

EPS.L1-L2.Detektion

Der Eichenprozessionsspinner (*Thaumetopoea processionea*, EPS) stellt in deutschen Kommunen eine wachsende Herausforderung dar. Bestehende Bekämpfungsverfahren setzen zu spät an – sie beginnen nach der Ausbildung gesundheitsgefährdender Brennhaare ab Larvenstadium L3. Dieses Konzeptpapier stellt ein integriertes Vorwarnsystem vor, ein drohnengestütztes VOC (Volatile Organic Compounds ; BVOC - Biogenic Volatile Organic Compounds) Frühwarnsystem auf Basis des Bosch BME688-Sensors zur Detektion herbivoren-induzierter Pflanzenvolatile (HIPVs) bereits in den EPS Larvenstadien L1–L2. Das System erlaubt erstmals ein Eingreifen vor der Brennhaarahase ab L3 und ist in kommunale Planungsstrukturen sowie bestehende Monitoringdatenbanken (FVA-BW) integrierbar.

Phänologisches Bekämpfungsfenster der EPS L1-L2 Phase

Die EPS Raupen schlüpfen zu Beginn der Vegetationszeit zwischen März und Mai (L1). Ab dem dritten Larvenstadium (L3) bilden die Raupen gesundheitsgefährdende Brennhaare aus. In der L1–L2 Phase, sind die EPS Nester noch klein, haben eine schlechte Thermosignatur und sind daher z.B. thermisch nicht zu orten.

Gassensoren (e-nose - E-Nase), die auf spezifische Monoterpene abzielen, werden aktuell in der Forstwirtschaft schon zur Erkennung holzbohrender Borkenkäfer eingesetzt. Studien haben gezeigt, dass Eichenbefall die VOC-Profile und die flüchtigen Stoffe in den grünen Blättern befallener Eichen im Vergleich zu gesunden Eichen subtil verändert, diese Emissionen jedoch hochkomplex sind. Es wird sehr stark vermutet, dass Eichen unter Stress, z.B. EPS Fraß, komplexe Gemische flüchtiger organischer Verbindungen (VOC - volatile organic compound) emittieren, darunter Monoterpene und Isopren. Obwohl elektronische Nasen oder spezielle Gassensortechnologien für die allgemeine Baumschädlingsüberwachung erforscht wurden, stellen sie noch keine standardisierte, kommerzielle Methode zur Identifizierung von Eichenholz dar.

Es stellt sich jetzt die wissenschaftliche Frage: „Kann man ein Monoterpene-e-nose Drohnen-Frühwarnsystem entwickeln, das erstmalig das Monitoring der EPS-Entwicklungsphasen L1-L2 ermöglichen würde?

E-Nose - Die elektronische Nasentechnologie

Die elektronische Nasentechnologie (E-Nose) erkennt bestimmte VOCs, die von Eichen bei Stress abgegeben werden. Durch die Analyse dieser unterschiedlichen chemischen Signaturen ermöglichen E-Nasen Forschern, einen Befall mit EPS frühzeitig zu erkennen, oft bevor die Raupen sichtbar sind oder ihre gesundheitsgefährdenden Brennhaare freigesetzt werden.

- **[CUI_18] Plant Pest Detection Using an Artificial Nose System: A Review - Erkennung von Pflanzenschädlingen mithilfe eines künstlichen Nasensystems: Ein Überblick**
 - Zusammenfassung: Dieser Artikel gibt einen Überblick über künstliche intelligente Nasen (oder elektronische Nasen) als schnelle und nichtinvasive Methode zur Diagnose von Insekten und Krankheiten an Gemüse und Obstbäumen. Der Fokus liegt insbesondere auf bakteriellen, pilzlichen und viralen Infektionen sowie Insektenschäden. VOCs, die von Pflanzen abgegeben werden und funktionelle Informationen über Wachstum, Abwehr und Gesundheitszustand liefern, ermöglichen die nichtinvasive Überwachung des Pflanzenzustands. Elektronische Nasen bestehen aus einem Sensorarray, einer Signalaufbereitungsschaltung und Mustererkennungsalgorithmen. Im Vergleich zu herkömmlichen Gaschromatographie-Massenspektrometrie-Verfahren (GC-MS) sind elektronische Nasen nichtinvasiv und stellen eine schnelle und kostengünstige Option für verschiedene Anwendungen dar. Die Anwendung elektronischer Nasen zur Diagnose von Pflanzenschädlingen befindet sich jedoch noch in der Entwicklungsphase, und es bestehen Herausforderungen hinsichtlich der Sensorleistung, der Probenahme und Detektion im Freien sowie der Skalierung der Messungen. Dieser Übersichtsartikel stellt die einzelnen Komponenten elektronischer Nasensysteme vor, insbesondere gängige Sensoren und Mustererkennungsverfahren, sowie deren Vor- und Nachteile. Es enthält einen umfassenden Vergleich und eine Zusammenfassung der Anwendungen, möglichen Herausforderungen und Verbesserungspotenziale von elektronischen Nasensystemen zur Diagnose verschiedener Pflanzenschädlinge.
 - Schlüsselwörter: elektronische Nase; Schädlingsüberwachung; Schädlingbekämpfung; Gassensor; nichtinvasive Detektion
 - Keywords: electronic nose; pest scouting; pest management; gas sensor; noninvasive detection
- **[FUND23] Advances in Electronic Nose Sensors for Plant Disease and Pest Detection - Advances in Electronic**

Nose Sensors for Plant Disease and Pest Detection

- Zusammenfassung: Die Ausbreitung invasiver Schädlinge wird durch Globalisierung und Klimawandel beschleunigt und stellt eine erhebliche Bedrohung für Agrar- und Forstökosysteme dar. Fortschritte bei elektronischen Nasen (E-Nasen) haben neue Wege zur Überwachung und Erkennung von Pflanzenkrankheiten und Schädlingen durch die Analyse emittierter VOCs eröffnet. Diese Arbeit gibt einen Überblick über die jüngsten Entwicklungen von E-Nasen und deren Anwendung zur Erkennung von Pflanzenkrankheiten und Schädlingen in den letzten fünf Jahren. Sie untersucht außerdem die Herausforderungen der VOC-Erkennung in der Landwirtschaft, wo die Probenahme im Feld eine zentrale Rolle für Überwachung und Management spielt.
- Schlüsselwörter: invasive Schädlinge; zerstörungsfreie Erkennung; Pflanzenschädlingserkennung; Sensortechnologie; VOC-Analyse; flüchtige organische Verbindungen
- Keywords: invasive pests; non-destructive detection; plant pest detection; sensor technology; VOC analysis; volatile organic compounds

Die Rolle von VOCs bei der EPS-Erkennung

Wenn EPS-Larven sich von Eichenblättern ernähren, sind die Bäume physiologischem Stress ausgesetzt und geben aktiv spezifische Infochemikalien und flüchtige Bestandteile grüner Blätter an die Luft ab.

- **[SCHÄ24] Pathogens of the oak processionary moth *Thaumetopoea processionea*: Developing a user-friendly bioassay system and metagenome analyses for microorganisms - Krankheitserreger des Eichenprozessionsspinners *Thaumetopoea processionea*: Entwicklung eines benutzerfreundlichen Bioassay-Systems und Metagenomanalysen für Mikroorganismen**
 - Der EPS ist ein Schädling an Eichen und stellt aufgrund der Brennhaare der Larven in späteren Stadien ein Gesundheitsrisiko für den Menschen dar. Daher ist es schwierig, den EPS unter Laborbedingungen zu züchten, Bioassays durchzuführen oder die Larven auf Krankheitserreger zu untersuchen. Die biologische Bekämpfung zielt auf die frühen Larvenstadien ab und basiert hauptsächlich auf kommerziellen Präparaten von *Bacillus thuringiensis* ssp. *kurstaki* (Btk). Um das entomopathogene Potenzial anderer sporenbildender Bakterien zu testen, wurde ein benutzerfreundliches Bioassay-System entwickelt, das
 - (i) Bakteriensporensuspensionen durch Eintauchen von Eichenknospen aufbringt,
 - (ii) Larven im ersten Stadium durch Fraßkontakt gezielt anspricht und
 - (iii) deren Gruppenfressverhalten berücksichtigt.
 - Die vernachlässigbare Mortalität in der unbehandelten Kontrollgruppe belegte die Funktionalität des neu etablierten Bioassay-Systems. Während der kommerzielle Btk HD-1-Stamm als Bioassay-Standard verwendet und als hocheffizient bestätigt wurde, war ein *Bacillus wiedmannii*-Stamm bei der Abtötung von Eichenprachtkäferlarven unwirksam. Larven, die während des Infektionsexperiments starben, wurden anschließend einer Nanoporenssequenzierung unterzogen, um mittels metagenomischer Analyse entomopathogene Erreger zu identifizieren. Dies bestätigte, dass *B. wiedmannii* nicht in der Lage war, Eichenprachtkäfer zu infizieren und sich in ihnen anzusiedeln, identifizierte aber potenziell insektenpathogene Arten der Gattungen *Serratia* und *Pseudomonas*.
 - Schlüsselwörter: Forstschädlinge, Entomopathogene, Bioassay, Mikrobielle Bekämpfung, *Bacillus cereus*-Gruppe, Sequenzierung der dritten Generation
 - Keywords: Forest pests Entomopathogens Bioassay Microbial control *Bacillus cereus* group Third generation sequencing
- **Chemisches Profil:** Die VOC-Emissionen von EPS-befallenen Eichen unterscheiden sich typischerweise von nicht befallenen Bäumen durch ihr spezifisches Verhältnis von Terpenen und kurzkettigen sauerstoffhaltigen Verbindungen.
- **Frühwarnung:** Die Identifizierung dieser einzigartigen VOC-Signaturen ermöglicht es Baumpfleger*innen und Forstverwaltungsteams, frühzeitig im Lebenszyklus der Raupe mit Bioziden oder der Entfernung von Nestern einzugreifen.
 - [BAUA26] Occupational Safety during Control of the Oak Processionary Moth - Arbeitssicherheit bei der Bekämpfung des Eichenprozessionsspinners

Wie E-Nose-Systeme funktionieren

Ein E-Nose-Gerät ahmt den Geruchssinn von Säugetieren nach. Es besteht aus einem speziellen chemischen Sensorarray gepaart mit Mustererkennungsalgorithmen.

- **Zerstörungsfreie Erkennung:** E-Nasen ermöglichen die schnelle, berührungslose und zerstörungsfreie Erkennung von Schädlingen auf dem Feld.

- **Fortgeschrittene Forschung:** Der Einsatz von künstlicher Intelligenz und fortschrittlichen Sensornetzwerken zur Kartierung von Baumkrankheiten über VOCs wird aktiv in [Pflanzenschädlingserkennung mithilfe eines künstlichen Nasensystems] vom [ARS, USDA] besprochen und in [Fortschritte bei elektronischen Nasensensoren zur Pflanzenschädlingserkennung] auf [Sciforum] ausführlich beschrieben.
- **Ökologischer Kontext:** Die Verfolgung dieser Emissionen trägt auch zum Verständnis der Auswirkungen invasiver Schädlingsepidemien auf die Kohlenstoffbilanz regionaler Wälder bei.
 - **[ARNO17] MODELLING OAK PROCESSIONARY MOTH - Sustainable Forest Management & Health Risk Control under Climate Change - MODELLIERUNG DES EICHENPROZESSIONSSPINNER– Nachhaltige Forstwirtschaft und Gesundheitsrisikokontrolle im Kontext des Klimawandels**
 - **[ARNO23] Effects of Oak Processionary Moth (*Thaumetopoea processionea* L.) Outbreaks on the Leaf Performance and Health of Urban and Forest Oak Trees (*Quercus robur* L.) in Brandenburg - Effects of Oak Processionary Moth (*Thaumetopoea processionea* L.) Outbreaks on the Leaf Performance and Health of Urban and Forest Oak Trees (*Quercus robur* L.) in Brandenburg**
 - Zusammenfassung: Waldinsekten zählen zu den wichtigsten Störfaktoren in europäischen Wäldern. Die Zunahme und Dauer von Trockenstressereignissen infolge des Klimawandels erhöhen nicht nur die Anfälligkeit ländlicher und städtischer Wälder, sondern machen geschwächte Bestände auch anfälliger für Insektenplagen. In diesem Zusammenhang berichten zahlreiche deutsche und europäische forstliche Forschungsinstitute und Umweltbehörden über eine Zunahme der Populationsdichte und des Ausmaßes von Schäden durch den EPS, nicht nur in Eichen- und Mischwäldern, sondern auch in kleineren Gebieten mit regelmäßigem Eichenvorkommen, wie z. B. Parkanlagen, Stadtgebieten, Gehölzen, Alleen, Erholungswäldern usw. Es ist zu erwarten, dass der EPS künftig von der insgesamt geschwächten Vitalität einzelner Eichen und ganzer Eichenbestände profitieren wird und dass Massenvermehrungen häufiger auftreten werden. Diese Arbeit untersucht die Auswirkungen des EPS auf die Gesundheit von Eichen in ländlichen Wäldern und Städten. Dazu wurde die zerstörungsfreie Chlorophyllfluoreszenz-Diagnostik zur Identifizierung und Quantifizierung von Schäden an Eichenblättern eingesetzt. Ziel der Studie war es, die Auswirkungen der OPM-Kotaktivität auf die Blattgesundheit mittels Chlorophyllfluoreszenzmessungen zu untersuchen und befallene Eichen mit nicht befallenen Eichen in städtischen und Waldgebieten zu vergleichen. Die Studie bewertete:
 - 1. die Quantenausbeute des Photosystems II (PS II) als Indikator für den Blattzustand,
 - 2. den Leistungsindex, der die Effizienz der photosynthetischen Lichtreaktion angibt,
 - 3. den Energieverlust der photosynthetischen Reaktion als Indikator für Zellschäden und
 - 4. den Öffnungsgrad der Reaktionszentren in PS II, der angibt, wie gut Lichtenergie für die Photosynthese absorbiert werden kann.
 - Befallene Eichen in städtischen und ländlichen Gebieten wiesen eine signifikant reduzierte Quantenausbeute von PS II von bis zu 10 % im Vergleich zu nicht befallenen Eichenblättern auf. Die Blattleistung war bei befallenen Stadteichen um bis zu 35 % und bei befallenen Waldeichen um bis zu 60 % signifikant reduziert. Die Energieverluste waren bei befallenen Stadt- und Waldeichen doppelt so hoch. Der Befall mit dem EPS führte jedoch zu einer stärkeren Reduktion der Photosyntheseleistung in den Blättern von Waldeichen als in denen von Stadteichen. Um dauerhafte Schäden zu vermeiden, müssen umgehend geeignete Gegenmaßnahmen ergriffen werden, da die Leistung unmittelbar nach dem Schädlingsbefall deutlich abnimmt. Eine geringere Leistung bedeutet einen erheblichen Verlust an Biomasseproduktion und damit auch an Vitalität der Bäume.
 - Schlüsselwörter: Chlorophyllfluoreszenz; JIP-Test; Eichenprozessionsspinner; befallene; nicht befallene Eichen; Stadt- und Wald-Wirtsbäume; Blattgesundheit
 - Keywords: chlorophyll fluorescence; JIP test; oak processionary moth; infested; non-infested oaks; urban and forest host trees; leaf health

EPS Risks & Management in Deutschland und United Kingdom

Da EPS-Raupen Tausende winziger, giftiger Brennhaare (Setae) besitzen, die das Toxin Thaumetopoin enthalten, stellen sie eine große Gesundheitsgefahr für Mensch und Tier dar. Diese Brennhaare können schwere Hautausschläge, Augenreizungen und Atembeschwerden verursachen. Im United Kingdom (UK) wurde EPS vermutlich 2019 eingeschleppt und man kann sehr gut beobachten, wie sich sein Verbreitungsgebiet permanent vergrößert. Von verantwortlichen Behörden wird immer wieder das Argument der chaotischen Populationsdynamik als Argument verwendet, um einen kurzfristigen Höhepunkt zu postulieren, der bald wieder vorbei sein wird. Natürlich ist diese chaotische Populationsdynamik vorhanden, sie überlagert sich aber mit einem permanenten Anstieg, den man im einfachsten Fall mit einer Sigmoide modellieren kann.

• **UK: [TECG22] - The Environmental Controls Group - The Invasion of the Oak Processionary Moth - Die Environmental Controls Group – Die Invasion des Eichenprozessionsspinners**

- Der Eichenprozessionsspinner ist ein Falter, dessen Raupen in Eichenwäldern zu finden sind. Ursprünglich in Europa beheimatet, wurde die Art 2005 versehentlich nach Großbritannien eingeschleppt, als einige Eier in den Baumkronen importierter Anpflanzungsbäume dort ankamen.
- Derzeit ist die EPS in einem relativ kleinen geografischen Gebiet angesiedelt und hat sich in London und einigen umliegenden Gebieten etabliert. Obwohl Bekämpfungsmaßnahmen die Ausbreitung verlangsamen, schreitet sie von Jahr zu Jahr weiter voran.
- Der Eichenprozessionsspinner (EPS) hat einen unstillbaren Appetit. Vom Schlüpfen an wollen diese Insekten fressen. Sie fressen ganze Eichenbestände kahl – ein Vorgang, der als Entlaubung bekannt ist. Dies schädigt den Baum und macht ihn anfällig für andere Bedrohungen wie Krankheiten, Schädlinge und Umweltbelastungen wie Dürre. Zudem finden viele einheimische Arten in Großbritannien in den Bäumen und Ästen der mächtigen Eichen ein Zuhause. Da sich der EPS durch das Blätterdach frisst, verlieren viele Arten ihren Lebensraum, was die Artenvielfalt bedroht.
- Die größte Gefahr besteht in den Monaten Mai und Juni, wenn die Raupen ausgewachsen sind. Die Raupen können ihre Haare abwerfen, wenn sie sich bedroht fühlen oder gestört werden. Auch in ihren Nestern sammeln sich viele Haare an, die zu Boden fallen und wie harmloses Laub aussehen können. In von der Eichenprozessionsspinner-Raupe befallenen Gebieten findet man die Haare an Ästen, im Gras und auch an Kleidung und Ausrüstung.
- Am stärksten gefährdet, von der Eichenprozessionsraupe befallen zu werden, sind in der Regel:
 - Kinder, die neugierig sind und sich der Risiken nicht bewusst sind
 - Neugierige Haustiere, die Nachforschungen anstellen möchten, können durch Haare in Maul und Nase erheblichen Stress erleiden, insbesondere wenn sie in ein heruntergefallenes Nest geraten.
 - Diejenigen, die mit Eichenbäumen arbeiten
 - Menschen, die sich in der Nähe befallener Bäume aufhalten
 - Weidetiere und Nutztiere in der Nähe von Eichen

Aufgrund der Ausbreitung des Insekts in Mitteleuropa verwenden lokale Frühwarnsysteme wie das [PHENTHAUproc – Entscheidungsunterstützungssystem] regionale Klimadaten, um Ausbrüche zu modellieren. In Gebieten wie Nordrhein-Westfalen und Brandenburg schreiben Kommunen und die [Bundesanstalt für Arbeitsschutz und Arbeitsmedizin [BAUA26] nachhaltige EPS-Kontrollmaßnahmen vor, darunter das Staubsaugen von Kokons und die gezielte Anwendung von Bioziden.

- **[HALB24] PHENTHAUproc – An early warning and decision support system for hazard assessment and control of oak processionary moth (Thaumetopoea processionea) - Ein Frühwarn- und Entscheidungsunterstützungssystem zur Gefahrenbewertung und Bekämpfung des Eichenprozessionsspinners (Thaumetopoea processionea)**
- Highlights - Schlaglichter
 - Das Frühwarnsystem für den Eichenprozessionsspinner liefert lokale und regionale Vorhersagen.
 - Die phänologischen Vorhersagen für den Falter und seinen Wirtsbaum basieren auf der Lufttemperatur.
 - Praktische Hinweise und Entscheidungshilfen für Monitoring und Bekämpfung werden bereitgestellt.
 - Ein neues Modell für die nicht-überwinternde Entwicklung des Eichenprozessionsspinners ist enthalten.
 - Ein neuartiges Modell für die Knospenanschwellung der Stieleiche (*Quercus robur*) ist integriert.
 - Zusammenfassung – Das Auftreten des Eichenprozessionsspinners (*Thaumetopoea processionea* L., Lep., Notodontidae) in Mitteleuropa hat seit den 1990er Jahren zugenommen. Angesichts potenzieller Klima- und Landnutzungsänderungen ist in Zukunft mit einer Zunahme der Populationsdichte und einer Ausbreitung des Eichenprozessionsspinners zu rechnen. Diese Veränderungen könnten zu stärkerem Kahlfraß an Eichen und einer erhöhten Gefährdung von Mensch und Tier durch die Brennhaare (Setae) der Eichenprozessionsspinnerlarven führen. Diese negativen Auswirkungen auf Eichen, Menschen und Tiere erfordern dringend wirksame Strategien zur Gefahrenabwehr.
 - Zur Gefahrenbeurteilung und Entscheidungsunterstützung im Bereich der Überwachung und Bekämpfung des Eichenprozessionsspinners (OPM) wurde das Online-Frühwarnsystem „PHENTHAUproc – Phänologiemodellierung von *Thaumetopoea processionea*“ entwickelt und validiert. PHENTHAUproc verwendet

täglich aktualisierte, temperaturbasierte Verfahren zur Berechnung der phänologischen Entwicklung des OPM und zur Modellierung der Phänologie der Wirtsbäume, d. h. des Knospenanschwellens und des Blattaustriebs von *Quercus robur* L.

- Der Schlupftermin der Larven im ersten Larvenstadium (L1) wird mithilfe von drei verschiedenen, bereits existierenden Modellen berechnet. Um den Beginn der Nahrungsaufnahme der L1-Larven zu bestimmen, wurde erstmals ein Knospenanschwellenmodell für *Q. robur* erstellt. Die phänologische Entwicklung der OPM-Larven und -Puppen wird durch ein Modell vorhergesagt, das auf Basis von Laborzuchtdateien für die verschiedenen Entwicklungsstadien entwickelt wurde.
- Darüber hinaus wurde ein bestehendes Blattaustriebsmodell für *Q. robur* in PHENTHAUproc integriert. Der vorhergesagte Zeitpunkt des Blattaustriebs kann durch Beobachtungen des Blattaustriebs vor Ort durch den Deutschen Wetterdienst (DWD) ergänzt werden. Die vorhergesagten Zeitpunkte des Blattaustriebs und der Entwicklung des vierten Larvenstadiums des Eichenprachtkäfers (OPM) dienen dazu, den optimalen Zeitraum für Bekämpfungsmaßnahmen wie die vorbeugende Ausbringung biologischer Insektizide festzulegen. Darüber hinaus kann die Modellierung der Larven- und Puppenentwicklung genutzt werden, um die saisonal zunehmende Gefährdung durch die Verbreitung der Borsten abzuschätzen und den Beginn der Überwachung fliegender Falter mit Pheromonfallen zu berechnen. PHENTHAUproc bietet phänologische Vorhersagen auf lokaler und regionaler Ebene, d. h. für Wetterstationsstandorte und Rasterkarten bundesweit. Die Modelle können europaweit eingesetzt werden, sobald Daten zur Lufttemperatur und Informationen zu möglichen Anpassungen des Eichenprachtkäfers an das lokale Klima und die Phänologie der Wirtsbäume verfügbar sind. Dies ermöglicht phänologische Vorhersagen für einen rechtzeitigen und wirksamen Schutz der Vitalität von Eichen sowie der Gesundheit von Mensch und Tier vor OPM-bedingten Gefahren.

VOC-E-Nose - Drohnen-Frühwarnsystem: Stand der Wissenschaft

Der direkte Präzedenzfall: Projekt PROTECTFOREST (Göttingen/Freiburg)

Das Projekt PROTECTFOREST der Georg-August-Universität Göttingen und der Universität Freiburg hat genau das entwickelt: Ein Halbleiter-Gassensor mit drei Sensorelementen wurde auf einer Drohnenplattform integriert, um Monoterpen-Emissionen über den Kronen eines Mischwaldes zu detektieren. Die Detektion von α -Pinen — dem dominanten Monoterpen aus Nadelholzresin — war erfolgreich. Wärmebilder befallener Bestände wurden im Feldversuch generiert und unter Einbeziehung der Windströmung eines zweiten Drohnensystems interpretiert.

Das verwendete Halbleiter-Metalloxid-Gassensor-Array konnte unter Laborbedingungen α -Pinen-Konzentrationen und Temperaturen unterscheiden. Im Feld antwortete der Sensor auf eine starke künstliche α -Pinen-Quelle. Der Feldversuch über einem Fichtenbestand lieferte Vorergebnisse — technische und Umweltbedingungen verhinderten jedoch einen vollständigen Machbarkeitsnachweis unter natürlichen Bedingungen.

Sensorprinzip: Halbleiter-Metalloxid-Gassensoren (MOS) sind geeignete Detektoren für VOC-Klassen in der Luft, darunter Monoterpene. Eine Halbleiteroberfläche aus Wolframoxid (WO_3) ändert ihre Leitfähigkeit bei Erhitzung ($\sim 275^\circ\text{C}$) — wenn VOCs mit der Oberfläche interagieren, werden sie thermisch oxidiert und erzeugen einen Leitfähigkeitsabfall. Die Intensität ist nicht VOC-spezifisch, sondern VOC-klassen-spezifisch.

In einem systematischen Review von 99 UAV-Forstmonitoring-Studien wird das PROTECTFOREST-Konzept als Einzelfall für die Gaschemie-basierte Drohnerdetektion genannt. Ein vollständiger Machbarkeitsnachweis für natürlich befallene Bäume steht noch aus. Das bedeutet: **Das Forschungsfeld ist offen** — niemand hat bislang einen vollständigen Proof-of-Concept erbracht.

Die entscheidende botanische Grundlage für Eichen / EPS

Nach Kontakt mit herbivoren-spezifischem Speichel synthetisiert die Pflanze das Hormon Methyljasmonat (MeJA), das die Freisetzung sogenannter herbivoren-induzierter flüchtiger Verbindungen (HIPVs — Herbivore-Induced Plant Volatiles) vermittelt. Induzierte VOCs können Stunden oder Tage nach einem Angriff emittiert werden — sowohl von der Schadensstelle als auch systemisch aus unverletzten Blättern.

Für Eichen spezifisch: Herbivoren-induzierte Pflanzenvolatile (HIPVs) entstehen über den Mevalonat-Weg, den Isoprenoid-Weg und den Octadecanoat-Weg, die Terpenoide, grüne Blattvolatile u.a. produzieren. Diese HIPVs vermitteln tritrophische Interaktionen — sie locken Fressfeinde an und warnen Nachbarpflanzen.

Kritischer Unterschied EPS vs. Borkenkäfer:

Merkmal	Borkenkäfer (Koniferen)	EPS (Eiche)
Hauptsignal-VOC	α -Pinen (Resin, massiv)	HIPVs (komplex, schwächer)
Emissionsquelle	Stamm/Rinde (konzentriert)	Blätter (verteilt über Krone)
Signalstärke	5–15× erhöht gegenüber gesund	subtil erhöht
Spezifität	charakteristisch	hochkomplex, variabel
Zeitverzögerung	sofort bei Befall	Stunden–Tage nach Fraßbeginn

Dies ist die zentrale Herausforderung: Die Herausforderungen bei der VOC-Detektion im Agrar- und Forstbereich liegen im Feld-Sampling, da die Wahl der Sensoren von Zielanwendung, gewünschter Detektionsfähigkeit und Umgebungsbedingungen abhängt und die spezifischen biologischen Parameter des Zielschädlings berücksichtigen muss.

E-Nose Technologiestand für Pflanzenschädlinge

Über die letzten fünf Jahre hat die Forschungsintensität zu E-Nose-Anwendungen für Pflanzenschädlinge deutlich zugenommen. Eine Recherche zu "nose", "volatiles" und "pest" von 2019–2023 identifizierte insgesamt 12 Publikationen — das Feld ist noch sehr jung.

Für den Smaragdgrünen Eschenbohrer (EAB — *Agrilus planipennis*) wurde ein kombiniertes E-Nose/Gaschromatograph-Gerät zur Früherkennung in Eschen eingesetzt. VOC-Emissionen aus dem Splintholz zeigten signifikante Unterschiede zwischen verschiedenen Befallsklassen.

Eine E-Nose konnte bei Gurken zwischen VOCs von Kontrollpflanzen, mechanisch beschädigten Pflanzen und spinmilben-befallenen Blättern diskriminieren — ein Proof-of-Concept für nicht-invasive, schnelle Schädlingsdetektion.

Aktueller Miniaturisierungsstand: Der Bosch BME688 ist ein KI-miniaturisiertes Umgebungssensorsystem, das flüchtige organische Verbindungen, flüchtige Schwefelverbindungen und andere Gase wie CO und H₂ in ppb-Auflösung detektiert, ergänzt um Temperatur, Feuchte und Druck — in einem einzigen drohnentauglichen Chip.

Die EPS-Raupen in L1–L2 fressen intensiv und produzieren genau in dieser Phase die stärkste HIPV-Antwort (Herbivoren-induzierte Pflanzenvolatile - herbivore-induced plant volatiles) der Eiche — bevor die optisch sichtbaren Neststrukturen entstehen und bevor Brennhaare ausgebildet werden. Das ist das einzige Detektionsfenster, das vor der Gesundheitsgefährdung liegt. Für diese EPS L1–L2 Phase liegt jetzt ein Grobkonzept für ein EPS-VOC-Drohnen-Frühwarnsystem vor. Im Konzeptzentrum steht der BOSCH drohnentaugliche Chip BME688, der ein KI-miniaturisiertes Umgebungssensorsystem darstellt, das flüchtige organische Verbindungen, flüchtige Schwefelverbindungen und andere Gase wie CO und H₂ in ppb-Auflösung detektiert, ergänzt um Temperatur, Feuchte und Druck.

Konzeptentwicklung: EPS-VOC-Drohnen-Frühwarnsystem**Warum L1–L2 die Zielphase ist**

Die EPS-Raupen in L1–L2 fressen intensiv und produzieren genau in dieser Phase die stärkste HIPV-Antwort der Eiche — bevor die optisch sichtbaren Neststrukturen entstehen und bevor Brennhaare ausgebildet werden. Das ist das **einzige Detektionsfenster**, das vor der Gesundheitsgefährdung liegt.

Systemarchitektur**SCHICHT 1 — Drohnen-VOC-Scan (wöchentlich, Mai–Juni)**

- Drohne mit MOS-Sensor-Array (α -Pinen, β -Pinen, Isopren, Linalool)
- + Windrichtungssensor (zweite Drohne oder Onboard-Anemometer)
- → Heatmap VOC-Konzentrationsverteilung über Allee
- → Schwellwertüberschreitung = Verdachts-Eiche

Analoge drohnengestützte VOC-Detektion wurde im Projekt PROTECTFOREST (Universität Göttingen / Universität Freiburg, [PACZ21]) für den Borkenkäfer-Monoterpen α -Pinen erprobt. Für EPS-spezifische HIPVs an Eichen liegt bislang kein publizierter Feldversuch vor — dies ist der wissenschaftliche Neuheitswert des vorliegenden Konzepts.

VOC-Drohnen-Frühwarnsystem (Larvenstadien L1–L2) Sensorik: Bosch BME688

Im Zentrum des Frühwarnsystems steht der Bosch BME688, ein miniaturisiertes KI-Umgebungssensorsystem mit integriertem Metal-Oxide-Semiconductor (MOX)-Gassensor. Der Chip detektiert flüchtige organische Verbindungen (VOCs) sowie flüchtige Schwefelverbindungen, CO und H₂ in ppb-Auflösung, ergänzt um Temperatur (± 1 °C),

Luftfeuchte ($\pm 3\%$) und Luftdruck (± 1 hPa). Das Gesamtgewicht des Sensors beträgt wenige Gramm – er ist vollständig drohntauglich.

Für das EPS-spezifische Anwendungsprofil wird der BME688 mit einem ergänzenden MOS-Array (Wolframoxid GGS2330 für α -Pinen/ β -Pinen; SnO_2 für Isopren) kombiniert. Ein KI-Klassifikationsmodell, trainiert auf dem VOC-Profil befallener vs. gesunder Eichen, ermöglicht die Echtzeitunterscheidung während des Drohnenfluges.

Operationsablauf

Beispielhaft führt eine VOC-Drohne wöchentliche Überwachungsflüge über einer Eichenallee durch (empfohlene Flugzeit: früher Vormittag, Windstille). Der Sensor misst die VOC-Konzentration kontinuierlich. In Kombination mit einem Onboard-Anemometer wird eine Konzentrations-Heatmap der Allee generiert. Überschreitet ein Messpunkt einen kalibrierten Schwellwert, wird der betreffende Baum als Verdachtsfall markiert und für die Verifikation durch das Thermokamera-/RGB-Modul vorgemerkt.

Sensorik-Empfehlung für EPS-spezifisches VOC-Profil

Da EPS-Fraß kein einzelnes dominantes Markergas produziert (wie α -Pinen beim Borkenkäfer), ist ein **Array-Ansatz** notwendig:

Sensor	Ziel-VOC	Relevanz für EPS-Fraß
MOS WO_3 (GGS2330)	α -Pinen, β -Pinen	Allgemeiner Eichen-Stressmarker
MOS SnO_2	Isopren	Hauptemission Eiche unter Stress
MOS (selektiv)	Linalool, (E)- β -Ocimen	HIPV-spezifisch für Lepidopteren-Fraß
Bosch BME688	VOC-Gesamtindex	Basisrauschen, Temperatur, Feuchte

Die Klassifikation gesund vs. befallen müsste durch ein trainiertes ML-Modell erfolgen — auf Basis eines Referenzdatensatzes, der an bekannt befallenen und gesunden Eichen während L1–L5 zu erheben wäre.

Wirtschaftlichkeit: Pilotabschätzung für 1.000 Eichen

Für eine Gemeinde mit beispielsweise 1.000 zu überwachenden Eichen ergibt sich folgende Größenordnung:

- IoT-Stammknoten (LoRaWAN, Bosch BME688, Solarpanel, vandalismusfest): 40–70 € / Baum in Serienproduktion → Gesamtinvestition Sensorik: 40.000–70.000 €
- Drohnen-System (VOC + Thermokamera, inkl. Gatewayinfrastruktur): 20.000–40.000 €

Offene Forschungsfragen und empfohlene Pilotprojekte

Das vorliegende Konzept erfordert für die Validierung folgende Forschungsschritte:

- EPS-HIPV-Profilung: GC-MS-Charakterisierung der VOC-Emissionen befallener Eichen während L1–L5 an 10–20 Bäumen über zwei Saisons. Ohne diesen Datensatz ist kein KI-Klassifikator trainierbar.
- BME688-Feldkalibrierung: Korrelation Drohnensensor-Signal $\leftrightarrow$ GC-MS-Referenz unter Feldbedingungen (Wind, Temperatur, Kronentopologie).

Offene Forschungsfragen und Forschungsplan

Frage 1 — Ist das EPS-HIPV-Profil der Eiche charakteristisch genug für Drohnerdetektion? Das ist die fundamentale Unbekannte. Literatur belegt HIPV-Emission bei Eichen unter Lepidopteren-Fraß — aber keine Studie hat das EPS-spezifische Profil quantitativ mit drohntauglichen MOS-Sensoren gemessen.

Frage 2 — Wie groß ist das Signal über der Krone? PROTECTFOREST hat gezeigt, dass α -Pinen aus Stamm-Resin über der Krone messbar ist. EPS-induzierte HIPVs aus Blättern verteilen sich anders — möglicherweise besser detektierbar, da die Emissionsquelle die gesamte Blattkrone ist.

Forschungsplan (2 Saisons):

Saison 1 — Grundlagenerhebung:

- 10 befallene + 10 gesunde Eichen
- Wöchentliche VOC-Probenahme (GC-MS, Referenzmethode)
- während L1–L5 → VOC-Profil-Datenbank

Saison 2 — Drohnen-Proof-of-Concept:

- MOS-Array-Drohne über denselben Bäumen
- Korrelation Drohnensignal $\leftrightarrow$ GC-MS-Referenz
- → Validierung Detektierbarkeit

- → Training ML-Klassifikator

Kosten für dieses Forschungsprogramm: ca. **30.000–60.000 €** — im Rahmen eines EU Horizon Europe oder BMBF-Waldschutzprojekts realistisch finanzierbar, zumal PROTECTFOREST (Göttingen) als natürlicher Kooperationspartner existiert.

Gesamtbewertung

Das EPS-VOC-Drohnen-Frühwarnsystem ist wissenschaftlich plausibel, technologisch noch nicht belegt, aber mit einem klar definierten Forschungspfad erreichbar. Der entscheidende Vorteil gegenüber dem Borkenkäfer-Analogfall: EPS-Raupen sind **oberflächlich aktiv** und die Blatt-HIPV-Emissionen sind räumlich über die gesamte Krone verteilt — möglicherweise ein besseres Drohnensignal als die punktuelle Stamm-Resin-Emission des Borkenkäfers.



[ASCH244] Adaptives Risikomanagement in trockenheitsgefährdeten Eichen- und Kiefernwäldern mit Hilfe integrativer Bewertung und angepasster Schadschwellen (ARTEMIS)

Zielsetzungen: Aus den genannten Gründen ist eine Weiterentwicklung bzw. Strategieänderung für ein pheromongestütztes Monitoring erforderlich. Versuche hierfür wurden im Rahmen des LWF-Teilprojektes konzipiert und organisiert und im Jahr 2021 mit folgenden Zielen durchgeführt:

1. Als Kontrolle für die nachstehenden Versuchsanordnungen und Ziel 1. Anwendung des als verlässlichstes Produkt ermittelten Sexuallockstoffs „Pherobank“ zur Attraktion von ♂: neue Fallenordnung als Transekt durch Waldbestand (modifiziert nach Straw et al., 2019)
2. Versuch einer Anlockung der Weibchen mittels Wirtsdüften (Green Leaf Volatiles, GLV bzw. Volatile Organic Components VOCs) aufgrund folgender Hypothesen:
 - weibliche Falter sind auf die Eiche als Eiablageort angewiesen, da die Raupen sich nur an dieser Baumart entwickeln können. Sie müssen Eiche und vielleicht sogar den Eiablageort belaubte Triebenden wahrnehmen können, evtl. olfaktorisch.
 - Die Weibchen, die in einem Testbestand gefangen werden, hätten dort vermutlich auch ihre Eier abgelegt. Sie repräsentieren die lokale Populationsdichte und Dichteentwicklung für die Folgegeneration besser als die mobilen ♂.
3. Verbesserung der Lockwirkung von Sexualpheromonen durch Kombination mit „Eichenduft“ für Fang von ♂ oder bisexuellen Fang. Hierzu gab es bereits erfolversprechende Untersuchungen bei verschiedenen anderen Schmetterlingsarten (z.B. Dai et al., 2008/ Reddy und Guerrero, 2004)

Untersuchungskonzept

Die Testsubstanzen für die Eichenduftstoffe wurden durch das Prof. Hellriegel - Institut der Hochschule Anhalt hergestellt (Arbeitsbereich: anorganische und organische Chemie, bioaktive Pflanzeninhaltsstoffe wie Alkaloide, Steroide, phenolische Komponente, Pflanzenhormone und Lipide und Möglichkeiten der Anwendung):

- Extrakte aus frisch angeliefertem Eichenlaub und -triebrinde: 5 Methoden, 10 Varianten „GLV (Green Leaf Volatiles Eiche“ = GLV
- Gemisch aus 5 häufigsten synthetischen Fettsäurederivaten von Q. robur (nach Pearse et al., 2013): 2 Mischungen, je 5 Verdünnungen mit Dimethylsulfoxid = GLVsyn.

Insgesamt wurden 20 unterschiedliche Testködervarianten hergestellt und ausgebracht

Es besteht so die Möglichkeit im Labor Wirtsdüften wie z.B. „Eichenduft“, Green Leaf Volatiles, GLV oder Volatile Organic Components VOCs für das VOC AI-Sensor-Training einzusetzen.

Recherche

DATUM	Suchmuster	Treffer
30.06.26	e-nose VOC "volatile organic compound" OPM "oak processionary moth"	116
01.07.26	"Plant pest detection using an artificial nose system: A review" filetype:pdf	131

::: Literatur

- [ARNO17] Anne I. M.-Arnold, et al., MODELLING OAK PROCESSIONARY MOTH - Sustainable Forest Management & Health Risk Control under Climate Change, Conference Poster 2017, <https://www.uni-goettingen.de/de/document/download/272ab422fabb20a3d661c2b844b86a43.pdf/Status%20Conference%20Poster%202017%20Carsten.pdf>
- [ARNO23] Anne L. M. Arnold, Effects of Oak Processionary Moth (*Thaumetopoea processionea* L.) Outbreaks on the Leaf Performance and Health of Urban and Forest Oak Trees (*Quercus robur* L.) in Brandenburg, Germany, *Forests* 2023, 14(1), 124; <https://doi.org/10.3390/f14010124> , https://mdpi-res.com/d_attachment/forests/forests-14-00124/article_deploy/forests-14-00124.pdf?version=1673353509
- [ASCH244] Valentin Aschmann, Gabriela Lobinger, Adaptives Risikomanagement in trockenheitsgefährdeten Eichen- und Kiefernwäldern mit Hilfe integrativer Bewertung und angepasster Schadschwellen (ARTEMIS), 30.04.2024, Teilvorhaben 4: Bayerische Landesanstalt für Wald und Forstwirtschaft (LWF), Waldschutzrisikomanagement mit variablen Schadschwellen für ausgewählte Bestandesschädlinge der Eiche in Süddeutschland, Förderkennzeichen: 22020618, <https://www.fnr.de/fileadmin/projektdatenbank/22020618.pdf>
- [BAUA26] Federal Institute for Occupational Safety and Health (BAUA), Occupational Safety during Control of the Oak Processionary Moth, download 01.07.2026, <https://www.baua.de/EN/Topics/Chemicals-biological-agents/Hazardous-substances/Assessment-unit-biocides/Oak-processionary-moth>
- [BOSC23] Bosch Sensortec (2023): BME688 – AI-Powered Environmental Sensor Datasheet. Bosch Sensortec GmbH
- [CUI_18] Shaoqing Cui, et al., Plant Pest Detection Using an Artificial Nose System: A Review, 2018, *Sensors* 2018, 18, 378; doi:10.3390/s18020378, <https://pdfs.semanticscholar.org/02a3/1fde06513d7fcbffe85e9c5361649ee2e121.pdf>
- [FUND23] Ana Fundurulic, et al., Advances in Electronic Nose Sensors for Plant Disease and Pest Detection, *Eng. Proc.* 2023, 48(1), 14; <https://doi.org/10.3390/CSAC2023-14890> , <https://www.mdpi.com/2673-4591/48/1/14> , fundurulic_2023.pdf
- [FVA_25] FVA Baden-Württemberg (2025): Eichenprozessionsspinner – aktuelle Situation, www.fva-bw.de/monitoring/eichenprozessionsspinner
- [HALB24] Paula Halbig, et al., PHENTHAUproc – An early warning and decision support system for hazard assessment and control of oak processionary moth (*Thaumetopoea processionea*), *Forest Ecology and Management*, 15 January 2024, <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0378112723007594>
- [HOLO10] Holopainen J.K., Gershenson J. (2010): Multiple stress factors and the emission of plant VOCs. *Trends in Plant Science* 15: 176–184.
- [PACZ21] Paczkowski S., Datta P., Irion H., Pelz S., Jaeger D. (2021): Evaluation of Early Bark Beetle Infestation Localization by Drone-Based Monoterpene Detection. *Forests* 12: 228.
- [POTA20] Potamitis I., Rigakis I. (2020): TreeVibes – A Wireless IoT Acoustic Sensor System for the Monitoring of Forest Pests. *Sensors*.
- [ROSS14] Rossi, M., Brunelli, D., Adami, A., Lorenzelli, L., Menna, F. and Remondino, F. (2014): Gas-drone: Portable gas sensing system on UAVs for gas leakage localization. *Proceedings of IEEE SENSORS*, 1431–1434
- [SCHÄ24] Lea Schäfer, et al., Pathogens of the oak processionary moth *Thaumetopoea processionea*: Developing a user-friendly bioassay system and metagenome analyses for microorganisms, *Journal of Invertebrate Pathology* 205 (2024) 108121, https://www.openagrar.de/servlets/MCRFileNodeServlet/openagrar_derivate_00059228/-2024_0181.pdf
- [TECG22] The Environmental Controls Group (TECG), The Invasion of the Oak Processionary Moth, 2022, <https://environmentalcontrolsgroup.co.uk/the-invasion-of-the-oak-processionary-moth>