022 haben jedoch gezeigt, dass die Entwicklungen mit zwei Iterationen zur Überarbeitung der Anforderungen nicht abgeschlossen werden können und auch im weiteren Bearbeitungsverlauf zusätzliche Anpassungen der technischen Versuchsmuster notwendig waren. Aufbauend auf den im Jahr 2022 gesammelten Praxiserfahrungen wurden einzelne Anforderungen konkretisiert oder aus technischen und anwendungspraktischen Erwägungen heraus ausgeschlossen werden. Im Verlauf der Entwicklungsarbeiten 2023 ergab sich die Notwendigkeit weiterer technischer Überarbeitungen einzelner Komponenten sowie daran anschließender Anpassungen und Tests im Rahmen von Labor- und Feldversuchen, um die Anforderungen im „Priorisierten Anforderungskatalog“ zu konkretisieren.

AP 2 – Konzeptentwicklung, Priorisierung von Umsetzungsvarianten und Komponentenauswahl sowie Versuchsplanung

Technische Konzeptentwicklung

Die Entwicklung technischer Umsetzungsvarianten basiert auf den in AP 1 „Anforderungsanalyse für automatisierte Fangsysteme“ dargestellten Anforderungen an das Gesamtsystem „digitale Pheromonfalle“ sowie deren Komponenten.

Nachdem wesentliche Anforderungen vorgestellt und diskutiert wurden, erarbeitete das Fraunhofer IFF zunächst konkrete Lösungsvorschläge für die eingangs wichtigsten Fallenfunktionen der Pheromonabgabe, der Sensorik zum Zählen der Fänge sowie für die Energieversorgung. Diese Konzepte wurden dem Verbundpartner NW-FVA im Rahmen gemeinsamer Online- und Präsenztermine vorgestellt. Gemeinsam wurden die Konzepte analysiert und hinsichtlich ihrer Eignung unter Freilandbedingungen sowie hinsichtlich offener Fragestellungen, die in ersten Komponententests zu untersuchen waren, mit den gestellten Anforderungen abgeglichen.

Ausgewählte Vorschläge der technischen Ausgestaltung der genannten Komponenten wurden in Abstimmung mit der NW-FVA zunächst theoretisch evaluiert und dann weiter konkretisiert und spezifiziert. Vor dem technischen Entwurf wurden offene Fragen in Abstimmungen beider Projektpartner ermittelt, unter Abwägung technischer und forstfachlicher Belange diskutiert und, sofern ohne Feldversuche zu beantworten, geklärt. Wichtige Fragestellungen wurden in Fragekatalogen fortlaufend dokumentiert, so dass relevante Festlegungen im weiteren Projektverlauf rekapitulierbar bleiben.

Nachdem im Projektjahr 2022 erste Konzepte in einer ersten Umsetzungsvariante bereits im Freiland getestet wurden, verfeinerte das Fraunhofer IFF die wichtigsten Fallenfunktionen der Pheromonabgabe, der Sensorik zum Zählen der Fänge sowie der Energieversorgung.

Im Projektverlauf wurden so zeitlich parallel zu Arbeiten zur technischen Konzeption die Komponenten durch den Aufbau von Funktions- und Testmustern erprobt und getestet. Dieser iterative Ansatz, bei dem bestehende Ansätze durch den Rücklauf von Erkenntnissen aus den Tests überarbeitet und konkretisiert wurden, entspricht dem klassischen Vorgehen bei entsprechenden Entwicklungsvorhaben. Parallel zu den Überarbeitungen bereits erstellter Konzeptionen wurde die Erarbeitung weiterer technischer Umsetzungsvarianten für weitere Fallenmodule fortgesetzt und das Gesamtkonzept einer digitalen Falle um neue Ansätze ergänzt. So wurden in weiteren Schritten neben den o. g. Kernfunktionen u. a. der Funktionen des Datenabrufs bzw. der Datenübertragung durch die Einbindung einer USB-Schnittstelle sowie eines Softwaretools zur Steuerung aller wesentlichen Fallenfunktionen vorangetrieben.

Im Folgenden werden die zugrundeliegenden Konzepte der Funktionsmuster, die im Rahmen des Projektes unter Labor- und Freilandbedingungen eingesetzt wurden, vorgestellt.

Pheromonabgabe

Als Umsetzungsvarianten wurden folgende technische Ansätze für den Aufbau von Funktionsmustern der Einzelkomponente „Pheromonabgabe“ priorisiert:

- Mikropumpe mit Pheromon-Lösungsmittel-Gemisch,
- Zeitlich versetzte mechanische Abgabe konventioneller Feststoff-Pheromonköder (automatisierter Köderwechselmechanismus).

Hintergrund dieser Festlegung ist, dass einerseits das Funktionsprinzip der unregelmäßigen Verdunstung (Mikropumpe) sowie andererseits die Abgabe pheromonbeladener Feststoffköder gute Grundlagen zur Erarbeitung technischer Lösungen bieten. Aufgrund der Komplexität der technischen Umsetzung feinsten Abgabemengen eines Pheromons, ist die Nutzung etablierter Pheromonköder zu bevorzugen. Einerseits liegen hier bereits über längere Zeitreihen durchgeführte Analysedaten vor, andererseits sind diese etablierten Köder jederzeit in großer Anzahl verfügbar und es liegen i. d. R. klare Versuchsergebnisse bzgl. der erreichten Lockwirkungen vor.

Der Lösungsansatz der Mikropumpe (siehe Abbildung 8) bietet folgende Vorteile:

- Das System erschien zunächst günstig in der Beschaffung (ca. 36 €) und in hohen Stückzahlen erhältlich. Gegen Ende des Berichtszeitraums 2022 wurde jedoch deutlich, dass zum Betrieb der Pumpe weiterhin für jedes System jeweils ein Pumpentreiber benötigt wird, der den Einzelpreis für ein Pumpensystem auf 120 € steigerte.
- Die Pumpe ist selbstansaugend, weist einen geringen Energiebedarf, eine geringe Größe (30 x 15 x 4 mm³) und ein geringes Gewicht (ca. 2 g) auf.

- Das Bauteil ist in einem Aluminiumgehäuse eingehaust (verkapselt) und kann gasdicht betrieben werden. Der Vorratsbehälter (Fluidreservoir) besteht aus Metall und ist wiederbefüllbar.
- Das Trägermedium, auf dem eine pheromonhaltige Flüssigkeit aufgebracht wird, ist frei wählbar.
- Ein Druckausgleichskanal aus Messing zur Kompensation thermischer und barometrischer Schwankungen ist im Pumpsystem integriert.
- Es können kleinste Abgabemengen im Bereich < 1 Mikroliter realisiert werden.
- Die Ansteuerung ist über einen Einplantinen-Mikrocomputer möglich.
- Abgabezyklen und -mengen können stufenlos dosiert werden. Das System kann bei Bedarf dynamisch geregelt werden (Umweltsteuerung).



Abbildung 8: Bartels mikrotechnik Pumpe mp6 mit Entwicklungsboard

Pheromonabgabe mittels Mikropumpe

Im technischen Entwurf wurde für Versuchsaufbauten für den Test einer entsprechenden Lösung die Adaption eines Pheromonabgabe-Mechanismus mit Mikropumpe auf der konventionellen Variotrap-Trichterfalle vorgeschlagen. Dadurch verbleiben die Abmessungen der Fallengeometrie des Falleneingangs, des Fallentrichters und des Fangbehälters unverändert und die Funktionalität des etablierten Fallensystems in Bezug auf das Verhalten angelockter Zielorganismen bleibt erhalten (siehe Abbildung 9).

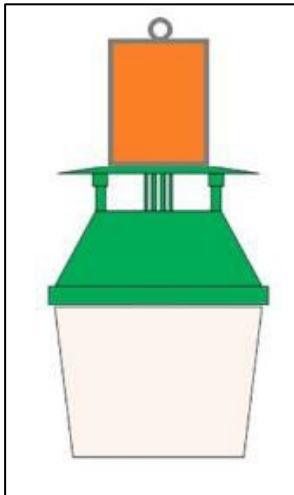


Abbildung 9: Entwurf einer Versuchsanordnung zur Pheromonabgabe

In dem drucklos betriebenen System soll das zur Beladung konventioneller Pheromonköder verwendete Lösungsmittel-Pheromon-Gemisch Verwendung finden. Hierzu ist vorgesehen, die pheromonhaltige Flüssigkeit auf ein Trägermedium aufzubringen. Als Lösungsmittel wird, in Anlehnung an bestehende Erfahrungen, n-Hexan favorisiert. Um Ausgasungen und das Eindringen des flüssigen Gemischs in die Matrixstruktur innenliegender Bauteile der Mikropumpe auszuschließen, müssen alle Teilkomponenten, welche mit dem pheromonhaltigen Lösungsmittel in Kontakt kommen, aus inerten Materialien bestehen (Metall, Glas, beschichtete Kunststoffe).

Die erforderliche Gesamtmenge des Lösungsmittel-Pheromon-Gemischs wurde abgeschätzt und im ersten Versuchsmuster wird die Kapazität des Fluidreservoirs auf 60 ml festgelegt. Die Auswahl der Abgabezyklen und -mengen soll zunächst stöchiometrisch berechnet und in ersten Versuchsanordnungen evaluiert werden. Möglich werden damit Funktionsversuche unter Laborbedingungen unter Abzug, die im nächsten Schritt durch Pheromon-Lockversuche unter Freilandbedingungen ergänzt, mit der Lockwirkung konventioneller

Pheromonköder verglichen und je nach Bedarf / Zielsetzung in einem letzten Untersuchungsteil durch eine GC- / MS-Analyse der abgegebenen Pheromon-Stoffmengen evaluiert werden könnten.

Eine technische Umsetzung der Pheromonabgabe mit Mikropumpe wurde im Jahr 2023 umgesetzt. Hierzu musste im Vorfeld ein geeignetes Lösungsmittel gefunden werden, welches ein geringeres Abdampfverhalten aufweist und zudem die verwendeten Komponenten nicht in ihrer Funktion beeinflusst oder gar zerstört. Diese Anforderung auf technische Verträglichkeit bestand sowohl für die eingesetzte Mikropumpe als auch für das erforderliche, im Ausbringungsbereich eingesetzte, leakagefreie Rückschlagventil. Die Ermittlung des Lösungsmittels sowie die entsprechenden Versuche zum Test der Lösungen wurden gemeinsam durch die Partner NW-FVA und IFF durchgeführt.

Pheromonabgabe mittels eines automatisierten Köderwechselmechanismus

Als zweiter technischer Lösungsansatz zur Darstellung der gewünschten Spezifikationen eines Pheromonabgabe-Mechanismus werden Standardköder in Kombination mit einem automatisierten Köderwechselmechanismus eingesetzt. Dabei wird, wie in Abbildung 9 dargestellt, auf der Pheromonfalle ein Magazin mit bis zu 5 Pheromonködern installiert. Dieses System bietet in Abhängigkeit von der maximalen Köderanzahl frei wählbare Ausgabeintervalle der eingesetzten Pheromonköder. Im Berichtszeitraum 2022 wurden mehrere Iterationen und zwei Varianten (manuell / automatisch) dieses technischen Lösungsansatzes im Freiland umgesetzt. In der ersten Version (März-Mai) wurden die Köder händisch (manuell) nach Ablauf von vier Wochen gewechselt. Im weiteren Verlauf wurde dieser erste Entwurf weiterentwickelt, wobei insbesondere die zuverlässige Funktion sowie die Dichtigkeit des Revolvermagazins im Vordergrund standen. Im Zeitraum Juli bis September wurde eine verbesserte Variante des Systems mit manuellem Köderwechsel im Freiland getestet und mit einfach beköderten Standardfallen verglichen. Gleichzeitig wurden erste Funktionsmuster der zweiten Variante des Pheromonabgabemoduls mit einfach beköderten Standardfallen verglichen. In der zweiten Variante erfolgte der Köderwechsel bereits automatisch mittels eines elektrisch betriebenen Schneckenantriebs. Generell liegen die Vorteile eines Köderwechsels in folgenden Aspekten:

- Die zeitliche Veränderung der Pheromonabgabemengen durch Entladung / Alterung der pheromonhaltigen Matrix soll durch das Nachlegen neuer Köder vollautomatisch kompensiert werden.
- Der Einsatz verschiedener Ködersymmetrien ist möglich. Es können sowohl konventionelle, marktgängige Pheromonköder, als auch neuartige bzw. experimentelle Köder oder Köder mit einer separaten Ummantelung (Aluminiumfolie) verwendet werden.
- Das System kann gasdicht gefertigt und durch ein Klappensystem ergänzt werden.
- Die Pheromonköder werden in einem Sammelkorb aufgefangen. Ein Wechsel der Köder innerhalb des Überwachungszeitraumes ist nicht notwendig.
- Das System weist einen geringen Energiebedarf auf.

Der Pheromonabgabe-Mechanismus wird oberhalb des bestehenden Variotrap-Trichterfallengehäuses angebracht (vgl. Abbildung 10).



Abbildung 10: Versuchsanordnung zur Pheromonabgabe: Automatischer Köderwechsel-Mechanismus (links), Manueller Köderwechsel-Mechanismus (rechts)

Im Projektjahr 2023 wurde die Konzeption für den mechanischen Köderwechselmechanismus fortgesetzt, wobei Erkenntnisse aus den Feldversuchen in die Überarbeitung und Verfeinerung der Konzepte einfließen.

Eine wesentliche Anpassung bestand darin, die Steuerung der Köderabgabe abzuändern, wobei die zeitgesteuerte Positionierung der abzugebenden Köder durch eine lagegesteuerte Positionsermittlung ersetzt wurde. Diese Änderung trug erkannten Störungen und Fehlern bei der Erprobung im Feldeinsatz Rechnung.

Daneben wurden konstruktive Anpassungen vorgenommen, um beispielsweise die Handhabung beim Befüllen der Pheromonködermagazine zu verbessern. Die Integration der Steuerung für die Pheromonabgabe in die zentrale Platine der neuen Fallengeneration im Jahr 2023 erlaubte zudem eine deutliche Verkleinerung der Komponenten und wurde mit einem neuen Design umgesetzt. Eine weitere Modifikation bestand in Änderungen der Befestigung der Falle. Diese wird im Ergebnis nicht mehr am Deckel des Pheromonabgabegerätes befestigt. Hintergrund und Notwendigkeit waren wiederum Erkenntnisse aus den durchgeführten Freilandversuchen, bei denen die verwendeten Kunststoffe unerwünschte Verformungen zeigten, welche auch auf die Funktion des Pheromonköderwechsels negative Auswirkungen hatte.

Pheromonabgabe mittels Blistersystem

Als dritter technischer Lösungsansatz zur Darstellung der gewünschten Spezifikationen eines Pheromonabgabe-Mechanismus wird ein ‚Blister‘ bzw. Tablettensystem ausgewählt. Dieses System soll in Abhängigkeit von der maximalen Köderanzahl frei wählbare Ausgabeintervalle der eingesetzten Pheromonköder bieten. Die Vorteile dieser Umsetzungsvariante sind:

- Die zeitliche Veränderung der Pheromonabgabemengen durch Entladung / Alterung der pheromonhaltigen Matrix soll durch das Nachlegen neuer Köder vollautomatisch kompensiert werden.
- Der Einsatz verschiedener Ködersymmetrien ist möglich. Es können sowohl konventionelle, marktgängige Pheromonköder, als auch neuartige bzw. experimentelle Köder oder Köder mit einer separaten Ummantelung (Aluminiumfolie) verwendet werden.
- Das System kann gasdicht gefertigt werden.
- Die Pheromonköder werden in einem Sammelkorb aufgefangen. Ein Wechsel der Köder innerhalb des Überwachungszeitraumes ist nicht notwendig.
- Das System weist einen geringen Energiebedarf auf.

Tests dieses Systems im Jahr 2022 zeigten, dass die verwendeten Köder eine störende Klebrigkeit aufwiesen und diese blieben gelegentlich beim Herausdrücken aus dem Blisterreservoir an selbigem haften. Köder, welche sich nicht vollständig von der Verpackung lösen, können in einem späteren automatischen Wechselmechanismus zur Blockade des Wechselmechanismus führen und somit zum Ausfall der Pheromonabgabe. Ein weiteres Problem stellte der hohe erforderliche Kraftbedarf dar, um die Köder aus dem Blister zu pressen. Dies kann technisch zwar gelöst werden, erhöht aber den erforderlichen mechanischen und aktorischen Aufwand eines solchen Aufbaus. Die Tests erfolgten ausschließlich mit reinen Aluminiumfolienblister, da diese durch einen simplen Ausdrückmechanismus durchstoßen werden können. Die gegenwärtigen Feststoffköder werden momentan standardmäßig in Kunststofffolien mit Metallbeschichtung eingeschweißt. Der Einsatz eines solchen Kunststofffolienblisters mit Metallbeschichtung kann mit diesem simplen stoßelbasierten Mechanismus nicht durchstoßen werden. Hierfür sind Stößel erforderlich, die eine umlaufende Klinge enthalten, um die Folie zu durchstechen. Perspektivisch müssten zu diesem Ansatz weitere Betrachtungen vorgenommen werden, die Erkenntnisse dazu bringen, ob auf Basis dieser bestehenden Blisterverpackungen eine robuste und simple, gleichzeitig jedoch energiebedarfsreduzierte Mechanik entworfen werden kann, um bestehende Konservierungsmethoden der Köder beizubehalten. Alternativ könnten die Entwicklung neuer Blistermaterialien oder Ködereinhausungen einen neuen Entwicklungsansatz darstellen.

Ziel ist die Implementierung des Blistersystems, ebenfalls oberhalb des bestehenden Variotrap-Trichterfallengehäuses (vgl. Abbildung 11).



Abbildung 11: Entwurf einer Versuchsanordnung zur Pheromonabgabe mittels Blistersystem (beispielhafte Darstellung)

Im Vorfeld der konstruktiven Ausgestaltung, d. h. des Baus der ersten Funktionsmuster sowie der Versuchs- und Umsetzungsplanung der Pheromonabgabe waren in Zusammenarbeit der Projektpartner folgende Fragestellungen zu bearbeiten:

- Auswahl der zu verwendenden Köder (Lockwirkung, Größe, Geometrie, Marktverfügbarkeit),
- Festlegung von Nachlegezyklen,
- Auswahl eines geeigneten Lösungsmittel-Pheromon-Gemischs für Versuche mit der Mikropumpe,
- Auswahl eines geeigneten Trägermediums für Versuche mit der Mikropumpe.

Die Klärung erfolgte unter Berücksichtigung der Zielspezies für die Versuche und in gemeinsamer Abwägung technischer, physikalischer, chemischer und biologischer Wechselwirkungen. Die Ergebnisse und die daraus resultierenden Umsetzungen in der Phase des Aufbaus und der Tests der Versuchsmuster sind den Ausführungen zu den Ergebnissen in AP 3 zu entnehmen.

Sensorik und Algorithmen zum Detektieren/Zählen von Fängen

Wesentliche Auswahlkriterien der technischen Ansätze zum Aufbau von Funktionsmustern der Einzelkomponenten für die Zählsensorik ergaben sich aus Erfahrungswerten bzgl. der Leistungsfähigkeit und Anwendungsmöglichkeit der Komponenten (z. B. Lichtsensor, Feldsensor), speziellen Anforderungen, die sich aus den spezifischen biologischen und morphologischen Eigenschaften der Zielspezies ableiteten, externen Umweltfaktoren sowie der Handhabung und der geforderten Systemautarkie. Weitere konkrete Anforderungen ergaben sich aus dem Energiebedarf, der Wiederverwendbarkeit und Nachfüllbarkeit, aus Reinheitsanforderungen, Materialanforderungen und dem störungsfreien Betrieb.

Entwürfe in Vorbereitung des Aufbaus konkreter Funktionsmuster und Versuchsanordnungen für die Sensorik zum Zählen von Fängen sahen wiederum die Nutzung des bewährten Gehäuses der Variotrap-Trichterfalle vor.

Das Fallengehäuse wurde exakt vermessen, um insbesondere die kritischen Maße des Falleneingangs sowie des trichterförmigen Mittelteils in die zu entwickelnden Versuchsmuster zu übernehmen. Die Falle ist auf die Flügelspannweiten der häufigsten Schadschmetterlinge ausgelegt, der Öffnungsdurchmesser des Fallentrichters beträgt 32 mm und wird für die Überwachung größerer Schmetterlinge, wie beispielsweise des Kiefernspinners individuell erweitert. Diese Vorgehensweise schließt eine Veränderung der Pheromonabgabe und der Fangwirkung durch konstruktive Änderungen der Fallengeometrie weitgehend aus. Abbildung 12 stellt die geplante Versuchsanordnung schematisch dar.

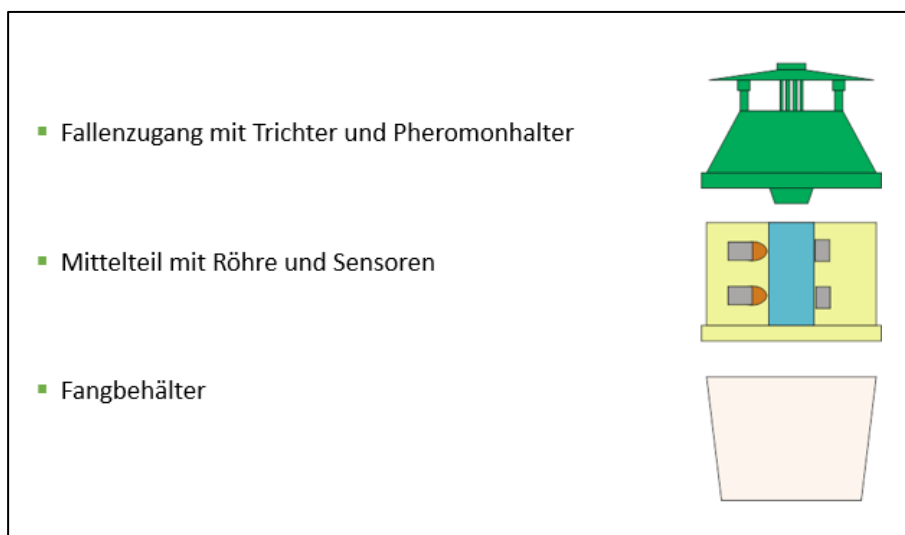


Abbildung 12: Schematische Darstellung der Versuchsanordnung Zählsensorik

Das Mittelteil mit Röhre (ca. 42 mm Durchmesser) dient zum Durchleiten der Fänge in den Fangbehälter sowie zur Positionierung der Sensorik (Lichtschranken), welche die Anwesenheit von Faltern und ihre Bewegungsrichtung erkennen lassen sollen. Das Erfordernis der Röhre ergibt sich daraus, dass einerseits zur Richtungserkennung eine Anordnung mehrerer Sensoren nacheinander erforderlich und andererseits für das Triggern und Aufwecken der Zählordnung ein Vorlauf notwendig ist.

Für die geplante Versuchsdurchführung wurden folgende Zielstellungen festgelegt:

- Die Erprobung und Optimierung einer Sensoranordnung zum Detektieren von Einflügen auf Grundlage der Variotrap-Trichterfalle mit einem konventionellen Pheromonköder.
- Die Erprobung und Optimierung von Sensoranordnungen zur Erkennung der Flug- / Bewegungsrichtung und eines Größenmerkmals der angelockten Falter.
- Die Ermittlung erforderlicher Aufweckzeiten bei der Verwendung von Energiesparmodi (Sleep Mode) unter Einsatz eines Trigger-sensors mit einer gewissen Vorlaufzeit, dessen Signal die Zählsensorik aktivieren soll.
- Die Erprobung und Optimierung von Algorithmen die aus den Sensorevents die Menge der angelockten Falter inkl. Berücksichtigung der Flugrichtung bestimmen.
- Das Beobachten und Aufzeichnen der Falle / des Fallenzugangs mit Videotechnik zur Untersuchung des Verhaltens der Tiere vor dem Eintritt in die Falle, zum Abschätzen des Verhältnisses von Anflügen zu Fängen und zur Fehlererkennung der Sensorart und -anordnung.

Die konstruktive Umsetzung eines Sensorikmoduls zwischen Falleneingang und Fangbehälter ist in Abbildung 13 dargestellt. Das Zwischenmodul besteht aus einer handelsüblichen undurchsichtigen PVC-Röhre, die Verbindungselemente basieren auf dem bewährten Stecksystem der Ursprungs konstruktion und sind zusätzlich durch eine Schelle gesichert. Nicht marktgängige Systemteile sollen mittels 3D-Drucker angefertigt werden.

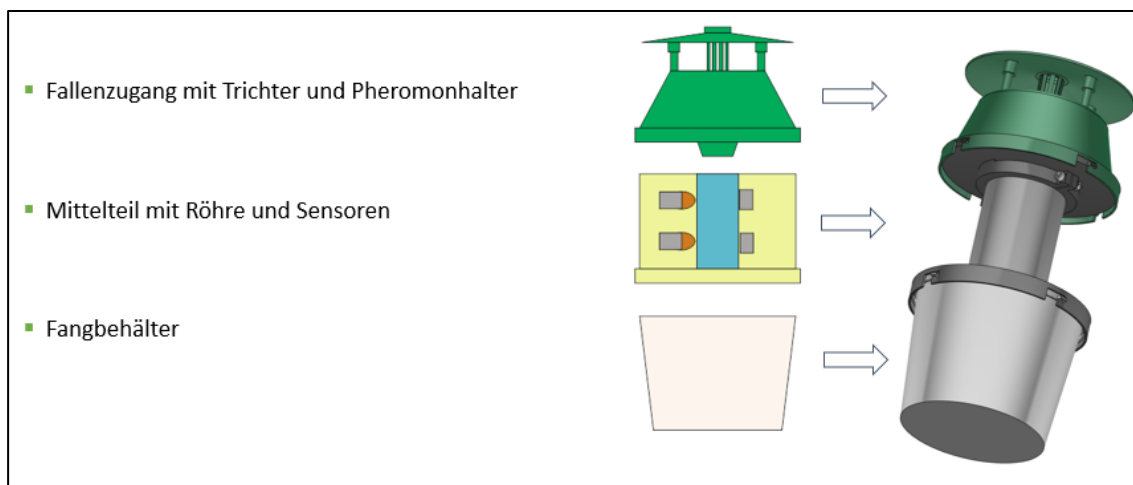


Abbildung 13: Konstruktive Anordnung der Sensorik als Zwischenmodul der Variotrap-Trichterfalle

Im Rahmen einer ersten Versuchsanordnung für die Sensorik zum Detektieren der Fänge soll die Frage des Energieverbrauchs zunächst unberücksichtigt bleiben. Die favorisierte Anordnung mehrerer Sensoren

hintereinander bietet den Vorteil das System wenig fehleranfällig zu halten, eine mögliche Hinderniswirkung der Sensoren zwischen Falleneingang und Fallentrichter ist zu prüfen. Optional kann im Rahmen dieses Versuchsaufbaus zunächst auf das Auffangen der Fänge mittels Fangbehälter verzichtet werden, da die Untersuchung der korrekten Erfassung anfliegender und in die Falle eintretender Falter im ersten Schritt im Fokus steht. Bei der Verwendung von Versuchstieren könnten weitere Vorteile in der Verwendung eines größeren Auffangkäfigs liegen. Hier ist zu prüfen, ob bereits detektierte Zielorganismen erneut für weitere Versuche Verwendung finden können, des Weiteren könnte bei einer solchen Versuchsanordnung die Abtötung und das Abflattern der Fänge vermieden werden. Damit ließe sich die Nutzungseffektivität von Zuchttieren erhöhen. Vor diesen Überlegungen ist jedoch dringend zu vermeiden, dass bereits gezählte Fänge die Sensorik durch erneutes Anfliegen von unten stören und so die erfassten Falteranzahlen verfälschen. Eine Lockwirkung des Pheromonköders in Richtung Trichterausgang ist in diesem Zusammenhang ebenso zu vermeiden.

Die konstruktive und elektrotechnische Umsetzung der Einzelkomponente Sensorik in mehreren Funktionsmustern zum Zählen der Fänge wurde in einer Reihe von Praxistests untersucht, wobei fortlaufende Anpassungen und Weiterentwicklungen zwischen den einzelnen Versuchsreihen und -zeiträumen vorgenommen wurden. Die Konzeption und Vorbereitung dieser Versuche übernahm die NW-FVA.

Abbildung 14 illustriert beispielhaft das Versuchskonzept für das Versuchsmuster mit Zählmechanismus aus einem der ersten Versuche im Jahr 2022. Hier wurde das Aufstellen von drei Hexagons (6 Fallensysteme im Umkreis von ca. 100m) geplant. In jedem Hexagon wird ein aktives automatisches Zählmodul (Trap 1-3) aufgestellt. Eines der Module sollte zusätzlich eine Kamera (Trap 1) erhalten, um das Anfliegen und das Verhalten der Falter vor dem Eintreten der Falter in die Falle zu untersuchen.

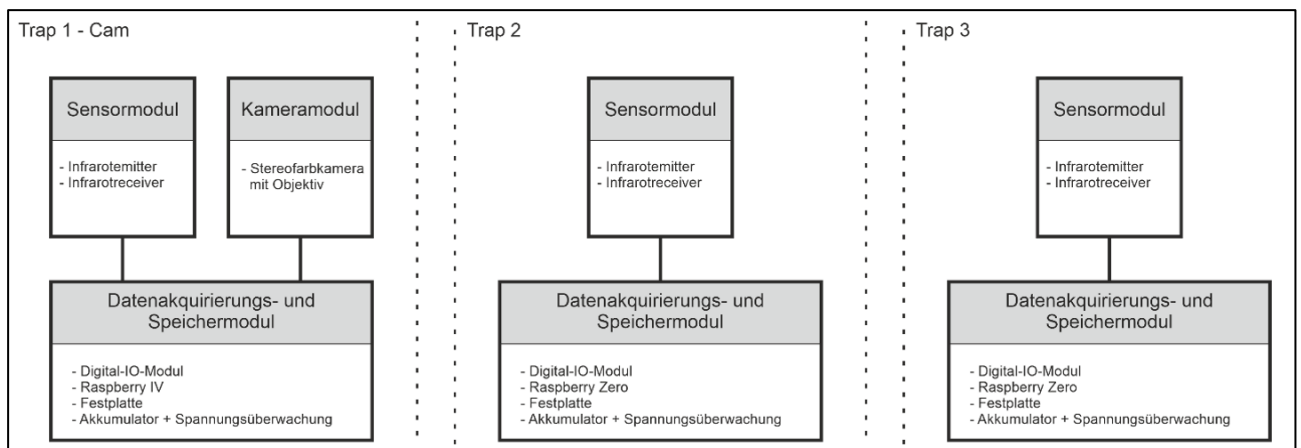


Abbildung 14: Versuchskonzept für das Zählmodul im Jahr 2022

Sensormodul

Als sensorisches Element für den Mittelteil des Fallensystems wurden Infrarotdioden als Emitter und Infrarotreceiver ausgewählt. Die infrarote Strahlung wird hierbei in den diskreten Frequenzbereichen 30 kHz, 38 kHz und 56 kHz ausgegeben und vom Receiver in ein digitales Signal gewandelt (logisch null = Unterbrechung des Infrarotkanals). In jeder der beiden Ebenen des aktiven Zählmoduls wurde eine Lichtschranke aus jeweils drei Infrarotdioden- und Receiver-Pärchen konzipiert (vgl. Abbildung 14). Zur Aufnahme der Elektronikkomponenten sind mehrere Platinen geplant, auf denen auch die Spannungsversorgung und Ansteuerung der Infrarotdioden untergebracht werden sollen. Abbildung 15 zeigt den vollständigen Aufbau, inkl. der 3D-gedruckten Platinenhalterungen.

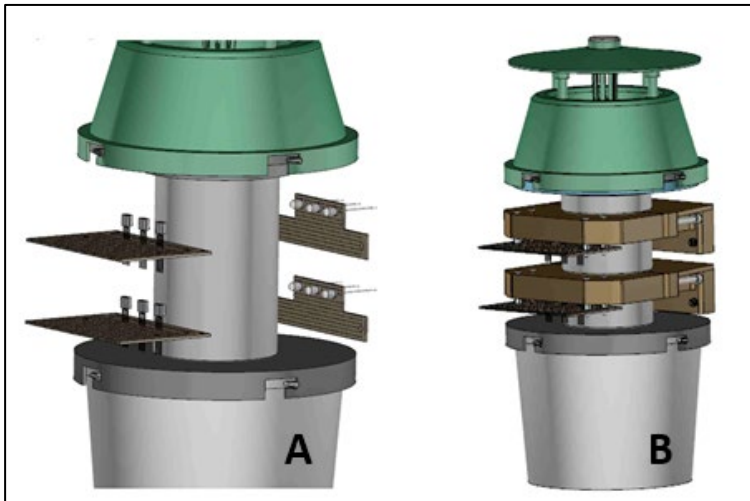


Abbildung 15: Anordnung Emitter und Receiver (A), Sensorzählmodul (B)

Kameramodul

Um einen zügigen Versuchsaufbau zu gewährleisten, wurde eine Kamera ausgewählt, für die die Bibliotheken zur Ansteuerung und Speicherung seitens des Raspberry bereits einsetzbar vorlagen. Das eingesetzte Modell Alvium 1800 ist eine industrielle USB-Kamera von Allied Vision mit einer maximalen Auflösung von 3,2 MP und einer maximalen Erfassungsrate von 40 Hz (vgl. Abbildung 16).



Abbildung 16: Alvium 1800 (Allied Vision)

Datenakquirierungs- und Speichermodul

Das Modul für die Erfassung und Archivierung der Zählimpulse wurde ebenfalls basierend auf Standardkomponenten konzipiert. Zur Detektion der Impulse der Sensoreinheit sollen sogenannte Industrial Digital-IO-Bricklets und ein master-Brick der Firma Tinkerforge eingesetzt werden. Für jeweils eine Zählebene, bestehend aus je drei Dioden und Receivern wird ein Bricklet benötigt. Für die Speicherung der Triggerevents ist der interne Speicher des verwendeten Raspberry ausreichend. Die Kamerabilder sollen auf einer handelsüblichen SSD-Kamera mit einem Speicher von 1 TB abgelegt werden. Der Master-Brick, die Festplatte und die Kamera wurden direkt über das USB-Interface mit dem Raspberry verbunden.

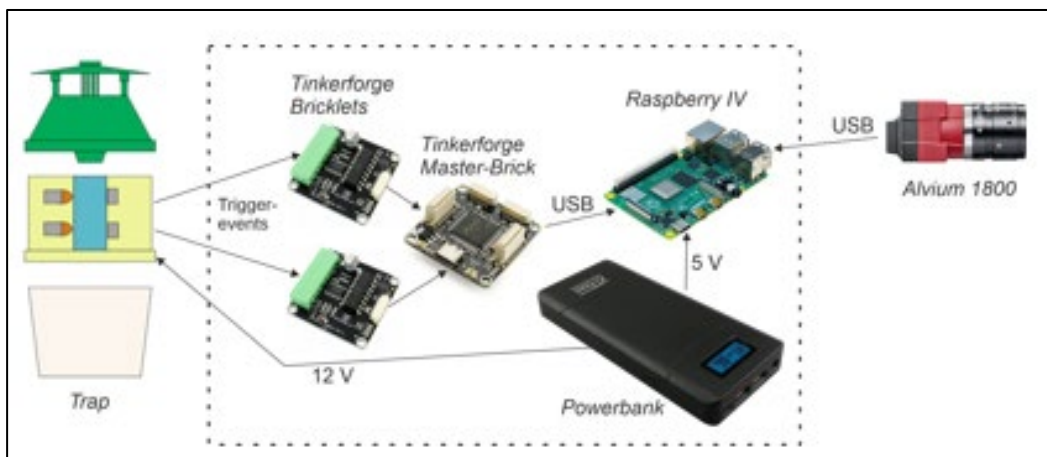


Abbildung 17: Systemkonzept für Datenakquirierungs- und Speichermodul

Der Stromverbrauch für die verschiedenen Zählfallen wurde wie folgt anhand von Datenblättern geschätzt:

- Zählfalle mit Kamera und USB-Festplatte 600 mA bei 5 V = 3,00 W.
- Zählfalle ohne Kamera und internem Speicher 160 mA bei 5 V = 0,80 W.

Für eine Laufzeit von 5 Tagen und einer Nachtabstaltung der Hauptkomponenten (ca. 10h Laufzeit) werden somit folgende Akkukapazitäten benötigt:

- Zählfalle mit Kamera und USB-Festplatte 150 Wh.
- Zählfalle ohne Kamera und internem Speicher 40 Wh.

Für die ersten Versuchsreihen für die Zählfallen mit Kamera wurde vorgesehen, 6 Stück eines Motorrad-Lithium-Akkumulators mit einer Kapazität von 24 Wh zusammenzuschalten. Die Zählfalle ohne Kamera soll über eine Powerbank mit 40 Wh gespeist werden.

Die Idee zur Erweiterung des bisherigen Konzepts der 2-Ebenenfalle auf eine 3-Ebenenfalle basiert auf der Annahme, dass die Richtungserkennung eines Falterdurchflugs, und damit die eindeutige Zählung verbessert wird, wenn eine dritte Ebene zur Validierung hinzugefügt wird.

Die Ebenen 2 und 3 werden beim Auslösen der Lichtschrankenebene 1, durch die Mikrocontrollereinheit aktiviert und sind dann beide nach max. 5ms mit validen Ausgangssignalen verfügbar.

Die Abbildung 18 zeigt das Verhalten des Lichtschrankenausgangs nach dem Einschalten der Versorgungsspannung im Falle einer freien Lichtschrankenebene. Die Versorgungsspannung ist auf dem Kanal 2 aufgezeichnet und das Ausgangssignal der Lichtschrankenebene stellt den Kanal 1 dar. Direkt nach dem Einschalten folgt der Ausgang der Lichtschranke dem Anstieg der Versorgungsspannung, um dann nach circa 2 ms wieder auf Low zu fallen und dort zu verbleiben.

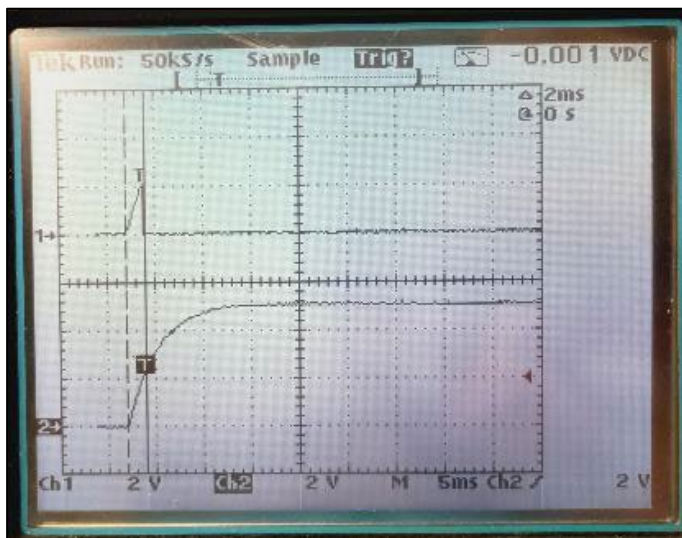


Abbildung 18: Einschaltzeit und -verhalten Lichtschrankenebene nach Versorgungsspannungsaktivierung (Lichtschranke frei)

Im Falle der belegten Lichtschrankenebene hingegen (Abbildung 19) folgt der Ausgang der Lichtschranke kontinuierlich dem Anstieg der Versorgungsspannung bis zum Maximalpegel von 5 Volt der nach circa 10 Millisekunden erreicht ist. Wird als Entscheidungsschwelle die Hälfte der Betriebsspannung, ob die Lichtschranke „Frei“ oder „Belegt“ ist, zu Grunde gelegt, sind 5 ms eine zweckmäßig abzuwartende Zeit, um sicher zu sein, dass die Lichtschranke nach dem Einschalten valide Daten liefert.

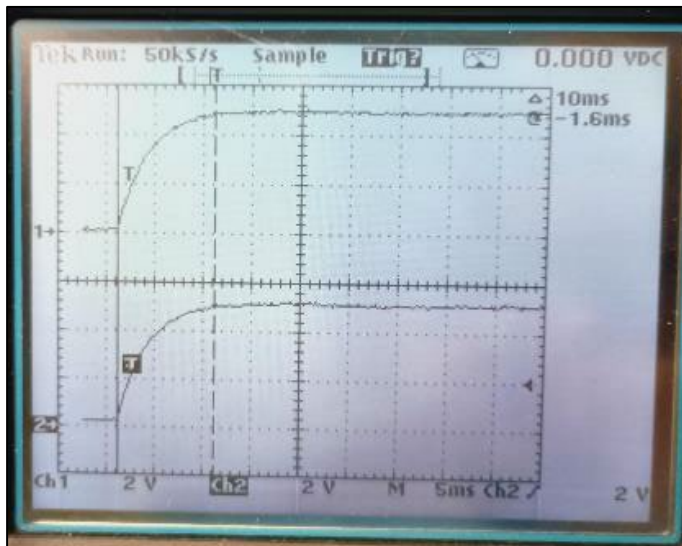


Abbildung 19: Einschaltzeit und -verhalten Lichtschrankenebene nach Versorgungsspannungsaktivierung (Lichtschranke belegt)

Energieversorgung

Aus den dargestellten, technisch möglichen Varianten der Energieversorgung wird die Einbindung eines bedarfsgerecht dimensionierten Akkumulators als obligatorisch bewertet. In Verbindung mit den im „Priorisierten Anforderungskatalog“ im Bereich Energieversorgung formulierten Zielkriterien ergibt sich als Untersuchungsziel die Frage nach der Einbindung eines zusätzlichen Energiewandlers. Im Rahmen der Projektarbeit wurde der Einsatz von Photovoltaik-Technologie zur dezentralen Stromerzeugung favorisiert. Zur anwendungsbezogenen Bewertung der Fragestellungen zur Energieversorgung der Falle im Freiland wurden zunächst Modellrechnungen mit den bereits bekannten Verbrauchern des „digitalen Fallensystems“ durchgeführt, um möglichst realistische Werte der zu erwartenden Akkulaufzeiten mit und ohne zusätzlichen Energieerzeuger zu ermitteln. Ziel dieser Untersuchungen war es, im Zuge der technischen Konzeption offene Fragestellungen zu ermitteln, die bereits in der ersten Phase der Versuche einzelner Fallenkomponenten potenziell beantwortet werden können.

In Bezug auf die dabei zugrunde gelegten Annahmen wurde der Gesamtenergiebedarf relativ großzügig bzw. pessimistisch angesetzt. Im Ergebnis zeigt sich, dass die Implementierung eines Standby-Triggers für das Fallensystem als ideale Lösung zur Reduktion des Energiebedarfs erscheint. Ein Vergleich der zu erwartenden Energiebedarfe durch Volllast-Ereignisse in einem Betriebszeitraum von 8-12 Wochen mit der durch im Standby-Modus befindliche Energieverbraucher benötigten Energiemenge, ergibt einen Anteil der Standby-Energie von mindestens ca. 80 % des zu erwartenden Gesamtenergiebedarfs (vgl. Abbildung 20). Volllast-Ereignisse bezeichnen in diesem Zusammenhang den Anflug von Zielorganismen.

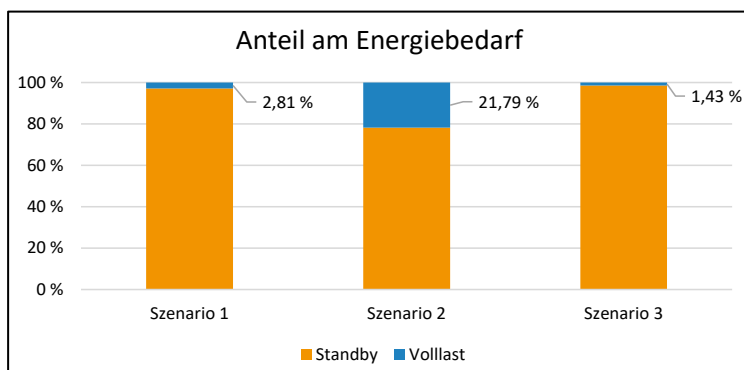


Abbildung 20: Anteile von Standby und Volllast am Gesamtenergiebedarf

Der Betrachtung des Energiebedarfs wurden dabei drei Szenarien zu Grunde gelegt, in denen die Auswirkungen höherer Energiebedarfe im Volllast-Bereich (Szenario 2) und höherer Standby-Verbräuche (Szenario 3) mit einem realistischen Grundszenario (Szenario 1) verglichen werden (vgl. Abbildung 21).

	Szenario 1	Szenario 2	Szenario 3
Charakteristik	leicht pessimistisch	stark pessimistisch hinsichtlich des Volllast-verbrauchs	stark pessimistisch hinsichtlich des Standby-verbrauchs
Standby-Verbrauch	0,5 W	0,5 W	1 W
Verbrauch Volllast	25 W	50 W	25 W
Häufigkeit Volllast pro Tag	10	24	10
Dauer der Volllast pro Aktion	5 Sek	10 Sek	5 Sek

Abbildung 21: Szenarien zur Darstellung der Verhältnisse zwischen Standby- und Volllastbetrieb

Die Frage, ob und ab welcher Grenze sich der Einsatz einer photovoltaikbasierten Energieerzeugung hinsichtlich der benötigten Betriebszeiten lohnt, ist somit abhängig vom Gesamtenergiebedarf, welcher sich in den benötigten Standby-Strom und die Häufigkeit und Dauer der Volllast-Ereignisse gliedert. Des Weiteren stellt der Wirkungsgrad des eingesetzten Solarpanels unter Freilandbedingungen einen limitierenden Faktor dar. Abbildung 22 zeigt den Grenzwert einer durch Solarenergie erreichten autarken Energieversorgung bei 2,06 %.

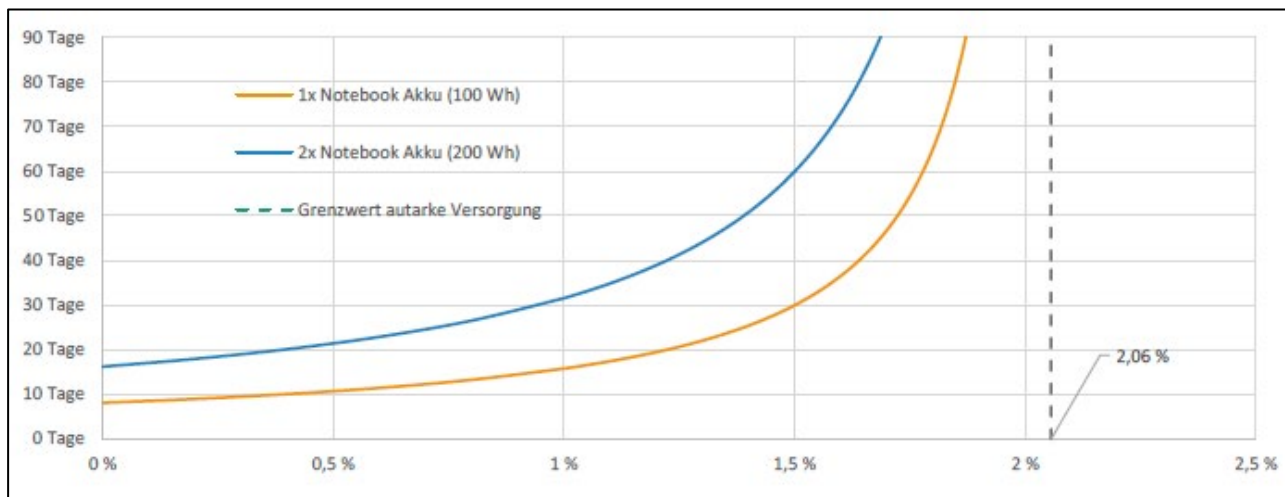


Abbildung 22: Betriebszeit des digitalen Fallensystems' in Abhängigkeit des durchschnittlichen praktischen Nettowirkungsgrads eines Solarpanels (25 W Nennleistung)

Der Einsatz von Solarenergie kann aufgrund der damit zu erzielenden Laufzeitverlängerung, einer Reduktion der notwendigen Akkukapazität verbunden mit einer signifikanten Gewichtsreduktion sowie dem perspektivischen Erreichen einer Energieautarkie und der damit verknüpften Reduktion der Ausfallwahrscheinlichkeit, als zielführend festgehalten werden.

Die potenziellen Fallenstandorte im Wald sind mitunter (teil-)verschattet, sodass für den Einsatz von Solarpanelen eine Unsicherheit hinsichtlich des erwartbaren Energieertrags besteht.

Erfahrungen der NW-FVA und des LWF Bayern zeigen jedoch, dass selbst unter starker Beschattung (Buchenaltbestände) regelmäßige Solarerträge von >40 % der auf unbeschatteten Freiflächen erzeugbaren Erträge generiert werden können. Zur Prüfung der Anlagendimensionierung sowie zur Evaluierung der getroffenen Annahmen werden in den Sommermonaten 2022 daher Feldversuche zur Energieerzeugung mittels Photovoltaik vorgesehen.

Mit einem entsprechenden Versuchsaufbau soll der erwartbare Energieertrag eines Solarpanels an einem schwierigen bzw. verschatteten potenziellen Fallenstandort abgeschätzt werden. Die Ergebnisse dienen dann im Weiteren zur Dimensionierung der Solarpanelgröße sowie der Energiespeicherkapazitäten in der Pheromonfalle, unter Berücksichtigung geforderter Laufzeiten und elektrischer Leistungsaufnahmen der einzelnen Komponenten der Falle.

Im ersten Konzept war vorgesehen, ein Solarpanel an einem potenziellen Fallenstandort anzubringen und diesen über einen Laderegler mit einem Akkumulator zu verbinden, um letzteren mit der gewandelten Solarenergie zu laden. Der Ladestrom bzw. die Leistung, mit der der Akkumulator dabei geladen werden würde, sollten in kurzen Zeitintervallen von einem Datenlogger gemessen und protokolliert werden.

Der technische Entwurf dieses Konzepts ist vereinfacht in Abbildung 23 dargestellt.

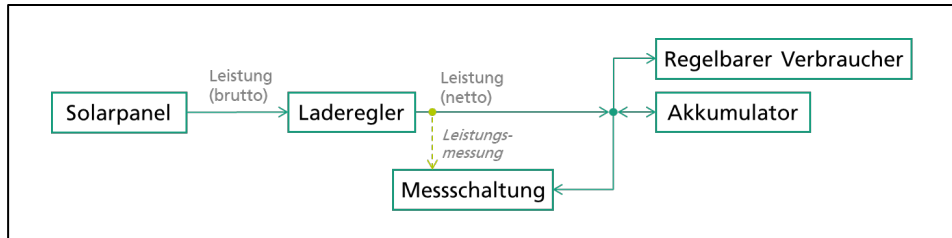


Abbildung 23: Technischer Entwurf für einen Versuchsaufbau zur Ertragsmessung von Solarpaneele im Wald

In der Abbildung gibt die Pfeilrichtung der durchgängigen Linien Auskunft über die Richtung des Energietransports. Der Akkumulator hat dabei als einziges Element einen Doppelpfeil, da – wenn auch nicht simultan – sowohl ein Laden als auch ein Entladen im Konzept vorgesehen war. Die Netto-Leistung, die zum Laden des Akkumulators genutzt werden kann, entspricht der Brutto-Leistung, die das Panel erbringt, abzüglich der Verlustleistung im Laderegler.

Im Laufe der Recherchen zu den einzelnen Baugruppen stellte sich heraus, dass Funktionen, die Solarladeregler zum Schutz und zur Langlebigkeit der Akkumulatoren integriert haben, die Umsetzung dieses Konzepts erschweren bzw. zu uneindeutigen Messwerten führen können. Ist der Akkumulator bspw. nahezu vollgeladen, würde der Laderegler den Ladestrom sperren. In der Folge würde eine Leistung von ca. 0 W gemessen und protokolliert werden. Aus den Protokolldaten wäre nun im Nachgang nicht ersichtlich, ob das Solarpanel zum Messzeitpunkt tatsächlich (nahezu) keine Leistung wandeln konnte, um den Akkumulator zu laden, oder ob der Laderegler den Ladestrom aus Gründen des Überladungsschutzes gesperrt hat.

Der Ansatz, eine regelbare Last an den Akkumulator anzuschließen, um das Vollladen des Akkumulators und damit eine Sperrung des Ladestroms vorzubeugen, wurde geprüft und führte zu keinem Erfolg. Eine weitere gängige Funktion vieler Solarladeregler zum Erhalt der Langlebigkeit des Akkumulators besteht darin, die Last vom Akku automatisch zu trennen, sollte der Akku über eine vordefinierte Zeitspanne nicht vollständig aufgeladen werden können.

Begründet durch die bis dahin gesammelten Informationen wurde ein alternatives Konzept entwickelt, das ohne den Einsatz eines Solarladereglers auskommt. Abbildung 24 ist ein vereinfachter technischer Entwurf dieses zweiten Konzepts zu entnehmen.

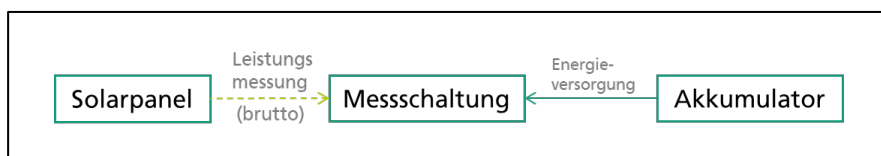


Abbildung 24: Überarbeiteter technischer Entwurf für einen Versuchsaufbau zur Ertragsmessung von Solarpaneele im Wald

Im zweiten Konzept soll auf das Laden des Akkumulators durch das Solarpanel verzichtet werden. Der Akkumulator dient lediglich der Energieversorgung der Messschaltung. Ein Solarladeregler wird somit nicht benötigt bzw. verwendet. Mit der Messschaltung werden in einem Messintervall von einer Minute kurz nacheinander die Leerlaufspannung und der Kurzschlussstrom an bzw. durch das Solarpanel gemessen und protokolliert. In Verbindung mit dem modellabhängigen Füllfaktor des Solarpanels kann durch Produktbildung der drei genannten Größen die elektrische Leistung im Betriebspunkt des Solarpanels, an dem die maximale Leistung umgesetzt wird – Maximum Power Point (MPP) genannt –, berechnet werden.

Das Messintervall von einer Minute wird als ausreichend klein bewertet, um brauchbare Energieerträge für ganze Tages- oder Wochenzeiträume aus den diskreten Werten der Momentanleistung am Solarpanel integrieren zu können. Zwischen den aufeinanderfolgenden Messwerten derselben Messgröße wird eine lineare Steigung bzw. ein lineares Gefälle angenommen.

Das Modell zur Abschätzung von Solarerträgen am realen Einsatzort der Fallen, wird in Verbindung mit der aktuellen Leistungsaufnahme der Falle (Versuchsmusterstadium) zur Festlegung einer geeigneten Konfiguration von Akkumulator und Solarpanel genutzt. Das Modell wurde dabei sinnvoll erweitert, um die Genauigkeit der Vorhersagen weiter zu erhöhen. Nähere Ausführungen dazu sind dem Folgetext zu

entnehmen. Das Rechenmodell wurde insbesondere dahingehend erweitert, dass nun der Eigenverbrauch des Solarladeregler berücksichtigt wird. Je nach Ladereglermodell und Verschaltung im System bestünde die Möglichkeit, den Solarladeregler ausschließlich vom Solarpanel zu versorgen, oder, falls kein ausreichender Solarertrag gegeben ist, über den Akkumulator. Durch die Erweiterung des Modells sollten so auch Aussagen zur Effizienz des Einsatzes von Solartechnik im Verlauf eines Jahres abgeleitet werden können.

Mit der Kombination aus Solartechnik und Akkumulator muss einerseits die energetische Versorgung über einen gesamten Fangzeitraum gesichert sein. Diese Zielvorgabe hat eine hohe Priorität. Andererseits sollten für eine finalisierte Fallenvariante keine überdimensionierten Komponenten eingesetzt werden, um Preis, Gewicht und Baugröße nicht unnötig hoch bzw. groß werden zu lassen. Für Parameter des Modells, deren Werte durch Auswahl entsprechender Komponenten einstellbar bzw. variabel sind, wurde eine Reihe an Werten bzw. ein realistischer Wertebereich angesetzt. Werte wie der aktuelle Leistungsbedarf des Fallensystems oder die erwartbare Globalstrahlung sind über alle Szenarien konstant gehalten worden.

Für die Nennleistung des Solarpanels wurde ein Wertebereich zwischen 20 W und 50 W in das Modell aufgenommen. Dieser Wertebereich ergab sich aus den Ergebnissen, die unter Einsatz eines 30 W Panels zum Überwachen der Solarerträge am realen Einsatzort gewonnen wurden.

Im Projektjahr 2023 konnte noch keine finale Leistungsaufnahme des Fallensystems bestimmt werden, da das System selbst noch nicht finalisiert wurde und weitere Optimierungsmöglichkeiten zur Reduktion des Energiebedarfs zu evaluieren sind. Die Leistungsaufnahme des Fallensystems lag zu diesem Zeitpunkt bei durchschnittlich 0,36 W.

Für den Akkumulator wurden Kapazitäten zwischen 2 Ah und 6 Ah (bei 12,8 V Nominalspannung) geprüft. Dieser Wertebereich ergab sich aus der aktuellen Leistungsaufnahme der Falle, und der Prämisse, dass die Fallensysteme mittels des Akkumulators zumindest wenige Tage mit nur geringem Solarertrag überbrücken können müssen. Für das Laden des Akkumulators mittels Solarenergie wurde ein gängiger Laderegler mit zusätzlicher Bluetooth-Funktion gewählt, der Ströme und Spannung – und damit den Solarertrag – selbstständig protokolliert. Dieser Laderegler ist für Dauerströme bis zu 5 A ausgelegt und wäre damit für den Wertebereich 20 W bis 50 W Nennleistung von Solarpaneele geeignet. Der gewählte Laderegler hat einen Eigenverbrauch von ca. 102,4 mW (8 mA, bei 12,8 V). Der Wert ist vergleichsweise hoch. Mit alternativen Ladereglermodellen ohne Bluetooth und Zustands-LEDs könnte die Leistungsaufnahme dieser Komponente der Recherche nach auf 25,6 mW gesenkt werden.

Durch weitere Recherchen wurde das Einsparungspotenzial durch eine selbstkonzipierte Ladeschaltung geprüft. Die notwendigen Voraussetzungen sind gemäß der Recherche gegeben. Die Entwicklung eines eigenen Solarladeregler mit Ladezustandsüberwachung wird innerhalb der verbleibenden Projektlaufzeit, auf Grund des dafür notwendigen Aufwands, nicht umzusetzen sein.

Integrierte Schaltkreise zum Laden der Akkumulatoren mittels Solarstrom, die für dauerhafte Ladeströme von bis zu 5 A ausgelegt sind und bereits Schutzfunktionen integriert haben, benötigen für den Betrieb eine Leistung von unter 1,28 mW (0,1 mA, bei 12,8 V).

Für das Überwachen des Ladestands des Akkumulators würde ein zusätzlicher, entsprechend ausgelegter integrierter Schaltkreis unter 1,65 mW (0,5 mA, bei 3,3 V) für den Betrieb benötigen.

Auch unter Berücksichtigung, dass weitere Komponenten wie passive elektronische Bauelemente, Transistoren und Sicherungen zusätzlich extern anzuschließen sind, ist ein Eigenverbrauch einer selbstkonzipierten Ladeschaltung von wenigen Milliwatt realistisch.

LiFePo4 Akkus können laut Herstellerangaben bis auf 10 % Restladung entladen werden, ohne die Lebensdauer signifikant zu reduzieren. Für die Kalkulation wurde hier eine verbleibende Restladekapazität von 15 % angenommen, um den werksseitig angegebenen Wert nicht auszureißen. Würde der Wert des Ladezustands laut Modellrechnung unter 15 % fallen, würde das Fallensystem zum Schutz des Akkumulators stromlos geschaltet werden, bis der Solarertrag den Gesamtleistungsbedarf wieder übersteigt und der Akkumulator somit geladen wird. Für die Bewertung von Komponentenkombinationen ist somit hinsichtlich der Versorgungssicherheit ein strenges Ausschlusskriterium, dass das Fallensystem zu keinem Zeitpunkt in den vorgesehenen Fangzeiträumen eine Restladung im Akkumulator von 15 % oder weniger der Kapazität aufweisen würde.

In Tabelle 2 sind die vorgestellten relevanten Parameter des Rechenmodells zusammengefasst. Auf Basis dieser Werte bzw. Wertebereiche wurde mittels Modellrechnung kalkuliert, welchen Ladezustand ein entsprechender Akkumulator der Falle im tagesfeinen Jahresverlauf in den Jahren 2017 bis 2022 am Einsatzort gehabt hätte.

Tabelle 2: Parameter für die Kalkulation der Restladung im Akkumulator im Jahresverlauf

Einordnung	Größe	Wert/Wertebereich
variabel/wählbar	Nennleistung des Solarpanels	20 W bis 50 W
	Kapazität des Akkumulators	2 Ah bis 6 Ah
	Leistungsbedarf des Solarladereglers (durch entsprechende Auswahl des Modells)	102,4 mW oder 25,6 mW
fix/vorgegeben	Leistungsbedarf des Fallensystems	0,36 W
	Globalstrahlung am Einsatzort	tagesfeine Historiendaten des DWD von 2017 bis 2022
	Grenzwert der Restladung im Akkumulator (keine vollständige Entladung des Akkumulators)	15 % der Kapazität

Nach der Bestimmung einer geeigneten Kombination aus Solarpanel und Akkumulator für die aktuellen Testmuster der Fallen sollten der Akkumulator sowie der dazugehörige Laderegler in das Fallensystem integriert werden und die bisher eingesetzten Bleiakkumulatoren, die auf Grund ihres Gewichts auf dem Boden verblieben und nur über ein langes Kabel mit dem Fallensystem verbunden werden konnten, ersetzen.

Im Folgenden werden die Ergebnisse aus den Modellrechnungen vorgestellt.

In Abbildung 25 ist aufgetragen, wie sich der Akkuladezustand im Fangzeitraum März bis Mai in den Jahren 2017 bis 2022 entwickelt hätte, wenn die fixen Parameter und Kenndaten (siehe Tabelle 2), ein Akkumulator mit 38,4 Wh (3 Ah, 12,8 V), ein Solarpanel mit 30 W Nennleistung und ein Solarladeregler mit geringem Eigenverbrauch von 25,6 mW eingesetzt worden wäre. Über die Jahre 2017 bis 2022 wäre der Akkuladezustand kalkulatorisch nicht unter einen Wert von 46,74 % gefallen. Dieses Minimum ist ausreichend weit von den 15 % Restladung entfernt, ab der das Fallensystem zum Schutz des Akkus theoretisch abgeschaltet werden sollte. Es ist anzunehmen, dass diese Kombination aus Solarpanel, Solarladeregler und Akkukapazität für einen durchgängigen Betrieb über den genannten Fangzeitraum geeignet wären.

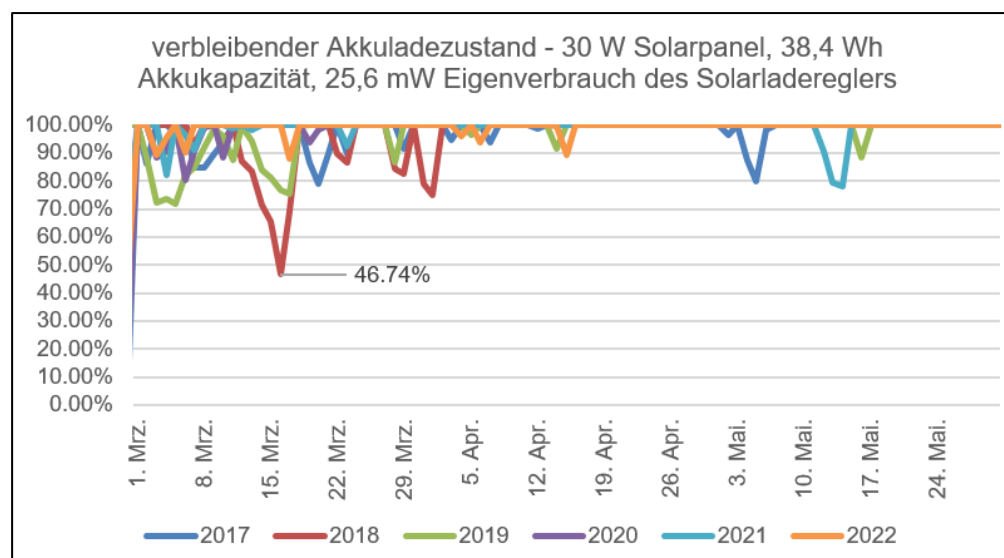


Abbildung 25: Restladung im Akkumulator (März bis Mai, 30 W Solarpanel, 25,6 mW Laderegler) 2023

Der Sicherstellung der Versorgungssicherheit über die Fangzeiträume steht die Vermeidung einer Überdimensionierung der Komponenten gegenüber. Um Letzteres zu vermeiden, wurde für mehrere Komponentenkombinationen das Minimum des Ladezustands ermittelt, das in den Fangzeiträumen in den Jahren 2017 bis 2022 zu erwarten gewesen wäre. Hierbei wurde auch der Eigenverbrauch des Solarladereglers variiert, da die aktuell eingesetzten Solarladeregler mit 102,4 mW einen deutlich höheren Bedarf haben, als verfügbare, kleiner dimensionierte Alternativen. Somit wurde geprüft, welche Komponentenkombinationen für die aktuellen Testmuster nötig sind, und zusätzlich, ob eine kleiner dimensionierte Kombination hinsichtlich der Versorgungssicherheit möglich werden würde, wenn Einsparungspotenziale durch die Wahl eines stromsparsameren Solarladereglers genutzt werden würden.

Tabelle 3 bis Tabelle 6 ist das jeweilige Minimum des Ladezustands zu entnehmen, das mit verschiedener Komponentenwahl in den Jahren 2017 bis 2022 zu erwarten gewesen wäre (vgl. Abbildung 25).

Mit aktuellem Solarladeregler (Leistungsbedarf 102,4 mW), im Fangzeitraum März bis Mai:

Tabelle 3: Minima der Restladung im Akkumulator (Laderegler 102,4 mW, März bis Mai) 2023

Minimum Ladezustand des Akkumulators		Nennleistung Solarpanel				
		20 W	25 W	30 W	40 W	50 W
Akkukapazität Bei 12,8 V Nominalspannung	2 Ah	0 %	0 %	0 %	17,72 %	51,34 %
	3 Ah	0 %	0 %	0 %	45,15 %	67,56 %
	4 Ah	0 %	0 %	24,05 %	58,86 %	75,76 %
	5 Ah	0 %	3,13 %	39,24 %	67,09 %	80,54 %
	6 Ah	0 %	19,27 %	49,37 %	72,57 %	83,78 %

Mit stromsparsameren Alternativ-Solarladeregler (Leistungsbedarf 25,6 mW), im Fangzeitraum März bis Mai:

Tabelle 4: Minima der Restladung im Akkumulator (Laderegler 25,6 mW, März bis Mai) 2023

Minimum Ladezustand des Akkumulators		Nennleistung Solarpanel				
		20 W	25 W	30 W	40 W	50 W
Akkukapazität Bei 12,8 V Nominalspannung	2 Ah	0 %	0 %	20,11 %	53,72 %	71,83 %
	3 Ah	0 %	15,34 %	46,74 %	69,15 %	81,22 %
	4 Ah	0 %	36,51 %	60,05 %	76,86 %	85,92 %
	5 Ah	13,09 %	49,21 %	68,04 %	81,49 %	88,73 %
	6 Ah	27,58 %	57,67 %	73,37 %	84,57 %	90,61 %

Mit aktuellem Solarladeregler (Leistungsbedarf 102,4 mW), im Fangzeitraum Juli bis September:

Tabelle 5: Minima der Restladung im Akkumulator (Laderegler 102,4 mW, Juli bis September) 2023

Minimum Ladezustand des Akkumulators		Nennleistung Solarpanel				
		20 W	25 W	30 W	40 W	50 W
Akkukapazität Bei 12,8 V Nominalspannung	2 Ah	0 %	0 %	29,01 %	67,76 %	75,12 %
	3 Ah	0 %	24,13 %	53,67 %	75,17 %	83,41 %
	4 Ah	11,63 %	43,1 %	64,51 %	81,38 %	87,56 %
	5 Ah	29,3 %	54,48 %	71,6 %	85,1 %	90,05 %
	6 Ah	41,09 %	62,06 %	76,34 %	87,59 %	91,71 %

Mit stromsparsameren Alternativ-Solarladeregler (Leistungsbedarf 25,6 mW), im Fangzeitraum Juli bis September:

Tabelle 6: Minima der Restladung im Akkumulator (Laderegler 25,6 mW, Juli bis September) 2023

Minimum Ladezustand des Akkumulators		Nennleistung Solarpanel				
		20 W	25 W	30 W	40 W	50 W
Akkukapazität Bei 12,8 V Nominalspannung	2 Ah	0 %	40,67 %	64,79 %	77,16 %	85,97 %
	3 Ah	31,46 %	60,45 %	76,53 %	84,77 %	90,64 %
	4 Ah	48,60 %	70,33 %	82,4 %	88,58 %	92,98 %
	5 Ah	58,88 %	76,27 %	85,92 %	90,86 %	94,39 %
	6 Ah	65,73 %	80,22 %	88,26 %	92,39 %	95,32 %

Auf Basis von

Tabelle 3 bis Tabelle 6 können mehrere Schlussfolgerungen gezogen werden.

- Der Fangzeitraum März bis Mai ist hinsichtlich der Versorgungssicherheit mittels des Einsatzes von Solartechnik anspruchsvoller als der Fangzeitraum Juni bis September.

- Wird der Solarladeregler dauerhaft über den Akkumulator mit Strom versorgt, nimmt der Leistungsbedarf des Solarladereglers signifikanten Einfluss auf die Dimensionierung von Solarpanel und Akkumulator. Durch den Einsatz einer stromsparsameren Alternative können Solarpanel und/oder Akkumulator kleiner dimensioniert werden, ohne die Versorgungssicherheit des Fallensystems zu mindern.
- Die Laufzeit der Falle reagiert sensibler auf die Nennleistung des Solarpanels als auf die Akkukapazität.

Das aktuell verwendete Solarladereglermodell stellt die eigene Stromversorgung sicher, indem es bei Bedarf Strom aus dem Akkumulator bezieht, wenn der Solarertrag den Leistungsbedarf des Ladereglers nicht abdecken kann. Dies ist besonders häufig bei Ladereglern der Fall, die Strom- und/oder Spannungswerte mit überwachen und protokollieren. In diesem Fall kann die Solartechnik, je nach Solarausbeute, Stromerzeuger oder -verbraucher sein. Beispielsweise ist in der Nacht mit weniger Solarertrag zu rechnen, als der Solarladeregler an Leistung für dessen Betrieb benötigt.

Im Folgenden wird die Effizienz des Einsatzes von Solartechnik über den Jahresverlauf betrachtet, unter der Annahme, dass der Solarladeregler dauerhaft in Betrieb ist.

Hierbei wurden zwei Fragen näher beleuchtet.

- In welchen Zeiträumen überwiegt der Leistungsbedarf des Solarladereglers den Solarertrag? (Die Solartechnik wäre in diesem Fall ein Verbraucher).
- In welchen Zeiträumen überwiegt der Solarertrag den Gesamtleistungsbedarf des Fallensystems, einschließlich des Leistungsbedarfs des Solarladereglers? (Autarkie des Fallensystems).

Für die weitere Betrachtung wird angenommen, dass ein möglichst stromsparender Solarladeregler eingesetzt wird. Hierfür wird erneut ein Eigenbedarf an Leistung des Solarladereglers von 25,6 mW veranschlagt. Für die Nennleistung des Solarpanels wurde ein Wert von 20 W angenommen.

In der Abbildung 26 ist der Solarertrag, abzüglich des Leistungsbedarfs des Solarladereglers (im Folgenden als Netto-Solarertrag bezeichnet) über den Jahresverlauf dargestellt. Um trotz der hohen Schwankungsbreite der Solarerträge über einzelne Tage allgemeinere Schlussfolgerungen ziehen zu können, wurden die Ursprungsdaten dafür aufbereitet bzw. geglättet.

Zur Erläuterung:

Auf Basis der Tabelle 7 wird die Aufbereitung der in Abbildung 26 dargestellten Daten erläutert. Für den Netto-Solarertrag für den 03. Januar wurden sowohl die vorangegangenen als auch die nachfolgenden zwei Tage aller sechs Jahre mitberücksichtigt. Für den Wert am 03. Januar in der Kurve „Durchschnitt aller Jahre“ wurde der Mittelwert aller in der Tabelle 7 enthaltenen Werte gebildet. Für die Kurven „Maximum“ und „Minimum“ wurde stattdessen das Maximum bzw. das Minimum aus allen in der Tabelle 7 enthaltenen Werten ermittelt und für den 03. Januar aufgetragen. Letztere Kurven dienen dazu, die Schwankungsbreite der Solarerträge über einzelne Tage zu verdeutlichen.

Tabelle 7: Erläuterungshilfe zum Solarertrag 2023

Solarertrag netto [Wh/d]	2017	2018	2019	2020	2021	2022
1. Jan.	-2,077	1,685	-0,452	1,884	-0,005	-1,115
2. Jan.	0,293	-0,618	1,652	2,917	1,420	-1,894
3. Jan.	-1,729	-0,95	1,321	-1,546	-2,093	0,227
4. Jan.	-0,419	0,558	-1,994	-1,447	-1,546	-1,463
5. Jan.	3,359	-0,204	-1,314	0,674	-2,06	-0,983

Aus den Netto-Tageserträgen in Abbildung 26 ist abzuleiten, dass der Einsatz von Solartechnik mit einem Solarpanel von 20 W Nennleistung oder höher über das gesamte Jahr effektiv ist. Erst ab einer Nennleistung von 10 W lägen die durchschnittlichen Erträge zwischen Dezember, über den Jahreswechsel, bis Anfang Januar rechnerisch im negativen Wertebereich.

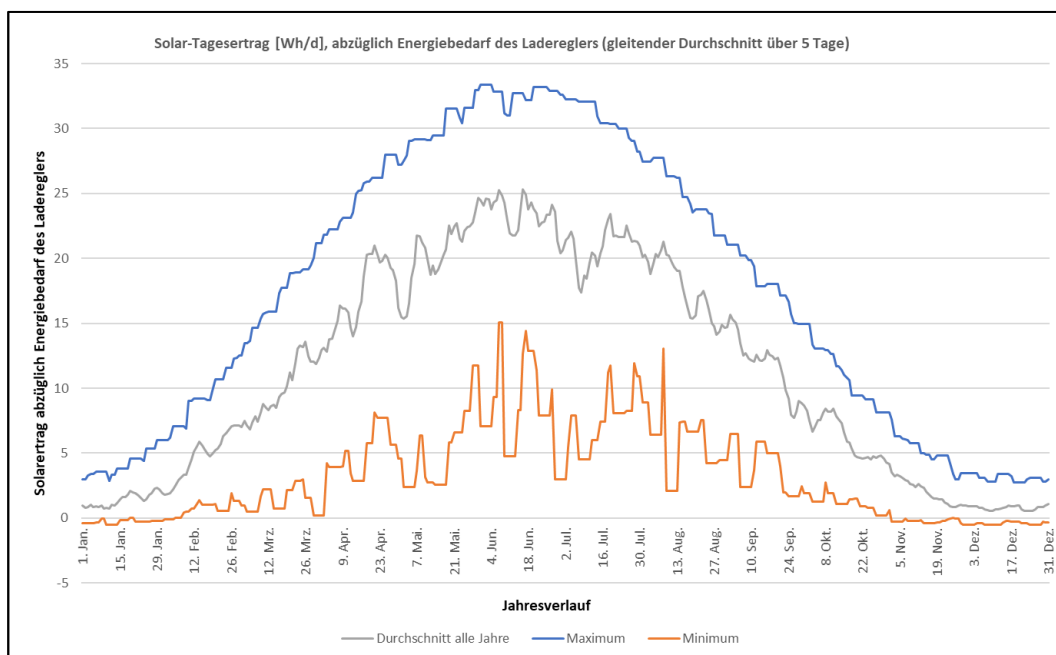


Abbildung 26: Solarertrag abzüglich des Energiebedarfs des Ladereglers 2023

Die Werte der nachfolgenden Abbildung 27 entsprechen den erwartbaren täglichen Solarerträgen, abzüglich des täglichen Energiebedarfs des Solarladereglers von 614,4 mWh ($24 \cdot 25,6 \text{ mW}$) und des Fallensystems von 8,65 Wh ($24 \text{ h} \cdot 0,36 \text{ W}$). In Zeiten, in denen der Wert größer oder gleich Null ist, kann das Fallensystem autark betrieben werden, da die Solarerträge den energetischen Bedarf des Gesamtsystems mindestens decken. Hierbei wurden verschiedene Nennleistungen für das Solarpanel veranschlagt. Im Vergleich lässt sich sagen, dass mit einem 30 W Solarpanel das Fallensystem im Frühjahr ca. 3 Wochen früher in den Bereich des autarken Betriebs kommt und ihn zum Ende des Jahres auch ca. 3 Wochen später wieder verlässt, als unter Einsatz eines 20 W Panel. Des Weiteren wäre hier ein 20 W Solarpanel nicht ausreichend, um bereits Anfang März (Beginn des ersten Fangzeitraums) autark zu laufen. Hier wäre eine entsprechend hohe Akkukapazität nötig, um den Zeitraum zu überbrücken, bis die Solarerträge den Bedarf decken bzw. übersteigen.

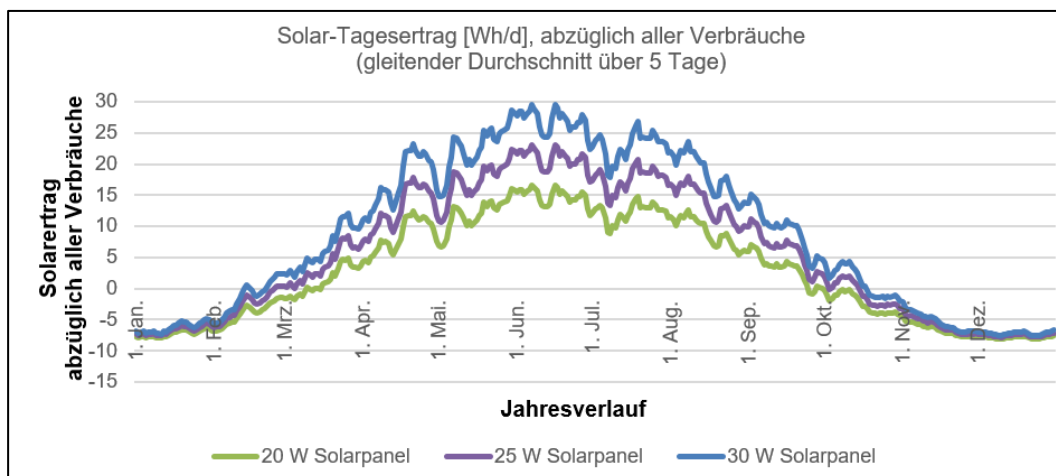


Abbildung 27: Solarertrag verschiedener Nennleistungen des Solarpanels abzüglich Eigenverbrauch Gesamtenergiebedarf

Unter der Annahme, dass für eine finale Fallenvariante ein Solarladeregler mit ca. 25,6 mW verwendet wird und dass der Leistungsbedarf der Falle sich relativ nicht signifikant ändert, zeigen sich folgende Kombinationen in Tabelle 8 hinsichtlich Solarpanel und Akkumulator den Modellrechnungen nach als geeignet, um ausreichende Versorgungssicherheit zu bieten und dabei nicht unnötig überdimensioniert zu sein.

Tabelle 8: Potenziell geeignete Kombinationen hinsichtlich Solarpanel und Akkumulator 2022

Kombinationsindex	Kapazität des Akkumulators	Nennleistung des Solarpanels	Geringste Restladung im Akkumulator über beide Fangzeiträume
1	2 Ah	30 W	20,11 %
2	2 Ah	40 W	53,72 %
3	3 Ah	30 W	46,74 %
4	4 Ah	25 W	36,51 %
6	6 Ah	20 W	27,58 %

Für die aktuellen Fallennuster, unter Einsatz des bluetoothunterstützten Solarladeregler mit vergleichsweise hohem Leistungsbedarf von 102,4 mW, werden Solarpaneele mit 30 W und eine Kombination von zwei modellgleichen 38,4 Wh LiFePo4 Akkumulatoren (Gesamtkapazität somit 76,8 Wh) je Falleneinheit gewählt. Diese Kombination ist für die Zielspezies bzw. in den Fangzeiträumen März bis Mai sowie Juli bis September überdimensioniert, hat aber den Zweck, auch außerhalb der genannten Fangzeiträume die Fallensysteme mit Solartechnik einsetzen und testen zu können.

Es ist vorgesehen, die Fallen hinsichtlich des Energiebedarfs weiter zu optimieren. Bei Erfolg bis zum nächsten Projektbericht, werden die Modellrechnungen entsprechend mit angepassten Parametern wiederholt und die Empfehlungen hinsichtlich notwendiger und sinnvoller Dimensionierung von Solarpanelnennleistung und Akkumulatorkapazität angepasst.

Nicht alle der bereits identifizierten Optimierungsmöglichkeiten hinsichtlich des Leistungsbedarfs des Fallensystems konnten bisher umgesetzt werden, sodass weiterhin keine Aussagen zum Leistungsbedarf eines finalen Prototyps gemacht werden können. Mit den umgesetzten Optimierungen konnte der Leistungsbedarf des Fallensystems (exkl. Laderegler) nochmals von ehemals 0,36 W auf 0,2 W gesenkt werden, was einer Einsparung von 44 % entspricht. Diese Einsparung ist bereits groß genug, um geeignete Kombinationen aus Solarpanel und Akkumulator neu zu bewerten.

Für diese Neubewertung wurden die in Tabelle 9 aufgeführten Parameterwerte veranschlagt (Vergleich Tabelle 2).

Tabelle 9: Parameter für die Kalkulation der Restladung im Akkumulator im Jahresverlauf 2024

Einordnung	Größe	Wert/Wertebereich
variabel/wählbar	Nennleistung des Solarpanels	10 W bis 30 W
	Kapazität des Akkumulators	1 Ah bis 5 Ah
	Leistungsbedarf des Solarladereglers (durch entsprechende Auswahl des Modells)	102,4 mW oder 25,6 mW
fix/vorgegeben	Leistungsbedarf des Fallensystems	0,2 W
	Globalstrahlung am Einsatzort	tagesfeine Historiendaten des DWD von 2017 bis 2022
	Grenzwert der Restladung im Akkumulator (keine vollständige Entladung des Akkumulators)	15 % der Kapazität

In Tabelle 10 bis Tabelle 13 ist das jeweilige Minimum des Ladezustands zu entnehmen, das mit verschiedener Komponentenwahl in den Jahren 2017 bis 2022 bei einer Leistungsaufnahme der Falle von 0,2 W laut Berechnungsmodell zu erwarten ist (vgl. Abbildung 25).

Mit aktuellem Solarladeregler (Leistungsbedarf 102,4 mW) im Fangzeitraum März bis Mai:

Tabelle 10: Minima der Restladung im Akkumulator (Laderegler 102,4 mW, März bis Mai) 2024

Minimum Ladezustand des Akkumulators		Nennleistung Solarpanel				
		10 W	15 W	20 W	25 W	30 W
Akkukapazität Bei 12,8 V Nominalspannung	1 Ah	0 %	0 %	0 %	0 %	18,21 %
	2 Ah	0 %	0 %	7,53 %	42,3 %	59,11 %
	3 Ah	0 %	0 %	38,35 %	61,53 %	72,74 %
	4 Ah	0 %	8,74 %	53,77 %	71,15 %	79,55 %
	5 Ah	0 %	26,99 %	63,01 %	76,92 %	83,64 %

Mit stromsparsameren alternativem Solarladeregler (Leistungsbedarf 25,6 mW) im Fangzeitraum März bis Mai:

Tabelle 11: Minima der Restladung im Akkumulator (Laderegler 25,6 mW, März bis Mai) 2024

Minimum Ladezustand des Akkumulators		Nennleistung Solarpanel				
		10 W	15 W	20 W	25 W	30 W
Akkukapazität Bei 12,8 V Nominalspannung	1 Ah	0 %	0 %	22,97 %	56,59 %	67,28 %
	2 Ah	0 %	32,45 %	61,49 %	78,3 %	83,64 %
	3 Ah	0 %	54,97 %	74,32 %	85,53 %	89,09 %
	4 Ah	8,79 %	66,22 %	80,74 %	89,15 %	91,82 %
	5 Ah	27,64 %	72,98 %	84,59 %	91,32 %	93,46 %

Mit aktuellem Solarladeregler (Leistungsbedarf 102,4 mW) im Fangzeitraum Juli bis September:

Tabelle 12: Minima der Restladung im Akkumulator (Laderegler 102,4 mW, Juli bis September) 2024

Minimum Ladezustand des Akkumulators		Nennleistung Solarpanel				
		10 W	15 W	20 W	25 W	30 W
Akkukapazität Bei 12,8 V Nominalspannung	1 Ah	0 %	0 %	13,05 %	48,42 %	60,78 %
	2 Ah	0 %	12,99 %	56,52 %	74,21 %	80,39 %
	3 Ah	0 %	42,0 %	71,02 %	82,81 %	86,93 %
	4 Ah	0 %	56,5 %	78,26 %	87,11 %	90,2 %
	5 Ah	0 %	65,2 %	83,61 %	89,68 %	92,16 %

Mit stromsparsameren alternativem Solarladeregler (Leistungsbedarf 25,6 mW) im Fangzeitraum Juli bis September:

Tabelle 13: Minima der Restladung im Akkumulator (Laderegler 25,6 mW, Juli bis September) 2024

Minimum Ladezustand des Akkumulators		Nennleistung Solarpanel				
		10 W	15 W	20 W	25 W	30 W
Akkukapazität Bei 12,8 V Nominalspannung	1 Ah	0 %	36,36 %	64,86 %	77,22 %	84,24 %
	2 Ah	21,67 %	68,18 %	82,43 %	88,61 %	92,12 %
	3 Ah	48,78 %	78,79 %	88,29 %	92,41 %	94,75 %
	4 Ah	60,83 %	84,09 %	91,21 %	94,31 %	96,06 %
	5 Ah	68,67 %	87,27 %	92,97 %	95,44 %	96,85 %

Der Akkumulator dient zur Sicherstellung der Energieversorgung über Nacht und zur Überbrückung von Tageszeiträumen mit weniger Solarertrag. Laut dem Berechnungsmodell ist im Fangzeitraum März bis Mai weniger Solarertrag zu erwarten als im zweiten Fangzeitraum von Juli bis September. Der Solarertrag bzw. die globale Sonnenstrahlung nimmt von März bis Mai zu. Bei der Identifikation einer geeigneten Kombination aus Solarpanel und Akkumulator wird entsprechend der Anfangszeitraum des ersten Fangzeitraums in den Fokus genommen.

In Abbildung 28 ist zum besseren Verständnis aufgetragen, wie sich der Akkuladezustand mit der aufgeführten Parameterwahl in den Jahren 2017 bis 2022 im ersten Fangzeitraum entwickelt hätte. An den Verläufen ist zu erkennen, dass zumindest bis Mitte/Ende März die Solarerträge mit einem 10 W Solarpanel den Energiebedarf nicht hätten decken können, sodass der Akkuladezustand einen negativen Trend zeigt. Dieser Trend kehrt sich jedoch im Laufe des März bereits wieder um, da die globale Strahlungsleistung zunimmt.

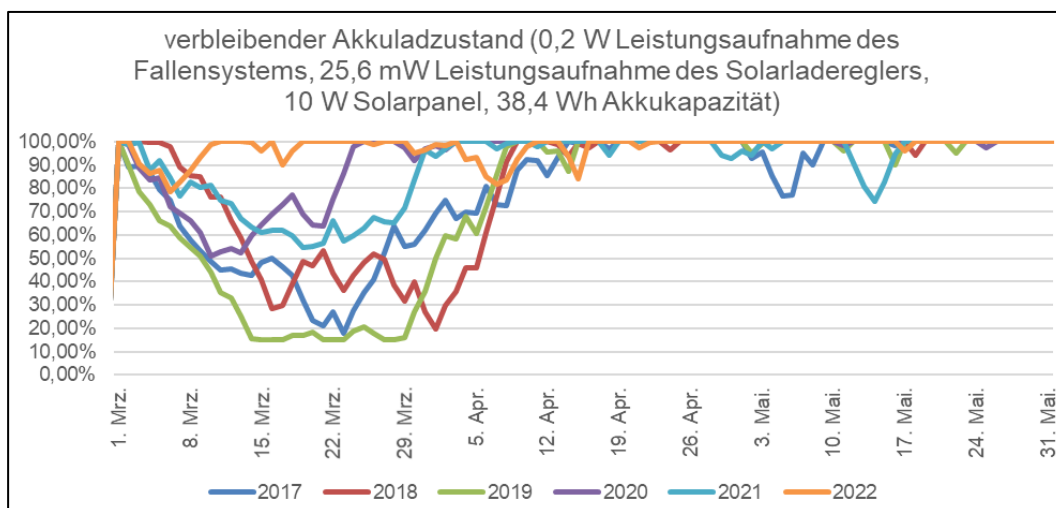


Abbildung 28: Akkuladenzustand über den Fangzeitraum 2024

Die Kombination aus Solarpanel und Akkumulator sollte mindestens so dimensioniert sein, dass der Solarertrag bereits Anfang März einen ausreichend großen Teil des Leistungsbedarfs des Fallensystems decken kann, sodass sich der Akkumulator nur langsam entlädt und einen Mindestladezustand nicht unterschreitet, bis der Solarertrag im Laufe des Fangzeitraums dann den Energiebedarf des Fallensystems übersteigt. Dass der Solarertrag bereits Anfang März den Gesamtenergiebedarf deckt, ist nicht nötig und würde eine Überdimensionierung bedeuten, da ab April sowie im zweiten Fangzeitraum das Fallensystem auch mit Solarpanelen mit geringerer Nennleistung autark betrieben werden könnte.

Unter der Annahme, dass für einen finalen Prototypen ein Solarladeregler mit ca. 25,6 mW verwendet wird und sich der aktuelle Leistungsbedarf der Falle von 0,2 W nicht wesentlich ändert, zeigen die Modellrechnungen, dass die folgenden Kombinationen in Tabelle 14 bezüglich Solarpanel und Akkumulator geeignet sind, um eine ausreichende Versorgungssicherheit zu gewährleisten, ohne unnötig überdimensioniert zu sein.

Tabelle 14: Potenziell geeignete Kombinationen hinsichtlich Solarpanel und Akkumulator 2024

Kombinationsindex	Kapazität des Akkumulators	Nennleistung des Solarpanels	Geringste Restladung im Akkumulator über beide Fangzeiträume
1	1 Ah	20 W	22,97 %
2	2 Ah	15 W	32,45 %
3	3 Ah	15 W	54,97 %
4	4 Ah	15 W	66,22 %
5	5 Ah	10 W	27,64 %

Der nachfolgenden Tabelle 15 kann entnommen werden, wie lange das Fallensystem (0,2 W + 25,6 mW) ohne jeglichen Solarertrag, also ausschließlich durch Nutzung des Akkumulators, betrieben werden könnte.

Tabelle 15: Laufzeit des Fallensystems ohne Solarertrag (bei 225,6 mW Leistungsaufnahme)

Akkukapazität (bei 12,8 V Nominalspannung)	Laufzeit in Tagen ohne jeglichen Solarertrag (bei Schlusskapazität von 15 %)
1 Ah	2,01 d
2 Ah	4,02 d
3 Ah	6,03 d
4 Ah	8,04 d
5 Ah	10,05 d

Um im Falle eines Defekts des Solarpanels oder des Solarladereglers keine größeren Ausfallzeiten im Monitoring zu riskieren, sollte die Akkukapazität mindestens so groß gewählt werden, dass ausreichend Zeit bleibt, um den Fallenstandort zu begehen und den Defekt zu beheben bzw. einen Austausch vornehmen zu können, ohne dass sich das Fallensystem in der Zwischenzeit durch aufgebrauchte Akkukapazität ausschaltet. Welche Laufzeit für einen solchen Fall benötigt wird, sollte durch Befragung potenzieller Nutzerinnen und Nutzer des Fallensystems in Erfahrung gebracht werden.

Automatisches Entleeren der Falle (Abtöten von Zielorganismen)

Entsprechend der formulierten Nutzeranforderungen an die Falle wurden im Verlauf des Berichtszeitraums 2023 die Betrachtungen zu möglichen Varianten des Abtötens der Zielorganismen bzw. zum Leeren der Falle im laufenden Betrieb fortgesetzt.

Einer der Hintergründe der hierzu durchgeführten Betrachtungen bestand in der Zielstellung, die Fallen auch während eines autarken Betriebs dann nicht im Feldeinsatz zu Wartungs- und Inspektionsarbeiten anfahren zu müssen, wenn beispielsweise hohe Fangzahlen zu verzeichnen sind und die Falle einen zu hohen Füllstand erreicht. Weitergehende Motivationen bestanden in der Vermeidung von Verwesungsgerüchen, die ebenfalls dazu führen, dass fallweise die Fallen in definierten Zeitintervallen vor Ort kontrolliert und geleert werden müssen. Neben den in Pretests ausgeschlossenen Verfahren zur Abtötung mit Strom, Laser, Fangflüssigkeiten oder Bioziden (vgl. Abschnitt AP3), wurden die Überlegungen zu geeigneten Verfahren mit mechanischen Ansätzen weitergeführt. Bei den Betrachtungen stand ergänzend im Fokus, Möglichkeiten zu suchen, bei denen die in die Falle eindringenden Nichtzielorganismen wieder aus der Falle freigelassen werden können und so die hohe Zahl der Beifänge minimiert sowie deren Abtötung vermieden werden kann.

Im Berichtszeitraum wurde in einem weiteren Pretest das Verfahren einer Abtötung der Zielorganismen mittels einer rotierenden Klinge umgesetzt und pilothaft erprobt (vgl. Ausführungen zu AP3 „Bau von Funktionsmustern“). Die technische Umsetzung der mechanischen Abtötung in Form einer horizontal gelagerten Flachklinge, welche durch einen Elektromotor in Rotation versetzt wird, konnte in Labortests eine mögliche Funktionalität nicht bestätigen. Die schnelldrehende Klinge konnte nicht über mehrere Arbeitsgänge in einer waagrecht ausgerichteten Position gehalten werden und verkantete daher während des Betriebs. Ergänzend gaben Praktiker den Hinweis, dass rotierende Klingen in einer Auswurföffnung am unteren Teil der Falle ein Sicherheitsrisiko darstellen und möglicherweise auch von unten eindringende Nichtzielorganismen gefährden könnten.

Weitere Entwurfsvarianten der Ansätze mechanischer Verfahren zum Abtöten der Zielspezies darstellen, zeigt Abbildung 29.

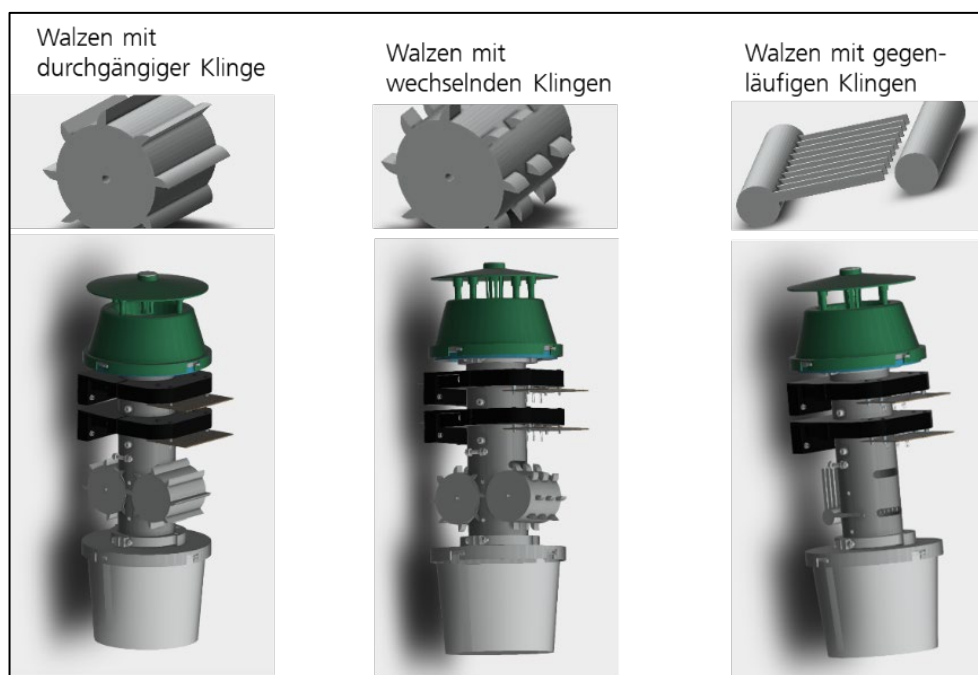


Abbildung 29: Weitere Ansätze für mechanische Verfahren zum Abtöten der Zielspezies nach dem Fang

Doch auch hier zeigt sich ein weiterer problematischer Aspekt bei der unmittelbar nachgelagerten Abtötung. Durch das teilweise unvermeidbare Vorhandensein von Barrieren besteht potenziell die Möglichkeit, dass die Zielorganismen nicht mehr in den Fangbehälter gelangen. Nach diversen Untersuchungen zum direkten Abtöten nach dem Detektieren der Zielspezies verdichtete sich in Abstimmungen mit Praktikern die Feststellung, dass eine Abtötung der Zielorganismen nicht zwingend direkt im Anschluss an den Fang bzw. die Detektion erfolgen muss. Aus forstpraktischer Sicht sei es vielmehr nur erforderlich, die Falle in regelmäßigen Abständen zu leeren und dabei sicherzustellen, dass keine lebenden bzw. ausschließlich geschwächten Zielorganismen die Falle wieder verlassen. Die Zielorganismen verharren nach dem Einflug in der Falle und sammeln sich nach natürlicher Schwächung bzw. dem Verenden im unteren Teil der Falle. Diese Feststellung ermöglicht neue Ansätze, bei denen die sich am Boden der Falle sammelnden Falter in regelmäßigen Abständen durch einen entsprechenden Mechanismus aus der Falle befördert und final abgetötet werden können.

Abbildung 30 zeigt eine Ideenskizze eines potenziell umsetzbaren Mechanismus für das Leeren der Falle. Bei diesem drücken mehrere parallele „Finger“ die gefangenen Falter (Zielorganismen) durch ein Gitter aus dem Falleninneren heraus und könnten so die Fänge in definierten Intervallen zerdrückt an die Umgebung abgeben. Die Abkehr von einem geschlossenen Behälter als Fangkorb könnte hierbei kleineren Nichtzielorganismen ermöglichen, die Falle nach einem Eindringen wieder zu verlassen.

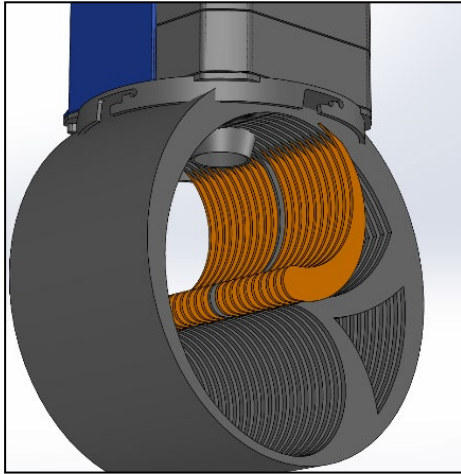


Abbildung 30: Ideenskizze eines Mechanismus zum Leeren der Falle

In Anlehnung an die Ideenskizze wurde ein erster Auswurfmechanismus für Testzwecke entworfen und diskutiert. Bei dem Entwurf eines Funktionsmusters für ein geeignetes System zum Leeren der Falle sind aus technischer und forstfachlicher Sicht mehrere wichtige zusätzliche Randbedingungen zu beachten.

So birgt ein komplett geschlossenes System, welches ausschließlich die im Inneren der Falle gefangenen Organismen durch sogenannte „Finger“ durch Schlitzöffnungen herausdrückt, die Gefahr, dass in sehr seltenen Fällen zufällig in die Falle gelangte größere Nichtzielorganismen (z. B. (Fleder-)Mäuse) den Behälter nicht mehr verlassen und beschädigen können. Sie würden voraussichtlich während des Entleerungsprozesses den entsprechenden Mechanismus mindestens blockieren. Ob und inwieweit der Sammelbehälter also während des Entleerprozesses auch größeren eingeschlossenen Tieren eine Öffnung zur Flucht schaffen muss, um die Falle unbeschadet zu verlassen, kann noch nicht abschließend beantwortet werden. Hierzu wäre es erforderlich, die Häufigkeit des Auftretens entsprechender Ereignisse zu ermitteln und den potenziell entstehenden Schaden abzuschätzen und dann der Wahrscheinlichkeit das Risiko gegenüberzustellen, dass durch diese „Fluchtöffnung“ auch noch lebende Zielorganismen der Falle entkommen können.

Ein weiterer Aspekt ist die Geschwindigkeit des Leerungsprozesses der Falle. Er müsste, um größere Beifänge unbeschadet freizugeben, entsprechend langsam durchgeführt werden, so dass eingeschlossene große, noch lebende Tiere ausreichend Zeit zum Erkennen der Fluchtöffnung und zum Verlassen der Falle haben. Ein positiver Effekt eines sich langsam drehenden Entleermechanismus ist der Einsatz kleiner, energiesparender Antriebe, welche durch eine entsprechende Getriebeuntersetzung trotzdem noch ausreichend Kraft zum Herausdrücken der zu entfernenden Zielspezies entwickeln. Durch eine geeignete Wahl der Finger- und Schlitzabstände können kleinere Nichtzielorganismen die Falle ungehindert durch die vorhandenen Schlitz verlassen. Ein weiterer Punkt, der berücksichtigt werden muss, ist die Wartungsfreundlichkeit des Systems. Es ist wichtig, dass der Entleermechanismus so gestaltet wird, dass er auch bei längerer Nutzung zuverlässig funktioniert und nicht zu einer unnötig hohen Wartungsbelastung führt. Hierbei ist gegebenenfalls ein einfaches Austauschen von abgenutzten oder beschädigten Bauteilen erforderlich. Zudem könnte der Mechanismus mit Sensoren ausgestattet werden, die eine Fehlfunktion frühzeitig erkennen und entsprechende Vor-Ort-Inspektionen oder Wartungsmaßnahmen anstoßen. Dies könnte helfen, den Betrieb der Falle konstant effizient und sicher zu gewährleisten.

Softwaretool zur Kommunikation mit der Falle

Zur einfachen Kommunikation mit den Testmustern bestand Bedarf nach einer Schnittstellenlösung, die es ermöglicht, aufwandsarm Informationen aus der Falle auszulesen und die Falle konfigurieren zu können. Hierfür wurde entschieden, ein entsprechendes Softwaretool mit GUI zu entwickeln, das auf einem mobilen Gerät direkt am Einsatzort der Falle für die Kommunikation mit der Falle genutzt werden kann.

Nachfolgende grundlegende Anforderungen wurden dabei definiert:

- Möglichkeit zum direkten Herunterladen der Protokolldaten von der SD-Karte der Falle, ohne Entnahme der SD-Karte
- Aufwandsarmer und einfacher Verbindungsaufbau zwischen mobilem Gerät und Fallensystem
- Ausführliche Übersicht über den Status der Falle sowie aktuelle Konfiguration
- Möglichkeit zur Änderung verschiedener Parameter der Falle, ohne die Firmware der Falle überschreiben zu müssen

Für die erste Umsetzung ist eine kabelgebundene Verbindung zwischen Fallensystem und (mobilem) Computer vorgesehen. Von einer kabellosen Verbindung wären weitere Vorteile zu erwarten, wobei beide Verbindungsarten die Anforderung eines aufwandsarmen und einfachen Verbindungsaufbaus erfüllen können. Eine kabellose Lösung wurde in Hinblick auf den Entwicklungsaufwand im Projekt niedriger eingestuft. Eine Umsetzung in der verbleibenden regulären Projektlaufzeit ist zum Zeitpunkt der Berichterstellung fraglich.

Priorisierung von Umsetzungsvarianten und Komponentenauswahl

Eine Priorisierung von Umsetzungsvarianten erfolgte im Berichtszeitraum anhand der Erkenntnisse aus den im Jahr 2022 durchgeführten Labor-, Semifreiland- und Freilandtests der vorgenannten Funktionsmuster für Einzelkomponenten. Im weiteren Projektverlauf wurden für diese Komponenten wiederholte Tests und infolgedessen nochmalige Neubewertungen und fallweise Anpassungen erforderlich sein. Anhand der in diesem Prozess gewonnenen Erkenntnisse ist abschließend die Auswahl geeigneter Komponenten für ein Gesamtsystem sowie dessen Erprobung vorgesehen worden.

Die Zielsetzung für die Arbeiten im Jahr 2023 sah vor, auf Basis der z. T. bereits mehrfach angepassten Einzelkomponenten ab Frühjahr 2023 eine finale Auswahl der Einzelkomponenten zu treffen und diese im Anschluss in einem gemeinsamen Fallenaufbau zusammenzuführen. Dabei stand zum einen die industrielle Fertigung der Leiterplatten (Platinen) als Grundlage der Fertigung einer größeren Anzahl identischer Fallenmuster im Vordergrund. Zum anderen wurde das gesamte System darauf ausgelegt, dass die einzelnen Fallenmuster je nach Bedarf modular umgerüstet werden können. Ein weiterer Meilenstein der Komponentenauswahl lag in der Mikrosteuereinheit. Während zur Steuerung der digitalen Falle im Projektjahr 2022 ein vollwertiges Raspberry IV-System eingesetzt worden ist, wurde diese Komponente im Frühjahr 2023 durch die finale Lösung in Form eines stromsparenden, speziell für die Falle konzipierten Mikrocontrollerboards ersetzt. Im Mittelpunkt gezielter Versuchsaufbauten im Jahr 2023 standen daher verschiedene Varianten der Komponente mit Zählfunktion. Diese wurde mit zwei Lichtschrankenebenen ausgestattet und für Vergleiche hinsichtlich der Nutzeffekte im Feldversuch einer Variante mit drei Lichtschrankenebenen gegenübergestellt.

Mit mehr als einer Lichtschrankenebene sollen Fehlzählungen, bei denen ein Falter eine Lichtschrankenebene blockiert, aber nicht bis in den Fangbehälter gelangt, vermieden werden. Die These war, dass mit einer dritten Lichtschrankenebene die Abfolge der Lichtschrankenevents weniger Mehrdeutigkeiten und damit potenzielle Fehlinterpretationen brächte, wenn ein zweiter Falter zeitlich sehr kurz versetzt nach einem ersten Falter in den Fangbehälter eindringt. Lichtschrankenevents, die auf ein solches Ereignis hindeuten, wurden in den Eventprotokollen über die Versuche nur vereinzelt gefunden. Eine parallele Beobachtung mittels Videotechnik fand dabei nicht mehr statt, sodass nicht nachvollzogen werden kann, ob es sich bei jedem dieser Ereignisse tatsächlich um das beschriebene Szenario, zwei kurz nacheinander eingeflogener Falter, handelt. Die These kann somit nicht verworfen werden.

Auf Grundlage dessen, dass die beschriebenen Abfolgen von Lichtschrankenevents aber generell nur äußerst selten auftraten, wurde entschieden, dass die Einsparung hinsichtlich der Leistungsaufnahme durch Verzicht auf eine dritte Lichtschrankenebene den maximal erwartbaren Zusatznutzen einer solchen dritten Ebene überwiegt. Somit wurde zum Berichtszeitpunkt die aktuellste Testmusterversion mit zwei Lichtschrankenebenen ausgestattet.

Aufwand-Nutzen-Vergleich für Umsetzungsvarianten

Die Betrachtung von Aufwand und Nutzen sowie entsprechende Vergleiche verschiedener Lösungsansätze für die technischen Umsetzungsvarianten waren ein immanenter Bestandteil der Entwicklungsarbeit.

In Bezug auf die technisch-konstruktive Umsetzung der ausgewählten Umsetzungsvarianten ist weiterhin festzustellen, dass die Beschaffung der technischen Einzelkomponenten in vielen Fällen nicht wie geplant durchgeführt werden konnte, da insbesondere der Markt für elektronische Bauteile in den Jahren 2022/23 wiederholt durch deutlich verlängerte Lieferzeiten, Lieferengpässe, Preisschwankungen und Lieferausfälle gekennzeichnet war. Dies erschwerte die Komponentenauswahl, die planmäßige Beschaffung kritischer Bauteile sowie die Umsetzung einer stringenten, aufwand-nutzen-orientierten Beschaffung unter Berücksichtigung der engen Zeitschienen im Projekt. Aus den genannten Gründen wurde die monetäre

Bewertung der Einzelkomponenten nicht niedriger priorisiert, musste jedoch bei Bauteilbeschaffungen teilweise vernachlässigt werden, um die gewünschten technischen Funktionen wie geplant im Rahmen von Testzeiträumen abdecken zu können.

Aus technischer Sicht ist die Umsetzung der im AP1 definierten Versuchsaufbauten dennoch gelungen. Neben der Betrachtung des wirtschaftlichen Verhältnisses von Aufwand und Nutzen in der Beschaffung und konstruktiven Zusammenführung technischer Komponenten wurde in der Praxis des Versuchsbetriebs eine intensive Betreuung notwendig, um auftretende Hemmnisse frühzeitig zu erkennen und beheben zu können. Als besondere Herausforderung stellte sich für die Versuche im Jahr 2022 die Energieversorgung der technischen Fallenmuster im Freiland heraus. Aufgrund dessen, dass nur Übergangslösungen zur Energieversorgung eingesetzt werden konnten, erforderten die verwendeten Akkusysteme ein wiederholtes Auswechseln (Nachladen) zur Aufrechterhaltung des Betriebs der Testmuster. Dies betraf insbesondere die Systeme der Zählfallen sowie die Fallensysteme mit Kamerabeobachtung und verursachte einen erhöhten Aufwand bei den Projektpartnern zur Durchführung der Versuche.

Die Fallenmodule der Pheromonabgabe hingegen benötigten planmäßig sehr wenig Energie, da sie ihrer Einsatzcharakteristik nach nur einmal täglich (Flüssigabgabe) bzw. zweimal monatlich (Festköder) aktiviert wurden. Die überwiegende Zeit waren diese Systeme stromlos geschaltet. Sie waren daher auch in der Wartung weniger aufwendig. Das System der Energieversorgung mit Solar erfüllte die Anforderungen ebenfalls planmäßig und konnte ohne großen Aufwand getestet werden. Die Energieversorgung der Falle hatte im gesamten Projektverlauf eine zentrale Bedeutung. Bestehende Einsparungspotenziale hinsichtlich des Energiebedarfs wurden fortlaufend identifiziert oder waren im Voraus bekannt, waren jedoch teilweise erst dann final in den Funktionsmustern nutzbar, wenn die Funktionstüchtigkeit einzelner Komponenten abschließend festgestellt werden konnte. Bspw. werden in der aktuellen Umsetzungsvariante der Versuchsmuster noch alle Lichtschrankenebenen dauerhaft mit Strom versorgt, um sie für den Dauereinsatz zu testen und die Funktionstüchtigkeit ausgiebig zu prüfen.

Unbenommen dessen ist bereits im Platinenlayout berücksichtigt, dass sich einzelne Lichtschrankenebenen auch zeitweise bis zu einem Ereignis (Faltereinflug) an der obersten Lichtschrankenebene, deaktivieren lassen um Strom einzusparen. Die Dimensionierung einer finalen Energieversorgung kann jedoch erst im Ergebnis ermittelter Energiebedarfe der verschiedenen Einzelkomponenten erfolgen. Um diesbezüglich Aussagen für einen voraussichtlichen Prototypen geben zu können, wäre es erforderlich, insbesondere die Module zum Leeren der Falle und zur Datenübertragung ebenfalls in ein gesamtheitliches Funktionsmuster integriert zu haben. Zum aktuellen Zeitpunkt ist jedoch festzustellen, dass durch den gewählten Aufbau und die eingesetzten Komponenten einerseits die Umsetzung einer Lösung gelungen ist, die einen autarken Betrieb der (bisherigen) Fallenkomponenten über die definierten Fangzeiträume erlaubt. Gleichzeitig wurde der Energiebedarf so minimiert, dass eine für den praktischen Einsatz kostenadäquate Lösung vorgeschlagen wurde, die aufgrund modular einsetzbarer Komponenten den Bedarfslagen der künftigen Anwender hinsichtlich des Preises/ der Leistung variabel angepasst werden kann. So können Nutzende je nach ihren betrieblichen Prozessen und der Häufigkeit der Vor-Ort Besuche der Fallenstandorte zwischen Varianten eines reinen Akkubetriebs der Fallen oder einem Akkubetrieb mit Solarunterstützung wählen.

Zusammenfassend ist festzuhalten, dass das Kosten-Nutzen-Verhältnis der konzipierten Komponenten im Hinblick auf die zu erreichende und erreichte Funktionalität den definierten Anforderungen entspricht. Im Projektverlauf wurden kontinuierlich die technischen, funktionalen und anwendungsspezifischen Anforderungen miteinander und gegeneinander abgeglichen und die Lösungen für die Einzelkomponenten weiter verbessert. Hierbei wurde stets großer Wert darauf gelegt, dass die eingesetzten (Elektronik-)Bauteile die Gesamtkosten einer potenziellen Gesamtlösung nicht unverhältnismäßig nach oben treiben.

Gleichsam wurde im Projektverlauf durch Diskussionen mit Praktikern deutlich, dass ausgehend von Veränderungen in Prozessen des Waldschutzes und vom erzielbaren Nutzen einer digitalen Falle in der Praxis komponentenabhängig durchaus höhere, als zu Projektbeginn vermutete Kosten für ein integriertes Gesamtsystem akzeptabel scheinen. Im Projekt wurde letztlich aufgrund dieser variierenden Ansprüche der Nutzenden der Ansatz verfolgt, am Markt später ein modulares System für den Einsatz der digitalen Falle anzubieten. Bei diesem soll sich der Endkunde das für ihn passende System anhand seiner individuellen Anforderungen im Hinblick auf den Preis, den prozessbezogenen Bedarf und den zu erzeugenden Nutzen im Monitoringprozess (z. B. Reduzierung des Aufwands) zusammenstellen können.

Aussagen zum Kosten-Nutzen-Verhältnis einer vollintegrierten Pheromonfalle für die Endanwender können zum Ende des Projektes unbenommen dessen dennoch noch nicht abschließend getroffen werden. Einerseits sind zwei der potenziell für den Einsatz erforderlichen Module (Datenübertragung, Leeren) noch nicht final umgesetzt und daher ist deren potenzieller Einfluss auf den potenziellen (markt-)Preis der Falle aktuell nicht abschätzbar. Dieser wird letztlich auch primär durch die verschiedenen denkbaren Geschäftsmodelle von Anbietern bestimmt werden (z. B. Verkauf, Miete, Leasing).

Andererseits können und werden die Kosten der Fallenmodule und einzelner Bauteile mittel- und langfristig durch verschiedene Faktoren und Rahmenbedingungen beeinflusst. Folgende Beispiele seien exemplarisch genannt:

- alle Einzelkomponenten der verschiedenen Fallenmodule wurden bislang in kleinen Stückzahlen beschafft und teilweise wurden aufgrund von Lieferengpässen benötigte konstruktive und funktionelle Lösungen in Einzelfällen übergangsweise aus Materialbeständen der Projektpartner abgedeckt. Die Beschaffung größerer Stückzahlen könnte tendenziell einen kostensenkenden Einfluss ausüben.
- Elektronikkomponenten haben in den vergangenen Jahren eine teils deutliche Preissteigerung erfahren. Die weitere tendenzielle Entwicklung von deren Preisen sowie technische Weiterentwicklungen sind unbekannt.

Zusammenfassend ist festzustellen, dass die Auswahl und die Kosten der für die Konzeption der einzelnen Fallenmodule eingesetzten technischen Komponenten stets unter Berücksichtigung des Preis-Leistungsverhältnisses, der gegebenen Rahmenbedingungen (z. B. Verfügbarkeiten) im Projektverlauf und gleichermaßen mit Blick auf die zu erreichende Funktionalität und Praktikabilität für die Lösungsfindung erfolgten.

Weitergehende Betrachtungen zu einem Kosten-Nutzen-Verhältnis des digitalen Fallensystems in der Praxis sowie die mögliche Nachfrage am Markt wurden projektbegleitend in Gesprächen mit Praktikern, d. h. sowohl späteren Endanwendern der digitalen Falle, als auch Entscheidern in Forstbetrieben und auch potenziellen Anbietern entsprechender Systeme durchgeführt und sind den Arbeiten im Arbeitspaket 6 zuzuordnen. Auf diesen Abschnitt des Berichtes sei an dieser Stelle verwiesen.

Festlegung von Versuchsflächen für Freilandprüfungen und Versuchsplanung (Festlegung von Indikatoren zur Messung und Erfolgsbewertung)

Die Auswahl von Versuchsflächen zur Umsetzung von Versuchsanordnungen im Freiland wird von der NW-FVA bearbeitet. Die Versuchsflächenauswahl erfolgte anhand der erfassten Daten von der regulären Überwachung der Zielorganismen mittels Pheromonfallen im Überwachungsgebiet der NW-FVA in den Überwachungszeiträumen des jeweiligen Vorjahres. Im Frühjahr 2023 stehen dabei mehrere Flächen nördlich der Stadt Wolfsburg (Forleule und Nonne), eine Fläche im Bramwald bei Hannoversch Münden (Breitflügelspanner), eine Fläche im Forstamt Wetzlar (Schwammspinner) sowie eine Fläche im Forstamt Reinhardshagen in der engeren Auswahl. Die ausgewählten Standorte sollen die Durchführung von Freilandversuchen zur Evaluierung der Fallenmodule des „Zählmechanismus“, des „Pheromonabgabemechanismus“ sowie des Versuchsteils „Energieversorgung mit zusätzlichem Energieerzeuger“ abdecken.

Hierzu sind mindestens drei Vergleichsflächen vorgesehen, die einerseits realistische Versuchsbedingungen unter Schirm (Belaubung) und andererseits schirmfreie Beleuchtungsbedingungen bieten. Während erste Versuche zur Pheromonausbreitung bereits im Februar 2023 beginnen können, ist der Versuchsteil zur Evaluierung einer solargestützten Energieerzeugung aufgrund der dafür notwendigen Belaubung ab Juli 2023 möglich. Für das Frühjahr 2024 stand wie im Vorjahr die Fläche im Bramwald bei Hannoversch Münden für den Breitflügelspanner zur Verfügung. Für die Forleule wurde ein Standort südlich der Stadt Uelzen (Bezirksförsterei Suderburg) ausgewählt. Die bereits in den Vorjahren genutzten Versuchsflächen für den Schwammspinner (Forstamt Wetzlar) und die Nonne (Forstamt Nordöstliche Altmark) wurden auch für die Versuche im Sommer 2024 ausgewählt. Für den Frostspanner kam zu der bereits im Jahr 2023 genutzten Versuchsfläche im Forstamt Reinhardshagen, Revier Beberbeck, zusätzlich eine weitere Versuchsfläche im Revier Sababurg hinzu.

Wie bereits in den Berichtszeiträumen der Vorjahre wurden Indikatoren für eine Erfolgsbewertung definiert. Um Vergleichswerte für diese Bewertungen zu ermitteln, wird in allen Versuchsteilen mit vergleichenden Untersuchungen konventioneller Fallensysteme gearbeitet, um die Fangleistung der Versuchsmuster in Relation zu praxisüblichen Bedingungen zu prüfen. Die gewählte Messgröße (Indikator) ist dabei die Anzahl der gefangenen Falter der Zielspezies.

In allen Versuchsteilen sollte die Funktion der technischen Anordnung laufend überwacht werden sowie auf Schwachstellen und Fehlfunktionen und hinsichtlich externer Faktoren (Umweltbedingungen, Witterung, Verschmutzung, Wildtiere, Vandalismus) kontrolliert und optimiert werden. Dazu wurden, wie bereits in allen Versuchsanordnungen der vorherigen Berichtszeiträume, seitens der NW-FVA detaillierte Versuchspläne erstellt, die regelmäßige Kontrollen der angelegten Freilandversuche vorsehen, die Versuchsaufbauten, -ziele und -umsetzungen sowie deren Auswertung beschreiben und dokumentieren. Wichtige Indikatoren für eine spätere Erfolgskontrolle sind dabei die angefertigten Protokolle aller Flächenbegehungen, die laufende Dokumentation der Versuchsaufbauten und -durchführungen sowie eine chronologische Fotodokumentation der durchgeführten Arbeiten. Die Erkenntnisse der innerhalb der zurückliegenden Projektlaufzeit durchgeführten Feldversuche werden dabei berücksichtigt.

AP 3 – Entwicklung von Funktionsmustern zur Untersuchung der Lösungsansätze in Laborversuchen

Ziel des Arbeitspaketes „Entwicklung von Funktionsmustern zur Untersuchung der Lösungsansätze in Laborversuchen“ im Projekt war die Überprüfung der Lösungsansätze aus der Konzeptionsphase. Einzelne Teilkomponenten und Lösungsmethoden sollten in Versuchsaufbauten überprüft und technische Parameter für die Umsetzung ermittelt werden, um die Erreichbarkeit der angestrebten Projektziele zu prüfen. Neben Laborversuchen waren (Semi-)Freilandversuche vorgesehen, sofern die erforderlichen Testumgebungen im Labor nicht zur Verfügung stehen.

Aufbauend auf den detaillierten und im Projektverlauf später jeweils überarbeiteten Konzeptionen (vgl. AP2) der Einzelkomponenten erfolgte der Bau der ausgewählten Versuchs- und Funktionsmuster für Tests im Freiland, Semi-Freiland oder unter Laborbedingungen.

Vorgehensweisen und Erkenntnisse werden im Folgenden untergliedert nach den Funktionen und Komponenten der automatischen Falle dargestellt.

Bau von Funktionsmustern für die Einzelkomponenten

Funktion Pheromonabgabe

Zur Umsetzung der Funktion Pheromonabgabe für die digitale Falle wurden bei der Umsetzung von Versuchsmustern verschiedene Ansätze parallel verfolgt. Dies sind einerseits der Einsatz einer Mikropumpe für die Abgabe des Pheromons in flüssiger Form sowie die Festkörpferabgabe. Die entsprechenden Umsetzungen werden im Folgenden vorgestellt.

Mikropumpe mit Pheromon-Lösungsmittel-Gemisch

Basis für die Abgabe von „flüssigen“ Pheromonen ist ein geeignetes Pheromon-Gemisch, welches für den entsprechenden Schädling im Freiland eingesetzt werden kann und auch technisch mit den vorgesehenen Komponenten abgegeben werden kann. Zur Herstellung von festen Pheromonködern wird ein Pheromon-Hexangemisch eingesetzt. Die ersten Tests zur Abgabe von flüssigen Pheromonen in Hexan zeigten unter Laborbedingungen eine sehr starke Verdunstung des Flüssigkeitsgemisches innerhalb des Fluidstranges. Da befürchtet wurde, dass das aggressive Lösungsmittel Hexan das Fluidsystem negativ beeinflussen könnte, (Erkenntnisse vom Pumpenhersteller zum Einsatz von Hexan existieren nicht) wurde beschlossen, alternative, weniger aggressive und flüchtige Lösungsmittel zur Herstellung des Pheromongemisches zu ermitteln und zu erproben.

Für die Auswahl geeigneter Lösungsmittel kommen ausschließlich unpolare schwerflüchtige Chemikalien in Frage, die über die Anwendungszeiträume von bis zu 12-16 Wochen ohne nennenswerte Verdunstung im Tank der Mikropumpe verbleiben. Polare Lösungsmittel wie Wasser, Ethanol oder Essigsäureethylester (Ethyl Acetate) sind aufgrund ihres chemischen Bindungsverhaltens Alkanen bzw. Kohlenwasserstoffverbindungen ungeeignet um Schmetterlingspheromone in Lösung zu halten. Als gängige unpolare Lösungsmittel sind zunächst die Vertreter der Alkanreihe (Hexan = C_6H_{14} , Heptan C_7H_{16} etc.), Chloroform sowie Diethylether zu nennen. Für die automatische Pheromonabgabe mittels einer Mikropumpe wird die Verwendung potenziell gesundheits- oder umweltschädlicher Lösungsmittel ausgeschlossen. Unter diesen Voraussetzungen wurden klassische Lösungen der Laborchemie wie beispielsweise die Verwendung von aromatischen und halogenisierten Kohlenwasserstoffe, Benzol, Toluol und Chloroform verworfen. Als alternative Lösungsmittel wurden n-Octan und 1-Butanol identifiziert. Die Verwendbarkeit der ausgewählten Lösungsmittel wird zunächst kontrollierten Laborprüfungen sowie biologischen Tests unterzogen, indem unter Zugabe des Insektenpheromons im korrekten stöchiometrischen Mischungsverhältnis in das Lösungsmittel, das Mischungsverhalten, die Flüchtigkeit und die biologische Wirksamkeit des Lockstoffs evaluiert wird.

Mit den identifizierten technisch wie biologisch für den Einsatzzweck geeigneten Lösungsmitteln (Kohlenwasserstoffe) wurden zunächst Versuche und Tests zur Mengenabgabe durchgeführt. Hierbei wurde untersucht, mit welcher Frequenz und Spannung die Mikropumpe betrieben werden muss, um eine definierte Flüssigkeitsmenge abzugeben. Des Weiteren wurde analysiert, ob die einzusetzenden Lösungsmittel einen negativen Einfluss auf das Fluidsystem haben. Nach mehreren Langzeittests wurden keine nennenswerten Beeinträchtigungen des Systems festgestellt, so dass eine Eignung einen weiteren Einsatz grundsätzlich gegeben scheint. Die genannten Tests wurden unter Laborbedingungen über einen längeren Zeitraum durchgeführt, wobei untersucht wurde, ob die verwendeten Lösungsmittel mit zunehmender Einwirkdauer die Abgabemenge wesentlich beeinflussen. Nachfolgendes Foto (vgl. Abbildung 31) zeigt den Aufbau des Versuchs.

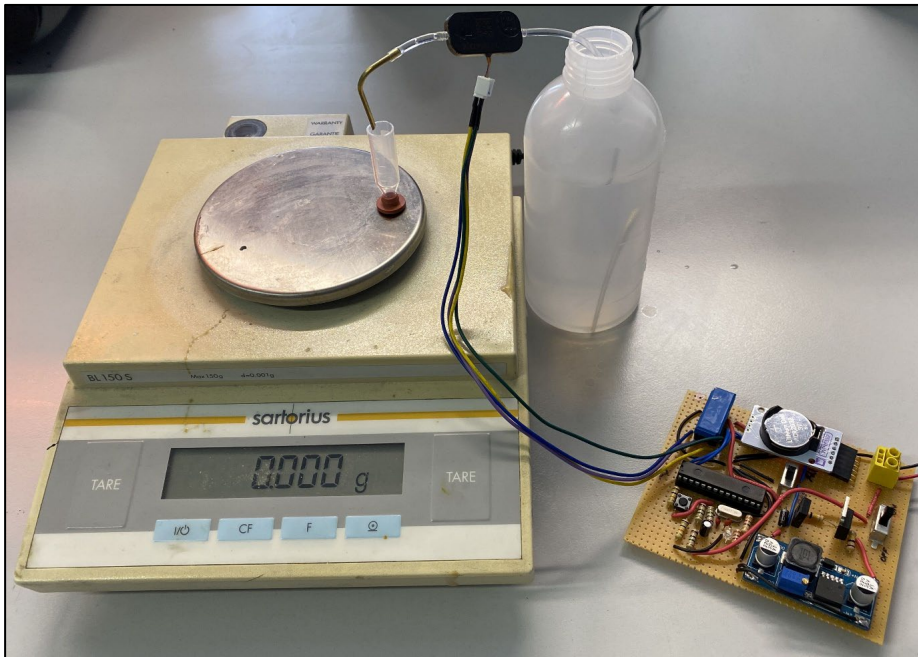


Abbildung 31: Versuchsaufbau zur Bestimmung der Abgabemengen

Des Weiteren wurde untersucht, in welcher Zeit eine definierte Menge der vorgesehenen Flüssigkeit an die Umgebung abgegeben wurde, d. h. das Verdunstungsverhalten der Lösungsmittel wurde beobachtet. Hauptaugenmerk lag dabei darauf, dass die Flüssigkeitsmenge von 0,5-1 ml innerhalb von 24 Stunden nahezu vollständig verdunstet sein musste. Als Trägermaterial für die Flüssigkeit wurde ein keramischer Docht verwendet, der chemisch inert ist. Anwendungsbeispiele solcher Dochte finden sich beispielsweise in E-Zigaretten.

Auf Basis der Vorarbeiten wurde ein erstes Funktionsmuster entworfen und erstellt, um die fehlerfreie und dosierungsgenaue Abgabe zu testen. In Abbildung 32 ist der Entwurf des Systems zur Abgabe eines flüssigen Pheromongemischs dargestellt.

Das Pheromongemisch wird dabei in einen metallischen Behälter gefüllt. Mittels Mikropumpe wird täglich eine vordefinierte Menge des Gemischs (ca. 1 ml) in einen kleinen Trichter gefördert. Am Auslauf des Trichters wird ein Glasfaserdocht nach unten geführt und im Anschluss um eine Dochthalterung gewickelt. Die Länge des Dochtes ist so dimensioniert, dass eine Dosiermenge problemlos aufgenommen werden kann. Das in dem Docht enthaltene Pheromon wird innerhalb von 24 Stunden an die Umgebung abgegeben. Über eine zusätzliche Öffnung oberhalb des Trichters erfolgt der Druckausgleich für den Liquidbehälter.

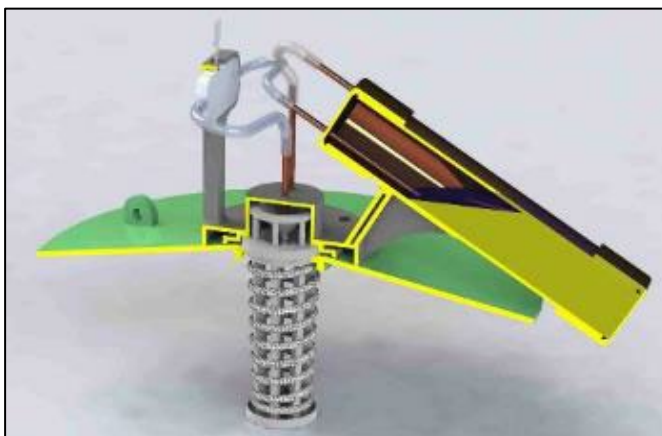


Abbildung 32: Funktionsmuster zur Abgabe von Flüssigpheromon

Die technische Umsetzung erfolgte dergestalt, dass ein hart gelötetes Kupferrohr als Reservoir für das Lösungsmittel-Pheromongemisch verwendet wurde. Der metallische Behälter verhindert ein ungewolltes Verdampfen des Lösungsmittels und eine damit eingehende Veränderung der Konzentration im Lösungsmittel-Pheromon-Gemisch.

Insgesamt wurden vier Zugänge in den Behälter integriert. Der erste Zugang erlaubt das Befüllen, der zweite dient dem Druckausgleich und über einen dritten Zugang wird das Pheromon Gemisch von der Pumpe

angesaugt. Die vierte Öffnung dient dazu, den Behälter nach dem Lötvorgang durch Lösungsmittel zu reinigen und Reste des Herstellprozesses vollständig zu entfernen.

In den Ansaugschlauch der vom Reservoir zur Pumpe führt, wurde ein Rückschlagventil integriert, welches verhindert, dass Pheromonlösung beim Betrieb der Falle ungewollt in den Behälter zurückfließt und für die Pumpe durch die langen Pausen zwischen Abgabeintervallen die Gefahr besteht, trocken zu laufen. Mit diesen und weiteren Maßnahmen wurde sichergestellt, dass sich in der Pumpe zu definierten Intervallen in der Lage ist, Flüssigkeit abzugeben und die erforderliche Abgabemenge über die Zeit konstant gehalten werden kann. Die nachfolgenden Abbildungen veranschaulichen die technische Umsetzung.

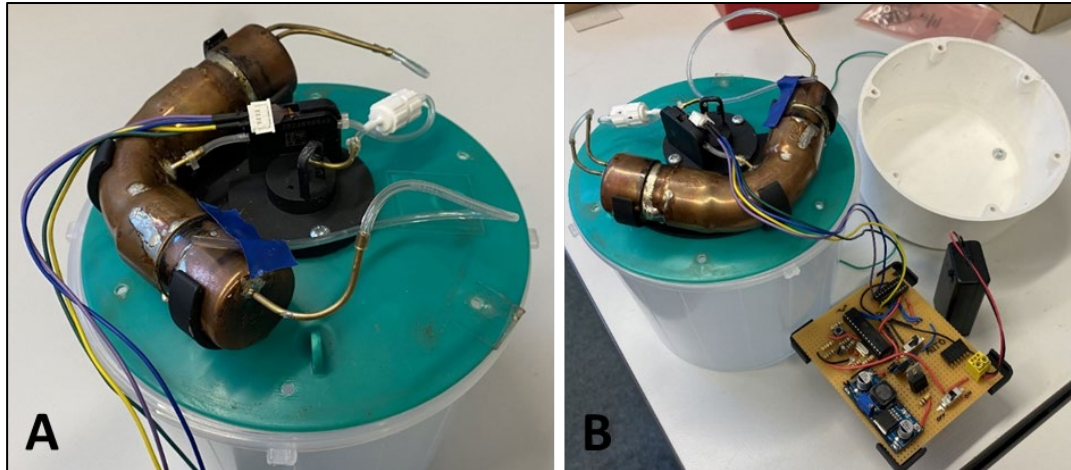


Abbildung 33: Tank, Pumpe und Rückschlagventil inkl. Schlauchsystem zur Abgabe von flüssigen Pheromonen

Der Aufbau der technischen Umsetzung ist so ausgelegt, dass die Flüssigkeitsmenge von mindestens 60 ml oberhalb eines Deckels der Standard-Variotraptrichterfalle innerhalb eines Tanks platziert werden kann. Um ein ungewolltes Auslaufen des Tanks zu verhindern, wurde die Pumpe oberhalb des Tanks platziert. Der Tank ist V-förmig gestaltet und an seiner tiefsten Stelle befindet sich das Röhrchen zum Absaugen des Pheromongemischs. Während der Versuchsphase wurde die elektronische Abgabesteuerung oberhalb des Tanks platziert. Vor dem Ausbringen der Falle wurde der enthaltene Mikrocontroller auf das verwendete Pheromongemisch abgestimmt programmiert, so dass eine definierte Menge der Lösung täglich zu einem festen Zeitpunkt abgegeben wird. In diesem Stadium wurde die Pheromonabgabe zunächst nicht von der zentralen Einheit der Falle gesteuert. Der komplette Aufbau wurde für ein Versuchsmuster im Freilandversuch wasserdicht unter einer Haube gekapselt. Die folgende Darstellung zeigt gut erkennbar den verwendeten Dochkörper. Er befindet sich somit an der bei der Variotrap-Trichterfalle vorgesehenen Stelle für die Pheromonabgabe.



Abbildung 34: Docht für flüssige Pheromonabgabe

Im unteren Bereich befindet sich eine Vertiefung, welche geringe Mengen an überschüssigem Pheromongemisch aufnehmen kann. Bei dem Aufbau des Funktionsmusters traten jedoch vereinzelt Probleme bei den kommerziell erworbenen Komponenten hinsichtlich der Dichtigkeit auf. Bei einigen der verwendeten Pumpen als auch diverser Rückschlagventile fiel die normalerweise vorhandene Ventilfunktion aus, was zu ungewollten Rückflüssen ins Reservoir führte. Dadurch entstanden bei den Dosierungen möglicherweise ungenaue Abgabemengen. Die Ursache dieser Effekte konnte final nicht ermittelt werden. Dies könnte auf Ungenauigkeiten bei der Herstellung der Komponenten, unbeabsichtigte Verunreinigungen oder chemische Unverträglichkeiten der verwendeten Lösungsmittel zurückzuführen sein.

Digital gesteuerte mechanische Abgabe konventioneller Feststoff-Pheromonköder

Für den Aufbau von Funktionsmustern zur Abgabe fester Pheromonköder wurden zwei verschiedene technische Umsetzungsvarianten berücksichtigt.

Diese Varianten dienten der Untersuchung von Effekten und Einflüssen, die sich durch eine Abgabe mehrerer Köder auf die Fangzahlen ergeben können. Alle für einen solchen Versuch erforderlichen Köder werden dabei bereits bei Ausbringen der Falle in einem Abgabereservoir platziert. Dabei wurde die Anzahl der für den Versuch erforderlichen Köder abhängig vom abzudeckenden Fangzeitraum definiert und ein zusätzlicher Köder im Abgabereservoir platziert, welcher nicht in die Falle ausgegeben werden sollte. Dieser zusätzliche Köder sollte dazu dienen, anhand der „Restbeladung“, d. h. der nach Versuchsende noch in ihm gespeicherten Pheromonmenge zu bestimmen, welchen Einfluss die nicht vollständige Abdichtung des Köderreservoirs auf die Köder hat. In der ersten technischen Umsetzungsvariante wurde ein sog. Blistersystem entworfen, welches einem Tablettenblisternachempfunden wurde. Durch manuelles Herausstechen mittels Stifts wurde ein Köder in den Auffangkorb befördert (vgl. Abbildung 35).



Abbildung 35: Blisterreservoir mit vier Ködern

Die zweite technische Variante basierte auf einem sich drehenden Karussell, bei dem die Köder durch metallische Kappen auf einer Metallplatte vor ungewünschter vorzeitiger Pheromonabgabe geschützt werden. Hier wurde neben den manuellen Abgabesystemen auch eine automatisierte Umsetzungsvariante entwickelt. Abbildung 36 zeigt die Umsetzung dieses zweiten Versuchsmusters.

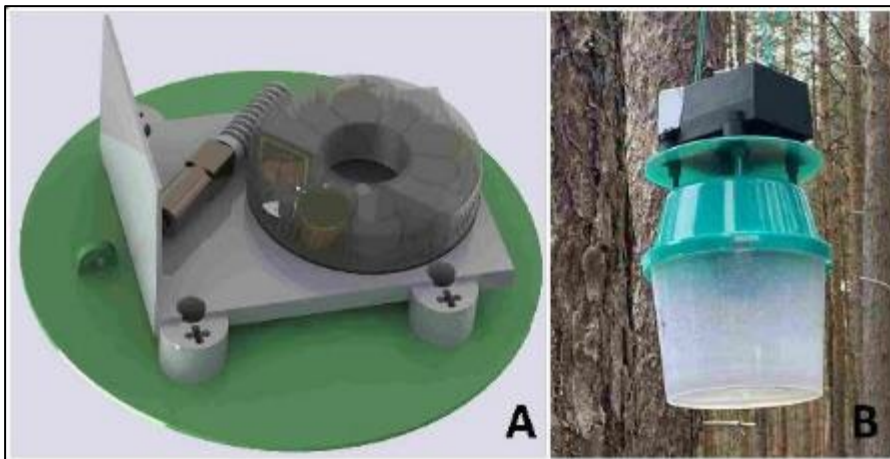


Abbildung 36: Automatischen Pheromonköderabgabe (links Modell, rechts im Freilandversuch)

Die Feststoffpheromonköder werden auch in dieser Variante vor dem Ausbringen der Fallen in den einzelnen Kammern platziert. Die Anzahl der Köder im Reservoir bestimmte sich hierbei aus dem für die Versuche festgelegten Fangzeitraum der Falter. Auch für diese Umsetzungsvarianten wurde dabei ein zusätzlicher Köderplatz für eine nachgelagerte Auswertung der Köderqualität zum Versuchsende vorgesehen. Der Aufbau wurde robust und einfach gehalten, um unerwartete Störungen durch Umwelteinflüsse zu minimieren. Kernstück der automatisierten Umsetzungsvariante ist ein hochunteretzter Getriebemotor mit nachgelagerter Spindel, welche nach definierten Zeitintervallen gedreht wird. Der Motor wird für ca. 120s gedreht, um von einer Köderabgabeposition zur nächsten zu gelangen. Im Anschluss an diese Drehbewegung des Reservoirs wird die elektronische Steuerung für 14 Tage in den Stand-By-Betrieb versetzt, um den Energieverbrauch zu minimieren. Dadurch genügte für einen 3-monatigen Außeneinsatz eine 9V Blockbatterie als Energiequelle.

Aus Gründen der Kostenreduzierung im Zusammenhang mit der Vielzahl für eine Auswertung von Ergebnissen der geplanten Versuche erforderlichen Versuchsmuster wurden ergänzend zu dem automatisierten Muster zusätzliche manuelle Karussellspender entworfen und hergestellt. Diese dienten im Rahmen der Feldversuche einer erweiterten Datenerhebung und hatten das Ziel, breiter angelegt mögliche Aussagen über die erzielte Lockwirkung durch wiederholte Köderabgabe zu erhalten. Abbildung 37 stellt die erste Entwicklungsvariante der Pheromonabgabe mit Köderwechselmechanismus dar.



Abbildung 37: Falle mit manuellem Köderkarussell im Freilandversuch

Im Rahmen der Freilandversuche mit ersten Versuchsmustern der automatisierten Abgabe von Festködern aus einem Reservoir (vgl. Abbildung 36) zeigte sich, dass sich die Fallenkomponente für die Festköderabgabe durch ihr Eigengewicht derart verformte, dass es zu Undichtigkeiten und zu Funktionseinschränkungen kam. Aufgrund der Größe und Form dieser ersten Muster für die Pheromonabgabe war es erforderlich, die gesamte Falle an dem Festködermodul, welches auf den Deckel der Variotrap-Trichterfalle montiert war, aufzuhängen. Ein entsprechendes Beispiel der entstandenen Verformungen zeigt die folgende Abbildung 38..



Abbildung 38: Verformter Deckel des automatischen Festködermoduls der ersten Generation

Im Zuge der Weiterentwicklung des Fallensystems wurden die Steuerungskomponenten für die Pheromonabgabe in das Hauptsystem integriert. Damit entfiel die Integration der Elektronikplatine innerhalb des Pheromonabgabedeckels. Mit dem nachfolgend erstellten neuen Design konnte die Komponente kompakter gestaltet werden (vgl. Abbildung 39). Vorgesehen sind hier insgesamt vier Abgabereservoirs, wobei sich die Abgabeöffnung für den Köder unter einem davon befindet. Beim Befüllen wird der erste Köder quasi direkt in den Fangkorb gelegt. In den drei anderen Reservoirs werden die Köder durch die Metalleinhausung vor einer Abdunstung geschützt. In das überarbeitete neue Design wurde ein Mikroschalter integriert, der der korrekten Positionierung während eines Abgabeprozesses der Köder dient. Mit dieser Erweiterung im Aufbau sollte gleichzeitig eine schnellere Inbetriebnahme und fehlerfreie Abgabe erzielt werden. Die Einhausung wird neu lediglich durch eine einzelne Schraube verschlossen, was die Praktikabilität des Befüllens im Vor-Ort-Einsatz bei den Freilandtests verbesserte. In der nachfolgenden Darstellung ist das neue Design der Komponente Pheromonabgabe mit Festködern abgebildet.

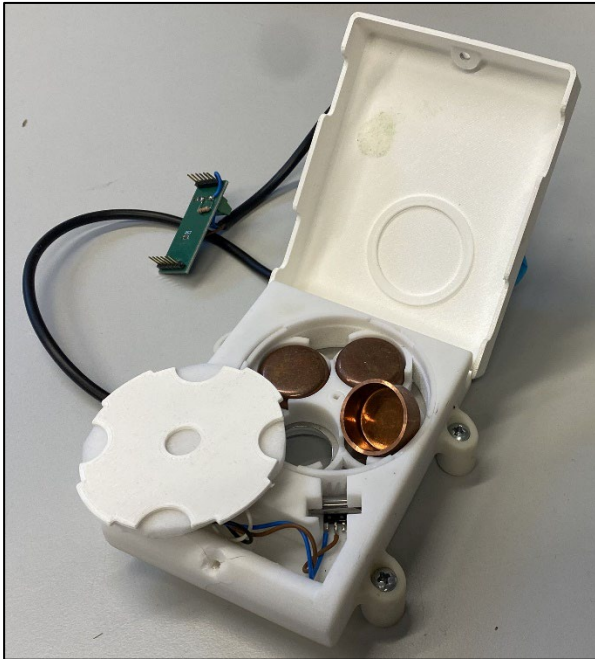


Abbildung 39: Modul zur automatischen Abgabe von Festködern

Das kompakte Design erlaubt nun wieder die Aufhängung der gesamten Falle an den vorgesehenen Laschen des Trichterfallendeckels, auf welchem die Pheromonabgabe befestigt wird. Im Zuge der weiteren Versuchsreihe wurden noch Anpassungen vorgenommen, die eine höhere Stabilität des Festköder-Pheromonabgabesystems ermöglichen. Gut zu erkennen ist in Abbildung 39 auch das überarbeitete Elektronikmodul zur Anbindung der Pheromonabgabe an die zentrale Steuerung der 2. Fallengeneration.

- Zukünftige Optimierungspotenziale des Aufbaus zur automatisierten Abgabe von Festköderpheromonen werden in folgenden Punkten gesehen und sind bei der Vorbereitung einer Prototypenentwicklung zu berücksichtigen: Optimierung des Aufbaus im Hinblick auf den Prozess des Befüllens, d. h. der Handhabung der Komponente während des Befüllvorgangs mit Pheromonködern. Idealerweise sollte ein Befüllen ohne Werkzeug angestrebt werden.
- Minimierung der Einzelkomponenten für den technischen Aufbau durch Kombination und Integration. Während des Befüllens des Pheromonabgabesystems in der Versuchsmusterphase konnte der Aufbau diesbezüglich noch nicht optimiert werden. Entsprechend hoch war die beim Befüllprozess anfallende Zahl an Einzelkomponenten bzw. Einzelteilen. Da diese während der Handhabung beim Befüllen herunterfallen und verloren gehen können, ist der Füllprozess der Versuchsmuster noch erschwert.
- Vereinfachung und damit einhergehende Steigerung der Robustheit bei der automatischen Erkennung der korrekten Auswurfposition eines Köders im Abgabeprozess.
- Optimierung der Integration der Pheromonabgabekomponente in den Aufbau einer handelsüblichen Trichter- oder Variotrap-Trichterfalle. Zu prüfen wäre hierbei beispielsweise die Gestaltung eines kompletten, eigenständigen Deckelmoduls, welches in der Phase der Prototypenentwicklung gleichsam wetterbeständig bzgl. Regen, Temperaturschwankungen, Sonneneinstrahlung und Windeinfluss gestaltet sein sollte. Dies setzt die Auswahl geeigneter Materialien und Fertigungstechnologien voraus.
- Vereinfachungen der elektrischen Verbindungen zur Hauptbaugruppe, d. h. die erforderlichen Verdrahtungen sind innerhalb des Gesamtsystems integriert.

Funktion Fangen und Zählen der Fänge mittels Sensorik

Zählsensorik unter Einsatz kapazitiver Sensoren in Kombinationen mit Lichtschranke

Die im Arbeitspaket 2 entwickelten Konzepte wurden umgesetzt und drei Zählfallen aufgebaut. Der Aufbau erfolgte modulweise mit jeweils einem Test auf Funktionstüchtigkeit und Reproduzierbarkeit.

Sensormodul

Im ersten prototypischen Versuchsaufbau (Trap 1) wurden die Infrarotdioden und Infrarotreceiver per Hand auf eine Lochrasterplatine gelötet. Mittels Potentiometer und Oszilloskop wurden die Schaltfrequenzen für die Infrarotdioden exakt auf 30 kHz, 38 kHz und 56 kHz auf die entsprechenden Empfangsfrequenzen der Receiver eingestellt. Alle Komponenten wurden einzeln mit Drähten verbunden (Abbildung 40).

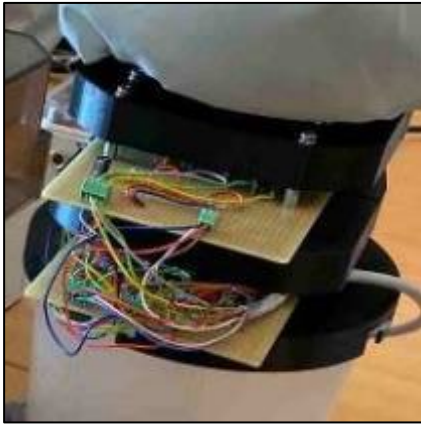


Abbildung 40: Handgelöteter Aufbau des Sensormoduls auf Lochrasterplatten

Der Aufbau wurde zunächst im Labor getestet und im Anschluss für den Einsatz im Feld freigegeben.

Für die Duplizierung des ersten Aufbaus zur Herstellung von zwei weiteren Systemen wurde für den Schaltplan ein Layout entworfen und Platinen für eine SMD (Surface Mounted Device)-Bauteil-Bestückung angefertigt (vgl. Abbildung 41).

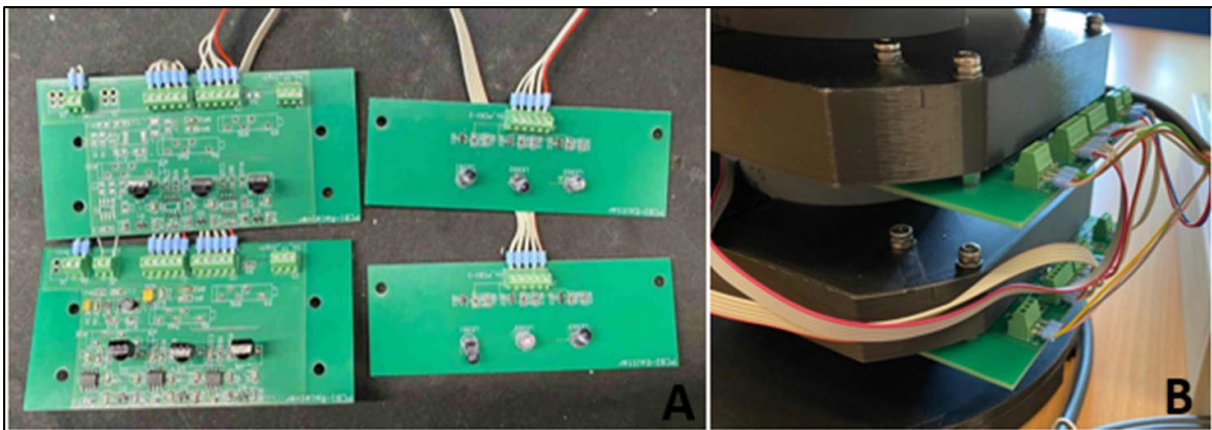


Abbildung 41: SMD-Bestückte Zählmodulplatinen (A), Im Versuchsmuster verbaute Platinen (B)

Durch die SMD-Bestückung lassen sich die Platinen erheblich besser konfektionieren und miteinander verbinden. Hierdurch ist der erste Schritt für eine spätere Vervielfältigung erreicht. Beide Aufbauten wurden unter Laborbedingungen getestet und für den Freiland-Einsatz freigegeben.

Um das Sensormodul im Freilandversuch gegenüber Witterung und sonstigen mechanischen Einflüssen zu schützen, wurde in mehreren Iterationen eine Schutzhaube entwickelt (Abbildung 42).

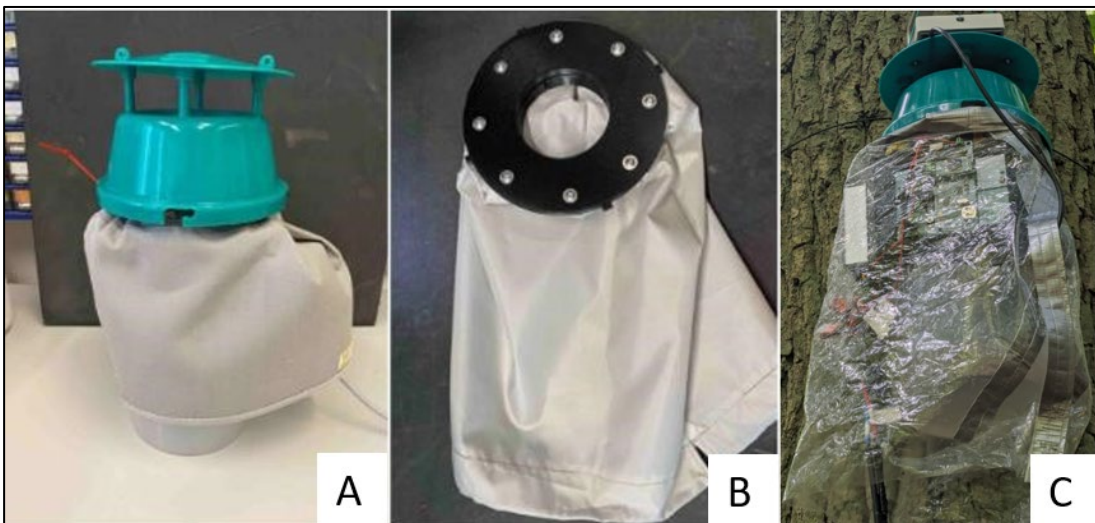


Abbildung 42: Fallenüberzug - Variante 1 (A), Fallenüberzug - Variante 2 (B), Fallenüberzug – Variante 3 (C)

Während dieser Iterationen und verschiedenartiger Test stellte sich heraus, dass eine raue Oberfläche des Schutzmaterials negative Eigenschaften beim Ableiten von Flüssigkeiten hat und dass sich bei Falten im Stoff Zielobjekte der Falle (Falter) ungewollt in der Hülle verfangen könnten. Die in der rechten Abbildung dargestellte Variante 2, in der Wetterschutzmaterial mit Lotuseffekt für die Ummantelung verwendet wurde, hat im Freilandtest gute Ergebnisse erzielt. Durch die Vermutung, dass der durch den Wetterschutz abgedunkelte Fangbehälter einen stärkeren Lichtreiz in Richtung der Fallenöffnung erzeugte und dies zu den geringen Fangzahlen führte, entschied man sich ab den Versuchen mit Schwammspinner und Nonne für die Verwendung eines transparenten Wetterschutzes (Variante 3), um diesen Einfluss zu minimieren.

Kameramodul (nur für Trap 1)

Die Kamera zeichnet Bilder mit einer Auflösung von 1.456 x 1.088 px bei einer Bilderfassungsrate von 15-20 Bildern pro Sekunde auf. In einem Messzeitraum von 8-10 h (lichter Tag) entstehen ca. 500.000-700.000 Bilder die eine Kapazität von 1-2 TB benötigen. Für die Erfassung hochwertiger und interpretierbarer Kamerabilder, muss die Entfernung zwischen Kamera und Falle ca. 2,00 bis 3,00 m betragen. Das Kameramodul wird über ein USB2-Kabel mit dem Datenakquirierungs- und Speichermodul verbunden. Wichtig für den Betrieb im Außengelände ist ein IP65-Schutz. Dazu wurde ein externes Gehäuse konzipiert, in welches die Kamera und das Objektiv integriert wurden (vgl. Abbildung 43).



Abbildung 43: Kamera in IP65-Gehäuse auf Stativ (oben)

Das Kameramodul kann über einen Teleskopmechanismus von 1,50 m bis 3,00 m in der Höhe verstellt werden.

Datenakquirierungs- und Speichermodul

Das Datenakquirierungs- und Speichermodul besteht aus den folgenden Komponenten:

- Raspberry IV (Trap 1) bzw. Raspberry Zero W (Trap 2 und Trap 3) zur Steuerung
- Spannungswandler
- Master-Brick (Sensormaster)
- Digital IO-Bricklets (Sensoren)
- Schalter und LEDs
- 144 Wh-Powerbank (Trap 1)
- 40 Wh-Powerbank (Trap 2 + 3)

Alle notwendigen Teilmodule wurden in ein Gehäuse mit transparentem Deckel untergebracht, so dass Status-LEDs leicht abzulesen sind. Hier wurde sich ebenfalls für ein robustes IP65-Gehäuse für den Außeneinsatz entschieden.

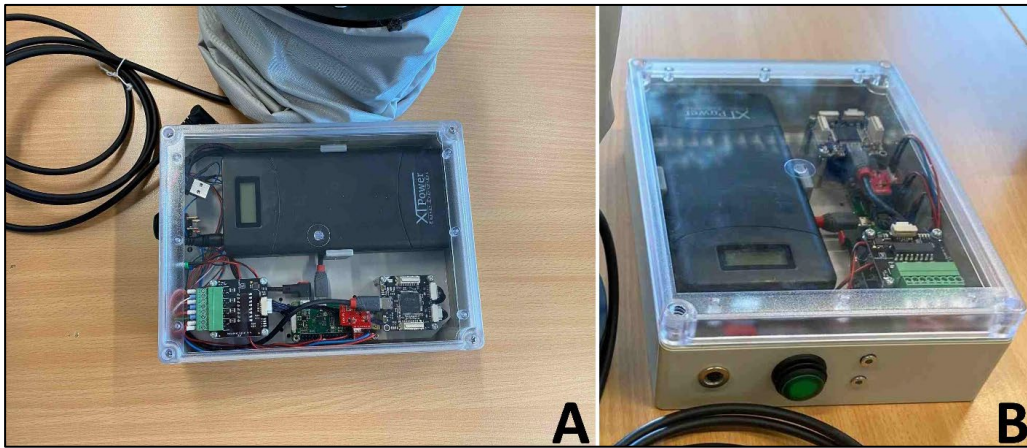


Abbildung 44: Elektronikmodule im IP65-Gehäuse - Draufsicht (A), Frontansicht (B)

Zusätzliche Bedienelemente und Statusanzeigen wurden von außen zugänglich in das Gehäuse integriert.

Für die kameraunterstützte Zählfalle wird ein externer Akku in einem separaten Gehäuse verwendet. Der Akku der anderen beiden Fallen ist in der ersten Iteration im Inneren des Gehäuses mit den Elektronikkomponenten verstaут, die Sensoreinheit wird jeweils über einen Industriesteckverbinder angeschlossen.



Abbildung 45: Großes Multi-Akku-Pack für kamerabasierte Zählfälle

Um die Laufzeit von 5 Tagen im Freiland weiter zu erhöhen, wurden der 144 Wh- Motorrad-Lithium-Akkumulator und die 40 Wh-Powerbank für 720 Wh-KFZ-Akkumulatoren ersetzt. Dadurch wurden die Laufzeiten der Zählssysteme auf über 20 Tage erhöht.



Abbildung 46: Batteriekasten mit KFZ-Akkumulator und Spannungswächter

Das Auslesen der Daten erfolgt beim Zählsystem mit Kamera über das Kopieren der Festplatte. Bei den Zählsystemen ohne Kamera öffnet der Raspberry einen WLAN-Hotspot, über den man sich auf dem Device einloggen und die Messdaten auf einen PC übertragen kann.

Tabelle 16: Zyklisch ablaufende Teilroutinen auf dem Datenakquirierungsmodul

Nr	Teilroutine	Trap 1	Trap 2	Trap 3	Datenformat und Speicherort	Zeitpunkt
1	Erfassung der Fallenumgebung mit Kamera	x			Bild auf Festplatte	20x pro s
2	Speichern eines auftretenden Events (Zeitstempel und Lichtschranken-ID) an einer Lichtschranke in Ebene 1	x	x	x	CSV-Datei auf Festplatte bzw. internem Speicher	event- bzw. interruptbasiert
3	Speichern eines auftretenden Events (Zeitstempel und Lichtschranken-ID) an einer Lichtschranke in Ebene 2	x	x	x	CSV-Datei auf Festplatte bzw. internem Speicher	event- bzw. interruptbasiert
4	Erfassung Systemstatus (Akkustand, Brickletstatus...)	x	x	x	Log-Datei auf Festplatte bzw. internem Speicher	1x pro min

Nach dem Einschalten des Datenakquirierungsmoduls der Fallensysteme startet eine automatisierte Routine zur Erfassung von einfliegenden Faltern und zum Abspeichern der betreffenden Ereignisse an den Lichtschrankenmodulen.

Alle Teilmodule sowie die Gesamtsysteme wurden getestet.

Versuch unter Laborbedingungen

Die ersten Versuche mit dem automatisierten Zählmodul wurden nicht in der Freifläche, sondern unter quasi-konstanten Bedingungen (Licht, Wärme, Wind) im Juni 2022 durchgeführt. Ziel war es, die technischen Systeme für einen längerfristigen Außeneinsatz zu qualifizieren und mögliche Fehler zu beseitigen. Dazu wurde beim Projektpartner in Göttingen ein großes, abgeschlossenes Zelt errichtet, in dem das kameraunterstützte Zählmodul (Trap 1) installiert wurde und gezüchtete Falter freigelassen wurden (vgl. Abbildung 47). Eine ausführliche Beschreibung dieser Testumgebung ist im folgenden Kapitel „Konzeption von Testumgebungen“ zu finden.



Abbildung 47: Zeltversuch

Freilandversuch

Nach der Qualifizierung der drei Messsysteme zur automatisierten Zählung von Faltern wurden ab Juli 2022 Versuche in der Altmark im Revier Bretsch durchgeführt. Dazu wurden jeweils drei Hexagone im Wald errichtet. Ein Hexagon besteht aus drei technisch manipulierten Fallensystemen (Versuchsmustern), drei normalen Fallen (Standard-Variotrap-Trichterfalle) und einer Leerfalle in der Mitte. In jedem der drei Hexagone ist eine Falle mit einem Zählmechanismus ausgestattet.

Abbildung 48 dokumentiert den Versuchsaufbau zur Überwachung des Anflugverhaltens von Nonnenfaltern mittelsameratechnik.



Abbildung 48: Fallensystem mit Zählmechanismus und Kameraüberwachung in Kiefernbestand

Abbildung 49 zeigt den Gesamtaufbau der digitalen Zählfalle und die elektronische Steuerungseinheit des digitalen Fallensystems mit Lichtschranke.

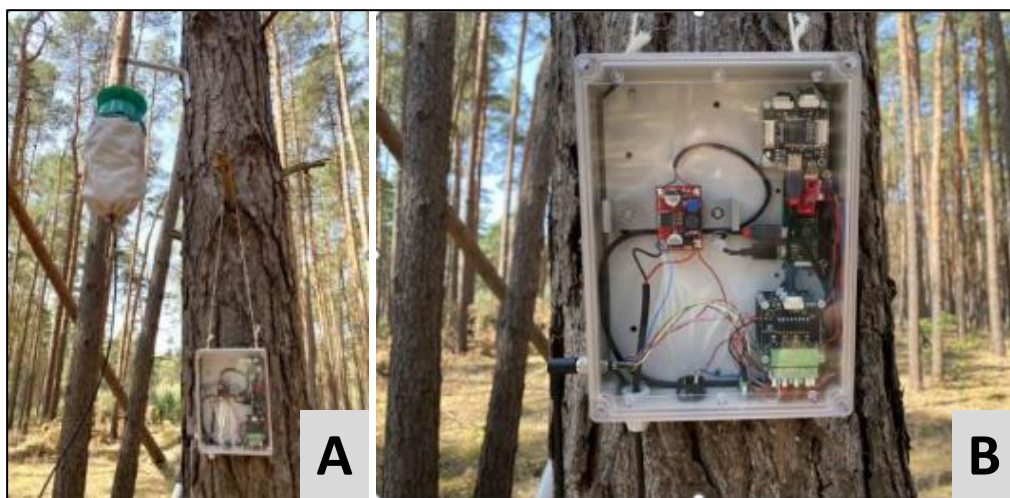


Abbildung 49: Fallenaufbau Zählfalle in Kiefernbestand (A), Elektronikmodul für Zählfalle (B)

Software-Tool zur Analyse des Anflugverhaltens und zur Auswertung von Zählereignissen

Die Kamera zeichnet an einem Tag ca. 500.000 Bilder auf. Um diese Bilder gezielt und schnell auszuwerten, wurde eine Software programmiert. Mittels der Software lassen sich:

- Messzeiträume auswählen,
- Zählereignisse auflisten und nach Zeit und Sensor sortieren,
- Ausgelöste Sensor-ID identifizieren,
- den Zeitraum von 2min vor bis 30s nach einem Ereignis analysieren (Anzeige zugehöriger Kamerabilder),
- Bilder komprimieren.



Abbildung 50: Software-Tool zur Analyse des Anflugverhaltens und zur Auswertung von Zählereignissen

Funktion Energieversorgung

Auf Grund der im Jahr 2022 noch fehlenden Kenntnis darüber, wie viel elektrische Leistung das künftige finale Fallensystem durchschnittlich und maximal umsetzen wird, ließen sich bisher nur Szenarien annehmen und untersuchen (siehe Abbildung 21). Ein konkretes Funktionsmuster für die Energieversorgung der Fallensysteme war nicht vorgesehen.

Um ein Fallensystem mit nur einer Akkuladung über einen Zeitraum von ca. 3 Monaten mit Energie versorgen zu können, müsste ein vergleichsweise großer, schwerer und teurer Akkumulator eingesetzt werden (siehe Abbildung 20). Um dem vorzubeugen, wurde untersucht, wie viel Energie durch den zusätzlichen Einsatz eines Solarpanels gewonnen werden kann. Die Ergebnisse sollen der Neudimensionierung der benötigten Akkumulatorkapazität in Verbindung mit der geforderten Mindestlaufzeit von ca. 3 Monaten dienen.

Um die Energieausbeute durch Einsatz eines Solarpanels möglichst realistisch einschätzen zu können, wurde ein Messaufbau konzipiert, bei dem ein Solarpanel an einem potenziellen Fallenstandort angebracht und dessen Momentleistung in kurzen, einminütigen Intervallen bestimmt und protokolliert wird. Ein vereinfachter technischer Entwurf ist der nachfolgenden Abbildung 51 zu entnehmen.

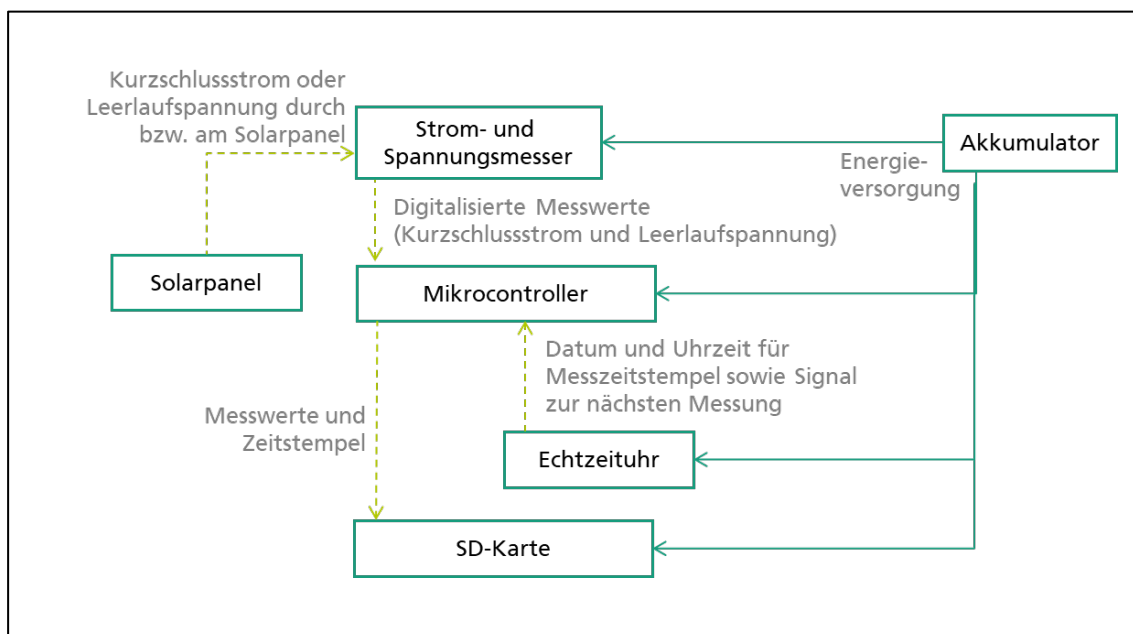


Abbildung 51: Technischer Entwurf eines Messsystems zum Messen und Loggen solarer Leistung

Der Akkumulator wird nicht über das Solarpanel geladen, sodass auf ein Solarladeregler verzichtet werden konnte. Das Messsystem ist entsprechend stromsparsam konzipiert, sodass mit einem der bereits verfügbaren 720 Wh KFZ-Akkumulatoren ein mehrwöchiger Betrieb mit nur einer Akkuladung möglich ist.

Die einzelnen elektronischen Bauteile wurden für dieses System per Hand auf eine Lochrasterplatine gelötet und miteinander verbunden.

Relevante Kenndaten der eingesetzten Komponenten:

- KFZ-Akkumulator
 - 720 Wh Kapazität
- 12 V Nennspannung
- Monokristallines Solarmodul
 - Max-Werte: Leerlaufspannung 24 V, Kurzschlussstrom 1,62 A
 - Nennspannung 12 V
 - Nennleistung 30 W
 - Füllfaktor 0,772
- Strom- und Spannungssensor
 - 12 Bit Auflösung (0,8 mA bei Messbereich von $\pm 3,2$ A)
 - 0,1 Ohm Messwiderstand
 - 1 % maximale Abweichung des realen Widerstands vom Nennwiderstand

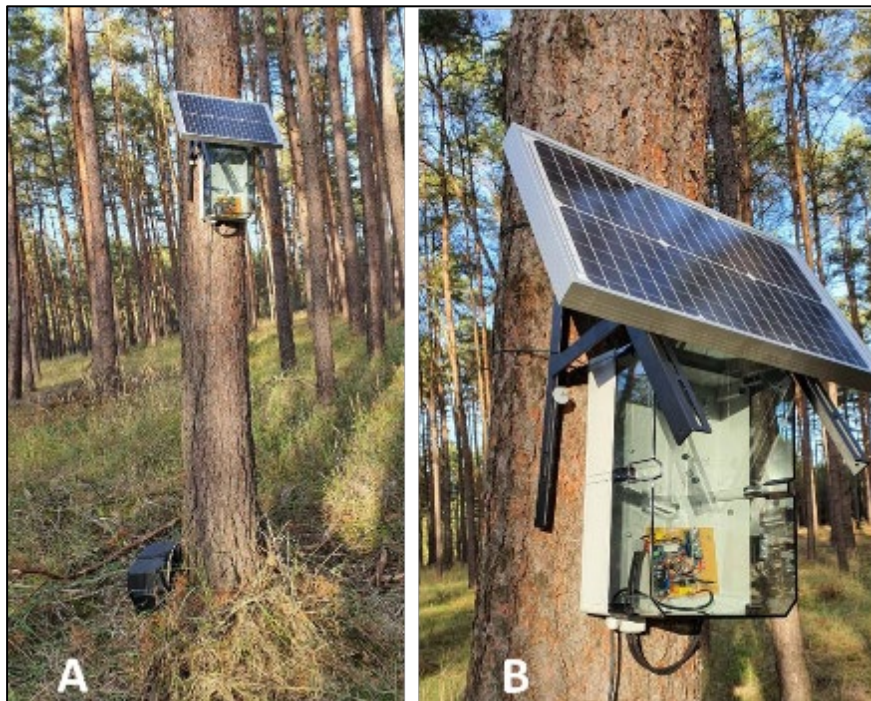


Abbildung 52: Messsystem Solarertrag im Wald: (A) Gesamtansicht, (B) Nahaufnahme

Methodik:

Es werden kurz nacheinander der Kurzschlussstrom und die Leerlaufspannung am Solarpanel gemessen und mit dem dazugehörigen Zeitstempel auf einer SD-Karte gespeichert. Dieses Messen und Protokollieren erfolgt automatisiert und wiederholt in einem Intervall von einer Minute. Aus den Messwerten und dem modellabhängigen Füllfaktor des Solarpanels kann im Prozess der Auswertung die maximale elektrische Leistung (im MPP) am Solarpanel zum Messzeitpunkt berechnet werden. Unter der vereinfachten Annahme linearer Steigungen / Gefälle der elektrischen Leistung zwischen aufeinanderfolgenden Messungen wird der solare Energieertrag über Zeiträume (Stunden, Tage, Wochen) dann mittels Integration aus den Messwerten berechnet. Vorgesehen ist, die Messungen mindestens 1 Woche autonom am potenziellen Fallenstandort laufen zu lassen.

Funktion Automatisches Entleeren der Falle (Abtöten von Zielorganismen)

Pilotversuch Abtötung mit Strom

Zu einer technischen Lösung des Abtötens von Schmetterlingsfaltern mit Strom hat die NW-FVA einen Tastversuch mit mehreren marktgängigen Kleingeräten durchgeführt. Zentral waren dabei die folgenden Fragestellungen:

- Sind herkömmliche Geräte dazu geeignet Schadschmetterlinge von der Größe eines Kiefernspinner-Männchens zu töten?
- Erfolgt die Tötung bei Erstkontakt?
- Wie hoch ist die benötigte Spannung?
- Wie ist das Verhalten der Tiere bei Kontakt mit den stromführenden Leitern?
- Wie unterscheiden sich das aktive Anfliegen und das passive Anfliegen?

Als Versuchstiere werden Schwammspinner ♀, Kiefernspinner ♂ und kleiner Frostspanner ♂ verwendet. In diesem Versuch wurden verschiedene Geräte getestet. Im Folgenden werden für diese Anwendung relevante Spezifikationen der vier eingesetzten Geräte aufgeführt:

Röhrich – Fliegenklatsche

- Nur ein Gitter (ohne Sicherheitsgitter)
- Lt. Hersteller geeignet für Fliegen, Mücken (Moskitos), Wespen, Stech- und Schmeißfliegen

2x AA Batterien

- 3000V lt. Hersteller (2kV Kondensator verbaut)

Night Cat Electric Fly Swatter

- Doppertes Gitter (Sicherheitsgitter)
- 3000V lt. Hersteller (2kV Kondensator verbaut)
- Lithium-Polymer-Akku (1200 mAh)
- Lt. Hersteller geeignet Fliegen, Mücken, Insekten und andere kleine Insekten abzutöten

Yissvic electric mosquito swatter

- Doppertes Gitter (Sicherheitsgitter)
- 4000V lt. Hersteller (? Kondensator? Nicht ersichtlich)
- Kann lt. Hersteller Moskitos, Motten, Fruchtfliegen und andere fliegende Insekten effizient töten
- Lithium-Polymer-Akku (1500 mAh)

Mosquito Swatter Model: DWP01-1

- Doppertes Gitter (Sicherheitsgitter)
- 3000V lt. Hersteller (? Kondensator? Nicht ersichtlich)
- Lithium-Ionen-Akku (1200 mAh)
- Lt. Hersteller geeignet für Mücken, Fruchtfliegen, andere Fliegen und Motten

Durchführung:

Der Versuch wurde unter einem Laborabzug durchgeführt, in dem die zu testenden Geräte an einer Stativklemme befestigt wurden. Die Versuchstiere wurden in eine Plastikschaale mit Klarsichtdeckel eingebracht, sodass ein Kontakt mit den stromführenden Leitern erzwungen wurde.

Versuchsaufbau

Im ersten Schritt wurden die Tiere auf die horizontal positionierten Geräte gesetzt. Dann wurde die Stromzufuhr aktiviert. Dabei wurde darauf geachtet, dass die Versuchstiere einen Kontakt zu dem leitenden Drahtgitter herstellen und gegebenenfalls wurden die Tiere aufgeschreckt um dies zu erreichen.

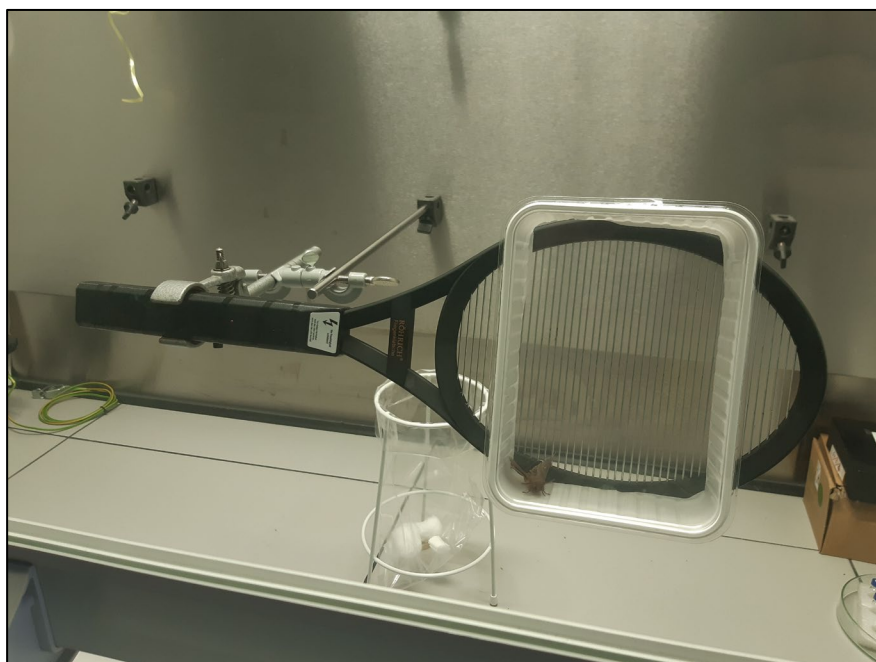


Abbildung 53: Laborversuch Abtötung: Versuchsaufbau elektrische Abtötung, vertikale Ausrichtung der Testgeräte

Erste Vorversuche zeigten sehr schnell, dass die Geräte „Night Cat Electric Fly Swatter“, „Yissvic electric mosquito swatter“ und „Mosquito Swatter Model: DWP01-1“ aufgrund der verbauten Sicherheitsgitter für diese Art der Abtötung ungeeignet sind. Die für den Haushaltsgebrauch sinnvollen Sicherheitsgitter verhinderten einen direkten Kontakt der Versuchstiere mit den stromführenden Leitern.

Daher wurde der Versuch mit dem Gerät der Firma Röhrich-Klatsche weitergeführt, das aufgrund seiner Bauweise am ehesten einen Stromkreisschluss bei flüchtigen Berührungen ermöglicht. Um den Tötungserfolg bei aktivem Anfliegen an das Gitter zu testen, wurde die Fliegenklatsche vertikal positioniert (Abbildung 53).

Dann wurden flugaktive, männliche Falter in die Plastikschele gesetzt, ohne das Gitter zu berühren (vgl. Abbildung 54) und nach Einschalten des Gerätes durch kurze Erschütterungen der Plastikschele dazu gebracht selbstständig an das Gitter zu fliegen.



Abbildung 54: Laborversuch Abtötung: Elektrische Abtötung ohne Sicherheitsgitter

Ansatz Abtötung mit Laser

Für das Abtöten mittels Laser wurden Recherchen durchgeführt, um auszuloten, ob dieses Verfahren in Betracht gezogen werden kann. Die thermische Energie eines geeigneten Lasers reicht aus, um Faltern eine tödliche Energiedosis zu verabreichen. Zum Einsatz wären Diodenlaser mit einer Leistung über 5 W geeignet. Mit abnehmender Leistung eines Lasers muss jedoch die Fokussierung auf das zu erhitzende Objekt mit hoher Genauigkeit positioniert werden. Die Strahlqualität eines realen Lasers mit geringer Leistung reicht nicht aus, einen Kanalbereich, den der Falter durchfliegen muss, über die komplette Kanaltiefe und -breite mit ausreichender Wärmeleistung pro Fläche abzudecken. Der sogenannte Brennfleck müsste hierfür an die optimale Position, also die Falteroberfläche, nachgeführt werden.

Die dafür erforderlichen technischen Umsetzungen zum Nachführen und Positionieren sind jedoch sehr komplex und aufwendig und für eine Integration innerhalb einer Falle ungeeignet. Erst ab Laserleistungen über 50W kann auf ein zusätzliches Fokussieren verzichtet werden. Ein Ablenken des Lasers über die gesamte Breite des Kanals ist aber weiterhin erforderlich. Module dieser Leistungsklasse sind in ihrer Dimensionierung für den vorgesehenen Einsatz jedoch zu groß.

Ein schnelles Vorbeifliegen eines Zielobjektes kann dazu führen, dass auch bei optimaler Fokuslage die eingebrachte Energiemenge nicht ausreicht, den Falter schnell abzutöten, sondern nur sehr schwer zu verletzen, was einen eher qualvollen Tod nach sich ziehen würde.

Ein weiterer Aspekt, der zum Verwerfen dieser Methode führte, ist die Gefahr, dass z. B. durch Wind brennbares Material versehentlich entzündet wird. Zusätzlich birgt der Umgang mit Lasern dieser Leistungsklasse große Risiken für den Bediener und kann bei unsachgemäßem Umgang zu schweren Verletzungen führen.

Darüber hinaus wird für die technische Umsetzung des Nachführens des Laser-Brennpunktes auf den Zielfalter eine aufwendige optische Ziel-Sensorik benötigt. Abgesehen davon, dass eine Abtötung der Zielorganismen mittels Lasertechnologie aufgrund der beschriebenen technischen Zusammenhänge für die konkrete Anwendung ungeeignet erscheint, wäre die Zielerfassung durch ein optisches Verfahren (Hochgeschwindigkeitskamera) absehbar deutlich energieintensiver als der Betrieb des Lasers. Vor diesem Hintergrund wird das Verfahren als technisch und energetisch unpraktikabel für den Einsatz im digitalen Fallensystem ausgeschlossen.

Pilotversuch Abtötung mechanisch

In Vorbereitung eines ersten „Tastversuchs“ für Umsetzungsoptionen des mechanischen Abtötens gefangener Falter wurde ein Funktionsmuster zunächst als 3-D-Modell entworfen (Abbildung 55). Potenziell könnte der vorgeschlagene Aufbau als Erweiterung der Komponente zur Erfassung der Zielorganismen im Fallenaufbau platziert werden. Das Abtöten erfolgt bei diesem Ansatz durch eine sich schnell bewegende Klinge im Detektionskanal. Wird ein Falter als solcher identifiziert (das Zählmodul wurde aktiviert) führt ein elektromagnetischer Aktor eine Hubbewegung aus und lässt dadurch eine drehbar gelagerte Klinge durch den Einflugkanal zur Falle schwenken. Dies soll eine tödliche Verletzung des Falters verursachen. Die Positionierung des Messers soll in unmittelbarer Nähe der optischen Sensoren (im Bild nicht dargestellt) erfolgen.

Der zunächst virtuelle Aufbau dieses Musters im Jahr 2022 bildete im Weiteren die Grundlage für Abstimmungen mit den Projektpartnern bezüglich der Praktikabilität.

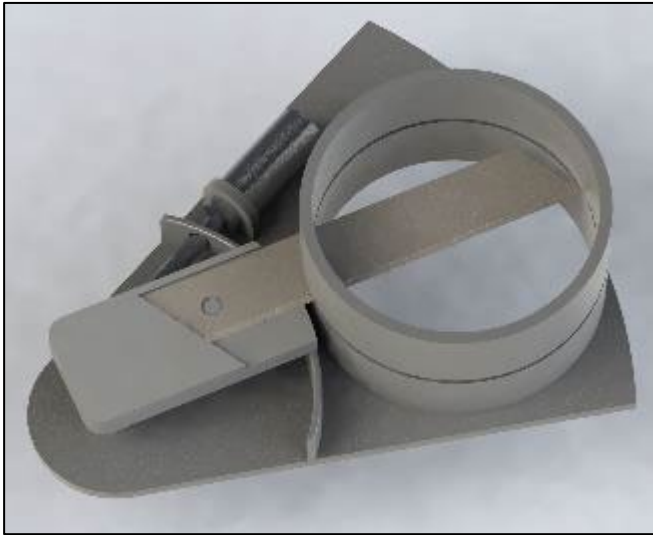


Abbildung 55: Virtuelle Darstellung des Funktionsmusters zum mechanischen Abtöten

Im Jahr 2023 wurde das erstellte virtuelle Funktionsmuster einer Lösung zum mechanischen Abtöten der Falter mit dem Ziel eines grundlegenden Funktionstests geringfügig modifiziert und ein rotatorischer Antrieb eingesetzt. Als potenziell zielführend wurde das Abtöten mit einer schnell bewegenden Klinge erachtet. Der Vorteil dieses Mechanismus besteht theoretisch darin, dass die Ausflugsöffnung nicht versperrt ist und eine schnelle Reaktion durch einen entsprechend dimensionierten Antrieb möglich ist. Es wurde ein einfaches Funktionsmuster für den Semifreilandversuch konstruiert, gefertigt und an einer Spezies getestet. Hierbei wurde in einem Behälter ein Köder gelegt. Durch einen Schalter konnte ein Bediener das sich schnell drehende Messer aktivieren. Ziel dieses Versuches war es herauszufinden, inwiefern eine solche Mechanik den Anflug von Schmetterlingen beeinflusst oder stört und ob damit ein effizientes Abtöten ermöglicht werden konnte. Konkret sollte ebenfalls untersucht werden, wie schnell sich die rotierenden Messer drehen können bzw. müssen.

Die konstruktive Umsetzung des Funktionsmusters zur mechanischen Abtötung ist in Abbildung 56 dargestellt. Die Versuchsdurchführung mit dem Funktionsmuster stellte sich jedoch als schwierig heraus, da der Rotationslauf der Klingeln wenig Spiel hatte und somit leicht verkantete. Nach erfolgreicher Durchführung mehrerer Testläufe ohne Testorganismen verhakte sich das System und die Messer beschädigten die Gehäusefassung. Daraufhin war der sichere Lauf der rotierenden Klingen nicht mehr gegeben und die Versuche mussten eingestellt werden. Auch die Größe des Gesamtaufbaus entspricht nicht den Zielen einer kompakten Falle.



Abbildung 56: Versuchsaufbau Abtöten der Zielorganismen mittels rotierender Klinge

Bei der Entwicklung der Komponente sind sicherheitsrelevante Aspekte zu berücksichtigen. Es besteht die Gefahr, dass Nichtzielorganismen von unten in die Öffnung gelangen und dadurch verletzt werden könnten.

Zudem stellen rotierende Klingen ein Risiko dar, insbesondere für Kinder, die ihre Hand in Öffnungen stecken könnten. Unter der Annahme, dass ein unmittelbares Abtöten der Zielspezies nicht notwendig ist, wurde im Jahr 2024 ein weiteres Funktionsmuster entwickelt.

Basierend auf dem im Abschnitt Konzeption beschriebenen Prinzip des automatisierten Entleerens des Fallenbehälters entstand der in Abbildung 57 dargestellte Auffangbehälter. Dieser ist in zwei Bereiche unterteilt. Im oberen Bereich befindet sich die Einflugzone, die sich an der bestehenden Variotrap-Trichterfallenkonstruktion orientiert. Hier ist zudem der Antrieb für den unteren Bereich platziert. Der obere Bereich ist ausreichend groß dimensioniert, damit die Zielspezies ungehindert einfliegen kann. Die Wände bestehen aus transparentem Kunststoff. Im unteren Bereich befindet sich die Auswurf- und Quetschmechanik, die durch ein zwischen den beiden Bereichen platziertes Zahnrad angetrieben wird.

Durch die gewählte Übersetzung arbeitet die Mechanik sehr langsam und entleert den Behälter innerhalb von 35 Sekunden vollständig. Der untere Bereich ist großzügig gestaltet, um sicherzustellen, dass alle auf dem Boden liegenden Elemente, verendete Tiere als auch hereingewehte Pflanzenreste, problemlos aus der Falle befördert werden. Zusätzlich sind im mittleren Bereich fünf stumpfe Finger angebracht, die an den Behälterwänden anhaftende Schmetterlinge durch Quetschwirkung aus dem unteren Bereich des Behälters herausbefördern. Um ein Blockieren der Mechanik durch größere Nichtzielorganismen zu verhindern, wurde eine zusätzliche große Öffnung integriert, die während des Entleervorgangs im mittleren Teil des Behälters entsteht. Die langsam drehende Mechanik bietet diesen gefangenen Nichtzielorganismen ausreichend Zeit, in den oberen Bereich des Behälters zu gelangen und durch die entstandene Öffnung zu entkommen. Möglicherweise sollte auch eine kurze Pause der Drehmechanik die Fluchtmöglichkeit positiv unterstützen.

Dieses Design ermöglicht eine effiziente und störungsfreie Entleerung des Behälters, während gleichzeitig ungewollte Blockaden durch größere Tiere vermieden werden. Während der Präsentation des Entwurfs zu den KWF-Thementagen gab es bereits erstes Feedback zur Gestaltung der Komponente. Demnach sollte die vorhandene abgerundete Formgebung aus Sicht der praktischen Anwendbarkeit überarbeitet werden, so dass ein problemloses Abstellen der Falle in jeder Situation möglich ist, ohne dass diese umkippt. Ein weiterer Hinweis betrifft die eher selten auftretenden Fälle, dass größere Nichtzielorganismen (Mäuse/ Fledermäuse u.ä.) in die Fallen gelangen. Die vorgesehene größere Fluchtöffnung im Konzept ist möglicherweise nicht erforderlich. Sie kann einerseits das Risiko bergen, dass Zielorganismen, die nicht vollends verendet sind, die Falle im Entleerungsprozess ohne mechanische Einwirkung verlassen könnten. Andererseits ist davon auszugehen, dass die betreffenden größeren Nichtzielorganismen durch die Fallen mit Leerungskomponente aufgrund des ausbleibenden Verwesungsgeruchs und/oder anderer, solche Fraßfeinde anlockender Eigenschaften, nicht mehr in die Fallen gelangen werden.

Eine sorgfältige Evaluierung der Notwendigkeit und der potenziellen Auswirkungen dieser Öffnung ist daher unerlässlich, um die Funktionalität der Falle zu gewährleisten und sicherzustellen, dass weder die unbeabsichtigte Freisetzung unbeeinträchtigter Zielorganismen noch eine potenzielle Steigerung der Fängigkeit für Fraßfeinde unbeabsichtigte negative Folgen für das Gesamtkonzept der Falle nach sich zieht.

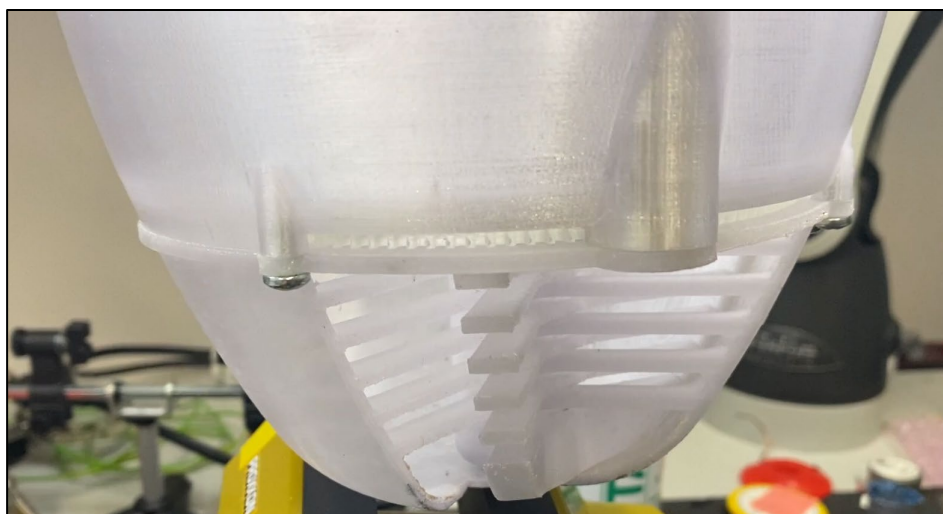


Abbildung 57: Versuchsaufbau zum Entleeren des Fallenbehälters

Softwaretool zur Kommunikation mit der Falle

Zur einfachen Kommunikation mit den Testmustern bestand Bedarf nach einer Schnittstellenlösung, die es ermöglicht, aufwandsarm Informationen aus der Falle auslesen und die Falle konfigurieren zu können. Hierfür wurde entschieden, ein entsprechendes Softwaretool mit GUI zu entwickeln, das auf einem mobilen Gerät direkt am Einsatzort der Falle für die Kommunikation mit der Falle genutzt werden kann.

Nachfolgende grundlegende Anforderungen wurden dabei definiert:

- Möglichkeit zum direkten Herunterladen der Protokolldaten von der SD-Karte der Falle, ohne Entnahme der SD-Karte.
- Aufwandsarmer und einfacher Verbindungsaufbau zwischen mobilem Gerät und Fallensystem.
- Ausführliche Übersicht über den Status der Falle sowie aktueller Konfiguration.
- Möglichkeit zur Änderung verschiedener Parameter der Falle, ohne die Firmware der Falle überschreiben zu müssen.

Die aktuelle Lösung sieht vor, dass ein (mobiles) Windowsgerät über dessen USB-Anschluss via Kabel mit der Falle verbunden wird. Die Falle bietet einen seriellen Anschluss, der dafür genutzt wird. Zwischen Falle und Windowsgerät ist dabei ein UART-Wandler, als Adapter, zwischengeschaltet. Die Software wird als ausführbare Datei bereitgestellt und muss nicht installiert werden. Eine kabellose Lösung wurde in Hinblick auf den Entwicklungsaufwand im Projekt niedriger eingestuft. Eine Umsetzung war in der verbleibenden regulären Projektlaufzeit nicht möglich.

Das Softwaretool bietet zum Ende des Berichtszeitraums folgenden Funktionsumfang:

- Informationsübersicht
 - Laufzeit der Falle
 - Uhrzeit laut Echtzeituhr auf der Fallenplatine
 - Betriebsstatus/Fallenstatus
 - Kennung der Falle
 - Anzahl angeschlossener Lichtschrankenebenen
 - Art des angeschlossenen Aktors (Pheromonabgabemodul)
- Protokolldaten der Lichtschrankenevents auf der SD-Karte der Falle
 - Direktes Herunterladen auf das Windowsgerät
 - Zurücksetzen bzw. Löschen der Protokolldaten auf der SD-Karte
- Infoboard zu allen Kommunikationsaktivitäten mit der Falle
 - Verbindungsstatus
 - Informationsabfragen an die Falle
 - Rückmeldungen der Falle auf Anfragen
- Konfigurationsmöglichkeiten
 - Uhrzeit (nach-)stellen
 - Fallenkennung definieren
 - Aktorkonfiguration
 - Abgabeintervall
 - Nächster Abgabezeitpunkt
 - Leistungsparameter für Flüssigdispenser (Pheromonabgabemodul)
- Updatefunktion, mit der die Firmware auf der Falle direkt vom Windowsgerät aus überschrieben bzw. aktualisiert werden kann
- Neustart der Falle

In der nachfolgenden Abbildung 58 ist das Hauptfenster der grafischen Oberfläche des Softwaretools dargestellt. Hier werden grundlegende Informationen zur Falle ausgegeben sowie ein Großteil der genannten Funktionen bereitgestellt. Die aktuellen Testmuster sind so konzipiert, dass automatisch erkannt wird, ob und wie viele Lichtschrankenebenen und ob und welche Art von Pheromonabgabemodul mit der Hauptplatine verbunden ist.

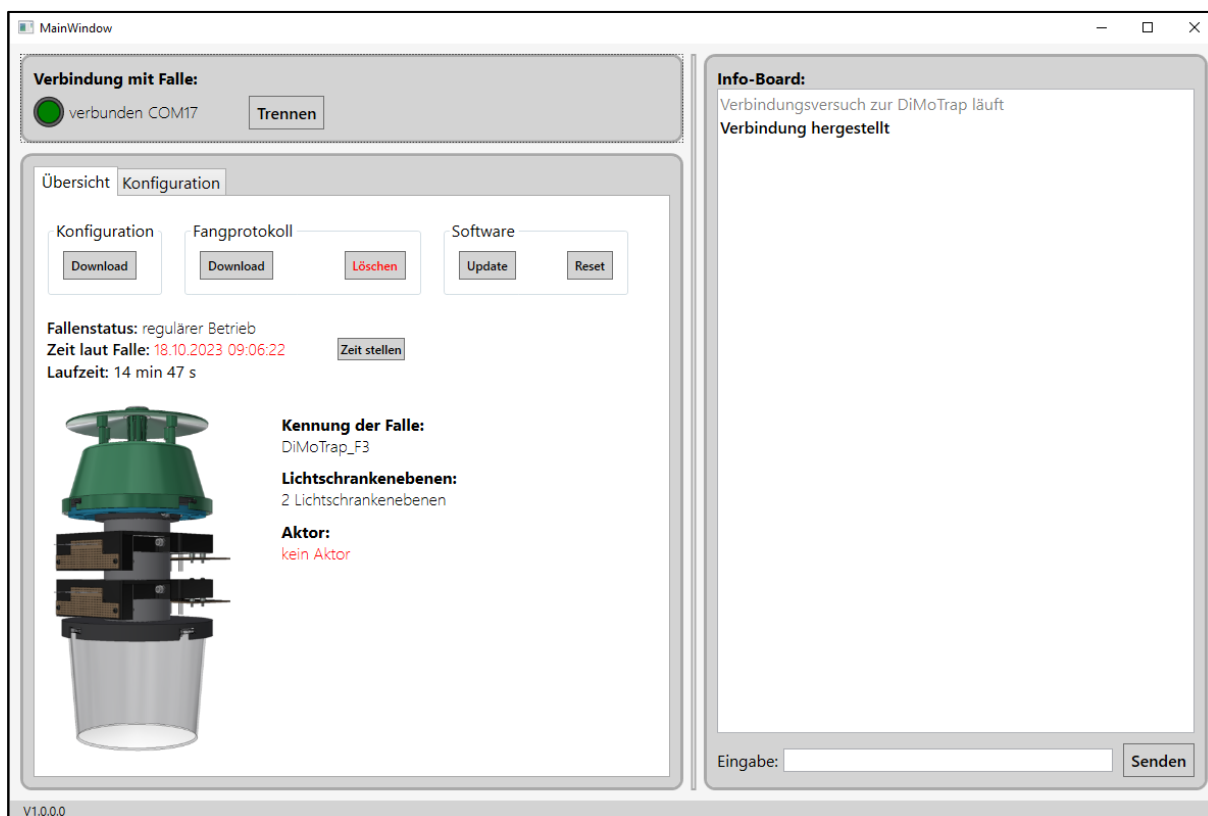


Abbildung 58: Softwaretool für die Kommunikation mit der Falle – Hauptansicht

In Abbildung 59 ist das zusätzliche Konfigurationsfenster der grafischen Oberfläche des Softwaretools dargestellt. Hier lassen sich die verschiedenen Parameter der beiden Varianten von Pheromonabgabemodulen bei Bedarf anpassen.

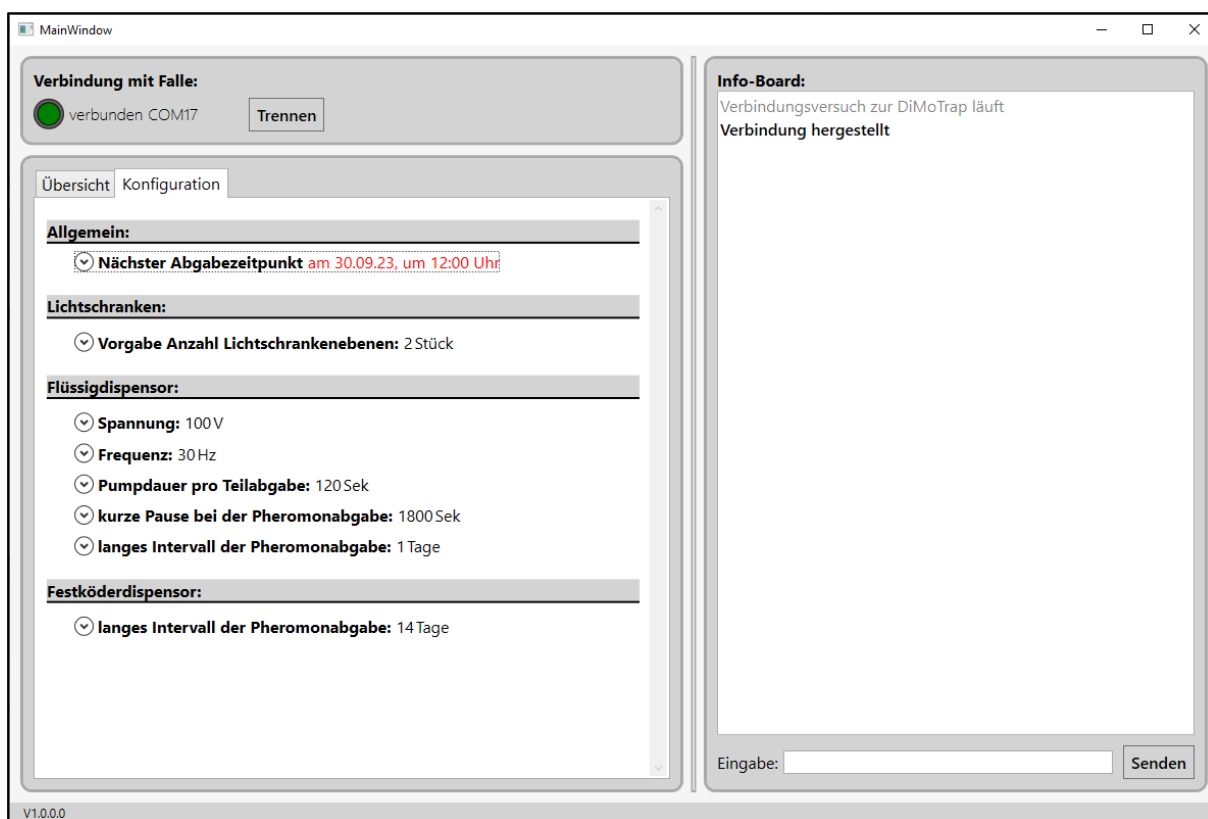


Abbildung 59: Softwaretool für die Kommunikation mit der Falle - Konfigurationsansicht

Unter Einsatz eines mobilen Windowsgeräts ist es durch das Softwaretool mittlerweile möglich, direkt am Einsatzort im Wald eine umfangreiche Kommunikation mit der Falle zu realisieren und softwareseitige Anpassungen vorzunehmen. Für die Bedienung des Softwaretools wurde zusätzlich eine Text- und Bildanleitung erstellt. Die Software, notwendige Kabel, der UART-Wandler (Adapter) sowie die Anleitungen wurden der NW-FVA für die Kommunikation mit den Fallensystemen am Einsatzort bereitgestellt.

Konzeption von Testumgebungen

Die Arbeiten zur Konzeption von Testumgebungen sahen folgende Schritte vor:

- Laboruntersuchung der Teilanforderungen,
- Freilandprüfungen für das integrierte Fallensystem,
- Erfolgskontrollen und Optimierungen
- Anpassung des Systemkonzepts.

Wesentliche Grundanforderungen an die Konzeption von Testumgebungen werden im Folgenden zusammenfassend dargestellt:

Voraussetzung zur Durchführung der geplanten Versuche ist die Bereitstellung geeigneter Versuchstiere. Dabei können je nach Bedarf auch Versuchstiere genutzt werden, welche von den im Projekt festgelegten Zielarten abweichen, wenn diese in Größe und Verhalten hinlänglich ähnliche Eigenschaften aufweisen und entsprechend artspezifische Pheromoneköder verfügbar sind.

Eine wesentliche Randbedingung des Versuchsaufbaus liegt in dem (zu erwartenden) Verhalten der Versuchstiere. Versuche unter Beteiligung von Sexuallockstoffen sind durch externe Faktoren wie Tageszeit, Witterung, Paarungsbereitschaft und weitere beeinflusst. Es ist zu vermuten, dass solche Versuche nicht in Innenräumen darstellbar sind oder aufgrund der künstlichen Bedingungen, insbesondere hinsichtlich der Luftbewegung, keine konsistenten Ergebnisse erzielen könnten. Zudem würde das Entlassen von Sexuallockstoffen in Laborräumen unter Umständen ungewollte Nebeneffekte wie beispielsweise die Kontaminierung der Laborumgebung oder das Verbringen der Pheromonduftspur in andere Gebäudeteile nach sich ziehen. Es wird daher vor diesem Hintergrund entschieden, dass Versuche unter aktivem Einsatz von Sexuallockstoffen im Rahmen des Projektvorhabens ausschließlich im Freiland oder im Semi-Freiland durchgeführt werden. Zu spezifischen Fragestellungen und über begrenzte Zeiträume sind jedoch Versuche zur Untersuchung der Pheromonverdunstung unter Luftabschluss in dafür vorgesehenen Laborräumlichkeiten der NW-FVA möglich.

Die Durchführung von Versuchen mit Pheromonabgabe sowie Versuche zum Modul „Energieversorgung“ waren dabei im Freiland oder im Semifreiland vorgesehen. Hierzu zählen auch Funktionstests des Fangmoduls zur Evaluierung der Zählensorik unter realistischen Bedingungen. Reine Laborversuche sollten fallweise auch ohne Anwesenheit eines Pheromoneköders durchgeführt werden, um die Kalibrierung der Sensoren zu testen.

Versuchsanlagen 2022

Die Arbeiten an den ersten Versuchsmustern des Moduls Pheromonabgabe wurden im März 2022 abgeschlossen und wurden in der Spezies Forleule von Mitte März bis Ende Mai 2022 im Feldversuch am Standort Jävenitz in Sachsen-Anhalt erstmals getestet. Das eingesetzte Pheromonabgabemodul zeichnete sich durch vier in Aluminium eingehauste Einzelköder (Blistersystem) aus und wurde auf der Oberseite der Testfallen angebracht. Im Zeitraum vom 01.07.2022 bis zum 01.09.2022 wurde eine Weiterentwicklung des Moduls Pheromonabgabe in der Spezies Schwammspinner getestet. Für diesen Feldversuch wurde der Stadtwald Halle ausgewählt. Das eingesetzte Versuchsmuster zeichnet sich durch eine verbesserte Einhausung und Gehäusestruktur aus. Anstelle der bis zu diesem Zeitpunkt verwendeten Aluminiumfolie, wurden die Köder einzeln in Kupferhülsen eingehaust, welche mit einer drehbaren Metallplatte verschlossen wurden (Revolversystem). Parallel zu dem Versuch in Halle, wurde im Zeitraum vom 01.07.2022 bis zum 05.10.2022 das bereits beschriebene Modul des manuellen Pheromoneköder-Wechselmechanismus mit einer ersten automatisierten Version verglichen. Zusätzlich wurde der Versuchsteil um die Testung eines automatischen Zählmechanismus erweitert. Der Versuchsstandort lag auf der Altmärkischen Höhe, nahe der Ortschaft Bretsch, getestet wurde in der Spezies Nonne. Im Zeitraum vom 23.05.2022 bis zum 05.06.2022 wurden männliche Schwammspinnerfalter aus eigener Zucht in einem Semi-Freilandversuch eingesetzt, um erste Tests mit einem Prototyp des Zählmechanismus mittels Infrarot-Lichtschranken durchzuführen.

Neben diesen technischen Tastversuchen, lag der zweite wesentliche Hintergrund des Versuchsansatzes in der Beobachtung biologischer Verhaltensmuster von Zuchtfaltern unter Semi-Freiland-Bedingungen. Da in diesem Bereich kaum Erfahrungswerte vorliegen, war es von besonderem Interesse, ob die gezüchteten Falter im Zeltversuch auf das artspezifische, weibliche Pheromon reagieren, wie sich diesbezüglich ihr Verhalten

beschreiben lässt und welche Herausforderungen mit dem Einsatz von Zuchtfaltern unter Semi-Freilandbedingungen verbunden sind.

Versuchsanlagen 2023

Laborversuch „Langlock-Dosierfläschchen“

In diesem Teilversuch wurden Langlock-Dosiermembrane auf die jeweils erreichten Abgaberaten untersucht. Langlock-Dosierfläschchen werden regelmäßig im Bereich Käfermonitoring angewendet. Im Rahmen des Versuchs sollte geklärt werden, ob dieses System grundsätzlich auch für die Ausbringung von Schmetterlingspheromonen geeignet wäre und ob sich die Herstellerangaben zu den Abgaberaten der verschiedenen Membranen auch für das Lösungsmittel n-Hexan bestätigen lassen. Physiologisch wirksame Stoffmengen von Sexualpheromonen liegen für die exemplarisch untersuchte Schmetterlingsspezies Forleule (*Panolis flammea*) in wesentlich geringeren Konzentrationen vor (Nanogramm) als es bei vielen Käferarten der Fall ist.

Im Versuch wurden die folgenden vier Dosiermembranen getestet, wobei die Durchlässigkeit im Verhältnis zu der Dosiermembran 226 angegeben wird:

- Do 226: geringste Durchlässigkeit
- Do 220: 20 – 30 % > als Do 226
- Do 204: 50 – 60 % > als Do 226
- Do 237: ca. 100 % > als Do 226
-

Als Versuchslösung wurde die Stammlösung zur Herstellung der Standard-Köder für *Panolis flammea* verwendet (Gö – PF 3/1 2021). Diese besteht aus dem Lösungsmittel n-Hexan und drei Pheromonkomponenten cis-9-tetradecenyl acetate, cis-11-hexadecenyl acetate und cis-11-tetradecenyl acetate. Es wurden jeweils 10 ml in die Vorratsfläschchen gefüllt und mit den verschiedenen Dosiermembran-Deckeln verschlossen. Dann wurden die Fläschchen mit dem Deckel nach unten unter einem Abzug platziert. Es wurde sichergestellt, dass die Dosiermembranen ordnungsgemäß im Deckel eingelegt sind und es nicht zur Tropfenbildung auf Grund von Undichtigkeiten kommt. Abbildung 60 illustriert den Aufbau des Abdampfungsversuchs mit Langlock-Dosierfläschchen.

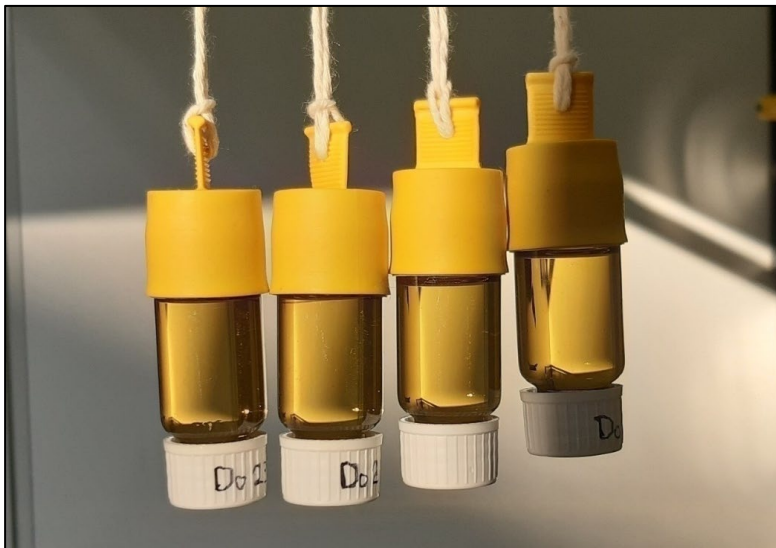


Abbildung 60: Langlock Dosierfläschchen

Mit einem Datenlogger sind Temperatur und rel. Luftfeuchtigkeit aufgenommen worden. Der Abzug wird mit einem Luftstrom von 720 - 900 m³/h betrieben. Nach 15 Tagen wurde die verbliebene Menge in den Dosierfläschchen mit einer Messpipette bestimmt.

1. Feldversuch: Integriertes Fallensystem (Weißgrauer Breitflügelspanner, *Agriopsis leucophaearia*)

Versuchszeitraum 03.02.2023 – 23.03.2023

In diesem Feldversuch wurden Pheromonabgabemodule in der 3. Umsetzungsvariante sowie Zählmodule der 2. Umsetzungsvariante in Feldversuchen getestet. Der Versuch wurde im Forstamt Münden, Revier Kattenbühl (Bramwald) umgesetzt (vgl. Abbildung 61 und Abbildung 62).

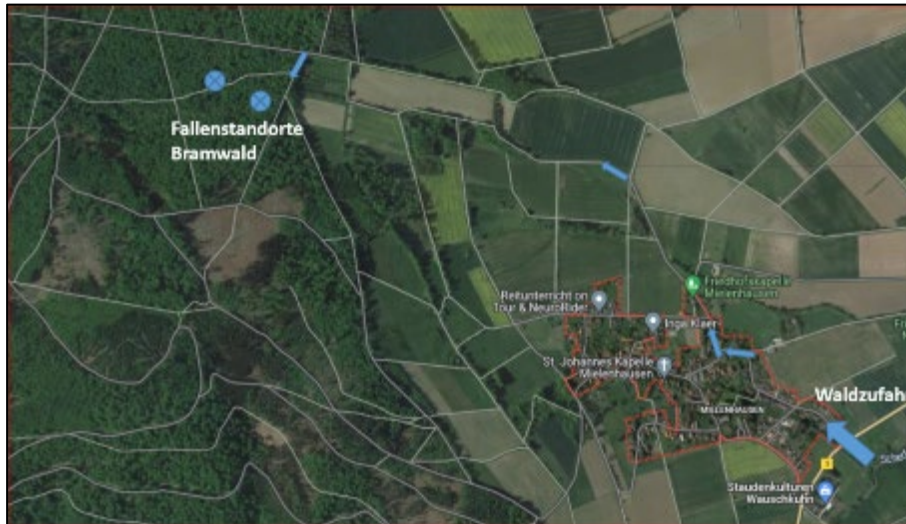


Abbildung 61: Versuchsstandort Bramwald

Der Versuch diente primär dazu, die Funktion der überarbeiteten Variante des automatischen Köderwechselmoduls im Feld zu testen. In diesem Versuch kamen neue Köder für den Weißgrauen Breitflügelspanner erstmals zum Einsatz. Die Köder weisen eine abgewandelte Geometrie auf. In vorherigen Tests funktionierte der Köderaufwurfmechanismus zunächst problemlos. Die Versuchsanordnung folgte einem hexagonalen Versuchsdesign und beinhaltete die Fallenvarianten „Standard-Variotrap-Trichterfalle“ und „Versuchsmuster“. Die Testgeräte waren nun als integrierte Fallensysteme ausgeführt, sodass die Module Pheromonabgabe und Zählmechanismus von einem Mikrocomputer gesteuert und von einer Stromquelle versorgt wurden.

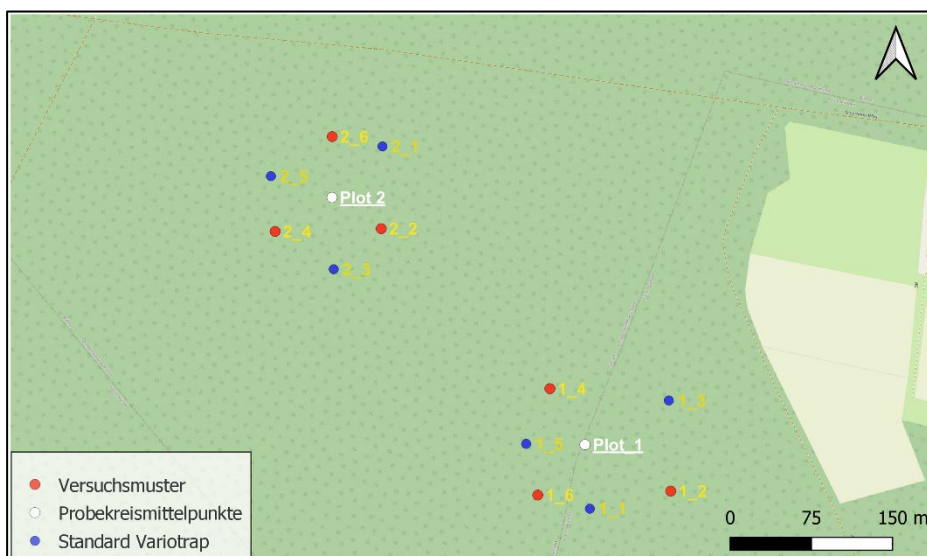


Abbildung 62: Versuchsanlage Weißgrauer Breitflügelspanner 2023: Plot 1 (links), Plot 2 (rechts)

Die Versuchsmuster (Versuchsmuster, Positionen 2,4 und 6 im Hexagon) wurden mit drei Ködern bestückt (1x aktiv, 2 x Magazin), während die Standard-Variotrap-Trichterfalle n (Vergleichsfallen Trockendispenser, Positionen 1,3 und 5 im Hexagon) einfach beködert waren. Der Abstand zwischen den benachbarten Fallen betrug 40-50 m. In der Mitte der Versuchsanordnung wurde eine Leerfalle ohne Köder positioniert. Der Standort der Versuchsanordnung wurde auf ebenem Relief im Abstand von mindestens 30-50 m zu den Forstwegen und den Bestandesrändern gewählt, um mögliche Randeffekte (Witterung, Mikroklima, Artenverteilung) auszuschließen. Die Fallen wurden mittels eines Aluminiumprofils im Abstand von mindestens 20 cm und in einer Höhe von 2,5 m an Kiefernstämmen angebracht. Zur Abtötung der Fänge wurde die Fangflüssigkeit Mono-Ethylenglykol eingesetzt. Alle Fallenstandorte wurden georeferenziert erfasst und in ein Kartenwerk übertragen. Am Mittelpunkt der Versuchsanordnung (Falle 0) wurden Klimadaten zu Temperatur, relativer Feuchte und die Niederschlagsmenge erfasst. Die Kontrollen der Fallen fanden wöchentlich statt, wobei neben der Zielspezies auch alle Nichtzielarten erfasst wurden. Die Nichtzielorganismen wurden im Anschluss einer Laborbestimmung zugeführt. Jeweils nach Ablauf von vier Wochen wurden die Pheromonköder der Versuchsmuster automatisch gewechselt. Der Versuch wurde eingestellt, nachdem keine

Falter der Zielspezies mehr in den Pheromonfallen aufgefunden wurden. Im Rahmen des Versuchs wurden inklusive Versuchsanlage und –abbau planmäßig 10 Fahrten von Göttingen aus in das Revier Kattenbühl im Forstamt Münden durchgeführt. Der Versuch wurde bis zum Ende der Falterflugzeit des Weißgrauen Breitflügelspanners durchgeführt.

Laborversuch: Aufbau und Funktionsprüfung der Pheromonabgabe mit Mikropumpe

Versuchszeitraum 08.05.2023 – 12.05.2023

Dieser Laborversuch diente der ersten Inbetriebnahme und Evaluierung des Versuchsmusters Mikropumpe. In Vorbereitung im Berichtszeitraum 2023 folgender Freilandtests mit diesem Versuchsmuster wurden die grundlegenden Funktionen der Mikropumpe geprüft und Abgabeintervalle des Pheromon-Lösungsmittel-Gemischs erarbeitet, die den Abgabemengen der durch Feststoffköder freigesetzten Pheromon-Duftspuren entsprechen.

Der Versuchsaufbau beinhaltete als wesentliche Elemente eine Steuerungseinheit, einen verkapselten Tank (Fluidreservoir) für das Gemisch aus Lösungsmittel (Heptamethylnonan) und Pheromonlösung der Spezies *Lymantria dispar*, eine Mikropumpe (Bartels mikrotechnik, Modell mp6) sowie die Stromversorgung mittels 9V Blockbatterie (vgl. Abbildung 63). Die Auswahl der Mikropumpe erfolgte auf Grundlage der für diese Komponente festgelegten Anforderungen und umfasste folgende Parameter:

- Geringer Energiebedarf von ca. 50 mW
- Platzsparende Bauform (30 x 15 x 4 mm³)
- Geringes Gewicht (2g)
- Selbstansaugend
- Möglichkeit der Anbindung an das Arduinosystem (Mikrocontroller)
- Dosierung kleinster Abgabemengen (< 1 Mikroliter)
- Druckausgleichskanal aus Messing für thermische und barometrische Schwankungskompensation

Die Abgabe der Flüssigkeit erfolgte über einen Silikonschlauch und ein Messingröhrchen in einen Probehälter. Das Gewicht der abgegebenen Fluidmenge wurde zu verschiedenen Zeitpunkten erfasst. Neben der Durchführung von Funktionstests wurden im Rahmen des Versuchsaufbaus drei unterschiedliche Lösungsmittel auf ihre Eignung zur Pheromonabgabe mittels Flüssigkeitsdispenser untersucht. Dabei wurden die beiden Chemikalien „Dimethylsulfoxid“ und „Caprinsäureethylester“ aufgrund eines starken Eigengeruchs für die weitere Verwendung als Lösungsmittel ausgeschlossen.

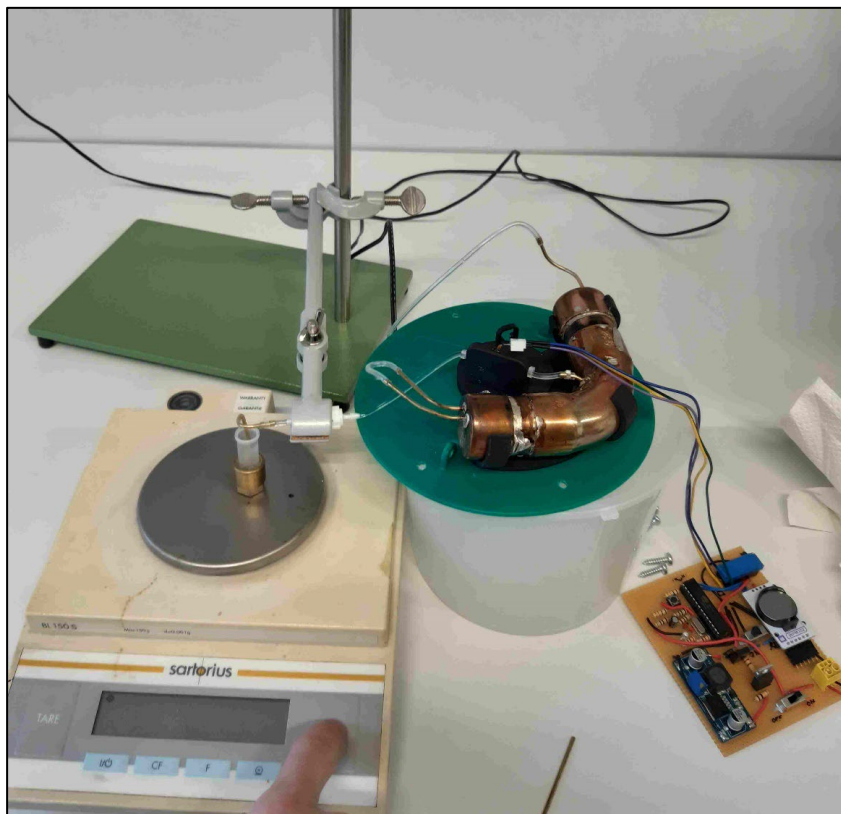


Abbildung 63: Versuchsaufbau Laborversuch Versuchsmuster Mikropumpe

Nach erfolgreich durchgeführten Laborversuchen wurde das Versuchsmuster Mikropumpe am Fraunhofer IFF in ein Gehäuse eingehaust und mit einem speziellen Glasfaserdispenser versehen, auf den das Lösungsmittel-Pheromon-Gemisch tropfenweise abgegeben wird.

2. Feldversuch: Freilandversuch mit Zuchtorganismen (Schwammspinner, *Lymantria dispar*)

Versuchszeitraum: 22.05. – 16.06.2023

Dieser Versuch umfasste erste Feldtests des Flüssigpheromondispensers (Mikropumpe). Vorherige Laborversuche hatten die technische Funktion des Testgerätes bestätigt. Da unter Laborbedingungen jedoch keine gesicherten Aussagen zur Lockwirkung der verwendeten Lösungsmittel-Pheromongemische getroffen werden konnten, wurden an der NW-FVA zu diesem Zweck etwa 300 männliche Schwammspinnerfalter angezüchtet, die diesem Freilandversuch zugeführt wurden. Zusätzlich wurden der NW-FVA etwa 100 Schwammspinnerpuppen von der Landesanstalt für Wald- und Forstwirtschaft bereitgestellt, sodass insgesamt etwa 400 Organismen in den Versuch eingebunden wurden. Literaturangaben und eigene Erfahrungen bildeten die Grundlage für den gewählten Versuchsaufbau bildeten Literaturangaben sowie eigene Erfahrungen der NW-FVA im Umgang mit diesen Versuchstieren.

Versuchsanordnung

Der Versuch wird in einem Eichenaltbestand durchgeführt und folgt einer linearen Anordnung. Es werden drei verschiedene Varianten einer digitalen Pheromonfalle getestet (Zählfalle 1, Zählfalle 2, Flüssigkeitsdispenser bzw. Pheromonabgabe per Mikropumpe). Im Bestandesinneren werden zunächst zwei Standorte x_0 und x_2 im Abstand von 100 m entlang der Hauptwindrichtung festgelegt. Am Standort x_2 wird die Versuchsfalle 2 (Mikropumpe) in 2 m Höhe am Unterstamm einer Eiche installiert. Am Standort x_0 werden die Falter freigesetzt bzw. die Versuchstiere im Puppenstadium eingebracht (vgl. Abbildung 64). Die Versuchsmuster 1 und 3 (digitale Zählfallen) werden im Abstand von 40 m zur Position x_2 und in einem 90° Winkel zu der Distanzlinie zwischen den Positionen x_0 und x_2 , an den Positionen x_1 und x_3 aufgestellt. In gerader Verlängerung der Hauptachse (Hauptwindrichtung) werden im Abstand von 50 m und 100 m zur Position x_2 jeweils Standard-Variotrap-Trichterfalle n installiert, um Falter abzufangen, die an den Versuchsmustern vorbei geflogen sind. Im Rahmen der Versuchsvorbereitung werden mittels Klimadatenlogger Vor-Ort-Klimadaten laufend erfasst (Position x_0 : Relative Feuchte, Temperatur, Niederschlag, Windrichtung und Windgeschwindigkeit).

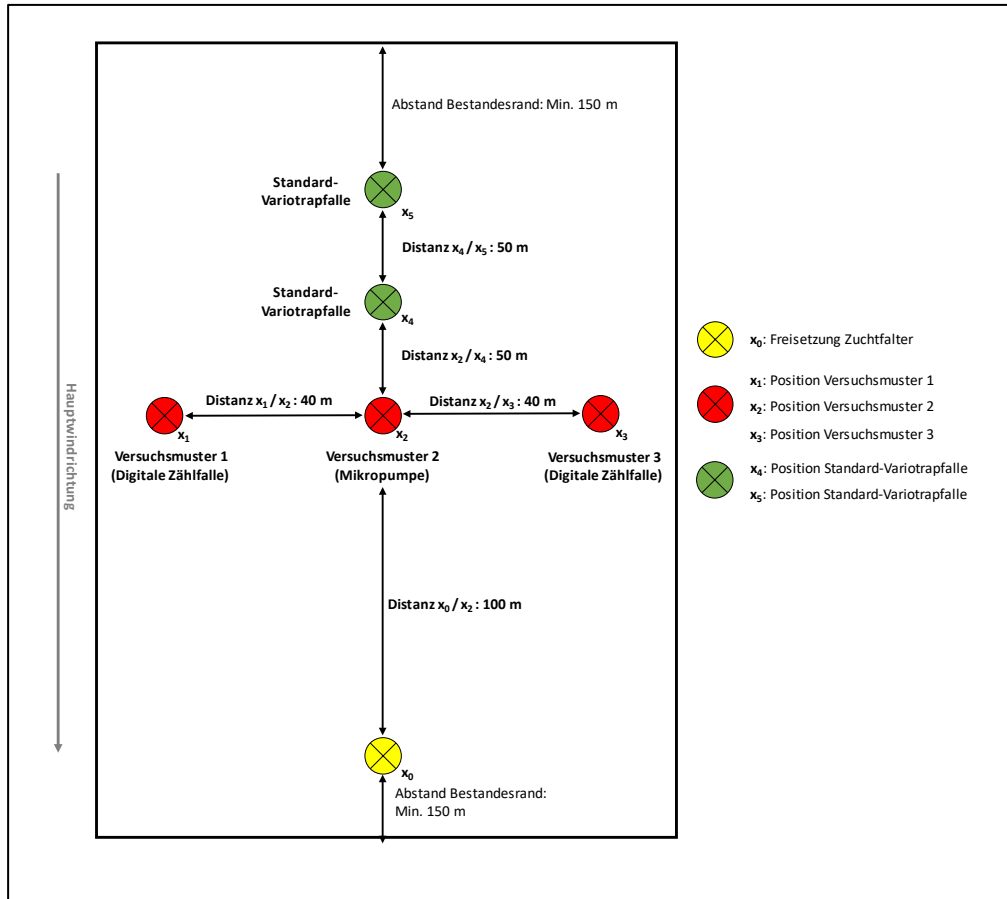


Abbildung 64: Freilandversuch mit Schwammspinner-Zuchtorganismen - Skizze der Versuchsanlage

Die Dauer der Flugversuche mit Falterfreisetzung wurde auf eine Woche angelegt und ab der Mittagszeit bei Temperaturen oberhalb von 16°C durchgeführt. Es wurden 100 männliche Puppen des Schwammspinners am Freisetzungspunkt x_0 in den Versuch eingebracht. Die Schlupfrate sowie die Fänge in den Pheromonfallen wurden täglich überwacht. Nach Ablauf einer Woche wurden weitere rund 300 Puppen des Schwammspinners an der Position x_0 ausgebracht. Für die Pheromonfalle mit Mikropumpe an der Position x_2 wurde mit einer Mischung aus dem Lösungsmittel Heptamethylnonan und Disparlure in einem Mischungsverhältnis von 99,998 Vol- % zu 0,002 Vol- % gearbeitet. Die Lockwirkung der Flüssigkeit wurde in diesem Versuch ausschließlich qualitativ bewertet.

Vorbedingungen

Der Versuch wurde bei trockenen Witterungsbedingungen durchgeführt. Die Flugversuche wurden ab einer gemessenen Lufttemperatur von 16°C in einer Höhe von 2 m am Abflugort x_0 begonnen, da Flugbewegungen der Spezies *Lymantria dispar* unterhalb dieser Temperaturschwelle stark eingeschränkt sind. Während des Versuchszeitraumes wurden die Umweltbedingungen im Bestandesinneren mit Klimadatenloggern überwacht (Temperatur, relative Feuchte, Niederschlag, Windrichtung).

Hauptversuch

Für den Versuchsaufbau wurde ein repräsentativer Waldstandort mit bestehender Unterschicht und Bodenvegetation in einem Eichenaltbestand ausgewählt, wobei zwischen dem Ort der Falterfreisetzung x_0 und der Position der Versuchsfalle x_1 ein Abstand von **50 m** festgelegt wurde. Die Luftlinie zwischen x_0 und x_2 bildete die Hauptwindrichtung ab, sodass der vorherrschende Wind in Richtung der Position x_0 wehte. Für die Versuchsmuster-Standorte x_1 , x_2 und x_3 wurde ein Minimalabstand zum nächstgelegenen Forstweg bzw. zum Bestandesrand von **150 m** eingehalten. Für den Standort x_0 galt ein Minimalabstand zum Bestandesrand von **50 m**. Zu Versuchsbeginn wurden 100 Versuchstiere im Puppenstadium am Standort x_0 in einem umgedrehten, mit Löchern versehenen und an der Unterseite verschlossenen Eimer (Schlupfglocke) auf einer erhöhten, mäuse sicheren Position in den Bestand eingebracht. Die Versuchstiere wurden so vorbereitet, dass der Schlupfzeitpunkt kurz bevorstand. Der Entwicklungsstand der Tiere wurde nach der Etablierung des Versuchsaufbaus in der ersten Woche täglich überwacht. Vom Zeitpunkt der ersten Schlupfbeobachtung an, wurden die Versuchsmuster täglich, jeweils nach Absinken der Lufttemperatur in 2 m Höhe an der Position x_0 auf < 14°C (nachmittags), auf Falterfänge kontrolliert. Der Versuch wurde fortgeführt, bis über einen Zeitraum von 48 Stunden keine weiteren Fänge in den drei zu untersuchenden Fallen beobachtet wurden bzw. bis maximal eine Woche nach dem Schlupf des letzten Falters. Sich in der Falle befindliche Nichtzielorganismen wurden entnommen und je nach Art in Alkohol oder trocken konserviert.

Flugversuch zur Funktionsprüfung der Versuchsmuster 1 und 3 mit „Zählautomatik“:

In diesem Versuchsteil wurden Fangversuche mit einem Mechanismus zur Zählung in die Falle eindringender Falter durchgeführt. Es wurden Standard-Gummilaminat-Pheromontköder eingesetzt. Nach den ersten drei Versuchstagen wurde auf Dochtköder gewechselt. Die technische Anordnung beinhaltete mehrere Lichtschranken in Verbindung mit einer elektronischen Steuereinheit, welche in die Falle eingedrungene Falter digital aufzeichnete. Das Ziel des Versuchs lag in der Prüfung der korrekten Zählung in die Falle eindringender Falter unter Freiland-Bedingungen.

Flugversuch zur Funktionsprüfung des Versuchsmusters 2 mit „Mikropumpe“:

In diesem Versuch wurden Fangversuche mit einem Flüssigkeitsdispenser zur steuerbaren Freisetzung eines Lösungsmittel-Pheromongemischs durchgeführt. Die technische Anordnung beinhaltete eine elektrisch betriebene Mikropumpe, einen gasdichten Tank, einen Glasfaserdocht, auf den die Lockflüssigkeit aufgebracht wird, und eine elektronische Steuereinheit, mit der sich Abgabemenge und -intervall der Lockflüssigkeit bestimmen lassen. Das Ziel des Versuchs lag in der Prüfung der korrekten Funktion eines technischen Aufbaus zur definierten Abgabe einer Lockflüssigkeit unter Freiland-Bedingungen und der Prüfung der auf den Zielorganismus erzielten Lockwirkung im Vergleich zu Gummilaminat-Pheromondispensern.

3. Feldversuch: Integriertes Fallensystem (Schwammspinner, *Lymantria dispar*)

Versuchszeitraum 26.06. – 19.09.2023

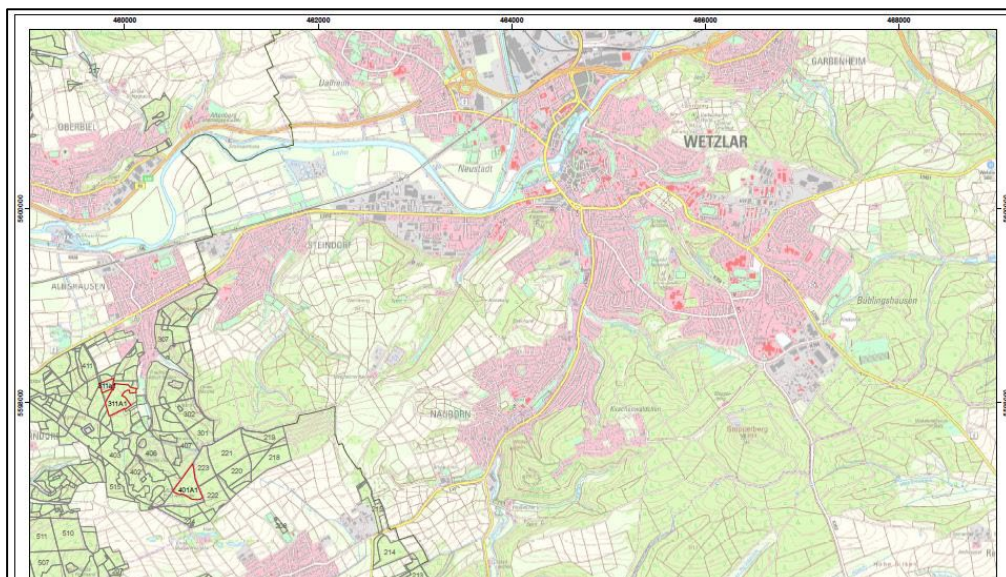


Abbildung 65: Kartenausschnitt Versuchsfelder Forstamt Wetzlar, Revier Solms

Am Standort Wetzlar im Revier Solms wurde das integrierte Pheromonfallensystem in der Spezies Schwammspinner getestet (vgl. Abbildung 65). Die Versuchsetablierung wurde gemeinsam mit beiden Projektpartnern durchgeführt, um die vollständige Funktion der technischen Aufbauten zu gewährleisten. Während des Untersuchungszeitraums wurde am 08.08.2023 im Rahmen eines projektbezogenen Workshops eine Exkursion mit Forstexperten im Bereich Pheromonfallenüberwachung auf den beiden Versuchsfelder durchgeführt.

Im Rahmen des Feldversuchs wurde ein technisches Verfahren zur automatischen Ausbringung von Schwammspinner-Pheromon auf Basis fester Trägermedien im Freiland untersucht. Dabei fand eine vergleichende Untersuchung eines vierwöchigen Köderwechselintervalls mit einer Standardbeköderung (1 Köder) hinsichtlich des Fangverhaltens (Zielorganismen/Nichtzielorganismen) unter Berücksichtigung der konstruktiven Unterschiede zwischen den eingesetzten Fallenvarianten statt. Weitere Versuchsinhalte lagen in der Untersuchung eines technischen Verfahrens zur automatischen Zählung der Zielorganismen (Versuchsmuster Zählfalle) und in der Untersuchung eines automatischen Mechanismus zur Abgabe von Pheromon in einer Flüssigsuspension. Die Versuchsziele bildeten somit die qualitative Wirksamkeitsprüfung der Pheromon-Lockwirkung, wobei ein Vergleich der Pheromonabgabe mittels zweier Varianten eines „Trockendispensers“ (Köderwechsel automatisch / manuell) mit einer einfach beköderten herkömmlichen Variotrap-Trichterfalle getestet wurde. Darüber hinaus sollten die Auswirkungen der natürlichen Umgebung eines Eichenwaldbestandes auf die Funktionalität des Zähl- und Pheromonabgabe-Mechanismus bewertet werden. An einem Fallenmuster wurde zusätzlich die Unterstützung der Energieversorgung mittels Batterie durch Solarpanel untersucht.

Für den Versuch standen 4 integrierte Versuchsmuster und ein Versuchsmuster mit Flüssigpheromonabgabe (Mikropumpe) zur Verfügung. Für den Versuchsteil der Mikropumpe wurde ein etwa 1,5 km von der Versuchsfelder mit den integrierten Versuchsmustern entfernter Standort gewählt. Abbildung 66 stellt das Versuchsdesign des Teilversuchs „Mikropumpe“ dar. In dieser Versuchsanordnung wurden zwei einfach beköderte Standard-Variotrap-Trichterfalle -Pheromonfallen und das Versuchsmuster Mikropumpe in einem Dreiecksverbund mit einer köderfreien Leerfalle in der Mitte des Plots installiert. Der Abstand der Fallen zueinander wurde auf 45 m festgelegt. In diesem Plot wird das Versuchsmuster Mikropumpe mit 2 Pheromonfallen verglichen.

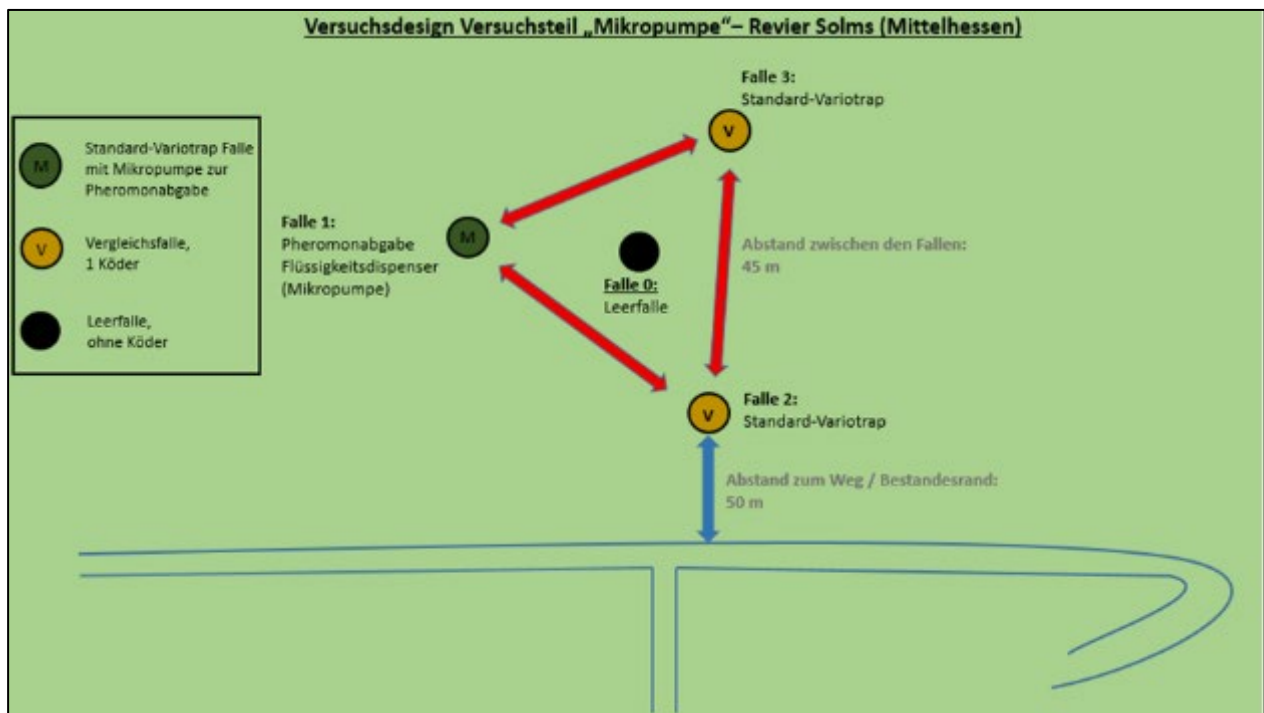


Abbildung 66: Versuchsdesign 2023 Versuchsteil "Mikropumpe", FA Wetzlar, Revier Solms

Im Zuge der Versuchsanlage des Feldversuchs zur Untersuchung der integrierten Versuchsmuster wurden insgesamt 14 Pheromonfallen in vier Plots (2 x 5, 1 x 4 Fallen) installiert. Die Geokoordinaten jedes Fallenstandorts wurden georeferenziert erfasst. Die Aufhängung der Pheromonfallen erfolgte in 2,5 m Höhe an einem L-Haken (Abstand zum Baum > 20 cm). Es wurden 10 Pheromonfallen in zwei Quadranten (Viererverbund) mit einer Leerfalle (köderfrei) in der Mitte der Fallenanordnung aufgestellt. Der Abstand der Fallen zueinander wurde auf 45 m festgelegt. In diesen beiden Plots wurden jeweils ein Versuchsmuster ‚Zählfalle mit 3-Ebenen-Lichtschränke‘ und ein Versuchsmuster ‚Zählfalle mit 2-Ebenen-Lichtschränke‘ mit zwei Standard-Variotrap-Trichterfallen verglichen (Abbildung 67). Eines der Versuchsmuster ‚Zählfalle mit 3-Ebenen-Lichtschränke‘ wurde zusätzlich mit einem Solarpanel ausgestattet. Die Standard-Variotrap-Trichterfallen sowie die Versuchsmuster wurden mit konventionellen Gummilaminat-Pheromonködern bestückt. Die Versuchsmuster ‚Digitale Zählfalle‘ sind mit einem Magazin für vier Köder bestückt und wechseln die Köder automatisch nach Ablauf von 4 Wochen. Als Fangflüssigkeit wurde Monoethylenglykol und Wasser im Mischungsverhältnis 1:3 eingesetzt. Die Geokoordinaten aller Fallenstandorte wurden erfasst. Die Fallen wurden im Uhrzeigersinn durchnummeriert, die Leerfalle erhält die Nr. 0. Bis auf die Leerfallen und das integrierte Versuchsmuster mit Solarpanel wurden sowohl die Standard-Variotrap-Trichterfallen als auch die integrierten Versuchsmuster im Rahmen der wöchentlichen Kontrollgänge innerhalb der beiden Versuchsplots im Uhrzeigersinn rotiert, um kleinräumige Standortbedingungen als Einflussfaktor auf die erzielten Fangzahlen zu minimieren. Die Einzelstandorte der Fallen wurden in einem Mindestabstand von 50 m zu vorhandenen Wegen / zum Bestandesrand gewählt. An den Standorten der Leerfallen wurde ein Klimadatenlogger am Probebaum, in Höhe der Pheromonfalle, installiert. Zusätzlich wurde ein Niederschlagsmesser in einer Höhe von ca. 1 m aufgestellt.

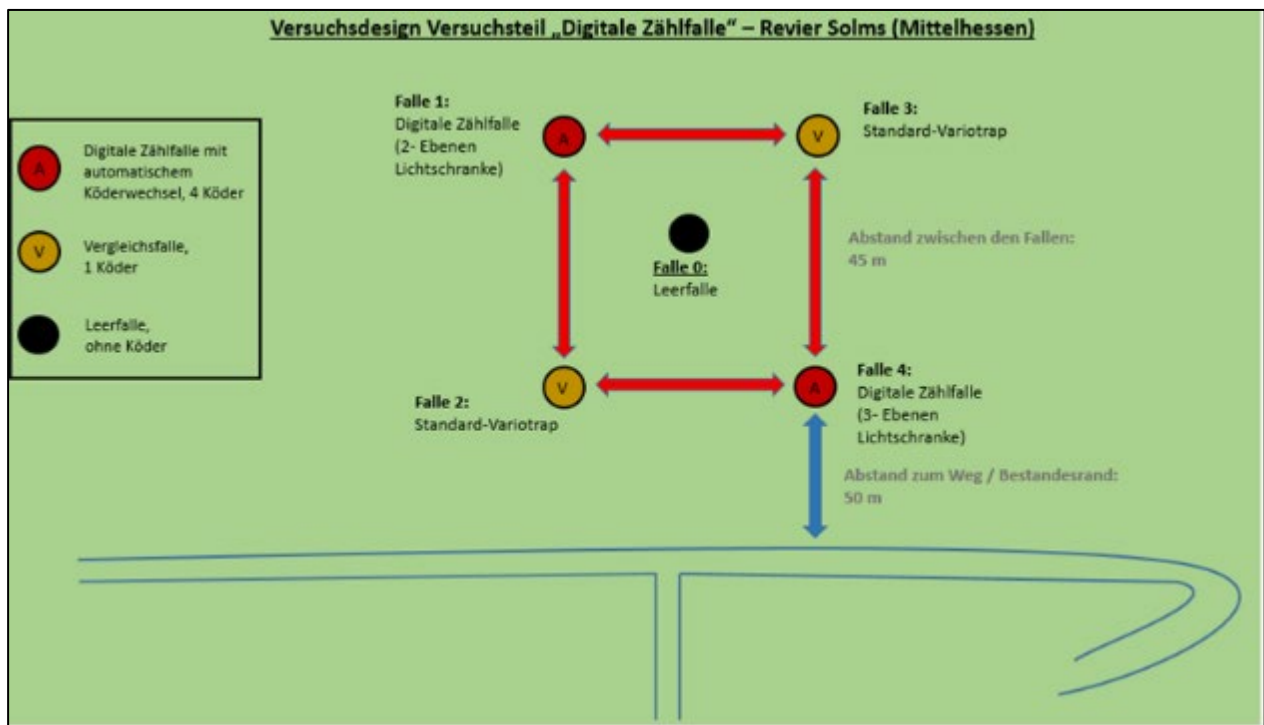


Abbildung 67: Versuchsdesign Versuchsteil „Digitale Zählfalle FA Wetzlar, Revier Solms

Versuchsdurchführung

Alle Fallen wurden wöchentlich (im Abstand von 7-10 Tagen) auf Falterfänge kontrolliert. Die Kontrolle umfasste die Protokollierung der Fangergebnisse, die Erfassung der Klimadaten und die Funktionsprüfung der Versuchsmuster. Zur Prüfung des Batterieladestandes wurden die Batteriespannungen gemessen. Bei jeder Fallenkontrolle wurden die Fallen im Uhrzeigersinn rotiert, um Standortfaktoren sowie den Einfluss der Infrarotlichtschranken-Dioden auf die Fangzahlen abzubilden. Die Beifänge wurden aufgenommen und im Labor bestimmt. Nach 4 Wochen / bei hohem Fangaufkommen / bei Verunreinigungen wurde die Fangflüssigkeit gewechselt. Es wurden die Fangdaten der Versuchsmuster erhoben, vorhandene Fehlermeldungen dokumentiert und ggf. durch einen Neustart der Geräte behoben. Nach Ablauf von vier Wochen wurden die automatischen Köderwechsel der Versuchsmuster ‚automatischer Köderwechselmechanismus‘ überprüft. Die vorherigen Köder werden dabei in den Fangkörben der Versuchsmuster belassen.

4. Feldversuch: Integriertes Versuchsmuster (Gemeiner Frostspanner, *Operophtera brumata*)

Versuchszeitraum: 23.10.2023 – 09.01.2024

Der Versuchsteil „Untersuchungen mit modifizierten Pheromonfallen im Freiland“ diente dazu, Versuchsmuster automatischer Pheromonfallen in der Spezies des Kleinen Frostspanners zu testen. In vorherigen Versuchen aufgetretene mechanische und softwarebedingte Funktionsstörungen des Zählmoduls führten zu fehlerhaften Zählzeiten der anliegenden Zielorganismen. Durchgeführte technische Verbesserungen der Versuchsmuster (z. B. Flackern der Infrarot-Lichtschranken, Datenabruf, Stromversorgung) wie auch die digital erfassten Zählzeiten wurden im Rahmen des Versuchs unter Freilandbedingungen geprüft.

Das Ziel des Versuchsteils liegt in der Umsetzung eines störungsfreien Betriebs der Versuchsmuster über den Flugzeitraum des Kleinen Frostspanners. Zusätzlich sollte die Implementierung einer finalen Batterielösung (Fe-Ph-Akku: Größe, Gewicht, modulares Gehäuse), untersucht werden, sowie die Frage, ob eine autarke Energieversorgung mittels eines 30 Watt Solarpanels unter den im Zeitraum November-Dezember gegebenen Solarstrahlungsbedingungen erreicht werden kann.

Im Ergebnis sollten die digital erfassten Fänge der Zielorganismen im Vergleich zu einer manuellen Auszählung der Fänge im Fangbehälter eine möglichst hohe Übereinstimmung liefern. Der Versuch wurde im Forstamt Reinhardshagen, Revierförsterei Beberbeck, Abteilung 1709 umgesetzt (Abbildung 68).



Abbildung 68: Anfahrtsskizze Versuchsfläche Gemeiner Frostspanner, FA Reinhardshagen, Revier Beberbeck

Der Versuchsteil ist in einen Ringversuch eingebettet, bei dem die männlichen Falter des Frostspanners zusätzlich zu der regulär mit Leimringen durchgeführten Überwachung der weiblichen Imagos, mit Pheromonfallen eingefangen werden. Der Ringversuch findet in Kooperation mit Thüringen Forst statt, dabei werden verschiedene Standorte mit demselben Versuchsdesign aufgebaut und verglichen.

Die Versuchsflächenauswahl erfolgte anhand der erfassten Daten von Leimringfängen in Eichenbeständen im Überwachungsgebiet der NW-FVA im Überwachungszeitraum 2022 auf Grundlage der Fangprognose für 2023 in Abstimmung mit ausgewählten Revierförstereien.

Versuchsaufbau

Der Versuch wurde in Eichenbeständen (110+ J.) mit laufendem Leimringmonitoring durchgeführt. Es wurden zwei Plots (Fallengruppen) mit einem Abstand von 50 m sowohl zu den mit Leimringen bestückten Eichen als auch zu Wegen und zum Bestandesrand eingerichtet. Der Abstand zwischen den Plots sollte mindestens 100 m betragen. Jeder Plot umfasste eine Dreiecksanordnung aus 3 Fallen mit Pheromonködern (Abbildung 69). Der Abstand zwischen den Pheromon-Fallen beträgt 30-50 m. Zusätzlich wurde eine köderfreie Kontrollfalle in der Mitte der Dreiecksanordnung positioniert. Die Fallenaufhängung erfolgt in ca. 2,5 m Höhe an einem L-Haken (Abstand zum Baum > 20 cm). In jedem Plot werden zwei Standard-Variotrap-Trichterfallen mit einer Zählfalle kombiniert. Die Standard-Variotrap-Trichterfallen sowie die Versuchsmuster werden jeweils mit einem konventionellen Gummilaminat-Pheromonköder bestückt. Als Fangflüssigkeit wird verdünntes Monoethylenglykol (Mischungsverhältnis 1:3) eingesetzt. Die Geokoordinaten aller Fallenstandorte wurden erfasst, die Fallen werden von 1-3 durchnummeriert, die Kontrollfalle erhielt die Nr. 0. In jeder Plotmitte wird ein Klimadatenlogger (Temperatur und relative Feuchte, Messintervall 10 Minuten) auf Höhe der Kontrollfalle installiert. Zusätzlich wird ein Niederschlagsmesser in einer Höhe von ca. 1 m aufgestellt. Die Zählfallen wurden mit einem 30 W Solarmodul und einer neuen Akkulösung versehen.



Abbildung 69: Versuchsaufbau Gemeiner Frostspanner 2023, Forstamt Reinhardshagen, Revier Beberbeck

Versuchsdurchführung

Alle Fallen wurden wöchentlich (im Abstand von 7-10 Tagen) auf Falterfänge kontrolliert, die Fangergebnisse wurden protokolliert. Die Klimadatenlogger wurden ausgelesen, die Niederschlagsmesswerte wurden aufgenommen. Die Beifänge wurden zu jedem Kontrolltermin aufgenommen und bestimmt (min. Familie). Nach 4 Wochen / bei hohem Fangaufkommen / bei Verunreinigungen wurde die Fangflüssigkeit gewechselt.

Versuchsanlagen 2024

Alle Freilandversuche folgten einem klar definierten Schema: An je zwei Standorten wurden jeweils 2 beköderte Standardfallen, ein beködertes Versuchsmuster sowie eine nicht beködete Standardfalle (Nullfalle) aufgestellt (vgl. Abbildung 70). Die Versuchsmuster waren nun als integrierte Fallensysteme ausgeführt, sodass das Modul und der Zählmechanismus von einem Mikrocomputer gesteuert und von Akkumulatoren und einem Solarpanel mit Strom versorgt wurden. Bei den Versuchsmustern wurde nach je vier Wochen der Köder automatisch gewechselt. Diese Köder waren in einem Reservoir des automatischen Köderwechselmechanismus gelagert. Die Fallen wurden in einem Dreiecksverbund angeordnet, wobei der Abstand zwischen den Fallen etwa 50 m betrug. In der Mitte des Verbundes befanden sich die Nullfallen. Darüber hinaus wurde darauf geachtet, einen Abstand von mindestens 50 m zu den Bestandesrändern einzuhalten, um Randeffekte zu minimieren. Die Fallen wurden an L-Haken in einer Höhe von ca. 2,5 m aufgehängt. An den Nullfallen wurde zusätzlich die relative Luftfeuchte, Temperatur sowie der Niederschlag aufgenommen. Als Fangflüssigkeit wurde Monoethylenglykol verwendet, welches bei starker Verschmutzung gewechselt wurde. Die Fallen wurden, soweit möglich, wöchentlich kontrolliert. Gefangene Nichtzielarten wurden im Labor bis auf Familie bestimmt und vermessen. Die Versuchsflächenauswahl erfolgte anhand der erfassten Daten von der regulären Überwachung der jeweiligen Spezies mittels Pheromonfallen im Zuständigkeitsbereich der NW-FVA im Überwachungszeitraum 2023. Im Versuchsteil „Untersuchungen mit modifizierten Pheromonfallen im Freiland“ wurden Versuchsmuster automatischer Pheromonfallen mit den Arten Weißgrauer Breitflügelspanner, Forleule, Schwammspinner, Nonne sowie Kleiner Frostspanner getestet. In vorherigen Versuchen aufgetretene mechanische und softwarebedingte Funktionsstörungen des Zählmoduls führten zu fehlerhaften Zählraten der gefangenen Zielorganismen. Durchgeführte technische Verbesserungen der Versuchsmuster (z. B. Flackern der Infrarot-Lichtschranken, Datenabruf, Stromversorgung) wie auch die digital erfassten Zählraten wurden im Rahmen des Versuchs unter Freilandbedingungen geprüft. Das Ziel des

Versuchsteils lag in der Umsetzung eines störungsfreien Betriebs der Versuchsmuster über den Flugzeitraum der jeweiligen Spezies. Eingesetzt wurden Zählfallen der 3. Generation, deren Gestaltung nun die Aufnahme von zwei Akkupacks (Fe-Ph-Akku) ermöglicht. Die Energieversorgung dieser Akkus war durch ein 30 Watt Solarpanel gegeben. Im Ergebnis sollten die digital erfassten Anflüge der Zielorganismen im Vergleich zu einer manuellen Auszählung der Fänge im Fangbehälter eine möglichst hohe Übereinstimmung liefern.

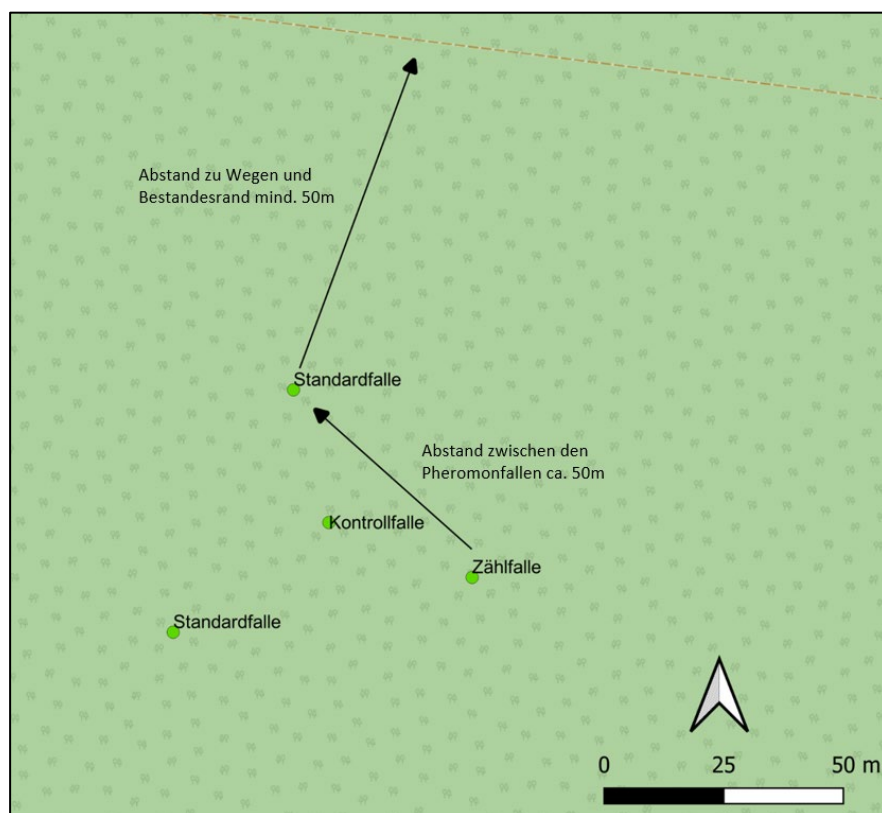


Abbildung 70: Allgemeiner Versuchsaufbau der in 2024 durchgeführten Freilandversuche

1. Feldversuch: Integriertes Fallensystem (Weißgrauer Breitflügelspanner (*Agriopsis leucophaearia*))

Versuchszeitraum 03.02.2024 – 23.03.2024

In diesem Feldversuch wurden Pheromonabgabemodule in der 3. Umsetzungsvariante sowie Zählmodule der 2. Umsetzungsvariante getestet. Der Versuch wurde in Niedersachsen im Forstamt Münden, Revier Kattenbühl umgesetzt (vgl. Abbildung 61). Der Versuch wurde bis zum Ende der Falterflugzeit des Weißgrauen Breitflügelspanners durchgeführt.

Laborversuch: Überprüfung der Zählgenauigkeit der Ziel- und Nichtzielorganismen

Im Versuchsteil „Untersuchungen mit modifizierten Pheromonfallen unter Laborbedingungen“ wurden die Funktionstests der automatischen Pheromonfallen mit toten Ziel- und Nichtzielorganismen durchgeführt. In vorherigen Versuchen traten mechanische und softwarebedingte Funktionsstörungen des Zählmoduls auf, die zu fehlerhaften Zählwerten führten. Durchgeführte technische Verbesserungen (z. B. Flackern der Infrarot-Lichtschranken, Datenabruf, Stromversorgung) sowie die digital erfassten Zählwerte wurden nun unter Laborbedingungen evaluiert. Ziel des Versuchsteils war die Evaluierung des Zählmechanismus einer digitalen Pheromonfalle. Dazu wurden Versuchsreihen mit toten Faltern der Forleule (*Panolis flammea*) und weiteren toten Individuen aus der Gruppe der Nichtzielorganismen (wie bspw. Fliegen, Spinnen, Asseln), die aus Freilandversuchen mit Pheromonfallen stammten (Schwammspanner (*Lymantria dispar*), Frostspanner (*Operophtera brumata*) und/oder Weißgrauer Breitflügelspanner (*Agriopsis leucophaearia*)), durchgeführt.

2. Feldversuch: Freilandversuch (Foreule (*Panolis flammea*))

Versuchszeitraum 07.03.2024 – 21.05.2024

In diesem Feldversuch wurden Pheromonabgabemodule in der 3. Umsetzungsvariante sowie Zählmodule der 2. Umsetzungsvariante in Feldversuchen getestet. Der Versuch wurde in Niedersachsen in der Bezirksförsterei Suderburg, Revier Uelzen, umgesetzt (vgl. Abbildung 71). Der Versuch wurde nach 2 Monaten und 2 Wochen eingestellt.

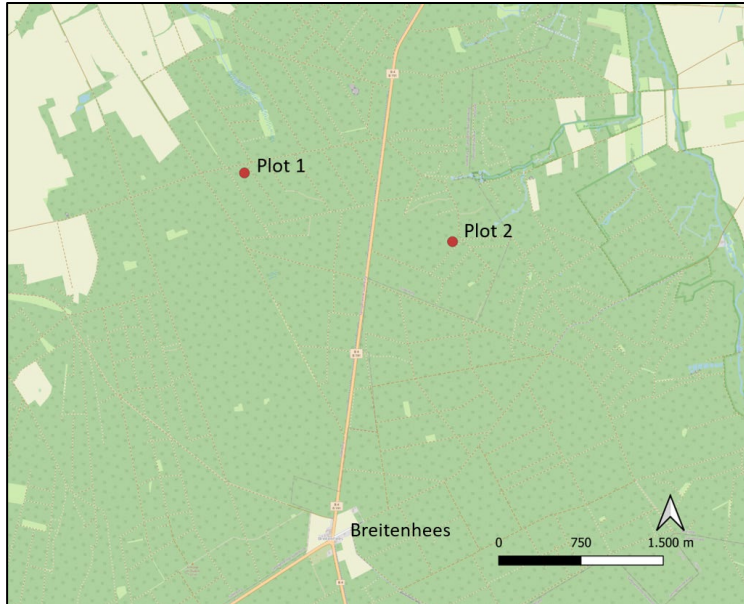


Abbildung 71: Versuchsstandorte für die Forleule im Forstamt Uelzen, Bezirksförsterei Suderburg

3. Feldversuch: Integriertes Fallensystem (Schwammspinner (*Lymantria dispar*))

Versuchszeitraum 24.06.2024 – 17.09.2024

In Hessen im Revier Solms des Forstamts Wetzlar (vgl. Abbildung 65) wurde ein Feldversuch durchgeführt, bei dem Pheromonabgabemodule der 3. Entwicklungsstufe und Zählmodule der 3. Version getestet wurden. Der Versuch wurde nach einer Laufzeit von zwei Monaten und drei Wochen abgeschlossen.

4. Feldversuch: Integriertes Fallensystem (Nonne (*Lymantria mochacha*))

Versuchszeitraum 03.07.2024 – 19.09.2024

Im Rahmen dieses Feldversuchs wurden Pheromonabgabemodule in der 3. Umsetzungsvariante sowie Zählmodule in der 3. Umsetzungsvariante getestet. Die Durchführung fand in Sachsen-Anhalt im Revier Bretsch des Forstamts Nordöstliche Altmark statt (siehe Abbildung 72). Nach einer Dauer von zwei Monaten und drei Wochen wurde der Versuch abgeschlossen.

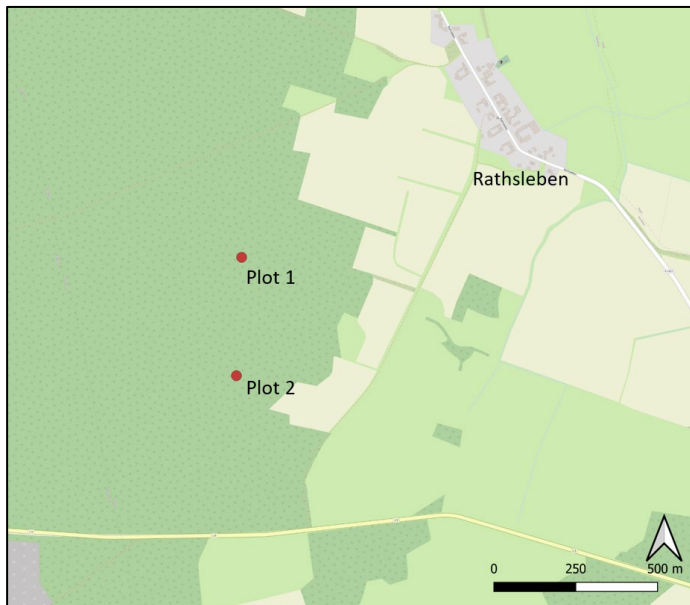


Abbildung 72: Versuchsstandort für die Nonne im Forstamt Nordöstliche Altmark, Revier Bretsch

5. Feldversuch: Integriertes Versuchsmuster (Kleiner Frostspanner (*Operophtera brumata*))

Versuchszeitraum 05.11.2024 – 10.12.2024

Im Zuge eines Feldversuchs wurden Pheromonabgabemodule in ihrer 3. Entwicklungsstufe sowie Zählmodule in der 3. Variante evaluiert. Die Untersuchung fand in Hessen in den Revieren Beberbeck und Sababurg, die zum Forstamt Reinhardshagen gehören, statt (siehe Abbildung 73). Der Versuchsteil war in einen Ringversuch mehrerer Bundesländer integriert, bei dem die männlichen Falter des Frostspanners mit Pheromonfallen gefangen werden. Im Gegensatz zu den anderen vier Versuchen, bei denen je Standort je ein integriertes Versuchsmuster ausgebracht wurde, wurden in diesem Versuch je Standort zwei integrierte Versuchsmuster ausgebracht. Daraus ergab sich ein Fallendreieck, bei dem eine Standardfalle mit zwei Versuchsmustern kombiniert wurde. Nach einer Laufzeit von insgesamt elf Wochen wurde der Versuch abgeschlossen.

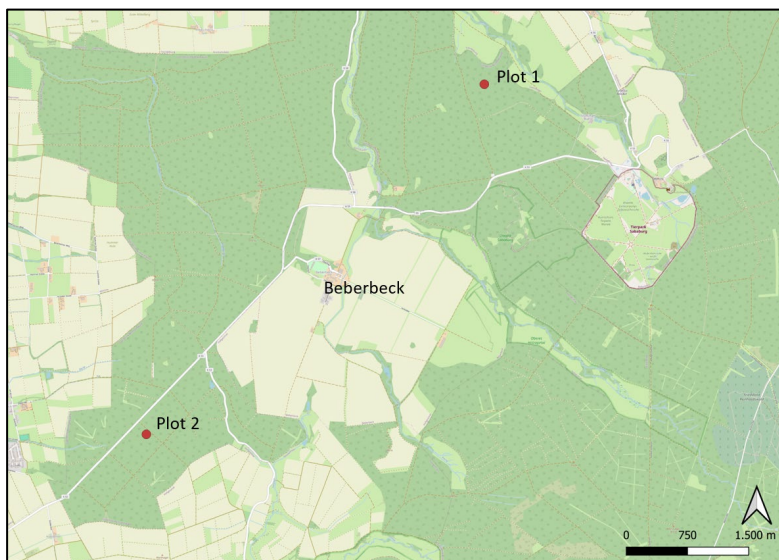


Abbildung 73: Versuchsstandort für den Kleinen Forstspanner im Forstamt Reinhardshagen, Revier Sababurg (Plot1) und Revier Beberbeck (Plot2)

AP 4 – Zusammenführung zum Versuchsmuster „Automatische Falle“

Die Vorbereitung der Zusammenführung der modular konzipierten Einzelkomponenten der automatisierten Fallen (Locken, Zählen, Energieversorgung) begann bereits im Jahr 2022 und wurde im weiteren Verlauf des Vorhabens kontinuierlich begleitend zu den Versuchsdurchführungen und Anpassungsarbeiten fortgesetzt. Hierzu wurden einzelne Komponenten in verschiedenen Varianten und Stückzahlen aufgebaut und in vordefinierten Versuchsreihen erprobt. Es erfolgten gezielte Auswertungen der Versuche (vgl. AP 5 – Erprobung und Evaluierung der „Automatischen Falle“). So wurden neben der naturwissenschaftlichen bzw. waldschutzbezogenen Auswertung der Erkenntnisse auch technische Aspekte ermittelt, die Veränderungs- und/oder Verbesserungsbedarf hinsichtlich der Komponenten aufzeigten. Sowohl funktionale als auch einsatzbedingte (z. B. Umwelt, Umfeld, Bedienung) Auffälligkeiten wurden ermittelt und im Projektteam ausgewertet. Die Erkenntnisse dieser Arbeiten flossen sowohl in Überprüfungen der Anforderungsdefinitionen, als auch in die technische Überarbeitung und die Priorisierung von Umsetzungsvarianten ein. Nachfolgende Tabelle 17 zeigt eine Auswahl von Erkenntnissen, die im Rahmen der ersten Versuche gewonnen wurden und daraus abgeleitete Verbesserungspotenziale.

Tabelle 17: Ausgewählte, im Rahmen von Versuchen der modularen Einzelkomponenten gewonnene Erkenntnisse und Lösungsansätze im Jahr 2022

	Erkenntnisse der Versuche	Lösungs- bzw. Verbesserungsansatz
1	Fangzahlen womöglich nicht eindeutig bzw. nicht interpretierbar	Erweiterung von 2 Ebenen mit Lichtschranken auf 3 Ebenen für die automatische Zählfalle
2	Energiebedarf zu hoch bzw. Laufzeit zu kurz	Ersetzung des Raspberry durch einen stromsparenden µProzessor, Integration abschaltbarer Komponenten und diverser Sleepmodes
3	Unzureichender Wetterschutz (z. B. Faltenbildung) und fehleranfällige Verdrahtung der Komponenten	Optimierung Leiterplattenform und Schaltungsdesign
4	Anzahl eigenständiger Teilsysteme zu hoch (nicht vernetzbar und kombinierbar)	Erstellung modulares Systemdesign (wechselbare und selbsterkennende Teilmodule) für Lichtschrankenmodule, Pumpenmodul und Motormodul
5	Sehr hohe Druckkräfte für das Durchdrücken eines Festköders aus einem Blister.	Sofern dieses Prinzip weiterverfolgt wird, müssen hierzu noch detaillierte Versuche der auftretenden Kräfte durchgeführt werden, damit in einem automatischen Mechanismus ein reibungsloser Ablauf gewährleistet wird. Alternative Aufbauten (Revolverabgabe)
6	Die Konzepte zur Energieversorgung mit Lithium-Ionen-Akkus haben sich in ersten Versuchen als nicht praktikabel erwiesen (Laufzeit Zählfalle < 1 Tag). Gründe: zu niedrige Kapazität für den Versuchsaufbau	Als Zwischenlösung wurde die Energieversorgung mittels Autobatterien gewährleistet. Mittelfristig wird die Verwendung von Akkus mit einem Gewicht von rund 1 kg angestrebt. Diese Lösung soll dann durch den Einsatz eines Solarmoduls unterstützt werden.
7	Die ersten Versuchsreihen mit Pheromonköderwechsel (Schwammspinner / Nonne) zeigten keine Verbesserung der Fangergebnisse aufgrund der Lockwirkung im Vergleich zur Standard-Variante.	Wiederholung der Versuche im Jahr 2023 unter Einsatz weiterentwickelter Pheromonköder-Wechselmechanismen. Zu prüfen ist weiterhin die Verbesserung der Lockwirkung durch mehrere Köder.
8	Geringe Fangzahlen (Frostspanner, Breitflügelspanner)	Änderung des Wetterschutzes hin zu einem durchsichtigen Material, um den Lichtreiz nach oben hin zu verringern damit der Ausflug der Tiere verringert wird.

Im Mittelpunkt der Auswertungen der Versuchsreihen und der Erarbeitung von Verbesserungsvorschlägen standen insbesondere Überarbeitungen der technischen Komponenten. Diese schlossen Fehlersuchen und -behebungen, Funktionsverbesserungen sowie Überarbeitungen am Aufbau und Gehäusekomponenten und die Weiterentwicklung an der Steuerung der Falle ein.

Die Arbeiten zur Integrierbarkeit der modularen Komponenten umfassten darüber hinaus die konzeptionellen Vorarbeiten zur Anpassung der Funktionsmusterentwürfe, die in den vorangegangenen Abschnitten bereits beschrieben wurden (vgl. AP2 und 3). Im Rahmen dieser Arbeiten wurden insbesondere die Konzepte und Bauteile der integrierten Steuerung der Fallenkomponenten aufeinander abgestimmt. Diese Arbeiten waren allerdings durch die bereits beschriebenen Engpässe bei der Beschaffung von elektronischen Bauteilen für die Umsetzung der Versuchsmuster insbesondere in den durch die Coronapandemie geprägten Projektjahren stark behindert.

Überarbeitung und Weiterentwicklung der Komponente „Zählen der Fänge“

Im Jahr 2023 wurden die Montagehalbschalen der Lichtschrankenebenen sowie das mittig angeordnete HT-Rohr durch Vollrohrstücke mit Montageflansch ersetzt. So können direkt beginnend unter dem Einflugtrichter die Lichtschrankenebenen als in sich fixes Element flexibel in 2fach oder 3fach Anordnung aneinander montiert werden. Damit ist ein „Verrutschen“ der Anbauelemente am HT-Rohr ausgeschlossen und die aufeinander ausgerichteten Infrarot-LEDs und Receiver bleiben in ihrer Anordnung bestehen bzw. fix.

Nach der mechanischen Optimierung, die zwei Halbschalen in ein Modul in Form eines Vollrohrstückes zu überführen, folgten weitere Systemtests im Labor und im Freiland.

Die Freifeldtests haben ergeben, dass trotz der mechanischen Verbesserung, immer noch eine zufällig auftretende Fehlfunktion der Lichtschranken besteht. Um die Ursache der Fehlfunktion, als „Flackern“ bezeichnet, zu finden, wurden diverse Tests und Analysen durchgeführt. Problematisch bei dieser Suche war, dass das Flackern am Fraunhofer Standort in Magdeburg nicht provoziert werden konnte.

Die im Folgenden aufgeführten, potenziell möglichen Fehlerursachen wurden untersucht und analysiert:

Optisches Übersprechen zwischen den Lichtschrankenebenen

Im Versuchsaufbau wurde eine Falle mit einer Lichtschrankenebene im normalen Aufbau in Betrieb genommen. Mit einer zweiten Sende-LED, über einen externen Signalgenerator mit 30 kHz gepulst, wurde versucht den IR-Receiver dieser Lichtschranke zu stören.

Trotz verschiedener Winkel, Ausrichtung und Abstände konnte kein fehlerhaftes Auslösen des IR-Receivers detektiert werden.

Somit kann festgestellt werden, dass mit diesem System und den durchgeführten Störfestigkeitsuntersuchungen ein optisches Übersprechen zwischen den Lichtschrankenebenen nicht provoziert werden konnte. Es ist also relativ unwahrscheinlich und scheint somit nicht die Ursache für das zufällig auftretende Lichtschrankenauslösen zu sein.

Abstand zwischen den Lichtschrankenebenen zu gering

Eine Störung der Lichtschrankenebenen untereinander könnte nur auf ein optisches Übersprechen zurückzuführen sein. Der Einfluss der Lichtschrankenebenen untereinander (siehe vorherigem Test) konnte im Rahmen von verschiedenen Tests nicht nachgewiesen/provoziert werden.

Der zu wählende Abstand zwischen den Lichtschrankenebenen muss sich nicht an den Lichtschranken orientieren, sondern sollte anhand des Falterflugs (Geschwindigkeit $\leftrightarrow$ Detektion, etc.) gewählt werden.

Witterungsbedingungen haben einen Einfluss auf die Lichtschrankenfunktion

Es wurden 2 Fallen auf dem Dach des Fraunhofer IFF (Hauptgebäude, Sandtorstrasse) für 3 Tage positioniert (Abbildung 74). Das Wetter war stürmisch und die Temperaturen lagen in einem Bereich zwischen 6°C und -10°C. Bei diesem Außenbereichstest konnte kein Fehlverhalten detektiert und provoziert werden.

Mit dieser Erkenntnis lässt sich aber nicht sicher sagen, dass unter diesen Umständen keine Fehldetektionen auftreten würden.



Abbildung 74: Testanordnung Freifeldtest auf dem Dach Fraunhofer Gebäude Sandtorstrasse

Überschwingen bei Pegeländerung am Mikrocontrollereingang führt zu Fehlzählungen

Das erste Überschwingen (>5 Volt) fallender Flanke am Mikrocontrollereingang, gefolgt von einigen gedämpften Schwingungen führt zu Rückkopplungen die wiederum eine fehlerhafte Lichtschrankenauslösung am Mikrocontrollereingang hervorruft. Mehrere manuell ausgelöste Lichtschrankenevents, die zu den entsprechend abgelegten Diagrammaufzeichnungen geführt haben, führten zu keinen Einträgen auf der SD-Karte. Ein Entprellen der Lichtschrankenausgänge ist unbedingt notwendig, um vermeintlich detektierte "Falterdurchflüge" zu vermeiden. Aktuell wird eine Pegeländerung firmwareseitig erst nach 7 ms als valide Pegeländerung akzeptiert. Folgende Abbildung 75 visualisiert die zeitliche Verzögerung des Lichtschrankensignals vom IR-Receiverausgang zum Mikrocontrollereingang.

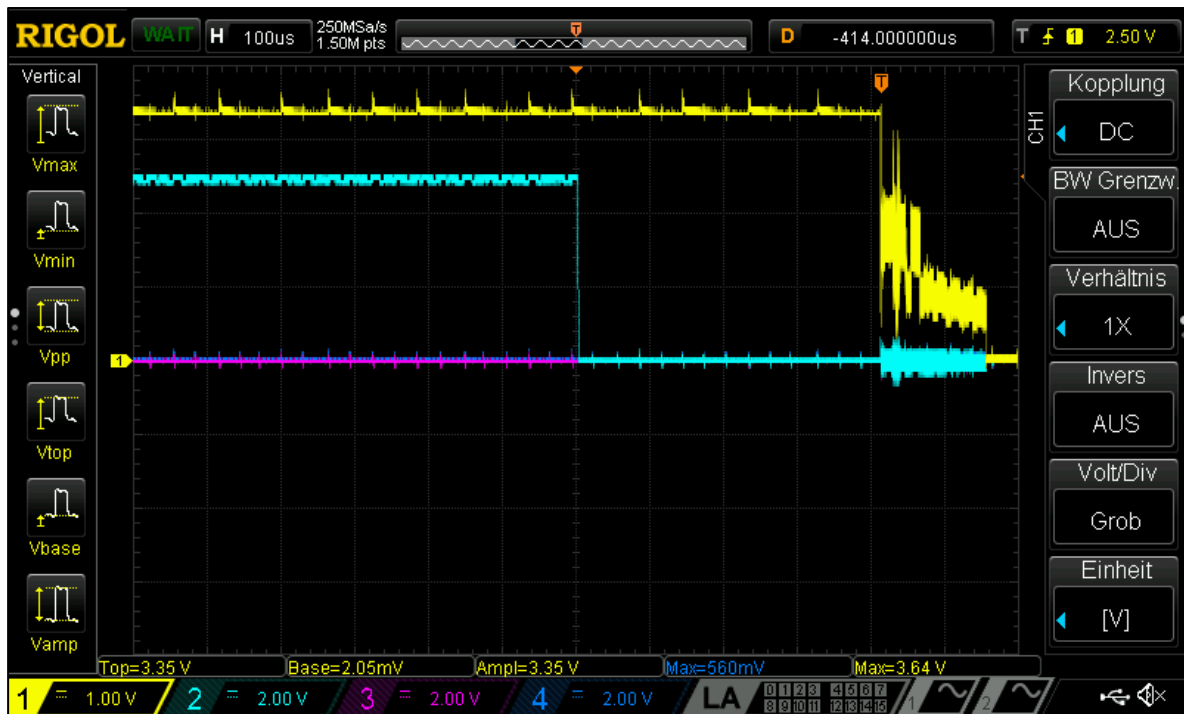


Abbildung 75: Zeitliche Verzögerung des Lichtschrankensignals vom IR-Receiverausgang (hellblau) zum Mikrocontrollereingang (gelb)

In Abbildung 76 ist das Überschwingen und das gedämpfte Schwingen des IR-Sensorsignals am Mikrocontrollereingang dargestellt.

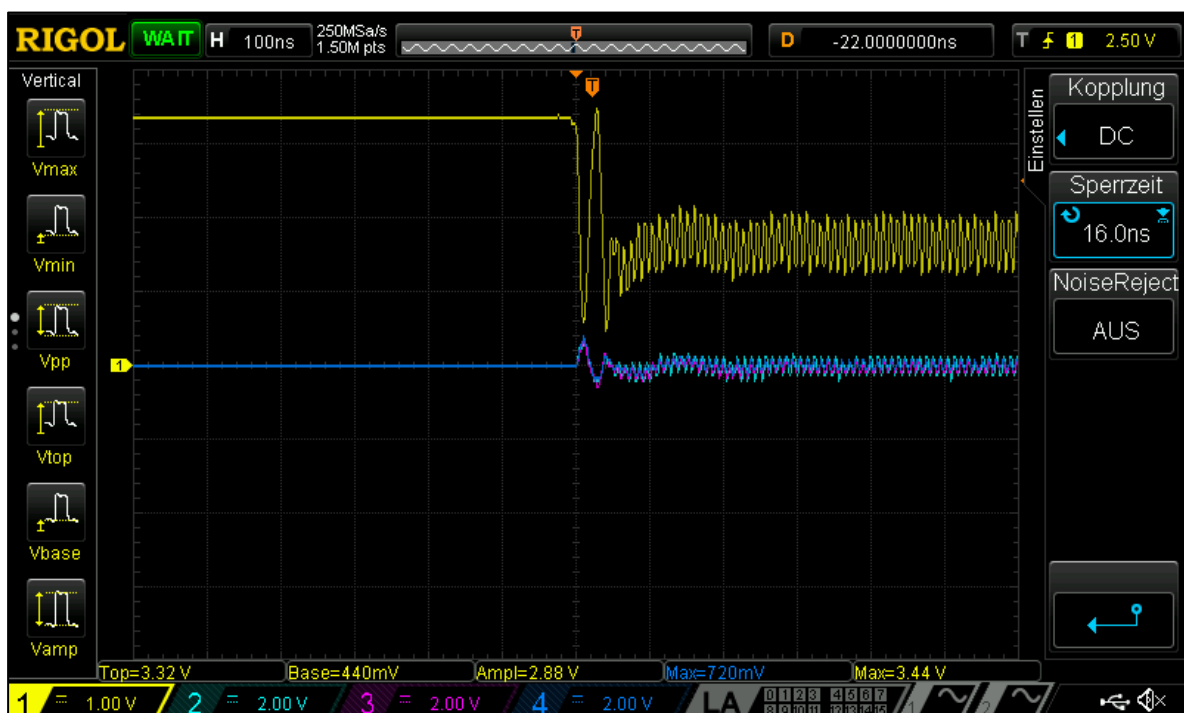


Abbildung 76: Überschwingen und gedämpftes Schwingen am Mikrocontrollereingang (gelb)

Die Arbeiten zur Verbesserung der Funktionsstabilität der Zählkomponenten wurden ausgehend von diesen Erkenntnissen fortgesetzt und weitere Anpassungen an den Komponenten vorgenommen.

Ein besonderer Fokus wurde hierbei aufgrund dessen, dass die Zählung der Fänge die relevante Kernfunktion der Falle ist, weiterhin auf das Zählmodul gelegt. Die im Folgenden hervorgehobenen, im Projektverlauf iterativ durchgeführten Verbesserungen und Optimierungen am Zählmodul stehen beispielhaft für Arbeiten, die in der Phase der Zusammenführung von Einzelkomponenten zu dem integrierten Funktionsmuster der Verbesserung des Aufbaus durchgeführt wurden.

- Optimierung der Lichtschranken selbst
- Hierbei wurden zunächst 8mm-Acryllichtleitern vor den Sende-LEDs zur Bündelung (Einsammeln) des abgestrahlten Infrarotlichts eingesetzt. Des Weiteren erfolgte eine Fokussierung des IR-Empfangszweig durch Minimierung der effektiven Empfangsöffnung über Verwendung eines vorgesetzten 4mm-Acrylstabs (Lichtleiter). Ergänzt wurde der Gesamtaufbau um den Einsatz eines 10fach höheren LED-Vorwiderstandes, um die abgestrahlte Lichtleistung der LED zu minimieren. Diese Minimierung war notwendig, da durch Verwendung der Lichtleiter vor Sender und Empfänger weniger ungenutztes Licht undefiniert abgestrahlt wurde. Als positiver Nebeneffekt ist hervorzuheben, dass diese Anpassung zu einem deutlich geringeren Energiebedarf der Lichtschrankenebene führte. Abschließend erfolgte eine Anpassung der Infratreceiver auf die Empfänger mit einer fixen Eingangsverstärkung. Vorher wurden Empfänger mit einer automatischen Verstärkerregelung verwendet, die sich auf Basis der Versuchsergebnisse als ungeeignet erwies.
- Mechanische Optimierung der Lichtschrankenhalbschalenebene
- Hierbei wurden die Lichtschrankenebenen als vollständige Rohrflanschmodule ausgeführt, so dass die Lichtschranke mit Sender und Empfänger in einem Modul montiert werden. Damit sind diese in einer fixen Ausrichtung zueinander angeordnet und der Sende- und Empfangszweig können sich nicht mehr verschieben. Durch eingesetzte Flanschringe oben und unten an den Modulen kann eine beliebige Anzahl von Ebenen frei wählbar gestapelt werden.

Einhergehend und parallel zu den Arbeiten zur Verbesserung des elektronischen Verhaltens und der Steuerung der Zählkomponente wurden auch Gehäuse- und Bauteile der Fallenkomponenten den stets neuen Anforderungen angepasst und in iterativen Schritten verbessert. Diese würden zunächst anhand der Rückmeldungen aus den Versuchen als Neuerungen in der 2. Generation umgesetzt, bei der die Zählmodule neugestaltet wurden. Alle unnötigen Befestigungen und Schraubverbindungen wurden entfernt. Ein unbeabsichtigtes Verstellen der Lichtschrankenelemente wird somit unterbunden. Passend dazu wurden das obere und untere Anschlussmodul zur Integration in eine Standardfalle modifiziert. Dadurch wurden alle noch vorhandenen Toträume, in welche sich evtl. Falter verkriechen konnten, eliminiert. Auch die mögliche Beeinflussung der oberen Dioden durch den Einflugtrichter wurde hiermit ausgeschlossen. Es entstand ein deutlich kürzerer Aufbau der Zählkomponente, d. h. auch der Flugweg durch die Falle reduzierte sich um ca. 30 %, wodurch auch eine mögliche Fehlerquelle (geringere Fangzahlen im Vergleich zur Standardfalle) potenziell reduziert worden ist. Die nachfolgenden Abbildungen illustrieren die durchgeführten Überarbeitungen des Funktionsmusters der Zählfalle.

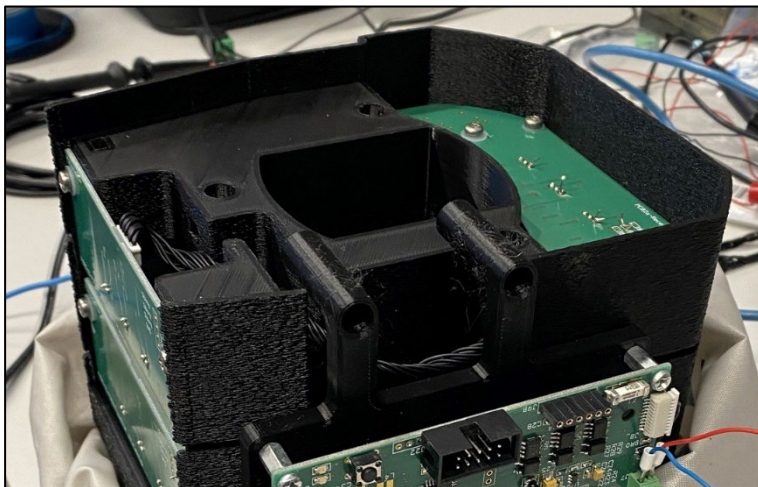


Abbildung 77: Zählmodul der 2. Generation inkl. Platinen

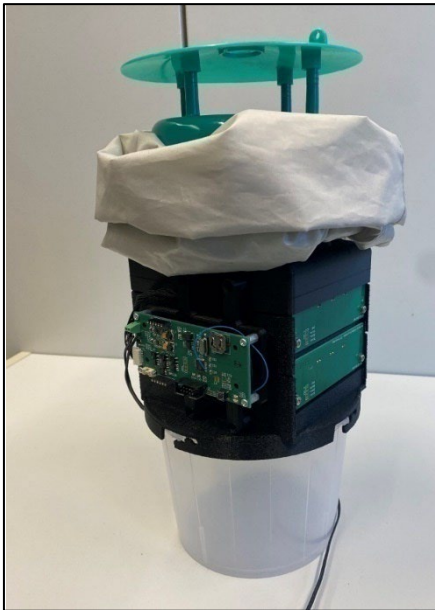


Abbildung 78: Falle der 2. Generation mit zwei Ebenen

Eine weitere Modifizierung wurde mit der derzeit aktuellen 3. Generation der Zählkomponente umgesetzt. Im Jahr 2024 wurden die Versuchsmuster mit Solarpanels ausgestattet, die zwischen Februar und Dezember ausreichend Energie für den autarken Betrieb liefern. Bei geringer Sonneneinstrahlung soll das System dank Batterien eine Woche lang autark arbeiten können. Das Zählmodul wurde komplett überarbeitet, mit neuen 3D-gedruckten Gehäuseteilen und einsteckbaren Akkus sowie einem Ein/Aus-Schalter. Zusätzlich wurde der Algorithmus zur Auswertung der Lichtschrankenereignisse und zur Analyse des Flugverhaltens verbessert, um die Fangzahlen plausibel zu überprüfen. Ein weiterer Vorteil stellt die schnelle und einfache Erreichbarkeit der SD-Karte dar, welche nun direkt von unten entnommen werden kann.



Abbildung 79: rechts: Zählfalle der 3. Generation (ohne Wetterchutz und oberem Einfülltrichter), links: Vollfunktionsfähige Zählfalle der 3. Generation mit Wetterchutz und allen Modulen.

AP 5 – Erprobung und Evaluierung der „Automatischen Falle“

Ziel ist die Überprüfung des Versuchsmusters „Automatische Falle“ unter Feldbedingungen und die Anpassung der Komponenten an die praktischen Erfordernisse. Eine Methodik zur Nutzung des Systems unter Einhaltung der Zielparameter wird auf der Basis von Versuchen entwickelt. In Versuchen werden Einsatzdaten des „Automatischen Fallensystems“ ermittelt und mit den technischen und anwendungsbezogenen Zielstellungen abgeglichen. Referenzwerte liefern u. a. konventionelle Fallen in typischen bzw. den Testbedingungen entsprechenden Überwachungssituationen.

Übersicht über alle Versuche (Anzahl der Standorte X eingesetzter Versuchsmuster)

Im Jahr 2022:

3 Freilandversuche: Forleule (2x3), Nonne (3x3), Frostspanner (3x3)

1 Semifreilandversuch: Schwammspinner (3x3)

Im Jahr 2023:

3 Freilandversuche: Frostspanner (3x3), Breitflügelspanner (3x3), Schwammspinner (3x3)

1 Semifreilandversuch: Schwammspinner

Im Jahr 2024:

5 Freilandversuche: Breitflügelspanner (2x2), Forleule (2x2), Nonne (2x2), Schwammspinner (2x2), Frostspanner (2x2)

Kurzdarstellung der wichtigsten Ergebnisse aus den Freilandversuchen im Jahr 2022

1. Zielorganismen

Abbildung 80 stellt die Boxplots der im Jahr 2022 in der Altmark untersuchten Fallenvarianten für die Spezies Nonne dar. Die Versuchsmuster wurden jeweils in dreifacher Wiederholung mit Standardfallen des Typs Variotrap-Trichterfalle verglichen. Es wird ersichtlich, dass die Fangzahlen der Versuchsmustervariante „Zählmodul“ insgesamt niedriger ausfallen als die anderen Fallenvarianten.

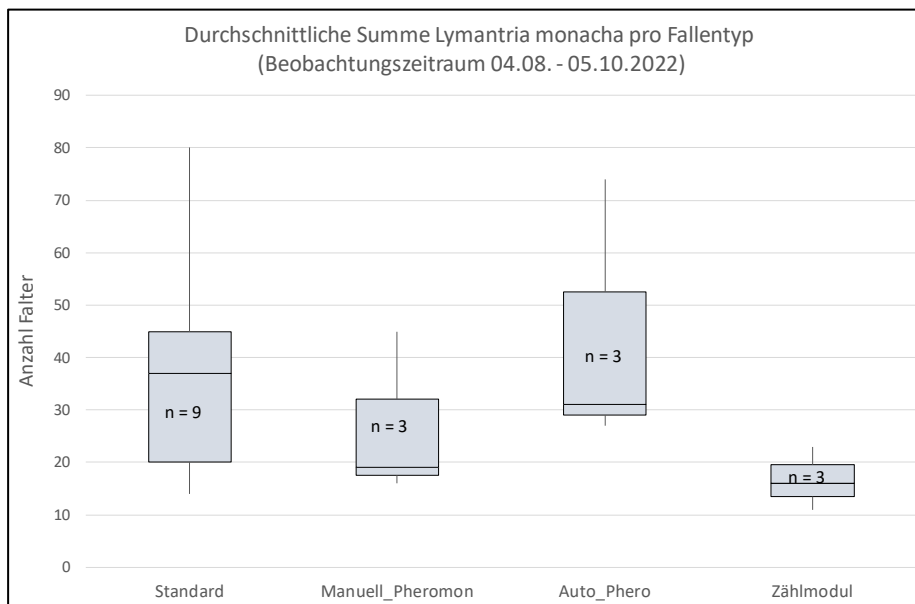


Abbildung 80: Boxplots der Falterfänge in der Spezies Nonne im Bereich Altmark 2022: Falterfänge der Fallenvarianten "Standard-Variotrap-Trichterfalle", "Manueller Pheromonköderwechsel", "Automatischer Pheromonköderwechsel" und "Zählfalle"

Abbildung 81 illustriert den Fangverlauf der Pheromonköder-Wechselmechanismen im Vergleich zur Standardfalle ohne Köderwechsel. Es wird deutlich, dass die Gesamtfänge der Fallen ohne Köderwechsel höher liegen, als bei den Fallenvarianten mit Köderwechsel. Insgesamt ist jedoch festzustellen, dass kein signifikanter Unterschied in den Daten vorliegt, sodass beide Fallenvarianten ein ähnliches Niveau an Fangzahlen erreichen.

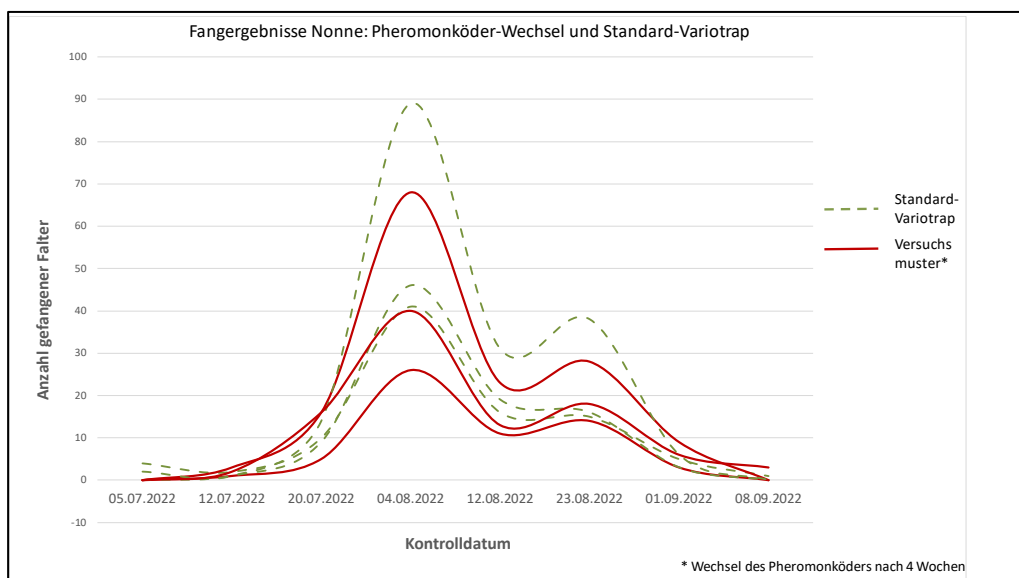


Abbildung 81: Fangverlaufsdiagramm 2022 der Versuchsmuster mit Pheromonköderwechsel (rot) im Vergleich zur Standard-Variotrap-Trichterfalle in der Spezies Nonne im Bereich Altmark

Der Fangverlauf der Versuchsmuster mit Pheromonköderwechsel im Vergleich zur Vergleichsfalle „Standard-Variotrap-Trichterfalle“ für die Spezies Schwammspinner ist in Abbildung 82 aufgezeigt. Auch hier konnten generell keine signifikanten Unterschiede in den Fangzahlen der verglichenen Fallenvarianten festgestellt werden.

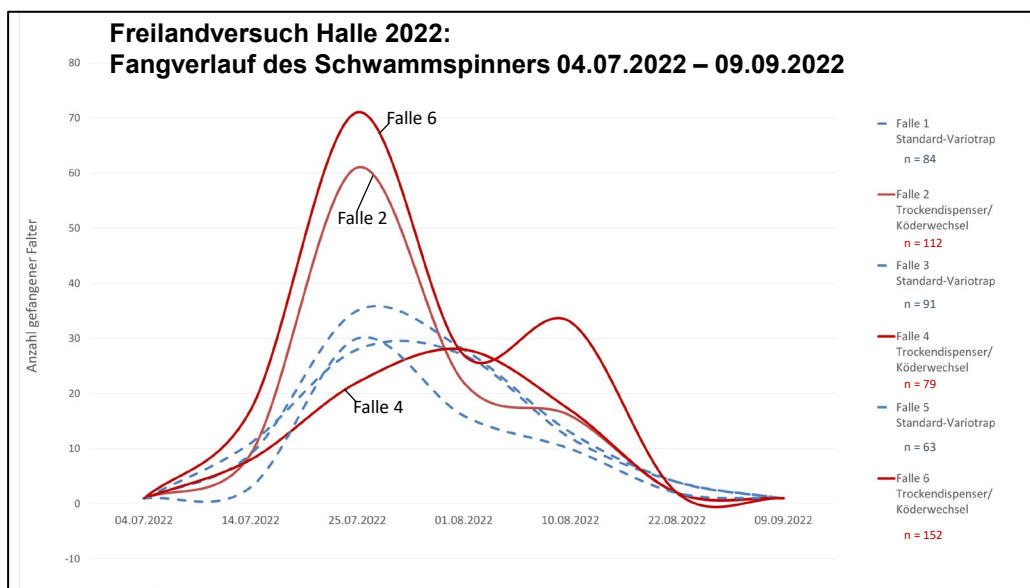


Abbildung 82: Fangverlaufsdiagramm 2022 der Versuchsmuster mit Pheromonköderwechsel (rot) im Vergleich zur Standard-Variotrap-Trichterfalle

in der Spezies Schwammspinner im Stadtwald Halle

2. Nichtzielorganismen

Neben der Betrachtung der Fangzahlen der Zielspezies wurden auch alle Beifänge der durchgeführten Freilandversuche in den Spezies Forleule, Nonne und Schwammspinner untersucht. Für die Forleule ergaben sich nur sehr wenige Beifänge. Tabelle 18 zeigt die Ergebnisse der Analyse für die drei hexagonalen Versuchsanordnungen im Stadtwald Halle in der Spezies Schwammspinner auf Ebene der Insektenfamilien.

Tabelle 18: Übersicht der dominanten Familien für die drei Versuchsplots in der Spezies Schwammspinner im Stadtwald Halle 2022

	Muscidae	Lonchaeidae	Sarcophagidae	Phoridae	Cecidomyiidae	Fannidae	Calliphoridae	Vespidae	Pteromalidae
Plot 1 (n = 7)	40,39%	10,51%	9,91%	4,19%	2,79%	2,59%	1,73%	13,71%	1,26%
Plot 2 (n = 7)	42,61%	4,12%	14,72%	2,50%	2,81%	< 1%	1,50%	13,97%	2,50%
Plot 3 (n = 7)	28,77%	16,56%	7,32%	7,15%	3,31%	< 1%	2,70%	13,86%	2,18%

Abbildung 83 illustriert die Ergebnisse für alle Versuchsanordnungen (Fallenanzahl n = 18) auf Ebene der Ordnungen. Demnach wurden in den Pheromonfallen neben den männlichen Faltern des Schwammspinners (ca. 27 %) vor allem Zweiflügler (ca. 53 %) und Hautflügler (ca. 14 %) aufgefunden.

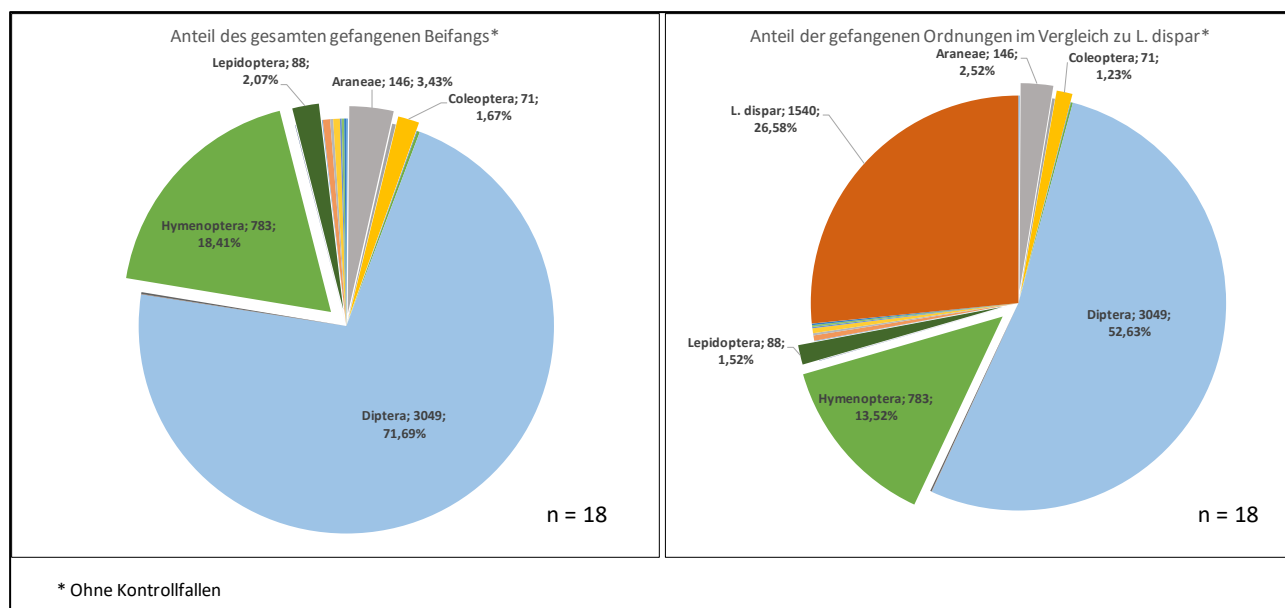


Abbildung 83: Ergebnisse der Bestimmungsarbeiten hinsichtlich der als Beifang in Schwammspinner-Pheromonfallen aufgefundenen Arthropodenordnungen im Stadtwald Halle

Tabelle 19 zeigt die Ergebnisse hinsichtlich der Beifänge aus Pheromonfallen der Nonne auf Ebene der Familien.

Tabelle 19: Übersicht der dominanten Familien für die drei Versuchsplots in der Spezies Nonne in der Altmark 2022

Plot	Muscidae	Sarcophagidae	Cecidomyiidae	Phoridae	Sciaridae
1	17,76 %	10,20 %	7,57 %	5,92 %	5,59 %
2	9,81 %	11,32 %	10,19 %	13,96 %	6,04 %
3	14,29 %	8,16 %	9,80 %	11,84 %	2,04 %

Abbildung 84 zeigt die Ergebnisse der Beifänge für die in der Spezies Nonne durchgeführten Pheromonfallenversuche im Jahr 2022. Neben dem Nonnenfalter, welcher 42 % der Gesamtfänge ausmachte, wurden insbesondere Zweiflügler (33 %), Hautflügler (8 %) und Spinnen (6 %) identifiziert.

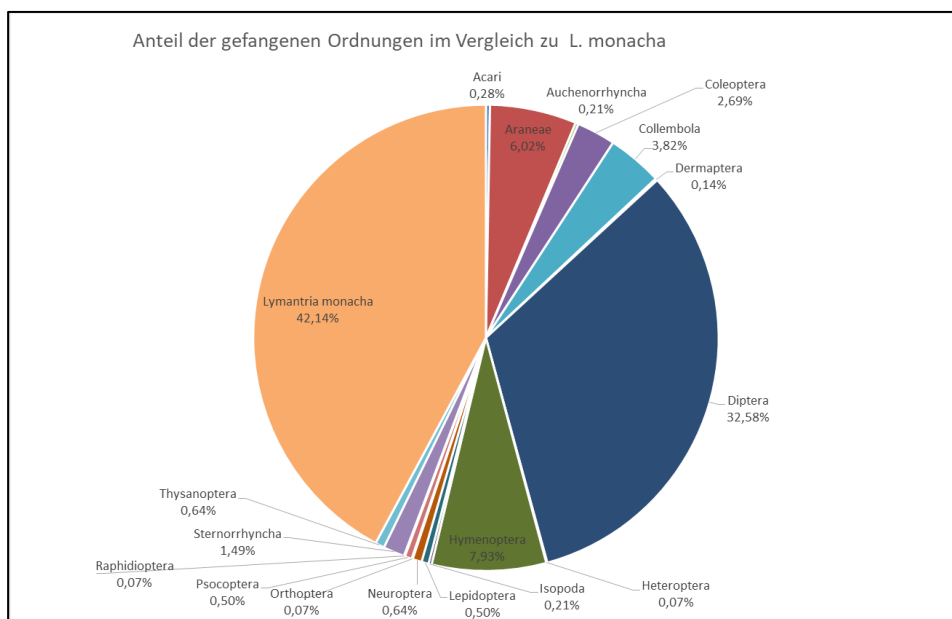


Abbildung 84: Ergebnisse der Bestimmungsarbeiten hinsichtlich der als Beifang in Pheromonfallen des Nonnenfalters aufgefundenen Arthropodenordnungen in der Altmark in Sachsen-Anhalt 2022

Ergebnisse des Laborversuchs „Langlock-Dosierfläschchen“

Die Temperatur, bei welcher der Versuch durchgeführt wurde, lag relativ konstant bei 22°C. Die rel. Luftfeuchtigkeit schwankte stark von anfangs etwa 20 % bis etwa 40 % im mittleren Verlauf. Die letzten Tage ist die RH % nochmal etwa abgefallen auf 30 – 35 %.

Nach Ablauf von 15 Tagen wurden die folgenden Abgabemengen ermittelt:

- Do 226: 4,8 ml → 0,32 ml/d → 514.051,84 ng/d
- Do 220: 3,3 ml → 0,22 ml/d → 353.410,64 ng/d
- Do 204: 5,2 ml → 0,34 ml/d → 546.180,08 ng/d
- Do 237: 3,3 ml → 0,22 ml/d → 353.410,64 ng/d

Die Menge an verdunsteter Pheromonlösung lag im Vergleich zur bewährten Emissionsrate der Standard-Dispenser für die Forleule unter Abzug mindestens 346x zu hoch. Es konnte bei den verschiedenen Langlock-Dosiermembranen auch, anders als angegeben, keine gradierte Abgabemengen festgestellt werden. Als winteraktiver Falter wird das Pheromon der weiblichen Forleulen bei niedrigen Temperaturen abgegeben, was im vorliegenden Versuch so nicht simuliert wurde. Bei niedrigeren Temperaturen und nicht unter Abzug würde dieser Versuch jedoch eine wesentlich längere Laufzeit benötigen. Die Verdunstungsmengen lassen sich am ehesten noch auf sommeraktive Falter anwenden, da die Temperaturen hier vergleichbarer sind. Jedoch sind hierfür die Abgabemengen der jeweiligen Pheromone der Standard-Dispenser als Vergleichswerte sowie die Konzentration der Stammlösung heranzuziehen. Die Konzentration der Lösung müsste also extrem verringert werden, um die gewünschte Menge an Pheromon zu emittieren. Es bleibt aber die Frage offen, ob das verdunstende n-Hexan einen Einfluss auf den Fangerfolg nimmt und wie hoch dieser Effekt ist. Abschließend werden die Langlock-Dosierfläschchen aufgrund der beobachteten Abgaberraten für die Verwendung zur Ausbringung von Schmetterlingspheromonen als ungeeignet bewertet.

Ergebnisse des Laborversuchs „Abtötung mit Strom“:

Anflugversuch

Beim Anflug kam es immer nur zu kurzen Berührungen des Stromgitters. Teilweise sind auch hier Gliedmaßen/Fühler verbrannt. Der elektrische Schlag hat das Tier anfangs in Aufregung versetzt. Nachdem es dann mehrmals elektrische Schläge erfahren hat, blieb es erschöpft in der Plastikschele sitzen, bis es durch Erschütterung wieder aufgeschreckt wurde. Auch bei diesem Versuchsaufbau kam es nicht zu einer vollständigen Abtötung, sondern lediglich zu einer Verstümmelung der Versuchstiere.

Vorversuche

Bei den Testgeräten ohne Sicherheitsgitter kam es bei Einschalten des Gerätes sofort zum Stromfluss, wohingegen es bei den Fliegenklatschen mit Sicherheitsgitter erst zum Stromfluss kam, wenn auch das innere Gitter von den Versuchstieren berührt wurde. Bei dem Gerät der Firma Röhrich-Klatsche hatte auch der Körper

direkten Kontakt mit den leitenden Drähten, selbst wenn die Gliedmaßen (Fühler, Beine) bereits verbrannt waren. Bei den Geräten mit Sicherheitsgitter kamen die Versuchstiere ausschließlich mit den Gliedmaßen in Kontakt mit den Drähten und wurden somit nicht sicher abgetötet.

Hauptversuch

Beine und Fühler verbrennen unter Funkenflug und Rauchentwicklung recht schnell (Abbildung 85 A). Der Stromschluss führte unter geringer Rauchentwicklung zu Verbrennungen bei den größeren Falter-Arten, bei kleineren Schmetterlingsarten, wie dem Kleinen Frostspanner kam es nach etwa 15 Sek. zu einem explosionsartigen Zerreißen des Körpers. Größere Schmetterlingsarten haben sowohl den ersten Kontakt mit der Stromquelle als auch einen dauerhaften Kontakt überlebt, wenn auch mit relativ starken Verletzungen. Bei anhaltendem Stromfluss haben die Tiere zwar gezittert, aber auch lange Zeit nach dieser Prozedur (24h) waren zum Bsp. noch Flügelbewegungen zu beobachten. Der Kleine Frostspanner hingegen ist bei Dauerkontakt stark beschädigt worden. Ein einmaliger kurzer Kontakt hat auch hier nicht zum Tod des Falters geführt.

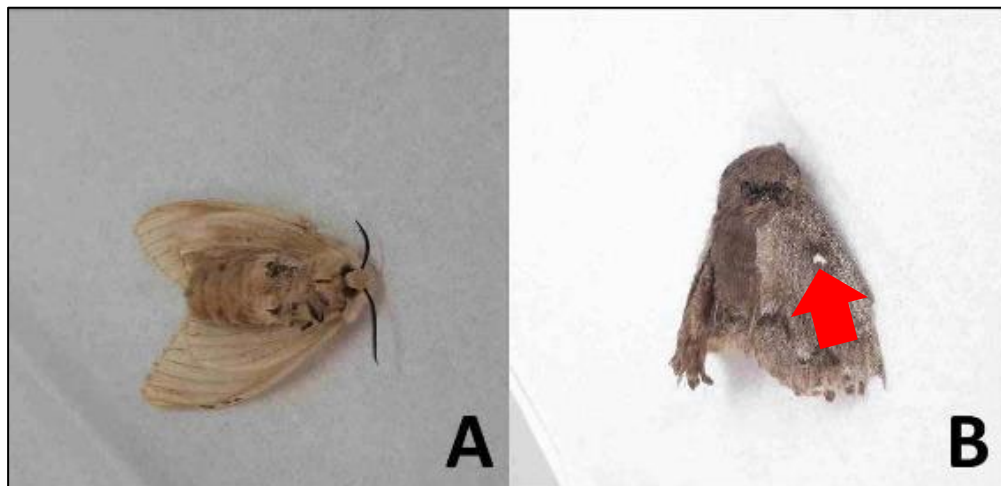


Abbildung 85: Ergebnisse des Laborversuchs elektrische Abtötung: Toter Schwammspinnerfalter mit verschmorten Gliedmaßen (A), Toter Schwammspinnerfalter mit Brandstelle am Thorax (B, roter Pfeil)

Schlussfolgerung

Die verwendeten Spannungen von 3 – 4kV (Lt. Hersteller) haben nicht ausgereicht, um Falter von der Größe eines Kiefernspinner-Männchens zu töten. Auch ist die Stromstärke nicht ausreichend gewesen um die Tiere langfristig bewegungsunfähig zu machen. Es kam immer noch zum Abflattern. Welche reale Spannung am elektrischen Gitter entsteht, konnte mit der verfügbaren Messtechnik nicht gemessen werden.

Bei Frostspannern, welche im ausgewachsenen Zustand eine Flügelspannweite von etwa 30 mm erreichen, reichte die vorhandene Spannung aus, um bei dauerhaftem Kontakt zum Tod der Versuchstiere zu führen. Jedoch wurden die Tiere dabei in kurzer Zeit derart verschmort, dass sie kaum noch zu identifizieren waren.

Die Bauweise mit Sicherheitsgitter hat sich für einen statistischen Versuchsaufbau nicht bewährt, da der Stromfluss hier oftmals nur durch die Extremitäten verläuft und nicht durch den Körper. Damit werden also auch keine lebenswichtigen Organe verletzt, was somit auch nicht zum Absterben führt. Um diese Schlussfolgerung zu bestätigen, sollte mit geeigneter Technik geprüft werden, ob sich diese Beobachtung bei letaler Spannung bestätigt. Dabei sollte der Abstand der leitenden Gitterelemente ebenfalls berücksichtigt werden, um einen Stromfluss durch den Körper zu gewährleisten.

Im Folgenden werden die im Rahmen des Versuchsbetriebs gewonnenen Erkenntnisse dargestellt. Das übergeordnete Ziel aller durchgeführten Versuche stellt die Evaluierung von digitalen Zählraten der in die Falle eindringender Falter unter Freiland-Bedingungen dar. Zur Erreichung des Versuchsziels werden Integrierte Versuchsmuster mit manuell behandelten Standardfällen verglichen. Das Design der entsprechenden Versuchsmuster ist ebenso wie die Versuchsaufbauten und die verschiedenen Komponenten der Versuchsmuster im Abschnitt „AP 2 – Konzeptentwicklung, Priorisierung von Umsetzungsvarianten und Komponentenauswahl sowie Versuchsplanung“ dieses Berichtes sowie im Kapitel „Konzeption von Testumgebungen“ beschrieben.

Dokumentation von Versuchen im Jahr 2023

1. Feldversuch: Integriertes Fallensystem (Weißgrauer Breitflügelspanner, *Agriopis leucophaearia*)

Versuchszeitraum 03.02.2023 – 23.03.2023

Für diesen Feldversuch wurden Funktionsmuster mit Pheromonabgabemodulen in der 3. Entwicklungsstufe sowie Zählmodule der 2. Entwicklungsstufe aufgebaut. Drei Versuchsmuster waren dabei als integrierte Fallensysteme ausgeführt, d. h. die Komponenten Pheromonabgabe und Zählmechanismus wurden zentral von einem Mikrocomputer gesteuert und von einer Stromquelle versorgt.

Neben der Funktionsprüfung des Zählmechanismus wurden im Rahmen dieses Teilversuchs folgende weitere Versuchsziele umgesetzt: (1) Prüfung technischer Verbesserungen der Versuchsmuster: Flackern der Infrarot-Lichtschränken, Datenabruf, Stromversorgung, (2) Prüfung einer finalen Batterielösung, (3) Prüfung der Einbindung eines 30 Watt Solarpanels unter den im Zeitraum November-Dezember gegebenen Solarstrahlungsbedingungen.

Die eingesetzten Fangsysteme zeigten eine gute Eignung zur Überwachung dieser Spezies. Erstmals eingesetzte Pheromonköder der Firma Csalomon erzielten eine artspezifische Lockwirkung für männliche Falter des Weißgrauen Breitflügelspanners (*Agriopis leucophaearia*). Die Beladungen der verwendeten Köder wurden nicht labortechnisch untersucht und es liegen keine Vergleichsköder für diese Spezies vor. Gegen Ende des Versuchszeitraums wurde auch eine Anlockung der nahverwandten Spezies des Graugelben Breitflügelspanners (*Agriopis marginaria*) beobachtet. Die männlichen Falter beider Schmetterlingsarten sind mit einer Flügelspannweite von 23-30 mm kleiner als die Modellarten Schwammspinner und Nonne. Bei diesen ersten Versuchen zur Überwachung des Weißgrauen Breitflügelspanners mit Pheromonfallen wurden je Falle innerhalb von 7 Wochen Fangzahlen von 85 – 180 Faltern erzielt. Die Versuchsergebnisse legen nahe, dass ein Köderwechsel für diese Spezies keine großen Einflüsse auf die erreichten Fangzahlen bewirkt (Abbildung 86). Zur statistischen Bestätigung dieser Beobachtung sind weitere Versuchsanlagen mit einer höheren Anzahl von Wiederholungen notwendig.

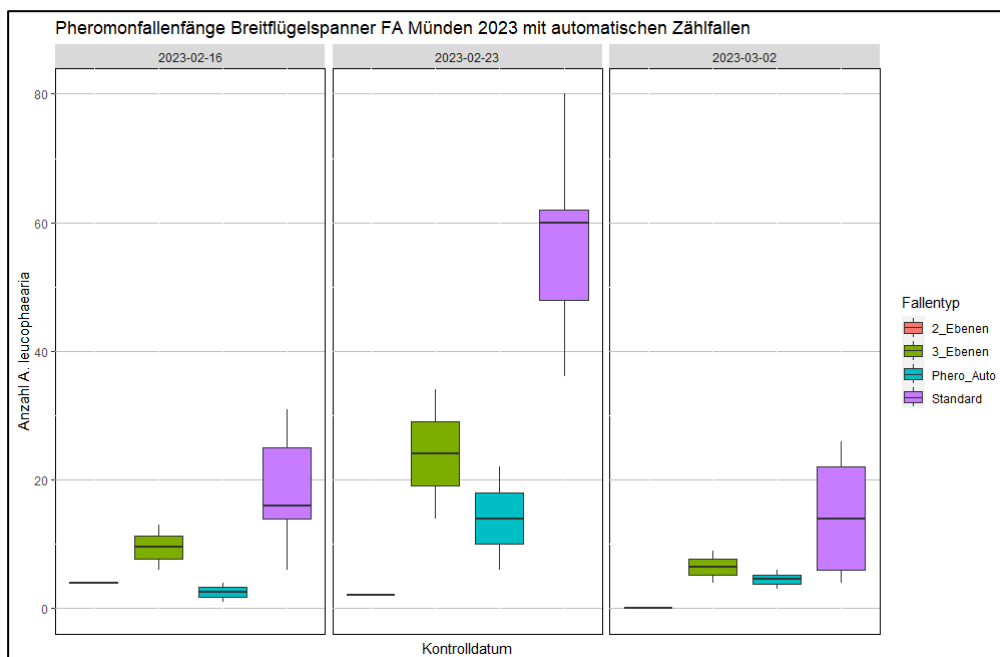


Abbildung 86: Pheromonfallenfänge Breitflügelspanner FA Münden, Revier Kattenbühl 2023

Die Auszählung und Bestimmung der in den Pheromonfallen eingefangenen Individuen an Nichtzielorganismen ergab insgesamt 1.526 Individuen. In Abbildung 87 ist die prozentuale Verteilung der im vorliegenden Versuch aufgetretenen Beifänge an Nichtzielorganismen dargestellt. Dabei nahmen Vertreter der Ordnung Diptera mit 1404 Individuen (ca. 92 %) den größten Anteil ein. Am häufigsten traten Pilzmücken (*Mycetophilidae*) mit ca. 59 % (n=1.101) auf, gefolgt von Trauermücken (*Sciaridae*) mit ca. 17 % (n=155) und Fenstermücken mit ca. 6 % (n=69).

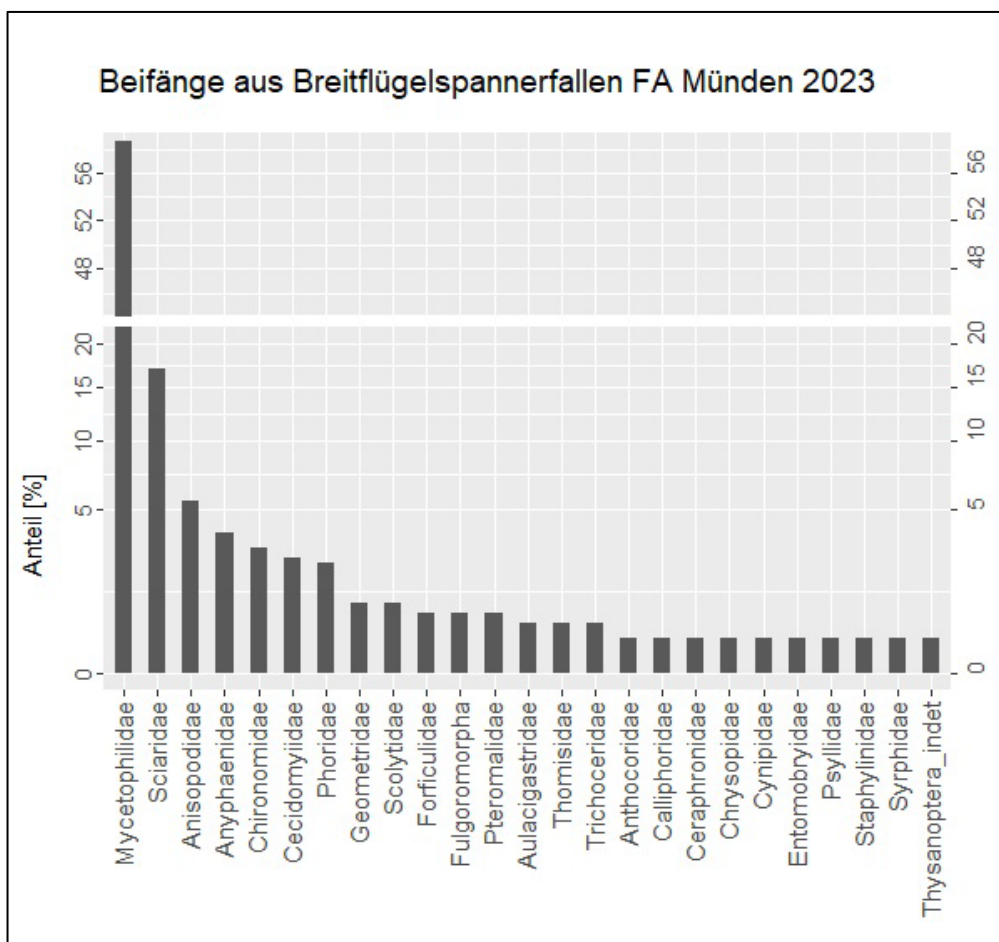


Abbildung 87: Beifänge aus Breitflügelspannerfallen FA Münden, Revier Kattenbühl 2023

In Hinsicht auf die technische Umsetzung ereigneten sich im Versuchszeitraum mehrere Funktionsausfälle der Zählfallen. Darüber hinaus lieferten die ausgelesenen Fangdaten sehr hohe Anzahlen von Zählereignissen, die sich pro Woche / Kontrolltermin im Bereich von bis zu 10^6 Auslösungen der Infrarotlichtschranken bewegten. Dieser Effekt wurde sowohl in den im Berichtszeitraum 2022 umgesetzten Feldversuchen als auch in den vorangegangenen und folgenden Versuchen häufig beobachtet und als „Flackern“ der Lichtschranken bezeichnet. Die ersten Versuche, das Problem vor Ort konstruktiv zu lösen, bestanden in der korrekten Fixierung der Lichtschrankenebenen, um undeutliche Signale durch leichtes Verrutschen der Lichtschrankenebenen bzw. Lichtschrankensensor und –emitter zu vermeiden. Auch nach ausgedehnter Fehlersuche konnte die Ursache der hohen Anzahl von Fehlzählungen zunächst nicht ermittelt werden. In der Folge konnten für diesen Versuch keine digitalen Zählraten ausgewertet bzw. keine Zählereignisse mit den manuellen Auszählungen übereingebracht werden.

2. Feldversuch: Freilandversuch mit Zuchtorganismen (Schwammspinner, *Lymantria dispar*)

Versuchszeitraum: 22.05. – 16.06.2023

Im Rahmen dieses Teilversuchs wurden folgende Versuchsziele aufgestellt: (1) Untersuchung verhaltensbiologischer Reaktionen von Zuchtorganismen der Zielart *Lymantria dispar* im Freiland, (2) Evaluierung von zwei Versuchsmustern einer digitalen Pheromonfalle mit automatischem Zählmechanismus.

In diesem Freilassungsversuch konnte nur ein Wiederfang erzielt werden. Der Großteil der etwa 300 freigelassenen Falter zeigte zwar eine Flugaktivität, ist der Lockwirkung der Pheromonköder jedoch während des Versuchszeitraumes nicht gefolgt. Die genauen Ursachen hierfür sind nicht bekannt, können jedoch beispielsweise durch Vogelfraß, Umweltbedingungen (insbesondere zu niedrige Temperaturen und Luftfeuchte) oder physiologische Einschränkungen der Versuchstiere bedingt sein. Auch kann eine repellente Wirkung des Flüssigkeits-Pheromondispensers (Versuchsmuster Mikropumpe) nicht ausgeschlossen werden. So wurden die in diesem Versuch eingesetzten Versuchstiere auf Kunstfutter angezogen, welches mit getrocknetem Eichenlaubpulver versetzt wurde. Die Minimaltemperatur des Schwärmflugs liegt für den Schwammspinner bei ca. 16°C. Diese wurde im Versuchszeitraum zwar erreicht, jedoch wiederholt von Kälteeinbrüchen unterbrochen. Der Versuch erforderte einen hohen Aufwand in Vorbereitung und Durchführung, der durch die generierten Ergebnisse letztlich nicht gerechtfertigt werden konnte. Der gewählte

Versuchsaufbau eines Wiederfangversuchs für die Spezies Schwammspinner zeigte methodische Mängel, und ist daher nicht für eine Wiederholung zu empfehlen.

In Hinsicht auf die praktische Handhabung der eingesetzten Versuchsmuster „Mikropumpe“, „2-Ebenen Zählfalle“ und „3-Ebenen Zählfalle“, konnten aus diesem Versuch Erkenntnisse abgeleitet werden, die den Betrieb der im folgenden Versuchszeitraum eingesetzten Geräte vereinfachten und weniger fehleranfällig machten. So wurde die Farbgebung einzelner Komponenten angepasst (einheitlich schwarz/grau), die Verkabelung der Stromversorgung wurde überarbeitet und die Pheromonkonzentration sowie Abgabemenge des Versuchsmusters Mikropumpe wurden angepasst.

3. Feldversuch: Integriertes Versuchsmuster (Schwammspinner, *Lymantria dispar*)

Versuchszeitraum 26.06. – 19.09.2023

Neben der Funktionsprüfung des Zählmechanismus wurden im Rahmen dieses Teilversuchs folgende weiteren Versuchsziele umgesetzt: (1) Qualitative Wirksamkeitsprüfung der Pheromon-Lockwirkung, (2) Vergleich der Pheromonabgabe mittels zweier Varianten eines „Trockendispensers“ mit und ohne Köderwechsel, (3) Untersuchung der natürlichen Umgebung eines Eichenwaldbestandes auf die Funktionalität der integrierten Versuchsmuster, (4) Evaluierung zweier Varianten des Versuchsmusters „Zählfalle“ mit 2 und 3 Lichtschrankenebenen und (5) Untersuchung der Unterstützung der Energieversorgung mittels Batterie durch Solarpanel.

Weiterhin fand eine Untersuchung der Unterstützung der Energieversorgung mittels Batterie durch Solarpanel statt. Im Laufe der Versuchsdurchführung fielen zwei der vier integrierten Versuchsmuster wochenweise aufgrund technischer Fehlfunktionen aus. In einem Fall ließ sich der Fehler vor Ort beheben. Das zweite Gerät musste rückgebaut und zur Instandsetzung nach Magdeburg eingeschickt werden. Die Verfügbarkeit von Versuchstieren der Naturpopulation des Schwammspinners lag im Versuchszeitraum mit durchschnittlich rund 200 Faltern pro Falle auf einem niedrigen, aber stabilen Niveau. Gemessen an dem hohen Aufwand der wöchentlichen Vor-Ort Kontrollen, wäre es für weitere Versuchsaufbauten wünschenswert, schon während der Kontrollgänge Informationen zur automatischen Zählung der Zielorganismen zu erhalten, um mögliche Verbesserungen sogleich erkennen und vornehmen zu können. Das Versuchsmuster „Mikropumpe“ lieferte über einen Fangzeitraum von 10 Wochen mit 42 Faltern vergleichsweise niedrige Fangzahlen, während in zwei Vergleichsfallen (Standard-Variotrap-Trichterfallen) 592 Fänge erzielt wurden (vgl. Abbildung 88).

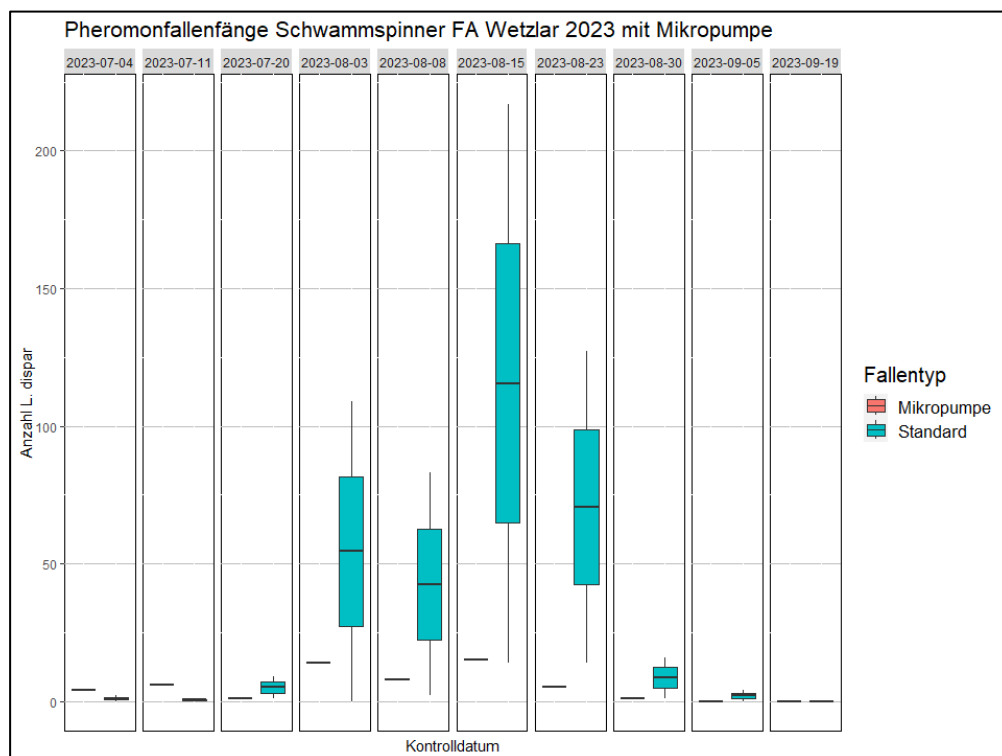


Abbildung 88: Pheromonfallenfänge Schwammspinner FA Wetzlar, Revier Solms 2023, Mikropumpe

Die Datenauswertung ergab für die Fallenvariante „Standard-Variotrap-Trichterfalle“ durchschnittlich niedrigere Fangzahlen als in die Variante „Integriertes Versuchsmuster“ (vgl. Abbildung 89). Insgesamt wurden über einen Zeitraum von 11 Wochen 1.458 Falter der Zielspezies Schwammspinner in Pheromonfallen eingefangen. In der Auswertung wurden außerdem 32 Fänge der nahverwandten Nonne (*Lymantria monacha*)

einbezogen. Die manuelle Auszählung ergab in den Standardfallen insgesamt 707 Fänge, was im Mittel 113 Fängen je Standardfalle entspricht. In den beiden Versuchsaufbauten mit 2 Lichtschrankenebenen wurden insgesamt 491 Zielorganismen, in den Geräten mit 3 Lichtschrankenebenen in der Summe 283 Zielorganismen ausgezählt. Im Verlauf der Versuchsdurchführung ist ein 3-Ebenen-Versuchsmuster über einen Zeitraum von 2 Wochen ausgefallen.

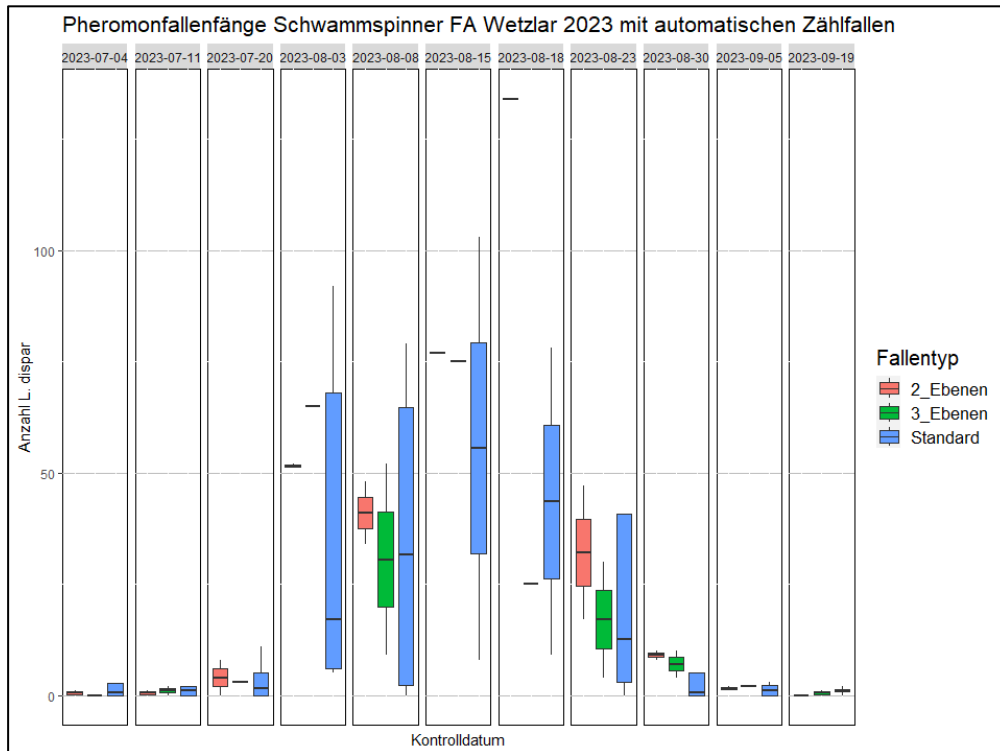


Abbildung 89: Pheromonfallenfänge Schwammspinner FA Wetzlar, Revier Solms 2023, Zählfallen

Damit haben sich für die Spezies Schwammspinner in den bislang umgesetzten Feldversuchen für Fallen mit Köderwechsel im Vergleich zu einfach beköderten Vergleichsfallen im Mittel über alle Einzelfallen höhere Fangzahlen ergeben. Im Vergleich aller untersuchten Spezies hat sich der Schwammspinner aus biologischer Sicht als besonders geeignet für weitere Feldtests erwiesen. Neben dem häufigen Vorkommen dieser Spezies bieten die breite Forschungslage im Bereich der biologischen Grundlagen sowie auch die gute Eignung für eine Zucht auf Naturfutter gute Voraussetzungen für weiterführende Untersuchungen.

Die Ergebnisse der Auszählung und Klassifizierung der Gruppe der Nichtzielorganismen ist in Form der prozentualen Anteile vorkommender Familien in Abbildung 90 dargestellt. Insgesamt wurden in zwei Versuchsaufbauten mit jeweils vier Pheromonfallen 1.947 Nichtzielorganismen gezählt. Die häufigsten Beifänge waren Buckelfliegen (*Phoridae*) mit einem Anteil von rund 15 % und Nachtfalter der Familie *Erebidae* mit rund 10 %. Wie bereits erwähnt wurden die Fänge des Nonnenfalters ebenfalls als Zielspezies-Fänge behandelt.

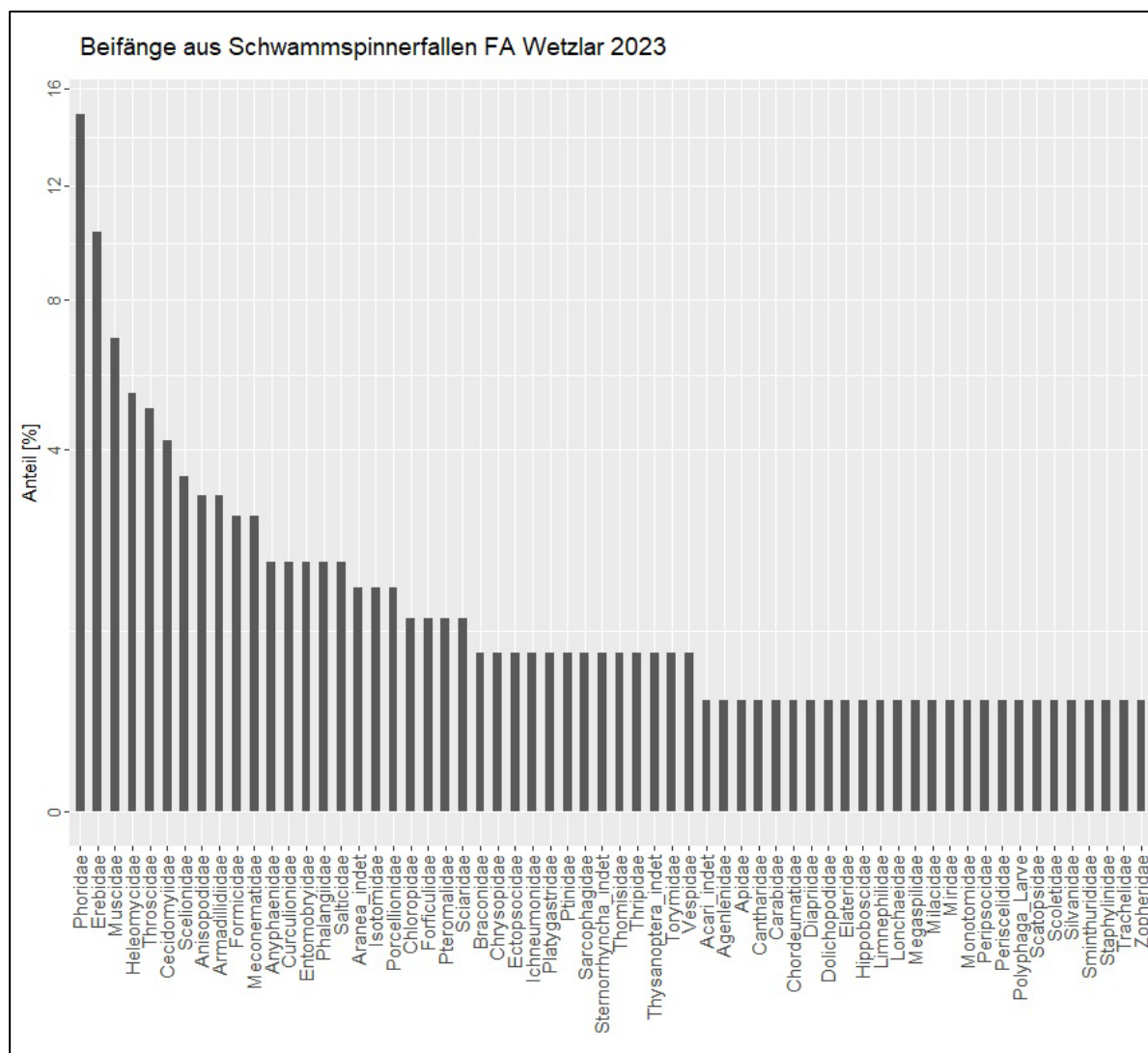


Abbildung 90: Beifänge aus Schwammspinnerfallen FA Wetzlar, Revier Solms 2023

4. Feldversuch: Integriertes Versuchsmuster (Gemeiner Frostspanner, *Operophtera brumata*)

Versuchszeitraum 23.10. – 15.12.2023

Für diesen Versuch wurden erneut zwei Versuchsmuster hergestellt. Im Mittelpunkt dieser Aufbauten standen die Zählkomponenten sowie die Erweiterung und Modifizierung der zentralen Steuerung der Falle. Eines der Versuchsmuster umfasste zudem die Implementierung einer finalen Lösung für die autarke Energieversorgung mittels eines 30 Watt Solarpanels und Lithium-Eisenphosphat-Akku (LFP-Akku) der in ein neues Gehäusedesign integriert wurde.

Der Versuchsteil dient dazu, Versuchsmuster automatischer Pheromonfallen in der Spezies des Kleinen Frostspanners zu testen. In vorherigen Versuchen aufgetretene mechanische und softwarebedingte Funktionsstörungen des Zählmoduls führten zu fehlerhaften Zählraten der anfliegenden Zielorganismen. Durchgeführte technische Verbesserungen der Versuchsmuster (z. B. Flackern der Infrarot-Lichtschranken, Datenabruf, Stromversorgung) wie auch die digital erfassten Zählraten wurden im Rahmen des Versuchs unter Freilandbedingungen geprüft. Es wurden die beiden Fallenvarianten „Standard-Variotrap-Trichterfalle“ und „Integriertes Versuchsmuster“ untersucht.

Das Ziel des Versuchsteils lag in der Umsetzung eines störungsfreien Betriebs der Versuchsmuster über den Flugzeitraum des Kleinen Frostspanners. Zusätzlich sollte die Implementierung einer finalen Batterielösung (Fe-Ph-Akku: Größe, Gewicht, modulares Gehäuse), untersucht werden, sowie die Frage, ob eine autarke Energieversorgung mittels eines 30 Watt Solarpanels unter den im Zeitraum November-Dezember gegebenen Solarstrahlungsbedingungen erreicht werden kann. In der technischen Umsetzung wurden die in diesem Versuch erstmals verwendeten neuen Batterien noch nicht in das Gehäuse der Zählfallen integriert, sondern in einem externen Schaltkasten untergebracht, welcher separat am Stamm angebracht wurde. Im Ergebnis sollten die digital erfassten Anflüge der Zielorganismen im Vergleich zu einer manuellen Auszählung der Fänge im Fangbehälter eine möglichst hohe Übereinstimmung liefern.

Im Versuchszeitraum wurden in den Standard-Variotrap-Trichterfallen insgesamt 1.130 männliche Falter des Gemeinen Frostspanners gefangen (Abbildung 91). Die niedrige Flugaktivität in der Mitte des Überwachungszeitraumes ergibt sich aus hohen Niederschlägen (Schneedecke) in der Woche vom 4. – 10.12.2023. Die beiden untersuchten Zählfallen lieferten mit insgesamt 8 Faltern sehr niedrige Fangzahlen.

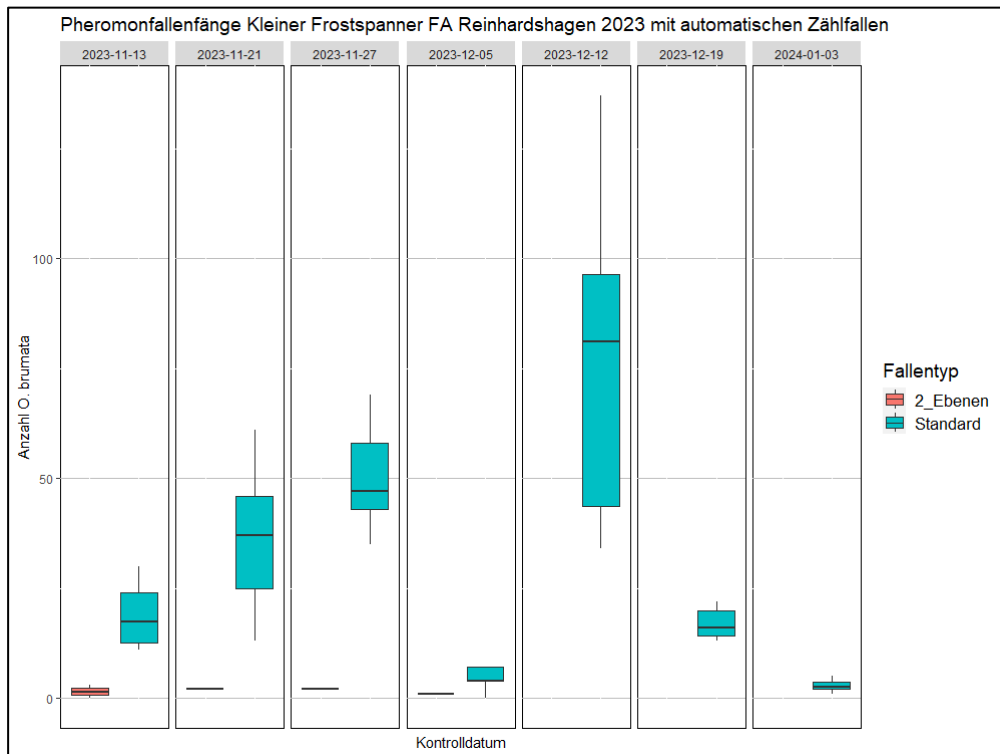


Abbildung 91: Pheromonfallenfänge Kleiner Frostspanner FA Reinhardshagen, Revier Beberbeck 2023, Zählfallen

Im Versuchszeitraum wurden insgesamt 340 Nichtzielorganismen in den ausgebrachten Fallen aufgefunden. Die häufigsten Nichtzielorganismen waren Scheufliegen (*Heleomyzidae*) mit ca. 28 %, Zartspinnen (*Anyphaenidae*) mit ca. 13 % und Taufliegen (*Drosophilidae*) mit einem Anteil von rund 8 %. Die Beifänge aus Frostspanner Pheromonfallen sind in Abbildung 92 dargestellt.

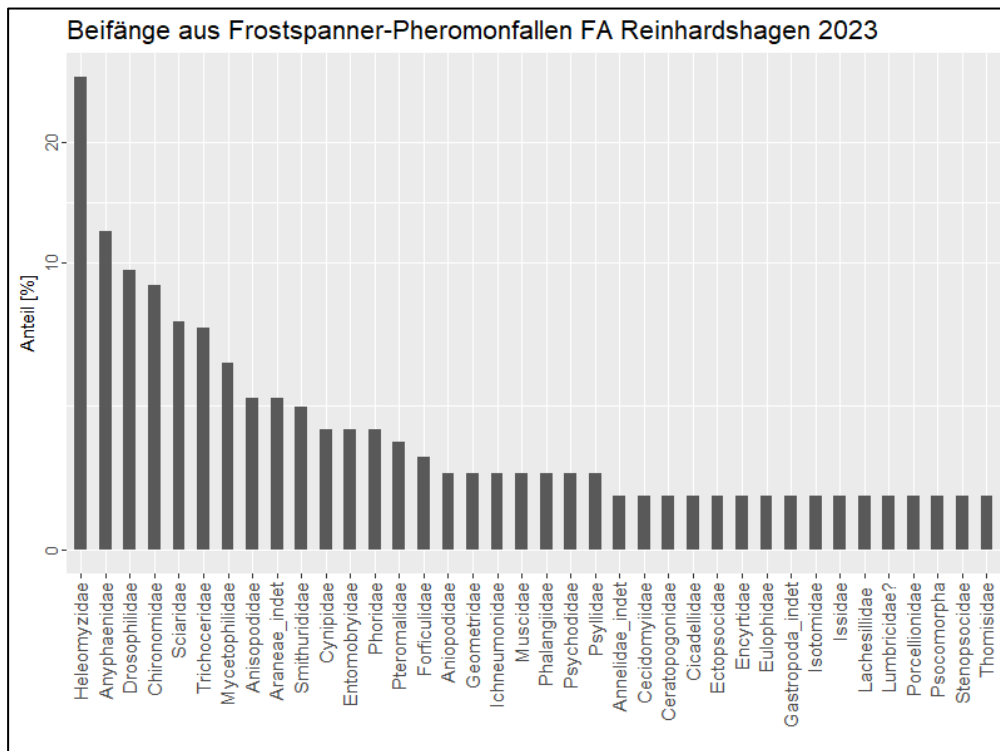


Abbildung 92: Beifänge aus Frostspannerfallen FA Reinhardshagen, Revier Beberbeck 2023

In der zweiten Fangwoche kam es zu einem Kurzschluss der Zähl Falle in Plot 2. Die Falle wurde rückgebaut und zur Instandsetzung nach Magdeburg gesendet. Bei dem Versuch der Wiederinbetriebnahme dieser Falle in der 4. Fangwoche konnte die Falle jedoch aufgrund von Schwierigkeiten mit der Stromversorgung nicht mehr in den Versuchsbetrieb integriert werden. Gründe für die niedrigen Fangzahlen der Versuchsmuster sind aktuell nicht sicher bekannt. Die beobachtete Fangverlaufskurve lässt einen nicht näher einzugrenzenden repellenten Effekt der Zählfallen auf die Zielorganismen vermuten. Da dieser Versuch im Vorjahr (2022) geringere Unterschiede der Fangzahlen zwischen Standardfallen und Versuchsmustern ergab (Standardfalle 2022 n=176, Versuchsmuster 2022 n=108), die verwendeten Pheromonköder als Ursache ausgeschlossen werden können und auch kleinräumige Standortfaktoren keine schlüssige Erklärung liefern, besteht die Vermutung, dass die verminderte Fängigkeit der Zählfallen in der Spezies Frostspanner mit den konstruktiven Änderungen am Fallensystem in Verbindung steht. Neben der bereits erwähnten Möglichkeit eines repellenten Effekts, könnte eine weitere Erklärung mit veränderten Lichtbedingungen im Fangbehälter zusammenhängen: Da der verwendete Wetterschutz den Fangbehälter gänzlich abdunkelt, könnten eingeflogene Frostspannerfalter einen höheren Lichtreiz in Richtung Fallenöffnung bzw. zum Trichter des Fangmoduls erfahren und daher den Fangbehälter nach erfolgtem Einflug wieder verlassen. Die erzielten digitalen Fangaufzeichnungen werden vom Projektpartner IFF auf Hinweise eines Wiederausflugs von Zielorganismen geprüft. Die im Untersuchungszeitraum simulierten Köderwechsel funktionierten reibungslos.

Dokumentation von Versuchen im Jahr 2024

Die im Berichtszeitraum 2024 durchgeführten Feldversuche sind im Teilkapitel „Konzeption von Testumgebungen“ des AP 3 beschrieben. Die genutzten Freilandstandorte wurden anhand der in den Vorjahren gesammelten Erfahrungen mit standortspezifischen Populationsdynamiken ausgewählter Zielspezies und den Entfernungen zu den Forschungseinrichtungen der Projektpartner in Göttingen und Magdeburg ausgewählt.

In Abstimmung von NW-FVA und IFF wurden für alle ausgewählten Versuchszeiträume die jeweiligen Zielstellungen der Tests der technischen Komponenten abgestimmt. Hierbei waren einerseits der technische Entwicklungsstand und zu priorisierende Funktionstests der technischen Komponenten, andererseits die Herstell- und Überarbeitungszeiten einzelner Komponenten sowie die begrenzte Wiederverwendbarkeit einzelner Bauteile durch Pheromonbelastung zu berücksichtigen. Die Vorbereitung, der Bau und die Bereitstellung der Funktionsmuster erfolgten durch das IFF, die Flächenauswahl und -vorbereitung wurden von der NW-FVA übernommen.

Die Festlegung der Versuchsstandorte wurde in den vergangenen beiden Berichtsperioden an den im Betreuungsbereich der NW-FVA maximal erreichten Fangzahlen des jeweiligen Vorjahres für die entsprechenden Spezies orientiert. Für das Jahr 2024 wurden folgende Versuche durchgeführt:

Weißgrauer Breitflügelspanner (*Agriopsis leucophaearia*): KW 4 / Ende Januar bis KW 13 / Ende März. Der Versuch wurde in Niedersachsen im FA Münden im Revier Kattenbühl durchgeführt.

Forleule (*Panolis flammea*): KW 10 / Anfang März bis KW 21 / Ende Mai. Als Versuchsstandort bot sich die Versuchsdurchführung in Niedersachsen in der Bezirksförsterei Suderburg, Revier Uelzen an.

Schwammspinner (*Lymantria dispar*): KW 26 / Anfang Juli bis KW 38 / Anfang September. Als Standort für diesen Versuchsaufbau bot sich in Hessen das FA Wetzlar, Revier Solms an.

Nonne (*Lymantria monacha*): KW 27 / Anfang Juli bis KW 38 / Anfang September. Als Standort für diesen Versuchsaufbau bot sich in Sachsen-Anhalt das FA Nordörtl. Altmark, Revier Bretsch an.

Kleiner Frostspanner (*Operophtera brumata*): KW 45 / Anfang November bis KW 50 / Anfang Dezember. Als Standort für diesen Versuch boten sich in Hessen die Reviere Beberbeck und Sababurg im Forstamt Reinhardshagen an.

1. Feldversuch: Integriertes Fallensystem (Weißgrauer Breitflügelspanner (*Agriopsis leucophaearia*))

Für diesen Versuch wurden zwei Versuchsmuster aufgebaut. Im Mittelpunkt dieser Aufbauten standen die Zählkomponenten sowie die Erweiterung und Modifizierung der zentralen Steuerung der Falle. Beide Versuchsmuster umfassten zudem die Implementierung einer finalen Lösung für die autarke Energieversorgung mittels eines 30 Watt Solarpanels und zwei Lithium-Eisenphosphat-Akkus (LiFePO₄ - Akku), die in ein neues Gehäusedesign integriert wurden. Der Versuchsteil dient dazu, Versuchsmuster automatischer Pheromonfallen in der Spezies des Weißgrauen Breitflügelspanners zu testen. In vorherigen Versuchen aufgetretene mechanische und softwarebedingte Funktionsstörungen des Zählmoduls führten zu fehlerhaften Zählwerten der anfliegenden Zielorganismen. Durchgeführte technische Verbesserungen der

Versuchsmuster (z. B. Flackern der Infrarot-Lichtschranken, Datenabruf, Stromversorgung) wie auch die digital erfassten Zählzeiten wurden im Rahmen des Versuchs unter Freilandbedingungen geprüft.

Das Ziel des Versuchsteils lag in der Umsetzung eines störungsfreien Betriebs der Versuchsmuster über den Flugzeitraum des Weißgrauen Breitflügelspanners. Zusätzlich sollte die Implementierung einer finalen Batterielösung (LiFePO₄-Akku: Größe, Gewicht, modulares Gehäuse), untersucht werden, sowie die Frage, ob eine autarke Energieversorgung mittels eines 30 Watt Solarpanels unter gegebenen Solarstrahlungsbedingungen erreicht werden kann. In der technischen Umsetzung wurden erstmals neue Batterien in das Gehäuse der Zählfallen integriert. Im Ergebnis sollten die digital erfassten Anflüge der Zielorganismen im Vergleich zu einer manuellen Auszählung der Fänge im Fangbehälter eine möglichst hohe Übereinstimmung liefern.

Im Versuchszeitraum wurden in den Standard-Variotrap-Trichterfallen insgesamt 70 männliche Falter des Weißgrauen Breitflügelspanners gefangen (vgl. Abbildung 93). Die beiden untersuchten integrierten Versuchsmuster lieferten mit lediglich 1 Falter eine sehr niedrige Fangzahl. In Hinsicht auf die technische Umsetzung ereignete sich im Versuchszeitraum am 13.02.2024 ein Funktionsausfall einer der automatisierten Pheromonfallen. Die Falle wurde ab diesem Zeitpunkt bis zum Ende des Versuchszeitraums als Standardfalle belassen.



Abbildung 93: Fänge männlicher Falter des Weißgrauen Breitflügelspanners in Pheromonfallen im FA Münden, Revier Kattenbühl 2024

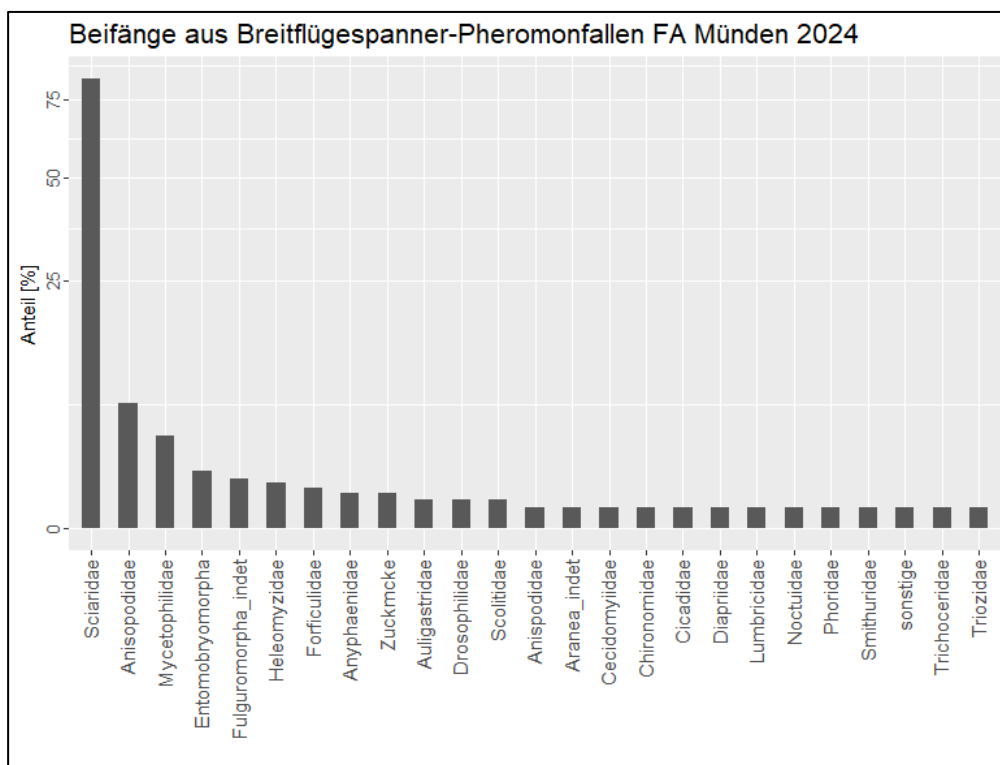


Abbildung 94: Beifänge (auf familienebene Bestimmt) aus Weißgrauen Breitflügelspannerfallen im FA Münden, Revier Kattenbühl 2024

Im Versuchszeitraum wurden insgesamt 839 Nichtzielorganismen in den ausgebrachten Fallen aufgefunden. Die häufigsten Nichtzielorganismen waren Trauermücken (*Sciaridae*) mit ca. 73 % (n=492), Fenstermücken (Anisopodidae) mit ca. 6 % (n=38) und Pilzmücken mit ca. 3 % (n=21). Die Beifänge aus Breitflügelspanner-Pheromonfallen sind in Abbildung 94 dargestellt.

2. Feldversuch: Integriertes Fallensystem (Forleule (*Panolis flammea*))

Im Versuchszeitraum konnten lediglich zwei männliche Falter der Forleule gefangen werden, welche jeweils in einer Standard- sowie einer Nullfalle vorgefunden wurden.

Mögliche Gründe für die geringe Fangzahl könnten eine hohe Parasitierungsrate durch Parasitoide, Prädatoren oder Krankheitserreger sein, die die Populationen der Forleule reduziert haben. Auch Witterungseinflüsse wie starke Regenfälle, niedrige Temperaturen oder Wind könnten die Flugaktivität der Falter beeinträchtigt haben. Zudem ist es möglich, dass die Gesamtpopulationsdichte in diesem Zeitraum generell niedrig war. Ein weiterer Faktor könnte die Effektivität des verwendeten Lockstoffs sein, der möglicherweise nicht optimal hergestellt war.

Die Auszählung und Bestimmung der in den Pheromonfallen vorgefundenen Nichtzielorganismen ergab insgesamt 146 Individuen. In Abbildung 95 ist die prozentuale Verteilung der im vorliegenden Versuch aufgetretenen Beifänge dargestellt. Am häufigsten traten Trauermücken (*Sciaridae*) mit 21 % (n=31), gefolgt von Pilmücken (*Mycetophilidae*) und Zuckmücken (*Chironomidae*) mit je ca. 9 % (n=12). Am 23.04.2024 wurde eine der automatisierten Pheromonfallen heruntergerissen vorgefunden. Die Falle wurde an das Fraunhofer IFF zur Überprüfung der Funktionalität geschickt. Die Falle wurde weiterhin bis zum Ende des Versuchszeitraums als Standardfalle verwendet.

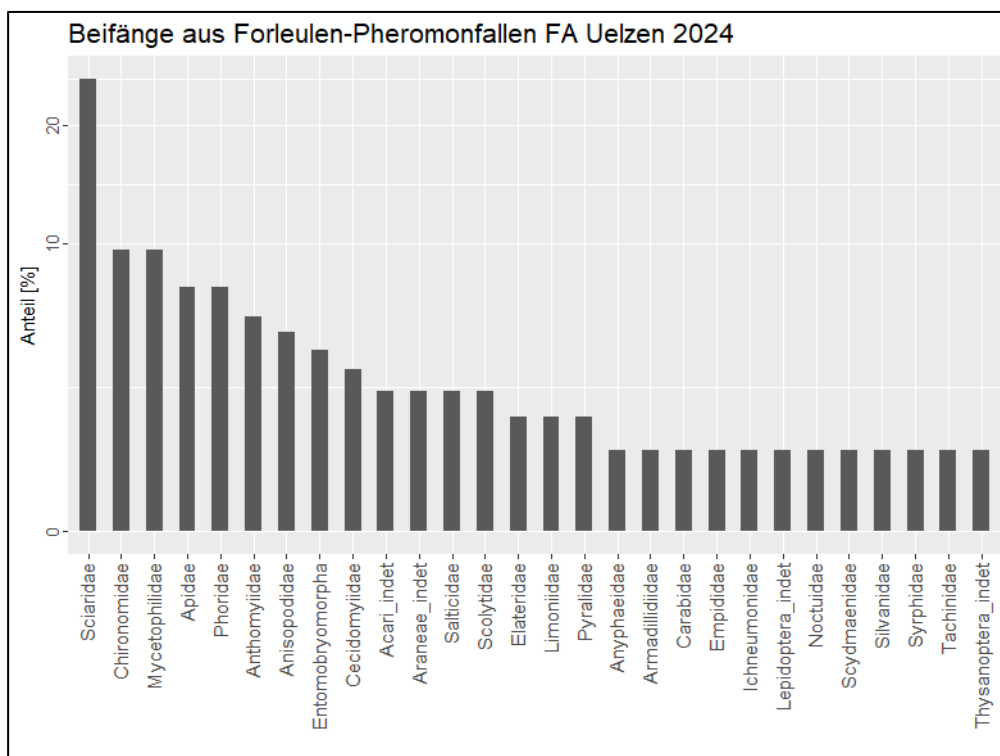


Abbildung 95: Beifänge (auf familienebene Bestimmt) aus Forleulenfallen FA Uelzen, Bezirksförsterei Suderburg 2024

3. Feldversuch: Integriertes Fallensystem (Schwammspinner (*Lymantria dispar*))

Ab diesem Freilandversuch wurde eine 3. Umsetzungsvariante des Zählmechanismus verwendet. In vorherigen Versuchen aufgetretene mechanische und softwarebedingte Funktionsstörungen des Zählmoduls führten zu fehlerhaften Zähldaten der anfliegenden Zielorganismen. Durchgeführte technische Verbesserungen der Versuchsmuster (z. B. Flackern der Infrarot-Lichtschranken, Datenabruf, Stromversorgung) wie auch die digital erfassten Zähldaten wurden im Rahmen des Versuchs unter Freilandbedingungen geprüft. Das Ziel des Versuchsteils lag in der Umsetzung eines störungsfreien Betriebs der Versuchsmuster über den Flugzeitraum des Schwammspinners.

Der Fangverlauf für den Schwammspinner ist in Abbildung 96 dargestellt. Im Versuchszeitraum wurden insgesamt 1.327 männliche Falter des Schwammspinners gefangen, wobei 42 % (n=568) in den Versuchsmustern gefangen wurden (durchschnittliche Falterzahl pro Versuchsmuster: Versuchsmuster 1: 26,6, Versuchsmuster 2: 32,8). Es ist zu beachten, dass doppelt so viele Standardfallen wie Versuchsmuster in die Auswertung einfließen und somit die Gesamtfänge der Standardfallen insgesamt höher waren, insgesamt wurden in den Standardfallen ca. 55 % der Falterfänge verzeichnet (n=740, durchschnittliche Falterzahl pro Standardfalle: Falle 1: 22,5, Falle 2: 29,8, Falle 3: 18,5 und Falle 4: 14,4).

Insgesamt 19 Falter (1,5 %) wurden in den Kontrollfallen vorgefunden, was auf eine leichte Kontamination mit Pheromonen hindeuten könnte. Der starke Anstieg der Fänge nach der 4. Woche lässt sich mit einem natürlich höheren Aufkommen des Schwammspinners in seiner Flugperiode erklären. Die höheren Zahlen in den Versuchsmustern lassen sich durch den automatischen Köderwechsel erklären, der alle vier Wochen zu einer Erhöhung der Pheromonkonzentration führte. Zu erwähnen ist, dass ein Versuchsmuster in der 9. Woche aufgrund einer nicht behebbaren Störung abgebaut werden musste und bis zur 10. Woche (Abbau des Versuchs) als Standardfalle belassen wurde.

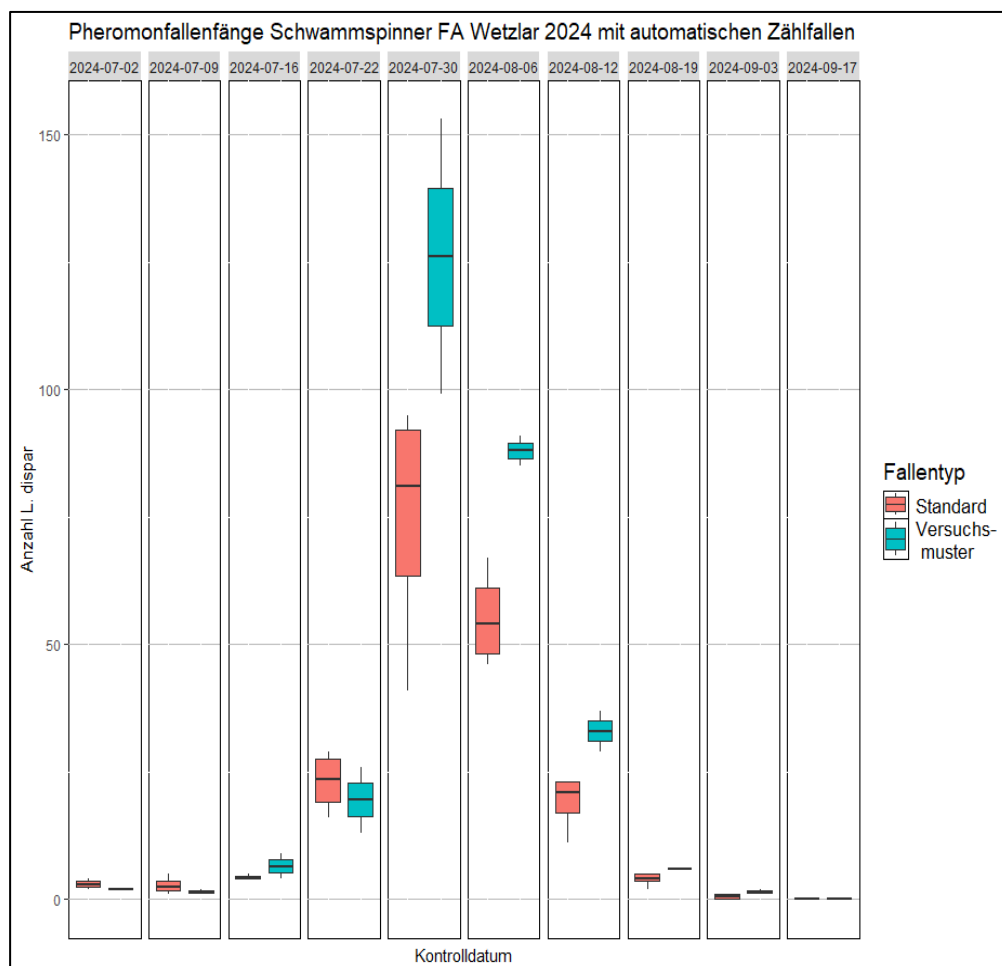


Abbildung 96: Fänge männlicher Falter des Schwammspinners in Pheromonfallen im FA Wetzlar, Revier Solms 2024

Der Vergleich der Fangzahlen zwischen händischer Auszählung vor Ort und der Auszählung mit dem Algorithmus der Falle ist in Abbildung 97 dargestellt. Die Gegenüberstellung beschränkt sich hier auf Fänge, bei denen die Versuchsmuster die Fänge registrieren konnten. Exkludiert wurden somit die Zählungen, bei denen die Versuchsmuster nicht in Betrieb waren bzw. ein Fehlerfall auftrat. Um eine gezielte Auswertung zu ermöglichen, wurden die automatisierten Fallen entsprechend gekennzeichnet. Dadurch konnte in der Analyse zwischen den einzelnen Fallen unterschieden und eine detaillierte Betrachtung der Ergebnisse durchgeführt werden. Zur Vereinfachung wurden die Fallen in der Auswertung als „Falle A“ und „Falle B“ bezeichnet, um eine klare Zuordnung der Fangzahlen aus der händischen Zählung und der algorithmusbasierten Erfassung zu gewährleisten. Für „Falle A“ wurde eine Referenz-Zählung von 239 ermittelt, während die Zählung gemäß der Interpretation der Lichtschrankenevents nur 162 betrug. Der relative Fehler liegt bei -32,22 %, was zu einer Erkennungsquote von 67,5 % führt. In „Falle B“ ergab die Referenz-Zählung 328, während die Zählung basierend auf den Lichtschrankenevents 255 betrug. Der relative Fehler beträgt -22,25 %, was eine Erkennungsquote von 77,75 % zur Folge hat. Wenn der Mittelwert beider Fallen gebildet wird, ergibt sich eine Referenz-Zählung von 283,5, während die Zählung gemäß den Lichtschrankenevents 208,5 beträgt. Der relative Fehler beträgt -26,45 %, was eine Erkennungsquote von 73,55 % ergibt. Die Gründe für die hohe Diskrepanz bei relativ hoher Fangdichte konnten im Projektzeitraum nicht abschließend geklärt werden. Eine mögliche Erklärung könnten viele aufgewirbelte Flügelschuppen der Schmetterlinge sein, die zu einer kurzzeitigen bzw. auch langzeitigen Beeinträchtigung der Lichtschranken geführt haben könnten.

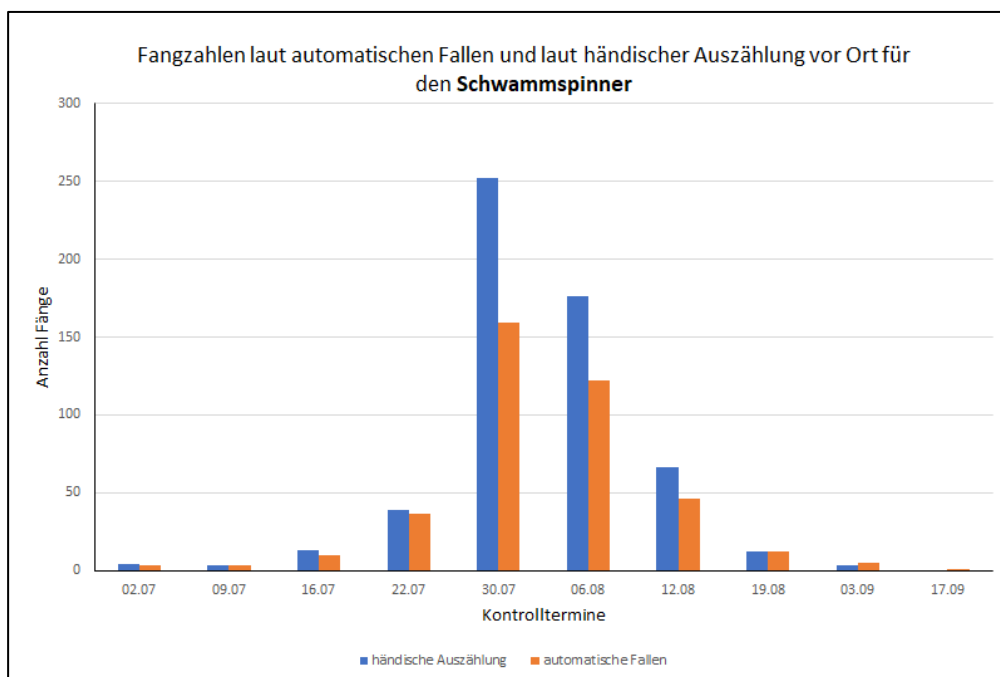


Abbildung 97: Vergleich der händischen Auszählung mit dem Algorithmus der Falle

Abbildung 98 zeigt die Fangzahlen des Schwammspinners (*Lymantria dispar*) im Tagesverlauf über die Fangperiode. Die höchste Aktivität trat zwischen 20:00 und 23:00 Uhr auf, mit einem deutlichen Peak von 22:00 bis 23:00 Uhr, wo über 20 Individuen gefangen wurden. Ab 18:00 Uhr stiegen die Fangzahlen langsam an, während sie tagsüber zwischen 6:00 und 17:00 Uhr, mit Ausnahme zwischen 13:00 und 15:00 Uhr, minimal blieben. Besonders zwischen 04:00 und 09:00 Uhr wurden fast keine Fänge registriert.

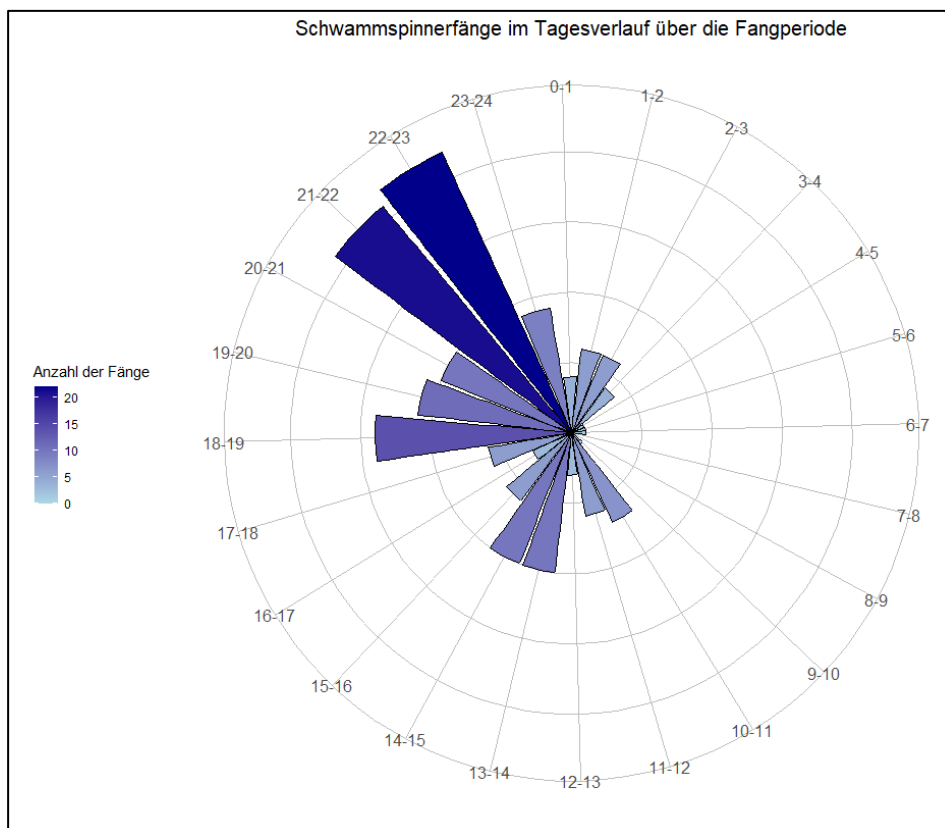


Abbildung 98: Fangzeiten des Schwammspinners im Tagesverlauf über die Fangperiode 2024

Die Zählung und Identifikation der in den Pheromonfallen gefundenen Nichtzielorganismen ergab insgesamt 219 Individuen. In Abbildung 99 ist die prozentuale Verteilung der im Versuch festgestellten Beifänge dargestellt. Am häufigsten wurden Rollasseln (Armadillidiidae) mit einem Anteil von 11 % ($n = 14$) nachgewiesen, gefolgt von Ohrwürmern (Forficulidae) und Weberknechten (Phalangiidae), die jeweils etwa 8 % ($n = 10$) der Gesamtzahl ausmachten.

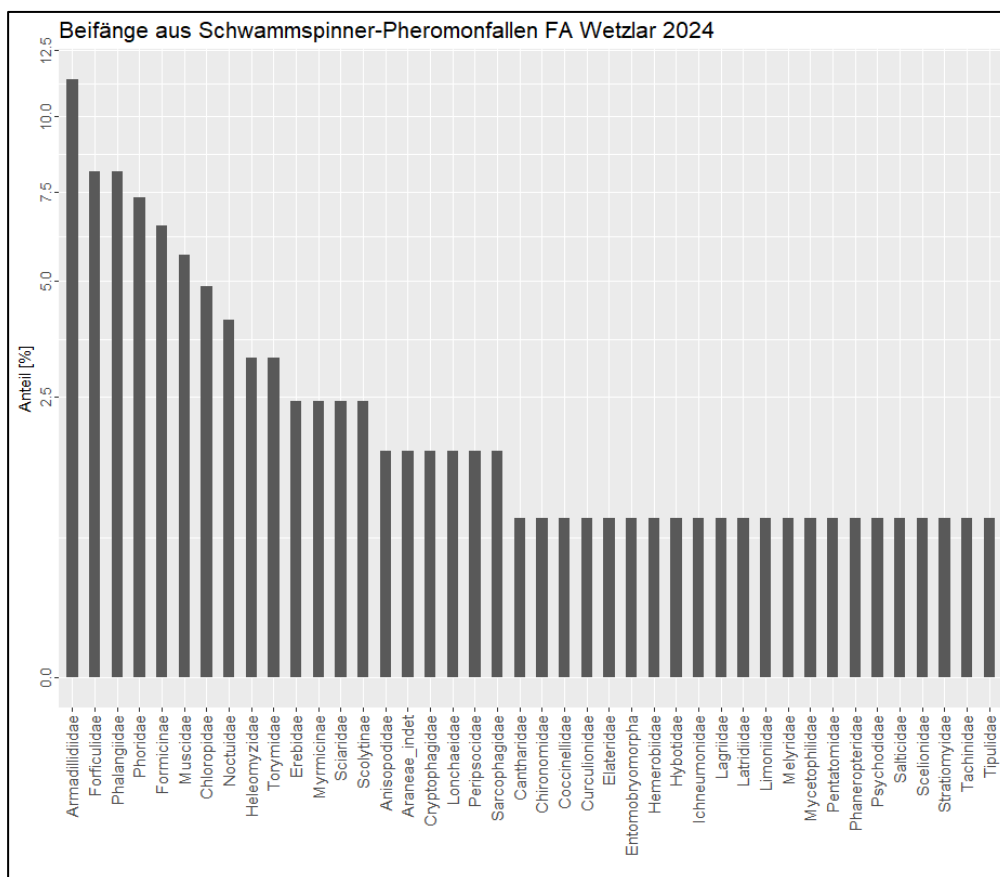


Abbildung 99: Beifänge (auf familienebene Bestimmt) aus Schwammspinnerfallen FA Wetzlar, Revier Solms 2024

4. Feldversuch: Integriertes Fallensystem (Nonne (*Lymantria monacha*))

In diesem Freilandversuch wurde eine 3. Umsetzungsvariante des Zählmechanismus getestet. Zuvor hatten mechanische und softwarebedingte Störungen im Zählmodul zu fehlerhaften Erfassungsdaten der anfliegenden Zielorganismen geführt. Daher wurden technische Verbesserungen vorgenommen, darunter die Beseitigung des Flackerns der Infrarot-Lichtschranken, die Optimierung des Datenabrufs sowie die Stabilisierung der Stromversorgung. Diese Anpassungen wurden unter Freilandbedingungen erprobt, wobei die digital erfassten Zählzahlen auf ihre Zuverlässigkeit hin überprüft wurden. Das Ziel des Versuchs bestand darin, einen störungsfreien Betrieb der optimierten Versuchsmuster während der Flugzeit der Nonne zu gewährleisten.

Abbildung 100 zeigt den Fangverlauf der Nonne im Jahr 2024. Im Versuchszeitraum konnten insgesamt 396 männliche Falter der Nonne gefangen werden. Hiervon wurden lediglich 23 % (n=91) in den Versuchsmustern gefangen wurden (durchschnittliche Falterzahl pro Versuchsmuster: Versuchsmuster 1: 7,1, Versuchsmuster 2: 6). Der größte Anteil von Faltern wurde mit den Standardfallen gefangen, in diesen wurden 297 Individuen (durchschnittliche Falterzahl pro Standardfalle: Falle 1: 7,6, Falle 2: 8,8, Falle 3: 9 und Falle 4: 8,7) aufgefunden (75 %), acht Falter (n=8, 2 %) wurden in den Kontrollfallen gefangen. Der Einbruch der gefangenen Falter ab dem 23.07.2024 in den Versuchsmustern lässt sich dadurch erklären, dass eines der Versuchsmuster an diesem Termin aufgrund eines Defektes abgebaut und an das Fraunhofer IFF zur Reparatur zurückgeschickt werden musste. Dieses Versuchsmuster verblieb für die Zeit der Reparatur als Standardfalle, was die hohen Zahlen in diesen erklärt. Am 07.08.2024 wurde die Standardfalle wieder als Versuchsmuster aufgebaut, was sich an den ansteigenden Zahlen bei den nächsten Kontrollen widerspiegelte.

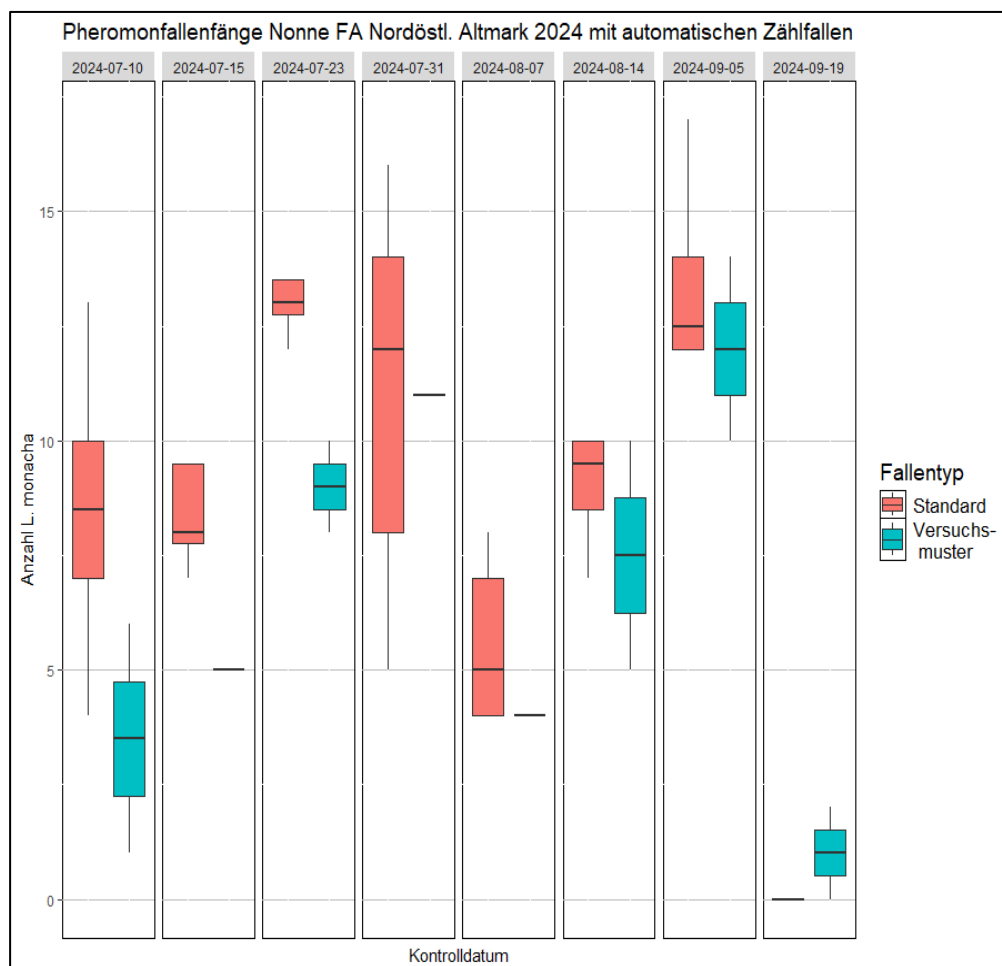


Abbildung 100: Fänge männlicher Falter der Nonne in Pheromonfallen im FA Nordöstliche Altmark, Revier Bretsch 2024

Die Gegenüberstellung der Fangzahlen aus der händischen Zählung vor Ort und der Zählung mittels des Algorithmus der Falle ist in Abbildung 101 beschrieben. Diese Darstellung umfasst ausschließlich Fänge, bei denen die Versuchsmuster in der Lage waren, die Fänge zu registrieren. Fänge, bei denen die Versuchsmuster nicht aktiv waren oder ein Fehlerfall aufgetreten ist, wurden daher ausgeschlossen. Um eine gezielte Auswertung zu ermöglichen, wurden die automatisierten Fallen entsprechend gekennzeichnet. Dadurch konnte in der Analyse zwischen den einzelnen Fallen unterschieden und eine detaillierte Betrachtung der Ergebnisse durchgeführt werden. Zur Vereinfachung wurden die Fallen in der Auswertung als „Falle C“ und „Falle D“ bezeichnet, um eine klare Zuordnung der Fangzahlen aus der händischen Zählung und der algorithmusbasierten Erfassung zu gewährleisten. Für „Falle C“ wurde eine Referenz-Zählung von 43 ermittelt, während die Zählung gemäß der Interpretation der Lichtschrankenevents 40 betrug. Der relative Fehler liegt bei -6,98 %, was zu einer Erkennungsquote von 93,02 % führt. In „Falle D“ ergab die Referenz-Zählung 21, während die Zählung basierend auf den Lichtschrankenevents 20 betrug. Der relative Fehler beträgt -4,76 %, was eine Erkennungsquote von 95,24 % zur Folge hat. Wenn der Mittelwert beider Fallen gebildet wird, ergibt sich eine Referenz-Zählung von 64, während die Zählung gemäß den Lichtschrankenevents 60 beträgt. Die Diskrepanz zwischen den zuvor erwähnten 91 Fängen in den Versuchsmustern ergab sich daraus, dass an zwei Terminen keine digitalen Fangdaten der Versuchsmuster aufgrund eines SD-Kartenfehlers erfasst wurden. Der relative Fehler beträgt -6,25 %, was eine Erkennungsquote von 93,75 % ergibt.

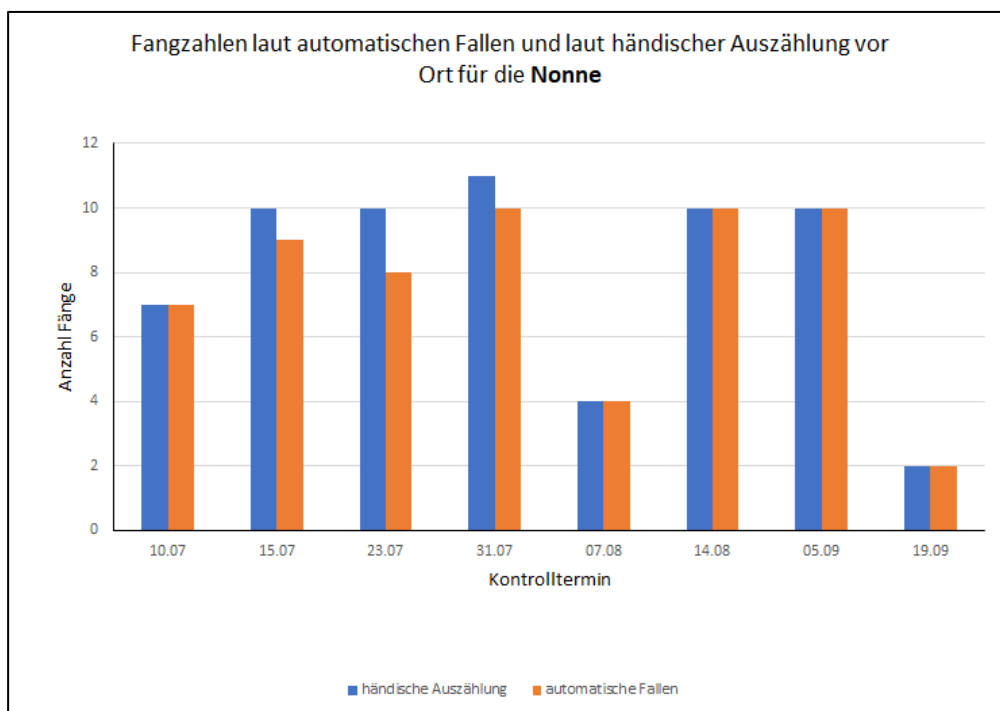


Abbildung 101: Vergleich der händischen Auszählung mit dem Algorithmus der Falle

Abbildung 102 stellt die Fangzahlen der Nonne (*Lymantria monacha*) im Verlauf eines Tages während der Fangperiode dar. Die meisten Fänge wurden in den frühen Nachtstunden registriert, mit einem deutlichen Höhepunkt zwischen 1:00 und 2:00 Uhr, gefolgt von weiterhin hoher Aktivität bis etwa 3:00 Uhr. Bereits ab 0:00 Uhr steigen die Fangzahlen an, bevor sie nach 3:00 Uhr langsam wieder abnehmen. Tagsüber blieb die Aktivität sehr gering, insbesondere zwischen 5:00 und 20:00 Uhr, wo keine Fänge verzeichnet wurden. Erst in den späten Abendstunden begann die Zahl der gefangenen Individuen wieder zu steigen.

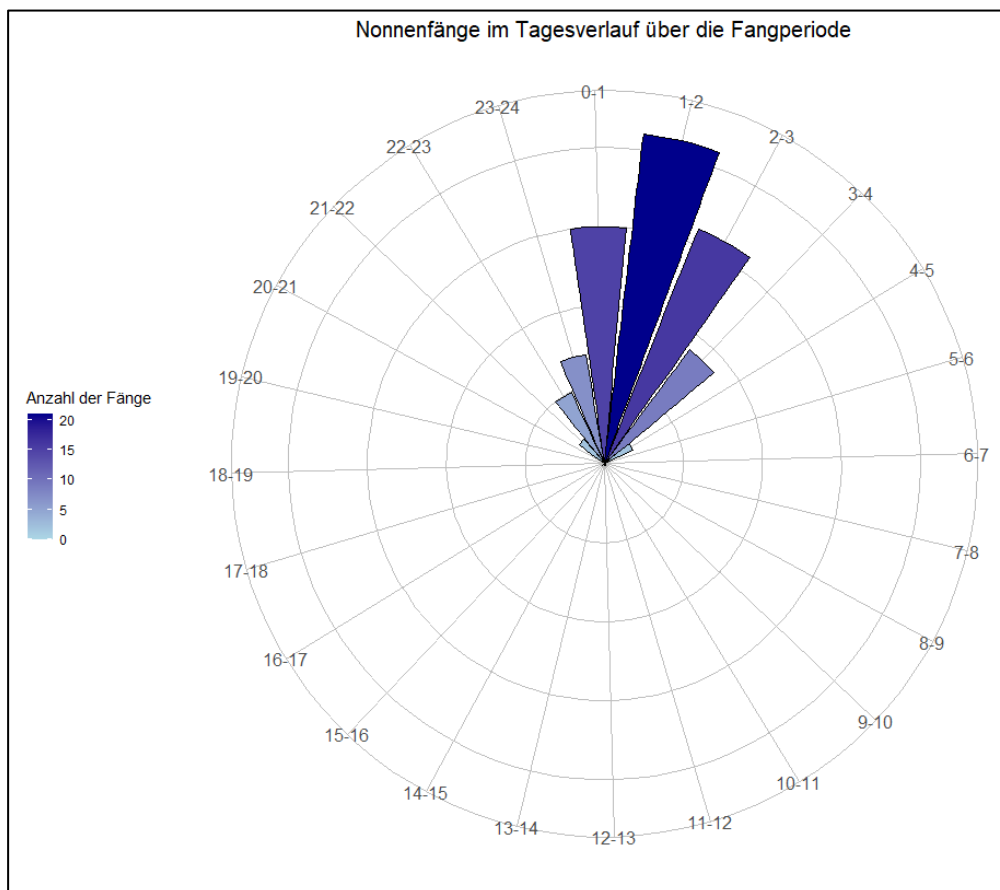


Abbildung 102: Fangzeiten der Nonne im Tagesverlauf über die Fangperiode 2024

Insgesamt wurden 194 Nichtzielorganismen aus den Pheromonfallen gezählt und bestimmt. Die prozentuale Verteilung der erfassten Beifänge ist in Abbildung 103 dargestellt. Trauermücken (Sciaridae) stellten mit 20 % (n=24) den größten Anteil, gefolgt von Torymidae mit etwa 15 % (n=18). Einen vergleichbaren Anteil von jeweils 10 % (n=12) machten Springspinnen (Salticidae) und Fleischfliegen (Sarcophagidae) aus.

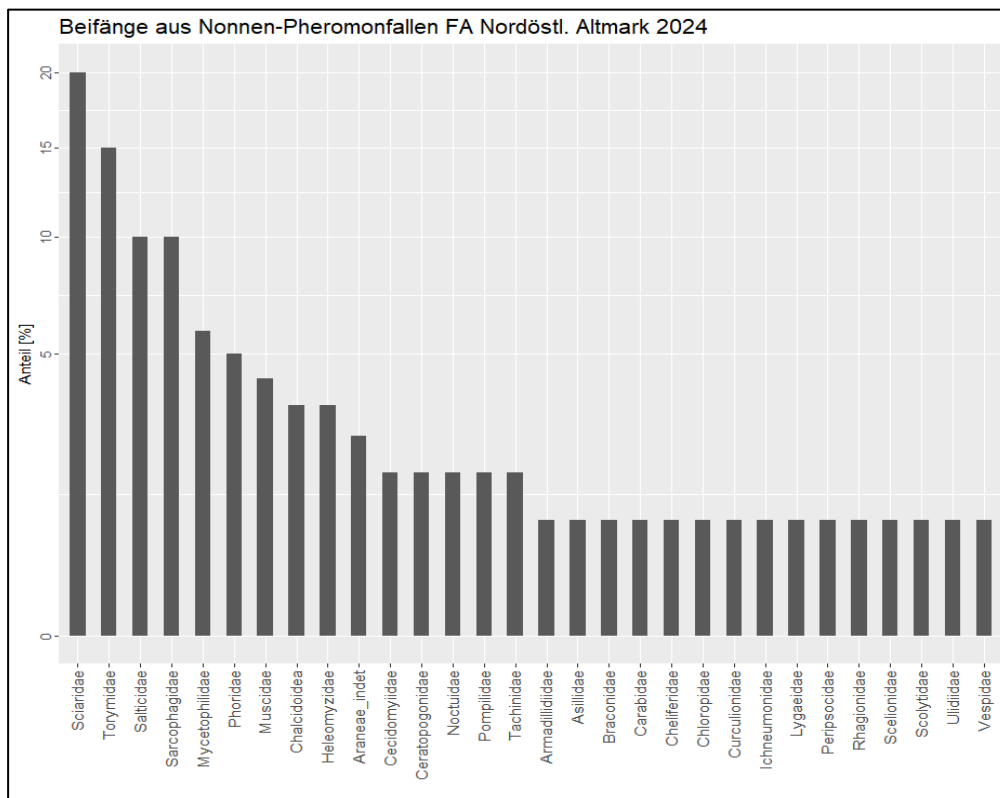


Abbildung 103: Beifänge (auf familienebene Bestimmt) aus Nonnenfallen FA Nordöstl. Altmark, Revier Bretsch 2024

5. Feldversuch: Integriertes Fallensystem (Kleiner Frostspanner (*Operophtera brumata*))

Für diesen Versuch wurden, im Gegensatz zu den anderen Versuchen, insgesamt vier Versuchsmuster aufgebaut, je zwei auf einem Standort. Im Rahmen dieses Freilandversuchs wurde eine 3. Umsetzungsvariante des Zählmechanismus erprobt. Zuvor hatten mechanische und softwarebedingte Störungen des Zählmoduls in früheren Tests zu unzuverlässigen Zählraten der anfliegenden Zielorganismen geführt. Verbesserungen wie die Stabilisierung der Infrarot-Lichtschranken, die Optimierung des Datenabrufs und die Sicherstellung einer stabilen Stromversorgung wurden implementiert und unter realen Bedingungen geprüft. Zusätzlich wurden die digital aufgezeichneten Zählraten einer ausführlichen Analyse unterzogen. Ziel war es, den störungsfreien Betrieb der Versuchsmuster über den Flugzeitraum des Kleinen Frostspanners zu prüfen. Es sollte untersucht werden, ob eine autarke Energieversorgung mittels des 30 Watts Solarpanels unter den im Zeitraum November-Dezember gegebenen Solarstrahlungsbedingungen erreicht werden kann. Im Ergebnis sollten die digital erfassten Anflüge der Zielorganismen im Vergleich zu einer manuellen Auszählung der Fänge im Fangbehälter eine möglichst hohe Übereinstimmung liefern.

Im Versuchszeitraum wurden insgesamt 6425 männliche Falter des Kleinen Frostspanners gefangen (Abbildung 104), von welchen 4406 männliche Falter (68,5 %) von den vier Versuchsmustern gefangen wurden (durchschnittliche Falterzahl pro Versuchsmuster: Versuchsmuster 1: 285,2, Versuchsmuster 2: 224,8, Versuchsmuster 3: 289,4, Versuchsmuster 4: 81,6). In den Standardfällen wurden in dem Versuchszeitraum insgesamt 2017 Falter (31,3 %) gefangen (durchschnittliche Falterzahl pro Standardfalle: Standardfalle 1: 264,2, Standardfalle 2: 139,2). In den Kontrollfällen wurden 2 Falter gefangen. Die höheren Zahlen in den Versuchsmustern lassen sich durch den automatischen Köderwechsel erklären, der alle vier Wochen zu einer Erhöhung der Pheromonkonzentration führte. Es ist allerdings auch zu vermuten, dass das Köderreservoir nicht komplett gasdicht war und somit der Ersatzköder eine zusätzliche Lockwirkung hatte, da die Fangzahlen der Versuchsmuster auch schon vor dem Köderwechsel höher waren als bei den Standardfällen. Im Versuchszeitraum kam es zu keinen größeren Ausfällen der Fallen, allerdings war die Batterie einer Falle in der 3. Woche entladen und musste gewechselt werden. Die im Vorjahr sehr niedrigen Falterfänge der Versuchsmuster (n=8) im Vergleich zu den Standardfällen (n=1122) konnten in diesem Jahr nicht bestätigt werden. Es wurde vermutet, dass ein nicht näher einzugrenzender repellenter Effekt der integrierten Versuchsmuster auf die Zielorganismen möglicherweise hierfür verantwortlich gewesen sein könnte. Da ab

Anfang des Jahres 2024 eine 3. Generation der Versuchsmuster für die Freilandversuche genutzt wurden, konnte dieser repellente Effekt vermieden werden. Auch wurde vermutet, dass ein höherer Lichtreiz in Richtung Fallenöffnung durch den Wetterschutz abgedunkelten Fangbehälter für die niedrigen Fangzahlen verantwortlich sein könnte. Ab den Versuchen mit Schwammspinner und Nonne wurde nicht mehr ein dunkler, sondern ein durchsichtiger Wetterschutz genutzt, um diesen Lichtreiz zu vermeiden. Defekte Fallen wurden während des Versuchszeitraums nicht verzeichnet. Aufgrund vollständig entleerter Batterien war es allerdings erforderlich, an zwei Kontrollterminen die Batterien von zwei automatisierten Fallen auszutauschen.

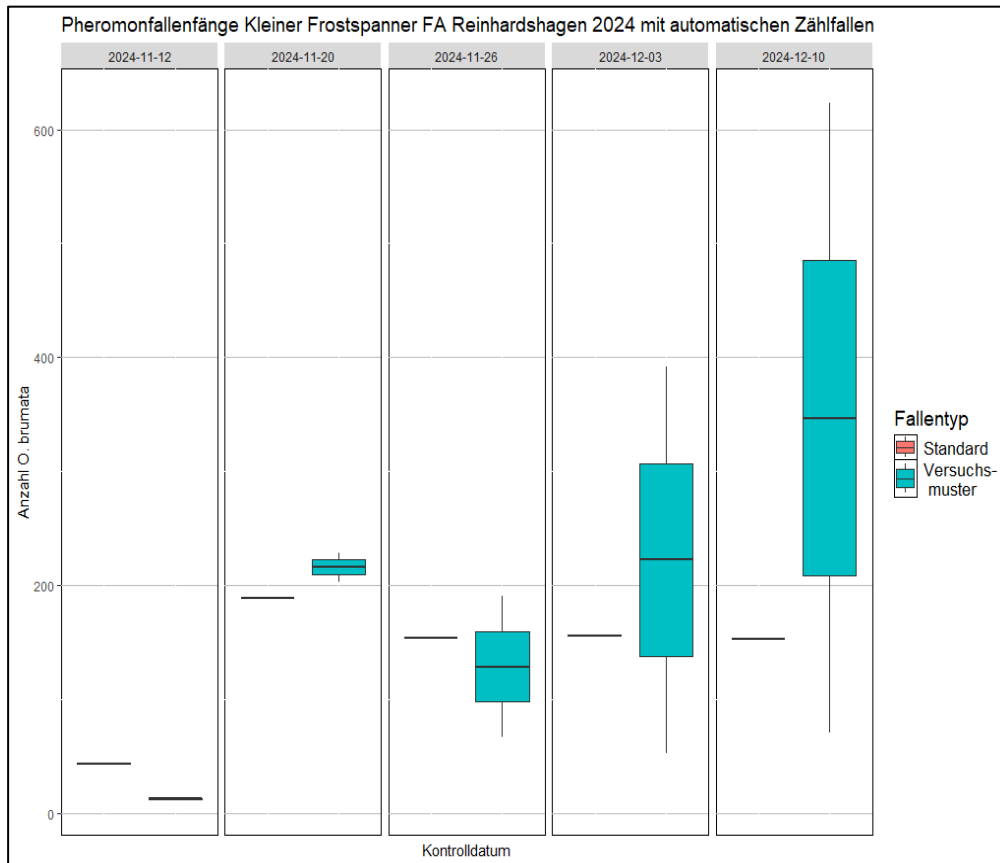


Abbildung 104: Fänge männlicher Falter des Kleinen Frostspanners in Pheromonfallen im FA Reinhardshagen, Reviere Bebeberck und Sababurg 2024

Im Versuchszeitraum wurden insgesamt 14 Nichtzielorganismen aufgefunden. Hiervon kamen Ohrwürmer (Forficulidae), Scheufliegen (Heleomyzidae) und Krabbenspinnen (Thomisidae) mit je 14 % (n=2) am häufigsten vor (vgl. Abbildung 105). Es sollte für die Nichtzielorganismen vermerkt werden, dass aufgrund der hohen Fangzahlen des Kleinen Frostspanners die Wahrscheinlichkeit groß ist, dass viele NZOs beim Auszählen der Fallen übersehen wurden, insbesondere kleinere Organismen.

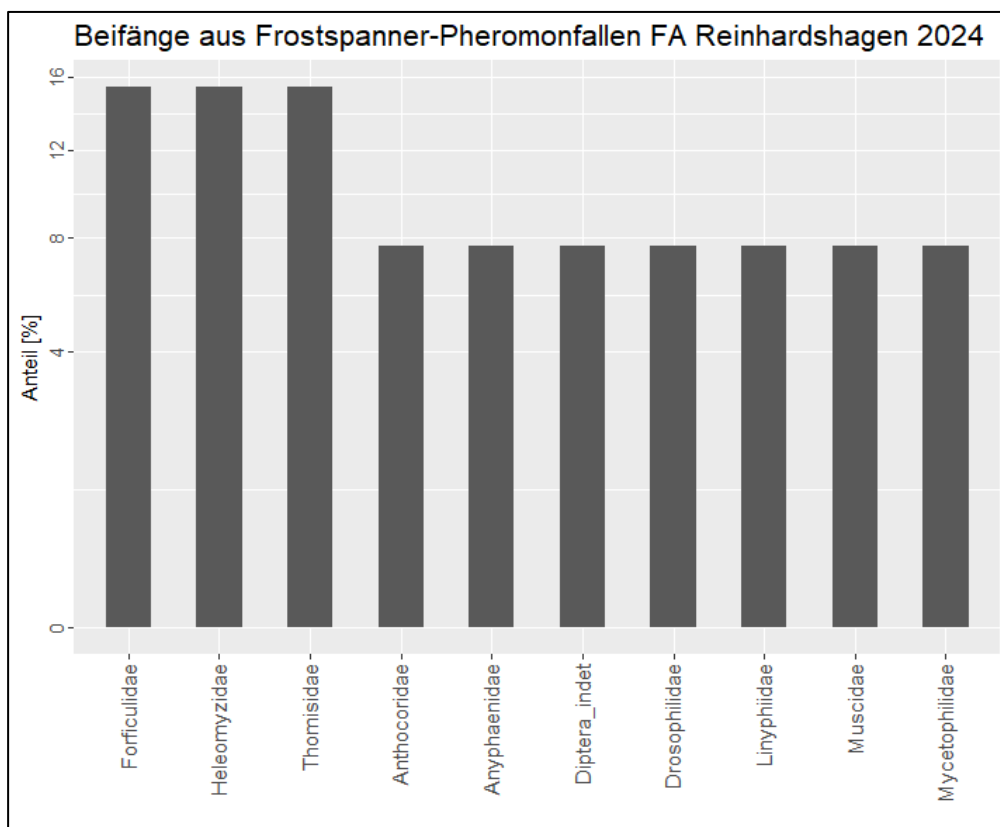


Abbildung 105: Beifänge (auf familienebene bestimmt) aus Frostspannerfallen FA Reinhardshagen, Reviere Beberbeck und Sababurg 2024

Ergebnisse des Einsatzes des Messsystems zur realistischen Abschätzung von Energieerträgen durch Einsatz von Solarpaneele im Wald

Der Messaufbau und die Messmethodik sind in Abschnitt „Funktion Energieversorgung“ beschrieben.

Die erste Messung zur solaren Energieausbeute wurde am 20.10.2022, um 15:55 Uhr im Wald nahe Jävenitz, Gardelegen aufgenommen. Die Messung sollte dabei mindestens 1 Woche lang autonom laufen. Nach Auswertung der Daten war festzustellen, dass die Messungen bereits am 22.10.2022, um 3:31 Uhr durch einen Fehlerfall abbrechen. Die Kommunikation zwischen dem Mikrocontroller und der Echtzeituhr ist dahingehend gescheitert, dass die Alarmfunktion der Echtzeituhr nicht neugestartet werden konnte – eine Minute nach der letzten Messung soll die nächste Messung mittels eines Alarmsignals der Echtzeituhr an den Mikrocontroller motiviert werden. Die Software des Mikrocontrollers wurde in Folge so angepasst, dass das System robust auf Fehlkommunikation mit den anderen Komponenten reagiert.

Die erste Messung hat somit eine Laufzeit von 35 h 40 min. Da am 20.10.2022 die Messung erst am späten Nachmittag begonnen wurde und bereits in der Nacht vom 21. Auf den 22.10.22 abbrach, wurden alle Sonnenstunden eines Tages nur vom 21.10.2022 mit der Messung erfasst. Der Fokus der Auswertung beschränkt sich somit auf die Sonnenstunden des 21.10.2022.

In der nachfolgenden Abbildung 106 sind die protokollierten Messwerte für Kurzschlussstrom und Leerlaufspannung grafisch aufgetragen.

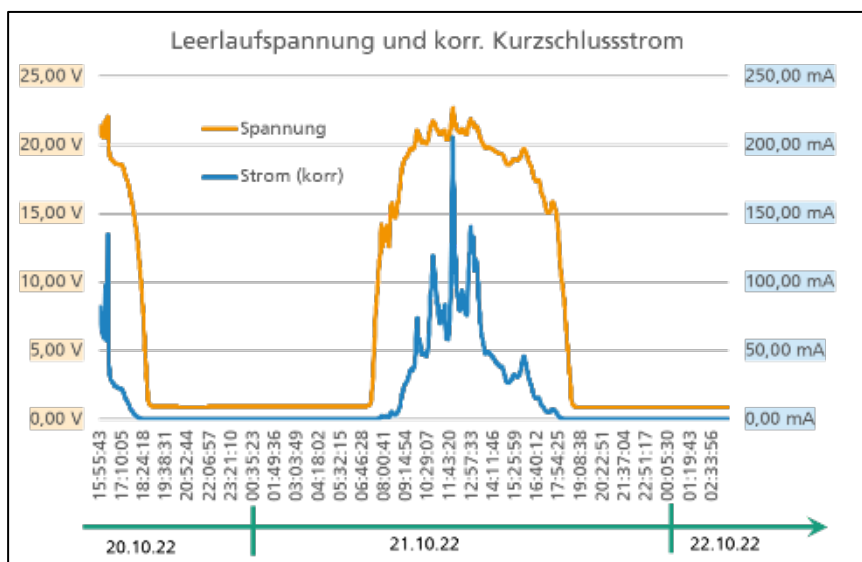


Abbildung 106: Messwerte Solarleistung im Wald

In Abbildung 107 ist die momentane Leistung des Solarpanels im MPP sowie die über die Zeit kumulierte Energiemenge für den 21.10.2022 aufgetragen. Dafür wurden die protokollierten Messwerte mit dem Füllfaktor verrechnet und für die Zeiträume zwischen aufeinanderfolgenden Messzeitpunkten eine lineare Steigung bzw. ein lineares Gefälle der Leistung angenommen.

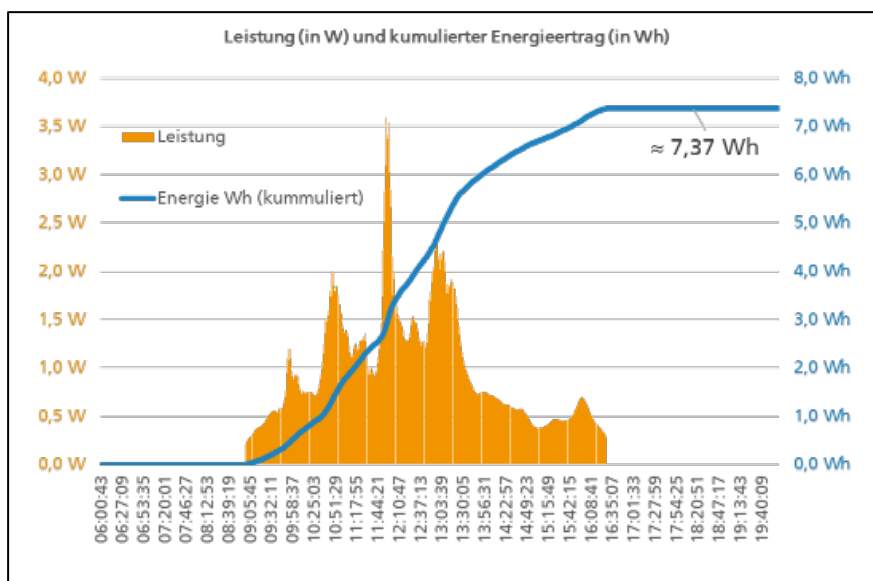


Abbildung 107: Solare Leistung und kumulierte Energie am 21.10.22 am Fallenstandort

Bei einer gemessenen Leerlaufspannung unter 18 V wurde pauschal eine Momentanleistung von 0 W veranschlagt, da ein für das spätere Fallensystem vorgesehener Solarladeregler eine Mindestspannung für den ordentlichen Betrieb benötigt. Entsprechend soll mit dem Schwellenwert von 18 V bei der Leerlaufspannung vorgebeugt werden, dass die erwartbaren Solarerträge überschätzt werden.

Nach Anpassung der Software des Messsystems hinsichtlich der Robustheit gegenüber fehlgeschlagener Einzelkommunikationsversuchen zwischen den elektronischen Komponenten wurde das System am selben Standort (selber Baum) für eine zweite Messung in Betrieb genommen.

Die zweite Messung wurde am 24.11.2022 um 14:16 Uhr gestartet und planmäßig am 08.12.2022 um 12:24 Uhr manuell beendet.

Zur Abschätzung erwartbarer Energieerträge durch Einsatz von Solarpaneelen an Fallenstandorten im Wald werden die gewonnenen Messwerte bzw. die daraus abgeleiteten Tagessummen an energetischen Solarerträgen den Daten des Deutschen Wetterdienstes gegenübergestellt.

Nähere Betrachtungen beschränken sich dabei auf die Tage, über die das Messsystem in Gänze in Betrieb war und Messwerte im Minutenintervall aufgezeichnet wurden, sodass der 24.11. und 08.12. für die nähere Betrachtung ausgeblendet wurden.

In der nachfolgenden Tabelle 20 sind sowohl die auf Basis der Messungen berechneten solaren Energieerträge als auch die Tagessummen der Globalstrahlung laut der Daten des Deutschen Wetterdienstes für dieselben Tage zu entnehmen. Die nächstgelegene Station des DWD war dabei die ca. 45 km vom eigenen Messstandort entfernte DWD-Station in Seehausen (ID 4642).

Tabelle 20: Messwerte Solarerträge und DWD-Daten zur Globalstrahlung

Datum	Tagessumme Globalstrahlung [1] (in J/m²)	Tagessumme Solarertrag laut eigener Messungen (in Wh)
21.10.22	484	7,37
26.11.22	141	3,19
27.11.22	355	5,5
28.11.22	140	1,80
29.11.22	87	0,6
01.12.22	42	0,31
02.12.22	89	0,62
03.12.22	114	0,94
04.12.22	51	0,03
05.12.22	50	0,51
06.12.22	64	0,4
07.12.22	218	2,57

[1] Deutscher Wetterdienst - Wetter und Klima aus einer Hand - Datenbank, Stand: 15.12.22
https://opendata.dwd.de/climate_environment/CDC/observations_germany/climate/daily/solar/

Der hohe Korrelationskoeffizient von gerundet 0,98 zwischen den Datenreihen in Tabelle 20 zeigt einen näherungsweise linearen Zusammenhang an. In Abbildung 108 sind die Werte aus Tabelle 20 und die dazugehörige Regressionsgerade grafisch aufgetragen. Der hohe R^2 -Wert von gerundet 0,95 zeigt an, dass die Regressionsfunktion eine hohe Güte aufweist, sich die Tagessummen der Globalstrahlung (laut DWD) somit recht sicher in die Solarerträge auf Basis eigener Messungen überführen lassen.

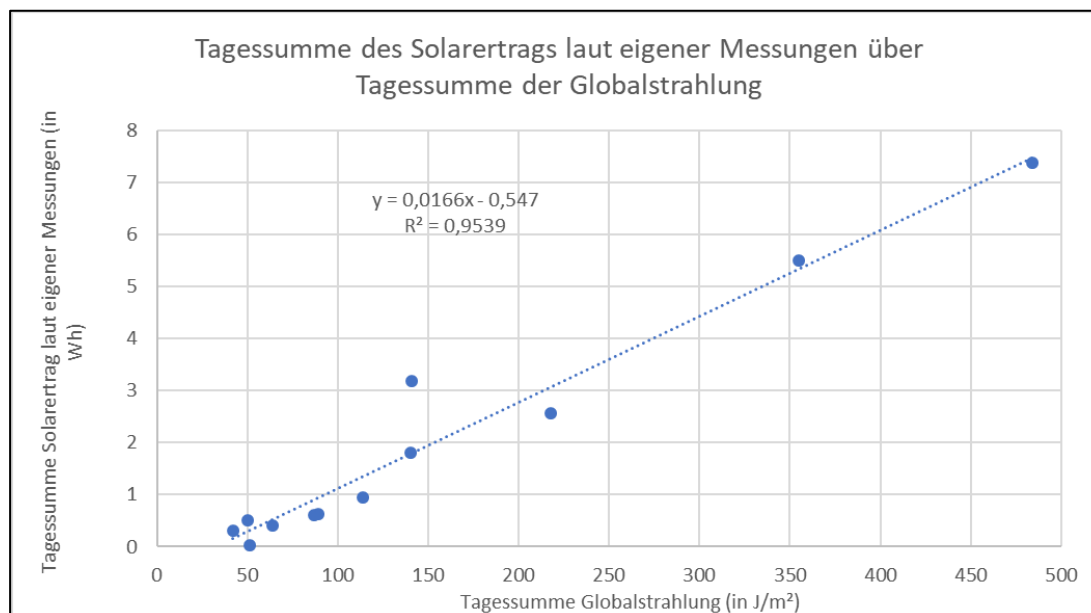


Abbildung 108: Tagessumme des Solarertrags laut eigener Messungen über Tagessumme der Globalstrahlung

Motivation ist hierbei, die Regressionsfunktion (siehe Abbildung 108) zur Umrechnung zu nutzen, um die historischen Daten des DWD zur Globalstrahlung zu realistischen Solarerträgen für das Fallensystem umzurechnen.

Die beiden Fangzeiträume, für die der Einsatz der Fallensysteme angedacht ist, erstrecken sich von März bis April und von Juli bis August. Aus den Historiendaten des DWD wurden für die letzten fünf Jahre die aufgezeichnete Globalstrahlung innerhalb der Fangzeiträume selektiert und mittels der Regressionsfunktion in Solarerträge umgerechnet, die man an den einzelnen Tagen innerhalb der Fangzeiträume der letzten fünf Jahre am Fallenstandort mit dem verwendeten 30 W Solarpanel hätte erwarten dürfen.

Es folgte eine Szenarienbetrachtung für die Fangzeiträume der vergangenen fünf Jahre. Hierbei wurden verschiedene Werte für die Leistungsaufnahme des Fallensystems sowie die Kapazität des Akkumulators angenommen, und analysiert, wie sich der Akkuladestand in den letzten fünf Jahren im Laufe des Betriebs innerhalb der Fangzeiträume entwickelt hätte. Der angenommenen Leistungsaufnahme des Fallensystems standen die umgerechneten Solarerträge aus den Historiendaten gegenüber.

In Abbildung 109 ist der Ladezustand des Akkus für die Jahre 2017 bis 2022 innerhalb des ersten Fangzeitraums auf Basis der erwarteten Solarerträge und unter Annahme einer Akkukapazität von 100 Wh sowie einer durchschnittlichen Leistungsaufnahme des Fallensystems von 0,5 W aufgetragen. Es ist zu erkennen, dass die größten Einbrüche im Akkuladestand zu Beginn des ersten Fangzeitraums, in den sonnenärmeren Wochen zu verzeichnen gewesen wären. Der niedrigste Akkuladestand wäre im Jahr 2017 zu verzeichnen gewesen und läge mit den angenommenen Parametern rechnerisch bei ca. 76,41. Auf sonnenärmere Tage folgten offensichtlich immer wieder ausreichend sonnenstarke Tage, in denen der Solarertrag den Energiebedarf der Falle überkompensiert hätte und der Akkumulator auf einen höheren Ladestand zurückgebracht hätte werden können. Von Mitte bis Ende Mai wäre bei den angenommenen Parametern der Akkuladestand in keinem der letzten 5 Jahre unter 90 % gefallen.

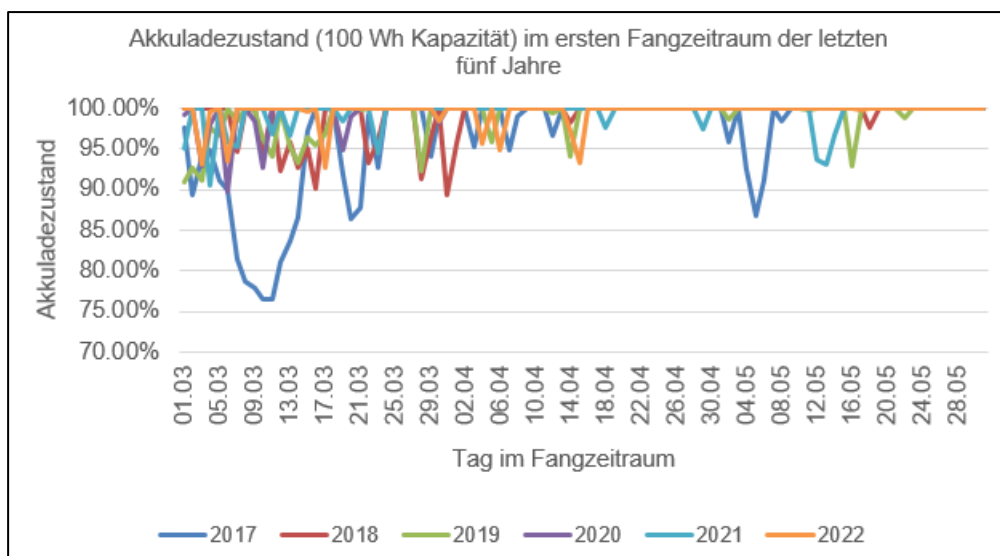


Abbildung 109: Verlauf des Akkuladestands unter Einsatz eines Solarpanels

In den nachfolgenden Tabelle 21 und Tabelle 22 sind separat für beide Fangzeiträume die niedrigsten Akkuladestände aufgeführt, die den Historiendaten der Globalstrahlung nach erwartet hätten werden können. Hierbei wurden mehrere Szenarien mit unterschiedlichen Wertekonstellationen für den Leistungsbedarf der Fallensysteme und für die Kapazität des Akkumulators betrachtet.

Tabelle 21: Niedrigster Akkuladestand unter Einsatz von Solarpaneele (Fangzeitraum März, April, Mai)

Minimum Ladezustand des Akkus		Durchschnittliche Leistungsaufnahme Fallensystem		
		0,4 W	0,5 W	0,6 W
Akkukapazität	50 Wh	82,48 %	52,83 %	0 % (mehrere Tage)
	100 Wh	91,24 %	76,41 %	40,83 %
	200 Wh	95,62 %	88,21 %	70,41 %

Tabelle 22: Niedrigster Akkuladestand unter Einsatz von Solarpaneele (Fangzeitraum Jul, Aug, Sep)

Minimum Ladezustand des Akkus		Durchschnittliche. Leistungsaufnahme Fallensystem		
		0,4 W	0,5 W	0,6 W
Akkukapazität	50 Wh	80,59 %	62,69 %	29,22 %
	100 Wh	90,3 %	81,35 %	64,61 %
	200 Wh	95,15 %	90,67 %	82,3 %

Aus den Tabellen wird ersichtlich, dass abhängig von der durchschnittlichen Leistung, die das finale Fallensystem aufweisen wird, unterschiedliche Akkukapazitäten oder analog Solarpanelgrößen genutzt werden sollten. Es ist ebenfalls zu erkennen, dass die Entladung deutlich sensibler auf die durchschnittliche Leistungsaufnahme des Fallensystems reagiert als auf die Akkukapazität. Ob weitere Szenarien mit bspw. unterschiedlicher Solarpanelgröße näher betrachtet werden sollten, muss im Konsortium noch diskutiert werden.

Ergebnisse von Untersuchungen zum Leistungsbedarf der Falle in den Jahren 2023 und 2024

Im Projektjahr 2023 wurden die Erprobungen zur Optimierung der Energieversorgung und der Leistungsaufnahme der Falle fortgesetzt. Dabei standen insbesondere Leistungsbedarfe der Komponente Zählen und der Lichtschrankensysteme im Fokus. Ziel war es, Aufwand und Nutzen des Einsatzes mehrerer Lichtschrankenebenen zu untersuchen und dabei Vorteile der Zählgenauigkeit gegenüber Nachteilen hinsichtlich des Leistungsbedarfs abzuwägen. Mit mehr als einer Lichtschrankenebene sollen Fehlzählungen, bei denen ein Falter eine Lichtschrankenebene blockiert, aber nicht bis in den Fangbehälter gelangt, vermieden werden. Die These war, dass mit einer dritten Lichtschrankenebene die Abfolge der Lichtschrankenevents weniger Mehrdeutigkeiten und damit potenzielle Fehlinterpretationen brächten, wenn ein zweiter Falter zeitlich sehr kurz versetzt nach einem ersten Falter in den Fangbehälter eindringt.

Lichtschrankenevents, die auf ein solches Ereignis hindeuten, wurden in den Eventprotokollen über die Versuche nur vereinzelt gefunden. Eine parallele Beobachtung mittels Videotechnik fand dabei nicht mehr statt, sodass nicht nachvollzogen werden kann, ob es sich bei jedem dieser Ereignisse tatsächlich um das beschriebene Szenario, zwei kurz nacheinander eingeflogener Falter, handelt. Die These kann somit nicht verworfen werden.

Auf Grundlage dessen, dass die beschriebenen Abfolgen von Lichtschrankenevents aber generell nur äußerst selten auftraten, wurde entschieden, dass die Einsparung hinsichtlich der Leistungsaufnahme, durch Verzicht auf eine dritte Lichtschrankenebene, den maximal erwartbaren Zusatznutzen einer solchen dritten Ebene überwiegt. Somit wurde die zum Berichtszeitpunkt die aktuellste Testmusterversion mit zwei Lichtschrankenebenen ausgestattet.

Im Jahr 2023 konnte noch keine finale Leistungsaufnahme des Fallensystems bestimmt werden, da das System selbst noch nicht finalisiert war und weitere Optimierungsmöglichkeiten zur Reduktion des Energiebedarfs zu evaluieren sind. Die aktuelle Leistungsaufnahme des Fallensystems lag zu diesem Zeitpunkt bei durchschnittlich 0,36 W.

Im Jahr 2024 konnte weiterhin keine finale Leistungsaufnahme für einen Prototypen des Fallensystems bestimmt werden, da nicht alle der bereits identifizierten Einsparungsmöglichkeiten hinsichtlich des Energiebedarfs umgesetzt werden konnten. Für die Optimierung wurden hierbei weiterhin Überarbeitungen am Zählmodul (Lichtschranken) priorisiert, da diese Komponente im Vergleich den größten Anteil am Gesamtenergiebedarf des Fallensystems hat. Die durchschnittliche Leistungsaufnahme des Fallensystems ließ sich durch mehrere Optimierungs- und Anpassungsschritte an den Lichtschranken von zuvor 0,36 W, um rund 44 %, auf 0,2 W reduzieren. Die Fallensysteme wurden nach diesen Anpassungen in den Feldversuchen in 2024 bereits getestet.

In Abschnitt 1.2, AP2, technische Konzeptentwicklung, wird die Konzeption für eine geeignete Kombination von Solar- und Akkumulatortechnik, unter Berücksichtigung aller aktuell verfügbaren Parameter beschrieben.

AP 6 – Erfolgskontrolle, Dokumentation und Ausblick

Praxiserfahrungen mit Versuchsmustern in Feldversuchen

Als Entwicklungsvorhaben für den Einsatz in der forstlichen Praxis ist die praktische Handhabung des automatisierten Pheromonfallensystems von besonderem Interesse und fand während der Entwicklungsarbeiten und in allen Freilandversuchen besondere Berücksichtigung. Im Folgenden werden wesentliche Erfahrungen des praktischen Umgangs mit den untersuchten Versuchsmustern kurz dargestellt.

Manueller Köderauswurf

Version 1 (Forleule, Frühjahr 2022)

Diese erste Umsetzungsvariante der Pheromonabgabe mit Festködern beruhte auf dem Konzept der Einhausung der Köder in gasdichter Aluminiumfolie (Blistersystem). Der Köderauswurf wurde in dieser Umsetzungsvariante während der Kontrolltermine manuell vorgenommen.

Generell gestaltete sich der Zugang zum Ködermagazin des untersuchten Gerätes sehr einfach. Die Abdeckung bestand aus einem unverschraubten Deckel. Das Ausdrücken eines neuen Köders aus dem Ködermagazin war mit Hilfe eines Stiftes oder Ähnlichem problemlos zu vollziehen. Im Laufe der durchgeführten Versuchsreihe zeigte sich ein Schwachpunkt des Systems in dem geringen Abstand des Fallentrichters zum Ködermagazin. Dadurch hat der entstehende Grat, der nach unten aufgerissenen Alufolie den Köder teilweise fixiert und daran gehindert, über den Trichter in das Köderkörbchen zu rutschen. Dies wurde durch die klebrige Oberfläche der Köder zusätzlich verstärkt. Des Weiteren waren die Seiten des Trichters nicht steil genug, sodass die klebrigen Gummiköder häufig erst nach leichtem Schütteln in den Köderauffangbehälter fielen.

Aus Sicht der praktischen Anwendung ergeben sich für die aktuelle Umsetzungsvariante des Blistersystems folgende **Hinweise für die Weiterentwicklung**:

- Wahl eines geeigneten Blistermaterials, welches auf die eingesetzten Köder abgestimmt ist und gleichzeitig die o. g. Herausforderungen überwindet
- Robuste Gestaltung eines leistungsstarken Auswurfmechanismus

Version 2 (Schwammspinner, Sommer 2022)

In der zweiten Version des Pheromonabgabemechanismus mit Festködern wurde ein fest verschraubtes Ködermagazin drehbar gelagert, wobei die Auswurföffnung direkt über dem Köderkorb lag. Die einzelnen Köder waren nun unter Kupferkappen auf einer Aluscheibe angeordnet. Durch Drehen des Ködermagazins wurden die Kupferkappen mit den Ködern über eine Öffnung in der Aluscheibe geschoben und der Köder konnte in den Köderauffangbehälter fallen.

Im Praxisversuch zeigte der Mechanismus Schwierigkeiten mit dem Auswurf von unterschiedlichen Köderformen: Beispielsweise ist die Geometrie der Schwammspinner-Köder schmäler und höher ausgeführt als die der Forleulen- / Nonnenköder, sodass die Köder beim ersten Anlauf nicht in die Kupferkapseln passten. Nach baulicher Anpassung der Ködermagazine war das Handling des Köderwechsels dann recht simpel: Das Magazin wurde gedreht, bis ein Köder herausfällt. Eine weitere Schwierigkeit ergab sich aus den Oberflächeneigenschaften der Pheromonfeststoffköder, welche aus Kautschuk gefertigt sind. Die Elastizität und die Haftung des Gummis auf der Aluscheibe führten dazu, dass der Köder sich beim Drehen des Magazins zwischen Aluscheibe und Kupferkappe verkeilen konnte. In solchen Fällen musste das Magazin aufgeschraubt und die Blockade manuell beseitigt werden.

Im Rahmen der durchgeführten Feldversuche erwies sich die manuelle Köderabgabe als fehleranfällig und betreuungsintensiv. Die beiden Gerätevarianten lieferten jedoch wichtige Praxiserfahrungen, die in die darauffolgende Konstruktion automatisierter Köderwechselmechanismen einfließen. Als wesentliche Änderung ist der Einsatz einer Edelstahlscheibe mit größerer Auswurföffnung vorzunehmen. Ergänzend dazu sind die Ködermagazine etwas größer zu dimensionieren, um das ungewollte Verkleben zu unterbinden. Auch das langsamere Drehen der Magazine durch einen elektrischen Antrieb erhöht die Robustheit der Festköderabgabe.

Automatischer Köderauswurf

Version 1 (Nonne, Sommer 2022)

Der Grundaufbau entsprach dem manuellen Köderauswurf Version 2, ist aber zusätzlich mit einem kleinen Elektromotor versehen, der durch eine 9-V-Batterie mit Strom versorgt wurde. Das System konnte vor der Ausbringung auf das gewünschte Wechselintervall programmiert werden.

Auch bei dieser Umsetzungsvariante wurden bei einigen Wechselintervallen keine Köder ausgeworfen. Zur Ermittlung der Ursache musste das Gehäuse geöffnet werden. Obwohl die Problematik mit verkeilten oder an Plastikoberflächen anhaftenden Ködern nicht mehr auftrat, kam es jedoch vor, dass sich die Plastikteile des Drehmechanismus verkeilt haben. Dies ließ sich im Feld kaum oder nur mit einem Zeitverzug von einem Wechselintervall lösen. Die erste automatisierte Version des Köderwechselmechanismus verlagerte den Schwerpunkt der Falle aufgrund der Größe und des Gewichts, sodass für eine Auszählung die gesamte Falle abgehängt werden musste, anstatt nur den Fangbehälter abzunehmen.

In zukünftigen Versionen (Prototypenphase) ist die Fertigungsgenauigkeit diverser Komponenten zu erhöhen, um die erwähnten Probleme zu reduzieren. Auch der Wechsel auf andere Kunststoffe, welche zu weniger Verzug der mechanischen Komponenten im Freilandeinsatz führen, ist umzusetzen.

Version 2 (Schwammspinner, Sommer 2023)

Die zweite Umsetzungsvariante des Wechselmechanismus wurde handlicher gestaltet und direkt mit der Zählereinheit verbunden. Über ein Interface konnte das Abgabeintervall softwareseitig eingestellt oder verändert werden. Die mechanische Belastung durch die direkte Befestigung der gesamten Falle entfiel bei dieser Variante. Fehlfunktionen aufgrund **verkeilter Köder** (Ködereigenschaften) und **verklemmter Drehmechanik** (3D-Druckmaterial) traten jedoch weiterhin auf, welche auf ungewollt eindringende Feuchtigkeit begründet ist. Dies ist auf eine Kombination von gewählter Fertigungsmethode und verwendetem Material zurückzuführen. Auch die verwendeten Mikroschalter sollten durch robustere Sensoren ausgetauscht werden, da auch diese sehr leicht durch ungewollte Bewegungen des Revolvers beschädigt wurden.

Die Praxiserfahrungen mit den untersuchten Köderwechselmechanismen haben gezeigt, dass für den aufwandsarmen Einsatz des Systems unter Praxisbedingungen noch zwei technische Herausforderungen zu lösen sind. Aus Sicht der praktischen Anwendung liegt die Zielvorstellung für den Entwicklungsansatz der automatisierten Festköderabgabe in einer einmaligen Bestückung des Ködermagazins zu Beginn der Überwachung. Das System soll maximal 4 Köder des Ködermagazins zu vorher festgelegten Zeitpunkten automatisch auswerfen, ohne dass weitere manuelle Eingriffe notwendig sind.

Aus Sicht der praktischen Anwendung ergeben sich für die aktuelle Umsetzungsvariante der Festköderabgabe folgende Verbesserungsvorschläge:

- Anpassung / Vereinheitlichung der Ködergeometrien (z. B. Schwammspinner) und / oder Überarbeitung des Ködermagazins und des Auswurfmechanismus, um das Verklemmen der Köder zu verhindern.
- Gasdichte Einhausung des Ködermagazins und / oder der Köder.
- Reduzierung der Kontaktflächen zum Köder.
- Vereinfachte und optimierte Bedienung beim Befüllen der Köderbehälter.
- Gestaltung der Pheromonabgabe ohne herausfallende oder sich lösende Einzelteile bei manuellem Nachfüllen.
- Stabilisierung der elektronischen Verbindungen zwischen Köderwechselmodul und Platine.

Mikropumpe (Flüssigpheromonabgabe, Schwammspinner 2023)

Die Praxiserfahrungen ergaben, dass die getesteten ersten Versuchsmuster der Mikropumpe im Vorfeld eines Feldeinsatzes relativ aufwendig vorzubereiten sind. Die Befüllung des schweren Tanks mit einem Lösungsmittel-Pheromon-Gemisch erfolgt über eine Kanüle, was zusätzliche Sorgfalt und Aufwand erfordert. Im durchgeführten Feldversuch funktionierte die Abgabe in vorher festgelegten Abgabeintervallen über den Zeitraum von 14 Wochen zuverlässig. Allerdings verhindert die Einhausung eine Einschätzung über den Füllstand des Tanks sowie den Zustand der Mikropumpen-Elektronik, was die praktische Handhabung zusätzlich erschwert. Wichtig ist hier zu betonen, dass es sich um erste Versuchsmuster und keine ausgereiften Produkte handelt. Daher sind die Ergebnisse als vorläufig zu betrachten. Eine zentrale Frage, die dabei beantwortet werden muss, ist, ob die Flüssigpheromonabgabe unter Gesichtspunkten des Waldschutzes überhaupt eine praktikable Alternative darstellt. Hierbei sind sowohl die technischen Einschränkungen als auch die praktische Umsetzbarkeit zu berücksichtigen. Ein zentrales Problem ist der Mangel an Erfahrungen im Umgang mit Lösungsmitteln und den spezifischen Anforderungen bei der Abgabe von Flüssigpheromonen. Insbesondere die Schwierigkeiten bei der exakten Bestimmung der Pheromonkonzentration im Lösungsmittel stellen eine große Herausforderung dar. Fehlende Pheromone oder eine falsche Konzentration könnten die Effektivität der Methode erheblich beeinträchtigen. Obwohl sich das Gerät im Test als grundsätzlich funktionsfähig erwiesen hat, ist die Handhabung unter Praxisbedingungen als sehr aufwendig zu beurteilen. Zudem sind die erreichten Fangzahlen – im Bereich von ca. 5 % der durchschnittlich in Vergleichsfallen erzielten Fänge – relativ gering. Die durchgeführten Tests bezogen sich ausschließlich auf die Art Schwammspinner, eine Übertragbarkeit der Ergebnisse auf andere Arten ist damit nicht möglich und wäre zu prüfen.

Aus Sicht der praktischen Anwendung ergeben sich für die aktuelle Umsetzungsvariante der Flüssigpheromonabgabe folgende **Hinweise für die Weiterentwicklung**:

- Einbindung einer Füllstandsanzeige des Tanks.
- Anpassung der Abgabemenge und / oder der Pheromonkonzentration im Lösungsmittel zur Verbesserung der Lockwirkung.
- Änderung des Flüssigkeitsabgabemechanismus in eine indirekte Dosierung via Luftpumpe oder anderer robuster Fördermethoden.
- Gestaltung der Abgabemethode unabhängig vom gewählten Lösungsmittel.
- Einfaches Handling im Umgang mit Flüssigpheromonen.

Zählmechanismus

Version 1 (Nonne 2022, Frost- und Breitflügelspanner 2022/23)

Die Installation der Zählmodule war sehr aufwändig, da die Steuerung und Energieversorgung jeweils separate Module darstellten, welche neben der eigentlichen Falle zusätzlich am Baum angebracht/untergebracht werden mussten. Die Stromversorgung über eine Autobatterie gewährleistete längere Betriebszeiten, bedurfte jedoch auch einen umständlichen Wechsel von leeren Batterien. Die Steuerungseinheit, welche in einem Elektro-Sicherungskasten verbaut war, ist nur durch Aufschrauben zugänglich gewesen, was die Handhabung (z. B. Systemneustart) umständlich gestaltete. Das Abrufen der Fangdaten vor Ort war prinzipiell über WLAN gegeben, konnte aber mangels geeigneter Feldgeräte und einer anwenderfreundlichen Benutzeroberfläche nicht genutzt werden. Stattdessen wurde bei jeder Fallenkontrolle eine im Sicherungskasten verbaute SD-Karte ausgelesen. Der für die Datenauslese notwendige Zugang zu dem auf einer offenliegenden Platine verbauten Mikrocomputer wurde durch einen enganliegenden Wetterschutz aus Zeltplane erschwert.

Das Zählmodul selbst ist mit dem gängigen Clipsystem der Variotrap-Trichterfalle an dieser zu befestigen. Die Passgenauigkeit variiert zwischen den einzelnen Trichter- und Fangbehälterkomponenten (werksseitig), wodurch bei den weniger flexiblen 3D-Druckkomponenten teilweise Plastikteile abgebrochen sind. Ein wesentliches Problem des Handlings der Versuchsgeräte bestand in dem Verrutschen der Lichtschranken, welche nicht zur Gänze am Fallrohr fixiert waren. Daraus resultierte eine Blockade der Lichtschrankensignale, die nur mühsam durch vorsichtiges Verschieben der Lichtschranken behoben werden konnte.

Die in der ersten Version eingeschränkte Zugänglichkeit zu wichtigen Komponenten, wie der Speicherkarte, wurde im Berichtszeitraum 2023 mit einer Konstruktionsänderung verbessert.

Version 2 (Schwammspinner und Frostspanner 2023)

Für die aktuelle Version wurde der Korpus der Zähleinheit so verändert, dass die Lichtschranken nicht verrutschen können und die Steuerung auf dem Zählmodul angebracht ist. Das Handling ist somit etwas einfacher geworden. Auch der Zugriff auf die Fallenprogrammierung sowie die gespeicherten Daten war nun direkt möglich. Über ein überschaubares Interface können Daten heruntergeladen oder Einstellungen, z. B. für die Köderabgabe, geändert werden. Dadurch, dass die Verbindung mit der Falle nur über Kabel möglich ist und die Steuerplatine dabei offen liegt, ist die Handhabung nicht für jedes Wetter geeignet.

Die Erprobung ergab für diese Umsetzungsvariante des automatisierten Zählmoduls folgende **Verbesserungsvorschläge für eine spätere praktische Handhabung:**

- Umsetzung einer finalen Lösung der Stromversorgung mit Eisen-Phosphat Akkus, die direkt am Fallensystem angebracht sind.
- Verbesserung des Zählalgorithmus zur präzisen Erfassung anfliegender (Ziel-) Organismen.
- Einhausung der elektronischen Schaltkreise, um mechanische Beschädigungen und Kurzschlüsse durch das Eindringen von Wasser zu vermeiden sowie den Transportaufwand der Geräte zu verringern.
- Implementierung eines Ein/Aus Schalters, um den Aufwand des Aufschraubens stromführenden Kontakte bei einem notwendigen Reset des Fallensystems zu verringern.
- Umsetzung eines stabileren Wetterschutzes, der aufwandsarm zu montieren und zu entfernen ist.
- Implementierung einer Alarmfunktion mit Fehlerausgabe innerhalb der Steuerungssoftware, sodass die auftretenden technischen Probleme eindeutig identifiziert und dokumentiert werden.
- Anzeige der erfassten Zählungen seit der letzten Fallenkontrolle in der Steuerungsapp und auf einem separaten Display.

Vor dem Hintergrund der durchgeführten Feldtests wurde die zuverlässige Zählung anfliegender Zielorganismen als zentrale Funktion des automatisierten Zählmoduls für die weiteren Entwicklungsarbeiten innerhalb des Vorhabens prioritär betrachtet. Weiterentwicklungen, die späteren Phasen, insbesondere der Prototypenentwicklung zuzurechnen sind, wurden lediglich aufgenommen und entsprechend dokumentiert.

Version 3 (Schwammspinner, Nonne und Frostspanner 2024)

Die Vorabversionen im Frühjahr 2024 waren als erste „Tastversuche“ zu verstehen – experimentelle Ansätze, die dazu dienten, zentrale Aspekte des Zählmechanismus zu erproben. Sie boten wertvolle Einblicke und halfen, einzelne Komponenten zu justieren, ohne bereits den finalen Rahmen zu setzen.

Im weiteren Verlauf des Jahres konzentrierten sich die Arbeiten dann auf den großen Abschlusstest, der das Projektende maßgeblich prägte. Hier flossen die gewonnenen Erkenntnisse aus den Vorabversionen zusammen, um einen umfassenden, aussagekräftigen Test zu ermöglichen.

In Vorbereitung der Langzeitversuche zum Abschluss des Projektes im Jahr 2024 wurden alle integrierten Versuchsmuster mit einem Solarpanel ausgestattet, welches im Zeitraum von etwa Mitte Februar bis Mitte Dezember einen für den autarken Dauerbetrieb des Fallensystems ausreichenden Solarertrag generiert. Ohne ausreichende Solareinstrahlung (z. B. Bewölkung, Wintermonate) sollte das System mit den gewählten Batteriekapazitäten im autarken Betrieb über den Zeitraum von etwa einer Woche betrieben werden können.

Das Zählmodul inkl. Lichtschrankenebenen, Mikrocontroller, Speicher, Verkabelung, Stromversorgung mit Lithium-Eisen-Phosphat-Akkumulatoren und Datenschnittstelle wurde im Jahr 2024 nochmals einer kompletten Überarbeitung unterzogen. Dabei wurde das gesamte Modul neu aufgesetzt, überarbeitete Gehäuseteile im 3-D-Druckverfahren gefertigt, um in dieser neuen Umsetzungsvariante die Stromversorgung mit einclippbaren Akkus zu gewährleisten. Zudem wurde das Mikrocomputermodul im Frühjahr 2024 mit einem Ein / Aus Schalter ausgestattet. Zur Verbesserung der Auswertungsmöglichkeiten wurde der Algorithmus, mit dem die Lichtschrankenevents interpretiert und unter anderem die Anzahl der Fänge abgeleitet werden, ebenfalls nochmals vollständig überarbeitet. Ergänzend wurden Algorithmen zur Analyse des registrierten Flugverhaltens entwickelt, die sekundär auch zur Plausibilitätsprüfung der abgeleiteten Fangzahlen eingesetzt werden. Im Zuge des Umbaus am Gehäuse wurde ein Loch für die SD-Karte eingesägt, das anschließend abgeklebt wurde. Obwohl dieser Umbau auch Nachteile hatte, war das Ausschneiden des Lochs erforderlich, um eine vollständige Neuerstellung der Aufbauten zu vermeiden. Allerdings kann es dadurch zu weiteren Problemen kommen, da Feuchtigkeit – beispielsweise durch nasse, flatternde Falter – auf die Platine dringen kann. Dies kann im schlimmsten Fall zu einem Kurzschluss führen. Daher muss das Loch unbedingt abgedichtet werden. Zudem ist beim manuellen Auslesen der SD-Karte darauf zu achten, dass die Hände trocken sind, um Schäden durch Feuchtigkeit zu vermeiden.

Die Akkumulatoren der Fallensysteme blieben über den Versuchszeitraum durch die Solarerträge grundsätzlich ausreichend geladen, um einen ordnungsgemäßen Betrieb zu gewährleisten. Hierbei wurden von Seiten der NW-FVA bei jeder Auszählung auch die Spannung der Akkumulatoren gemessen und protokolliert. Lediglich drei Mal mussten die Akkus gewechselt werden: Im Sommerversuch 2024, in dem die Versuchsmuster in der Spezies Schwammspinner getestet wurden. Hier ist allerdings nicht bekannt, warum sich die Akkus entleerten, da es an der Solarleistung nicht gelegen haben kann. Hierbei sollten weitere Untersuchungen in einem Folgeprojekt durchgeführt werden, um einer möglichen Ursache auf den Grund zu gehen. Im Winterversuch 2024, in dem in der Spezies Kleiner Frostspanner getestet wurde, mussten an zwei Terminen die Akkus aufgrund vollständiger Entleerung gewechselt werden. Im Winter ist die Solarleistung aufgrund der kürzeren Tage und geringeren Sonneneinstrahlung naturgemäß niedriger, was dazu führt, dass die Solarpaneele weniger Strom liefern und die Akkus daher nicht vollständig geladen werden können. Dennoch sollte die Falle auch ohne die Solarpaneele mindestens etwa eine Woche in Betrieb bleiben können. Vor diesem Hintergrund ist es unklar, warum die Akkus zweimal vollständig entladen waren. Akkus verlieren bei kalten Temperaturen ihre Leistung schneller. Wenn die Temperaturen extrem niedrig sind, kann dies dazu führen, dass die Akkus ihre Energie viel schneller abgeben, als es bei wärmeren Bedingungen der Fall wäre. Möglicherweise gibt es andere Faktoren, die den Stromverbrauch erhöhen oder die Akkuleistung beeinträchtigen, weshalb eine genauere Untersuchung des Systems und der Akkus sinnvoll wäre.

Die entwickelten Funktionsmuster wurden im Rahmen umfangreicher Labor-, Semifreiland- und Freilandversuche der NW-FVA untersucht, um die technischen Lösungsansätze sowie die Praxistauglichkeit zu evaluieren. Die technischen Varianten der Versuchsmuster mit dem größten Potenzial für die Umsetzung und Anwendung wurden zu einem integrierten Versuchsmuster einer „automatischen Falle“ zusammengeführt und ebenfalls in Freilandversuchen getestet. Die bisherigen Projektergebnisse, insbesondere der der Freilandversuche im Projektjahr 2024, belegen das Potenzial der automatisierten Pheromonfalle. Die Funktionsmuster der zentralen technischen Komponenten der Falle – gezieltes Anlocken, Fangen, Zählen, der automatische Wechsel von Pheromonködern sowie die autarke Energieversorgung – wurden im Projekt erfolgreich entwickelt, in ein Gesamtsystem integriert und der grundlegende Funktionsnachweis durch erste Praxisversuche erbracht.

Ausblick bezogen auf die technischen Aspekte des Vorhabens

Die durch die eingebauten Akkumulatoren inkl. Solarpanel autarke Energieversorgung gewährleistet eine kontinuierliche Funktion über den gesamten Überwachungszeitraum von bis zu drei Monaten. Durch den funktionierenden, automatischen Köderwechselmechanismus ist eine effiziente Nutzung während dieses Zeitraums möglich. Darüber hinaus ist eine Verlängerung des Überwachungszeitraums möglich, sodass eine effektive und langfristige Überwachung gewährleistet wird. Der überarbeitete Zählmechanismus sorgt für eine Übereinstimmung der Fangzahlen händischer Auslesung von 70 % bis zu 93 % Genauigkeit. Für die Datenübertragung steht aktuell eine Kabelverbindung zur Verfügung, die das Herunterladen der gesammelten Daten ermöglicht.

Im Folgenden werden künftig geplante Weiterentwicklungen der technischen Komponenten des integrierten Pheromonfallensystems beschrieben.

Manueller Köderauswurf

Sollte ein manueller Köderauswurf in Zukunft dem automatischen Köderauswurf bevorzugt werden, sollten einige Verbesserungen der manuellen Versionen durchgeführt werden. Die Tests zeigten, dass der enge Abstand zwischen Fallentrichter und Ködermagazin ein Problem darstellt. Der Grat der Alufolie fixierte die Köder und hinderte sie daran, in das Köderkörbchen zu fallen. Zudem waren die Trichterseiten zu flach, wodurch die Köder oft erst nach Schütteln fielen. Zur Verbesserung sollten folgende Maßnahmen getroffen werden:

- Auswahl eines geeigneten Blistermaterials, das besser mit den Ködern harmonisiert.
- Verbesserung des Auswurfmechanismus für eine zuverlässigere Köderabgabe.

Bei einer zweiten Version trat das Problem auf, dass unterschiedliche Köderformen nicht immer korrekt in die Kupferkapseln passten. Zudem verhakten sich die Gummiköder durch ihre Elastizität zwischen Aluscheibe und Kupferkappe. Dies führte zu Blockaden, die manuell behoben werden mussten. Zur Optimierung sind folgende Änderungen erforderlich:

- Verwendung einer Edelstahlscheibe mit größerer Auswurföffnung.
- Vergrößerung der Ködermagazine, um Verklemmungen zu vermeiden.
- Einheitliche Ködergeometrien.

Automatischer Köderauswurf

Der bestehende Entwicklungsstand des automatisierten Köderwechselmechanismus kann grundsätzlich beibehalten werden. Für zukünftige **Prototypentwicklungen** sind sinnvolle Anpassungen in der gasdichten Einhausung (1) der Köder sowie in der Überarbeitung des Ködermagazins (2) zu sehen. In Feldversuchen beobachtete technische Störungen des Köderauswurfs (Verklemmen / Verkeilen) für **mittelfristig** zu empfehlende, länger andauernde Freilandversuche können die bereits in den konzeptionellen Abschnitten beschriebenen Anpassungen Entlastung bringen. Eine gasdichte Einhausung der systemischen Komponenten erfordert jedoch in der Umsetzung komplexerer Anpassungen des bestehenden Aufbaus in einer späteren Entwicklungs- oder Prototypingphase.

Künftige Optimierungspotenziale des Aufbaus für die automatisierte Abgabe von Festköderpheromonen werden in folgenden Punkten gesehen und sind in Vorbereitung einer Prototypenentwicklung zu berücksichtigen:

- **Standardisierung und Verbesserung der Ködergeometrien** (z. B. für Schwammspinner) sowie eine Überarbeitung des Ködermagazins und des Auswurfmechanismus, um ein Verklemmen der Köder zu verhindern.
- **Gasdichte Einhausung** für das Ködermagazin und/oder die Köder selbst, um die Haltbarkeit und Wirksamkeit zu verbessern.
- **Reduktion der Kontaktflächen zum Köder**, um mögliche Beeinträchtigungen zu minimieren.
- Vereinfachung und Optimierung des Befüllens der Köderbehälter, um die Bedienung benutzerfreundlicher zu gestalten.
- **Optimierung der Pheromonabgabe**, sodass keine Einzelteile beim manuellen Nachfüllen herausfallen oder sich lösen können.
- **Verbesserung des Befüllprozesses**, einschließlich einer werkzeuglosen Handhabung und der Reduktion von Einzelkomponenten, um Verluste und Schwierigkeiten während der Befüllung zu vermeiden.
- **Erhöhung der Robustheit der automatischen Ködererkennung** im Abgabeprozess, insbesondere bei der korrekten Positionierung des Köders.
- **Integration der Pheromonabgabekomponente in handelsübliche Fallen** (z. B. Trichter- oder VarioTrap-Trichterfallen) durch die Entwicklung eines eigenständigen, wetterbeständigen Deckelmoduls, das vor Regen, Temperaturschwankungen, Sonneneinstrahlung und Windeinflüssen schützt. Dies erfordert die Auswahl geeigneter Materialien und Fertigungstechnologien.

Mikropumpe

Bis zum Abschluss des Vorhabens wurde der konstruktive Entwicklungsstand des Moduls zur Flüssigpheromonabgabe beibehalten. Notwendige Änderungen wie die Anpassung der Lockwirkung des Lösungsmittel-Pheromon-Gemischs und die Einbindung einer Füllstandsanzeige für den Tank der Mikropumpe erfordern umfangreiche weitere Arbeiten, die im laufenden Projekt nicht umsetzbar waren. Umfangreiche Vorarbeiten für notwendige Anpassungen, wie die Optimierung der Lockwirkung des

Lösungsmittel-Pheromon-Gemischs, die Integration in die zentrale Stromversorgung des Pheromonfallensystems sowie die Einbindung einer Füllstandsanzeige für den Tank der Mikropumpe, wurden im laufenden Zeitraum nicht priorisiert. Ein zentrales Hindernis stellt der Mangel an Erfahrungen mit geeigneten Lösungsmitteln und die noch fehlende Verfügbarkeit der benötigten Pheromone dar. Dies erschwert sowohl die Auswahl eines passenden Lösungsmittel-Pheromon-Gemischs als auch die Bestimmung der optimalen Konzentration, die für eine zuverlässige Funktion und Lockwirkung erforderlich ist. Dennoch wird angestrebt, ein Lösungsmittel zu identifizieren, das speziell für den Einsatz mit der Mikropumpe geeignet ist. Praktische Verbesserungsvorschläge wurden ebenfalls identifiziert, um die Effizienz und Benutzerfreundlichkeit des Systems zu erhöhen. Dazu zählen die Integration einer Füllstandsanzeige, um den Tankinhalt zuverlässig zu überwachen und rechtzeitig nachzufüllen, sowie die Anpassung der Abgabemenge oder Pheromonkonzentration, um eine optimale Lockwirkung zu gewährleisten. Außerdem wird eine Optimierung der Stromversorgung durch eine direkte Anbindung an die Akkus des Fallensystems empfohlen. Darüber hinaus wird die Einbindung der Mikropumpe in die Steuerungssoftware vorgeschlagen, um eine nahtlose Integration und automatisierte Steuerung zu ermöglichen.

Zählmechanismus

Für das Zählmodul inkl. Lichtschrankenebenen, Mikrocomputer, Speicher, Verkabelung, Stromversorgung mit Lithium-Eisen-Phosphat-Akkumulators und Datenschnittstelle ist eine komplette Überarbeitung zum Jahreswechsel 2023 / 2024 umgesetzt worden. Dabei wurde das gesamte Modul neu aufgesetzt, überarbeitete Gehäuseteile im 3-D-Druckverfahren gefertigt, um in dieser neuen Umsetzungsvariante die Stromversorgung mit einclippbaren Akkus zu gewährleisten. Für die im Berichtszeitraum 2024 vorgesehenen Versuche werden alle integrierten Versuchsmuster mit einem Solarpanel ausgestattet, welches im Zeitraum von etwa Mitte Februar bis Ende Oktober einen für den autarken Dauerbetrieb des Fallensystems ausreichenden Solarertrag generiert. Ohne ausreichende Solareinstrahlung (z. B. Bewölkung, Wintermonate) soll das System mit den gewählten Batteriekapazitäten im autarken Betrieb über den Zeitraum von etwa einer Woche betrieben werden können. Zudem wurde das Mikrocomputermodul im Frühjahr 2024 mit einem Ein / Aus Schalter ausgestattet.

Der Schwerpunkt der Entwicklungsarbeiten im Berichtszeitraum 2024 lag auf der Evaluierung und Verbesserung der zentralen Funktionen des Zählmoduls. Hier stand die fehlerfreie Funktion der Hardware (1) im Vordergrund. Darüber hinaus sollte auch der Transfer bzw. die Umsetzung der erfassten Lichtschrankensignale in konkrete Fangzahlen (2) gelöst werden. Die hierzu benötigten Auswertungsroutinen sollen lokal auf dem Mikrocomputer des Fallensystems eingebunden werden.

Weitere Umsetzungsvarianten wie die Einhausung der elektronischen Schaltkreise (1), die Implementierung eines stabilen Wetterschutzes (2), einer Alarmfunktion mit Fehlerausgabe (3) und die Anzeige der erfassten (bzw. plausibilisierten) Zählungen in der Steuerungssoftware (4) und auf einem externen Display (5) wurden im Berichtszeitraum nicht priorisiert.

Die Ergebnisse lassen darauf schließen, dass mehrere Faktoren den Zählmechanismus beeinflussen. Es wurde festgestellt, dass mit steigenden Fangzahlen die Ungenauigkeiten bei der Erfassung der Falter steigen. Zudem zeigt sich eine Abhängigkeit des Fangverhaltens von der Größe der Falter. Kleinere Falter könnten aufgrund ihrer Größe möglicherweise nicht korrekt erkannt werden, was die Qualität der Datenerhebung beeinträchtigen könnte. Diese Unterscheidung könnte dazu führen, dass besonders kleine Falter unterrepräsentiert sind und die Fangmethode somit nicht alle Falterarten zuverlässig erfasst. Eine Lösung wäre, die Röhre sowie die Sensorik entsprechend anzupassen, um sicherzustellen, dass auch kleinere Falter korrekt erkannt werden. Ein weiteres auffälliges Phänomen betrifft das Verhalten der Falter in der Falle: Insbesondere die Frostspanner setzen sich in sehr hoher Zahl an den Wänden des Behälters ab, anstatt in die Fangflüssigkeit zu sinken. Ein zusätzlicher Aspekt ist, dass das Flattern der Falter möglicherweise dazu führt, dass Schuppen in die Röhre gelangen, die dann die Sensorik der Falle beeinträchtigen könnten. Diese Schuppen könnten die Funktionsweise der Sensoren stören und so die Messungen verfälschen. Diese Erkenntnisse verdeutlichen, dass die derzeitige Fangmethode nicht optimal ist und einer weiteren Untersuchung bedarf. Um die Genauigkeit der Erfassungen zu verbessern, sind gezielte Anpassungen erforderlich, die sowohl das Verhalten der Falter als auch die Technik der Falle berücksichtigen.

Edge Analysen zur Zählereventaggregation direkt in der Falterfalle

In der nächsten Entwicklungsstufe der Pheromonfalle könnte auch angestrebt werden, eine Aggregation der Sensorevents (Lichtschrankenevents) zu belastbaren Zählerevents direkt auf der Mikrocontrollereinheit in den Pheromonfallen umzusetzen. Vorteil einer direkten Verarbeitung vor Ort im System könnte sein, dass so nur noch die Zählerevents übertragen werden und nicht jedes einzelne Lichtschrankenevent, also eine Minimierung der Datenübertragung direkt an der Quelle erfolgt. Als Methoden zur Datenaggregation stehen klassische Auswertealgorithmen oder aber KI-Methoden zur Verfügung. Welche Strategie zur Auswertung auf der

Controllereinheit am besten geeignet ist, wird in der Evaluierungsphase der Weiterentwicklung vergleichend bewertet.

Weitere Module und Fallenfunktionen

Für künftige Weiterentwicklungen des automatisierten Pheromonfallensystems sollte die Einbindung folgender Funktionen vorgesehen werden:

- Kompakteres Fallendesign und Integration eines robusten Wetterschutzes.
- Leeren der Falle durch Auswurf der Fänge inkl. Abtötung noch lebender Zielorganismen und Minimierung der Schadwirkung auf Nichtzielorganismen.
- Anpassung des Leer- und Fluchtmechanismus mittels geometrischer und konzeptioneller Modifikationen.
- Werkzeugfreie Nutzung der Falle (Befüllen, Akkutausch etc.) und Überarbeitung des Fallendesigns zur optimalen Benutzung im Freilandeinsatz (z. B. Minimierung von Schäden durch Bedienung, Verschluss von innenliegenden Öffnungen zum Schutz der Elektronik).
- Schnittstelle zur drahtlosen Datenübertragung.
- Decision Support, weitere Softwarelösungen.

Die Fortentwicklung dieser zusätzlichen Module/Schnittstellen konnte innerhalb des laufenden Projektes nicht begonnen werden. Es wurden jedoch konzeptionelle Vorarbeiten für die Bereiche „Abtötung der Zielorganismen“, „Auswurf der Fänge“ und „Netzwerkmodul“ mit der Funktion Datenfernübertragung durchgeführt. Dabei wurden konkrete Vorschläge erarbeitet und technische Lösungen der angestrebten Funktionalitäten mit Entwicklern anderer, teilweise bereits marktverfügbarer automatisierter Fallensysteme im Rahmen von Online- und Präsenzterminen diskutiert.

Ausgewählte Möglichkeiten für entsprechende Verbesserungen und Arbeitsschritte in potenziell weiteren Entwicklungsphasen der digitalen Falle werden im Folgenden dargelegt.

Optimierung des Fallendesigns

Die bisherigen Fallenkomponenten basieren in ihrem Design auf der Grundlage der Variotrap-Trichterfalle und der damit einhergehenden Dimensionierung und Gestaltung der einzelnen Module. Durch eine Loslösung dieser geometrischen Beschränkung sind optimalere Gestaltungen im Hinblick auf Funktion und Handhabbarkeit möglich. Durch Aufbrechen dieser Beschränkung sind auch neue, innovative Konzepte möglich. In diesem Zusammenhang steht vor allem die Trennung der Module, vor allem im Hinblick auf die Verwendung für unterschiedliche Spezies. Dazu zählt primär die Trennung von (kostengünstigen) pheromonbelasteten Fallenteilen und gering pheromonbelasteten (teuren) Bestandteilen.

Eine weitere Funktion ist die werkzeugfreie Gestaltung der Falle während der normalen Verwendung und eine vollständige wetterfeste Umsetzung des Fallenkonzepts.

Auch das Fixieren des kompletten Fallensystems muss aufgrund des Einsatzes von Solartechnik und weiterer Module in ihrer Gesamtheit betrachtet werden und optimal gestaltet werden.

Leeren und Abtöten der Fänge

Die ersten Entwicklungen zu dieser Thematik sind zu validieren und auf ihre Praxistauglichkeit hin zu untersuchen. Hier besteht großes Potenzial, die bisherige Praxis der ungewollten Beifänge und der aufwendigen Handhabung zu vereinfachen. Aber auch hier ist eine Vielzahl an Versuchen erforderlich, um eine Minimierung der Schadwirkung auf Nichtzielspezies und die Gestaltung einer robusten Kinematik alltagstauglich umzusetzen. Auch sollte in diesem Zusammenhang betrachtet werden, ob eine Abtötung in bestimmten Konstellationen entfallen kann, da die natürliche Seneszenz relativ schnell eintritt oder durch gezielte Maßnahmen gegebenenfalls beschleunigt wird. Auch ein mehrstufiges System zum Entfernen moribunder Spezies ist hierbei denkbar und sollte untersucht werden.

Optimierung der Montage- und Reparaturfreundlichkeit

Für eine schnellere und einfachere Handhabung bei der Erstmontage eines Fallensystems wird der aktuell feinmodulare Systemaufbau überarbeitet. Ziel ist es hier ein blockbasierte Modulbauweise zu realisieren. Damit ist gemeint, dass Funktionsgruppen wie Falterfallendeckel, Fallenboden, Energieversorgung

und Zähleinheit modular montieren und demontieren kann. Beispielsweise sollte so ein einfacher Akkuwechsel oder Wechsel der Pheromonabgabe möglich sein.

Lokal vernetzte Falterfallen mit zentralem LPWAN-Gateway

Für eine zweckmäßige (Fern)Überwachung der Pheromonfallen und auch eine echtzeitorientierte Eventübertragung ist für die nächste Entwicklungsstufe geplant, die Fallen im Nahbereich über eine energiesparsame Kurzstreckenfunktechnik zu verbinden und dann über ein zentrales Gateway per LPWAN als Uplinkkanal an einen zentralen Server anzubinden.

Mit einem solchen Netzwerk können so in zweckmäßigen/geeigneten Zyklen die relevanten Zählerevents und anderen Systemzustände (Akkukapazität etc.) an eine Servereinheit übertragen werden. Sollte sich z. B. ein Übertragungsstandard wie BLE nach der Evaluierungsphase als sinnvoll erweisen, hätte dies den Vorteil, dass mit Smartphones, Tablets oder Laptops über deren Bluetoothinterface auch eine direkte eins-zu-eins Verbindung mit einer Falle aufgebaut werden kann. Andere Standards, bspw. ZigBee oder WiFi, sollten im Vorfeld auch auf ihre Eignung für eine energiesparsame Datenübertragung mit BLE verglichen werden.

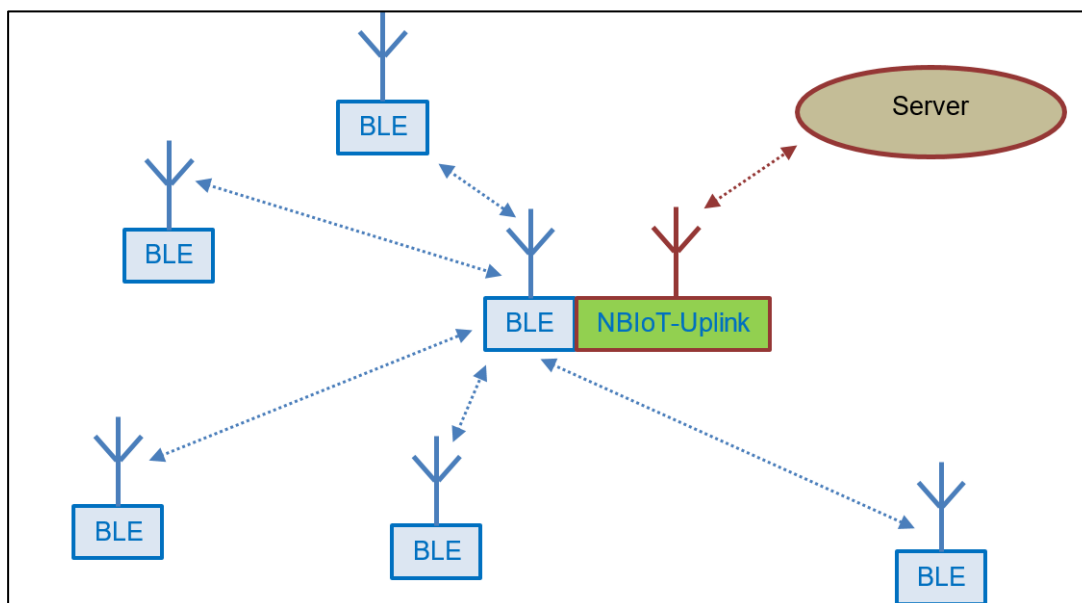


Abbildung 110: Beispielaufbau eines BLE-Netzwerks und zentralem Gateway mit LPWAN-Uplink

In der Abbildung 110 ist beispielhaft ein möglicher Aufbau eines Netzwerks von Fallen aufgezeigt. Hier wird für den Nahbereich Bluetooth Low Energy (BLE) verwendet. Darüber können die Fallen ihre Eventinformation an ein zentrales Gateway übertragen. Dieses Gateway verfügt über eine zweite LPWAN-Funkschnittstelle, bspw. NB-IoT, worüber die Informationen der jeweiligen Fallen an die zentrale Servereinheit weitergeleitet werden könnten. Bei dem Uplink-Kanal wären auch andere Standards wie LoRaWAN, Sigfox oder auch klassisch LTE/5G denkbar, wobei aber auch hier die Energiesparsamkeit neben der Netzabdeckung im Vordergrund steht.

LoRaWAN ist nach aktuellem Stand nicht wirklich flächendeckend ausgebaut und damit vor allem in abgelegenen Forstgebieten wahrscheinlich nicht verfügbar. LTE oder 5G sind bzgl. ihres Energieverbrauchs zu intensiv und bieten Datenraten an, die für die Eventübertragung der Fallen nicht gebraucht werden. Eine sorgsame Abwägung und Gegenüberstellung, welche Übertragungstechnik für welchen Abschnitt am vielversprechendsten ist, ist am Anfang der nächsten Entwicklungsphase unbedingt notwendig.

Ausblick bezogen auf die forstfachliche Anwendung und ein künftiges Marktangebot

Im Rahmen des Projektes wurden die Arbeiten zur Entwicklung und Erprobung der technischen Komponenten und Funktionen der automatischen Pheromonfalle durch gezielte, projektbegleitend durchgeführte Maßnahmen zur Evaluierung und Vorbereitung des künftigen Anwendungsbereiches sowie des Transfers der Lösungen in den Markt.

Hierzu zählten einerseits die kontinuierliche Berücksichtigung des Kosten-Nutzen-Verhältnisses bei der Lösungsfindung für jede einzelne Funktion und Anforderung. Andererseits umfasste dies auch kontinuierliche Erhebungen und Gespräche mit Anwendern, potenziellen Herstellern und möglichen Vertriebspartnern zur Ermittlung von deren individuellen Möglichkeiten, Anforderungen und Restriktionen.

Festzuhalten ist zunächst, dass eine abschließende Aussage zum Kosten-Nutzen-Verhältnis für spätere Anwender derzeit pauschal zum aktuellen Zeitpunkt nicht getroffen werden können. Eine derartige Bewertung ist von zahlreichen individuellen Faktoren, wie Problemlage, Rahmenbedingungen und Nutzwerten bei den verschiedenen Anwendern abhängig, darüber hinaus jedoch auch von den individuellen Geschäftsmodellen, mit denen verschiedene Anbieter später Lösungen auf dem Markt etablieren können. Unbenommen dessen wurde bei der Entwicklung der Komponenten stets darauf geachtet, dass Aufwand und Nutzen (Preis/Leistung) bei Auswahl und Einsatz technischer Lösungen so gut wie möglich gestaltet wurde. Bestehende Verbesserungspotenziale wurden eingangs bereits beschrieben. Unbenommen dessen ist festzustellen, dass durchaus höhere, als zu Projektbeginn vermutete Kosten für ein digitales Pheromonfallen-System für Anwender im forstlichen Bereich akzeptabel scheinen. Dies ist eine Erkenntnis, die im Rahmen von Diskussionen mit Praktikern deutlich wurde und ausgeht von Veränderungen in Prozessen des Waldschutzes und vom erzielbaren Nutzen in der Praxis. Ein als positiv in der Praxis bewerteter Aspekt ist der im Projekt konsequent verfolgte Ansatz, die digitale Falle modular aufzubauen, sodass sich der Endkunde das für ihn passende System anhand seiner individuellen Anforderungen im Hinblick auf den Preis, den prozessbezogenen Bedarf und den zu erzeugenden Nutzen im Monitoringprozess (z. B. Reduzierung des Aufwands) zusammenstellen kann.

Ausgewählte Erkenntnisse von Arbeiten/Betrachtungen im Projekt zur Ermittlung möglicher Marktpotenziale einer digitalen Falle werden im Folgenden dargestellt.

Im Kontext der regulären Monitoringpraxis wurde für die Trägerländer NW-FVA (Hessen, Niedersachsen, Schleswig-Holstein und Sachsen-Anhalt) sowie für die Bundesländer Bayern und Sachsen eine Abfrage zu Art und Umfang der wiederkehrenden Arbeiten durchgeführt. Hierbei ergaben sich für die Schmetterlingsarten Forleule, Nonne und Schwammspinner die in Tabelle 23: Übersicht Pheromonfallenüberwachung forstschädlicher Schmetterlingsarten im Überwachungsraum der NW-FVA, Bayern und Sachsen

Tabelle 23: Übersicht Pheromonfallenüberwachung forstschädlicher Schmetterlingsarten im Überwachungsraum der NW-FVA, Bayern und Sachsen

Pheromonfallenüberwachung forstschädlicher Schmetterlingsarten			
Bundesland / Landesbehörde	Hessen/ Niedersachsen/ Sachsen-Anhalt/ Schleswig- Holstein/ NW-FVA	Bayern	Sachsen
Nonne	327	rd. 750	ca. 240
Forleule	327	140	ca. 45
Schwammspinner	101	70	ca. 35

Darüber hinaus werden an der NW-FVA die erfassten Daten weiterer 238 Einzelstandorte für den Kiefernspinner zusammengeführt.

Zur **Ermittlung von Verwertungs- und Marktpotenzialen** wurden darüber hinaus weitere verschiedene Betrachtungen und Befragungen durchgeführt. Die folgenden **Kernaussagen** können daraus hervorgehend zusammengefasst werden:

Die Marktgröße in der forstlichen Anwendung ist derzeit beschränkt, weshalb eine Erweiterung auf die Zielgruppe Landwirtschaft empfehlenswert und notwendig für eine wirtschaftliche Tragfähigkeit für einen Marktanbieter wäre. Der Preisunterschied zwischen der Trichterfalle und der DiMoTrap ist aus Sicht des Kosten-Nutzen-Verhältnisses grundsätzlich gerechtfertigt, jedoch stellt er insbesondere in Forstverwaltungen aufgrund spezifischer Randbedingungen öffentlicher Auftraggeber nicht zwingend ein Argument für die Einführung des Produkts dar. Komplexe Beschaffungsvorgänge in öffentlichen Verwaltungen könnten dabei ein Hemmnis für die Markteinführung darstellen, ebenso wie Herausforderungen in der IT-Infrastruktur und die damit verbundenen Vorgaben. Dennoch ist ein Marktpotenzial sowohl national als auch europaweit und

international vorhanden. Der Markteinstieg, insbesondere über große private Forstbetriebe scheint vielversprechend, da diese eher bereit sein könnten, in die digitalen Lösungen zu investieren. Eine wichtige Voraussetzung für den Erfolg ist es, eine Referenz für den Einsatz zu schaffen, etwa durch Langzeittests in der betrieblichen Praxis und über Fortentwicklungen mindestens den Status eines Prototyps zu erreichen.

Bedeutung einer nachgelagerten Prototypenentwicklung für potenzielle Hersteller

Ein funktionsfähiger Prototyp bietet potenziellen Herstellern zahlreiche Vorteile, die den Übergang zur Serienproduktion erleichtern und die Markteinführung beschleunigen. Zunächst ermöglicht ein funktionsfähiger Prototyp eine deutlich verkürzte Zeit bis zum Markteintritt, da der Hersteller auf bereits getestete Technologien zurückgreifen kann. Das geprüfte Sensorkonzept für die Falterzählung spart Entwicklungszeit, und die Konstruktion der Falle ist bereits auf den Anwendungsfall optimiert, sodass nur geringe Anpassungen erforderlich sind, zum Beispiel für Fertigungstechniken wie Spritzguss. Außerdem ist die Datenaggregation vom Sensorevent zum Falterzählwert bereits funktionsfähig und getestet, was dem Hersteller ermöglicht, die Software problemlos in die Serienproduktion zu integrieren. Sollte ein KI-Modell notwendig sein, könnte es später ergänzt werden, ohne den gesamten Entwicklungsprozess neu starten zu müssen. Das vorhandene Sensornetzwerk für Anwendungen in der Forst- und Landwirtschaft bietet zudem die Möglichkeit, das System für andere Anwendungsbereiche weiterzuentwickeln. Schließlich ermöglicht die funktionierende Pheromonabgabe eine automatisierte, energieeffiziente Nachfüllung von Lockstoffen, was das System noch attraktiver macht. All diese Faktoren tragen dazu bei, dass der Hersteller mit minimalem Aufwand und schnellen Ergebnissen in die Produktion gehen kann.

AP 7 – Projektmanagement und Öffentlichkeitsarbeit

Die Arbeiten an diesem AP wurden durch beide Verbundpartner in enger Zusammenarbeit umgesetzt. Die wesentlichen Arbeiten und Ergebnisse werden im Folgenden vorgestellt.

Das Projekt startete für den Projektpartner Fraunhofer IFF zum 01.07.2021 (Teilvorhaben 2), die personelle Besetzung der projektbezogenen Wissenschaftlerstelle des Projektpartners NW-FVA (Teilvorhaben 1) wurde zum 01.08.2021 realisiert.

In Abstimmung aller Partner wurde eine *Kooperationsvereinbarung* zum Projekt erstellt, zwischen den Partnern abgestimmt. Die Unterzeichnung wurde am 21.07.2021 abgeschlossen.

Am 03.08.2021 wurde die Auftaktveranstaltung (Kick-off-Meeting) in den Räumlichkeiten der NW-FVA in Göttingen unter Anwesenheit von Mitarbeitenden beider Partnerinstitutionen durchgeführt. Das Verbundvorhaben wurde vor dem Hintergrund des etablierten forstlichen Schaderregermonitorings bei der NW-FVA in das Arbeitsfeld Waldschutz eingeordnet. Im Rahmen des Treffens wurden die wesentlichen Projekthinhalte, Zuständigkeiten, Zielsetzungen und Hintergründe des Vorhabens besprochen und festgelegt.

Die praktische Umsetzung der laufenden jährlichen Überwachung forstlicher Schadschmetterlinge sowie die hierzu eingesetzten Arbeitsmaterialien wurden am Beispiel der Variotrap-Trichterfalle vorgestellt und diskutiert. Des Weiteren wurden monatlich wiederkehrende Arbeitstreffen mit allen Projektbeteiligten (per Videokonferenz) sowie quartalsweise wiederkehrende Präsenztermine vereinbart. Im Rahmen des Termins wurden formale und administrative Grundlagen für das Projekt, wie die Einrichtung eines ContentServers für laufende Arbeiten sowie eines Cloudservers zur sicheren Ablage wesentlicher Arbeitsdokumente, die Einbindung des Fördermittelhinweises in öffentlichkeitswirksame Maßnahmen zusammen mit der Verwendung der Logos des BMEL und BMU sowie die Etablierung eines eigenen Projektlogos festgelegt.

Die Bildrechte an den Logos der Partnerinstitute wurden ausgetauscht und seitens der NW-FVA wurde vereinbart, einen Schaukasten mit Präparaten relevanter Schmetterlingsarten zur Verfügung zu stellen. Als Ergebnis des Projekttreffens wurden inhaltliche und formale Anforderungen an die Projektpartner dokumentiert.

Für den Datenaustausch innerhalb des Projektes richtete das Fraunhofer IFF im Folgenden einen Server zum Datenaustausch (DMS) ein und wies die Projektpartner in deren Nutzung ein. Die webbasiert erreichbare Plattform zum Datenaustausch auf gesicherten Servern der Fraunhofer-Gesellschaft enthält einen Arbeitsbereich, in dem Dokumente und Materialien für und von den Partnern abgelegt werden können.

Monatliche JourFixe-Termine dienten zur kontinuierlichen Abstimmung der Arbeiten im Projekt, in denen die aktuellen Arbeitsstände, Feldversuchen und Arbeiten an den Fallenkomponenten abgestimmt wurden. Die Treffen der Projektmitarbeitenden beider Partner fanden im Wesentlichen als online-Meetings statt. Diese

Treffen der Projektpartner ergänzend wurden neben einzelnen Abstimmungen in Präsenz und bei den Versuchsflächen verschiedene bilaterale Abstimmungen durchgeführt.

Zur Unterstützung der projektbezogenen Öffentlichkeitsarbeit wurden zu Projektbeginn entsprechend Hinweise zum Projekt auf den Internetseiten der Partner eingestellt:

- eine Projektwebseite auf den Seiten der NW-FVA freigeschaltet. Diese ist unter <https://www.nw-fva.de/forschen/projekte/pherubs> erreichbar.
- eine Projektwebseite auf den Seiten des Fraunhofer IFF freigeschaltet. Diese ist unter <https://www.holzlogistik.iff.fraunhofer.de/de/forschungsprojekte/dimotrap.html> erreichbar.

Des Weiteren wurde vom Fraunhofer IFF im Rahmen des Berichtszeitraums für das Projekt-CI ein Projektlogo entworfen und mit den Partnern abgestimmt. Ausgehend von der Erarbeitung verschiedener Entwurfsvarianten das Pro und Contra der Varianten diskutiert und eine finale Logovariante (vgl. Abbildung 111) ausgewählt.



Abbildung 111: Finales Projektlogo PherÜbs (DiMoTrap)

Ergänzt wurden diese administrativen Abstimmungen beider Partner durch zahlreiche Maßnahmen der Öffentlichkeitsarbeit. Ziel war es, mittels der verschiedenen Aktivitäten Fachpublikum über die Arbeiten zu informieren und einen fachlichen Austausch zu den technischen Entwicklungen zu führen. Die Aktivitäten werden im Folgenden in knapper Form vorgestellt.

Im Jahr 2022 präsentierte das Fraunhofer IFF das Projekt DiMoTrap im Rahmen der **6. KWF-Thementage vom 31.03. bis 02.04.2022 in Jessen / Sachsen-Anhalt** an einem gemeinsamen Ausstellungsstand mit dem Landesforstbetrieb Sachsen-Anhalt. Ein eigens für die Präsentation auf Messen gestalteter Projektflyer DiMoTrap diente hierbei zur Ansprache und Information der Teilnehmenden an den Thementagen.

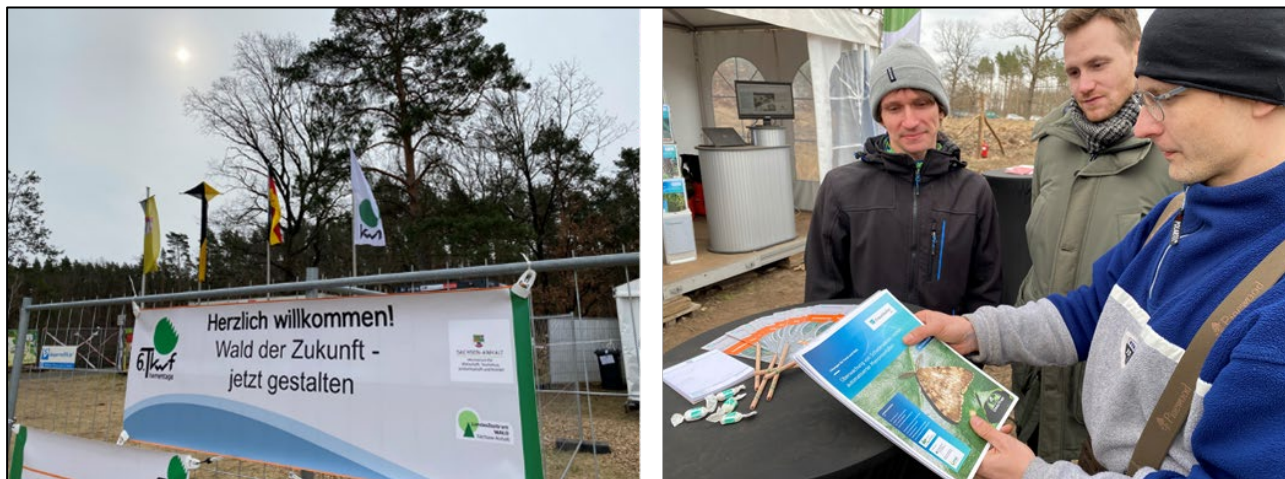


Abbildung 112: Zielgruppenansprache mit dem DiMoTrap-Projektflyer auf den KWF-Thementagen in Jessen

Eine weitere Maßnahme der Öffentlichkeitsarbeit bestand 2022 in der Vorstellung des Projektes im Rahmen des **Waldklimafondskongresses** (<https://www.waldklimafondskongress.de>). Gemeinsam mit den Partnern von der NW-FVA wurde ein Poster "Überwachung von Schadinsekten mittels automatisierter Pheromonfallen" präsentiert. Dieses ist als online-Publikation zur Session: Waldschadensmanagement - Forstschutz und Kalamitätsbewältigung unter <https://www.waldklimafondskongress.de/posteraustellung/waldschadensmanagement> veröffentlicht.



Abbildung 113: Posterpräsentation zum Projekt auf dem Waldklimafondskongress 2022

Diese Posterpräsentation ergänzend wurde seitens des IFF in der Workshop-Session "Waldschadensmanagement" ein Kurzvortrag zum Thema "Entwicklung automatisierter Pheromonfallen für die laufende Überwachung von forstschädlichen Schmetterlingsarten" gehalten.

Am **10.11.2022** nahmen die NW-FVA und das IFF am **FNR Statusseminar in Kassel** teil. Seitens der NW-FVA wurde das Projekt auf der Veranstaltung präsentiert.

Abbildung 114 zeigt die beiden im Jahr 2022 im Rahmen des Projekts PherÜbS entstandenen Poster.

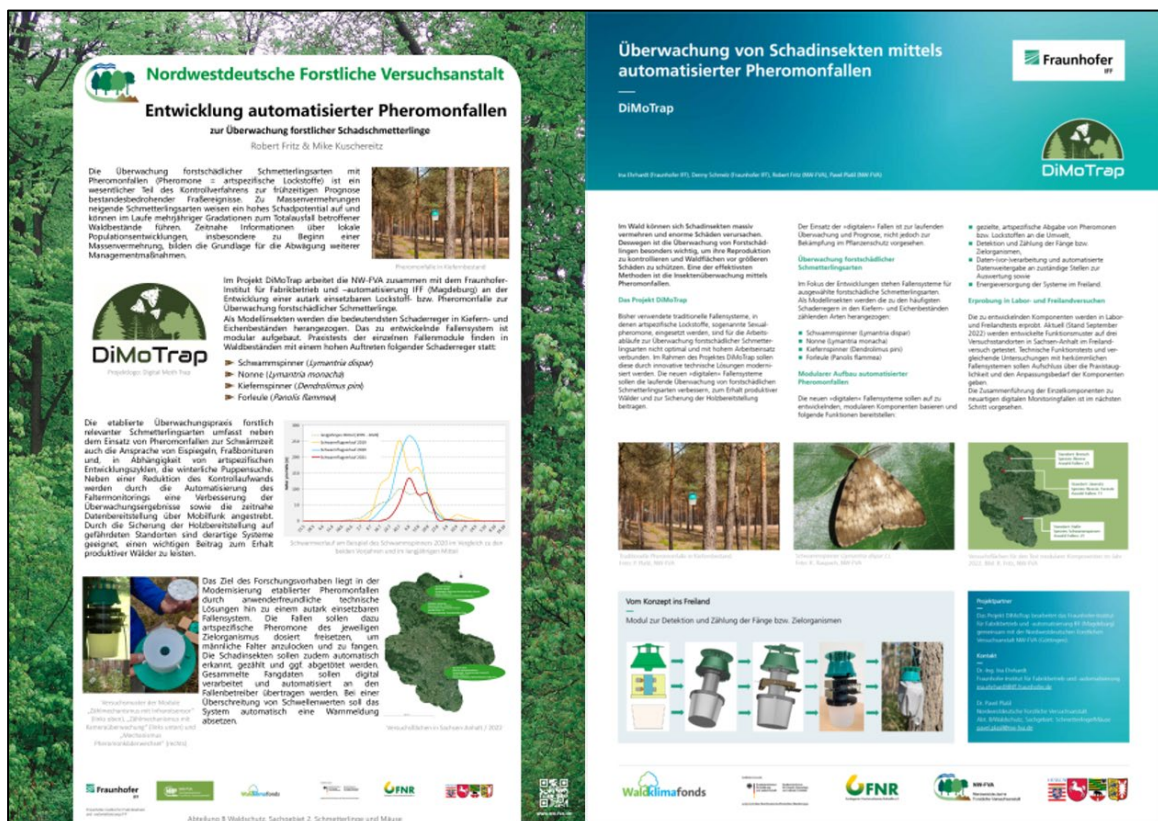


Abbildung 114: Poster 1: "Entwicklung automatisierter Pheromonfallen" (NW-FVA, links) und Poster 2: "Überwachung von Schadinsekten mittels automatisierter Pheromonfallen" (IFF, rechts)

Die Maßnahmen zur Öffentlichkeitsarbeit wurden in den Jahren 2023/2024 wie folgt fortgeführt:

14. – 16.03.2023 Tagung Sektion Waldschutz

Die Tagung „Sektion Waldschutz“ fand im Zentrum für Wald und Holzwirtschaft in Arnsberg statt. Das Format richtete sich an Experten aus dem Bereich Waldschutz. Neben den Trägerländern der NW-FVA waren mehrere andere Bundesländer wie bspw. Sachsen, Brandenburg und Bayern, sowie öffentliche Forschungseinrichtungen vertreten. Das Projekt DiMoTrap wurde im Rahmen einer Präsentation vorgestellt.

18. – 19.04.2023 Tagung Ressource Holz

Die Tagung „Ressource Holz“ wird vom Fraunhofer-Institut für Fabrikbetrieb und –automatisierung in Schloss Hundisburg in Sachsen-Anhalt ausgerichtet. Das Projekt DiMoTrap war im Rahmen des Tagungsprogramms mit einem Vortrag, einem Posterbeitrag und einem Demonstrationsstand vertreten.

24.05.2023 Projektpräsentation Forstreferendare Göttingen

Die Forschungsaktivitäten der NW-FVA werden regelmäßig in interne Fortbildungen der Trägerländer eingebunden (Referendariat / Tag der offenen Tür etc.).

25.05.2023 Projekttreffen LWF Freising

Im Rahmen eines Projekttreffens an der bayerischen Landesanstalt für Wald und Forstwirtschaft wurden frühere technische Aufbauten zum Fang forstschädlicher Schmetterlinge und Käfer mit den aktuellen projektbezogenen Versuchsmustern einer automatisierten Pheromonfalle verglichen und hinsichtlich verschiedener Zielstellungen diskutiert. Neben autarken Fallensystemen mit automatischer Zählung der Zielorganismen wurde die Zucht der Spezies *Lymantria dispar* besichtigt und hinsichtlich spezieller wissenschaftlicher Fragestellungen diskutiert. Es fand ein intensiver Austausch mit Herrn Prof. Skatulla und Frau Dr. Dr. Lobinger statt, der für die Inhalte des Projekts PherUbS einen großen Mehrwert darstellte.

07.08. – 08.08.2023 Workshop Projekt PherUbS / DiMoTrap

Der projektbezogene Workshop richtete sich an Forstexperten, -praktiker und Wissenschaftler, die sich mit dem Thema Pheromonfallenüberwachung forstschädlicher Schmetterlinge beschäftigen. Am 07.08. wurden die Fortschritte und der aktuelle Projektstand aus biologischer und technischer Sicht vorgestellt und diskutiert. Am zweiten Veranstaltungstag fand eine Exkursion auf Versuchsflächen im FA Wetzlar statt, in deren Rahmen der aktuelle Entwicklungsstand automatisierter Pheromonfallen vor Ort besichtigt und diskutiert werden konnte. Im Rahmen der Veranstaltung wurden außerdem Maßnahmen der PR mit Interviews und Bild- sowie Drohnenaufnahmen im Waldbestand durchgeführt.

11. – 13.09.2023 Präsentation des Projektes DiMoTrap auf der Forstwissenschaftlichen Tagung Dresden

Im Rahmen eines Präsentationsbeitrages auf der FowiTa 2023 konnten neue Kontakte hinsichtlich der Anwendung automatisierter Erfassungsmethoden im Bereich Forst geknüpft werden. In Hinsicht auf verschiedene Umsetzungsmethoden der Datenübertragung aus dem Wald in das Mobilfunknetz konnte in der Folge eine Kooperation mit der FVA Freiburg und ehemaligen Mitarbeitern der Universität Konstanz realisiert werden. Ein sich bereits in der kommerziellen Anwendung befindliches System zur Waldbrandfrüherkennung, welches die Datenübertragungstechnologie LoRaWAN zur Bildung von Sensornetzwerken nutzt, wurde von der Firma Dryad vorgestellt (<https://de.dryad.net>).

26. – 29.09.2023 Posterpräsentation auf der Deutschen Pflanzenschutztagung Göttingen

Bei der Teilnahme an der Deutschen Pflanzenschutztagung wurde ein hohes Interesse an dem Thema Automatisierung und Digitalisierung im Bereich der Erfassungsmethoden deutlich. Dabei zeigte sich auch, dass der im Projekt PherUbS verfolgte technische Ansatz sowohl im forstlichen als auch im landwirtschaftlichen Bereich, einzigartig ist. Es wurde die Frage diskutiert, inwiefern das vorliegende System geeignet ist, um es auf andere Schmetterlingsspezies zu übertragen.

05. – 06.10.2023 Projekttreffen in Wien (Universität für Bodenkultur, Prof. Schopf) und Brunn (Mendel-Universität)

Während des Besuchs des Instituts für Forstentomologie, Forstpathologie und Forstschutz an der Universität für Bodenkultur in Wien ergab sich eine Reihe von Anknüpfungspunkten, insbesondere, was die Überwachungspraxis forstschädlicher Schmetterlinge in Österreich und die Zucht der Spezies Schwammspinner in Verbindung mit zwei parasitären Brackwespenarten betrifft. Es konnten darüber hinaus entomologische Methoden ausgetauscht werden. Im Rahmen des Vor-Ort Termins an der Mendel-Universität in Brunn stand ebenfalls der entomologische Austausch im Vordergrund. Darüber hinaus konnten alle Bereiche der Universität im Zuge einer ‚Nacht der Wissenschaft‘ besichtigt werden.

12.01.2024 Projekttreffen mit der Firma Embever

Das Unternehmen stellt ein Dashboard zur Verfügung, das die Auswertung von Daten aus der Borkenkäferfalle von Vitasec ermöglicht. Ziel des Gesprächs war es, die Möglichkeiten der Datenübertragung zu besprechen und Potenziale für eine gemeinsame Weiterentwicklung zu erörtern.

21.03.2024 Forstlicher Unternehmertag - Tagung Ressource Holz

Die Tagung „Ressource Holz“ wurde vom Fraunhofer-Institut für Fabrikbetrieb und -automatisierung am Zentrum Wald Forst Holz Weihenstephan in Bayern ausgerichtet. Das Projekt DiMoTrap war mit einem Posterbeitrag vertreten. Abbildung 115 zeigt das in diesem Zusammenhang entstandene Poster.

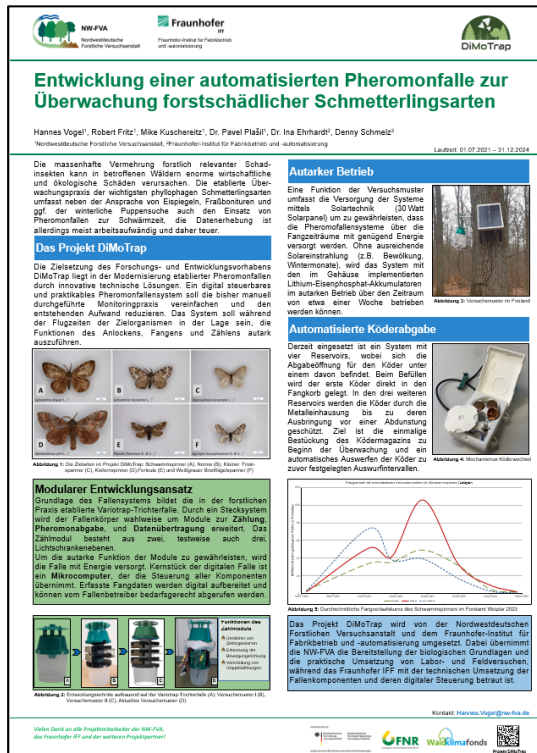


Abbildung 115: Poster Entwicklung einer automatisierten Pheromonfalle zur Überwachung forstschädlicher Schmetterlingsarten

Im Juni veröffentlichte das Fraunhofer IFF ein Video unter der Rubrik Forschung erklärt. Das Video entstand in Zusammenarbeit mit der NW-FVA. Das Video ist unter:

https://www.youtube.com/watch?v=giml0s_cwXM&embeds_referring_euri=https%3A%2F%2Fwww.holzlogistik.iff.fraunhofer.de%2F&embeds_referring_origin=https%3A%2F%2Fwww.holzlogistik.iff.fraunhofer.de&source_ve_path=MjM4NTE aufrufbar.

20.-22. Juni 2024: KWF-Tagung 2024

Das Projekt DiMoTrap wurde auf der 18. KWF-Tagung mit einem Stand präsentiert. Gezeigt wurden ein Poster, ein Projektvideo sowie ein Versuchsmuster, das die Inhalte und Anwendungen des Projekts anschaulich vermittelte. Der Stand bot Interessierten die Möglichkeit, sich über die Fortschritte und Ziele des Projekts zu informieren.

Juni 2024: Statusseminar der FNR (Online-Veranstaltung)

Unter dem Thema „Schädlingsmonitoring und Detektion von Sturmschäden“ beschäftigte sich das Seminar mit dem Einsatz moderner Technologien zur Identifikation von Sturmflächen und zur Überwachung von Schädlingsbefall. Im Mittelpunkt standen innovative Fernerkundungsmethoden und digitale Lösungen aus Forschung und Praxis, die darauf abzielen, Folgeprobleme frühzeitig zu erkennen und zu minimieren.

Oktober 2024: Abschlusspräsentation am Runden Tisch Digitalisierung der FNR (Online Veranstaltung)

Beim Statusseminar „Forst 4.0“ am 21. und 22. Oktober 2024, das der Präsentation und Diskussion ausgewählter Projektergebnisse diente, wurde beschlossen, auf Basis des aktuellen Stands von Wissen und Technik gezielte Maßnahmen zur Weiterentwicklung der initiierten Digitalisierungsprozesse zu definieren. Gleichzeitig sollen in einem koordinierten Verfahren Wege zur Förderung der Markteinführung und praktischen Anwendung von Demonstratoren und Versuchsmustern erarbeitet werden.

22. Oktober 2024: Projektpräsentation im Rahmen der Dienstberatung mit den Waldschutzbeauftragten Sachsen-Anhalts

Im Oktober 2024 wurde das Projektkonsortium zu einer Präsentation der erreichten Ergebnisse und des Entwicklungsstands zur Dienstberatung des Landeszentrum Wald mit den Waldschutzbeauftragten Sachsen-Anhalts unter Beteiligung von VertreterInnen der LLG und der NW-FVA eingeladen. Die Sitzung fand in Räumlichkeiten der LLG Sachsen-Anhalts, Standort ALB-Magdeburg in Magdeburg, Wallonerberg 6/7 statt. Die Präsentation wurde durch das IFF vorgenommen und im Anschluss an die Ausführungen erfolgte eine Diskussion zu möglichen Kooperationen des LZW mit dem Projektkonsortium während einer möglichen Weiterführungsphase des Projektes. Hierbei konnte ein potenzielles Interesse des LZW zur Unterstützung weitergehender Feldtests festgehalten werden.

Oktober 2024: Pressemitteilung der Fraunhofer-Gesellschaft zum Projekt DiMoTrap

Im Oktober 2024 publizierte die Fraunhofer Gesellschaft unter der Rubrik „Forschung kompakt“ eine mehrseitige Pressemitteilung (vgl. Abbildung 116) in deutscher und englischer Sprache. Diese wurde VertreterInnen der Fachpresse im In- und Ausland für eine geeignete Nachnutzung angeboten. Resonanz zeigte diese Aktivität unter anderem durch die Kontaktaufnahme einschlägiger Anbieter von Lösungen für ein gezieltes Monitoring von Schaderregern aus Südafrika. Dies unterstreicht eine bestehende Nachfrage nach digitalen Lösungen nicht nur auf nationaler und europäischer Ebene, sondern auch darüber hinaus.



Abbildung 116: Pressemitteilung in der Rubrik "Forschung kompakt"

Präsentation auf der Entomologentagung 2025

Eine Präsentation auf der Entomologentagung in Geisenheim (17. - 20. März 2025) stellt einen wertvollen Abschluss dar. Die Tagung bietet eine ideale Plattform, um die Ergebnisse einem breiten Fachpublikum vorzustellen und deren Transfer in die Praxis zu fördern. Darüber hinaus ermöglicht der direkte Austausch mit Expertinnen und Experten aus Wissenschaft, Wirtschaft und Praxis eine vertiefte Diskussion der Ergebnisse und die Identifikation weiterer Anknüpfungspunkte für zukünftige Projekte. Die Einbindung in dieses Veranstaltungsformat erhöht zudem die Sichtbarkeit der Arbeitsergebnisse und trägt zur Vernetzung der Beteiligten sowie zur Etablierung neuer Kooperationen bei. Dies ist besonders in Hinsicht auf einen geplanten Folgeforschungsantrag wichtig, um das Interesse potenzieller Projektpartner zu wecken.

2. Verwertung

Das Projekt zielte darauf ab, die laufende Überwachung von forstrelevanten Schadinsekten durch innovative technische Lösungen zu verbessern. Dies soll dazu beitragen, produktive Wälder zu erhalten und die Versorgung mit Holz langfristig zu sichern. Im Mittelpunkt stehen neuartige automatisierte Pheromonfallen, die universell für die Überwachung und Prognose forstschädlicher Schmetterlingsarten im Pflanzenschutz eingesetzt werden können. Die Entwicklung dieser automatisierten Fallensysteme umfasst einen modularen Aufbau von Komponenten für die gezielte, artspezifische Freisetzung von Lockstoffen, die automatisierte Erfassung von Zielorganismen, eine autarke Energieversorgung für den Einsatz im Freiland sowie eine effiziente Daten-(vor-)verarbeitung und eine automatisierte Datenweitergabe. Wenn im Folgenden von **automatisierten Pheromonfallen** gesprochen wird, bezieht sich dies ausdrücklich auf die derzeit in Entwicklung befindlichen Systeme im Versuchsmusterstadium.

Die bisherigen Projektergebnisse unterstreichen das Potenzial der automatisierten Pheromonfalle, die Effizienz in der Schädlingsüberwachung zu steigern. Die Funktionsmuster der grundlegenden technischen Komponenten der Falle - gezieltes Anlocken, Fangen, Zählen, der automatisierte Wechsel von Pheromonködern sowie die autarke Energieversorgung - wurden erfolgreich entwickelt, in ein Gesamtsystem integriert und der grundsätzliche Funktionsnachweis durch erste Praxisversuche erbracht. Eine Komponente zur Kommunikation zwischen Falle und einer zentralen Stelle wurde in der bisherigen Projektlaufzeit noch nicht implementiert.

Die wirtschaftlichen Erfolgsaussichten für ein funktionierendes, breit einsetzbares, modulares Fangsystem für diverse Schaderreger werden zum Projektende sowohl im Wald als auch für den Bereich der Landwirtschaft weiterhin als gut eingeschätzt. Weder die NW-FVA noch die LWF als Fachbehörde, noch das Fraunhofer IFF verfolgen wirtschaftliche Ziele. Im Rahmen von Anschluss- und Folgeprojekten könnten die entwickelten Funktions- und Versuchsmuster in Kooperation mit geeigneten KMU zunächst zu Prototypen weiterentwickelt und anschließend in Form eines oder mehrerer vermarktungsfähiger Systeme angeboten werden.

Unter Berücksichtigung der projektspezifischen Anforderungen an das Entwicklungsvorhaben sind zum Zeitpunkt der Berichtserstellung im internationalen Raum keine gleichwertigen alternativen technischen Lösungen hinsichtlich des Funktionsumfangs bekannt. Im forstlichen Sektor in Deutschland wurde im Rahmen von Expertenworkshops, Tagungsbeiträgen und Interviews von Fachpersonal ausgewählter relevanter Landesforstbetriebe eine Einordnung des Marktpotenzials für ein automatisiertes Pheromonfallensystem innerhalb Deutschlands vorgenommen. Der Zugang zu den wichtigsten Akteuren des forstlichen Sektors ist durch die Trägerländer und die Netzwerkfähigkeit der NW-FVA gegeben. In Abhängigkeit von der aktuellen Überwachungspraxis forstschädlicher Schmetterlingsarten wird das wirtschaftliche Potenzial im forstlichen Sektor als begrenzt eingeordnet. Eine Erweiterung des Einsatzbereichs eines automatisierten Pheromonfallensystems auf den landwirtschaftlichen Sektor wurde im Rahmen von Expertengesprächen geprüft und wird vor dem Hintergrund der wirtschaftlichen Erfolgsaussichten empfohlen. Sowohl im forstlichen als auch im landwirtschaftlichen Sektor wird die Nachfrage sowohl auf europäischer als auch auf internationaler Ebene als gegeben bewertet.

Zur Realisierung des identifizierten Marktpotenzials besteht das Erfordernis der Umsetzung technischer Folgeentwicklungen mit dem primären Ziel des Prototypenbaus und einer begleitenden Langzeiterprobung zur Gewinnung statistisch auswertbarer Erkenntnisse. Dabei sind sowohl die Optimierung bestehender Komponenten als auch die ergänzende Weiterentwicklung als erfolgversprechend eingestuft. Innovativer Ansätze von entscheidender Bedeutung. Durch iterative Entwicklungszyklen und umfassende Tests ist sicherzustellen, dass der Prototyp sowohl den technischen als auch den wirtschaftlichen Anforderungen gerecht wird. Dazu ist eine enge Zusammenarbeit mit potenziellen Anwendern und Partnern zentral, um praxisnahe Lösungen zu entwickeln und die Markteinführung effizient vorzubereiten.

Eine Umsetzbarkeit der im Projekt entwickelten und demonstrierten technischen Ansätze und Lösungen in die Praxis ist daher potenziell erst nach einer Phase der Prototypenentwicklung und des Prototypentests mittel- bis langfristig gegeben.

Mit den entwickelten Komponenten und Funktionsmustern eines digitalen Fangsystems ist perspektivisch eine deutliche Verbesserung der wissenschaftlichen Datenbasis für die laufende Überwachung und Prognose der Populationsentwicklungen forstschädlicher Schmetterlingsarten zu erwarten. Insbesondere das dauerhafte bzw. langjährige Monitoring populationsdynamischer Prozesse der wichtigsten forstlichen Schadschmetterlinge wird damit auf eine tragfähigere und belastbarere Basis gestellt. Die gezielte Implementierung und fortlaufende Weiterentwicklung vorhandener moderner und digitaler Technik bietet eine Vielzahl von weiteren Ansätzen und Innovationen. Der Einsatz intelligenter Automatisierung, datenbasierter Analysen und vernetzter Systeme trägt maßgeblich zur Steigerung von Effizienz, Präzision und Nachhaltigkeit in verschiedenen Anwendungsfeldern bei. Die mögliche Integration zukunftsweisender Technologien wie Künstliche Intelligenz, Internet of Things (IoT) und Machine Learning eröffnet zusätzlich neue Möglichkeiten zur Optimierung von Prozessen und Entwicklungen. Eine fortlaufende Anpassung an neue technologische Entwicklungen sowie an dynamische Markt- und Kundenbedürfnisse ist dabei entscheidend.

Im Rahmen des Projektes wurden anhand erster Praxistests folgende verbesserungswürdige Aspekte festgestellt:

- Es sind Abhängigkeiten der Zählgenauigkeit von der Größe der zu überwachenden Schmetterlinge sowie von deren Gesamtmenge zu beobachten.
- Da die Datenfernübertragung noch nicht implementiert wurde, müssen die automatisch erfassten Zählereignisse vor Ort von der Falle ausgelesen werden.
- Die Fangbehälter der Fallen müssen derzeit bei den Kontrollen manuell geleert werden.
- Benutzerfreundlichkeit und die Stabilität des Fallengehäuses.

Für die erfolgreiche Weiterentwicklung des automatisierten Pheromonfallensystems sind Folgeaktivitäten mit einer mittelfristigen Laufzeit von mindestens drei bis fünf Jahren vorzusehen. Diese sollten darauf ausgerichtet sein, die Funktionsmuster der automatisierten Pheromonfalle zu optimieren und weiterzuentwickeln, um eine erfolgreiche Einsatzfähigkeit in der forstlichen Praxis zu gewährleisten (Prototypenentwicklung). Im Zuge dessen sind iterative Tests und Validierungen unter praxisnahen Bedingungen notwendig, um die Praxistauglichkeit der Falle zu überprüfen und kontinuierlich zu verbessern. Durch strukturierte Feldversuche, z. B. in Zusammenarbeit mit ausgewählten Forstbetrieben mit wissenschaftlich begleiteter Evaluation, kann die Vermarktungsstrategie aufgebaut und die Akzeptanz in der Praxis gefördert werden. Neben der Forstwirtschaft sollte dabei auch ein Einsatz in der Landwirtschaft und im Biozidbereich in Betracht gezogen und im Rahmen von spezifischen Anforderungsanalysen ermittelt werden. Dabei ist es wichtig, die jeweiligen branchenspezifischen Anforderungen frühzeitig zu identifizieren und in die Weiterentwicklung einfließen zu lassen. Durch die enge Zusammenarbeit relevanter Akteure aus Praxis und Wissenschaft können wertvolle Erkenntnisse für die im nachfolgenden Schritt zu entwickelnden Prototypen gewonnen werden, die zur technischen Optimierung beitragen.

Auf die notwendigen Entwicklungsarbeiten, die identifiziert werden konnten, um an das Vorhaben DiMoTrap anschließend die künftige Attraktivität eines Produktes und das Marktpotenzial einer entsprechenden Lösung zu erhöhen, wird nachfolgend eingegangen.

Mindest-Anforderungen für eine Etablierung in der Praxis (mit hoher Priorität und Zeitschiene mind. 3 Jahre)

- (1) **Datenübertragung:**
Energieeffiziente Komponente zur kabellosen, bidirektionalen Kommunikation zwischen Falle und einer zentralen Stelle (Datenaustausch, Konfiguration, Wartung, ...).
- (2) **Sensorik und Konstruktion:**
Weiterentwicklung der Zählkomponente: Erhöhung der Zählgenauigkeit
Anpassbarkeit der Sensorik an die Zielorganismen sowie Optimierung der Stabilität des Fallengehäuses.
- (3) **Entwicklung einer Komponente zum Leeren des Fangbehälters:**
Gewährleisten der Funktionalität durch Vermeidung von Überfüllung des Fangbehälters.
- (4) **Validierung in der Praxis:**
 - Weitere Überprüfung und Optimierung der Gesamtfunktionalität unter Praxisbedingungen mit wissenschaftlich begleiteter Evaluation in ausgewählten Forstbetrieben.
- (5) **Assistenz- und Wartungsfunktion (Vereinfachung der Handhabung):**
Entwicklung eines intuitiven Bedienkonzepts, Anleitung für Wartungs- und Fehlerfälle.

Darüberhinausgehende Erweiterungen mit sehr gutem Aufwand-Nutzen-Verhältnis zur Verbesserung des Markteinführungspotenzials

- (1) **Weiterentwicklung des Köderwechselmechanismus zur Pheromonabgabe:**
Erprobung alternativer Systeme wie eines Blister-Systems.
- (2) **Pheromone:**
Entwicklung und Optimierung der Abgabe von Mehrkomponenten-Pheromonen in flüssiger Form durch eine Mikropumpe.
- (3) **Transfer in anderen Branchen mit ähnlicher Problematik:**
Erprobung beispielsweise in der Landwirtschaft und im Biozidbereich.

Unbenommen der technischen (Weiter-) Entwicklungen muss für eine spätere Markteinführung an der **An- und Einbindung in bestehende Daten- und Technikinfrastrukturen gearbeitet werden**. Diese adressiert die effiziente Verwaltung und Verarbeitung der gesammelten Daten in Meldeportalen der Länder, wie bspw. dem Waldschutz-Meldeportal der NW-FVA. Daneben werden für den Anwendungsbereich **adäquate Geschäftsmodelle für Aufbau, Betrieb und Nutzung integrierter digitaler Infrastrukturen** erforderlich.

Eine Begleitung der Forschungs- und Entwicklungsaktivitäten durch geeignete Rahmenbedingungen, die z. B. Möglichkeiten zur Teilnahme an Fachveranstaltungen bieten, wären hierbei hilfreich, um z. B. Kontakte zu

potenziellen Partnern sowie relevanten Akteuren aus der Industrie und Praxis zu etablieren. Solche Veranstaltungen fördern den interdisziplinären Austausch und ermöglichen es, das Projekt einer breiten Zielgruppe zu präsentieren, wodurch wertvolle Rückmeldungen zur Weiterentwicklung des Projekts eingeholt und langfristige Kooperationen initiiert werden können. Ein Beispiel hierfür wäre eine Tagung als Plattform für die von der FNR geförderten Projekte im Rahmen der Digitalisierung im Wirtschaftskluster Forst & Holz zu etablieren.

Darüber hinaus wäre es denkbar, die Ergebnisse im Rahmen von Freilandtests gezielt durch die Einbindung von potenziellen Industriepartnern zu präsentieren. Ergänzend könnten Workshops im Freiland organisiert werden, um die erzielten Ergebnisse praxisnah zu demonstrieren. Diese Workshops könnten beispielsweise darauf abzielen, Verfahren oder Produkte unter realen Bedingungen zu erproben und den Austausch zwischen Forschenden, Anwendern und Industriepartnern zu fördern.

Insgesamt tragen diese Aktivitäten maßgeblich dazu bei, die Sichtbarkeit des Projekts zu steigern und eine fundierte Basis für dessen spätere Markteinführung zu schaffen.

3. Erkenntnisse von Dritten

Der Einsatz von Künstlicher Intelligenz (KI), dem Internet der Dinge (IoT) und Fernsensoren hat die Schädlingsüberwachung grundlegend verändert (Ma et al., 2019). KI und IoT ermöglichen die Echtzeit-Erkennung von Schädlingen sowie die Umweltüberwachung, wodurch Entscheidungen effizienter getroffen und traditionelle, arbeitsintensive Methoden reduziert werden (Ramalingam et al., 2020; Huang et al., 2021). Besonders Deep Learning (DL) hat dabei eine Schlüsselrolle gespielt, insbesondere bei der automatisierten Erkennung und Vorhersage von Schädlingen in Fallen, wodurch ein bedeutender Übergang von konventionellen zu datengetriebenen Ansätzen erfolgt ist (Passis et al., 2024). Durch den Einsatz von Convolutional Neural Networks (CNNs) konnte die Effizienz und Genauigkeit der Schädlingsdetektion erheblich verbessert werden (Kamilaris et al., 2018). Studien wie die von Molina-Rotger et al. (2023) zeigen zudem, dass maschinelles Lernen (ML) in Kombination mit DL auch bei begrenzten Datensätzen präzise Ergebnisse in der Identifikation und Klassifizierung von Schädlingen liefert.

In den letzten Jahren wurden automatisierte Insektenfallen entwickelt, die auf diesen Technologien basieren. Der Einsatz von Deep Learning und maschinellem Lernen steigert die Genauigkeit der Schädlingsdetektion und erleichtert den Umgang mit Herausforderungen wie begrenzten Datenmengen. Diese Fallen nutzen verschiedene Sensoren (z. B. für Ton und Licht), Kameras und Kommunikationssysteme, um Insektenarten präzise zu erkennen und zu zählen. Pheromonfallen werden häufig zur Optimierung der Fangrate und Identifikation eingesetzt, während Wetterdaten helfen, Vorhersagemodelle für Schädlingspopulationen zu verbessern. Die Hardware umfasst robuste Gehäuse, Kommunikationsmodule und Sensoren, während die Software für Datenspeicherung und -analyse verantwortlich ist. Eine wichtige Funktion ist die Integration von Smartphones, die Echtzeit-Benachrichtigungen über Schädlingspopulationen ermöglichen und den Wartungsaufwand reduzieren (Passis et al., 2024). Diese technologischen Fortschritte optimieren die Schädlingsüberwachung, indem sie die Datenerfassung automatisieren, eine präzisere Identifikation einzelner Arten ermöglichen und Fehlalarme minimieren (Preti et al., 2021).

Häufig werden verschiedene Fallenarten wie Delta-, Trichter- und McPhail-Fallen verwendet, die jeweils für unterschiedliche Schädlingsarten konzipiert sind. Kamerabasierte und sensorbasierte Systeme sind die beiden Hauptmethoden der Schädlingsdetektion, wobei jedes System seine eigenen spezifischen Vorteile bietet. Kamerabasierte Fallen ermöglichen eine visuelle Bestätigung/Zählung und präzise Identifizierung von Schädlingen, was sie zu einem wertvollen Werkzeug im gezielten Schädlingsmanagement macht. Allerdings bringen sie Herausforderungen wie hohe Anschaffungskosten und den Aufwand für die Verarbeitung großer Datenmengen mit sich (Passis et al., 2024).

In verschiedenen Studien wurden bemerkenswerte Klassifikationsgenauigkeiten erzielt. So erreichte das DenseNet169-Modell eine Genauigkeit von 88,8 % (Pattnaik et al., 2020), während GoogLeNet bei einem Datensatz mit zehn verschiedenen Schädlingen eine Genauigkeit von 98 % erreichte (Li et al., 2020). Weitere Modelle wie das Ensemble von CNNs von Ayan et al. (2020) erzielten eine Klassifikationsgenauigkeit von 98,8 %, und Khanramaki et al. (2020) erreichten sogar 99 %. Der Einsatz von YOLO-Modellen zur Echtzeit-Überwachung in Feldtests zeigte ebenfalls vielversprechende Ergebnisse, wie die Forschung von Bjerger et al. (2023). Ein automatisiertes System zur Überwachung von Motten und anderen Insekten wurde von Bjerger et al. (2021) entwickelt, das eine Lichtfalle, ein Computer Vision-Modul und Deep Learning nutzt, um Mottenarten in Echtzeit zu erkennen und zu zählen. Die Lichtfalle ist allerdings nicht für Zwecke der Überwachung von Schadinsekten gedacht, sondern vielmehr für nichttödliche Untersuchungen der Biodiversität. Die Lichtfalle besteht aus einer Kamera und speziellen Lichtquellen, die Insekten anziehen, während ein Deep-Learning-Algorithmus, basierend auf einem konvolutionalen neuronalen Netzwerk, die Schmetterlinge klassifiziert,

wobei das Netzwerk einen hohen Validierungs-F1-Score von 0,93 erreichte. Der Algorithmus ermittelte einen durchschnittlichen Klassifikations- und Tracking-F1-Score von 0,71 sowie eine Tracking-Detektionsrate von 0,79. Liu et al. (2022) entwickelten für die Baumwoll-Kapseleule (*Helicoverpa armigera*), eine nicht benannte Bohrer motte und den Asiatischen Baumwollwurm (*Spodoptera litura*) ein kamerabasiertes Überwachungs- und Vorhersagesystem auf Basis des ResNet v2-Modells. Bei verschiedenen Experimenten mit Fotos aus dem Labor bzw. aus einem Baumwollfeld konnten sie Genauigkeiten von 84,6 % bzw. 85,7 % erreichen.

Ein weiteres auf maschineller Bildverarbeitung basierendes Überwachungsgerät wurde von Chen et al. (2023) für den Herbst-Heerwurm (*Spodoptera frugiperda*) entwickelt. Die Schädlingsbilder wurden in Echtzeit erfasst und mit einem MATLAB-Algorithmus verarbeitet. Die Ergebnisse der automatischen Zählung zeigten eine Zählgenauigkeit von 94,10 %. Das Gerät bietet den Vorteil eines geringen Energieverbrauchs bei gleichzeitig hoher Erkennungsgenauigkeit, sodass Echtzeitinformationen über *S. frugiperda* erlangt werden können.

Ein Plug-in-System für Delta Pheromonfallen zur Überwachung des Apfelwicklers (*Cydia pomonella*) wurde von Schrader et al. (2022) entwickelt und getestet. Es besteht aus einem RGB-Bildsensor, Mikrocontroller und Hardware für niedrigen Energieverbrauch. Das System erfasst regelmäßig Bilder und speichert sie auf einer microSD-Karte. In einem Feldversuch zur Überwachung der Apfelwicklerpopulation lieferte es zuverlässige Ergebnisse bei minimalem Stromverbrauch. Die Kosten betragen etwa 33 US-Dollar pro Einheit. Ein weiteres Plug-In-System zur Datenverarbeitung, wurde von Suto (2022) vorgestellt. Es nutzt ein Raspberry Pi Zero W-Board zur Bildaufnahme und -analyse in Verbindung mit einem LoRa-Modul. Diese Kombination ermöglicht es, die Anzahl der erkannten Objekte drahtlos zu übertragen, wodurch eine effiziente Fernkommunikation und -überwachung ermöglicht wird. Mit dieser Lösung wird eine kostengünstige und effektive Methode für die Verarbeitung und Übermittlung von Bilddaten in Echtzeit bereitgestellt.

Neben der Vielzahl an Systemen, die Bilderkennungstechniken nutzen, gibt es einige wenige optoelektronische Systeme, die vor allem auf der Infrarottechnik basieren. So entwickelten Iraklis et al. (2021) die „e-funnel“ Falle. Diese basiert auf herkömmlichen Trichterfallen und ist mit optischen (Infrarot) Zählern ausgestattet. Die Falle bildet ein Netzwerk basierend auf dem LoRa-Protokoll, das Daten wie die Anzahl an Insekten, GPS-Standorte und Temperaturen an einen Cloud-Server überträgt. In ihrer Studie wurde die Population der Tomatenminiermotte (*Tuta absoluta*) überwacht, in der die Falle eine Genauigkeit von 84 % erreichte. Welsh et al. (2022) realisierten einen optoelektronischen Sensor, der an Delta-Fallen angepasst ist, um die Flügelschlagfrequenzen von Schmetterlingen zu erkennen und diese Daten drahtlos in Echtzeit zu übermitteln. Kombiniert mit maschinellen Lernalgorithmen ermöglicht dieses System eine automatisierte Artenbestimmung und frühzeitige Erkennung von Schmetterlingen. Tests haben gezeigt, dass Schmetterlinge bereits vor dem visuellen Fang erfasst werden können.

In einer Studie von Tóth et al. (2020) wird ein neues automatisiertes Gerät („ZooLog KLP“) vorgestellt, das den Westlichen Maiswurzelbohrer (*Diabrotica virgifera*) durch Fangelemente und einen opto-elektronischen Sensor erkennt. Das Gerät zeichnet die Fangzeit auf und überträgt die Daten an eine Web-Oberfläche. In Tests zeigte es eine hohe Genauigkeit von 95,84 % bei der Erkennung. Das System basiert auf der CSALOMON KLP Falle. Der Sensorbereich des von Ballas et al. (2020) entwickelten und in dieser Studie genutzten Infrarotsensorrings enthält 16 Infrarotsensoren, die in zwei Reihen angeordnet sind, um eine bessere Abdeckung des Erfassungsbereichs zu gewährleisten. Den gleichen Sensorring nutzen Flórián et al. (2023) in ihrer Studie eines Prototyps („ZooLog VARL“) für die automatisierte Erkennung von Schmetterlingen. Auch hier basiert der Prototyp auf einer Falle der Firma CSALOMON, der VARL-Trichterfalle. Getestet wurde die Falle für sechs Schmetterlingsarten: Saateule (*Agrotis segetum*), Gammaeule (*Autographa gamma*), Baumwoll-Kapseleule (*Helicoverpa armigera*), Roskastanienminiermotte (*Cameraria ohridella*), Pflaumenwickler (*Grapholita funebrana*) und Pfirsichtriebwickler (*Grapholita molesta*). Eine Untersuchung bewertete die Präzision und Genauigkeit der Datenfilterung mit einem künstlichen neuronalen Netzwerk sowie die Erkennungsgenauigkeit. Der Prototyp besteht aus einer Trichterfalle, einem Sensorring und einem System zur Datenkommunikation. Eine wesentliche Neuerung der Falle war ein Ausblasmechanismus, der das Entweichen fliegender Insekten verhinderte. Die Genauigkeit des künstlichen Netzwerkes lag stets über 60 %, bei Arten mit größeren Körpergrößen erreichte sie bis zu 90 %. Die durchschnittliche Erkennungsgenauigkeit lag zwischen 84 % und 92 %.

Die automatische Erfassung und Überwachung von Insektenschädlingen durch moderne Fallen stellt einen innovativen Ansatz im integrierten Schädlingsmanagement dar. Besonders Systeme mit Bildverarbeitung und neuronalen Netzwerken haben sich als vielversprechend erwiesen (Cardim Ferreira Lima et al., 2020). Sie ermöglichen eine präzise, vollautomatische Klassifizierung von Insektenordnungen sowie deren Zählung. Während Fallen mit Infrarotsensoren effektiv zur Quantifizierung von Insektenpopulationen eingesetzt werden, sind sie in der Artbestimmung eingeschränkt. Diese Technologien tragen dazu bei, den Einsatz von IPM-Strategien zu optimieren, indem sie eine kontinuierliche Datenerfassung ermöglichen. Die gesammelten Informationen sind nicht nur für die Analyse der Populationsdynamik wertvoll, sondern können – in Kombination mit Klimadaten – in Entscheidungsunterstützungssysteme integriert werden. Dadurch lassen sich Echtzeitprognosen zum Schädlingsbefall erstellen, die eine gezieltere und effizientere Bekämpfung ermöglichen.

4. Veröffentlichungen

Maßnahme	Links (jeweils zuletzt aufgerufen am 11.02.2025)
Projektbezogene Webseite NW-FVA	https://www.nw-fva.de/forschen/projekte/pherubs
Projektbezogene Webseite IFF	https://www.holzlogistik.iff.fraunhofer.de/de/forschungsprojekte/dimotrap.html
Projektvorstellung im Rahmen des Waldklimafondskongresses	https://www.waldklimafondskongress.de/posteraustellung/waldschadensmanagement
Projektvorstellung im Rahmen des FNR Statusseminar in Kassel	https://www.youtube.com/watch?v=DJs5tNp3nlo https://veranstaltungen.fnr.de/fileadmin/Projekte/2022/RT_Digitalisierung/Statusseminar/PherUbs.pdf
Poster- und Vortragspräsentation im Rahmen der Tagung Ressource Holz	https://www.holzlogistik.iff.fraunhofer.de/content/dam/iff/holzlogistik/de/dokumente/DiMoTrap_Robert_Fritz.pdf
Posterpräsentation auf der Deutschen Pflanzenschutztagung Göttingen	https://www.openagrar.de/receive/openagrar_mods_00091276
Veröffentlichung Projektvideo im Format „Forschung erklärt“	https://www.youtube.com/watch?v=giml0s_cwXM
Statusseminar der FNR, Onlineseminar FNR in der Reihe „Digitalisierung Forst und Holz	https://veranstaltungen.fnr.de/fileadmin/Projekte/2022/RT_Digitalisierung/Seminarreihe/9_Waldschutz/3_DiMoTrap.pdf
Abschlusspräsentation am Runden Tisch Digitalisierung der FNR	https://www.youtube.com/watch?v=UkgK-0RLPQY https://veranstaltungen.fnr.de/fileadmin/Projekte/2022/RT_Digitalisierung/Statusseminar/2024_online/1_DiMoTrap_Pla %C5 %A1il.pdf
Pressemitteilung der Fraunhofer-Gesellschaft zum Projekt DiMoTrap	https://www.fraunhofer.de/de/presse/presseinformationen/2024/oktober-2024/automatisierte-pheromonfalle-fuer-forstschaedliche-schmetterlinge.html

Eine ausführliche Gesamtübersicht aller Maßnahmen, die aufgrund der engen Vernetzung der Arbeiten der Projektpartner vielfach gemeinsam vorbereitet und umgesetzt wurden, sind den Ausführungen im Abschnitt zu **AP7** dieses Berichtes zu entnehmen.

ANHANG

Teilvorhaben 2220WK38A4 - Anforderungsdefinition und Durchführung von Labor- und Freilandtests

1. Ziel und Gegenstand des Teilvorhabens

Unter den bestehenden Klimaveränderungen können sich Schadinsekten im Wald massiv vermehren und enorme Zerstörungen verursachen. Die Überwachung von Forstschädlingen ist daher wichtig, um ihre Reproduktion zu kontrollieren und Waldflächen vor größeren Schäden zu schützen. Eine der effektivsten Methoden dazu ist die Insektenüberwachung mittels Pheromonfallen. Die dazu bisher verwendeten traditionellen Fallensysteme für die Überwachung waldschutzrelevanter Schmetterlingsarten sind in mehrerlei Hinsicht unzulänglich und sollen mit dem Vorhaben modernisiert werden.

Das Ziel des Forschungsvorhabens ist es, "digitale" Fallensysteme zu entwickeln, die auf modularen Komponenten zur (1) gezielten, artspezifischen Abgabe von Pheromonen bzw. Lockstoffen an die Umwelt, (2) Detektion und Zählung der Fänge bzw. Zielorganismen, (3) Daten-(vor-)verarbeitung und automatisierten Datenweitergabe an zuständige Stellen zur Auswertung sowie auf (4) Komponenten zur Energieversorgung der Systeme im Freiland basieren.

Im Fokus der Entwicklung der Fallensysteme stehen ausgewählte Schmetterlingsarten, die zu den häufigsten Schaderregern in den Kiefern- und Eichenbeständen zählen. Als Modellinsekten sind Schwammspinner (*Lymantria dispar*) und Forleule (*Panolis flammea*) vorgesehen.

Im Rahmen des Teilvorhabens werden vom Fraunhofer IFF aufbauend auf einer Anforderungsanalyse die Basiskomponenten der neuartigen Fallensysteme zum Fang von Schmetterlingen technisch definiert. Darauf aufbauend erfolgt die technische Konzeption modularer Komponenten und deren Umsetzung in Funktionsmuster. Nach Abschluss von Tests und Anpassungen an ausgewählten Modellinsekten werden Einzelkomponenten zum Versuchsmuster „Automatisierte Falle“ zusammengeführt.

2. Bearbeitete Arbeitspakete

AP 1 – Anforderungsanalyse für automatisierte Fangsysteme

Ziel des AP ist die Erstellung eines konkreten Anforderungskatalogs für ein breit einsetzbares automatisiertes Fallensystem. Mit Hilfe einer umfangreichen Analyse aller Ausgangs- und Randbedingungen, insbesondere aus Anwendersicht, werden quantifizierte Parameter als Voraussetzung für die Systementwicklung zusammengefasst. Die Beschreibung erfolgt in Form eines Anforderungskatalogs (sog. Lastenheft). Im Rahmen dieses AP sind folgende Aufgaben vorgesehen:

- Ermittlung der Ausgangsbedingungen,
- Präzisierung der Anforderungen an einzelne Komponenten und das Gesamtsystem
- Priorisierung der Zielstellungen mit Fokus auf Falter-Schädling,
- Definition von Anwendungsszenarien,
- Überarbeitung und Anpassung des Anforderungskatalogs in Abhängigkeit von Erkenntnissen aus anderen AP.

Aufgabe der NW-FVA ist in diesem AP in enger Zusammenarbeit mit dem Fraunhofer IFF die Bearbeitung der genannten Aufgaben aus forstfachlicher Sicht. Die NW-FVA formuliert die spezifischen Anforderungen der forstwissenschaftlichen Zielstellungen und die Erfordernisse der forstpraktischen Anwendung, legt forstliche Rahmenbedingungen für die Versuchsplanung und gemeinsam mit dem Fraunhofer IFF geeignete Messgrößen und Indikatoren zur Erfolgsbewertung einzelner Versuchsaufbauten fest.

AP 2 – Konzeptentwicklung, Priorisierung von Umsetzungsvarianten und Komponentenauswahl sowie Versuchsplanung

Im Rahmen von AP 2 werden für die ermittelten Anforderungen technische Umsetzungsvarianten ermittelt und auf Realisierbarkeit geprüft. Auswahl und Festlegung geeigneter, möglicherweise bereits verfügbarer technischer Module, deren Weiterentwicklung oder Anpassung sowie die Kombination und technische Abstimmung der Bauteile zueinander werden definiert. Der priorisierte Anforderungskatalog für die Teilsysteme soll so beschaffen sein, dass er als Grundlage die Entwicklung breit verwendbarer Fangsysteme mit verschiedenen Lockstoffen ermöglicht.

Im Rahmen dieses AP sind folgende Aufgaben vorgesehen:

- Technische Konzeptentwicklung,
- Priorisierung von Umsetzungsvarianten und Komponentenauswahl,
- Aufwand-Nutzen-Vergleich für Umsetzungsvarianten sowie
- Festlegung von Versuchsflächen für Freilandprüfungen und Versuchsplanung (Festlegung von Indikatoren zur Messung und Erfolgsbewertung).

Aufgabe der NW-FVA ist es, in diesem AP technische Entwicklungsvarianten forstfachlich zu begleiten, ausgewählte Umsetzungsvarianten und die getroffene Komponentenauswahl hinsichtlich ihrer Praxis-tauglichkeit zu priorisieren sowie gemäß den in AP 1 formulierten Anforderungen geeignete Versuchsflächen bereitzustellen.

AP 3 – Entwicklung von Funktionsmustern zur Untersuchung der Lösungsansätze in Laborversuchen

Ziel des AP ist die Überprüfung der Lösungsansätze aus der Konzeptionsphase. Einzelne Teilkomponenten und Lösungsmethoden werden in Versuchsaufbauten überprüft und technische Parameter ermittelt. Daraus resultiert eine Abschätzung der Erreichbarkeit der angestrebten Projektziele. Die Laborversuche werden mit ersten Freilandversuchen verbunden, sofern die erforderlichen Testumgebungen im Labor nicht zur Verfügung stehen. Die Konzeption der Einzelkomponenten und des zu entwickelnden Funktionsmusters wird anhand der Erkenntnisse aus den Laborversuchen angepasst.

Im Rahmen dieses AP sind folgende Aufgaben vorgesehen:

- Bau von Funktionsmustern für die Einzelkomponenten
- Konzeption von Testumgebungen
- Laboruntersuchung der Teilanforderungen
- Erste Freilandprüfungen für einzelne Systemkomponenten
- Erfolgskontrollen und Optimierungen
- Anpassung des Systemkonzepts

Die Aufgaben der NW-FVA beinhalten in diesem AP die wissenschaftliche Begleitung und Evaluation der erarbeiteten Lösungsansätze, die Konzeption und Bereitstellung modulspezifischer Testumgebungen im Labor und im Freiland, die Durchführung von Laboruntersuchungen zu in AP 1 formulierten Teilanforderungen sowie die Identifikation des Optimierungspotentials der zu untersuchenden Teilmodule anhand von Erfolgskontrollen.

AP 4 – Zusammenführung zum Versuchsmuster „Automatische Falle“

Ziel des AP ist die Zusammenführung aller Versuchsmuster und Funktionalitäten der einzelnen Komponenten zu einem Versuchsmuster der digitalen Falle. Der Aufbau erfolgt modular, so dass leichte Anpassungen an die unterschiedlichen Anforderungen realisiert werden können, die sich aus den Zielstellungen des Vorhabens ableiten (z. B. Bandbreite der Schädlinge). Schaffung der Voraussetzungen für einen kontinuierlichen autonomen Versuchsbetrieb.

Im Rahmen dieses AP sind folgende Aufgaben vorgesehen:

- Lösungsauswahl und Konzeption des Versuchsmusters
- Bau von für die Tests ausreichend robusten Komponenten
- Technische Zusammenführung der Komponenten zum Versuchsmuster „Automatisierte Falle“
- Testkonzept
- Inbetriebnahme des Funktionsmusters (Parametereinstellung, Kalibrierung, ...)
- Technische Funktionstests des komplexen Aufbaus

Die Aufgaben der NW-FVA beinhalten in diesem AP in Zusammenarbeit mit dem Fraunhofer IFF die Lösungsauswahl aus Sicht der forstwissenschaftlichen Zielstellungen und der Erfordernisse der forstpraktischen Anwendung sowie die Erstellung des Testkonzepts, die Vorbereitung und die Begleitung der Durchführung technischer Funktionstests.

AP 5 – Erprobung und Evaluierung der „Automatischen Falle“

Ziel von AP 5 ist die Überprüfung des Versuchsmusters „Automatisierte Falle“ unter Labor- und Feldbedingungen und die Anpassung der Komponenten an die praktischen Erfordernisse. Eine Methodik zur Nutzung des Systems unter Einhaltung der Zielparameter wird auf der Basis von Versuchen entwickelt. In Versuchen werden Einsatzdaten des „Automatisierten Fallensystems“ ermittelt und mit den technischen und anwendungsbezogenen Zielstellungen abgeglichen. Referenzwerte liefern u. a. konventionelle Fallen in typischen bzw. den Testbedingungen entsprechenden Überwachungssituationen.

Im Rahmen dieses AP sind folgende Aufgaben vorgesehen:

- Konzeption von Testszenarien und Prüfbedingungen
- Erprobung unter praxisnahen Bedingungen
- Erhebung von Betriebsdaten, Überprüfen der Bedienbarkeit in der forstlichen Praxis
- Freilandprüfungen
- Ergebnisauswertung und Parametervergleich
- Systemanpassung und Systemoptimierungen

Die Aufgaben der NW-FVA umfassen in diesem AP wiederum die forstwissenschaftliche und forstpraktische Konzeption der Testszenarien und Prüfbedingungen, die Erhebung von Referenzwerten und die Durchführung von Freilandprüfungen sowie Arbeiten der forstbezogenen Ergebnisauswertung und Vorschläge für Systemanpassungen. Die Arbeiten werden in enger Abstimmung und in iterativen Prozessen gemeinsam mit dem Fraunhofer IFF durchgeführt.

AP 6 – Erfolgskontrolle, Dokumentation und Ausblick

AP 6 umfasst die laufende Dokumentation der Projektergebnisse und den Vergleich des Ist-Standes mit den Zielstellungen. Die Versuchsaufbauten, die Vorgehensweise, erreichte Parameterwerte und Bewertungskriterien werden dokumentiert. Auf der Basis der erzielten Ergebnisse werden ein Ausblick auf mögliche neue Forschungsschwerpunkte gegeben und Möglichkeiten für die Umsetzung der Ergebnisse in die forstliche Praxis aufgezeigt.

Ein wichtiger und integraler Bestandteil von AP 6 ist die Einbeziehung von Fallenherstellern bzw. -anbietern in das Projekt, um Weiterentwicklungen und eine spätere Markteinführung entsprechender Lösungen zu unterstützen. Hierzu werden nach Vorliegen erster gesicherter Erkenntnisse zu Aufbau und Zusammenwirken der ausgewählten Komponenten sowie aus den Funktionstests im Feld ein bis zwei Praxisworkshops mit entsprechenden Herstellern bzw. Anbietern durchgeführt. Zielstellungen dieser Workshops sind einerseits die Vorstellung und Information der Hersteller bzw. Anbieter über Ziele und Fortgang der Entwicklungen und andererseits die frühzeitige Einbeziehung interessierter Unternehmen in die an das Projekt anschließenden Phasen der Prototypenentwicklung sowie der Etablierung auf dem Markt. Im Rahmen der Workshops sollen u. a. Chancen und Risiken der beteiligten Unternehmen hinsichtlich digitaler Fallensysteme ermittelt werden.

Im Rahmen dieses AP sind folgende Aufgaben vorgesehen:

- Dokumentation von Versuchsaufbauten und -mustern
- Beschreibung der experimentellen Erprobung
- Beschreibung von Messvorschriften und Methoden
- Vergleich des Arbeitsstandes mit den Zielstellungen
- Aufzeigen des zukünftigen Entwicklungsbedarfes, Einbeziehung von potenziellen Fallenherstellern bzw. -anbietern mittels Workshops
- Beschreibung erforderlicher Schritte zur Umsetzung in die forstliche Praxis (Marktreife)

Die NW-FVA bearbeitet die o. g. Aufgaben aus forstwissenschaftlicher und forstpraktischer Sicht und führt die Ergebnisse gemeinsam mit dem Fraunhofer IFF zusammen.

AP 7 – Projektmanagement und Öffentlichkeitsarbeit

Ziel von AP 7 ist die Sicherstellung eines reibungslosen Projektablaufes. Hierbei müssen sowohl die Arbeiten verschiedener Fachexperten innerhalb der beteiligten Forschungseinrichtungen als auch die Zusammenarbeit zwischen beiden Einrichtungen im Sinne des Projektfortschritts und -erfolgs kontinuierlich aufeinander abgestimmt werden. Ergänzend umfasst dieser Arbeitsschwerpunkt Maßnahmen zur Öffentlichkeitsarbeit und zum Transfer der Projektergebnisse.

Im Rahmen dieses AP sind folgende Aufgaben vorgesehen:

- Berichtswesen
- Change-Management
- Koordination der Einzelaktivitäten

Erfolgskontrollen sowie Maßnahmen der Öffentlichkeitsarbeit (Präsentationen, Veröffentlichung von (Zwischen-)Ergebnissen/Aufgaben) der NW-FVA liegen in der termingerechten Bereitstellung der Projektberichte, der Koordinierung interner und externer Arbeitsaktivitäten und -fortschritte, der Anpassung von Projekthinhalten an aktuelle forstfachliche und methodische Rahmenbedingungen sowie der Durchführung von Maßnahmen der Öffentlichkeitsarbeit (Internetauftritt, Präsentationen, Veröffentlichungen).

3. Wesentliche Ergebnisse des Teilvorhabens

Zu AP 1: Anforderungsanalyse für automatisierte Fangsysteme:

Während der Projektlaufzeit arbeitete die NW-FVA eng mit dem Fraunhofer IFF zusammen, um die Zielstellungen mit Fokus auf das Falterstadium der betrachteten forstschädlichen Schmetterlingsarten zu priorisieren. Auf Basis des „Priorisierten Anforderungskatalogs“ aus Meilenstein M1 wurden die technischen Anforderungen kontinuierlich überarbeitet und unter Berücksichtigung der Erkenntnisse aus Labor- und Feldversuchen angepasst. Diese Änderungen flossen direkt in den Katalog ein. Die durchgeführten Arbeiten zeigten, dass die Entwicklung des integrierten Versuchsmusters weitere Feldversuche erforderlich machte.

Zu Beginn wurden verschiedene technische Ansätze und Komponenten für die definierten Kernfunktionen der Falle (Locken, Zählen, Datenerfassung und -übertragung sowie Energieversorgung) gesammelt, ohne Optionen auszuschließen – auch abwegig erscheinende Konzepte wurden erfasst. In der nächsten Phase evaluierten die Projektpartner gemeinsam die Anforderungen im Zusammenhang mit den vorliegenden technologischen Möglichkeiten. Auf dieser Basis wurden bestimmte Ansätze für weitere Untersuchungen ausgewählt oder ausgeschlossen und die Anforderungen präzisiert.

Die Arbeiten in dieser Phase konzentrierten sich auf die zentralen technischen Funktionen der automatisierten Falle: (1) Pheromonabgabe, (2) Zählen der Fänge mittels Sensorik, (3) Energieversorgung, (4) Datenübertragung und (5) Abtötung von Schadinsekten.

Detaillierte Ergebnisse der Arbeitsschritte „Ermittlung der Ausgangsbedingungen“ und „Präzisierung der Anforderungen“ sind im gemeinsamen Berichtsteil beider Partner dokumentiert.

Gegen Ende des Berichtszeitraums 2023 konnten wiederholt auftretende Funktionsstörungen der Infrarot-Lichtschrankensignale unter Laborbedingungen reproduziert und behoben werden. Im Anschluss wurden weitere Verfahren zur Umsetzung der automatisierten Falle untersucht, einschließlich Versuchen zur „Abtötung von Schadinsekten“. Während die NW-FVA elektrische Verfahren prüfte, lag der Fokus vom Fraunhofer IFF auf mechanischen Verfahren und Lasertechnologie. Da anfängliche Ergebnisse keinen Lösungsvorschlag lieferten, wurden weitere Diskussionen mit externen Experten geführt. Es zeigte sich, dass das sofortige Abtöten der Zielorganismen nicht erforderlich war. Vielmehr war das Hauptziel eine regelmäßige Entleerung der Falle, um Verwesungsgerüche und Überfüllung zu vermeiden, wobei lebende Nichtzielorganismen die Falle lebend wieder verlassen sollten.

Durch mehrere Iterationen der Modulentwicklungen wurden im Meilenstein M2 die wichtigsten Erkenntnisse im „Angepassten Anforderungskatalog“ zusammengefasst. Es stellte sich jedoch heraus, dass die Überarbeitung der Anforderungen nicht mit nur zwei Iterationen abgeschlossen werden konnte. Auch nach Erreichen von M2 waren weiterhin Anpassungen, Tests und Überarbeitungen notwendig, um die Anforderungen im „Priorisierten Anforderungskatalog“ weiter zu präzisieren. Die Szenarien für die Anwendung der automatisierten Falle und die Versuchsaufbauten wurden im Arbeitsschwerpunkt 1 in enger Abstimmung mit dem Fraunhofer IFF festgelegt. Die NW-FVA definierte die Versuchszeiträume und Zielorganismen, während das Fraunhofer IFF die technischen Zielsetzungen vorgab.

Im Verlauf des Projekts war die NW-FVA in verschiedenen Bereichen aktiv: Sie erweiterte die Auswahl der forstschädlichen Schmetterlingsarten, die im Projekt untersucht bzw. getestet wurden, und übernahm die Auswahl, Organisation sowie Betreuung der Labor-, Semifreiland- und Freilandversuche für die Zielarten Forleule, Schwammspinner, Nonne, Kleiner Frostspanner und Weißgrauer Breitflügelspanner. Zudem war sie für die Planung, Durchführung und Auswertung der Labor-, Semifreiland- und Freilandversuche verantwortlich und dokumentierte die Ergebnisse. Des Weiteren fiel die Koordination der Entwicklungsarbeiten in Abstimmung mit der Verfügbarkeit von Modellorganismen in den Aufgabenbereich der NW-FVA. Die Präsentation der Projektergebnisse auf Tagungen, sowohl in Form von Postern als auch von Vorträgen, gehörte ebenfalls zu den Aufgaben der NW-FVA (vgl. AP 7).

Zu AP 2 – Konzeptentwicklung, Priorisierung von Umsetzungsvarianten und Komponentenauswahl sowie Versuchsplanung:

Die Entwicklung technischer Umsetzungsvarianten basiert auf den Anforderungen, die im Arbeitspaket 1 („Anforderungsanalyse für automatisierte Fangsysteme“) für das Gesamtsystem „digitale Pheromonfalle“ und dessen Komponenten formuliert wurden. Zu Beginn sowie im Laufe des Projektzeitraumes wurden seitens der NW-FVA Literaturrecherchen durchgeführt und den Projektpartnern zur Verfügung gestellt, um aktuelle wissenschaftliche Entwicklungen in die Projektarbeit einfließen zu lassen. Im Rahmen dieser Literaturrecherche wurde der Fokus auf verschiedene forstfachliche Themen gelegt, die direkt oder indirekt mit dem Projekt in Verbindung standen. Dabei wurden bekannte Ansätze und Erkenntnisse zu den Biologien und Morphologien der Schmetterlingsarten Schwammspinner, Forleule, Nonne und Kiefernspinner sowie zur Überwachung dieser Arten mit Pheromonfallen untersucht. Auch die biochemischen Grundlagen der Insektenpheromone und deren Synthese wurden betrachtet. Weitere Themen umfassten die

Pheromonkommunikation der Schmetterlinge, relevante Versuchsanordnungen bei der Arbeit mit Pheromonfallen und die Entwicklung automatisierter Systeme. Zudem wurden Patente zu Mechanismen der Pheromonabgabe sowie Informationen zu den biologischen Merkmalen der Zielarten recherchiert. Nach der Festlegung und Abstimmung dieser Anforderungen durch die Projektpartner prüfte die NW-FVA die vom Fraunhofer IFF konstruierten Versuchsmuster, welche die zentralen Fallenfunktionen – Pheromonabgabe, Zählung der Fänge mittels Sensorik und Energieversorgung – abdeckten. Diese Muster wurden in modulspezifischen Labor-, Semifreiland- und Freilandversuchen getestet. Die gewonnenen Erkenntnisse aus den Versuchen im Jahr 2022 führten zur Identifikation biologischer, technischer und organisatorischer Optimierungsmöglichkeiten, die in die weiteren Untersuchungen einfließen. Dies ermöglichte eine gezielte Anpassung an die Flugaktivitäten der Modellspezies, die Einbindung zusätzlicher relevanter Arten im Herbst und Winter sowie die Bereitstellung von Zuchttieren außerhalb der Sommermonate.

Die Versuchsmuster wurden kontinuierlich anhand neuer Testergebnisse evaluiert, um relevante Erkenntnisse in den „Angepassten Anforderungskatalog“ zu überführen. Neben der Betreuung biologischer Untersuchungen trug die NW-FVA wesentlich zum Verständnis des Verhaltens der Zielspezies bei, was eine erfolgreiche Entwicklung der Fallenfunktionen unterstützte. Technische Herausforderungen in den Freilandversuchen wurden in enger Zusammenarbeit mit dem Fraunhofer IFF meist zeitnah gelöst. Details zu Planung, Durchführung und Auswertung der Freilandversuche sind in den Arbeitspaketen 3, 5 und 6 des gemeinsamen Berichtsteils dokumentiert. Die NW-FVA erstellte detaillierte Versuchspläne, führte Protokolle und stellte diese den Projektpartnern zeitnah zur Verfügung.

Die technische Umsetzung der Pheromonabgabe wurde in zwei Varianten entwickelt: ein automatisierter Köderwechselmechanismus für Feststoff-Pheromonköder und eine Mikropumpe für die Abgabe eines Pheromon-Lösungsmittel-Gemischs. Eine zunächst priorisierte Umsetzung mittels Blisterverpackungen wurde aufgrund technischer Herausforderungen, insbesondere der klebrigen Eigenschaften der Köder und des hohen mechanischen Aufwands für die sichere Freisetzung, zurückgestellt. Weitere Untersuchungen sollen klären, ob eine robuste und einfache Mechanik entwickelt werden kann, die bestehende Konservierungsmethoden beibehält.

Die Sensorik zur Fangzählung wurde im Projektverlauf ebenfalls optimiert. Erste Entwürfe und Erkenntnisse aus Versuchen führten zu kontinuierlichen Anpassungen bei den Funktionsmustern. Aufgrund von Lieferengpässen bei elektronischen Bauteilen mussten häufig alternative Komponenten verwendet werden, was zusätzlichen konzeptionellen Aufwand erforderte.

Für die Energieversorgung wurden zwei Varianten untersucht: ein Akkumulator ohne zusätzlichen Energieerzeuger und ein Akkumulator mit Photovoltaikmodul. Zur Bestimmung der Solarleistung im Wald wurde zunächst ein Konzept entwickelt, bei dem ein Solarpanel einen Akkumulator über einen Laderegler speiste, während ein Datenlogger den Ladevorgang protokollierte. Aufgrund technischer Schwierigkeiten mit den geplanten elektronischen Komponenten wurde dieses Konzept verworfen und überarbeitet.

Parallel wurden die Gehäusekomponenten und formgebenden Bauteile der Falle entsprechend neuer und angepasster Anforderungen überarbeitet und mithilfe aufwendiger 3D-Druckverfahren gefertigt. Erfahrungen aus den Feldversuchen der NW-FVA flossen in konstruktive Anpassungen ein, insbesondere zur Verbesserung der Robustheit und Handhabung. Beispielsweise wurde festgelegt, dass die Akkus direkt am Fallenkörper platziert werden sollten.

Funktionen wie das automatisierte Entleeren der Falle im laufenden Betrieb sowie die Datenfernübertragung wurden nicht priorisiert, jedoch erste konzeptionelle Entwürfe und virtuelle Funktionsmuster erstellt. Gemeinsam mit den Partnern des Fraunhofer IFF wurden Anforderungen für ein zukünftiges Auswurfsystem definiert. Dabei standen Aspekte wie die Fluchtmöglichkeit für Nichtzielspezies und das Entfernen verendeter Zielspezies im Fokus. In allen Versuchsteilen wurde die Funktionalität der technischen Anordnung kontinuierlich überwacht und hinsichtlich potenzieller Schwachstellen sowie externer Einflüsse (Witterung, Verschmutzung, Wildtiere, Vandalismus) optimiert. Detaillierte Versuchspläne der NW-FVA legten regelmäßige Kontrollen der Freilandversuche fest, einschließlich Dokumentation der Aufbauten, Ziele, Umsetzungen und Ergebnisse. Protokolle der Flächenbegehungen sowie eine chronologische Fotodokumentation dienten als Grundlage für spätere Erfolgskontrollen.

Zusammenfassend wurden im Projektverlauf zentrale Funktionen der digitalen Pheromonfalle umfassend getestet, optimiert und weiterentwickelt. Besondere Schwerpunkte lagen auf der Validierung der Zähl-ergebnisse, der Optimierung des Energieverbrauchs sowie der Verbesserung der Steuerungs- und Übertragungsmodule. Wiederholte Tests und gezielte Anpassungen führten zur Stabilisierung der Funktionalität und erhöhten die Effizienz des Gesamtsystems.

Zu AP 3 – Entwicklung von Funktionsmustern zur Untersuchung der Lösungsansätze in Laborversuchen:

Die Entwicklung der technischen Umsetzungsvarianten stützte sich auf die in AP 1 „Anforderungsanalyse für automatisierte Fangsysteme“ dargelegten Anforderungen an das Gesamtsystem „digitale Pheromonfalle“ sowie deren Einzelkomponenten. Nach der Vorstellung und Diskussion wesentlicher Anforderungen entwickelte das Fraunhofer IFF konkrete Lösungsvorschläge für zentrale Fallenfunktionen, wie die Pheromonabgabe, die sensorische Fangerfassung und die Energieversorgung. Diese Konzepte wurden in gemeinsamen Online- und Präsenzterminen der Projektpartner diskutiert, analysiert und im Hinblick auf ihre Tauglichkeit unter Freilandbedingungen sowie bezüglich offener Fragestellungen abgestimmt.

Durch das Fraunhofer IFF ausgewählte technische Ansätze wurden mit der NW-FVA theoretisch evaluiert und weiter präzisiert. Vor dem technischen Entwurf wurden offene Fragen zwischen den Projektpartnern diskutiert, technische sowie forstfachliche Aspekte berücksichtigt und, wenn möglich, ohne die Durchführung von Feldversuchen geklärt. Wichtige Fragestellungen wurden fortlaufend dokumentiert, sodass sie im weiteren Verlauf des Projekts nachvollziehbar blieben.

Die Entwicklung der modularen Komponenten für die digitale Falle begann bereits 2021 mit der Konzeption erster Einzelkomponenten. Im Laufe des Projekts wurden passende technische Komponenten ausgewählt, beschafft und in mehreren iterativen Schritten weiterentwickelt. Aufgrund von Engpässen bei der Beschaffung, bedingt durch die Corona-Pandemie und nachfolgende geopolitische Ereignisse, kam es jedoch zu Verzögerungen und Einschränkungen bei der Flexibilität der Auswahl. Ab 2022 wurden die Versuchs- und Funktionsmuster für Tests unter Freiland-, Semifreiland- und Laborbedingungen weiterentwickelt und umgesetzt. Dies beinhaltete die schrittweise Konzipierung und Verfeinerung zusätzlicher Komponenten, wobei jede neue Entwicklungsstufe auf detaillierteren und teils überarbeiteten Konzepten basierte. Jeder Versuch wurde sorgfältig geplant und in enger Abstimmung durch die Projektpartner durchgeführt, um die bestmöglichen Ergebnisse zu erzielen.

Ab 2022 und bis zum Projektende wurden die ausgewählten Versuchs- und Funktionsmuster für Tests im Freiland, Semifreiland oder unter Laborbedingungen gebaut. Dabei wurden schrittweise zusätzliche Einzelkomponenten entwickelt, aufgebaut und in iterativen Entwicklungsschritten auf Grundlage detaillierterer und teils überarbeiteter Konzepte verbessert (vgl. AP 2). Jeder der im Gesamtbericht beschriebenen Versuche basierte auf einer zeitlichen und inhaltlichen Versuchsplanung, der Abstimmung der Versuchsflächen und Versuchsabläufe sowie der Gestaltung der Testumgebungen. Diese Prozesse wurden während des gesamten Projekts in enger Zusammenarbeit der Projektpartner abgestimmt, erstellt und dokumentiert. Während der Entwicklung der modularen Komponenten für die digitale Falle wurden bei der Erstellung der Versuchsmuster unterschiedliche Ansätze berücksichtigt und teilweise parallel verfolgt. Die Muster wurden unter verschiedenen Bedingungen und an unterschiedlichen Versuchsstandorten entsprechend der Versuchsplanung eingesetzt. Besonders im Feldeinsatz wurden verschiedene Kombinationen der Komponenten getestet. Die Versuche zielten einerseits auf technische Erkenntnisse zur Funktionalität und dem Zusammenspiel der Komponenten, andererseits auf mögliche Einflüsse auf die Fangergebnisse im Monitoring.

In den Berichtsjahren 2023/2024 wurde die Entwicklung funktioneller Fallenmodule fortgesetzt. Aufbauend auf detaillierteren und überarbeiteten Konzeptionen der Einzelkomponenten, die die Pheromonabgabe mittels Mikropumpe, die sensorische Zählung der Fänge und die Energieversorgung betrafen, erfolgte eine kontinuierliche Überarbeitung und Umsetzung der Versuchs- und Funktionsmuster. Neu eingeführte Komponenten, wie die Mikropumpe zur Pheromonabgabe, und weitere Zählmodule wurden in der 3. Entwicklungsstufe integriert, während die Steuerung der Falle und die zugehörige Software weiter ausgebaut wurden. Die enge zeitliche Abfolge der Versuche sowie die kontinuierliche Anpassung und Weiterentwicklung der Versuchsmuster stellten eine Herausforderung dar, da viele Bauteile, wie Gehäuseteile und Fallenkomponenten, nicht mehrfach verwendet werden konnten. Pheromonbelastungen in den Materialien könnten störende Effekte erzeugen, die die Versuche beeinträchtigen. Daher war es notwendig, die einzelnen Komponenten nach jedem Versuch zu überarbeiten und die Versuchsmuster entsprechend neu aufzubauen.

Die Versuchsdurchführung an verschiedenen Standorten unter variierenden Bedingungen erfolgte im gesamten Projektverlauf durch die NW-FVA, die während der Versuche den Betrieb der Fallensysteme kontrollierte und überwachte sowie umfangreiche Daten und Informationen zu den Versuchsaufbauten und bezüglich der eingesetzten Komponenten in enger Zusammenarbeit mit den Partnern des Fraunhofer IFF erhob. Die Auswertung der Versuche wurde von den Partnern gemeinsam vorgenommen. Schlussfolgerungen aus den Versuchen wurden gemeinsam gezogen und Ableitungen für die Weiterentwicklungen getroffen. Diese flossen in die nächsten Testmuster und Versuchsplanungen ein. Für Änderungen, die den Umgang mit den Fallensystemen oder der Software betreffen, wurden Anleitungen in Text- und Bildform von den Projektpartnern des Fraunhofer IFF erstellt und zur Verfügung gestellt. Während des Feldeinsatzes wurden unterschiedliche Kombinationen der Komponenten getestet, wobei die Tests sowohl die technische Funktionalität als auch mögliche Auswirkungen auf die Fangergebnisse im Monitoring untersuchten.

An der Umsetzung modularer Komponenten für die digitale Falle wurde im gesamten Projektverlauf bis zum Ende des Vorhabens festgehalten. Gespräche mit externen Experten, Praktikern und Demonstrationen des integrierten Gesamtsystems bestätigten, dass der Ansatz eines modular aufgebauten Systems den Praxisanforderungen für einen späteren Einsatz entspricht.

Die ständige Weiterentwicklung der Komponenten und die Durchführung von Tests in verschiedenen Umgebungen führten zu wertvollen Erkenntnissen, die in die nächsten Phasen der Entwicklung und Testplanung einfließen. Die Versuche wurden fortlaufend ausgewertet und die Schlussfolgerungen gemeinsam mit der NW-FVA für die Weiterentwicklung und Optimierung der digitalen Falle genutzt.

Eine ausführliche Beschreibung der technischen Aufbauten, der umgesetzten Varianten einzelner Komponenten, der Versuchszeiträume sowie der in verschiedenen Versuchsszenarien gewonnenen Erkenntnisse ist den Ausführungen zu AP 3 im gemeinsamen Berichtsteil des Abschlussberichtes zum Projekt zu entnehmen.

Zu AP 4 – Zusammenführung zum Versuchsmuster „Automatische Falle“

Im Mittelpunkt standen insbesondere Überarbeitungen der technischen Komponenten auf Basis der in den zahlreichen durchgeführten Versuchen und Tests gewonnenen Erkenntnisse. Diese schlossen Fehlersuchen und -behebungen, Funktionsverbesserungen sowie Überarbeitungen am Aufbau und Gehäusekomponenten und die Weiterentwicklung an der Steuerung der Falle ein.

Die Vorbereitung der Zusammenführung der modular konzipierten Einzelkomponenten der automatisierten Fallen (Locken, Zählen, Energieversorgung) begann bereits im Jahr 2022 und wurde im weiteren Verlauf des Vorhabens kontinuierlich begleitend zu den Versuchsdurchführungen und Anpassungsarbeiten fortgesetzt. Hierzu wurden einzelne Komponenten in verschiedenen Varianten und Stückzahlen aufgebaut und in vordefinierten Versuchsreihen erprobt. Es erfolgten gezielte Auswertungen der Versuche (vgl. AP 5). So wurden neben der naturwissenschaftlichen bzw. waldschutzbezogenen Auswertung der gewonnenen Erkenntnisse auch technische Aspekte ermittelt, die Veränderungs- und/oder Verbesserungsbedarf hinsichtlich der Komponenten aufzeigten. Sowohl funktionale als auch einsatzbedingte (z. B. Umwelt, Umfeld, Bedienung) Auffälligkeiten wurden ermittelt und im Projektteam ausgewertet. Die Erkenntnisse dieser Arbeiten flossen sowohl in Überprüfungen der Anforderungsdefinitionen als auch in die technische Überarbeitung und die Priorisierung von Umsetzungsvarianten ein.

Im Jahr 2023 wurden zunächst folgende teil- und später vollintegrierte Versuchsaufbauten durch das Fraunhofer IFF aufgebaut und durch die NW-FVA in Labor-, Semifreiland- und Freilandversuchen erprobt:

- In der 3. Entwicklungsstufe wurden Funktionsmuster mit Pheromonabgabemodulen und Zählmodulen der 2. Entwicklungsstufe entwickelt. Drei Versuchsmuster wurden als integrierte Fallensysteme realisiert, bei denen die Pheromonabgabe und der Zählmechanismus zentral durch einen Mikrocomputer gesteuert und mit Strom versorgt wurden.
- Für die Versuche wurden drei integrierte Muster vorbereitet: eines mit Pheromonfalle und Mikropumpe sowie zwei mit „Zählautomatik“.
- In einem weiteren Versuch wurden vier integrierte Muster entwickelt, darunter ein zusätzliches Muster mit Flüssigheromonabgabe über Mikropumpe. Eines dieser Muster beinhaltete eine 3-Ebenen-Lichtschanke zur Zählung und eine autarke Energieversorgung durch ein Solarpanel. Andere Muster setzten auf Festkörpheromon und verschiedene Zählmechanismen (2x2-Ebenen und 1x3-Ebenen-Lichtschrannen). Alle Muster verfügten über zentrale Steuerungssoftware und Schnittstellen zur Auswertung der Fangergebnisse sowie zur Konfiguration der Fallen.
- Zwei weitere Versuchsmuster wurden entwickelt, wobei der Fokus auf den Zählkomponenten und der Erweiterung der zentralen Steuerung lag. Eines der Muster integrierte eine autarke Energieversorgung mit einem 30-Watt-Solarpanel und einem LiFePo-Akku in ein neues Gehäusedesign.

Im Jahr 2024 wurden die integrierten Versuchsmuster mit Fokus auf die Optimierung der Lichtschrannen der Zählkomponenten durch die Partner des Fraunhofer IFF weiterentwickelt. Ziel war die Stabilisierung der Zählergebnisse und die Behebung auftretender Probleme im Freiland. Dafür wurden elektronische und mechanische Anpassungen vorgenommen. Zudem wurde der Algorithmus zur Auswertung der Lichtschrannenereignisse verbessert, um Doppelzählungen zu vermeiden und das Flugverhalten der Falter genauer zu analysieren. Weitere Aufbauten und Versuche dienten der Vorbereitung eines abschließenden Langzeitversuchs integrierter Versuchsmuster der digitalen Falle im Sommer 2024. Hierfür wurden 5 vollintegrierte Versuchsmuster, die mit einer Festkörpheromonabgabe, einer 2-Ebenen-Zählkomponente, einer Energieversorgung mit Akku und Solarpanel sowie einer Datenschnittstelle zum Auslesen der Zählergebnisse und einer integrierten Steuerung ausgestattet wurden, aufgebaut.

Während der durchgeführten Feldversuche wurden bei auftretenden technischen Funktionsstörungen Anpassungen, wenn möglich, direkt vor Ort ausgeführt. Waren aufwendigere elektronische oder konstruktive Arbeiten notwendig, so wurden die Geräte im Einzelfall aus den Versuchen entfernt, von den Mitarbeitern des

Fraunhofer IFF instandgesetzt und wieder ausgebracht. Durch die NW-FVA wurden weiterhin kontinuierlich naturwissenschaftliche und biologische Aspekte ermittelt, die Veränderungs- und/oder Verbesserungsbedarf hinsichtlich der Einzelkomponenten aufzeigten. Sowohl funktionale als auch einsatzbedingte (z. B. Umwelt, Umfeld, Bedienung) Auffälligkeiten wurden ermittelt und im Projektteam ausgewertet. Die Erkenntnisse dieser Arbeiten flossen sowohl in Überprüfungen der Anforderungsdefinitionen als auch in die sinnvolle Umsetzung technischer Überarbeitungen im Rahmen der durchgeführten Versuche ein.

Obwohl sich alle untersuchten Schmetterlingsarten während der Projektlaufzeit in einer Latenzphase befanden, reichten die Fangzahlen im Freiland vollkommen aus, um die wesentlichen Funktionen des Fallensystems im Freiland zu prüfen. Die NW-FVA hat alle Erkenntnisse aus den durchgeführten Praxisversuchen zeitnah aufbereitet, den Projektpartnern zur Verfügung gestellt und in Hinsicht auf weitere Anpassungspotenziale, teils unter Hinzuziehen zusätzlicher Expertise, mit dem Fraunhofer IFF diskutiert. Während der Versuche wurden dabei vielfach bilaterale Absprachen und/oder Vor-Ort-Termine durchgeführt, um die auftretenden Hemmnisse zeitnah zu identifizieren und möglichst auszuräumen.

Zu AP 5 – Erprobung und Evaluierung der „Automatischen Falle“

Die Arbeiten an diesem AP begannen bereits im Jahr 2022, wobei zunächst noch kein integriertes Versuchsmuster verschiedener Fallenkomponenten erprobt und getestet werden konnte. Vielmehr wurden die für eine Integration in ein gemeinsames Funktionsmuster vorgesehenen Einzelkomponenten individuell in den Versuchen erprobt, um grundlegende Aussagen für weiter zu verfolgende Entwicklungsstränge zu gewinnen. Die ersten, unterschiedlichen Versuche im Jahr 2022 dienten daher der Auswahl der für die nächsten Entwicklungsschritte weiter zu priorisierenden Umsetzungsvarianten und der Gewinnung relevanter Erkenntnisse zum Einsatz unter Realbedingungen.

Im Jahr 2023 wurden verschiedene Versuchsmuster entwickelt, die zunächst einzelne Komponenten der Falle kombinierten (teilintegrierte Muster), welche in Feldtests erprobt wurden. Danach wurden vollintegrierte Versuchsmuster erstellt, die die Komponenten Pheromonabgabe, Zählen, Steuerung und Energieversorgung in einem System vereinten. Aufgrund der Pheromonbelastung einzelner Komponenten, die bei artfremden Spezies unerwünschte Nebenwirkungen (repellente Wirkung) verursachen konnten, mussten Gehäuseteile neu angefertigt oder komplette Umbauten der Versuchsmuster durchgeführt werden.

Die zentrale Funktion der Zählung in die Falle eindringender Zielorganismen im Projektjahr 2023 konnte für den Einsatz im Freiland nicht abschließend bewertet werden, da die digital ermittelten Zählraten häufig inkonsistent und damit nur sehr eingeschränkt vergleichbar mit den manuell erfolgten Auszählungen waren. Gegen Ende des Berichtszeitraums 2023 wurden die Ursachen für die häufig auftretenden Systemstörungen identifiziert. Durch Anpassungen in der technischen Auslegung konnte das Problem durch die Partner des Fraunhofer IFF erfolgreich gelöst werden. Erste konstruktive und softwareseitige Korrekturarbeiten wurden zeitnah umgesetzt und im Frühjahr 2024 evaluiert. Die Projektpartner hatten sich darauf verständigt, dass die Arbeiten des Projektjahres 2024 die Verbesserung der Zählfunktion des Fallensystems in den Fokus stellen. Im Rahmen von AP 5 lag der Schwerpunkt auf der Vorbereitung und Durchführung eines abschließenden Langzeitversuchs mit integrierten Versuchsmustern der digitalen Falle im Sommer 2024, nachdem verschiedene vorbereitende Tests und Versuche durchgeführt wurden. Fünf vollintegrierte Versuchsmuster wurden mit einer Festköder-Pheromonabgabe und einer Zählkomponente mit 2-Ebenen-Lichtschranke ausgestattet. Die Energieversorgung erfolgte durch einen Akku mit Solarpanel, und das System wurde durch eine integrierte Steuerung betrieben. Eine Datenschnittstelle ermöglichte das Auslesen der Zählergebnisse. Vier der Versuchsmuster wurden für etwa 3 Monate im Freiland getestet, während eines als Reserve diente. Der Langzeitversuch im Freiland wurde erfolgreich abgeschlossen und die Ergebnisse sind im Abschlussbericht dokumentiert.

Ein häufig auftretender Fehler der digitalen Fallen lag in der Erkennung des Speichermediums. Hierdurch konnten Daten teilweise nicht erhoben bzw. ausgelesen werden. Während der Fallenkontrollen ließ sich das Problem durch Entfernen und Wiedereinsetzen der SD-Speicherkarte in den meisten Fällen beheben. Mögliche Ursachen wurden im Zusammenhang mit den im Freiland auftretenden Umweltbedingungen vermutet, konnten im Einzelfall jedoch nicht eindeutig identifiziert werden.

Aus Sicht der NW-FVA bot die Auswahl der in der Projektlaufzeit festgelegten Versuchsflächen für alle Zielarten gute Voraussetzungen zur Evaluierung des automatisierten Pheromonfallensystems im Freiland. Die in Vergleichsfällen ermittelten Fangzahlen der Zielorganismen belegten ausreichende Populationsgrößen, um eine ausreichende Anzahl an Versuchstieren in Feldtests zu gewährleisten. Die Funktionsmuster der grundlegenden technischen Komponenten der Falle – gezieltes Anlocken, Fangen, Zählen, der automatisierte Wechsel von Pheromonködern sowie die autarke Energieversorgung – wurden erfolgreich entwickelt, in ein Gesamtsystem integriert und der grundsätzliche Funktionsnachweis wurde durch erste Praxisversuche erbracht.

Zu AP 6 – Erfolgskontrolle, Dokumentation und Ausblick

Im Verlauf des Projekts wurden die verschiedenen Versuchsaufbauten und -muster detailliert dokumentiert und beschrieben. Gleichzeitig erfolgte eine gründliche Auswertung der durchgeführten Versuche, bei der technische, handhabungsseitige und forstfachliche Perspektiven berücksichtigt wurden. Diese Auswertungen, die gemeinsam mit den Projektpartnern durchgeführt wurden, führten zu wichtigen Erkenntnissen, die als Grundlage für die nächsten Arbeitsschritte dienten. Besondere Aufmerksamkeit galt der praktischen Anwendbarkeit der entwickelten Systeme und deren Optimierung auf Basis von direkten Rückmeldungen aus den Versuchen. Weitere Informationen zu den Konzepten, den Komponenten der Versuchsaufbauten sowie den Ergebnissen der technischen Versuche finden sich in den Abschnitten AP 2 bis AP 5 des Schlussberichts.

Die Bewertung der Entwicklungsergebnisse wurde kontinuierlich während des gesamten Projektzeitraums durchgeführt und begleitete sämtliche Versuche. Dabei wurden die gesammelten Praxiserfahrungen gemeinsam analysiert und systematisch aufbereitet (siehe Abschnitt zu AP 6 im Schlussbericht). Dieser kontinuierliche Prozess trug maßgeblich dazu bei, dass die entwickelten Lösungen immer weiter verbessert und an die sich ergebenden Herausforderungen angepasst werden konnten.

Im Anschluss werden im AP 6 konkrete Handlungsempfehlungen für die Weiterentwicklung der Pheromonfalle zu einem Prototyp präsentiert. Diese wurden von den beiden Projektpartnern in enger Abstimmung erarbeitet. Dabei wurde besonders auf die Praxistauglichkeit und die langfristige Funktionalität geachtet, um den Anforderungen des Marktes und der Nutzer gerecht zu werden. Zudem wurden Maßnahmen zur späteren Markteinführung definiert, die neben technischen Aspekten auch die Marktfähigkeit und die potenzielle Zielgruppe berücksichtigten. Wichtige Impulse für diese Schritte kamen unter anderem aus Gesprächen mit Experten der LWF in Bayern, aus Expertenworkshops, Messeauftritten sowie bilateralen Gesprächen mit potenziellen Herstellern, Vertriebspartnern und Nutzern. Diese vielfältigen Rückmeldungen aus der Praxis halfen nicht nur, das Produkt weiter zu verbessern, sondern gaben auch wertvolle Hinweise zu einer an das Forschungs- und Entwicklungsprojekt anschließenden Vermarktung und zur gezielten Ansprache von relevanten Zielgruppen. Dabei werden identifizierte Handlungsbedarfe, die Priorisierung notwendiger Folgeaktivitäten sowie eine Einschätzung des zeitlichen Rahmens für die weiteren Entwicklungsschritte hin zu marktfähigen Lösungen im Kapitel 2 „Verwertung“ des gemeinsamen Berichtsteils beider Projektpartner ausführlich dargestellt.

Zu AP 7 – Projektmanagement und Öffentlichkeitsarbeit

Die gemeinsam von der NW-FVA und den Kolleginnen und Kollegen des Fraunhofer IFF durchgeführten Arbeiten in diesem Arbeitspaket hatten das Ziel, einen reibungslosen Ablauf des Projekts und die Bekanntmachung der Ergebnisse zu gewährleisten. Es wurde sichergestellt, dass die Tätigkeiten der Beteiligten beider Forschungseinrichtungen gut miteinander abgestimmt wurden. Besonders im Fokus stand die enge Zusammenarbeit der Partner, um den Fortschritt und Erfolg des Projekts zu fördern. Darüber hinaus wurden auch Maßnahmen zur Öffentlichkeitsarbeit und zum Transfer der Projektergebnisse umgesetzt. Eine Auswahl wesentlicher Maßnahmen wird im Folgenden vorgestellt. Eine ausführliche Gesamtübersicht aller Maßnahmen, die aufgrund der engen Vernetzung der Arbeiten der Projektpartner vielfach gemeinsam vorbereitet und umgesetzt wurden, ist dem gemeinsamen Abschlussbericht in AP 7 zu entnehmen.

In Abstimmung aller Partner wurde eine Kooperationsvereinbarung zum Projekt erstellt, die zwischen den Partnern abgestimmt wurde. Die Unterzeichnung erfolgte am 21.07.2021.

Am 03.08.2021 wurde die Auftaktveranstaltung (Kick-off-Meeting) in den Räumlichkeiten der NW-FVA in Göttingen unter Anwesenheit von Mitarbeitenden beider Partnerinstitutionen durchgeführt. Das Verbundvorhaben wurde vor dem Hintergrund der etablierten Dauerüberwachung der wichtigsten Forstschädlinge bei der NW-FVA in das Arbeitsfeld Waldschutz eingeordnet. Im Rahmen des Treffens wurden die wesentlichen Projekthinhalte, Zuständigkeiten, Zielsetzungen und Hintergründe des Vorhabens besprochen und festgelegt.

Für den Datenaustausch innerhalb des Projektes richtete das Fraunhofer IFF im Folgenden einen Server zum Datenaustausch (DMS) ein und wies die Projektpartner in deren Nutzung ein. Die webbasiert erreichbare Plattform zum Datenaustausch auf gesicherten Servern der Fraunhofer-Gesellschaft enthält einen Arbeitsbereich, in dem Dokumente und Materialien für und von den Partnern abgelegt werden können.

Monatliche Jour-Fixe-Termine dienten zur kontinuierlichen Abstimmung der Arbeiten im Projekt, in denen die aktuellen Arbeitsstände, Feldversuche und Arbeiten an den Fallenkomponenten abgestimmt wurden. Die Treffen der Projektmitarbeitenden beider Partner fanden im Wesentlichen als Online-Meetings statt. Diese Treffen der Projektpartner ergänzend wurden neben einzelnen Präsenztreffen und bei den Versuchsflächen verschiedene bilaterale Abstimmungen durchgeführt.

Ergänzt wurden die fachlichen und administrativen Abstimmungen beider Partner durch zahlreiche Maßnahmen der Öffentlichkeitsarbeit.

Zur Unterstützung der projektbezogenen Öffentlichkeitsarbeit wurde bereits zu Projektbeginn eine Projektwebseite auf den Seiten der NW-FVA freigeschaltet. Diese ist unter <https://www.nw-fva.de/forschen/projekte/pherubs> erreichbar.

Des Weiteren wurde in Vorbereitung weiterer öffentlichkeitswirksamer Maßnahmen vom Fraunhofer IFF für das Projekt-CI ein Projektlogo entworfen und mit den Partnern abgestimmt.

Ziel der im gesamten Projektverlauf durchgeführten Maßnahmen der Öffentlichkeitsarbeit war es, Fachpublikum über die Arbeiten zu informieren und einen fachlichen Austausch zu den technischen Entwicklungen zu führen. Beispielhaft werden im Folgenden ausgewählte Aktivitäten und Ergebnisse vorgestellt.

- 31.3. bis 2.4.2022: Präsentation des Projekts DiMoTrap im Rahmen der 6. KWF-Thementage in Jessen / Sachsen-Anhalt an einem gemeinsamen Ausstellungsstand mit dem Landesforstbetrieb Sachsen-Anhalt. (Material: Projektflyer DiMoTrap)
- 11. bis 12.10.2022, Göttingen: Posterpräsentation "Überwachung von Schadinsekten mittels automatisierter Pheromonfallen" im Rahmen des Waldklimafondskongresses (<https://www.waldklimafondskongress.de>). Das Poster ist als Online-Publikation zur Session: „Waldschadensmanagement - Forstschutz und Kalamitätsbewältigung“ unter <https://www.waldklimafondskongress.de/posteraustellung/waldschadensmanagement> veröffentlicht. Diese Posterpräsentation ergänzend wurde seitens des Fraunhofer IFF in der Workshop-Session "Waldschadensmanagement" ein Kurzvortrag zum Thema "Entwicklung automatisierter Pheromonfallen für die laufende Überwachung von forstschädlichen Schmetterlingsarten" gehalten.
- 18. bis 19.04.2023 Tagung Ressource Holz (Poster, Vortrag und Demonstration),
- 07. bis 08.08.2023 Workshop Projekt PherUbS / DiMoTrap (Vortrag und Freilanddemonstration),
- 11. bis 13.09.2023 Forstwissenschaftliche Tagung Dresden (Vortrag).
- 26. bis 29.09.2023 Posterpräsentation auf der Deutsche Pflanzenschutztagung
- 13.06.2024: Vortrag zum Projekt DiMoTrap: "Überwachung von Schadinsekten mittels automatisierter Pheromonfallen" im 9. Seminar Onlineseminar FNR in der Reihe „Digitalisierung Forst und Holz“ - Schädlingsmonitoring, Detektion von Sturmschäden und deren Bewältigung (https://veranstaltungen.fnr.de/fileadmin/Projekte/2022/RT_Digitalisierung/Seminarreihe/9_Waldschutz/3_DiMoTrap.pdf)
- Juni 2024: Präsentation des Vorhabens im Rahmen der KWF-Tagung. Auf dem Stand der NW-FVA wurden ein gemeinsam erstelltes Poster sowie ein vom Fraunhofer IFF vorbereitetes Rollup präsentiert. Auch auf dem Gemeinschaftsstand der forstlichen Landesbetriebe Sachsen-Anhalts mit dem Fraunhofer IFF wurde auf das Projekt DiMoTrap mittels dieser Materialien hingewiesen.
- 2024: Erstellung eines Projektvideos durch das Fraunhofer IFF für die Rubrik „Forschung erklärt“, welches unter https://www.youtube.com/watch?v=giml0s_cwXM veröffentlicht ist.
- 21. und 22.10.2024: Öffentliche Abschlusspräsentation (online) zum Projekt im Rahmen des FNR-Statusseminars „Digitalisierung Forst und Holz“ (Aufzeichnung abrufbar unter <https://www.youtube.com/watch?v=UkgK-0RLPQY> und der Vortrag unter https://veranstaltungen.fnr.de/fileadmin/Projekte/2022/RT_Digitalisierung/Statusseminar/2024_online/1_DiMoTrap_Pla%C5%A1il.pdf)
- 22.10.2024 Projektpräsentation im Rahmen der Dienstberatung mit den Waldschutzbeauftragten Sachsen-Anhalts.

Teilvorhaben 2220WK38B4 - Konzeption und Versuchsmusteraufbau

1. Ziel und Gegenstand des Teilvorhabens

Unter den bestehenden Klimaveränderungen können sich Schadinsekten im Wald massiv vermehren und enorme Zerstörungen verursachen. Die Überwachung von Forstschädlingen ist daher wichtig, um ihre Reproduktion zu kontrollieren und Waldflächen vor größeren Schäden zu schützen. Eine der effektivsten Methoden dazu ist die Insektenüberwachung mittels Pheromonfallen. Die dazu bisher verwendeten traditionellen Fallensysteme für die Überwachung waldschutzrelevanter Schmetterlingsarten sind in mehrerlei Hinsicht unzulänglich und sollen mit dem Vorhaben modernisiert werden.

Das Ziel des Forschungsvorhabens ist es, "automatisierte" Fallensysteme zu entwickeln, die auf modularen Komponenten zur (1) gezielten, artspezifischen Abgabe von Pheromonen bzw. Lockstoffen an die Umwelt, (2) Detektion und Zählung der Fänge bzw. Zielorganismen, (3) Daten-(vor-)verarbeitung und automatisierten Datenweitergabe an zuständige Stellen zur Auswertung sowie auf (4) Komponenten zur Energieversorgung der Systeme im Freiland basieren.

Im Fokus der Entwicklung von Fallensystemen stehen dabei ausgewählte Schmetterlingsarten, die zu den häufigsten Schaderregern in den Kiefern- und Eichenbeständen zählen. Als Modellinsekten sind Schwammspinner (*Lymantria dispar*) und Forleule (*Panolis flammea*) vorgesehen.

Im Rahmen des Teilvorhabens werden vom Fraunhofer IFF aufbauend auf einer Anforderungsanalyse die Basiskomponenten der neuartigen Fallensysteme zum Fang von Schmetterlingen technisch definiert. Darauf aufbauend erfolgt die technische Konzeption modularer Komponenten und deren Umsetzung in Funktionsmuster. Nach Abschluss von Tests und Anpassungen an ausgewählten Modellinsekten werden Einzelkomponenten zum Versuchsmuster „Automatische Falle“ zusammengeführt.

2. Bearbeitete Arbeitspakete

Unter Berücksichtigung der vorgenannten Abgrenzungen war im Projekt eine geeignete Gesamtkonfiguration für eine automatisierte Pheromonfalle für ausgewählte Schmetterlingsarten unter Berücksichtigung multikriterieller Ziele zu erarbeiten. Die Zusammenführung einzelner, für einen spezifischen Anwendungsfall (Schadinsekt bzw. Schädlingsklasse) anpassbarer Komponenten zu einem Gesamtsystem und dessen Erprobung in der Fläche war damit Inhalt des Projektes. Als grundsätzlich erforderlich für neuartige Fangsysteme wurde die Entwicklung der folgenden vier Module zum Aufbau einer Automatisierungslösung definiert:

- Komponenten zur Abgabe der Pheromone bzw. Lockstoffe an die Umwelt,
- Komponenten zur automatisierten Detektion und Zählung der Fänge,
- Komponenten zur Daten-(vor-)verarbeitung und mobilen Datenübertragung für die Auswertung sowie
- Komponenten zur Energieversorgung der Systeme im Freiland.

Die Anforderungen an die genannten Module waren im ersten Schritt durch Anforderungsanalyse mit weitgehend universeller Zielsetzung in Bezug auf Zielobjekte zu beschreiben, im Anschluss daran in einem zweiten Schritt jedoch spezifisch auf Falter als Schadinsekten anzupassen, zu definieren und zu konzipieren. Das darauf aufbauend zu erstellende, angepasste Gesamtsystem (Versuchsmuster) sollte unter Feldbedingungen erprobt und getestet werden.

Die Umsetzung erfolgte gegliedert in sieben Arbeitspakete, deren Inhalte werden im Folgenden beschrieben.

AP 1 – Anforderungsanalyse für automatisierte Fangsysteme

Ziel des AP ist ein konkreter Anforderungskatalog für ein breit einsetzbares automatisiertes Fallensystem. Mit Hilfe einer umfangreichen Analyse aller Ausgangs- und Randbedingungen, insbesondere aus Anwendersicht, werden quantifizierte Parameter als Voraussetzung für die Systementwicklung zusammengefasst. Die Beschreibung erfolgt in Form eines Anforderungskatalogs (sog. Lastenheft). Im Rahmen dieses AP sind folgende Aufgaben vorgesehen:

- Ermittlung der Ausgangsbedingungen,
- Präzisierung der Anforderungen an einzelne Komponenten und das Gesamtsystem
- Priorisierung der Zielstellungen mit Fokus auf Falter-Schädling,
- Definition von Anwendungsszenarien,
- Überarbeitung und Anpassung des Anforderungskatalogs in Abhängigkeit von Erkenntnissen aus anderen AP.

Aufgabe des Fraunhofer IFF ist in diesem AP in enger Zusammenarbeit mit der NW-FVA die Bearbeitung der genannten Aufgaben aus technischer Sicht.

AP 2 – Konzeptentwicklung, Priorisierung von Umsetzungsvarianten und Komponentenauswahl sowie Versuchsplanung

Im Rahmen von AP 2 werden für die ermittelten Anforderungen technische Umsetzungsvarianten ermittelt und auf Realisierbarkeit geprüft. Auswahl und Festlegung geeigneter, möglicherweise bereits verfügbarer technischer Module, deren Weiterentwicklung oder Anpassung sowie die Kombination und technische Abstimmung der Bauteile zueinander werden definiert. Der priorisierte Anforderungskatalog für die Teilsysteme soll so beschaffen sein, dass er als Grundlage die Entwicklung breit verwendbarer Fangsysteme mit verschiedenen Lockstoffen ermöglicht.

Im Rahmen dieses AP sind folgende Aufgaben vorgesehen:

- Technische Konzeptentwicklung,
- Priorisierung von Umsetzungsvarianten und Komponentenauswahl,
- Aufwand-Nutzen-Vergleich für Umsetzungsvarianten sowie
- Festlegung von Versuchsflächen für Freilandprüfungen und Versuchsplanung (Festlegung von Indikatoren zur Messung und Erfolgsbewertung).

Aufgabe des IFF ist in diesem AP die technische Konzeptentwicklung sowie in Zusammenarbeit mit der NW-FVA die Priorisierung und Auswahl von Umsetzungsvarianten. Dies schließt ein, auf Grundlage der in AP1 festgelegten Anforderungen an ein digitales Fallensystem technische Lösungsvarianten zu erarbeiten, diese in enger Abstimmung mit der NW-FVA auf die spezifischen Anforderungen der forstwissenschaftlichen Zielstellungen und auf die Erfordernisse der forstpraktischen Anwendung anzupassen, technische Rahmenbedingungen für die Versuchsplanung festzulegen sowie ebenfalls in Abstimmung mit der NW-FVA geeignete Messgrößen und Indikatoren zur Erfolgsbewertung einzelner Versuchsaufbauten festzulegen.

AP 3 – Entwicklung von Funktionsmustern zur Untersuchung der Lösungsansätze in Laborversuchen

Ziel des AP ist die Überprüfung der Lösungsansätze aus der Konzeptionsphase. Einzelne Teilkomponenten und Lösungsmethoden werden in Versuchsaufbauten überprüft und technische Parameter ermittelt. Daraus resultiert eine Abschätzung der Erreichbarkeit der angestrebten Projektziele. Die Laborversuche werden mit ersten Freilandversuchen verbunden, sofern die erforderliche Testumgebung im Labor nicht zur Verfügung steht. Die Konzeption der Einzelkomponenten und des zu entwickelnden Funktionsmusters wird anhand der Erkenntnisse aus den Laborversuchen angepasst.

Im Rahmen dieses AP sind folgende Aufgaben vorgesehen:

- Bau von Funktionsmustern für die Einzelkomponenten
- Konzeption von Testumgebungen
- Laboruntersuchung der Teilanforderungen
- Erste Freilandprüfungen für einzelne Systemkomponenten
- Erfolgskontrollen und Optimierungen
- Anpassung des Systemkonzepts

Aufgabe des IFF in diesem AP ist die Entwicklung funktioneller Fallenmodule auf Grundlage der in AP1 festgelegten Anforderungen an ein digitales Fallensystem, die konstruktive Bereitstellung von Funktionsmustern zur Untersuchung in Laborversuchen sowie die Anpassung technischer Lösungsvarianten anhand der in Labor- und/oder Freilandversuchen erzielten Ergebnisse.

AP 4 – Zusammenführung zum Versuchsmuster „Automatische Falle“

Ziel des AP ist die Zusammenführung aller Versuchsmuster und Funktionalitäten der einzelnen Komponenten zu einem Versuchsmuster der digitalen Falle. Der Aufbau erfolgt modular, so dass leichte Anpassungen an die unterschiedlichen Anforderungen realisiert werden können, die sich aus den Zielstellungen des Vorhabens ableiten (z. B. Bandbreite der Schädlinge). Schaffung der Voraussetzungen für einen kontinuierlichen autonomen Versuchsbetrieb.

Im Rahmen dieses AP sind folgende Aufgaben vorgesehen:

- Lösungsauswahl und Konzeption des Versuchsmusters
- Bau von für die Tests ausreichend robusten Komponenten
- Technische Zusammenführung der Komponenten zum Versuchsmuster „Automatische Falle“
- Testkonzept
- Inbetriebnahme des Funktionsmusters (Parametereinstellung, Kalibrierung, ...)

- Technische Funktionstests des komplexen Aufbaus

Aufgabe des Fraunhofer IFF ist in diesem AP in enger Zusammenarbeit mit der NW-FVA die Bearbeitung der genannten Aufgaben aus technischer Sicht. Diese beinhalten in enger Abstimmung mit der NW-FVA die Lösungsauswahl und Konzeption aus technischer Sicht, den Aufbau des Versuchsmusters sowie die Erstellung des Testkonzepts und die Durchführung technischer Funktionstests.

AP 5 – Erprobung und Evaluierung der „Automatischen Falle“

Ziel von AP 5 ist die Überprüfung des Versuchsmusters „Automatische Falle“ unter Labor- und Feldbedingungen und die Anpassung der Komponenten an die praktischen Erfordernisse. Eine Methodik zur Nutzung des Systems unter Einhaltung der Zielparameter wird auf der Basis von Versuchen entwickelt. In Versuchen werden Einsatzdaten des „Automatischen Fallensystems“ ermittelt und mit den technischen und anwendungsbezogenen Zielstellungen abgeglichen. Referenzwerte liefern u. a. konventionelle Fallen in typischen bzw. den Testbedingungen entsprechenden Überwachungssituationen.

Im Rahmen dieses AP sind folgende Aufgaben vorgesehen:

- Konzeption von Testszenarien und Prüfbedingungen
- Erprobung unter praxisnahen Bedingungen
- Erhebung von Betriebsdaten, Überprüfen der Bedienbarkeit in der forstlichen Praxis
- Freilandprüfungen
- Ergebnisauswertung und Parametervergleich
- Systemanpassung und Systemoptimierungen

Das IFF bearbeitet in diesem AP wiederum schwerpunktmäßig die genannten Aufgaben aus Sicht der technischen Anforderungen und Umsetzungen. Hierzu zählen die Unterstützung der Testkonzeption, die Erhebung von Betriebsdaten, die Bereitstellung und die Durchführung von Freilandprüfungen sowie Arbeiten der technischen Ergebnisauswertung und Vorschläge für Systemanpassungen. Die Arbeiten werden in enger Abstimmung und in iterativen Prozessen gemeinsam mit der NW-FVA durchgeführt.

AP 6 – Erfolgskontrolle, Dokumentation und Ausblick

AP 6 umfasst die laufende Dokumentation der Projektergebnisse und den Vergleich des Ist-Standes mit den Zielstellungen. Die Versuchsaufbauten, die Vorgehensweise, die erreichte Parameterwerte und die Bewertungskriterien werden dokumentiert. Auf der Basis der erzielten Ergebnisse werden ein Ausblick auf mögliche neue Forschungsschwerpunkte gegeben und Möglichkeiten für die Umsetzung der Ergebnisse in die forstliche Praxis aufgezeigt.

Ein wichtiger und integraler Bestandteil von AP 6 ist die Einbeziehung von Fallenherstellern bzw. -anbietern in das Projekt, um Weiterentwicklungen und eine spätere Markteinführung entsprechender Lösungen zu unterstützen. Hierzu werden nach Vorliegen erster gesicherter Erkenntnisse zu Aufbau und Zusammenwirken der ausgewählten Komponenten sowie aus den Funktionstests im Feld ein bis zwei Praxisworkshops mit entsprechenden Herstellern bzw. Anbietern durchgeführt. Zielstellungen dieser Workshops sind einerseits die Vorstellung und Information der Hersteller bzw. Anbieter über Ziele und Fortgang der Entwicklungen und andererseits die frühzeitige Einbeziehung interessierter Unternehmen in die an das Projekt anschließenden Phasen der Prototypenentwicklung sowie der Etablierung auf dem Markt. Im Rahmen der Workshops sollen u. a. Chancen und Risiken der beteiligten Unternehmen hinsichtlich digitaler Fallensysteme ermittelt werden.

Im Rahmen dieses AP sind folgende Aufgaben vorgesehen:

- Dokumentation von Versuchsaufbauten und -mustern
- Beschreibung der experimentellen Erprobung
- Beschreibung von Messvorschriften und Methoden
- Vergleich des Arbeitsstandes mit den Zielstellungen
- Aufzeigen des zukünftigen Entwicklungsbedarfes, Einbeziehung von potenziellen Fallenherstellern bzw. -anbietern mittels Workshops
- Beschreibung erforderlicher Schritte zur Umsetzung in die forstliche Praxis (Marktreife)

Das IFF bearbeitet die o. g. Aufgaben aus technischer Sicht und führt die Ergebnisse gemeinsam mit der NW-FVA zusammen.

AP 7 – Projektmanagement und Öffentlichkeitsarbeit

Ziel von AP 7 ist die Sicherstellung eines reibungslosen Projektablaufes. Hierbei müssen sowohl die Arbeiten verschiedener Fachexperten innerhalb der beteiligten Forschungseinrichtungen als auch die Zusammenarbeit zwischen beiden Einrichtungen im Sinne des Projektfortschritts und -erfolgs kontinuierlich aufeinander

abgestimmt werden. Ergänzend umfasst dieser Arbeitsschwerpunkt Maßnahmen zur Öffentlichkeitsarbeit und zum Transfer der Projektergebnisse.

Im Rahmen dieses AP sind folgende Aufgaben vorgesehen:

- Berichtswesen
- Change-Management
- Koordination der Einzelaktivitäten
- Erfolgskontrolle sowie Maßnahmen der Öffentlichkeitsarbeit (Präsentationen, Veröffentlichung von (Zwischen-)Ergebnissen)

Die Aufgaben des IFF liegen in diesem AP in der Koordination interner und externer Arbeitsvorgänge, der kontinuierlichen Dokumentation des Projektfortschritts und -erfolgs, der Berichterstellung sowie der Durchführung der Öffentlichkeitsarbeit (Internetauftritt, Präsentationen, Veröffentlichungen).

3. Wesentliche Ergebnisse des Teilvorhabens

Die durchgeführten Arbeiten und Ergebnisse werden im Folgenden, jeweils zugeordnet zu den zugrundeliegenden Arbeitspaketen in kurzer Form zusammengefasst. Eine jeweils ausführliche Beschreibung findet sich im gemeinsamen Gesamtberichtsteil beider Projektpartner.

AP 1: Anforderungsanalyse für automatisierte Fangsysteme:

Ausgehend von der vorgenannten Zielstellung des Vorhabens, eine technologische Lösung für ein automatisiertes Fangsystem zu erarbeiten, wurden durch das IFF Ausgangsbedingungen systematisiert und aufgearbeitet, um die Arbeiten im Projekt anhand des aktuellen Standes des Wissens zu fokussieren und zu konkretisieren. Hierzu wurden durch das Fraunhofer IFF Möglichkeiten und Grenzen verschiedener technischer Varianten systematisch aufbereitet und dokumentiert.

Die Sammlung technischer Ansätze (Verfahren) und von Beispielen technischer Komponenten erfolgte für die definierten Kernfunktionen der Falle (Locken, Zählen, Datenerfassung und -übertragung sowie Energieversorgung) zunächst ohne Ausschluss von Optionen, d. h. auch zunächst abwegig erscheinende technische Ansätze wurden miteingefasst.

Im nächsten Schritt wurden die Anforderungen im direkten Zusammenhang mit den Möglichkeiten, die verschiedene konkrete technologische Lösungen bieten durch die Projektpartner gemeinsam evaluiert. Hierbei wurden technologische Ansätze für weitere Betrachtungen ausgewählt oder ausgeschlossen und die Anforderungen präzisiert.

Strukturiert wurden die Arbeiten dieser Projektphase anhand der folgenden (technischen) Funktionen einer automatisierten Falle (1) „Pheromonabgabe“, (2) „Zählen der Fänge mittels Sensorik“, (3) „Energieversorgung“, (4) „Datenübertragung“ und (5) „Abtötung von Schadinsekten“.

Detaillierte Ergebnisse aus den Arbeitsschritten „Ermittlung der Ausgangsbedingungen“ und „Präzisierung der Anforderungen an einzelne Komponenten und das Gesamtsystem“ sind den Ausführungen im gemeinsamen Berichtsteil beider Projektpartner zu entnehmen.

Die für das Projekt definierten Anforderungen hinsichtlich des Funktionsumfangs der zu entwickelnden Fallenlösung wurden im folgenden Arbeitsschritt anhand der vorgenannten Arbeiten der in enger Zusammenarbeit mit der NW-FVA konkretisiert. Mit der Formulierung von priorisierten Anforderungen und deren Klassifizierung in Muss- und Sollte-Anforderungen wurden zu Projektbeginn ermittelte Wunschvorstellungen an die digitale Falle konkretisiert. Mit dieser Anforderungsübersicht, die in iterativen Schritten weiter zu entwickeln ist, wurde Meilenstein M1 „Priorisierter Anforderungskatalog“ erreicht. Dieser bildet die fachliche Grundlage der weiteren Entwicklungsschritte.

In Fortsetzung, Ergänzung und Präzisierung der im ersten Arbeitsschritt definierten Anforderungen an einzelne Komponenten und das Gesamtsystem wurden unter anderem weitere Verfahren zur Umsetzung der (technischen) Funktionen einer automatisierten Falle untersucht. Hierzu zählen Versuche und Betrachtungen zur „Abtötung von Schadinsekten“. Ergänzend zu Betrachtungen und Versuchen, die die Projektpartner der NW-FVA bezüglich des Einsatzes elektrischer Verfahren vorgenommen haben, betrachtete das Fraunhofer IFF alternativ speziell mechanische Verfahren sowie Verfahren zum Abtöten der Zielorganismen mittels Laser. Entwürfe verschiedener mechanischer Ansätze stellte das Fraunhofer IFF hierbei zur Diskussion.

Ausgehend von den gewonnenen Erkenntnissen, die zunächst keinen geeigneten Lösungsansatz hervorbrachten, wurden weitere Überlegungen und Diskussionen zur „Abtötung von Schadinsekten“ auch unter Einbeziehung externer Experten geführt. Im Ergebnis wurde einerseits festgestellt, dass ein direktes Abtöten der Zielspezies sofort nach dem Detektieren nicht zwingend erforderlich ist. Aus forstpraktischer Sicht zeigte sich, dass wesentliches Ziel dieser Anforderung lediglich eine regelmäßige Entleerung der Falle ist (Vermeidung von Verwesungsgeruch sowie Vermeidung von Überfüllung). Sicherzustellen sei jedoch, dass keine lebenden Zielorganismen die Falle wieder verlassen. Ausgehend von diesen Erkenntnissen wird im

Weiteren nunmehr von einer Komponente zum Leeren der Falle im laufenden Betrieb gesprochen, da diese Bezeichnung der umzusetzenden Funktion besser gerecht wird.

Aufbauend auf der Anforderungsübersicht, die im Meilenstein M1 „Priorisierter Anforderungskatalog“ erstellt wurde, erfolgten Überarbeitungen der Anforderungen anhand der Erkenntnisse mit ersten technischen Versuchsmustern. Die Arbeiten im weiteren Projektverlauf umfassten mehrere Überarbeitungen und Anpassungen der Komponenten und Versuchsmuster, die dann durch Tests im Rahmen von Labor- und Feldversuchen erprobt wurden. Wichtige Erkenntnisse flossen jeweils in die Anforderungen im „Priorisierten Anforderungskatalog“ ein und dienten dazu diesen zu konkretisieren.

Im Ergebnis mehrerer modulspezifischer Iterationen wurden Erkenntnisse im Rahmen des Meilensteins M2 „Angepasster Anforderungskatalog“ zusammengefasst. Die Arbeiten im Projektverlauf zeigten jedoch, dass die Entwicklungen mit zwei Iterationen zur Überarbeitung der Anforderungen nicht abgeschlossen werden können. Im Ergebnis konnten daher zunächst einzelne Anforderungen konkretisiert werden bzw. mussten für die weiteren Entwicklungen aus technischen oder anwendungspraktischen Erwägungen heraus ausgeschlossen werden. Im Verlauf der Arbeiten waren auch nach Erreichen des M2 weitere Überarbeitungen, Anpassungen und Tests im Rahmen von Labor- und Feldversuchen erforderlich, um die Anforderungen im „Priorisierten Anforderungskatalog“ zu konkretisieren.

Die Anwendungsszenarien der automatisierten Falle und der verschiedenen Versuchsaufbauten innerhalb des Projektes wurden im Arbeitsschwerpunkt 1 in enger Zusammenarbeit und in Abstimmung mit den Partnern der NW-FVA abgestimmt und festgelegt. Neben der Definition der Versuchszeiträume und Zielorganismen für die Versuche durch die NW-FVA wurden seitens des IFF jeweils verschiedene technische Zielstellungen definiert.

Erkenntnisse der Arbeiten zu Arbeitsschwerpunkt 1 sind den Ausführungen im gemeinsamen Berichtsteil beider Projektpartner zu entnehmen.

Zu AP 2 – Konzeptentwicklung, Priorisierung von Umsetzungsvarianten und Komponentenauswahl sowie Versuchsplanung:

Die Entwicklung technischer Umsetzungsvarianten basiert auf den in AP 1 „Anforderungsanalyse für automatisierte Fangsysteme“ dargestellten Anforderungen an das Gesamtsystem „digitale Pheromonfalle“ sowie deren Komponenten. Nachdem wesentliche Anforderungen formuliert und diskutiert wurden, erarbeitete das Fraunhofer IFF konkrete Lösungsvorschläge für die zunächst wichtigsten Fallenfunktionen der *Pheromonabgabe*, der *Sensorik zum Zählen der Fänge* sowie für die *Energieversorgung*. Diese wurden im Rahmen gemeinsamer Online und Präsenztermine vorgestellt, analysiert und vor dem Hintergrund ihrer Tauglichkeit unter Freilandbedingungen sowie hinsichtlich offener Fragestellungen, die in ersten Komponententests zu untersuchen sind, mit den gestellten Anforderungen abgeglichen.

Ausgewählte Vorschläge der technischen Ausgestaltung der genannten Komponenten wurden in Abstimmung mit der NW-FVA zunächst theoretisch evaluiert und dann weiter konkretisiert und spezifiziert. Vor dem technischen Entwurf wurden offene Fragen in gemeinsamen Gesprächsterminen zwischen den Projektpartnern ermittelt, unter Abwägung technischer und forstfachlicher Belange diskutiert und, sofern ohne Feldversuche zu beantworten, geklärt. Wichtige Fragestellungen wurden in Fragekatalogen fortlaufend dokumentiert, so dass relevante Festlegungen im weiteren Projektverlauf rekapitulierbar bleiben.

Anhand erster ausgearbeiteter Entwürfe wurden die folgenden Umsetzungsvarianten einzelner Komponenten und Funktionen für erste Versuche und Tests priorisiert:

Funktion Pheromonabgabe

- Mikropumpe mit Pheromon-Lösungsmittel-Gemisch,
- Digital gesteuerte mechanische Abgabe konventioneller Feststoff-Pheromonköder.

Funktion Fangen und Zählen der Fänge mittels Sensorik

- Zählsensorik unter Einsatz kapazitiver Sensoren in Kombination mit Lichtschranke.

Funktion Energieversorgung

- Variante 1: Akkumulator ohne zusätzlichen Energieerzeuger,
- Variante 2: Akkumulator mit Photovoltaikmodul als zusätzlichem Energieerzeuger.

Die Entwicklung technischer Umsetzungsvarianten basierte nachfolgend auf den in AP 1 „Anforderungsanalyse für automatisierte Fangsysteme“ dargestellten Anforderungen an das Gesamtsystem „digitale Pheromonfalle“ sowie deren Komponenten. Nachdem im ersten Projektjahr wesentliche Anforderungen formuliert und diskutiert wurden, erarbeitete das Fraunhofer IFF konkrete Lösungsvorschläge für die zunächst wichtigsten Fallenfunktionen der *Pheromonabgabe*, der *Sensorik zum Zählen der Fänge*

sowie für die *Energieversorgung*. Die konzeptionellen Arbeiten wurden im weiteren Projektverlauf kontinuierlich fortgesetzt. Erste Ansätze wurden teilweise überarbeitet und konkretisiert sowie durch neue Ansätze ergänzt.

So wurde beispielsweise die Funktion *Pheromonabgabe*

- mittels eines automatisierten Köderwechselmechanismus, d. h. eine Umsetzungsvariante zur digital gesteuerten mechanischen Abgabe konventioneller Feststoff-Pheromonköder sowie
- mittels einer Mikropumpe, die ein Pheromon-Lösungsmittel-Gemisch abgibt,

verfeinert und konkretisiert und für die Umsetzung vorbereitet. Die technische Konzeption der zu Beginn des Projektes priorisierten Umsetzungsvariante einer Pheromonabgabe mittels Blistersystem wurde nach Versuchen im Labormaßstab in der Priorität herabgestuft. Gründe lagen insbesondere in den (klebrigen) Eigenschaften der in einem Blister enthaltenen Pheromonködern sowie in den Erkenntnissen zu dem erforderlichen mechanischen, aktorischen und somit auch energetischen Aufwand eines technischen Aufbaus, der die Köder sicher aus dem Blister ausbringen muss. Im Berichtszeitraum 2023 sind weitere Untersuchungen vorgesehen, die Erkenntnisse dazu bringen sollen, ob auf Basis bestehender Blisterverpackungen eine robuste und simple Mechanik entworfen werden kann, um bestehende Konservierungsmethoden der Köder beizubehalten.

Auch die technische Konzeption der Einzelkomponente *Sensorik zum Zählen der Fänge* wurde im Projektverlauf ausgehend von ersten Entwürfen und Erkenntnissen aus den Versuchen kontinuierlich verfeinert, angepasst und dem Bau jeweils entsprechender (neuer) Funktionsmuster zugrunde gelegt. Modifikationen entstanden vor allem auf der Basis von Testmessungen von Einzelkomponenten und der Recherche nach verfügbaren Bauteilen. Aufgrund schwerwiegender Lieferengpässe bei elektronischen Bauteilen musste hierbei häufig auf Alternativbaugruppen zurückgegriffen werden. Die Durchführung von Praxistests im Rahmen erster Versuche erfolgte ab dem Frühjahr 2022.

Ausgehend von im ersten Schritt vorgeschlagenen grundsätzlichen Varianten für die Umsetzung der Funktion *Energieversorgung*:

- 1: Akkumulator ohne zusätzlichen Energieerzeuger und
- 2: Akkumulator mit Photovoltaikmodul als zusätzlichem Energieerzeuger.

wurden zunächst Modellrechnungen mit den bereits bekannten Verbrauchern des „digitalen Fallensystems“ durchgeführt, um möglichst realistische Werte der zu erwartenden Akkulaufzeiten mit und ohne zusätzlichen Energieerzeuger zu ermitteln. Ein erstes Konzept für Versuche zur Ermittlung der Solarleistung im Wald sah vor, ein Solarpanel an einem potenziellen Fallenstandort anzubringen und diesen über einen Laderegler mit einem Akkumulator zu verbinden, um letzteren mit der gewandelten Solarenergie zu laden. Der Ladestrom bzw. die Leistung, mit der der Akkumulator dabei geladen werden würde, sollten in kurzen Zeitintervallen von einem Datenlogger gemessen und protokolliert werden. Die Variante musste im Berichtszeitraum verworfen werden, da sich im Rahmen der Ermittlung möglicher Bauteile herausstellte, dass spezifische Funktionen der angedachten elektronischen Komponenten, die Umsetzung dieses Konzepts erschweren bzw. zu uneindeutigen Messwerten führen können. Das entsprechende Konzept wurde daher angepasst und überarbeitet. Auch bei diesen Arbeiten musste aufgrund schwerwiegender Lieferengpässe bei elektronischen Bauteilen häufig auf Alternativbaugruppen und -teile zurückgegriffen werden. Dies hatte wiederholten konzeptionellen Aufwand zur Folge, da bei den technischen Aufbauten die einzelnen eingesetzten mikroelektronischen Bauteile in enger Wechselwirkung stehen und einzelne Teile nicht einfach durch Alternativen zu ersetzen sind. Infolgedessen müssen bei Auftreten solcher Situationen Schaltungen bei Ausfall eines Bauteils komplett neu konzipiert werden.

Nach den Praxistests erster Umsetzungsvariante im Freiland im Jahr 2022, verfeinerte das Fraunhofer IFF im Jahr 2023 die wichtigsten Fallenfunktionen der *Pheromonabgabe*, der *Sensorik zum Zählen der Fänge* sowie die *Energieversorgung* (2. Iteration). Parallel wurden die Arbeiten zur technischen Konzeption fortgesetzt. Hierbei wurden Ansätze teilweise weiter überarbeitet und konkretisiert sowie durch neue Ansätze ergänzt.

Die Priorisierung von Umsetzungsvarianten erfolgte wiederum in Zusammenarbeit mit den Partnern der NW-FVA anhand der Erkenntnisse durchgeführter Labor- und Freilandtests spezifischer Funktionsmuster für Einzelkomponenten. Neben dem konstruktiven Aufbau der Fallenmodule, wurde zu diesem Zeitpunkt die Entwicklung der Funktionen des Datenabrufs bzw. der Datenübertragung durch die Einbindung einer USB-Schnittstelle sowie das Aufsetzen eines Softwaretools zur Steuerung aller wesentlichen Fallenfunktionen priorisiert. Für die bidirektionale Kommunikation mit den Fallensystemen am Einsatzort wurde ein Softwaretool entwickelt und bereitgestellt, das definierte Anforderungen an die Kommunikation erfüllt. Einen ebenfalls priorisierten Schwerpunkt bildete die Versorgung der Systeme mittels Solartechnik, um die Energieversorgung der Fallensysteme über relevante Fangzeiträume zu gewährleisten. Hierfür wurden zunächst Modellrechnungen durchgeführt und anhand der Ergebnisse jeweils geeignete Komponentenkombinationen ermittelt. Die Dimensionierung der Komponentenkombination aus Akkumulator-Kapazität und Solarpanel-Nennleistung wurde zu Projektende und im Ergebnis abschließender Versuche auf Basis der durch

kontinuierliche Anpassungen im Projektverlauf veränderten Leistungsbedarfs der überarbeiteten Testmuster neu bewertet.

Deutliche Überarbeitungen erforderten im Projektverlauf auch die Gehäusekomponenten und die formgebenden Bauteile der Falle. Diese wurden entsprechend der neuen oder angepassten Anforderungen jeweils neu modelliert und später in aufwändigen 3D-Druckprozessen hergestellt. Die konstruktiven Anpassungen berücksichtigten jeweils Erfahrungen aus den Feldversuchen (Robustheit, Handling) und gingen aus Anpassungen hervor, die sich nach ersten Tests von Funktionen z. B. hinsichtlich der Bauteile oder des Handlings ergaben. Ein Beispiel hierfür war die Anforderung, die Akkus direkt am Fallenkörper zu platzieren.

Eine deutlich niedrigere Priorität musste aus Kapazitätsgründen den Wunschkomponenten „Leeren der Falle im laufenden Betrieb“ und „Datenfernübertragung“ zugeordnet werden. Zum Projektende stehen jedoch konzeptionelle Entwürfe und virtuelle Funktionsmuster zur Verfügung, welche erste Optionen für eine Lösung, insbesondere zum Leeren der Falle vorstellen. Diese Konzepte basieren auf gemeinsamen Überlegungen mit den Praktikern der FVA zu Anforderungen und Funktionen, welche ein zu entwickelndes Auswurfsystem erfüllen sollte. Zu diesen zählten vor allem die Möglichkeit der „Flucht“ von Nichtzielspezies, das Auswerfen verendeter Zielspezies und das gleichzeitige Abtöten und Auswerfen von geschwächten und noch lebenden Zielspezies. Anhand der Erstentwürfe wurden bereits erste Hinweise formuliert, wie perspektivisch die Grundlage für Anpassungen und erste Versuchsmuster gebildet werden können.

Zusammenfassend wurden im Projektverlauf für die priorisierten Komponenten umfassende, teils wiederholt durchgeführte Tests durchgeführt, Anpassungen zur Stabilisierung der Funktion vorgenommen und verschiedene ergänzende funktionale Tests der integrierten Versuchsmuster vorgenommen. Besonders hoch priorisiert wurden bei den abschließenden Erprobungen gegen Ende des Projektes die Validierung der Zählergebnisse, die Bestätigung der Verbrauchswerte der Falle aus energetischer Sicht sowie die falleninternen Steuerungsmodule.

Eine ausführliche Darstellung der Arbeiten, der erzielten Zwischenergebnisse sowie der ausgearbeiteten technischen Konzeptionen ist den Ausführungen zu **AP 2** im gemeinsamen Berichtsteil beider Projektpartner zu entnehmen.

Zu AP 3 – Entwicklung von Funktionsmustern zur Untersuchung der Lösungsansätze in Laborversuchen:

Die Entwicklung funktioneller Fallenmodule begann mit der Konzeption erster Einzelkomponenten für Versuchs- und Testzwecke bereits im Jahr 2021. Grundlage für die Entwicklung und den Aufbau jeweils mehrerer identischer Muster je Versuch bildete die Auswahl geeigneter technischer Komponenten sowie deren Beschaffung. Hierfür waren entsprechende Beschaffungsvorgänge inkl. der zugehörigen Ausschreibungs- und Vergabeprozesse umzusetzen. Im gesamten Projektverlauf, der gerade bezüglich der Beschaffung elektronischer Bauteile durch Engpässe bedingt durch die Corona-Pandemie und nachfolgend einsetzende Kriegsereignisse geprägt war, ergaben sich deutliche Limitierungen hinsichtlich der Flexibilität bei der Auswahl von Komponenten, teilweise Verzögerungen im Projektverlauf durch ausbleibende oder falsche Lieferungen und Mehraufwände durch wiederhol durchzuführende Arbeitsschritte, die nur durch ein kontinuierliches und gutes Change-Management im Projekt gemildert werden konnten.

Ab 2022 und in den Folgejahren bis zum Projektende erfolgte der Bau der ausgewählten Versuchs- und Funktionsmuster für Tests im Freiland, Semi-Freiland oder unter Laborbedingungen. Hierfür wurden schrittweise weitere, für den Funktionsumfang der Falle erforderliche Einzelkomponenten konzipiert, aufgebaut und in iterativen Entwicklungsschritten, aufbauend auf detaillierteren und teils überarbeiteten Konzeptionen der Einzelkomponenten (vgl. AP2) verfeinert. Jedem der im Gesamtberichtsteil ausführlich beschriebenen Versuche lag die Erstellung einer zeitlichen und inhaltlichen Versuchsplanung, die Abstimmung von Versuchsflächen und -abläufen sowie der Konzeption von Testumgebungen zugrunde. Diese wurden im gesamten Projektverlauf in enger Zusammenarbeit und Abstimmung mit den Partnern der NW-FVA abgestimmt, erstellt und dokumentiert.

Im Verlauf der Entwicklungen der modularen Komponenten für die digitale Falle wurden beim Aufbau von Versuchsmustern jeweils verschiedene Ansätze betrachtet und teilweise parallel verfolgt. Die jeweils erstellten Muster wurden unter variierenden Bedingungen und an verschiedenen Versuchsstandorten entsprechend der geplanten Versuche ausgebracht. Insbesondere im Feldeinsatz wurden jeweils variierende Kombinationen der Komponenten getestet, wobei die Versuche einerseits auf Erkenntnissen zu technischen Fragen der Funktionalität und des Zusammenspiels der Komponenten, andererseits auf Erkenntnissen zu möglichen Einflüssen auf die Fangergebnisse im Monitoring ausgerichtet waren.

Die zeitlich eng aneinandergrenzenden Versuchszeiträume sowie Um- und Neuaufbauten der Versuchsmuster nach jedem Feldeinsatz einschließlich der Integration der jeweils zeitparallel (weiter-)entwickelten Funktionen stellten hierbei für den Aufbau der Versuchsmuster der jeweils nächsten Generation eine besondere Herausforderung dar. Einerseits war es, anders als aus technischer Sicht in diesem Umfang

vorhersehbar, für jeden Versuch erforderlich, mehrere identische Versuchsmuster aufzubauen. Dies begründet sich aus natürlich-biologischen Einflüssen, die eine Auswertung von Versuchsergebnissen basierend auf nur einem Versuchsmuster nicht in hinreichendem Umfang zulassen. Zum anderen waren in der Regel bereits aufgebaute Versuchsmuster, Gehäuseteile und Fallenkomponenten nicht mehrfach verwendbar. Ursache hierfür ist, dass Pheromonbelastungen der eingesetzten Bauteile und Materialien störende Effekte und Einflüsse in nachfolgenden Versuchen (repellente Wirkung auf Falterschädlinge einer anderen Spezies) auslösen können. Zur Vermeidung und Reduzierung dieser Einflüsse mussten mit erhöhtem Aufwand in kurzen Abständen (vgl. zeitliche Folge der Versuchszeiträume) einzelne Komponenten gleichzeitig funktional überarbeitet, in die Versuchsaufbauten integriert, um- und wiederaufgebaut werden.

Aus diesem Grund war es erforderlich, im Projektverlauf für einzelne Versuche und Versuchsmuster die jeweils nächsten Schritte zu priorisieren und unter Berücksichtigung der Kapazitäten im Projekt das Augenmerk auf diejenigen Komponenten zu legen, die aus technischer und praktischer Sicht das zunächst höchste Realisierungspotenzial für ein integriertes Versuchsmuster einer digitalen Falle hatten. Obgleich verschiedene Umsetzungsvarianten beispielsweise für die Einzelkomponenten zum Anlocken mittels automatisierter Pheromonabgabe (Pheromonabgabe mit Festköder, Blistersystem, Pheromonabgabe mittels Mikropumpe), entworfen und getestet wurden, konnte nur die Pheromonabgabe mit Festköder in eine dritte Entwicklungs- und Überarbeitungsstufe weitergeführt werden. Dies ist jedoch nicht gleichzusetzen damit, dass die anderen Ansätze nicht aussichtsreich für Umsetzungen und die praktische Anwendung sind. Vielmehr ist einzuschätzen, dass eine Weiterentwicklung der vorgestellten Ansätze sehr zu empfehlen ist. Die Priorisierung der Komponenten erfolgte vielmehr unter Berücksichtigung der im Projekt verfügbaren Kapazitäten und des gegebenen Zeitrahmens sowie der Zielstellung, ein funktionierendes Gesamtsystem zu erstellen.

Die Versuchsdurchführung erfolgte im gesamten Projektverlauf in enger Zusammenarbeit mit den Partnern der NW-FVA, die während der Versuche den Betrieb kontrollierten und überwachten, sowie umfangreiche Daten und Informationen zu den Versuchsaufbauten und bezüglich der eingesetzten Komponenten erhoben. Die Auswertung der Versuche wurde von den Partnern gemeinsam vorgenommen, wobei beim IFF insbesondere technische Daten analysiert und ausgewertet wurden. Schlussfolgerungen aus den Versuchen wurden gemeinsam mit der NW-FVA gezogen und Ableitungen für die Weiterentwicklungen getroffen. Diese flossen in die nächsten Testmuster und Versuchsplanungen ein.

Für den Umgang mit den Fallensystemen oder dem Softwaretool für die Kommunikation mit den Systemen wurden die Kollegen der NW-FVA entsprechend eingewiesen und/oder geschult. Hierfür erstellte das IFF u. a. auch entsprechende Text- und Bildanleitungen, die der NW-FVA bereitgestellt wurden.

An der Umsetzung modularer Komponenten für die digitale Falle wurde im gesamten Projektverlauf bis zum Ende des Vorhabens festgehalten. Gespräche mit externen Experten, Praktikern und Demonstrationen des integrierten Gesamtsystems bestätigten, dass der Ansatz eines modular aufgebauten Systems den Praxisanforderungen für einen späteren Einsatz entspricht.

Eine ausführliche Beschreibung der technischen Aufbauten, der umgesetzten Varianten einzelner Komponenten, der Versuchszeiträume sowie der Erkenntnisse aus deren Einsatz in verschiedenen Versuchsszenarien ist den Ausführungen zu **AP 3** im gemeinsamen Berichtsteil des Abschlussberichtes zum Projekt zu entnehmen.

Zu AP 4 – Zusammenführung zum Versuchsmuster „Automatische Falle“

Als Vorbereitung der Zusammenführung der modular konzipierten Einzelkomponenten der automatisierten Fallen (Locken, Zählen, Energieversorgung), die ab dem Jahr 2022 in verschiedenen Varianten und Stückzahlen aufgebaut und in vordefinierten Versuchsreihen erprobt wurden, erfolgten gezielte Auswertungen der Versuche für Funktionsmuster einzelner Fallenkomponenten. So wurden durch das Fraunhofer IFF insbesondere technische Aspekte ermittelt, die Veränderungs- und/oder Verbesserungsbedarf hinsichtlich der Komponenten aufzeigten. Sowohl funktionale als auch einsatzbedingte (z. B. Umwelt, Umfeld, Bedienung) Auffälligkeiten wurden ermittelt und im Projektteam ausgewertet. Die Erkenntnisse dieser Arbeiten flossen sowohl in Überprüfungen der Anforderungsdefinitionen, als auch in die technische Überarbeitung und die Priorisierung von Umsetzungsvarianten ein (vgl. AP3).

Die Arbeiten zur Integrierbarkeit der modularen Komponenten umfassten konzeptionelle Vorarbeiten zur Anpassung der Funktionsmusterentwürfe (vgl. Ausführungen zu AP 2 und AP 3 im gemeinsamen Berichtsteil zum Vorhaben). Im Rahmen dieser Arbeiten wurden durch das IFF zunächst die Konzepte und Bauteile der integrierten Steuerung der Fallenkomponenten aufeinander abgestimmt. Diese Arbeiten waren durch die bereits beschriebenen Engpässe bei der Beschaffung von elektronischen Bauteilen für die Umsetzung der Versuchsmuster stark behindert. Unbenommen dessen konnte durch das IFF eine integrierte Steuerung der Fallenkomponenten entworfen, aufgebaut und im Projektverlauf über mehrere Erprobungen hinweg kontinuierlich weiterentwickelt und verfeinert werden. Die Optimierungen dieser integrierten Steuerung waren dabei neben der Verbesserung des Zusammenspiels der einzelnen Komponenten insbesondere darauf ausgerichtet, das modulare Gesamtsystem bezüglich eines minimalen Energiebedarfs weiter zu verbessern. Die Eigenschaft, das modulare System perspektivisch über alle Fangzeiträume hinweg und somit fast im

Verlauf eines gesamten Jahres jeweils weitgehend energieautark betreiben zu können, wurde als besonders bedeutsam für den Feldeinsatz herausgearbeitet.

Eine besondere Herausforderung für den Test insbesondere der Zählkomponente, damit jedoch auch für den Aufbau und Test erster integrierter Versuchsmuster ergab sich in den Jahren 2022 und 2023 durch eine fehlende Reproduzierbarkeit ausschließlich im Feldeinsatz auftretender Fehler. Wiederholte Versuche, den Fehler auch in der Labortestumgebung auszulösen, um gezielt eine Ursachenanalyse und Fehlerbehebung einzuleiten, blieben über Monate erfolglos. Dennoch wurden verschiedene Maßnahmen ergriffen, um eine mutmaßliche Ursache zu ermitteln, jedoch ohne einen konkreten Verdacht bestätigen zu können. Erst nach zahlreichen Versuchen und nach zufälligem Auftreten des Fehlers in Laborversuchen wurde eine Ursache ermittelt und konnte nach Anpassung der technischen Auslegung zu einer Problemlösung führen.

Der Aufbau vollintegrierter Versuchsaufbauten konnte im Jahr 2023 begonnen und mit der erfolgreichen Durchführung eines Langzeitversuchs im Jahr 2024 abgeschlossen werden.

Im Jahr 2023 wurden zunächst folgende teil- und später vollintegrierte Versuchsaufbauten aufgebaut und erprobt:

- Funktionsmuster mit Pheromonabgabemodulen in der 3. Entwicklungsstufe sowie Zählmodulen der 2. Entwicklungsstufe. Drei Versuchsmuster waren dabei als integrierte Fallensysteme ausgeführt, d. h. die Komponenten Pheromonabgabe und Zählmechanismus wurden zentral von einem Mikrocomputer gesteuert und von einer Stromquelle versorgt.
- Drei integrierte Versuchsmuster, davon eines der Pheromonfalle mit Mikropumpe und zwei Versuchsmuster jeweils mit „Zählautomatik“.
- vier integrierte Versuchsmuster und zusätzlich ein weiteres Versuchsmuster mit Flüssigpheromonabgabe mittels Mikropumpe. Eines der Versuchsmuster integrierte hierbei die Komponenten „Zählen mit 3-Ebenen-Lichtschranke“ mit einer Energieversorgung mittels Solarpanel. Weitere Versuchsmuster waren jeweils mit einer Komponente zur Festkörperpheromonabgabe sowie einer Zählkomponente (2x2-Ebenen und 1x3-Ebenen-Lichtschranken) ausgestattet. Alle Versuchsmuster verfügten über zentrale Steuerungssoftwarekomponenten und Schnittstellen zum Auslesen der Fangergebnisse sowie zur Konfiguration der Fallen.
- Zwei Versuchsmuster mit Zählkomponenten sowie einer Erweiterung und Modifizierung der zentralen Steuerung der Falle. Eines der Versuchsmuster umfasste zudem die Implementierung einer finalen Lösung für die autarke Energieversorgung mittels eines 30 Watt Solarpanels und LiFePo-Akku, der in ein neues Gehäusedesign integriert wurde.

Die zugehörigen Versuchsumgebungen, Zielspezies und Versuchszeiträume sind im gemeinsamen Berichtsteil beider Projektpartner beschrieben.

Weitere Aufbauten integrierter Versuchsmuster erfolgten im Jahr 2024. Hierbei standen zunächst weitere Optimierungen der Lichtschranken der Zählkomponente im Fokus der Weiterentwicklungen. Ziel war eine deutliche Stabilisierung der Zählergebnisse und die Behebung der oben beschriebenen, im Freiland auftretenden Probleme mit den Versuchsaufbauten. Hierbei wurde einerseits eine Überarbeitung des elektronischen und optischen Aufbaus durchgeführt, andererseits wurden mechanische Optimierungen der Lichtschrankenhalschalenebene vorgenommen. Ergänzend wurde auch der Algorithmus zur Interpretation der Lichtschrankenevents an den Fallensystemen und zur Ableitung der Fangzahlen überarbeitet, um mit höherer Sicherheit Doppelzählungen zu vermeiden, das Entkommen (die Flucht) bereits gefangener Falter zu identifizieren und deren Flugverhalten detaillierter analysieren zu können.

Weitere Aufbauten und Versuche dienten der Vorbereitung eines abschließenden Langzeitversuchs integrierter Versuchsmuster der digitalen Falle im Sommer 2024. Hierfür wurden 5 vollintegrierte Versuchsmuster, die mit einer Festkörperpheromonabgabe, einer 2-Ebenen Zählkomponente, einer Energieversorgung mit Akku und Solarpanel sowie einer Datenschnittstelle zum Auslesen der Zählergebnisse und einer integrierten Steuerung ausgestattet sind, aufgebaut.

Zu AP 5 – Erprobung und Evaluierung der „Automatischen Falle“

Die Arbeiten an diesem AP begannen bereits im Jahr 2022, wobei zunächst noch kein integriertes Versuchsmuster verschiedener Fallenkomponenten erprobt und getestet werden konnte. Vielmehr wurden die für eine Integration in ein gemeinsames Funktionsmuster vorgesehenen Einzelkomponenten individuell in den Versuchen erprobt, um grundlegende Aussagen für weiter zu verfolgende Entwicklungsstränge zu gewinnen. Die ersten, unterschiedlichen Versuche im Jahr 2022 dienten daher der Auswahl der für die nächsten Entwicklungsschritte weiter zu priorisierenden Umsetzungsvarianten und der Gewinnung relevanter Erkenntnisse zum Einsatz unter Realbedingungen.

Die verschiedenen, nachfolgend im Jahr 2023 erstellten Versuchsaufbauten (Versuchsmuster), die zunächst einzelne Komponenten der Falle kombinierten (teilintegrierte Muster), wurden ebenfalls in Feldtests erprobt.

Im Anschluss wurden, wie in den Ausführungen zu AP 4 beschrieben, vollintegrierte Versuchsmuster, die die Komponenten Pheromonabgabe, Zählen, Steuerung und Energieversorgung in einem System integrierten, aufgebaut. Aufgrund der stetigen Weiterentwicklungen an den einzelnen Fallenkomponenten erforderten die Feldtests jeweils den Aufbau mehrerer, teils baugleicher, teils gezielt unterschiedlicher Systeme. Aufgrund der Pheromonbelastung einzelner Komponenten, die bei artfremden Spezies auch unerwünschte Nebenwirkungen hervorbringen kann (repellente Wirkung), erforderte der Aufbau der Versuchsmuster für den Freilandeinsatz die wiederholte Herstellung von Gehäuseteilen oder den kompletten Umbau aller Versuchsmuster nach einzelnen technischen Änderungen oder Anpassungen. Die Änderungen und Anpassungen waren dabei jeweils mit nachgelagerten Labortests verbunden, bevor die Muster an die NW-FVA übergeben werden konnten.

Neben verschiedenen vorbereitenden Versuchen und Tests waren die Arbeiten im AP 5 final auf die Vorbereitung und Durchführung eines abschließenden Langzeitversuchs integrierter Versuchsmuster der digitalen Falle im Sommer 2024 ausgerichtet. Die aufgebauten 5 vollintegrierten Versuchsmuster wurden mit einer Komponente zur Abgabe des Pheromons mittels Festködern und einer Zählkomponente mit einem 2-Ebenen-Lichtschrankenaufbau ausgestattet. Die Energieversorgung wurde durch einen Akku mit Solarpanel sichergestellt und das Gesamtsystem mittels einer integrierten Steuerung betrieben. Eine Datenschnittstelle wurde zum Auslesen der Zählergebnisse bereitgestellt.

Vier der Versuchsmuster wurden im Freilandtest für rund 3 Monate ausgebracht, eines der Versuchsmuster diente als Reserve. Der Langzeitversuch im Freiland konnte erfolgreich abgeschlossen werden. Die Ergebnisse sind entsprechend dem Gesamtbericht zu entnehmen.

Ein weiterer Einsatz dieser Funktionsmuster, die im Anschluss an den Langzeitversuch gereinigt und grob überholt wurden, erfolgte bis über das Projektende hinaus. Dieser Versuch, der einer nochmaligen Überprüfung ausgewählter biologischer bzw. forstfachlicher Fragestellungen diente, wurde ebenfalls erfolgreich abgeschlossen.

Zusammenfassend konnte erfolgreich nachgewiesen werden, dass eine Integration der Einzelkomponenten in ein Gesamtsystem möglich und ein autarker Betrieb der Fallen auch über längere Fangzeiträume möglich ist.

Zu AP 6 – Erfolgskontrolle, Dokumentation und Ausblick

Im Rahmen des Arbeitsschwerpunktes wurden einerseits die verschiedenen Versuchsaufbauten und -muster beschrieben und dokumentiert. Andererseits wurden die Erkenntnisse der durchgeführten Versuche mit den Versuchsmustern sowohl aus technischer Sicht, als auch aus Sicht der Handhabung und forstfachlicher Sicht gemeinsam mit den Projektpartnern ausgewertet, bewertet und Schlussfolgerungen für die jeweiligen Folgeaktivitäten abgeleitet. Die Konzepte, Komponenten der Versuchsaufbauten sowie die durchgeführten Experimente und Erkenntnisse aus den technischen Versuchen sind in den Abschnitten AP2 bis AP5 des Gesamtberichtsteils beschrieben.

Die Arbeiten zur Bewertung der Entwicklungsergebnisse wurden kontinuierlich im gesamten Projektverlauf und begleitend zu allen Versuchen durchgeführt. So wurden unter anderem die gesammelten Praxiserfahrungen gemeinsam ausgewertet und zusammengefasst (vgl. Ausführungen zu AP6 des Gesamtberichtsteils).

Im Anschluss erfolgte, wiederum in enger Zusammenarbeit beider Verbundpartner, die Ableitung von Handlungsempfehlungen für die Weiterentwicklung der Pheromonfalle zu einem Prototyp sowie die Formulierung von Maßnahmen zur späteren Markteinführung. Wichtige Erkenntnisse lieferten hierbei unter anderem die Gespräche mit Fachexperten der LWF in Bayern, Expertenworkshops sowie Demonstrationen, Messeauftritte und bilaterale Gespräche mit Marktpartnern (potenzielle Fallenhersteller und/oder Vertriebspartner) sowie Anwendern und Nutzern.

In der Auswertung der gesammelten Erfahrungen wird im Abschnitt zu AP6 des Gesamtberichtsteils der erarbeitete Ausblick zunächst bezogen auf die technischen Aspekte des Vorhabens gegeben. Dabei werden aus anwendungspraktischer und technischer Sicht erforderliche und empfohlene Weiterentwicklungen der technischen Komponenten des integrierten Pheromonfallensystems beschrieben. Eingegangen wird dabei sowohl auf die im Projekt erarbeiteten Funktionsmuster der Fallenkomponenten im Einzelnen als auch auf weitere Module und Fallenfunktionen sowie das Design bzw. das Gehäuse der Falle.

Im Anschluss wird im Abschnitt zu AP6 des Gesamtberichtsteils ergänzend der erarbeitete Ausblick bezogen auf die forstfachliche Anwendung und ein künftiges Marktangebot dargelegt. Ermittelte Handlungsbedarfe, eine Priorisierung von erforderlichen Folgeaktivitäten sowie eine Abschätzung der Zeitschiene für die weiteren Entwicklungsschritte hin zu marktfähigen Angeboten werden in Kapitel 2 „Verwertung“ des gemeinsamen Berichtsteils beider Projektpartner ausgeführt.

Zu AP 7 – Projektmanagement und Öffentlichkeitsarbeit

Die in enger Zusammenarbeit des IFF mit den Kollegen von der NW-FVA durchgeführten Arbeiten in diesem Arbeitspaket dienten der Sicherstellung eines reibungslosen Projektablaufes. Hierbei wurden nicht nur die Arbeiten verschiedener Kolleginnen und Kollegen innerhalb der beteiligten Forschungseinrichtungen kontinuierlich gut aufeinander abgestimmt, sondern insbesondere die Zusammenarbeit beider Einrichtungen im Sinne des Projektfortschritts und -erfolgs. Ergänzend umfasste dieser Arbeitsschwerpunkt Maßnahmen zur Öffentlichkeitsarbeit und zum Transfer der Projektergebnisse. Im Folgenden werden wichtige Schritte und Ergebnisse der im gesamten Projektverlauf als äußerst zielorientiert und erfolgreich durchgeführten Kooperation grob zusammengefasst dargestellt. Weitergehende Details sind dem gemeinsamen Berichtsteil in den Ausführungen zu AP 7 zu entnehmen.

Administratives und Zusammenarbeit

Am 03.08.2021 fand das Projekt-Kick-off-Meeting in Göttingen statt.

In Abstimmung aller Partner wurde eine Kooperationsvereinbarung zum Projekt erstellt, zwischen den Partnern abgestimmt. Die Unterzeichnung wurde am 21.07.2021 abgeschlossen.

Für den Datenaustausch innerhalb des Projektes richtete das Fraunhofer IFF einen Server zum Datenaustausch *in der Fraunhofer owncloud* ein und wies die Projektpartner in deren Nutzung ein. Die webbasiert erreichbare Plattform zum Datenaustausch auf gesicherten Servern der Fraunhofer-Gesellschaft stellte im gesamten Projekt einen Arbeitsbereich, in dem Dokumente und Materialien für und von den Partnern abgelegt werden können, bereit.

Abstimmungen und Arbeitstreffen zwischen den Partnern wurden, zunächst aufgrund der Covid19-Situation, später aus Effizienzgründen zu einem großen Teil in Form von virtuellen Arbeitsmeetings bzw. Telefonabstimmungen durchgeführt. Fast über den gesamten Projektverlauf dienten monatliche JourFixe-Termine zur Abstimmung der Arbeiten im Projekt, in denen die aktuellen Arbeitsstände, Versuche und Arbeiten an den Fallenkomponenten abgestimmt wurden. Diese Abstimmungen der Projektpartner ergänzend wurden einzelne Meetings in Präsenz, Abstimmungen bei den Versuchsflächen sowie bilaterale Abstimmungen einzelner Kollegen und Kolleginnen durchgeführt. IFF-intern erfolgte in 14-tägigen Zyklen die Abstimmung der Arbeiten verschiedener Arbeitsgruppen.

Am 25.05.2023 fand ein Projekttreffen beider Verbundpartner mit Fachkollegen des assoziierten Projektpartners, der bayerischen Landesanstalt für Wald und Forstwirtschaft (LWF), in Freising statt. Im Rahmen des Projekttreffens an der LWF, das einen intensiven Austausch mit langjährig erfahrenen Experten im Bereich des Waldschutzes und der Entwicklung digitaler Lösungen zum Ziel hatte, wurden frühere technische Aufbauten zum Fang forstschädlicher Schmetterlinge und Käfer mit den aktuellen projektbezogenen Versuchsmustern einer automatisierten Pheromonfalle verglichen und hinsichtlich verschiedener Zielstellungen diskutiert. Dieser Termin stellte für die Entwicklungen im Projekt einen großen Mehrwert dar, bestätigte viele der technischen Ansätze und gab wichtige Hinweise zu Einsatzmöglichkeiten der Entwicklungen, die über das klassische Waldschutzmonitoring hinausgehen.

Öffentlichkeitsarbeit

Ergänzt wurden die fachlichen und administrativen Abstimmungen beider Partner durch zahlreiche Maßnahmen der Öffentlichkeitsarbeit.

Zur Unterstützung der projektbezogenen Öffentlichkeitsarbeit wurde bereits zu Projektbeginn eine Projektwebseite auf den Seiten des Fraunhofer IFF freigeschaltet. Diese ist auch über das Projektende hinaus unter <https://www.holzlogistik.iff.fraunhofer.de/de/forschungsprojekte/dimotrap.html> erreichbar.

Des Weiteren wurde in Vorbereitung weiterer öffentlichkeitswirksamer Maßnahmen vom Fraunhofer IFF für das Projekt-CI ein Projektlogo entworfen und mit den Partnern abgestimmt.

Ziel der im gesamten Projektverlauf durchgeführten Maßnahmen der Öffentlichkeitsarbeit war es, Fachpublikum über die Arbeiten zu informieren und einen fachlichen Austausch zu den technischen Entwicklungen zu führen. Beispielhaft werden im Folgenden ausgewählte Aktivitäten und Ergebnisse vorgestellt.

- 31.3. bis 2.4.2022: Präsentation des Projekts DiMoTrap im Rahmen der 6. KWF-Thementage in Jessen / Sachsen-Anhalt an einem gemeinsamen Ausstellungsstand mit dem Landesforstbetrieb Sachsen-Anhalt. (Material: Projektflyer DiMoTrap)
- 11. bis 12. 10 2022, Göttingen: Posterpräsentation "Überwachung von Schadinsekten mittels automatisierter Pheromonfallen" im Rahmen des Waldklimafondskongresses (<https://www.waldklimafondskongress.de>). Das Poster ist als online-Publikation zur Session: Waldschadensmanagement - Forstschutz und Kalamitätsbewältigung unter

<https://www.waldklimafondskongress.de/posteraustellung/waldschadensmanagement> veröffentlicht. Diese Posterpräsentation ergänzend wurde seitens des IFF in der Workshop-Session "Waldschadensmanagement" ein Kurzvortrag zum Thema "Entwicklung automatisierter Pheromonfallen für die laufende Überwachung von forstschädlichen Schmetterlingsarten" gehalten.

- 18. bis 19.04.2023 Tagung Ressource Holz (Poster, Vortrag und Demonstration),
- 07. bis 08.08.2023 Workshop Projekt PherUbS / DiMoTrap (Vortrag und Freilanddemonstration),
- 11. bis 13.09.2023 Forstwissenschaftliche Tagung Dresden (Vortrag).
- 13.06.2024: Vortrag zum Projekt DiMoTrap: "Überwachung von Schadinsekten mittels automatisierter Pheromonfallen" im 9. Seminar Onlineseminar FNR in der Reihe „Digitalisierung Forst und Holz“ - Schädlingsmonitoring, Detektion von Sturmschäden und deren Bewältigung (https://veranstaltungen.fnr.de/fileadmin/Projekte/2022/RT_Digitalisierung/Seminarreihe/9_Waldschutz/3_DiMoTrap.pdf)
- Juni 2024: Präsentation des Vorhabens im Rahmen der KWF-Tagung. Auf dem Stand der NW-FVA wurden ein gemeinsam erstelltes Poster sowie ein vom Fraunhofer IFF vorbereitetes Rollup präsentiert. Auch auf dem Gemeinschaftsstand der forstlichen Landesbetriebe Sachsen-Anhalts mit dem IFF wurde auf das Projekt DiMoTrap mittels dieser Materialien hingewiesen.
- 2024: Erstellung eines Projektvideos durch das Fraunhofer IFF für die Rubrik „Forschung erklärt“, welches unter https://www.youtube.com/watch?v=giml0s_cwXM veröffentlicht ist.
 - 10. 2024: Presseinformation der Fraunhofer-Gesellschaft zum Projekt DiMoTrap in der Rubrik Forschung Kompakt (Erreichbar unter: <https://www.fraunhofer.de/de/presse/presseinformationen/2024/oktober-2024/automatisierte-pheromonfalle-fuer-forstschaedliche-schmetterlinge.html>)
- 21. und 22. 10 2024: Öffentliche Abschlusspräsentation (online) zum Projekt im Rahmen des FNR Statusseminars „Digitalisierung Forst und Holz“ (Aufzeichnung abrufbar unter <https://www.youtube.com/watch?v=UkgK-0RLPQY> und der Vortrag unter [https://veranstaltungen.fnr.de/fileadmin/Projekte/2022/RT_Digitalisierung/Statusseminar/2024_online/1_DiMoTrap_Pla %C5 %A1il.pdf](https://veranstaltungen.fnr.de/fileadmin/Projekte/2022/RT_Digitalisierung/Statusseminar/2024_online/1_DiMoTrap_Pla%C5%A1il.pdf))
- 22.10 2024 Projektpräsentation im Rahmen der Dienstberatung mit den Waldschutzbeauftragten Sachsen-Anhalts.

Eine Gesamtübersicht aller Maßnahmen der Öffentlichkeitsarbeit im Projekt, die primär das Ziel verfolgte, die Arbeiten und Ergebnisse potenziellen Nutzenden vorzustellen und die aufgrund der engen Vernetzung der Arbeiten der Projektpartner im Vorhaben DiMoTrap vielfach gemeinsam vorbereitet und umgesetzt wurden, sind dem gemeinsamen Abschlussbericht in den Ausführungen zu AP7 zu entnehmen.

Literatur- und Quellenverzeichnis

- AYAN, E., ERBAY, H. AND VARÇIN, F. (2020): CROP PEST CLASSIFICATION WITH A GENETIC ALGORITHM-BASED WEIGHTED ENSEMBLE OF DEEP CONVOLUTIONAL NEURAL NETWORKS, *COMPUT. ELECTRON. AGRICULTURE*, VOL. 179.
- BALLA, E., FLÓRIÁN, N., GERGÓCS, V., GRÁNICZ, L., TÓTH, F., NÉMETH, T., & DOMBOS, M. (2020). AN OPTO-ELECTRONIC SENSOR-RING TO DETECT ARTHROPODS OF SIGNIFICANTLY DIFFERENT BODY SIZES. *SENSORS*, 20(4), 982
- BENELLI, G., LUCCHI, A., THOMSON, D., IORIATTI, C. (2019): SEX PHEROMONE AEROSOL DEVICES FOR MATING DISRUPTION: CHALLENGES FOR A BRIGHTER FUTURE. *INSECTS* 10: 308.
- BJERGE, K., NIELSEN, J. B., SEPSTRUP, M. V., HELSING-NIELSEN, F., & HØYE, T. T. (2021): AN AUTOMATED LIGHT TRAP TO MONITOR MOTHS (LEPIDOPTERA) USING COMPUTER VISION-BASED TRACKING AND DEEP LEARNING. *SENSORS*, 21(2), 343.
- CARDE, R. T., MINKS, A. K. (1995): CONTROL OF MOTH PESTS BY MATING DISRUPTION: SUCCESSES AND CONSTRAINTS, *ANNUAL REVIEW OF ENTOMOLOGY* 40 (1): 559–585.
- CARDE, R. T., MINKS, A. K. (1995): CONTROL OF MOTH PESTS BY MATING DISRUPTION: SUCCESSES AND CONSTRAINTS, *ANNUAL REVIEW OF ENTOMOLOGY* 40 (1): 559–585.
- CARDIM FERREIRA LIMA, M., DAMASCENA DE ALMEIDA LEANDRO, M. E., VALERO, C., PEREIRA CORONEL, L. C., & GONÇALVES BAZZO, C. O. (2020): AUTOMATIC DETECTION AND MONITORING OF INSECT PESTS—A REVIEW. *AGRICULTURE*, 10(5), 161
- CHEN, M., CHEN, L., YI, T., ZHANG, R., XIA, L., QU, C., XU, G., WANG, W., DING, C., TANG, Q., & WU, M. (2023): DEVELOPMENT OF A LOW-POWER AUTOMATIC MONITORING SYSTEM FOR SPODOPTERA FRUGIPERDA (J. E. SMITH). *AGRICULTURE*, 13(4), 843
- DING, W., TAYLOR, G. (2016): AUTOMATIC MOTH DETECTION FROM TRAP IMAGES FOR PEST MANAGEMENT. *COMPUT. ELECTRON. AGRIC.*; 123:17–28.
- DODDS, K.J., ROSS, D.W. (2002): SAMPLING RANGE AND RANGE OF ATTRACTION OF DENDROCTONUS PSEUDOTSUGAE PHEROMONE-BAITED TRAPS. *CAN ENTOMOL* 134:343–355.
- DUNN, E., HOUGH-GOLDSTEIN, J., HANKS, L.M., MILLAR, J.G., D'AMICO, V. (2016): RANGE OF ATTRACTION OF PHEROMONE LURES AND DISPERSAL BEHAVIOR OF CERAMBYCID BEETLES. *ANN ENTOMOL SOC AM* 109(6):872–880.
- EVERINGHAM, M., ESLAMI, S.M.A., GOOL, L.V., WILLIAMS, C.K.I., WINN, J., ZISSERMAN, A. (2015): THE PASCAL, VISUAL OBJECT CLASSES CHALLENGE: A RETROSPECTIVE. *INT. J. COMPUT. VIS.*, 111, 98–136.
- FACELLO, A., CAVALLO, E. (2013): INSECTS REMOTE DETECTION IN PHEROMONES TRAPS. EFITA-WCCA-CIGR CONFERENCE. TURIN, ITALY, 24-27 JUNE 2013. 400-408.
- FLÓRIÁN, N., JÓSVAI, J. K., TÓTH, Z., GERGÓCS, V., SIPŐCZ, L., TÓTH, M., & DOMBOS, M. (2023). AUTOMATIC DETECTION OF MOTHS (LEPIDOPTERA) WITH A FUNNEL TRAP PROTOTYPE. *INSECTS*, 14(4), 381
- FUKATSU, T., WATANABE, T., HU, H., YOICHI, H., HIRAFUJI, M. (2012): FIELD MONITORING SUPPORT SYSTEM FOR THE OCCURRENCE OF LEPTOCORISA CHINENSIS DALLAS (HEMIPTERA: ALYDIDAE) USING SYNTHETIC ATTRACTANTS, FIELD SERVERS, AND IMAGE ANALYSIS. *COMPUT. ELECTRON. AGRIC.*, 80: 8-16.
- GOLDSHTEIN, E., COHEN, Y., HETZRONI, A., GAZIT, Y., TIMAR, D., ROSENFELD, L., GRINSHPON, Y., HOMAN, A., MIZRACH, A. (2017): DEVELOPMENT OF AN AUTOMATIC MONITORING TRAP FOR MEDITERRANEAN FRUIT FLY (CERATITIS CAPITATA) TO OPTIMIZE CONTROL APPLICATIONS FREQUENCY. *COMPUT. ELECTRON. AGRIC.*, 139, 115–125.
- GUARNIERI, A., MAINI, S., MOLARI, G., RONDELLI, V. (2011): AUTOMATIC TRAP FOR MOTH DETECTION IN INTEGRATED PEST MANAGEMENT. *B. INSECTOL.*; 64:247–251.

- HAACK, R.A., RABAGLIA, R.J. (2013): EXOTIC BARK AND AMBROSIA BEETLES IN THE USA: POTENTIAL AND CURRENT INVADERS. POTENTIAL INVASIVE PESTS OF AGRICULTURAL CROPS (ED. BY JE PENA), PP. 48–74. CABI, WALLINGFORD, UK.
- HANULA, J.L., MAYFIELD, A.E., REID, L.S., HORN, S. (2016): INFLUENCE OF TRAP DISTANCE FROM A SOURCE POPULATION AND MULTIPLE TRAPS ON CAPTURES AND ATTACK DENSITIES OF THE REDBAY AMBROSIA BEETLE (COLEOPTERA: CURCULIONIDAE: SCOLYTINAE). J ECON ENTOMOL 109:1196–1204.
- HOLGUIN, G.A., LEHMAN, B.L., HULL, L.A., CLEMENT, T., JONES, V.P., PARK, J. (2010): ELECTRONIC TRAPS FOR AUTOMATED MONITORING OF INSECT POPULATIONS. IFAC PROCEEDINGS VOLUMES.; 43(26):49-54.
- HUANG, R., YAO, T., ZHAN, C., ZHANG, G. AND ZHENG, Y. (2021): A MOTOR-DRIVEN AND COMPUTER VISION-BASED INTELLIGENT E-TRAP FOR MONITORING CITRUS FLIES. AGRICULTURE, VOL. 11, NO. 5
- IORIATTI, C., LUCCHI, A. (2016): SEMIOCHEMICAL STRATEGIES FOR TORTRICID MOTH CONTROL IN APPLE ORCHARDS AND VINEYARDS IN ITALY. J. CHEM. ECOL. 42, 571–583.
- IORIATTI, C., LUCCHI, A., VARELA, L.G. (2012): GRAPE BERRY MOTHS IN WESTERN EUROPEAN VINEYARDS AND THEIR RECENT MOVEMENT INTO THE NEW WORLD. IN ARTHROPOD MANAGEMENT IN VINEYARDS: PESTS, APPROACHES, AND FUTURE DIRECTIONS; BOSTANIAN, N.J., VINCENT, C., ISAACS, R., EDS.; SPRINGER: BERLIN/HEIDELBERG, GERMANY; PP. 339–359.
- JIANG J.A., TSENG C.L., LU F.M., YANG E.C., WU Z.S., CHEN C.P., LIN H., LIN K.C., LIAO C.S.– A (2008): GSM-BASED REMOTE WIRELESS AUTOMATIC MONITORING SYSTEM FOR FIELD INFORMATION: A CASE STUDY FOR ECOLOGICAL MONITORING OF THE ORIENTAL FRUIT FLY, BACTROCERA DORSALIS (HENDEL). COMPUT. ELECTRON. AGR.; 63:243–259.
- KALAMATIANOS, R., KARYDIS, I., DOUKAKIS, D., AVLONITIS, M. (2018): DIRT: THE DACUS IMAGE RECOGNITION TOOLKIT. J. IMAGING.; 4 (129). DOI:10.3390/JIMAGING4110129
- KAMILARIS, A. AND PRENAFETA-BOLDÚ, F. X. (2018): DEEP LEARNING IN AGRICULTURE: A SURVEY. COMPUT. ELECTRON. AGRICULTURE, VOL. 147, PP. 70–90
- KONDO, A., SANO, T., TANAKA, F. (1994): AUTOMATIC RECORD USING CAMERA OF DIEL PERIODICITY OF PHEROMONE TRAP CATCHES. JPN. J. APPL. ENTOMOL. Z., 38(3): 197-199.
- KSHETRI, N. (2016). THE ECONOMICS OF THE INTERNET OF THINGS IN THE GLOBAL SOUTH. THIRD WORLD QUARTERLY, 38(2), 311–339.
- LECUN, Y., BENGIO, Y., HINTON, G. (2015): DEEP LEARNING. NATURE, 521, 436.
- LI, Y., WANG, H., DANG, L.M, SADEGHI-NIARAKI, A. AND MOON, H. (2020): CROP PEST RECOGNITION IN NATURAL SCENES USING CONVOLUTIONAL NEURAL NETWORKS,” COMPUT. ELECTRON. AGRICULTURE, VOL. 169
- LIU, C., ZHAI, Z., ZHANG, R., BAI, J. AND ZHANG, M. (2022): FIELD PEST MONITORING AND FORECASTING SYSTEM FOR PEST CONTROL FRONT. PLANT SCI., VOL. 13
- LUCCHI, A., SAMBADO, P., JUAN ROYO, A.B., BAGNOLI, B., BENELLI, G. (2018): LOBESIA BOTRANA MALES MAINLY FLY AT DUSK: VIDEO CAMERA-ASSISTED PHEROMONE TRAPS AND IMPLICATIONS FOR MATING DISRUPTION. J. PEST SCI. 91, 1327–1334.
- MA, L., LIU, Y., ZHANG, X., YE Y., YIN, G. AND JOHNSON B.A. (2019): DEEP LEARNING IN REMOTE SENSING APPLICATIONS: A META-ANALYSIS AND REVIEW. ISPRS J. PHOTOGRAMMETRY REMOTE SENS., VOL. 152, PP. 166–177
- MOLINA-ROTGER, M., MORÁN, A., MIRANDA, M. A. AND ALORDA-LADARIA, B. (2023): REMOTE FRUIT FLY DETECTION USING COMPUTER VISION AND MACHINE LEARNING BASED ELECTRONIC TRAP. FRONT. PLANT SCI, VOL. 14
- NESTEL, D., COHEN, Y., SHAKED, B., ALCHANATIS, V., NEMNY-LAVY, E., MIRANDA, M.A., SCIARRETTA, A., PAPADOPOULOS, N.T. (2019): AN INTEGRATED DECISION SUPPORT SYSTEM FOR ENVIRONMENTALLY-FRIENDLY MANAGEMENT OF THE ETHIOPIAN FRUIT FLY IN GREENHOUSE CROPS. AGRONOMY, 9, 459.

- OKUYAMA, T., YANG, E., CHEN, C., LIN, T., CHUANG, C., JIANG, J. (2011): USING AUTOMATED MONITORING SYSTEMS TO UNCOVER PEST POPULATION DYNAMICS IN AGRICULTURAL FIELDS. *AGRIC. SYST.*, 104, 666–670.
- PASSIAS, A., TSAKALOS, K., RIGOGIANNIS, N., VOGLITSIS, D., PAPANIKOLAOU, N., MICHALOPOULOU, M., BROUFAS, G., & SIRAKOULIS, G.C. (2024): INSECT PEST TRAP DEVELOPMENT AND DL-BASED PEST DETECTION: A COMPREHENSIVE REVIEW. *IEEE TRANSACTIONS ON AGRIFOOD ELECTRONICS*, 2, 323-334.
- PATTNAIK, G., SHRIVASTAVA, V.K. AND PARVATHI, K. (2020): TRANSFER LEARNING-BASED FRAMEWORK FOR CLASSIFICATION OF PEST IN TOMATO PLANTS,” *APPL. ARTIF. INTELL.*, VOL. 34, NO. 13, PP. 981–993
- POLAND, T.M., RASSATI, D. (2019): IMPROVED BIOSECURITY SURVEILLANCE OF NON-NATIVE FOREST INSECTS: A REVIEW OF CURRENT METHODS. *J PEST SCI* 92, 37–49.
- POTAMITIS I, RIGAKIS I. (2015): SMART TRAPS FOR AUTOMATIC REMOTE MONITORING OF RHYNCHOPHORUS FERRUGINEUS (COLEOPTERA: CURCULIONIDAE) *PEERJ PREPRINTS* 3: E1337V1 [HTTPS://DOI.ORG/10.7287/PEERJ.PREPRINTS.1337V1](https://doi.org/10.7287/peerj.preprints.1337v1).
- POTAMITIS, I., ELIOPOULOS, P., RIGAKIS, I. (2017): AUTOMATED REMOTE INSECT SURVEILLANCE AT A GLOBAL SCALE AND THE INTERNET OF THINGS. *ROBOTICS*, 6, 19.
- PRETI, M., VERHEGGEN, F., AND ANGELI, S. (2021): INSECT PEST MONITORING WITH CAMERA-EQUIPPED TRAPS: STRENGTHS AND LIMITATIONS. *J. PEST SCI.* VOL. 94, NO. 2, PP. 203–217
- PRIYA, C.T., PRAVEEN, K., SRIVIDYA, A. (2013): MONITORING OF PEST INSECT TRAPS USING IMAGE SENSORS AND DSPIC. *INT. J. ENG. TRENDS TECH.*, 4 (9): 4088-4093.
- RAMALINGAM, B., MOHAN, R. E., POOKKUTTATH, S., GÓMEZ, B. F., SAIRAM BORUSU, C. S. C., WEE TENG, T., AND TAMILSELVAM, Y. K. (2020): REMOTE INSECTS TRAP MONITORING SYSTEM USING DEEP LEARNING FRAMEWORK AND IOT. *SENSORS* 20(18), 5280
- RASSATI, D., FACCOLI, M., CHINELLATO, F., HARDWICK, S., SUCKLING, D.M., BATTISTI, A. (2016): WEB-BASED AUTOMATIC TRAPS FOR EARLY DETECTION OF ALIEN WOOD-BORING BEETLES. *ENTOMOL. EXP. APPL.*; 160(1):91-95.
- RIGAKIS, I.I., VARIKOU, K.N., NIKOLAKAKIS, A.E., SKARAKIS, Z.D., TATLAS, N.A. AND POTAMITIS, I.G. (2021): THE E-FUNNEL TRAP: AUTOMATIC MONITORING OF LEPIDOPTERA, A CASE STUDY OF TOMATO LEAF MINER. *COMPUTERS AND ELECTRONICS IN AGRICULTURE*, VOLUME 185
- SCHLYTER (1992): SAMPLING RANGE, ATTRACTION RANGE, AND EFFECTIVE ATTRACTION RADIUS: ESTIMATES OF TRAP EFFICIENCY AND COMMUNICATION DISTANCE IN COLEOPTERAN PHEROMONE AND HOST ATTRACTANT SYSTEMS. *J. APPL. ENT.* 114: 439-454.
- SCHRADER, M.J., SMYTHEMAN, P., BEERS, E.H., KHOT, L.R. (2022): AN OPEN-SOURCE LOW-COST IMAGING SYSTEM PLUG-IN FOR PHEROMONE TRAPS AIDING REMOTE INSECT PEST POPULATION MONITORING IN FRUIT CROPS. *MACHINES*, 10, 5
- SCHWERDTFEGER, F. (1970): DIE WALDKRANKHEITEN. EIN LEHRBUCH DER FORSTPATHOLOGIE UND DES FORSTSCHUTZES. VERLAG PAUL PAREY, HAMBURG UND BERLIN. 509 S.
- SCIARRETTA, A., CALABRESE, P. (2019): DEVELOPMENT OF AUTOMATED DEVICES FOR THE MONITORING OF INSECT PESTS. *CURR AGRI RES*; 7(1).
- SEVERTSON, D., CONGDON, B.S., VALENTINE, C. (2018): APPS, TRAPS AND LAMP’S: ‘SMART’ IMPROVEMENTS TO PEST AND DISEASE MANAGEMENT. IN *PROCEEDINGS OF THE 2018 GRAINS RESEARCH UPDATES*, PERTH, AUSTRALIA, 26 FEBRUARY 2018; GRAINS RESEARCH AND DEVELOPMENT CORPORATION: BARTON, AUSTRALIA; P. 71.
- SHAKED, B., AMORE, A., IOANNOU, C., VALDÉS, F., ALORDA, B., PAPANASTASIOU, S., GOLDSSTEIN, E., SHENDERREY, C., LEZA, M., PONTIKAKOS, C., PERDIKIS, D., TSILIGIRIDIS, T., TABILIO, M. R., SCIARRETTA, A., BARCELÓ, C., ATHANASSIOU, C., MIRANDA, M. A., ALCHANATIS, V., PAPADOPOULOS, N., NESTEL, D. (2017): ELECTRONIC TRAPS FOR DETECTION AND POPULATION MONITORING OF ADULT FRUIT FLIES (DIPTERA: TEPHRITIDAE). *JOURNAL OF APPLIED ENTOMOLOGY*. 1-9.

- SHIEH, J.C., WANG, J. Y., LIN, T.S., LIN, C.H., YANG, E.C., TSAI, Y.J., JIANG, J.A. (2011): A GSM-BASED FIELD MONITORING SYSTEM FOR SPODOPTERA LITURA (FABRICIUS). ENGINEERING IN AGRICULTURE, ENVIRONMENT AND FOOD 4: 77-82.
- SHUMAN, D., COEFFELT, J.A., WEAVER, D.K. (1996): A COMPUTER-BASED ELECTRONIC FALL-THROUGH PROBE INSECT COUNTER FOR MONITORING INFESTATION IN STORED PRODUCTS, TRAN. AM. SOC. AGRIC. ENG. 39(5):1773-1780.
- SUTO, J. (2022). A NOVEL PLUG-IN BOARD FOR REMOTE INSECT MONITORING. AGRICULTURE. 12. 1897
- TABUCHI, K., MORIYA, S., MIZUTANI, N., ITO, K. (2006): RECORDING THE OCCURRENCE OF THE BEAN BUG RIPTORTUS CLAVATUS (THUNBERG) (HETEROPTERA: ALYDIDAE) USING AN AUTOMATIC COUNTING TRAP. JPN. J. APPL. ENTOMOL. ZOO.; 50: 123–129.
- THULASI PRIYA, C., PRAVEEN, K., SRIVIDYA, A. (2013): MONITORING OF PEST INSECT TRAPS USING IMAGE SENSORS & DSPIC. INT. J. ENG. TRENDS TECH. 4 (9):4088-4093.
- TÓTH, Z., TÓTH, M., JÓSVAI, J.K., TÓTH, F., FLÓRIÁN, N., GERGÓCS, V. AND DOMBOS, M. (2020): AUTOMATIC FIELD DETECTION OF WESTERN CORN ROOTWORM (DIABROTICA VIRGIFERA VIRGIFERA, COLEOPTERA: CHRYSOMELIDAE) WITH A NEW PROBE. INSECTS. 11(8):486
- ÜNLÜ, L., AKDEMİR, B., ÖGÜR, E., ŞAHİN, İ. (2019): REMOTE MONITORING OF EUROPEAN GRAPEVINE MOTH, LOBESIA BOTRANA (LEPIDOPTERA: TORTRICIDAE) POPULATION USING CAMERA-BASED PHEROMONE TRAPS IN VINEYARDS. TURKISH JOURNAL OF AGRICULTURE - FOOD SCIENCE AND TECHNOLOGY, 7(4): 652-657.
- UPADHYAY, A.J., INGOLE, P.V. (2014): AUTOMATIC MONITORING OF PEST INSECTS TRAPS USING IMAGE PROCESSING. INDONES. J. ELEC. ENG. COMPUT. SCI., 12(8): 5779-5783.
- WELSH, T. J., BENTALL, D., KWON, C., & MAS, F. (2022). AUTOMATED SURVEILLANCE OF LEPIDOPTERAN PESTS WITH SMART OPTOELECTRONIC SENSOR TRAPS. SUSTAINABILITY, 14(15), 9577
- WELTER, S., PICKEL, C., MILLAR, J., CAVE, F., VAN STEENWYK, R., DUNLEY, J. (2005): PHEROMONE MATING DISRUPTION OFFERS SELECTIVE MANAGEMENT OPTIONS FOR KEY PESTS. CALIF. AGRIC. 59, 16–22.
- WILSON, BLAKE EMERSON, "MEXICAN RICE BORER (EOREUMA LOFTINI) PHEROMONE TRAP EFFICACY AND ROLE IN INVASIVE SPECIES MONITORING AND PEST MANAGEMENT" (2016). LSU DOCTORAL DISSERTATIONS. 2640. [HTTPS://DIGITALCOMMONS.LSU.EDU/GRADSCHOOL_DISSERTATIONS/2640](https://digitalcommons.lsu.edu/gradschool_dissertations/2640).
- WITZGALL, P., KIRSCH, P., CORK, A. (2010): SEX PHEROMONES AND THEIR IMPACT ON PEST MANAGEMENT, JOURNAL OF CHEMICAL ECOLOGY 36 (1): 80–100.
- WYATT, T.D. (2017): PHEROMONES. CURR BIOL 27: R739–R743.
- XIE, C., WANG, R., ZHANG, J., CHEN, P., LI, R., CHEN, T., CHEN, H. (2018): MULTI-LEVEL LEARNING FEATURES FOR AUTOMATIC CLASSIFICATION OF FIELD CROP PESTS. COMPUT. ELECTRON. AGRIC. 152, 233–241.
- XIE, C., ZHANG, J., LI, R., LI, J., HONG, P., XIA, J., CHEN, P. (2015): AUTOMATIC CLASSIFICATION FOR FIELD CROP INSECTS VIA MULTIPLE-TASK SPARSE REPRESENTATION AND MULTIPLE-KERNEL LEARNING. COMPUT. ELECTRON. AGRIC. 119, 123–132.
- YALCIN, H. (2015): VISION BASED AUTOMATIC INSPECTION OF INSECTS IN PHEROMONE TRAPS. 2015 FOURTH INTERNATIONAL CONFERENCE ON AGRO-GEOINFORMATICS (AGRO-GEOINFORMATICS), ISTANBUL, PP. 333-338.

Abbildungsverzeichnis

Abbildung 1: Die Zielarten im Projekt PherUbS/DiMoTrap: Schwammspinner (A), Nonne (B), Kleiner Frostspanner (C), Kiefernspinner (D), Forleule (E) und Weißgrauer Breitflügelspanner (F)	13
Abbildung 2: Übersicht über (verfahrens-)technische Ansätze für die Pheromonabgabe (Arbeitsstand zum Locken der Schädlinge)	14
Abbildung 3: Übersicht über (verfahrens-)technische Ansätze für die das Zählen der Fänge (Arbeitsstand)	14
Abbildung 4: Beispiel - Möglichkeiten und Grenzen (foto-)optischer Verfahren zum Zählen von Fängen	14
Abbildung 5: Im Rahmen der laufenden Überwachung forstlicher Schadschmetterlinge etablierte Pheromon-Dispenser	16
Abbildung 6: Innerhalb der ursprünglichen Projektlaufzeit verfügbare Versuchszeiträume im Freiland für die Schmetterlingsarten Forleule, Schwammspinner, Nonne, Kiefernspinner, Kleiner Frostspanner und Breitflügelspanner	24
Abbildung 7: Innerhalb der erweiterten Projektlaufzeit verfügbare Versuchszeiträume im Freiland für die Schmetterlingsarten Forleule, Schwammspinner, Nonne, Kiefernspinner, Kleiner Frostspanner und Breitflügelspanner	24
Abbildung 8: Bartels mikrotechnik Pumpe mp6 mit Entwicklungsboard	27
Abbildung 9: Entwurf einer Versuchsanordnung zur Pheromonabgabe	27
Abbildung 10: Versuchsanordnung zur Pheromonabgabe: Automatischer Köderwechsel-Mechanismus (links), Manueller Köderwechsel-Mechanismus (rechts)	28
Abbildung 11: Entwurf einer Versuchsanordnung zur Pheromonabgabe mittels Blistersystem (beispielhafte Darstellung)	30
Abbildung 12: Schematische Darstellung der Versuchsanordnung Zählsensorik	31
Abbildung 13: Konstruktive Anordnung der Sensorik als Zwischenmodul der Variotrap-Trichterfalle	31
Abbildung 14: Versuchskonzept für das Zählmodul im Jahr 2022	32
Abbildung 15: Anordnung Emitter und Receiver (A), Sensorzählmodul (B)	33
Abbildung 16: Alvium 1800 (Allied Vision)	33
Abbildung 17: Systemkonzept für Datenakquirierungs- und Speichermodule	33
Abbildung 18: Einschaltzeit und -verhalten Lichtschrankenebene nach Versorgungsspannungsaktivierung (Lichtschranke frei)	34
Abbildung 19: Einschaltzeit und -verhalten Lichtschrankenebene nach Versorgungsspannungsaktivierung (Lichtschranke belegt)	35
Abbildung 20: Anteile von Standby und Vollast am Gesamtenergiebedarf	35
Abbildung 21: Szenarien zur Darstellung der Verhältnisse zwischen Standby- und Vollastbetrieb	36
Abbildung 22: Betriebszeit des digitalen Fallensystems' in Abhängigkeit des durchschnittlichen praktischen Nettowirkungsgrads eines Solarpanels (25 W Nennleistung)	36
Abbildung 23: Technischer Entwurf für einen Versuchsaufbau zur Ertragsmessung von Solarpaneele im Wald	37
Abbildung 24: Überarbeiteter technischer Entwurf für einen Versuchsaufbau zur Ertragsmessung von Solarpaneele im Wald	37
Abbildung 25: Restladung im Akkumulator (März bis Mai, 30 W Solarpanel, 25,6 mW Laderegler) 2023	39
Abbildung 26: Solarertrag abzüglich des Energiebedarfs des Ladereglers 2023	42
Abbildung 27: Solarertrag verschiedener Nennleistungen des Solarpanels abzüglich Eigenverbrauch Gesamtenergiebedarf	42
Abbildung 28: Akkuladestatus über den Fangzeitraum 2024	45
Abbildung 29: Weitere Ansätze für mechanische Verfahren zum Abtöten der Zielspezies nach dem Fang	46
Abbildung 30: Ideenskizze eines Mechanismus zum Leeren der Falle	47
Abbildung 31: Versuchsaufbau zur Bestimmung der Abgabemengen	52
Abbildung 32: Funktionsmuster zur Abgabe von Flüssigpheromon	52
Abbildung 33: Tank, Pumpe und Rückschlagventil inkl. Schlauchsystem zur Abgabe von flüssigen Pheromonen	53
Abbildung 34: Docht für flüssige Pheromonabgabe	54
Abbildung 35: Blisterreservoir mit vier Ködern	55
Abbildung 36: Automatischen Pheromonköderabgabe (links Modell, rechts im Freilandversuch)	55
Abbildung 37: Falle mit manuellem Köderkarussell im Freilandversuch	56
Abbildung 38: Verformter Deckel des automatischen Festködermoduls der ersten Generation	56
Abbildung 39: Modul zur automatischen Abgabe von Festködern	57
Abbildung 40: Handgelöteter Aufbau des Sensormoduls auf Lochrasterplatinen	58

Abbildung 41: SMD-Bestückte Zählmodulplatinen (A), Im Versuchsmuster verbaute Platinen (B)	58
Abbildung 42: Fallenüberzug - Variante 1 (A), Fallenüberzug - Variante 2 (B), Fallenüberzug – Variante 3 (C)	58
Abbildung 43: Kamera in IP65-Gehäuse auf Stativ (oben)	59
Abbildung 44: Elektronikmodule im IP65-Gehäuse - Draufsicht (A), Frontansicht (B)	60
Abbildung 45: Großes Multi-Akku-Pack für kamerabasierte Zählfälle	60
Abbildung 46: Batteriekasten mit KFZ-Akkumulator und Spannungswächter	60
Abbildung 47: Zeltversuch	61
Abbildung 48: Fallensystem mit Zählmechanismus und Kameraüberwachung in Kiefernbestand	62
Abbildung 49: Fallenaufbau Zählfalle in Kiefernbestand (A), Elektronikmodul für Zählfalle (B)	62
Abbildung 50: Software-Tool zur Analyse des Anflugverhaltens und zur Auswertung von Zählereignissen	63
Abbildung 51: Technischer Entwurf eines Messsystems zum Messen und Loggen solarer Leistung	63
Abbildung 52: Messsystem Solarertrag im Wald: (A) Gesamtansicht, (B) Nahaufnahme	64
Abbildung 53: Laborversuch Abtötung: Versuchsaufbau elektrische Abtötung, vertikale Ausrichtung der Testgeräte	66
Abbildung 54: Laborversuch Abtötung: Elektrische Abtötung ohne Sicherheitsgitter	66
Abbildung 55: Virtuelle Darstellung des Funktionsmusters zum mechanischen Abtöten	68
Abbildung 56: Versuchsaufbau Abtöten der Zielorganismen mittels rotierender Klinge	68
Abbildung 57: Versuchsaufbau zum Entleeren des Fallenbehälters	69
Abbildung 58: Softwaretool für die Kommunikation mit der Falle – Hauptansicht	71
Abbildung 59: Softwaretool für die Kommunikation mit der Falle - Konfigurationsansicht	71
Abbildung 60: Langlock Dosierfläschchen	73
Abbildung 61: Versuchsstandort Bramwald	74
Abbildung 62: Versuchsanlage Weißgrauer Breitflügelspanner 2023: Plot 1 (links), Plot 2 (rechts)	74
Abbildung 63: Versuchsaufbau Laborversuch Versuchsmuster Mikropumpe	75
Abbildung 64: Freilandversuch mit Schwammspinner-Zuchtorganismen - Skizze der Versuchsanlage	76
Abbildung 65: Kartenausschnitt Versuchsflächen Forstamt Wetzlar, Revier Solms	78
Abbildung 66: Versuchsdesign 2023 Versuchsteil "Mikropumpe", FA Wetzlar, Revier Solms	79
Abbildung 67: Versuchsdesign Versuchsteil „Digitale Zählfalle FA Wetzlar, Revier Solms	80
Abbildung 68: Anfahrtsskizze Versuchsfläche Gemeiner Frostspanner, FA Reinhardshagen, Revier Beberbeck	81
Abbildung 69: Versuchsaufbau Gemeiner Frostspanner 2023, Forstamt Reinhardshagen, Revier Beberbeck	82
Abbildung 70: Allgemeiner Versuchsaufbau der in 2024 durchgeführten Freilandversuche	83
Abbildung 71: Versuchsstandorte für die Forleule im Forstamt Uelzen, Bezirksförsterei Suderburg	84
Abbildung 72: Versuchsstandort für die Nonne im Forstamt Nordöstliche Altmark, Revier Bretsch	85
Abbildung 73: Versuchsstandort für den Kleinen Forstspanner im Forstamt Reinhardshagen, Revier Sababurg (Plot1) und Revier Beberbeck (Plot2)	85
Abbildung 74: Testanordnung Freifeldtest auf dem Dach Fraunhofer Gebäude Sandtorstrasse	87
Abbildung 75: Zeitliche Verzögerung des Lichtschrankensignals vom IR-Receiverausgang (hellblau) zum Mikrocontrollereingang (gelb)	88
Abbildung 76: Überspringen und gedämpftes Schwingen am Mikrocontrollereingang (gelb)	88
Abbildung 77: Zählmodul der 2. Generation inkl. Platinen	89
Abbildung 78: Falle der 2. Generation mit zwei Ebenen	90
Abbildung 79: rechts: Zählfalle der 3.Generation (ohne Wetterschutz und oberem Einflugtrichter), links: Vollfunktionsfähige Zählfalle der 3. Generation mit Wetterschutz und allen Modulen.	90
Abbildung 80: Boxplots der Falterfänge in der Spezies Nonne im Bereich Altmark 2022: Falterfänge der Fallenvarianten "Standard-Variotrap-Trichterfalle", "Manueller Pheromonköderwechsel", "Automatischer Pheromonköderwechsel" und "Zählfalle"	91
Abbildung 81: Fangverlaufsdiagramm 2022 der Versuchsmuster mit Pheromonköderwechsel (rot) im Vergleich zur Standard-Variotrap-Trichterfalle in der Spezies Nonne im Bereich Altmark	92
Abbildung 82: Fangverlaufsdiagramm 2022 der Versuchsmuster mit Pheromonköderwechsel (rot) im Vergleich zur Standard-Variotrap-Trichterfalle	92
Abbildung 83: Ergebnisse der Bestimmungsarbeiten hinsichtlich der als Beifang in Schwammspinner-Pheromonfallen aufgefundenen Arthropodenordnungen im Stadtwald Halle	93
Abbildung 84: Ergebnisse der Bestimmungsarbeiten hinsichtlich der als Beifang in Pheromonfallen des Nonnenfalters aufgefundenen Arthropodenordnungen in der Altmark in Sachsen-Anhalt 2022	94

Abbildung 85: Ergebnisse des Laborversuchs elektrische Abtötung: Toter Schwammspinnerfalter mit verschmorten Gliedmaßen (A), Toter Schwammspinnerfalter mit Brandstelle am Thorax (B, roter Pfeil)	95
Abbildung 86: Pheromonfallenfänge Breitflügelspanner FA Münden, Revier Kattenbühl 2023	96
Abbildung 87: Beifänge aus Breitflügelspannerfallen FA Münden, Revier Kattenbühl 2023	97
Abbildung 88: Pheromonfallenfänge Schwammspinner FA Wetzlar, Revier Solms 2023, Mikropumpe	98
Abbildung 89: Pheromonfallenfänge Schwammspinner FA Wetzlar, Revier Solms 2023, Zählfallen	99
Abbildung 90: Beifänge aus Schwammspinnerfallen FA Wetzlar, Revier Solms 2023	100
Abbildung 91: Pheromonfallenfänge Kleiner Frostspanner FA Reinhardshagen, Revier Beberbeck 2023, Zählfallen	101
Abbildung 92: Beifänge aus Frostspannerfallen FA Reinhardshagen, Revier Beberbeck 2023	101
Abbildung 93: Fänge männlicher Falter des Weißgrauen Breitflügelspanners in Pheromonfallen im FA Münden, Revier Kattenbühl 2024	103
Abbildung 94: Beifänge (auf familienebene Bestimmt) aus Weißgrauen Breitflügelspannerfallen im FA Münden, Revier Kattenbühl 2024	104
Abbildung 95: Beifänge (auf familienebene Bestimmt) aus Forleulenfallen FA Uelzen, Bezirksförsterei Suderburg 2024	105
Abbildung 96: Fänge männlicher Falter des Schwammspinners in Pheromonfallen im FA Wetzlar, Revier Solms 2024	106
Abbildung 97: Vergleich der händischen Auszählung mit dem Algorithmus der Falle	107
Abbildung 98: Fangzeiten des Schwammspinners im Tagesverlauf über die Fangperiode 2024	107
Abbildung 99: Beifänge (auf familienebene Bestimmt) aus Schwammspinnerfallen FA Wetzlar, Revier Solms 2024	108
Abbildung 100: Fänge männlicher Falter der Nonne in Pheromonfallen im FA Nordöstliche Altmark, Revier Bretsch 2024	109
Abbildung 101: Vergleich der händischen Auszählung mit dem Algorithmus der Falle	110
Abbildung 102: Fangzeiten der Nonne im Tagesverlauf über die Fangperiode 2024	110
Abbildung 103: Beifänge (auf familienebene Bestimmt) aus Nonnenfallen FA Nordöstl. Altmark, Revier Bretsch 2024	111
Abbildung 104: Fänge männlicher Falter des Kleinen Frostspanners in Pheromonfallen im FA Reinhardshagen, Reviere Beberbeck und Sababurg 2024	112
Abbildung 105: Beifänge (auf familienebene Bestimmt) aus Frostspannerfallen FA Reinhardshagen, Reviere Beberbeck und Sababurg 2024	113
Abbildung 106: Messwerte Solarleistung im Wald	114
Abbildung 107: Solare Leistung und kumulierte Energie am 21.10.22 am Fallenstandort	114
Abbildung 108: Tagessumme des Solarertrags laut eigener Messungen über Tagessumme der Globalstrahlung	115
Abbildung 109: Verlauf des Akkuladestands unter Einsatz eines Solarpanels	116
Abbildung 110: Beispielaufbau eines BLE-Netzwerks und zentralem Gateway mit LPWAN-Uplink	125
Abbildung 111: Finales Projektlogo PherÜbs (DiMoTrap)	128
Abbildung 112: Zielgruppenansprache mit dem DiMoTrap-Projektflyer auf den KWF-Thementagen in Jessen	128
Abbildung 113: Posterpräsentation zum Projekt auf dem Waldklimafondskongress 2022	129
Abbildung 114: Poster 1: "Entwicklung automatisierter Pheromonfallen" (NW-FVA, links) und Poster 2: "Überwachung von Schadinsekten mittels automatisierter Pheromonfallen" (IFF, rechts)	129
Abbildung 115: Poster Entwicklung einer automatisierten Pheromonfalle zur Überwachung forstschädlicher Schmetterlingsarten	131
Abbildung 116: Pressemitteilung in der Rubrik "Forschung kompakt"	132

Tabellenverzeichnis

Tabelle 1: Überwachungszeiträume im Freiland und Verfügbarkeit von Versuchstieren sowie zum Versuchszeitpunkt am Markt verfügbare, artspezifische Pheromone und Pheromonköder	25
Tabelle 2: Parameter für die Kalkulation der Restladung im Akkumulator im Jahresverlauf	39
Tabelle 3: Minima der Restladung im Akkumulator (Laderegler 102,4 mW, März bis Mai) 2023	40
Tabelle 4: Minima der Restladung im Akkumulator (Laderegler 25,6 mW, März bis Mai) 2023	40
Tabelle 5: Minima der Restladung im Akkumulator (Laderegler 102,4 mW, Juli bis September) 2023	40
Tabelle 6: Minima der Restladung im Akkumulator (Laderegler 25,6 mW, Juli bis September) 2023	40
Tabelle 7: Erläuterungshilfe zum Solarertrag 2023	41
Tabelle 8: Potenziell geeignete Kombinationen hinsichtlich Solarpanel und Akkumulator 2022	43
Tabelle 9: Parameter für die Kalkulation der Restladung im Akkumulator im Jahresverlauf 2024	43
Tabelle 10: Minima der Restladung im Akkumulator (Laderegler 102,4 mW, März bis Mai) 2024	43
Tabelle 11: Minima der Restladung im Akkumulator (Laderegler 25,6 mW, März bis Mai) 2024	44
Tabelle 12: Minima der Restladung im Akkumulator (Laderegler 102,4 mW, Juli bis September) 2024	44
Tabelle 13: Minima der Restladung im Akkumulator (Laderegler 25,6 mW, Juli bis September) 2024	44
Tabelle 14: Potenziell geeignete Kombinationen hinsichtlich Solarpanel und Akkumulator 2024	45
Tabelle 15: Laufzeit des Fallensystems ohne Solarertrag (bei 225,6 mW Leistungsaufnahme)	45
Tabelle 16: Zyklisch ablaufende Teilroutinen auf dem Datenakquirierungsmodul	61
Tabelle 17: Ausgewählte, im Rahmen von Versuchen der modularen Einzelkomponenten gewonnene Erkenntnisse und Lösungsansätze im Jahr 2022	86
Tabelle 18: Übersicht der dominanten Familien für die drei Versuchsplots in der Spezies Schwammspinner im Stadtwald Halle 2022	93
Tabelle 19: Übersicht der dominanten Familien für die drei Versuchsplots in der Spezies Nonne in der Altmark 2022	93
Tabelle 20: Messwerte Solarerträge und DWD-Daten zur Globalstrahlung	115
Tabelle 21: Niedrigster Akkuladestatus unter Einsatz von Solarpaneele (Fangzeitraum März, April, Mai)	116
Tabelle 22: Niedrigster Akkuladestatus unter Einsatz von Solarpaneele (Fangzeitraum Jul, Aug, Sep)	116
Tabelle 23: Übersicht Pheromonfallenüberwachung forstschädlicher Schmetterlingsarten im Überwachungsraum der NW-FVA, Bayern und Sachsen	126