Schlussbericht

zum Vorhaben

Thema:

Drohnengestützte Detektion Phytophager Forstschädlinge mittels Electronic Nose

Zuwendungsempfänger:

Teilvorhaben 1: Projektkoordination: Hochschule für Forstwirtschaft Rottenburg, Prof. Dr. Pelz

Teilvorhaben 2: Professur für Fernerkundung und Landschaftsinformationssysteme FeLis der Albert-Ludwigs-Universität Freiburg, Prof. Dr. Koch

Teilvorhaben 3: Cadmium GmbH, Regenstauf, Herr Reiner (Geschäftsführer)

Teilvorhaben 4: Abteilung für Arbeitswissenschaft und Verfahrenstechnologie der Georg-August Universität Göttingen, Prof. Dr. Jaeger

Förderkennzeichen:

Teilvorhaben 1: 22005617, Entwicklung der Halbleitergassensorik für die geruchsbasierte Forstschädlingsdetektion

Teilvorhaben 2: 22009018, Entwicklung der webbasierten Sensorsignaldatenverarbeitung mittels OGC Sensor Web Enablement

Teilvorhaben 3: 22008918, Entwicklung der Drohnenplattform zu halbleitergassensorbasierten Forstschädlingsdetektion

Teilvorhaben 4: 22011018, Arbeitseffizienzbewertung der drohnengestützten Forstschädlingsdetektion

Laufzeit:

01.11.2018 – 31.10.2020

Monat der Erstellung:

08/2020

Gefördert durch:

Bundesministerium für Ernährung und Landwirtschaft

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) über die Fachagentur Nachwachsende Rohstoffe e.V. (FNR) als Projektträger des BMEL für das Förderprogramm Nachwachsende Rohstoffe unterstützt. Die Verantwortung für den Inhalt dieser Veröffentlichung liegt beim Autor.

I. Ziele

Das Ziel des Projektes PROTECT^{FOREST}© war der Aufbau und Test eines Halbleitergassensor-Prototyps, der drohnengestützt eingesetzt werden kann und in Echtzeit die Informationen an ein Netzwerk übermittelt, aus denen auf die Borkenkäferbefallssituation in Fichtenbeständen (*Picea abies*) geschlossen werden kann. Die dabei ausreichend selektiv und sensitiv zu detektierenden Marker sind Monoterpene, die bei einem Befall durch phytophage Insekten, wie z.B. *Ips typographus* oder *Pityogenes chalcographus*, im Kronenraum oder exponiertem Stammbereich verstärkt emittiert werden. Die Kombination aus Drohneneinsatz und Gassensorik kann Insektenkalamitäten bereits im ersten Jahr des Befalls, bzw. bei nicht sichtbaren Stehendbefall an der Krone (v.a. *Pitiogenes chalcographus oder Ips typographus* am Kronenansatz), bzw. an exponierten und dadurch besonders gefährdeten Stämmen, lokalisieren. Eine Braunfärbung der Nadeln ist für die Befallsdetektion durch drohnengestütztes Monoterpenmonitoring nicht notwendig. Die Reaktionszeiten für den effizienten Forstschutz kann sich so im Vergleich zu konventionellen oder drohnengestützten optischen Verfahren (sichtbares und Infrarot-Spektrum) um bis zu ein Jahr verkürzen. Im Rahmen des Projektes PROTECT^{FOREST}© wurde zudem eine integrierte Analyse dieses neuartigen Detektionsverfahrens in Bezug auf Zeit- und Kosteneffizienz durchgeführt.

Das Projekt wurde im Rahmen des Förderschwerpunktes „Stärkung der nachhaltigen Forstwirtschaft zur Sicherung der Waldfunktionen“ unter dem Aufruf „Waldschutz zur Unterstützung der nachhaltigen Forstwirtschaft“, Themenbereich „Überwachung und Prognose„ , Unterpunkt „Entwicklung effizienter und Verbesserung bestehender Frühwarnsysteme und Monitoringverfahren auch unter Anwendung moderner Technik (z.B. UAV)“ durchgeführt.

Das wissenschaftliche Arbeitsziel war die Ausarbeitung einer Datengrundlage zur emissionsbasierten Frühwarnung von Insektenbefall an Nadelbäumen. Dabei wurde und wird die Art und die Menge an emittierten Terpenen im Kronenraum der befallenen Bäume mittels eines kalibrierten drohnenmontierten TDS-Röhrchen-Probennahmesystems untersucht. Ein weiteres wissenschaftliches Arbeitsziel war die Evaluation des Drohnendetektions-Verfahrens in Bezug auf seine Zeit- und Kosteneffizienz.

Die technischen Arbeitsziele waren der Aufbau (1) eines TDS-basierten Probennahmesystems sowie in Folge (2) eines innovativen Halbleitergassensorsystems, dass an einer Drohne angebracht werden kann und die Zielgase ausreichend selektiv und sensitiv messen kann. Die Luftbeprobung wurde über ein beabstandetes Kapillarsystem außerhalb der Rotorabwinde durchgeführt. Ziel war es, die Drohne in geringem Abstand über dem Kronenraum fliegen zu lassen. Es wurde zudem ein Interface zwischen Sensor, Drohnenelektronik und einem „Data-handler“ hergestellt, was zu einem OGC Sensor Web Enablement als zugrundeliegendem Standard ausgebaut werden kann.

1. Aufgabenstellung

Die Aufgabenstellung im Projekt PROTECT^{FOREST}© war die Konzeptionierung und der Bau eines halbleitergassensorbasierten Drohnenprototypen für den Einsatz über dem Kronendach zur Borkenkäferfrühdetektion. Der im Rahmen des Projektantrags recherchierte wissenschaftliche Hintergrund zeigte die theoretische Machbarkeit dieses Vorhabens in Bezug auf

1) Emissionsstärke von befallenen Bäumen und Abgrenzung dieser Emissionen gegenüber gesunden und abgestorbenen Bäumen
2) Detektionsschwelle der Halbleitergassensoren
3) technische Umsetzbarkeit des Drohnensystems

Es galt es im Projekt PROTECT^{FOREST}© zunächst, ein VOC-Sammelsystem zu bauen, um die unter künstlichen Bedingungen gemessenen Nadelbaumemissionen im Freiland zu validieren. Weiterhin musste ein Halbleitergassensor gebaut werden und auf die Detektion von α-Pinen angepasst werden. Der Halbleitergassensor musste auf der Drohne verbaut und mit der Aufbau- und Verbindungstechnik so verschaltet werden, dass eine online-Signalübertragung möglich wurde. Darauf aufbauend musste eine Datenauswerteroutine erstellt werden, die eine HeatMap der Monoterpen Konzentration erzeugen konnte, auf deren Basis die Lokalisation von im Frühstadium befallenen Bäumen stattfinden konnte. Das Verfahren musste dann in Bezug auf Zeiteffizienz und Wirtschaftlichkeit bewertet werden und es sollten mögliche Eingriffsverfahren bewertet werden.
Zusätzlich zu diesen grundlegenden Zielen, die im Projekt erfolgreich erreicht wurden, wurden weitere Aufgabenstellungen deutlich. Dazu zählte vor allem die Notwendigkeit zum Bau eines feinskaligen Abstandssensors, der in der Lage sein muss, kleine Zweige zu detektieren. Nur so ist ein autonomes Fliegen möglich, da pilotengesteuerte Sensorflüge in Kronennähe sehr riskant und zeitineffizient sind. Das Übertragen eines pilotengesteuerten Frühdetektionssystems in die Praxis erscheint vor diesem Hintergrund trotz grundsätzlicher technischer Funktionalität des Systems als nicht realistisch. Eine weitere sich daraus ergebende Aufgabenstellung war die Höhenmodellierung des Kronendachs der beflogenen Bestände, um trotz fehlendem Abstandssensor kronennahe Flüge möglich zu machen. Diese durch FeLis durchgeführten zeitaufwendigen Berechnungen erfolgten auf der Basis von sich überlappenden Multispektralbildern und den verfügbaren Bodenhöhenprofilen der Bestände.

Eine erwähnenswerte Voraussetzung, unter denen das Vorhaben durchgeführt wurde, waren die Einschränkungen durch die Coronakrise, die den Projektablauf über eine kurze Zeit behinderten.

Der zeitliche Ablauf des Vorhabens gestaltete sich in Bezug auf die Sensorentwicklung und die ersten Tests in Labor und Feld wie vorhergesehen, wenn der fertiggestellte Sensor auch oft gewartet und die Software angepasst werden musste. So kam es zu deutlichen Verzögerungen bei den Sensortests im Labor. Sensortests über Waldbeständen werden

aktuell unter Einschränkungen in einem Waldgebiet bei Lenzkirch (Fürst zu Fürstenberg) durchgeführt, da sich das Navigieren in Kronennähe ohne Abstandssensor, wie bereits erwähnt, schwierig gestaltet. Auch die Navigation nach Wegepunkten, die an die Höhe der Bäume angepasst wurden, befindet sich aktuell noch in der Erprobungsphase.
Die TDS Messungen konnten nicht wie in gewünschtem Umfang durchgeführt werden, da die Sensordrohne oft gewartet werden musste und sich die Feldtests daher schwerpunktmäßig auf Sensortests konzentrierten. Auch der große Abstand zwischen GC-MS in Göttingen (Abt. Forstzoologie und Waldschutz) und den Testgebieten (Regenstauf oder Biberbach in Bayern) führte zu Datenverlusten trotz durchgeführter drohnengestützter Luftprobemessungen, da bei der Transportvariante mit der Post trotz Kühlung der Proben offensichtlich ein Teil der gesammelten VOCs entwichen ist.

2. Stand der Technik

Die Technologie zum Betrieb, zur Steuerung und zur Ausrüstung einer Drohne mit zusätzlicher Last war bei Projektstart vorhanden und etabliert, bzw. befindet sich aktuell in einer Phase der Expansion. Der Umbau auf die technischen Bedürfnisse zur Ausrüstung und zum Betrieb mit einem Halbleitergassensorsystem war bereits auf der Basis der Drohnensysteme von CADMIUM prinzipiell möglich.

Vor dem Projekt publizierte Lösungen waren für das hier geplante Einsatzspektrum untauglich, da der starke Einfluss der Rotorabwinde auf die VOC-Messung nicht berücksichtigt wurde. Es existieren beispielsweise kommerziell angebotene Beprobungssysteme, die im freien Luftraum und direkt in den Rotorabwinden messen. Diese Systeme sind nicht für die Anwendung im Forstbereich geeignet, da die zu messenden Emissionen unter der Drohne entstehen und von den konventionellen Systemen nach unten gewirbelt werden (Krüll et al., 2012).

Es gab Vorarbeiten zur selektiven und sensitiven Detektion von VOCs durch Halbleitergassensoren. Die Quellstärken im Kronenraum der befallenen Bäume waren vor Projektbeginn nicht bekannt, da bisher Messungen im Kronenraum nicht möglich waren. Zudem gab es keine Informationen über mögliche Quersubstanzen, die das Sensorsignal verfälschen könnten. Bisherige Arbeiten beschränken sich auf die Quantifizierung von hauptsächlich Monoterpen-Emissionen aus isolierten Zweigen in wenigen Metern Höhe (Page et al., 2012, 2014). Die über den Beständen zu erwartende Windgeschwindigkeit war vor Projektbeginn bekannt (Mayer, 1976) und wurde bei Planung der Sensorlaborversuche berücksichtigt (s. Anhang 1).

Der praxisbezogene Forschungsansatz in PROTECT^{FOREST}©, der grundlagenwissenschaftliche Erkenntnisse mit angewandter Technik kombiniert, ist nach wie vor grundsätzlich neu.

Ein Patent, das die in diesem Projekt entwickelte Innovation betrifft, ist DE 10 2016 200 920 A1 2017.07.27 zur Messung von Abgasen an Schornsteinen. Ein eigenes Markenrecht auf den Projektnamen wurde federführend durch CADMIUM beim Markenamt beantragt. Die

Internetseiten www.protectforest.de und www.protectforest.uni-goettingen.de wurden ebenfalls durch CADMIUM und FORESTOPERATION belegt.

Die wesentlichen Literaturquellen, die im Projekt verwendet wurden, sind im Folgenden aufgelistet und in der Literaturliste am Ende des Abschlussberichts im Detail referenziert:

Halbleitergassensor: (Kohl et al., 2000, Paczkowski et al., 2011, Paczkowski et al., 2013, Paczkowski et al., 2018b, Paczkowski et al., 2018a, Paczkowski et al., 2019)

Drohnensensor, Kalibrierung: (Krüll et al., 2012, Lausch et al., 2013, Schultealbert et al., 2017)

VOC-Emissionen Borkenkäfer: (Amin et al., 2012, Berg et al., 2013, Giunta et al., 2016, Holopainen, 2004, Lewinsohn et al., 1991, Litvak et al., 1999, Page et al., 2012, 2014, Thatcher, 1981, Yokouchi, Ambe, 1984)

Windverhältnisse Waldbestand / VOC Verteilung: (Balkovsky, Shraiman, 2002, Croon et al., 2013, Institute of Electrical and Electronics Engineers, IEEE SoutheastCon, 2014, Mayer, 1976, Meng et al., 2012, Monroy et al., 2017)

3. Zusammenarbeit mit anderen Stellen

Im Rahmen des Projektes PROTECT^{FOREST}© wird aktuell erfolgreich mit der Abt. Forstzoologie und Waldschutz in Bezug auf die VOC Messungen kooperiert. Diese Kooperation wurde zu Projektbeginn vom Projektträger FNR vorgeschlagen und erfolgreich umgesetzt.

Weiterhin wird mit drei Privatwaldbesitzern, Herrn Graf v. Drechsel, Herrn Christian Vogt und dem Fürst zu Fürstenberg, die alle über sehr unterschiedliche Waldbestände verfügen (Laubmischwald mit Fichte, Fichtenreinbestand mit klassischer Altersstruktur, Fichtenreinbestand mit gemischter Altersstruktur) im Rahmen der Feldtests eng zusammengearbeitet. Im Rahmen eines Folgeantrags wird die Zusammenarbeit auf die Bundesforsten (Dr. Dirk Drewes), die Niedersächsischen Landesforsten (Dr. Hans-Martin Hauskeller) und den polnischen Staatswaldbetrieb Nadlesnictwo Lidzbark ausgeweitet.

Die Zusammenarbeit mit verschiedenen Pressestellen zur Verbreitung der Idee des innovativen Messkonzeptes zur Borkenkäferfrühdetektion (sh. Aufgabenstellung) verläuft ebenfalls sehr erfolgreich und hat zu viel Öffentlichkeitsaufmerksamkeit geführt. Dies macht sich vor allem durch Anfragen aus der Forstpraxis bei dem Firmenpartner CADMIUM bemerkbar. Weiterhin wird die Projektidee über das bayerische Vermessungsamt in der Öffentlichkeit verbreitet.

Es wurde Kontakt zur Forstlichen Versuchsanstalt Freiburg aufgenommen, um für das Folgeprojekt FORST^{PRAX} eine inhaltliche Verknüpfung mit dem FNR Projekt IpsPro zu erreichen. Es sollen in IpsPro prognostizierte HotSpots mit dem PROTECT^{FOREST}© Prototypen beflogen werden.

Aktuell ergab sich über den Partner FeLis die Möglichkeit zu einer Befliegung in einem Forstrevier bei Lenzkirch (Fürst zu Fürstenberg) mit starkem Borkenkäferbefall. Das Projektteam arbeitet dazu an der Fertigstellung einer zweiten Gassensordrohne (CADMIUM), die dann durch Dr. Sebastian Paczkowski als Pilot geflogen wird (FORESTOPERATION, HFR). Parallel wird die Windmessdrohne zum Einsatz kommen (FORESTOPERATION, FeLis), sowie VOC-Messungen durchgeführt (FORESTOPERATION). Die Daten werden verwendet, um die Auswerteroutine durch FeLis (Dr. Pawan Datta, B.Sc. Heidrun Irion) anzuwenden und zu verbessern.

Weiterhin ergab sich über ein Weiterbildungsseminar zum aktuellen Drohnenrecht, an dem der Projektmitarbeiter Johann Ziereis teilnahm, ein Kontakt zu Dr. David Brunner von der Hochschule Geisenheim. Hier wird zusammen mit einer Drohnenfirma an der automatischen und effizienten Ausbringung von Pestiziden im Weinbau geforscht. In einem möglichen Folgeprojekt kann die Ausbringung von Pestiziden an die vorab-Detektion von für den Befall mit der Kirschfruchtfliege typischen VOC Profilen gekoppelt werden. So können Pestizide gespart und der Rebschutz umweltverträglicher gestaltet werden. Parallelen zum Projekt DIWA-Kopter und PROTECT^{FOREST}© gibt es auch im Bereich Abstandssensorik, da auch hier ein Problem bei der notwendigen Automatisierung des Drohnenfluges zur Effizienzsteigerung besteht.

II. Ergebnisse

1. Erzielte Ergebnisse

Das wissenschaftlich technische Ergebnis des Vorhabens ist zusammengefasst die Entwicklung eines funktionsfähigen Drohnensensor-Prototypen (CADMIUM), der in der Lage ist, eine Monoterpenquelle zu detektieren (CADMIUM, HFR, FORESTOPERATION). Die technische Machbarkeit wurde in Labortests und gestellten Feldtests bestätigt, zudem belegen erste Feldtests über Waldbeständen die grundsätzliche Machbarkeit der Käferdetektion. Die in den Feldtests erzeugten Daten können über eine Auswerteroutine zu einer HeatMap verarbeitet werden, die die Lokalisation von Käferbäumen zulässt (FeLis, HFR, FORESTOPERATION). Weiterhin wurden die Emissionen über dem Kronenraum untersucht. Das Ergebnis zeigt, dass in Bezug auf das verfügbare analytische Fenster des verwendeten TDS-GC-MS außer Monoterpenen keine weiteren VOCs über dem Kronendach vorhanden sind (HFR, Forstzoologie Uni Göttingen). Es wurden Zeitstudien zum Einsatz der Sensordrohne durchgeführt. Dabei wurde deutlich, dass erhebliche Effizienzverbesserungen bei der Flugvorbereitung, der Flugdurchführung und der Datenverarbeitung und -darstellung möglich sind (FORESTOPERATION). Es wurde zudem eine Studie zur vergleichenden Arbeitseffizienz von Begehung und Drohneneinsatz durchgeführt. Dabei wurde deutlich, dass selbst im für den Drohneneinsatz ungünstigsten Vergleich die Begehung in steilen Lagen oder schlecht begehbaren Untergrund aus finanzieller Sicht zu bevorzugen ist. Je nach Altersstruktur des Forstpersonals und Reviergröße kann der Drohneneinsatz das Handlungsspektrum des Forstpersonals deutlich erweitern (FORESTOPERATION).

Als Nebenergebnisse ergaben sich die präzise Modellierung des Kronendaches als notwendige Vorraussetzung autonomer Flüge ohne Abstandssensor (FeLis). Der Grund für dieses entscheidende technische Ergebnis war die deutlich schwieriger als geplant verlaufenen kronennahen Flüge (CADMIUM), bei denen es auch zu einem Verfangen der Drohne in einem Baumwipfel kam. Daher musste eine WayPoint Flugroutine programmiert werden, die die Höhe der Bestandesoberfläche mitberücksichtigt. Dieses Verfahren befindet sich aktuell in der Erprobung im Feld und wird bis zum Projektende etabliert sein (FeLis, FORESTOPERATION). Weiterhin wurde zur Einbeziehung von Windrichtung und -stärke in die Sensordatenanalyse eine mobile Windmessstation in Form einer Drohne, deren Metadaten zu Windrichtung und Geschwindigkeit ausgelesen werden können, ermöglicht (FORESTOPERATION). Ein Nebenergebnis im Projektmanagementbereich war die Bekanntmachung des Projektes in zahlreichen Presseberichten in namhaften Formaten wie dem ZDF, dem Bayerischen und Hessischen Rundfunk, der FAZ und der ZEIT sowie mehreren kleineren Formaten (CADMIUM, HFR, FORESTOPERATION). Zudem wurde das Projekt PROTECT^{FOREST}© auf zwei Projektwebseiten der Partner CADMIUM und FORESTOPERATION veröffentlicht.

Wesentliche gesammelte Erfahrungen waren insbesondere im technischen Bereich die Entwicklung der Sensorhard- und -software, die mehrere Male im Laufe des Projektes gewartet, verbessert oder den Bedürfnissen des Feldeinsatzes angepasst werden musste

(CADMIUM, HFR, FORESTOPERATION). Weiterhin war die erhöhte Navigationsschwierigkeit im Kronennahbereich eine wesentliche Erfahrung, die zur Konzeptionierung eines Folgeantrags führte (CADMIUM). Dabei soll ein Abstandssensor zur Hinderniserkennung (z.B. Zweige) in der Flugbahn entwickelt werden (CADMIUM).

Arbeitspaket A1: Internes Projektmanagement (Alle)

Das Projekt PROTECT^{FOREST}© wurde kooperativ durchgeführt und bekam ungewöhnlich hohe mediale Aufmerksamkeit vom Hessischen Rundfunk, Bayerischen Rundfunk, ZDF, der FAZ und der ZEIT und fachnahen Internetplattformen. Es wurden weiterhin zwei Projekt-Internetseiten gelauncht (von den Partnern CADMIUM und FORESTOPERATION). Die mediale Aufmerksamkeit führte zu einem hohen Interesse an einem Kauf des Prototypen bei Firmen aus Deutschland und Österreich, die die Käferdetektion als Dienstleistung anbieten wollen. Allerdings bedarf es zur Ausschöpfung des Verkaufspotentials noch substantieller Forschung und Entwicklung in Bezug auf die Drohnentechnik und der Verortung von befallenen Bäumen. Weiterhin ergaben sich sehr positive Kooperationen mit Forstbetrieben (Graf v. Drechsel, Christian Vogt, Fürst zu Fürstenberg, Niedersächsische Landesforsten), die Waldbestände als Testgebiete zu Verfügung stellten. Das generelle Interesse an dem in PROTECT^{FOREST}© entwickelten Borkenkäferfrühdetektionsverfahren in der forstlichen Praxis war über den Projektzeitraum sehr hoch, es gab aber auch klar artikulierte Skepsis. Auf der Basis der in PROTECT^{FOREST}© erarbeiteten Erfolge (sh. Abb. 9 und 10 sowie Anhang 1) erscheint diese Skepsis unangebracht, zeugt aber auch von einem prinzipiellen Interesse an einer funktionierenden Lösung. Daher wurde ein Folgeantrag bei der FNR eingereicht, um das Messkonzept zusammen mit der praxisnahen forstlichen Basis zu etablieren (aktueller Stand: fünf LOIs vorhanden, zwei in Aussicht) und in den Betriebsablauf zu integrieren. Weiterhin wurde ein Neuantrag beim BMBF (DigitalGreenTech) gestellt, um das Messkonzept auf eine Deep Learning basierte flexible Informationsverarbeitung zu erweitern und in ein übergeordnetes Fernerkundungskonzept zur satelliten- und drohnengestützten Einzelbaumcharakterisierung einzubinden. Ein weiterer Folgeantrag bei der DFG zur Verwendung des drohnengestützten TDS-Messsystems wird aktuell von FORESTOPERATION zusammen mit der Abt. Forstzoologie und Waldschutz der Georg-August-Universität Göttingen entworfen.

Arbeitspaket A2: Fachliche Besprechungen/Fachkonferenzen (Alle)

Es wurden über die Projektlaufzeit zahlreiche Telefonkonferenzen und zehn Projektmeetings in Göttingen, Rottenburg, Regenstauf, Biberbach und Münchehof durchgeführt. Der öffentlichkeitswirksame Auftritt auf der KWF Forst-Fachmesse musste auf Grund der Covid-19-Beschränkungen auf das nächste Jahr verschoben werden, hier ist die Projektpräsenz mit Flugvorführung und Stand mit den Organisatoren bereits abgesprochen. Das Projekt wurde in Fachkreisen diskutiert, so z.B. mit Sensortechnikern der Universität des Saarlandes, mit Chemoökologen der Forstlichen Fakultät der Universität Göttingen und mit Forstschutzexperten der Nordwestdeutschen Forstlichen Versuchsanstalt und der Forstlichen Versuchsanstalt Freiburg. Durch die gute Vernetzung des 2019 für den Deutschen Waldpreis nominierten (2. Platz) Waldbesitzers Graf v. Drechsel wurde das Projekt in Forstkreisen bekannt. Die ersten Ergebnisse wurden für die Online-Fachtagung

„1st International Electronic Conference on Forests — Forests for a Better Future: Sustainability, Innovation, Interdisciplinarity“ als Konferenzpaper und Vortrag eingereicht und akzeptiert, ein Folgepaper im internationalen Fachjournal Forest wurde in Aussicht gestellt. Eine weitere internationale Fachpublikation in „Remote Sensing of Environment“ wird aktuell vorbereitet. Das Projekt wurde in einem Impulsvortrag auf der Akteurstagung Künstliche Intelligenz in der Agrar- und Forstwirtschaft 2020 in Osnabrück von Prof. Dirk Jaeger vorgestellt. Eine weitere Publikation in „Forest Policy and Economics“ zu dem Projektteil Arbeitseffizienzbewertung (FO2) ist geplant.

Arbeitspaket A3: Gemeinsame Feldtests (Alle)

Es wurden bisher insgesamt zehn Feldtests mit unterschiedlichen Zielstellungen durchgeführt. Es wurden Multispektralaufnahmen der Testbestände gemacht, die mit Geodaten des Bayerischen Landesamtes für Digitalisierung, Breitband und Vermessung (LDBV) zu einem feinskaligen Bestandeshöhenmodell verrechnet wurden. Weiterhin wurden befallenen Bäume terrestrisch mit der Logbuch Anwendung lokalisiert, um die Flüge mit der Halbleitergassensorbestückten Drohne vorzubereiten. Es wurden gestellte Feldtests (Mast mit hochdosierter α-Pinenquelle) mit dem Drohnenprototyp durchgeführt, um die Sensorreaktion bei bekanntem Quellenstandort zu untersuchen. Die mit GPS Daten verknüpften Sensorreaktionen wurden mit entsprechender Software georeferenziert in Form von HeatMaps visualisiert. Die im Projekt beschaffte Drohne Mavic 2 Zoom Enterprise wurde erfolgreich als Windmessgerät eingesetzt. Weitere Feldtests werden aktuell für die technische Validierung des Systems durchgeführt, insbesondere in Bezug auf die Sensorsensitivität und die autonomen WayPoint Flüge mit Baumhöhenreferenz. Zudem wird bis Projektende die Datenbasis zu VOC Emissionen im Kronenbereich mit Hilfe des drohnenbasierten TDS-Probennahmesystems erweitert.

Arbeitspaket H1: Projektmanagement (HFR)

Die Partner wurden zu den entsprechenden Treffen (A2) koordiniert und die Telefonkonferenzen wurden organisiert und protokolliert. Auf der Basis des jeweiligen Arbeitsstandes wurden die Projektteilziele verfeinert. So wurde z.B. auf der Basis der ersten Flugerfahrungen ein Unterauftrag als Aufstockung beantragt, um ein Abstands-Sicherheitssystem durch die Firma Scarabot herstellen zu lassen. Weiterhin wurde eine Aufstockung für intensivere Begehungen und Befliegungen beantragt, da der Aufwand für die Begehungen erheblich höher ausfiel als geplant. Das Projektmanagement wurde maßgeblich durch den Projektpartner Cadmium unterstützt, der z.B. den Kontakt zum Grafen v. Drechsel herstellte und die Projekttreffen in Regenstauf sowie einige Pressekontakte koordinierte. Weiterhin wurden die jeweiligen technischen Entwicklungsschritte zwischen allen Partnern kommuniziert und koordiniert. Die im Projekt deutlich sichtbare Öffentlichkeitsarbeit wurde in Zusammenarbeit mit den Projektpartnern, insbesondere der Cadmium GmbH, inhaltlich und organisatorisch gesteuert.

Arbeitspaket H2: Aufbau und Kalibrierung VOC-Sammelsystem (HFR)

Bereits zu einem frühen Zeitpunkt wurde im Projekt die Gestaltung eines VOC Sammelsystems diskutiert, dass in der Lage ist, im Flug zwischen mehreren VOC-Sammelröhrchen zu wechseln. Zunächst wurde der Schwerpunkt allerdings auf die Sensorentwicklung gelegt, da sich bereits zu Beginn des Projektes hier hohes Interesse aus der Forstpraxis zeigte. Während der Sensorentwicklung wurde dann klar, dass der Bau eines Ansaugsystems aus Kapillare und ferngesteuerter Pumpe dem geplanten VOC Sammelsystem bereits sehr nahekam. Zudem wäre ein revolverartiges Sammelröhrchen-Wechselsystem kein großer Effizienzvorteil, da die Sammelzeit ca. 10 Minuten beträgt und die Drohne nur 30-40 min fliegt. Incl. Anflug zur Messstelle und Landung können also technisch bedingt nur zwei bis drei Probennahmen erfolgen, weswegen ein aufwendig konstruiertes Revolverwechselsystem (Luftdichtigkeit der Proberöhrchen ist schwierig zu gewährleisten) als unverhältnismäßig angesehen wurde. Vielmehr wurde ein einfacher Adapter auf das Kapillarenende gesteckt und nach jeder Messung das Röhrchen manuell am Boden gewechselt. So waren trotz manuellem Röhrchenwechsel und entsprechenden Zwischenlandungen ebenfalls zwei bis drei Probenahmen je Akkuladung möglich. Diese Messanzahl wäre durch ein teures Revolversystem nicht erhöht worden.
In einem parallelen Ansatz wurde ein Arduino/XBee basiertes ferngesteuertes Probennahmesystem entwickelt, welches in Beständen zur Anwendung kommen soll und bereits erfolgreich an einer DJI Phantom 3 Drohne getestet wurde.
Ein ausgewähltes Ergebnis einer VOC Analyse mit der Sensordrohne an einer Fichte ist in Abbildung 1 zu sehen.

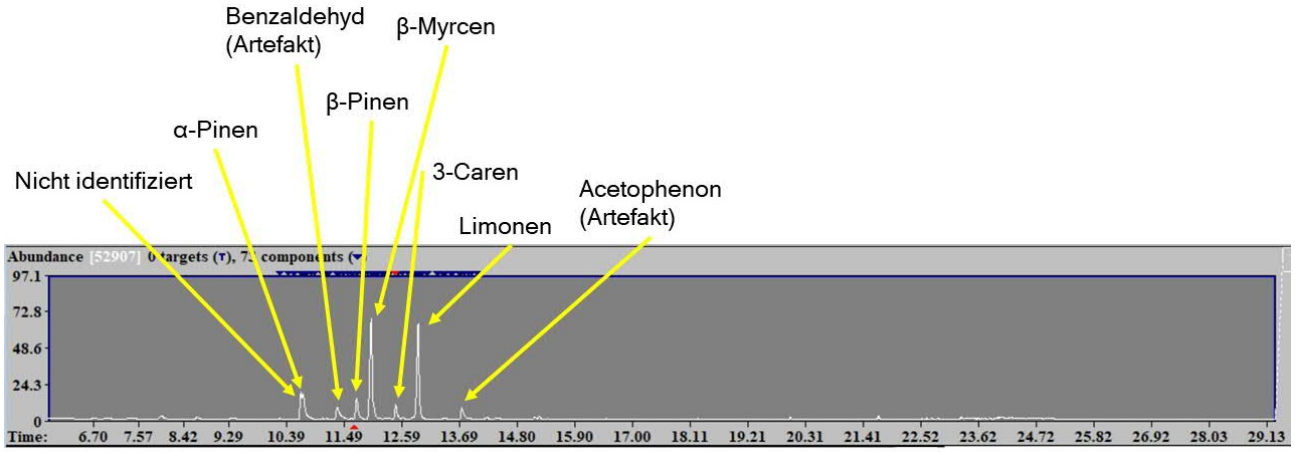

Abbildung 1 zeigt das Ergebnis einer drohnengestützten VOC-Messung an einer vitalen Fichte. Die Dauer der Probennahme betrug 10 Minuten bei einer Pumpenleistung von 12 L×min^{-1} und fand in ca. 45 m Höhe im Abstand von 1 m zu der Krone des Baumes statt. Es zeigt sich deutlich, dass das VOC-Profil mit einer Ausnahme ausschließlich aus Monoterpenen besteht. Die Komponenten Benzaldehyd und Acetophenon sind auch in Leermessungen vorhanden und damit kein Bestandteil der Kronengerüche.

Tabelle 1 zeigt die Konzentration der nach Retentionszeit und NIST Database identifizierten Peaks, berechnet auf der Basis von TDS-Verdünnungsreihen der Abt. Forstzoologie und Waldschutz, Georg-August-Universität Göttingen.

VOC	Retentionszeit Standard [min]	CAS	Peakfläche [TIC]	Ion zur Quantifizerung [m/z]	Single Ion Fläche [SIC]	Emissionsrate [$\mu g \times l^{-1} \times 5s^{-1}$]
α-Pinen	10,7	7785-70-8	55.310.575	93	9.033.449	0,0025
β-Pinen	11,7	19902-08-0	27.857.984	93	6.645.277	0,0046
β-Myrcen	11,9	123-35-3	122.407.918	41	15.318.372	24,79
3-Caren	12,5	498-15-7	17.154.138	93	3.549.837	0,0018
Limonen	12,9	5989-27-5	105.055.668	68	14.953.634	11,11
					Summe	35,91

Die Auswertung der Ergebnisse zeigt, dass β-Myrcen und Limonen das VOC Profil der Fichte dominieren. Diese ersten Ergebnisse widersprechen den Literaturergebnissen, die vor allem α-Pinen als Hauptkomponente identifizieren. Allerdings handelt es sich bei Abb. 1 um die erste unverfälschte Messung über einem Waldkronenraum. Da sich die Sensorreaktion bei unterschiedlichen Monoterpenen nicht unterscheidet, erlauben die quantifizierten Mengen eine Detektion mit dem Sensorsystem (Abb. 1 im Anhang). Dies belegt vorläufig die grundsätzliche Machbarkeit der Borkenkäferdetektion mittels Geruchssensors, wie sich auch in den HeatMaps bestätigt (Abb. 9 und 10).

Arbeitspaket H3: Aufbau und Kalibrierung Sensorsystem (HFR)

Bereits zu Beginn des Projektes wurde klar, dass ein Arduino/XBee basiertes System nicht den hohen Anforderungen an die Georeferenzierung der Sensordaten und eine potentiell online durchzuführende Datenübertragung gerecht werden kann. Daher übernahm der Partner CADMIUM den Entwurf und den Bau des Halbleitergassensors und stellte diesen dem Partner HFR und später im Projektverlauf dem Partner FORESTOPERATION zur Verfügung. Details zum Sensor werden daher unter C2 genannt. Auf Grund der während der Kalibrierversuche festgestellten Notwendigkeit von technischen Anpassungen und vor allem auf Grund der einvernehmlichen Verlagerung des selbstgebauten Sensorprüfstandes von der HFR in das Technikum von FORESTOPERATION (Arbeitsplatzverlagerung Dr. Sebastian Paczkowski) verzögerten sich die ersten Kalibrierungstests bis zum Anfang diesen Jahres. Danach waren mehrmals technische Wartungen am Sensor und weitere Anpassungen am selbstgebauten Sensorprüfstand notwendig, die den Versuchsfortschritt weiter verzögerten. Es wurden erfolgreich statische und dynamische Versuche mit dem im Rahmen des Projektes selbst gebauten Sensormessstand und einem Windkanal der Abteilung Bioklimatologie der Georg-August-Universität Göttingen durchgeführt. Die Windkanalexperimente wurden und werden aktuell mit einem PID validiert. Die Ergebnisse dieser umfangreichen Untersuchungen finden sich im parallel eingereichten Verlängerungsantrag FORST^{PRAX} und im Anhang 1 dieses Abschlussberichts. Die Ergebnisse dienen der Interpretation der HeatMaps aus den Feldversuchen. Die Kalibration des Sensors wird bis zum Projektende an unterschiedlichen VOCs wiederholt, um die Mustererkennung des Sensors zu untersuchen. Wie Abb. 1 zeigt, hat dies aber nur

theoretische Relevanz, da neben den postulierten Monoterpenen keine Quersubstanzen über Waldbeständen zu erwarten sind. Die Datenbasis der VOC Messungen über den Beständen wird parallel bis Projektende im Wald des Fürsten zu Fürstenberg erweitert. Beide Datensätze werden die Grundlage für eine Publikation in einem internationalen Journal bilden. Die oben beschriebenen ausstehenden Versuche wurden bereits vorbereitet und werden nach abgeschlossener Wartung des Sensors bei CADMIUM bis zum Projektende durchgeführt.

Arbeitspaket C1: Integration VOC-Sammelsystem auf Drohnenplattform

Nach bilateralen Planungsgesprächen (HFR – CADMIUM) wurde entschieden, das drohnenbasierte VOC-Sammelsystem auf der Basis des Sensorsystems zu entwickeln und damit diesen Entwicklungsschritt zu vereinfachen. Die Pumprate des Sensorsystems ist über die von CADMIUM programmierte Software einstellbar (1,5 l/min - 11 l/min), selbst die minimale Saugrate liegt aber für TDS Anwendungen im oberen Bereich. Das im Unterauftrag entwickelte stationäre VOC-Sammelsystem (0,5 l/min, Abb. 2) ist zwar im Bereich der üblichen TDS Saugraten, erfordert aber eine deutlich längere Verweildauer vor der Quelle, so dass das System mit hoher Saugrate der bessere Kompromiss für die drohengestützte VOC Beprobung ist.

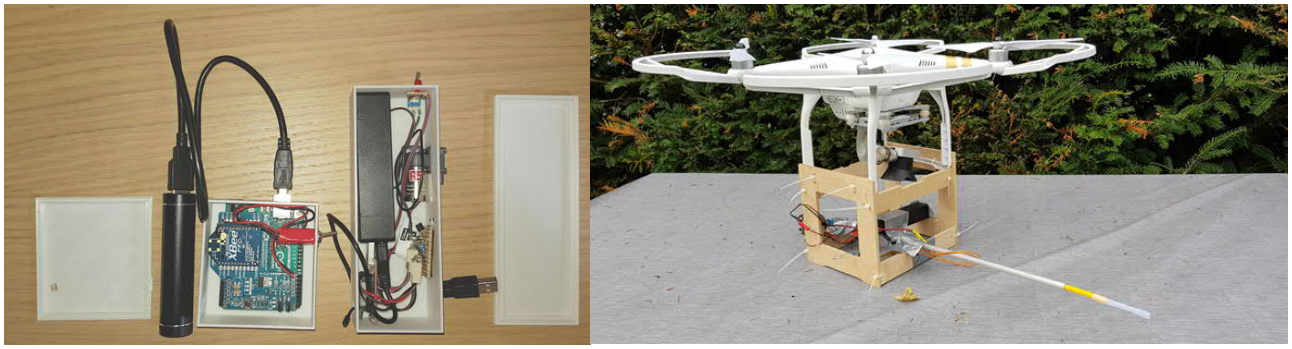

Abb. 2 zeigt das im Unterauftrag entwickelte VOC Sammelsystem als stand alone Variante (linkes Bild, links im Bild: wireless on/off Sender; linkes Bild, rechts im Bild: Empfänger mit Pumpe) und verbaut an einer konventionellen DJI Drohne (Phantom 3 Professional) (unten). Es ist keine Verbindung zwischen Drohnen-GPS und Pumpensystem möglich. Das Pumpensystem kann nicht gegen ein eigenes Arduino-Sensorsystem ausgetauscht werden, da die Georeferenzierung der Sensordaten nicht möglich ist und die Reichweite der Funkverbindung im Wald stark begrenzt ist.

Aktuell wird die Datenbasis zu VOCs über Waldbeständen in Zusammenarbeit mit der Abteilung Forstzoologie und Waldschutz der Georg-August-Universität erweitert. Im Rahmen des Projektes gestaltete sich die große Distanz zwischen Messort (z.B. Bayern) und Analyseort (Göttingen) als problematisch, da die TDS Röhrchen ihre VOC-Beladung bereits nach wenigen Tagen verlieren können. Bis Projektende werden die Messröhrchen daher unmittelbar nach dem Messen mit der Post versandt und in Göttingen sofort analysiert.

Arbeitspaket C2: Integration des Sensors auf Drohnenplattform

Bau und Integration des Sensors wurde vom Projektpartner CADMIUM übernommen (Abb. 3 und 4). Dadurch können Sensor- und GPS-Daten sowie Flughöhe synchron aufgenommen und durch FeLis ausgewertet werden. Weiterhin ist perspektivisch für das OGC-Web-Enablement eine höhere Rechenleistung erforderlich als das ursprünglich geplante Arduino System hat. Der Sensor kann über die Fernsteuerung gestartet und deaktiviert werden und die Sensordaten können online ausgelesen werden. Es wurden weiterhin zwei stand-alone Sensoren gebaut, die zur technischen Validierung, Kalibrierung und für Laborversuche den Partnern HFR und FORESTOPERATION zu Verfügung gestellt wurden.

Abbildung 3 zeigt das an der Drohne im Luftstrom verbaute Sensormodul mit drei Halbleitergassensoren, die Signalverarbeitung findet auf dem On-board Computer statt.

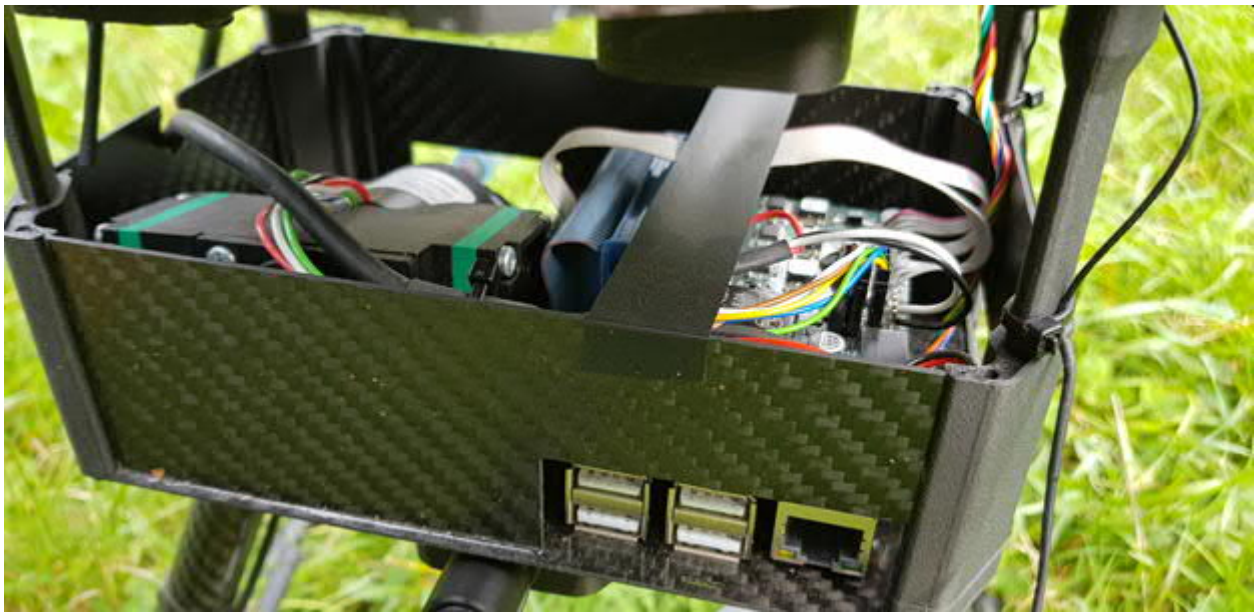

Abbildung 4 zeigt den an der Drohne verbauten On-board Computer mit Schnittstellen, Computerplatine für das Odroid Betriebssystem, sowie Pumpe.

Die Flugstabilität mit beabstandetem Kapillarsystem wurde berücksichtigt und ist ebenfalls gewährleistet. Dazu wurden von CADMIUM entsprechende Spezialteile entworfen und hergestellt. Eine Abwindmessung mit einem Anemometer zeigte, dass es keinen Einfluss der Abwinde im Ansaugbereich der Sensorkapillare gab. Zur Flugzeitoptimierung wurde ein Hexacopter mit kleinem Grundkörper und relativ großen Rotoren verwendet, womit bei geringer Rotationsgeschwindigkeit ein ausreichender Auftrieb erzeugt wird (Abb. 5). So wird Energie gespart und es werden zusätzlich die Abwinde reduziert. Durch Verbau von zwei Hochleistungsakkus wurde die Flugzeit weiter auf bis zu 40 Minuten verlängert, um den durch FORESTOPERATION (FO1) definierten Minimalanforderungen für einen arbeitseffizienten Einsatz zu genügen.
Zusätzlich zu den Vorbereitungen der Sensorauswertung zusammen mit FeLis (F1) wurden zeitintensive Waldbegehungen und Befliegungen durchgeführt (CADMIUM) und mit dem von FORESTOPERATION zur Verfügung gestellten System „Logbuch“ die GPS Koordinaten von befallenen Bäumen vermessen.

Abbildung 5 zeigt den im Projekt PROTECT^{FOREST}© entwickelten Drohnenprototypen mit Halbleitergassensor und beabstandeter Kapillare für die Einsaugung der Umgebungsluft außerhalb der Rotorabwinde.

Arbeitspaket C3: Integration OGC Sensor Web Enablement/OGC Web Processing Service auf Drohnenplattform

Das Konzept der Direktübertragung der Daten wurde auf Grund der mangelhaften Netzverfügbarkeit über Waldbeständen vorerst verworfen. In Kooperation mit FeLis wurde der Datentransfer über USB automatisiert (Plug and Save von Drohne auf USB). Die Drohne verfügt aber durch die hohe Rechenleistung und die Schnittstellenflexibilität des verbauten Mikrocomputers über die Option zum online Datentransfer. Im Falle des mittelfristigen Ausbaus der Netzinfrastruktur, z.B. auf 5G, kann diese Option aktiviert werden. Zudem werden die Sensordaten online während des Fluges über ein Graupner-Interface auf das Display der Fernsteuerung übertragen. Dies dient dem Piloten als Orientierung zur Sensorperformance und dem Abschätzen der Aufwärmphase der Halbleiter vor dem Start.

Arbeitspaket F1: Aufnahme / Auswertung von optischen Informationen (IR/Vis)
Das Ziel dieses Arbeitspaketes war die Entwicklung eines Work Flows, um die foto-optischen Drohnendaten zu möglichst detaillierten Orthofotos der Waldregionen mit potentiellem Käferbefall zusammenzusetzen. Ein weiteres Ziel war die Erstellung einer Hintergrundkarte für die Darstellung der aus den Sensordaten generierten HeatMaps zur Monoterpenkonzentration. Weiterhin sollten 3D Modelle der ausgewählten Bestände erstellt werden, um die präzise Flugplanung ohne Abstandssensor zu ermöglichen.
Das Parrot Sequoia+ Kamera Setup wurde in Zusammenarbeit mit CADMIUM auf der Drohnenplattform integriert. Diese Kamera besitzt vier Multispektralsensoren mit Sensoren für grün, rot, red-edge und near-infrared Bänder in 1,2 MP Auflösung und RGB mit 16 MP Auflösung, sowie einem Sonnenlichtsensor für die interne Kalibrierung der Bilder entsprechend der Umgebungsbelichtung. Eine Visualisierung der optischen und Multispektraldaten vor Ort wurde bei den ersten orientierenden gemeinsamen Feldtests (CADMIUM, FeLis, HFR, FORESTOPERATION) bei Regenstauf, Bayern, computerbasiert realisiert. Eine Beispielaufnahme vom Privatwald des Grafen v. Drechsel findet sich in Abbildung 2. Weitere Bestandesmodellierungen wurden im Privatwaldgebiet von Christian Vogt bei Biberbach in der Nähe von Augsburg (Besandesabschnitt Römerhügel und Wiedenkräutle) und im Privatwaldbetrieb Fürst zu Fürstenberg, Donaueschingen, durchgeführt. Die Planung und Durchführung der Flüge erfolgte mit einem Minimum an 80 % Überlappung der Bilder sowohl in Flugrichtung als auch zu beiden Seiten der Flugrichtung.
Zusätzlich zu den drohnenbasierten Daten wurden die aktuellsten LiDAR und Luftbilddaten des Bayerischen Vermessungsamtes für Digitalisierung, Breitband und Vermessung (LDBV) akquiriert. Die Laserdaten beinhalteten Punktewolken des Terrains und der Oberflächeneigenschaften und die Luftbilder enthielten die Kanäle Blau, Grün, Rot und Nahinfrarot.

Prozessieren der optischen Daten:
Die LiDAR Daten des Bayerischen Vermessungsamtes wurden GIS prozessiert um ein hoch-präzises Digitales Terrain Modell (DTM) der Testgebiete zu erzeugen. Ein Digitales Oberflächen Modell (DSM) wurde ebenfalls berechnet, um einen ersten Eindruck von den Baumkronenoberflächen zu bekommen.
Die Orthofotos wurden benutzt, um ein „Kante zu Kante“ Multispektralbild der Gebiete zu erzeugen. Im Waldgebiet des Grafen v. Drechsel wurde ebenfalls eine Klassifizierung potentieller Befalls-HotSpots, basierend auf einer Spektralanalyse der Nahinfrarot- und Rotbänder, durchgeführt (Abb. 6). Da aber die optischen Daten des Bayerischen Vermessungsamtes älteren Datums waren, wurden diese Spektralanalysen nur für einen ersten Eindruck von potentiell befallenen Flächen verwendet.

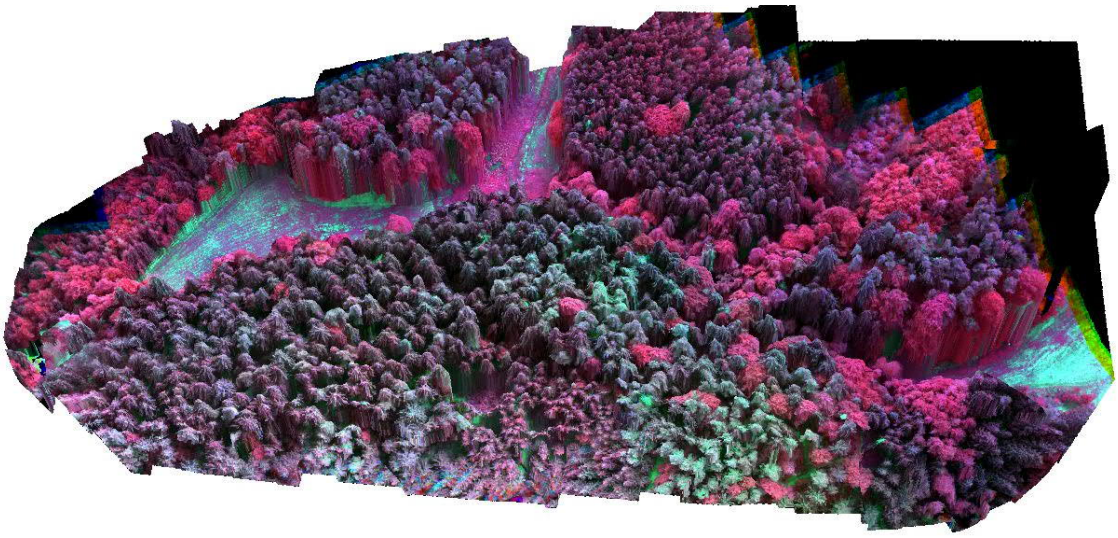

Abbildung 6 zeigt ein mit einer Multispektralkamera aufgenommenes Versuchsgebiet im Wald des Grafen v. Drechsel bei Regenstauf. Die dreidimensionale Aufnahme wurde mit georeferenzierten Bodendaten des Bayerischen Vermessungsamtes zur Ermittlung des Kronenhöhenprofils verrechnet.

Der aktuelle Status der Bestände wurde mit Hilfe der optischen Bilder berechnet, die von der Drohne aufgenommen wurden. Dazu wurden die Programme Pix4D Mapper und Agisoft Metashape Professional verwendet und Orthomosaik- und Digitale Oberflächenmodelle der Testgebiete erstellt. Die Hauptarbeitsschritte des Workflows waren:

a) Laden der Bilder in das AGISOFT Metashape Professional Tool
b) Anordnen der Bilder durch Berechnen der Kameraposition und entsprechender Orientierung jedes einzelnen Bildes
c) GCP Import zur Kontrolle der Georeferenzierung des Models und zur Validierung der Bilderanordnung aus b)
d) Optimierung der Kameraausrichtung
e) Berechnung einer Dichtewolke
f) Bau eines Netzmodells und Texturgenerierung
g) Aufbau eines Kachelmodells
h) Berechnung eines digitalen Höhen Modells (DEM)
i) Berechnung des Orthomosaiks
j) Export des DEM und des Orthomosaiks

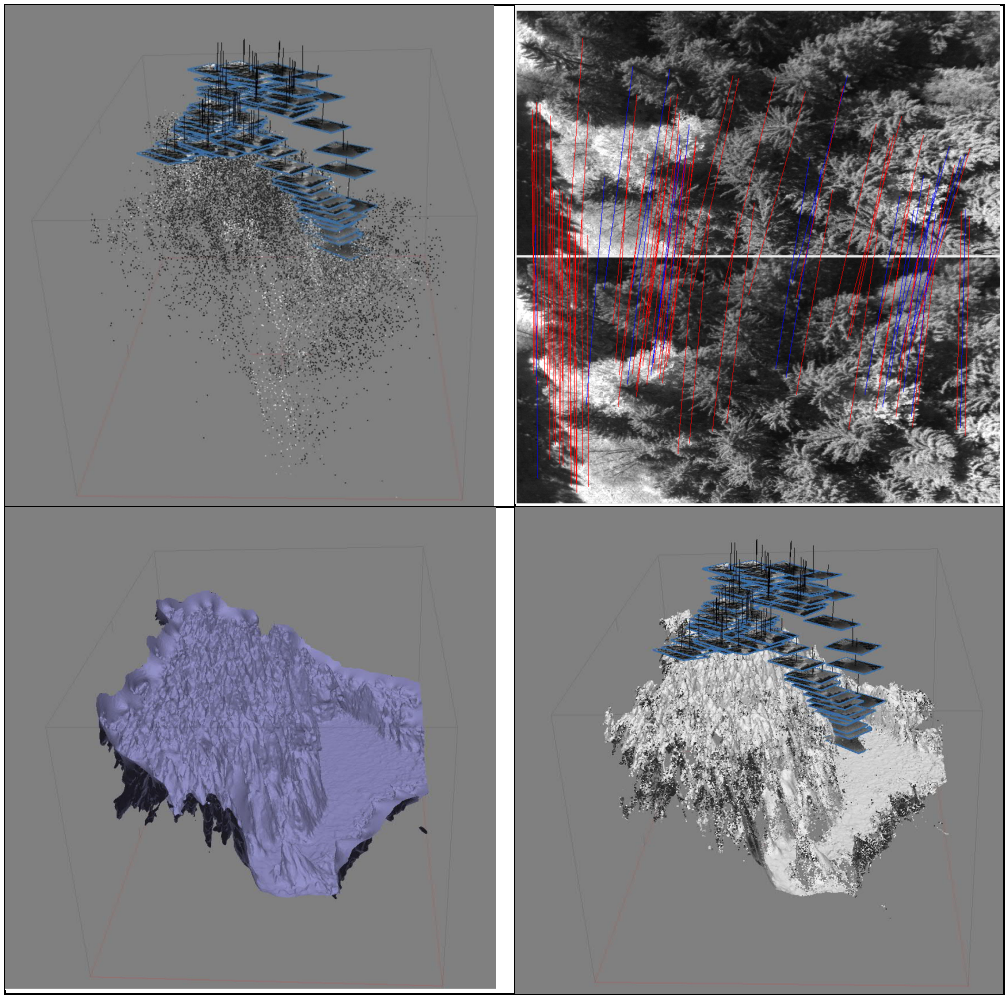

Abbildung 7 zeigt (im Uhrzeigersinn von links oben): die Bildervoransichten und die zugrundeliegenden Punktewolken; ein Beispiel von zwei Bildüberlagerungen; eine prozessierte punktbasierte Dichtewolke; und schliesslich die generierte 3D Oberfläche des Testgebietes (Waldgebiet Graf v. Drechsel).

Das Orthomosaik ist ein hochaufgelöstes Multispektralbild des Bestandes, welches für eine Visualisierung des Einzelbaumzustandes und weiteren Analysen zur Identifikation von befallenen Bäumen verwendet werden kann. Das DEM ist ein digitales Oberflächenmodell, welches die 3D Oberflächenstruktur des Kronendaches abbildet. Abb. 7 zeigt eine 3D Abbildung eines Testbestandes die basierend auf eigenen optischen Drohnendaten durch Überlappung von Multispektraldaten auf dem digitalen Höhenmodell berechnet wurde.
Ein weitere wichtige Anforderung an die Auswertung der optischen Bilder war die präzise Höhenbestimmung der Bäume, um das Fliegen mit dem drohnenbasierten Geruchssensor in Kronendachnähe zu ermöglichen. Dies wurde realisiert, in dem die mit den Daten des Bayerischen Vermessungsamtes berechnete Geländehöhe von den aus den drohnenbasierten optischen Daten berechneten Baumkronen-Höhen abgezogen wurden. Die so erhaltenen Vegetations-/Baumhöhen erlauben eine Wegepunktplanung unter Berücksichtigung der Realhöhen der Bäume (Abb. 8). So kann die Drohne autonom in Baumnähe gesteuert werden, wobei die Vorbereitung für diese Art des autonomen Fliegens sehr aufwendig und kostenintensiv ist (FO1). Dadurch wird dieses Verfahren sehr ineffizient (FO2) und eine Verbesserung des Verfahrens durch die Entwicklung eines feinskaligen Abstandssensors, z.B. zur Zweigerkennung, ist notwendig und für das Folgeprojekt FORST^{PRAX} geplant. Ein Abstandssensor, der direkt an der Drohne befestigt ist, wird auch

in der Lage sein eine präzisere Auflösung der Kronenoberfläche zu generieren. So kann in noch geringerem Abstand zu den Bäumen geflogen werden. Dies ist notwendig um die Aufklärungsrate von befallenen Bäumen zu erhöhen, was ebenfalls für die Effizienz des Detektionsverfahrens entscheidend ist.

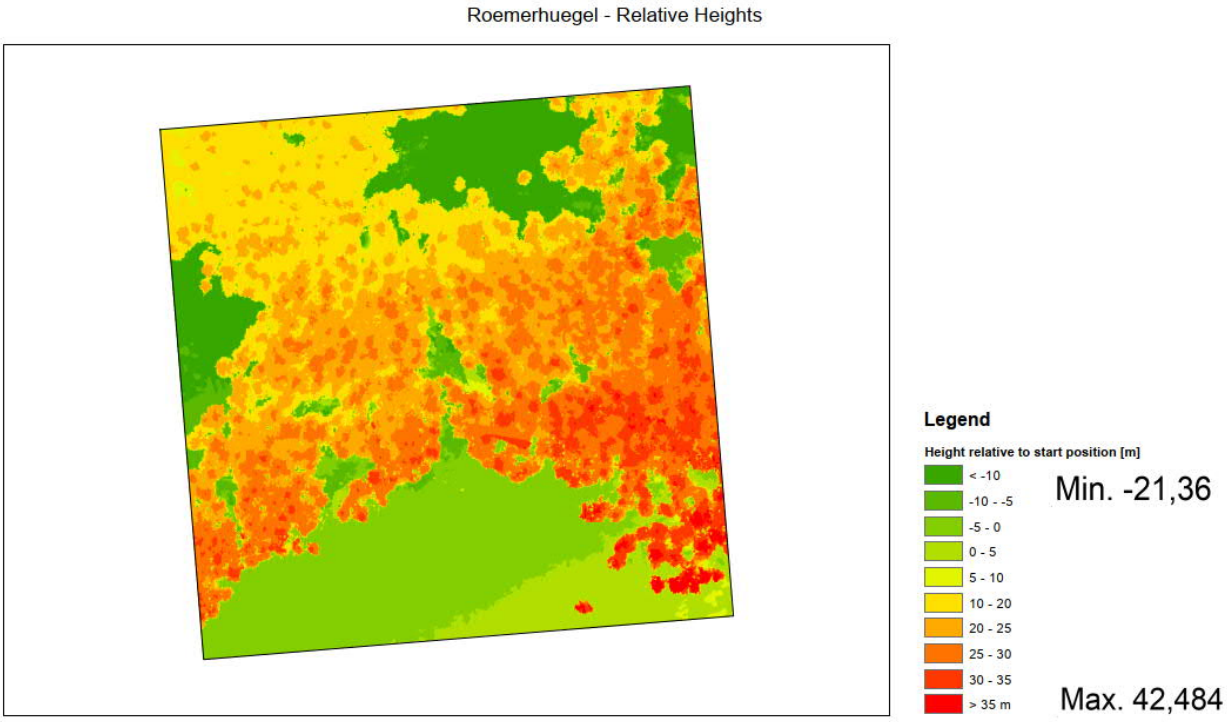

Abb. 8 zeigt die Realhöhen der Bäume eines Fichtenbestandes (Römerhügel, Biberbach, Christian Vogt) als HeatMap mit Minimal- und Maximalhöhen der Bäume.

Prozessierung der HeatMap:

HeatMaps wurden zur Visualisierung der Sensordaten verwendet. Zunächst wurden dazu künstlich generierte Daten und später im Projektverlauf Felddaten verwendet. Areale mit roter Farbe zeigen potentielle frische Käferherde. Die Daten der drei an der Drohne verbauten Sensoren werden automatisiert als .csv File ausgelesen. Die Sensordaten enthalten neben einem Zeitstempel auch die entsprechenden Georeferenzierungen des Drohnen-GPS. Diese Daten werden in eine GIS Software eingelesen, um zwei Arten von Visualisierung vorzubereiten: Ein Graduelles Punkte Overlay und eine Interpolierte Raster Karte. Beide Formate werden so kalibriert, dass der Höhenunterschied zwischen Drohne und Baum mit in die Intensitätsauswertung der Sensordaten einfließt. Diese HeatMap Berechnung ist in einem semi-automatischen Skript implementiert, was ein schnelleres Prozessieren der Daten ermöglicht.
Die Daten werden offline prozessiert, da auf Grund der meist schlechten Netzabdeckung in Waldgebieten ein direktes online System noch nicht realistisch ist. Nach dem Prozessieren der Daten werden diese über einen lokalen Server in einer Geodatenbank gespeichert und können so durch autorisierte Benutzer über eine Netzwerkverbindung eingesehen werden. Mit der Programmierung eines serverbasierten Web-Mapping-Service für die Regulierung des Datenabrufs, z.B. im Sinne einer Dienstleistung, wurde begonnen.

Die Arbeiten zur Realisierung der HeatMap sind zunächst mit künstlich generierten Daten und dann auf der Basis der Sensordaten durchgeführt worden. Dabei wurden die Daten aus den ersten Flügen auf dem Gelände der Georg-August-Universität (HFR, FORESTOPERATION) verwendet. Ausgewählte Beispiele für die bisher generierten Sensor HeatMaps sind in Abbildung 9 und 10 gezeigt.

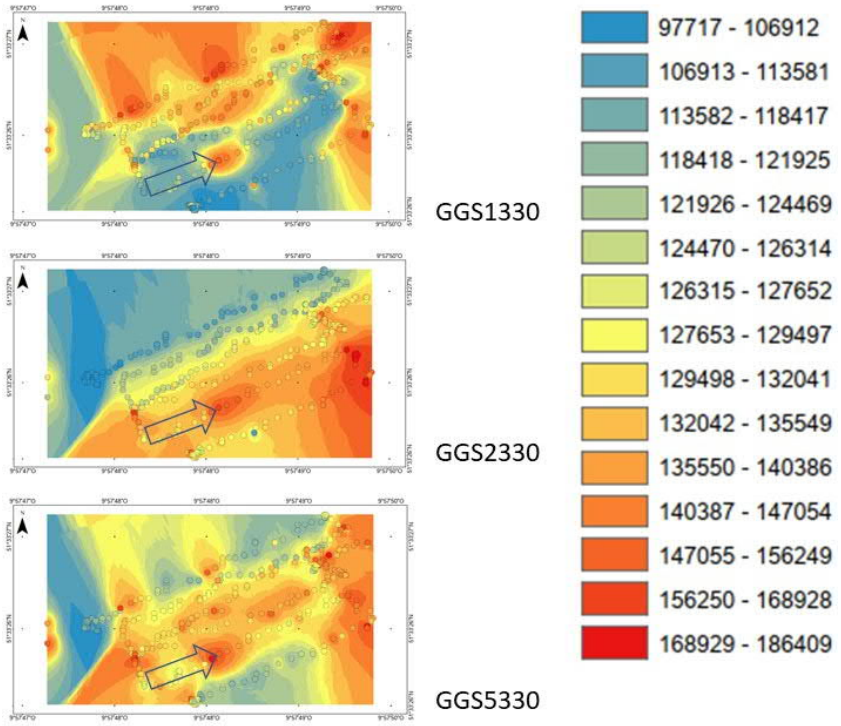

Abb. 9 zeigt die normierten einheitslosen Sensorsignale der drei verwendeten Sensoren (GGS1330, GGS2330, GGS5330) als HeatMap. Die Daten wurden mit einer semi-automatisierten Routine interpoliert. Der blaue Pfeil zeigt jeweils auf die in diesem Fall künstlich installierte α-Pinenquelle (98 %ige Lösung). Die Punkte in der HeatMap stellen die Einzelwerte der Sensordaten dar.

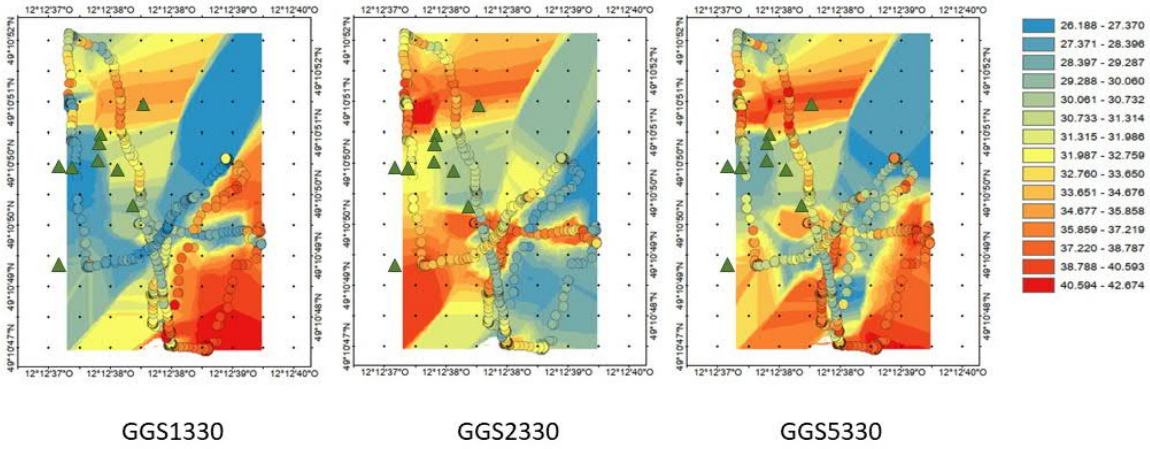

Abb. 10 zeigt die Sensordaten HeatMap des ersten Testfluges über einem Laub-Nadel Mischbestand bei Regenstauf Mitte April 2020. Die grünen Dreiecke markieren abgestorbene oder sichtbar befallene Bäume und die farbigen Punkte stellen die Intensität der Messwerte während des Fluges dar. Eine genauere Differenzierung der Befallsstadien war auf Grund zeitlicher Verzögerungen und Hiebsmaßnahmen nicht möglich.

Arbeitspaket F2: OGC Sensor Web Enablement (SWE)

Das ursprüngliche Ziel in diesem AP war der Echtzeit-Transfer der Daten von der Sensorplattform in ein OGC Sensor Web. Dieses Ziel musste angepasst werden, da bereits zu einem frühen Zeitpunkt im Projekt klar wurde, dass die Netzabdeckung über Wäldern aktuell nicht dem Anspruch an eine digitale Vernetzung genügt (C3). Das auf dieser Basis angepasste Projektziel war es, eine Geodatenstruktur aufzusetzen, um die Sensor- und Metaflugdaten auszulesen, zu speichern, zu verarbeiten und die Resultate grafisch darzustellen. Auch hier wurde die Zeiteffizienz zunehmend optimiert, da der Zeitanteil der Auswertung im Vergleich zum eigentlichen Sensordrohnenflug sehr hoch war (FO1).

Bei diesem angepassten Workflow wurden die Daten des Geruchssensors und die Bilddaten auf einen Computer transferiert und offline prozessiert. Die GIS basierte HeatMap wurde mit einer semi-automatisierten Routine erstellt und offline zur Verfügung gestellt, bzw. zu den entscheidenden Stakeholdern gesendet. Die Architektur der semi-automatischen Routine stellt sich wie folgt dar:

a) die von der Drohne automatisch auf USB transferierten Daten (plug and safe, entwickelt in C3) werden auf den vorbereiteten Server geladen, dabei werden ssh und MQTT Protokolle verwendet.
b) die Daten werden auf eine PostgreSQL/PostGIS Geodatenbank geladen, die das System-Backend darstellt
c) das Prozessieren der HeatMap wird auf dem Server ausgeführt (WPS)
d) die Ergebnisse werden als eine Browser-basierte HeatMap publiziert (WFS, WCS, WMS)

Abb. 11 zeigt das Diagramm der Geodateninfrastruktur, wie sie in PROTECT^{FOREST}© entwickelt wurde. Die das WebEnablement betreffenden Kapazitäten der Infrastruktur wurden mit simulierten Daten getestet. Die Daten aller erfolgten Flüge und alle Bestandesdaten wurden in die Datenbank geladen und die entsprechenden WebMapping Fähigkeiten wurden erfolgreich demonstriert. Diese Systemarchitektur kann grundsätzlich weiterentwickelt werden, um real-time HeatMap Processing zu erlauben. Nach aktuellem Stand ist eine near-real time Berechnung möglich.

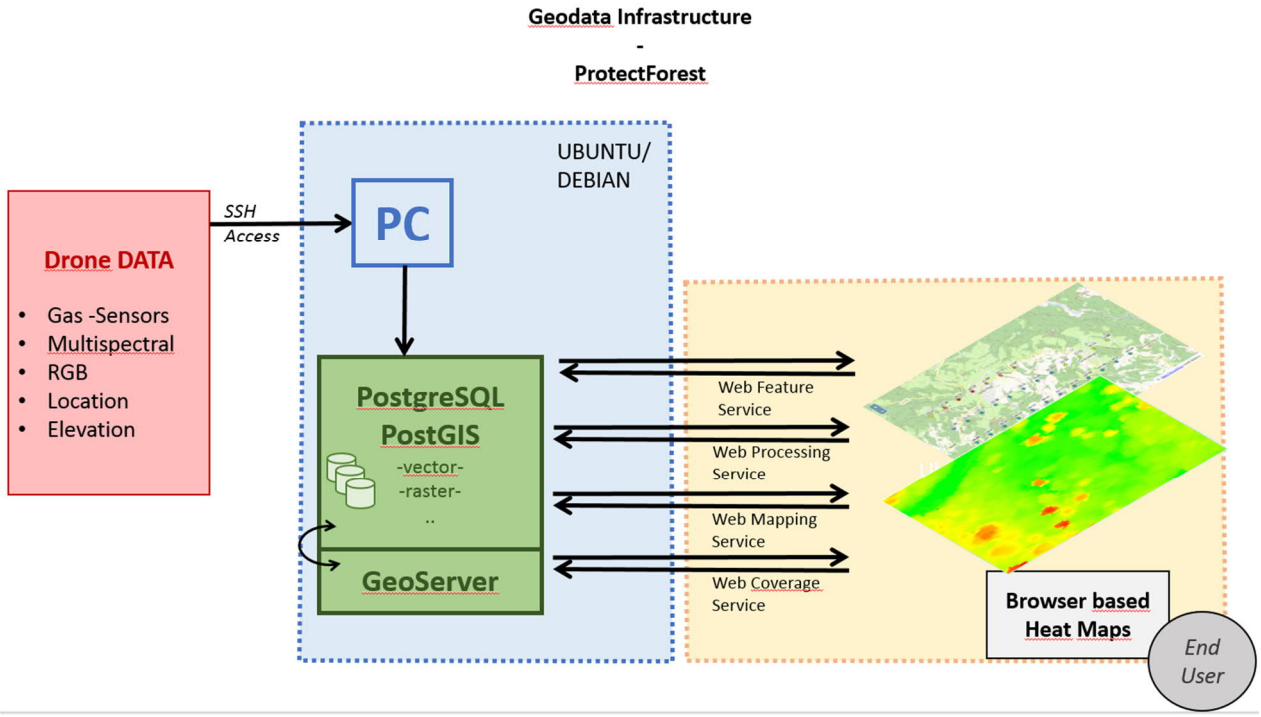

Abbildung 11 zeigt das Systemdesign der Geodateninfrastruktur für die OGC-Sensor Web Umsetzung in PROTECT[FOREST]©.

Arbeitspaket F3: Anschlussverwertung Business Plan

In Zusammenarbeit mit den Projektpartnern CADMIUM und FORESTOPERATION wurden verschiedene Businesspläne im Bereich Forst- und Agrardienstleistungen sowie Drohnenvertrieb entwickelt. Dabei wurde neben möglichen Anwendungen im Weinbau vor allem das Businessmodell „Dienstleistung“ und „Drohnenverkauf“ für Forstbetriebe untersucht. Die Ergebnisse sind in FO1 dargestellt.

Daraus ergibt sich, dass zunächst der Markt in Form von Demonstrations-Dienstleistungsaufträgen an steilen Hängen und schlecht begehbarem Gelände erschlossen werden soll. Auf Grund der hohen Personalkosten der klassischen Waldbegehung kann das Dienstleistungskonzept leicht auch auf ebene Waldgebiete ausgeweitet werden. Ist so das Messkonzept in der Praxis etabliert, können Lehrgänge für Forstwirte angeboten werden, bei denen sie das Bedienen der Sensordrohne und die Interpretation der HeatMaps lernen und in Folge mit einem gekauften System in Ihrem Betrieb arbeiten können. Auf Grund der zu vermutenden hohen Nachfrage nach der Dienstleistung und gleichzeitigem Mangel an Fachkräften, die diese Dienstleistung durchführen können, ist auch die Nachfrage nach dem Kauf von Systemen als sehr hoch einzuschätzen. Im Staatswald wäre ein aus Bundes- oder Landesmitteln bezahltes Monitoring denkbar, bei dem die Mitarbeiter der Landesforstbetriebe die Flüge durchführen würden. In dem Fall wäre die Firma CADMIUM über Schulungen, Drohnenverkauf und Wartungsverträge finanziell beteiligt. Ein Drohnensystem wäre mit ungefähr 30.000 € incl. Schulung zu veranschlagen und würde sich vor allem für große Forstbetriebe oder Forstbetriebsgemeinschaften lohnen. Wartungsverträge wären als Pakete von Grundwartung (routinemäßig einmal im Jahr) über Reparaturwartung (routinemäßig einmal im Jahr + einmaliger Sofort - Drohnentausch bei Absturz) bis hin zur Vollkostenwartung

(Routinemäßig einmal im Jahr + mehrmaliger Sofort - Drohnentausch bei Absturz) anzubieten.
Bei 2.7 Mio ha Fichtenbestand in Deutschland (Stand BWI 2012, alle Eigentumsarten), davon 74,4 % in Bayern und Baden-Württemberg und damit potentiell in steileren Lagen, ist die potentiell zu monitorende Fläche als enorm groß zu sehen, insb. da eine ausgewählte Fläche mehrfach (bei drei Schwärmzeiten drei mal) während der Vegetationsperiode beflogen werden muss. Bei einer durchschnittlichen Tagesleistung von 20 ha kommt man rechnerisch auf 405.000 Arbeitstage, die von Dienstleistern oder innerbetrieblich weitergebildetem Personal abgedeckt werden müssen. Selbst nach starker Reduktion der Fichte (Ausblick auf die 4. BWI in 2021) ist von einer enorm hohen Nachfrage auszugehen. Weiterhin kann eine Verwertung über den kostenpflichtigen Zugang zu einem Online-Portal erfolgen, in dem die Emissionsdaten zu den Beständen verfügbar sind. So kann ein Waldbesitzer sich einen Überblick über die aktuelle Befallslage auch in Nachbarrevieren verschaffen und entsprechend früh reagieren. Die Kosten pro ha für derartige Bestandesdaten wären an die bereits erhobenen Kosten der Einsätze gekoppelt (Privatwald) und würden entsprechend niedriger ausfallen.
In Folge der Etablierung des Messkonzeptes im Forst kann der Verkaufsbereich durch F&E Projekte auf andere Bereiche, insbesondere den Agrarbereich, erweitert werden.
An alle diese möglichen Geschäftsfelder ist allerdings die Implementierung eines Abstandssensors zur automatisierten Navigation gebunden. Auch eine online-Positionsbestimmung mittels neuartiger PPP Technologie und eine vollautomatische Datenauswertung wurde den Berechnungen in FO1 zugrunde gelegt. Diese drei technischen Innovationen wurden als die wesentlichen Hemmschwellen bei der Entwicklung des Prototypen zur Anwendungsbereitschaft identifiziert.

Arbeitspaket FO1: Analyse Arbeitsverfahren Drohneneinsatz

Das Arbeitsverfahren Drohneneinsatz wurde incl. Vorbereitung und Datenauswertung in einzelne Arbeitsschritte unterteilt, denen gemessene Zeiten zugeordnet wurden. Im Ergebnis zeigte sich deutlich, dass der Anteil an Vor- und Nachbereitungszeit bis zu 95% der Gesamtzeit ausmacht. Dies ist bedingt durch die aufwendige Flugplanung (65 % der Gesamtzeit), bei der z.B. die Baumkronenhöhe eines Bestandes für den Way Point Flug aufwendig multispektral vermessen werden muss. Weiterhin kommt es oft zu langen Anfahrten bis zur Fläche, die aber sehr variabel sind. Im Kostenmodell wurde zwischen 10 km im Falle eines weitergebildeten Försters und 100 km für einen Ingenieur als Dienstleister unterschieden. Die Datenauswertung und -darstellung (34 % der Gesamtzeit) ist ebenfalls deutlich zeitintensiver als die Flugzeit mit der Sensordrohne (6 % der Gesamtzeit). Die genaue Aufteilung in Zeiten findet sich in Tabelle 2.

Tabelle 2 zeigt die Zeiten, die für die einzelnen Vorbereitungs- und Nachbereitungsschritte aufgewandt wurden (n=2). Anfahrt und Rückfahrt wurden auf Grund der hohen Variabilität nicht berücksichtigt und dafür im Kostenmodell modelliert und auf Sensitivität überprüft.

Arbeitsschritte	Zeit [min]	Stunde [h]	Kosten [€]	Zeit [%]
Vermessung Kronendachprofil				
Flugplanung	32,50	0,54	25,78 €	12,6%
Anfahrt				
Vorbereitung Fläche	33,00	0,55	26,18 €	12,8%
Flug Multispektral / ha	5,40	0,09	4,28 €	2,1%
Nachbereitung Fläche	10,00	0,17	7,93 €	3,9%
Rückfahrt				
Nachbereitung	6,00	0,10	4,76 €	2,3%
Datenauswertung Höhenprofil	60,00	1,00	47,60 €	23,2%
Datenauswertung HeatMap	30,00	0,50	23,80 €	11,6%
Summe	176,90	2,95	140,34 €	68,5%
Sensorflug	15,00	0,25	11,90 €	5,8%
Vorbereitung Firma	32,50	0,54	25,78 €	12,6%
Anfahrt				
Vorbereitung Fläche	33,00	0,55	26,18 €	12,8%
Flug Sensor / ha				
Nachbereitung Fläche	10,00	0,17	7,93 €	3,9%
Rückfahrt				
Nachbereitung Firma	6,00	0,10	4,76 €	2,3%
Summe	81,50	1,36	64,66 €	31,5%
Summe Gesamt	258,40	4,31	205,00 €	

Die Zeitstudie basiert auf zwei begleiteten Drohneneinsätzen und mehreren Interviews. Sie wurde teilweise aus Einzelschritten, die im Rahmen der Projektentwicklung zeitlich stark entzerrt waren, rekombiniert.

Zur Effizienzverbesserung des Verfahrens sind daher drei Schritte unbedingt umzusetzen:

1) Installation eines Abstandssensors zur Hinderniserkennung in der Flugbahn, wie z.B. Äste, da dadurch keine Höhenprofilberechnung und entsprechende Multispektralflüge vor dem Sensorfluglug mehr notwendig sind.

2) Installation eines PPP (Precise Point Positioning) Systems zur referenzpunktlosen und zentimetergenauen Positionsbestimmung. Dies spart 15 % der Gesamtzeit (5 % bei Flugplanung und 10 % bei Datenauswertung), da keine Positionsmarker im Fluggebiet verteilt werden müssen und keine Nachjustierung der Geodaten zum Verschneiden von Sensordaten und Basiskarte (z.B. Google Maps) mehr notwendig ist.

3) Entwicklung einer Auswerteroutine zur Datenübertragung, Analyse, Darstellung und serverbasierten Veröffentlichung. Dies spart 10 % der Datenauswertungszeit, da sämtliche Prozesse vollautomatisch ablaufen und die HeatMap danach im Internet verfügbar ist. Geltende Datenschutzrichtlinien müssen entsprechend beachtet werden.

Arbeitspaket FO2: Entwicklung Handlungsempfehlungen und Web Service Integration

Grundsätzlich wurden zwei Möglichkeiten des Drohneneinsatzes mit den klassischen Bestandesbegehungen verglichen: 1) Forstwirt wird weitergebildet und arbeitet mit eigener Drohne (Geschäftsmodell Drohnenverkauf) und 2) Nicht-forstlicher Drohnenpilot fliegt als Dienstleister (Geschäftsmodell Dienstleistung). Für die Begehung und diese beiden Geschäftsmodelle wurde ein Kostenmodell erstellt, welches durch Multifaktorvariation einen möglichst differenzierten Vergleich erlaubt.

In einem ersten Schritt wurde dazu ein Modell entwickelt, dass die Fortbewegungsgeschwindigkeit im Wald realistisch modelliert. Da die Geländeneigung hierauf einen großen Einfluss hat, wurden Schrittgeschwindigkeiten nach Tobler verwendet, bei denen die Steigung berücksichtigt wird. Die von Tobler angenommene Fortbewegungsgeschwindigkeit beim Wandern auf befestigten Wegen beträgt 1,4 $m \times s^{-1}$ auf ebenem Weg. Dies ist eine starke Überschätzung für die Fortbewegungsgeschwindigkeit im Wald. Allerdings kann man auf Grund der hohen Variabilität von Untergrundbeschaffenheit und Bewuchsdichte nicht genau festlegen, wie hoch die reale Fortbewegungsgeschwindigkeit im Wald ist. Orientierend geben die KWF-Zeitbedarfstafeln zusätzliche Zeitaufschläge von bis zu 60 % für die Kombination aus steilem Gelände (>55°) mit starkem Bewuchs. Daher wurde eine Sensitivitätsstudie mit den Geschwindigkeiten 1,4 ; 1,05 ; 0,7 und 0,35 $m \times s^{-1}$ durchgeführt. Dabei wurden die Kosten pro begangenem ha abhängig von der Steigung und incl. Anfahrtskosten zur Fläche ermittelt.

Diese Kosten wurden mit den Kosten für den Drohneneinsatz verglichen. Zunächst wurden dazu die Kosten für den Drohnenflug pro ha untersucht. Dabei wurde in einer Sensitivitätsstudie festgestellt, dass Fluggassenabstand und Fluggeschwindigkeit die stärksten technischen Einflussfaktoren sind, die Personalkosten aber den insgesamt höchsten Einfluss auf die Gesamtkosten haben. Die Kalkuation beinhaltete auch Nebenkosten wie Fahrten, Vor-/Nacharbeiten, Datenauswertungen etc. die durch die Zeitstudien berechnet werden konnten.

Im Vergleich von Befliegung und Begehung zeigt sich, dass insbesondere in steilen Lagen und schwer begehbarem Gelände der Drohneneinsatz günstiger ist. Die Ermüdung des Forstwirtes über sechs Stunden Fußmarsch und der aktuell hohe Anteil an älteren Forstwirten wurde nicht mit eingerechnet, da diese Faktoren sehr individuell sind.

Tabelle 3 zeigt die Kosten eines Forstwirtes bei der Käfersuche incl. Nebenkosten (An/Abfahrtsweg 10 km, davon 7 km Straße, 3 km Wald) in Abhängigkeit von der Steigung und einer **Gehgeschwindigkeit von 1,05 m × s^{-1}**. Die roten Felder zeigen an, wenn der Drohneneinsatz günstiger ist (**Forstwirt als Pilot** (47,60 € brutto × h^{-1}), vollautomatisiertes Verfahren (Abstandssensor, PPP Positionsbestimmung, autom. HeatMap Berechnung), An-/Abfahrt wie bei Begehung, **Fluggassenabstand 4 m (Hiebsreife erreicht)**, Fluggeschwindigkeit 2,5 m × s^{-1}, incl. Nebenkosten (Vor- und Nachbereitung, zusätzliche Fahrtkosten bei Übersteigen von 20 ha Tagesflugleistung)). Die schwarzen Linien zeigen an, dass eine Befliegung als Dienstleistung durch einen Ingenieur günstiger ist als die Begehung (**Ingenieur als Pilot** (70 € brutto × h^{-1}), vollautomatisiertes Verfahren (Abstandssensor, PPP Positionsbestimmung, autom. HeatMap Berechnung), An/Abfahrt 100 km (davon 97 km Straße, 3 km Wald), **Fluggassenabstand 4 m (Hiebsreife erreicht)**, Fluggeschwindigkeit 2,5 m × s^{-1}, incl. Nebenkosten (Vor- und Nachbereitung Flug, Übernachtungs- und Fahrkosten bei Übersteigen von 20 ha Tagesflugleistung)). Die Ermüdung des Forstwirtes wurde nicht berechnet, daher wird der Drohneneinsatz in der Praxis wahrscheinlich deutlich öfter favorisiert als nach dieser Kostenkalkulation ersichtlich.

		Kosten [€]											
Steigung [Grad]	Fläche [ha]												
	1	5	10	15	20	30	40	50	60	70	80	90	100
-50	180,15	900,76	1801,52	2702,28	3603,04	5404,56	7206,08	9007,60	10809,12	12610,64	14412,16	16213,68	18015,20
-40	58,72	293,59	587,18	880,77	1174,36	1761,54	2348,72	2935,90	3523,08	4110,26	4697,44	5284,62	5871,80
-30	29,00	144,99	289,98	434,98	579,97	869,95	1159,94	1449,92	1739,91	2029,89	2319,88	2609,86	2899,85
-25	22,63	113,13	226,26	339,39	452,52	678,78	905,05	1131,31	1357,57	1583,83	1810,09	2036,35	2262,61
-20	18,59	92,95	185,90	278,85	371,79	557,69	743,59	929,48	1115,38	1301,28	1487,18	1673,07	1858,97
-15	15,90	79,50	159,00	238,49	317,99	476,99	635,98	794,98	953,97	1112,97	1271,96	1430,96	1589,95
-10	14,05	70,26	140,53	210,79	281,05	421,58	562,10	702,63	843,15	983,68	1124,21	1264,73	1405,26
-5	12,75	63,77	127,54	191,31	255,08	382,61	510,15	637,69	765,23	892,76	1020,30	1147,84	1275,38
0	12,91	64,55	129,10	193,65	258,20	387,30	516,40	645,50	774,60	903,70	1032,80	1161,90	1291,00
5	14,25	71,25	142,50	213,74	284,99	427,49	569,98	712,48	854,97	997,47	1139,96	1282,46	1424,95
10	16,10	80,49	160,97	241,46	321,94	482,91	643,89	804,86	965,83	1126,80	1287,77	1448,74	1609,72
15	18,73	93,67	187,34	281,01	374,68	562,03	749,37	936,71	1124,05	1311,40	1498,74	1686,08	1873,42
20	22,53	112,65	225,30	337,95	450,60	675,90	901,20	1126,50	1351,80	1577,10	1802,40	2027,70	2253,00
25	28,39	141,97	283,94	425,91	567,88	851,82	1135,76	1419,70	1703,64	1987,58	2271,51	2555,45	2839,39
30	37,29	186,43	372,87	559,30	745,73	1118,60	1491,46	1864,33	2237,20	2610,06	2982,93	3355,80	3728,66
40	78,93	394,66	789,32	1183,99	1578,65	2367,97	3157,30	3946,62	4735,94	5525,27	6314,59	7103,91	7893,24
50	244,85	1224,23	2448,47	3672,70	4896,94	7345,40	9793,87	12242,34	14690,81	17139,27	19587,74	22036,21	24484,68

Tabelle 4 zeigt die Kosten eines Forstwirtes bei der Käfersuche incl. Nebenkosten (Anfahrtsweg 10 km, davon 7 km Straße, 3 km Wald) in Abhängigkeit von der Steigung und einer **Gehgeschwindigkeit von 0,35 m × s^{-1}**. Die blauen Felder zeigen an, wenn der Drohneneinsatz günstiger ist (**Forstwirt als Pilot** (47,60 € brutto × h^{-1}), vollautomatisiertes Verfahren (Abstandssensor, PPP Positionsbestimmung, autom. HeatMap Berechnung), Anfahrt wie bei Begehung, **Fluggassenabstand 8 m (Altbestand)**, Fluggeschwindigkeit 2,5 m × s^{-1}, incl. Nebenkosten (Vor- und Nachbereitung, zusätzliche Fahrtkosten bei Übersteigen von 20 ha Tagesflugleistung)). Die schwarzen Linien zeigen an, dass eine Befliegung als Dienstleistung durch einen Ingenieur günstiger ist als die Begehung (**Ingenieur als Pilot** (70 € brutto × h^{-1}), vollautomatisiertes Verfahren (Abstandssensor, PPP Positionsbestimmung, autom. HeatMap Berechnung), An-/Abfahrt 100 km, **Fluggassenabstand 8 m (Altbestand)**, Fluggeschwindigkeit 2,5 m × s^{-1}, incl. Nebenkosten (Vor- und Nachbereitung Flug, Übernachtungs- und Fahrkosten bei Übersteigen von 20 ha Tagesleistung)). Die Ermüdung des Forstwirtes wurde nicht berechnet, daher wird der Drohneneinsatz in der Praxis je nach Betrieb öfter favorisiert als nach dieser Kostenkalkulation ersichtlich.

Steigung [Grad]	Kosten [€] Fläche [ha] 1	5	10	15	20	30	40	50	60	70	80	90	100
-50	428,85	2144,24	4288,49	6432,73	8576,98	12865,47	17153,95	21442,44	25730,93	30019,42	34307,91	38596,40	42884,88
-40	130,78	653,92	1307,84	1961,75	2615,67	3923,51	5231,34	6539,18	7847,01	9154,85	10462,68	11770,52	13078,36
-30	57,84	289,18	578,36	867,53	1156,71	1735,07	2313,42	2891,78	3470,14	4048,49	4626,85	5205,20	5783,56
-25	42,19	210,97	421,94	632,92	843,89	1265,83	1687,78	2109,72	2531,67	2953,61	3375,56	3797,50	4219,45
-20	32,29	161,43	322,87	484,30	645,74	968,60	1291,47	1614,34	1937,21	2260,08	2582,95	2905,81	3228,68
-15	25,68	128,42	256,84	385,26	513,67	770,51	1027,35	1284,18	1541,02	1797,86	2054,70	2311,53	2568,37
-10	21,15	105,75	211,50	317,25	423,00	634,51	846,01	1057,51	1269,01	1480,52	1692,02	1903,52	2115,02
-5	17,96	89,81	179,62	269,43	359,24	538,87	718,49	898,11	1077,73	1257,36	1436,98	1616,60	1796,22
0	18,35	91,73	183,46	275,19	366,92	550,38	733,83	917,29	1100,75	1284,21	1467,67	1651,13	1834,58
5	21,63	108,17	216,34	324,51	432,67	649,01	865,35	1081,69	1298,02	1514,36	1730,70	1947,03	2163,37
10	26,17	130,84	261,69	392,53	523,38	785,06	1046,75	1308,44	1570,13	1831,82	2093,50	2355,19	2616,88
15	32,64	163,21	326,42	489,62	652,83	979,25	1305,67	1632,08	1958,50	2284,91	2611,33	2937,75	3264,16
20	41,96	209,79	419,58	629,38	839,17	1258,75	1678,34	2097,92	2517,51	2937,09	3356,67	3776,26	4195,84
25	56,35	281,76	563,52	845,28	1127,04	1690,55	2254,07	2817,59	3381,11	3944,62	4508,14	5071,66	5635,18
30	78,18	390,90	781,79	1172,69	1563,59	2345,38	3127,17	3908,96	4690,76	5472,55	6254,34	7036,13	7817,93
40	180,40	902,00	1804,01	2706,01	3608,01	5412,02	7216,03	9020,03	10824,04	12628,05	14432,06	16236,06	18040,07
50	587,65	2938,23	5876,45	8814,68	11752,90	17629,35	23505,81	29382,26	35258,71	41135,16	47011,61	52888,06	58764,51

Tabelle 3 und 4 zeigen, dass selbst in einem Szenario mit für die Drohne schlechtesten Parametern (Parameter für gerade erst hiebsreifen Bestand) und besten Parametern für den begehenden Forstwirt ein Drohneneinsatz durch einen Dienstleister sinnvoll sein kann. Bei dem Szenario mit für die Drohne besten und den Forstwirt schlechtesten Parametern ist der Einsatz einer Drohne sehr attraktiv und ab 40 ha Fläche immer zu bevorzugen.
Damit ist aus Sicht der Kostenstruktur ein Drohneneinsatz grundsätzlich sinnvoll. Insbesondere auf Grund der aktuellen Altersstruktur des Personals in den Forstbetrieben

erscheint der Einsatz einer Drohne besonders ressourcenschonend. Durch das Ermöglichen eines konstanten Monitorings können Käfernester früh beseitigt werden und dadurch die Notwendigkeit zum Verkauf von Holz während kalamitätsbedingten Preiseinbrüchen verringert oder verhindert werden.
Die gesamte Kostenstudie ist sehr umfangreich, da jeder der genannten Faktoren auf Sensitivität überprüft und das Modell somit multifaktoriell untersucht wurde. Daher wurden hier nur zwei ausgewählte Ergebnisse gezeigt. Die Ergebnisse eignen sich auf Grund ihres Neuigkeitswertes für eine Publikation in einem internationalen oder nationalen Journal, z.B. „Forest Policy and Economics“.

Ein weiterer Aspekt im Projekt war die Kalkulation der Kosten für die TDS-Messoption mit Drohne. Bei 150 € Kosten für die Analyse einer TDS Messung im GC-MS incl. Auswertung und einer Sammeldauer von 10 min (Abb. 1), sowie 45 min Vor-/Nachbereitungszeit, 4 min An- und Abflugzeit zur Messstelle und 2 min Akkuwechselzeit bei 40 min Flugdauer je Akkusatz ergeben sich die in Abb. 12 dargestellten Kosten. Durchführender ist ein Ingenieur (70 € × h^{-1}) und die Fahrtkosten wurden wie für Tabelle 2 und 3 veranschlagt.

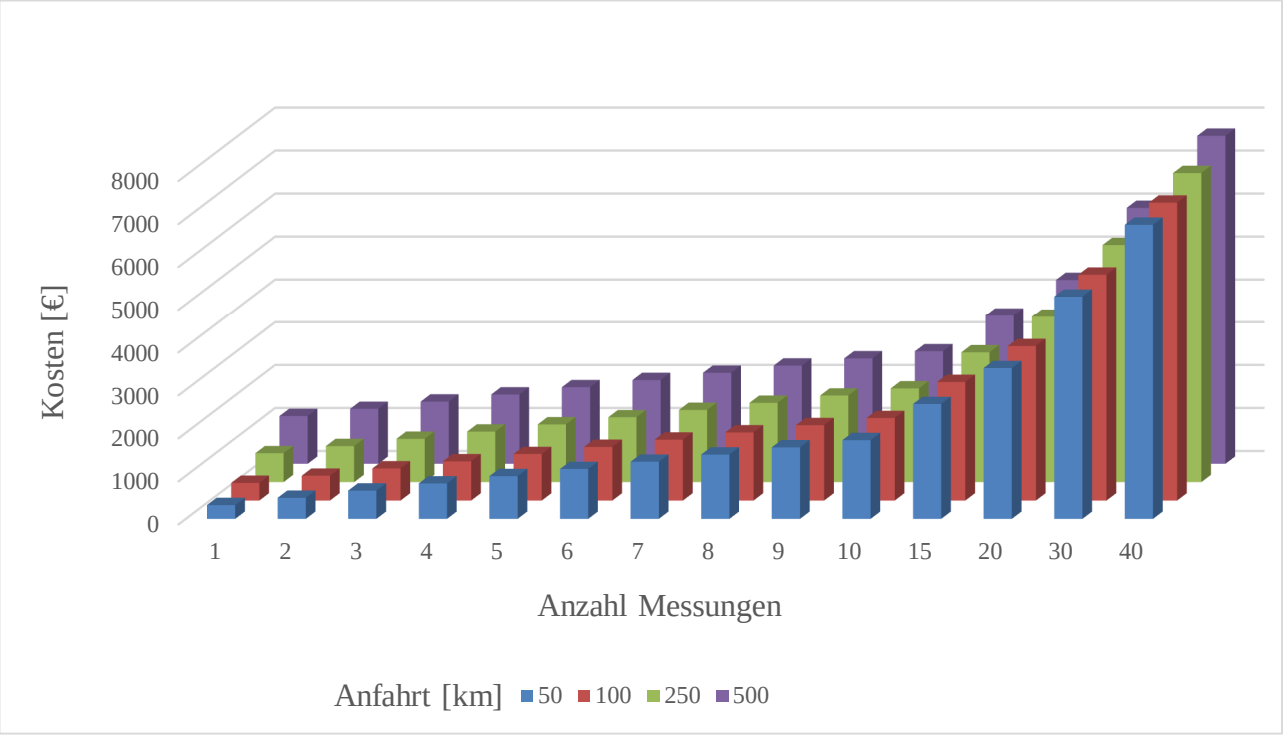

Abb. 12 zeigt die Kostenstruktur für zwischen ein bis 40 TDS Messungen mit Drohne bei unterschiedlich langen Anfahrtswegen.

Es zeigt sich deutlich, dass die Kosten hauptsächlich von der Anzahl der Messungen bestimmt wird. Desto mehr Messungen gemacht werden, desto weniger Einfluss haben die An- und Abfahrtskosten des Personals auf die Durchschnittskosten für eine Messung.

Die Entwicklung von Handlungsempfehlungen in Bezug auf den forstlichen Eingriff nach Käferbaumdetektion gestaltete sich als praxisnah und unkompliziert, da durch die

Zusammenarbeit mit den beteiligten Waldbesitzern Graf v. Drechsel und Christian Vogt trotz der großen Unterschiede in der Bewirtschaftungsform der Betriebe und der Baumartenzusammensetzung der Umgang mit den Käferbäumen gleich war. Kurz nach den gemeinsamen oder einzelnen Bestandesbegehungen, bei denen die befallenen Bäume mit LogBuch markiert wurden, wurden diese in Einzelbaumnutzung entnommen. Der Zeitverzug zwischen Markieren und Entnehmen belief sich auf höchstens eine Woche. Dies spricht für die Effizienz des Käfersuchens, da in anderen weniger intensiv kontrollierten Revieren der Käfer nicht mehr ausreichend durch Entnahmen bekämpft werden kann (z.B. Stadtwald Heiligenstadt in Thüringen, Buchenmischwald, Forstbezirk Fürstenberg bei Lenzkirch, Fichtenwald oder Landeswald Niedersachsen bei Münchehof, Fichtenmischwald). Hier werden abgestorbene Fichten großflächig in Femelschlag oder sogar Kahlschlag entnommen oder der Wald sogar temporär begrenzt sich selbst überlassen. Diese Beispiele zeigen eindrücklich, dass je nach Standort eine frühzeitige Erkennung des Käferbefalls den Totalausfall der Fichte verhindern kann.
Einzelbaumnutzungen sind relativ kostspielig, da die Kosten der gesamten Nutzungskette von Anfahrt bis Abtransport auf einen oder wenige Bäume umgerechnet werden müssen. Es ergeben sich Bereitstellungskosten zwischen 27 und 80 € × fm^{-1} je Einzelbaum, abhängig von Gelände und Steigung. Damit liegen die Gestehungskosten selbst in nur leicht steilem oder unzugänglichen Gelände über dem aktuellen Fichtenlangholzpreis. Eine ökonomisch auskömmliche Nutzung ist so nicht möglich. Der Einsatz von Finanzmitteln für die Käferholzernte und -aufarbeitung kommt einer Investition in den Waldschutz gleich.

2. Verwertung

- **Verwertbarkeit der Ergebnisse im Sinne des fortgeschriebenen Verwertungsplans**

PROTECT^{FOREST}© wurde als Wortmarke geschützt markenrechtlich eingetragen.
Weiterhin wurden insbesondere durch die Firma Cadmium GmbH Geschäftsmodelle zur Vergabe von Lizenzen bei der Verwendung des Online-Auswertungsportals erstellt. Als Vergleichsportal nutzt der Projektpartner CADMIUM bereits das System Logbuch, bei dem Bestandsdaten mobil eingepflegt werden, um anschließend analysiert zu werden. Vor der Markterschliessung ist es allerdings notwendig, noch weitere technische Entwicklungen durchzuführen, die in dem FNR Folgeantrag FORST^{PRAX} zusammengefasst wurden.

- **Wissenschaftliche und/oder technische Erfolgsaussichten nach Projektende**

Die Erstellung dreidimensionaler Echtzeit VOC-Profile ist ein im Projekt herausgearbeiteter Aspekt, der grundsätzlich neu ist und für die Ökosystemanalyse ein entscheidender Fortschritt sein kann. Eine Anwendung in vielen Forschungs- und Anwendungsbereichen ist denkbar, von Innenraumemissionen über Agraremissionen bis hin zur VOC Dynamik komplexer terrestrischer Ökosysteme und der Korrelation der Emissionen zum Ökosystemzustand.

Das Projekt PROTECT^{FOREST}© besitzt viel Entwicklungspotenzial, vor allem, da fliegende Messstationen viele verschiedene Aufgaben übernehmen könnten (z.B. SmartFarming).
Das Ziel ist es, ein marktfähiges Produkt aus dem im Projekt gebauten Prototypen zu entwickeln und sowohl Drohnen mit Halbleitergassensorik als auch die Dienstleistung der Datenerhebung und Auswertung anzubieten. Vor dem Hintergrund der Klimaveränderungen und des Zustandes des Waldes ist mit erhöhtem Bedarf in diesem Bereich zu rechnen, dies zeichnete sich bereits während des Projektes ab, da insbesondere der Projektpartner CADMIUM viele Anfragen zur Borkenkäferfrühdetektion aus der Praxis bekam. Daraus ergaben sich für das Projekt wertvolle Zusammenarbeiten mit Waldbesitzern.
Im Fokus für das Folgeprojekt FORST^{PRAX} stehen außerdem die Weiterentwicklung der Analysemethode und die Langzeiterprobung des Systems. Unter anderem die bereits in diesem Projekt sehr kooperativen Waldbesitzer Graf von Drechsel und Christian Vogt haben sich auch für das Folgeprojekt bereit erklärt, ihre Expertise und ihren Wald als Testgebiet und Reallabor einzusetzen und damit die Implementierung des neuartigen Messsystems in die Praxis vorzubereiten.
Aktuell wird ein Forschungsantrag für ZIM gestellt, in dem das Sensorsystem für eine stationäre Anwendung (Thermoholz) erweitert, kalibriert und installiert werden soll. Zudem wurde ein Konsortium für einen Antrag beim BMBF (Digital.Green.Tech) aufgestellt, das den drohnenbasierten Halbleitergassensor für die Detektion verschiedener VOCs auch über Laubwaldbeständen erweitern soll. Eine entsprechende Projektskizze (FOREST^{CARE}) wurde bereits beim BMBF eingereicht. Zudem wird an einem Projektantrag für ein DFG Projekt für das Ökosystemmonitoring auf der Basis von VOCs gearbeitet.

- **Aussichten für eine mögliche notwendige nächste Phase bzw. die nächsten innovatorischen Schritte zur erfolgreichen Umsetzung der Ergebnisse**

Es gilt im Rahmen des bei der FNR beantragten Folgeprojektes FORST^{PRAX} die in der Effizienzstudie in PROTECT^{FOREST}© identifizierten Schwächen durch technische Innovationen auszugleichen. Dazu gehören:

1) aufwendige Flugvorbereitung (vermessen der Kronenhöhe) -> **Abstandssensor**, der Zweige automatisch erkennt

2) aufwendige Georeferenzierung zur HeatMap Generierung -> **Installation eines PPP Positionierungssystems**, wodurch die Georeferenzierung der Sensordaten wesentlich präziser wird

2) aufwendige und vielschichtige Datenverarbeitung zur HeatMap Generierung -> **vollautomatisierte Datenauswertung** übernimmt alle Einzelschritte der HeatMap Generierung und stellt Daten auf Server abrufbereit zur Verfügung

Parallel zu diesen technischen Weiterentwicklungen soll der Prototyp bei den beiden kooperierenden Waldbesitzern, Graf. v. Drechsel und Christian Vogt und weiteren Praxispartnern (insg. fünf LOIs aquiriert, weitere zwei stehen noch in Aussicht), in den

Betriebsablauf integriert werden, um die Praxisfähigkeit des Verfahrens in Fachkreisen zu etablieren.

- **Wirtschaftliche Erfolgsaussichten**

Die Anwendung des Messsystems kann neben der Forstbranche auch für andere Branchen eine hilfreiche Möglichkeit sein, flüchtige Gase aufzuspüren. Feuerwehren zum Beispiel könnten damit Methangas in der Nähe von Biogasanlagen oder gefahrenfrei Kraftstoffaustritt bei Unfällen aufspüren. Diese Szenarien werden auf Ihre Praxistauglichkeit getestet und nach Projektabschluss weiterverfolgt und bearbeitet. Kontakte zu Feuerwehren und Instituten bestehen bereits durch den Projektpartner CADMIUM. Die Realisierung ist innerhalb des ersten Halbjahres nach Projektende möglich. Vorteil des im Rahmen von PROTECT^{FOREST}© entwickelten Prototypen ist die mögliche Einbindung in Industrie-4.0 Konzepte über die grundsätzlich zu Verfügung stehende Schnittstellenarchitektur des Sensors.

Die Konkurrenz (z.B. Firma Festmeter) im Bereich Waldanalyse und -monitoring ist auf das Projekt PROTECT^{FOREST}© aufmerksam geworden und hat bereits angefragt, um zu erfahren welches Verfahren entwickelt wurde und wie hoch die Erfolgsaussichten sind.

Anfragen für die Verwendung der Sensorik gibt es inzwischen auch aus anderen Bereichen: das Bayerische Landesamt für Gesundheit und Lebensmittelsicherheit hat Interesse bekundet, das Drohnensystem zu nutzen, um Wildschweinkadaver im Forst auch auf große Entfernung aufzuspüren.
Erste Gespräche wurden auch mit der HS Geisenheim geführt, die sich mit wissenschaftlichen Untersuchungen zum Weinanbau und Insektenbekämpfung beschäftigt. Der Geruchssensor könnte für die Frühdetektion von Insekten (z.B. Kirschfruchtfliegen) eingesetzt werden. Derzeit wird eruiert, inwiefern ein sinnvoller Einsatz in Weinanbaugebieten möglich ist, um Früherkennung zu betreiben und damit etwa den Einsatz von Insektiziden zu reduzieren.

Eine Präsentation der Drohnentechnik auf der „1st International Electronic Conference on Forests — Forests for a Better Future: Sustainability, Innovation, Interdisciplinarity“ ist zusammen mit FORESTOPERATION und FeLis geplant. Weiterhin wird das Projekt auf der KWF-Messe 2021 mit Messestand und Vorführung vertreten sein. Weitere Präsentationsmöglichkeiten sind über das Bayerische Vermessungsamt (BayernLAB) möglich. Hierzu gibt es Anfragen dieses innovative Verfahren einem Fachpublikum an Förstern, Vermessungsexperten und Interessenten der Staatsforsten vorzustellen.
Über Deutschlands größten Drohnenverband UAV-DACH sind weiterhin Präsentationen geplant u.a. auf diversen Messen z.B. Intergeo, UTSEC Nürnberg.

3. Erkenntnisse von Dritten

In Bezug auf die technische Entwicklung der Drohne und die Sensoruntersuchungen im Labor, bzw. die HeatMap Programmierung sind von Dritter Seite keine Erkenntnisse

bekannt geworden. Von verschiedenen Seiten (FVA, Wissenschaft, Presse, Waldbesitzer) wurde bisher sehr hohes Interesse an den im Projekt durchgeführten Entwicklungen deutlich, was sich teils in Skepsis aber vor allem in Zuspruch äußerte.

Im von der FNR geförderten Projekt IpsPro wurde ein Borkenkäferfrühwarnsystem entwickelt, welches auf der Basis von statischen und dynamischen Daten sowie Ereignisdaten eine lokale Risikoabschätzung für Borkenkäferbefall erlaubt. Es wurde bereits Kontakt zu dem Projektkoordinator der FVA Freiburg, Dr. Markus Kautz, aufgenommen, um Möglichkeiten für eine Zusammenarbeit zu evaluieren.

4. Veröffentlichungen

Im Rahmen des Projektes wurde die technische Entwicklung eines Sensordrohnensystems durchgeführt. Bereits im Frühstadium der Entwicklung wurde das Sensormodul unter Laborbedingungen getestet. Der Drohnenprototyp wurde unter nachgestellten Feldbedingungen und in Feldtests getestet. Die so erhobenen Daten wurden zu einer HeatMap generiert. Diese Datensätze wurden zur Publikation auf einer Fachtagung der Zeitschrift Forest angemeldet und akzeptiert. Ziel ist eine weitere Publikation in einem Tagungsband der OpenAccess Zeitschrift Forest.

Es ist eine weitere detaillierte Fachpublikation in Remote Sensing of Environment geplant. Ein Manuskript für die Zeitschrift wurde in einem frühen Projektstadium bereits eingereicht, auf Grund fehlender Felddaten aber abgelehnt. Im Moment werden intensiv Felddaten erhoben, so dass das Manuskript ergänzt werden und bis Projektende nochmals eingereicht werden kann.

Eine weitere Publikation in dem internationalen Journal „Forest Policy and Economics“ ist mit den Daten der vergleichenden Kostenkalkulation Bestandesbegehung / Drohneneinsatz für die Käferdetektion geplant.

In Zusammenarbeit mit der Abteilung Forstzoologie und Waldschutz sollen bis Projektende Experimente zur dreidimensionalen VOC-Verteilung in Beständen durchgeführt werden, die grundsätzlich neu und publizierbar sind. Es ist hier allerdings keine Einreichung vor Projektende zu erwarten, da sich das Zeitfenster der Vegetationsperiode 2020 langsam schließt und so nur orientierende Messungen möglich sein werden.

Literatur

Amin, H.; Atkins, P. T.; Russo, R. S.; Brown, A. W.; Sive, B.; Hallar, A. G.; Huff Hartz, K. E. Effect of bark beetle infestation on secondary organic aerosol precursor emissions. *Environmental science & technology* **2012,** *46* (11), 5696–5703. DOI: 10.1021/es204205m.

Balkovsky, E.; Shraiman, B. I. Olfactory search at high Reynolds number. *Proceedings of the National Academy of Sciences of the United States of America* **2002,** *99* (20), 12589–12593. DOI: 10.1073/pnas.192393499.

Berg, A. R.; Heald, C. L.; Huff Hartz, K. E.; Hallar, A. G.; Meddens, A. J. H.; Hicke, J. A.; Lamarque, J.-F.; Tilmes, S. The impact of bark beetle infestations on monoterpene emissions and secondary organic aerosol formation in western North America. *Atmos. Chem. Phys.* **2013,** *13* (6), 3149–3161. DOI: 10.5194/acp-13-3149-2013.

Croon, G.C.H.E. de; O'Connor, L. M.; Nicol, C.; Izzo, D. Evolutionary robotics approach to odor source localization. *Neurocomputing* **2013,** *121*, 481–497. DOI: 10.1016/j.neucom.2013.05.028.

Giunta, A. D.; Runyon, J. B.; Jenkins, M. J.; Teich, M. Volatile and Within-Needle Terpene Changes to Douglas-fir Trees Associated With Douglas-fir Beetle (Coleoptera: Curculionidae) Attack. *Environmental entomology* **2016,** *45* (4), 920–929. DOI: 10.1093/ee/nvw040.

Holopainen, J. K. Multiple functions of inducible plant volatiles. *Trends in plant science* **2004,** *9* (11), 529–533. DOI: 10.1016/j.tplants.2004.09.006.

Institute of Electrical and Electronics Engineers; IEEE SoutheastCon. *IEEE SoutheastCon 2014. 13 - 16 March 2014, Lexington, KY;* IEEE: Piscataway, NJ, 2014.

Kohl, D.; Heinert, L.; Bock, J.; Hofmann, T.; Schieberle, P. Systematic studies on responses of metal-oxide sensor surfaces to straight chain alkanes, alcohols, aldehydes, ketones, acids and esters using the SOMMSA approach. *Sensors and Actuators B: Chemical* **2000,** *70* (1-3), 43–50. DOI: 10.1016/S0925-4005(00)00552-9.

Krüll, W.; Tobera, R.; Willms, I.; Essen, H.; Wahl, N. von. Early Forest Fire Detection and Verification using Optical Smoke, Gas and Microwave Sensors. *Procedia Engineering* **2012,** *45*, 584–594. DOI: 10.1016/j.proeng.2012.08.208.

Lausch, A.; Heurich, M.; Gordalla, D.; Dobner, H.-J.; Gwillym-Margianto, S.; Salbach, C. Forecasting potential bark beetle outbreaks based on spruce forest vitality using hyperspectral remote-sensing techniques at different scales. *Forest Ecology and Management* **2013,** *308*, 76–89. DOI: 10.1016/j.foreco.2013.07.043.

Lewinsohn, E.; Gijzen, M.; Croteau, R. Defense Mechanisms of Conifers Differences in Constitutive and Wound-Induced Monoterpene Biosynthesis Among Species. *Plant Physiol.* [Online] **1991,** *96* (1), 44–49. http://www.plantphysiol.org/content/96/1/44.full.pdf.

Litvak, M. E.; Madronich, S.; Monson, R. K. Herbivore-Induced Monoterpene Emissions from Coniferous Forests: Potential Impact on Local Tropospheric Chemistry. *Ecological Applications* [Online] **1999,** No. 9, 1147–1159.

Mayer, H. Die Windverhältnisse in und über einem Fichtenwald. *Forstw Cbl* **1976,** *95* (1), 333–345. DOI: 10.1007/BF02741044.

Meng, Q.-H.; Yang, W.-X.; Wang, Y.; Li, F.; Zeng, M. Adapting an ant colony metaphor for multi-robot chemical plume tracing. *Sensors (Basel, Switzerland)* **2012,** *12* (4), 4737–4763. DOI: 10.3390/s120404737.

Monroy, J.; Hernandez-Bennets, V.; Fan, H.; Lilienthal, A.; Gonzalez-Jimenez, J. GADEN: A 3D Gas Dispersion Simulator for Mobile Robot Olfaction in Realistic Environments. *Sensors (Basel, Switzerland)* **2017,** *17* (7). DOI: 10.3390/s17071479.

Paczkowski, S.; Jaeger, D.; Pelz, S. Optimizing storage emissions of wood flakes by gas sensor controlled thermal oxidation of lipids. *Biomass and Bioenergy* [Online] **2018a,** *117*, 146–153. http:// www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0961953418301867.

Paczkowski, S.; Paczkowska, M.; Dippel, S.; Schulze, N.; Schütz, S.; Sauerwald, T.; Weiß, A.; Bauer, M.; Gottschald, J.; Kohl, C.-D. The olfaction of a fire beetle leads to new concepts for early fire warning systems. *Sensors and Actuators B: Chemical* **2013,** *183*, 273–282. DOI: 10.1016/j.snb.2013.03.123.

Paczkowski, S.; Pelz, S.; Jaeger, D. Semi-conductor metal oxide gas sensors for online monitoring of oak wood VOC emissions during drying. *Drying Technology* **2019,** *2019* (37), 1081-1086.

Paczkowski, S.; Pelz, S.; Paczkowska, M. Monitoring of Eucalyptus globulus tissue thermal degradation by metal oxide semi-conductor sensors for early fire detection in eucalypt forests. *International Journal of Wildfire Management* [Online] **2018b,** No. 28, 167–175.

Paczkowski, S.; Sauerwald, T.; Weiß, A.; Bauer, M.; Kohl, C.-D.; Schütz, S. *Biomimetic gas sensors for large-scale drying of wood particles*; Proceedings of the SPIE, 2011.

Page, W. G.; Jenkins, M. J.; Runyon, J. B. Mountain pine beetle attack alters the chemistry and flammability of lodgepole pine foliage. *Can. J. For. Res.* **2012,** *42* (8), 1631–1647. DOI: 10.1139/x2012-094.

Page, W. G.; Jenkins, M. J.; Runyon, J. B. Spruce Beetle-Induced Changes to Engelmann Spruce Foliage Flammability. *Forest Science* **2014,** *60* (4), 691–702. DOI: 10.5849/forsci.13-050.

Schultealbert, C.; Baur, T.; Schütze, A.; Böttcher, S.; Sauerwald, T. A novel approach towards calibrated measurement of trace gases using metal oxide semiconductor sensors. *Sensors and Actuators B: Chemical* **2017,** *239*, 390–396. DOI: 10.1016/j.snb.2016.08.002.

The Southern Pine Beetle; Thatcher, C. R., Ed.; United State Department of Agriculture, 1981.

Yokouchi, Y.; Ambe, Y. Factors Affecting the Emission of Monoterpenes from Red Pine (Pinus densiflora). *Plant Physiol.* [Online] **1984,** *75* (4), 1009–1012. http://www.plantphysiol.org/content/75/4/1009.full.pdf.

Anhang 1, Sensortest Labor

Sensorreaktion auf α-Pinen bei laminarem Luftstrom

Im Rahmen des Projektes PROTECT^{FOREST}© wurde der vom Projektpartner CADMIUM gebaute Sensor in einem selbst gebauten Sensorprüfstand auf unterschiedliche Konzentrationen von α-Pinen (Monoterpen) kalibriert. Dazu wurde der Teststand durch Heizer auf bis zu 180 °C erwärmt, um Kondesationszonen zu verhindern. Die Testkonzentration wurde durch Verdampfen einer nach mol berechneten Menge von α-Pinen in einem definierten Spritzenvolumen (50 ml) erzeugt. Die so erhaltene definierte Ausgangskonzentration wurde mit einer je nach gewünschter Testkonzentration berechneten Geschwindigkeit von einer Spritzenpumpe in einen konstanten Luftstrom gespritzt und so weiter verdünnt. Es wurden Verdünnungen zwischen 10^{-4} bis 10^{-8} getestet, die Sensoren reagierten aber erst ab 10^{-6}. Dies entspricht der im Vollantrag genannten Sensitivität gegenüber α-Pinen und bestätigt die Ausgangshypothese, dass α-Pinen im Kronenraum detektierbar ist. Die Verdünnungsstufen 10^{-4} bis 10^{-6} in Abb. 1 beziehen sich auf mol $_{\alpha\text{-Pinen}}$ zu mol $_{\text{synthetische Luft}}$. Abb. 1 zeigt die Ergebnisse der Kalibrierungen. Die Reaktionen des GGS 1330 und 2330 zeigen konzentrationsabhängige Unterschiede, während GGS 5330 keine signifikante Reaktion auf unterschiedliche Konzentrationen zeigt. Es wurde mit dem t-test für unabhängige Stichproben für n=10 (10^{-4} und 10^{-5}) und n=7 (10^{-6}) getestet.

Das Testen weiterer Stoffe und eine Optimierung des Sensorprüfstandes werden bis Projektende durchgeführt. Dabei sollen auch die Heizwiderstände der Sensoren verändert und der Einfluss auf die Sensitivität und Selektivität der Sensoren untersucht werden. Aktuell befindet sich das Sensormodul zur Wartung bei CADMIUM. Die Wartung wird durch eine stark verzögerte Lieferung von Ersatzsensoren durch die Firma UST behindert.

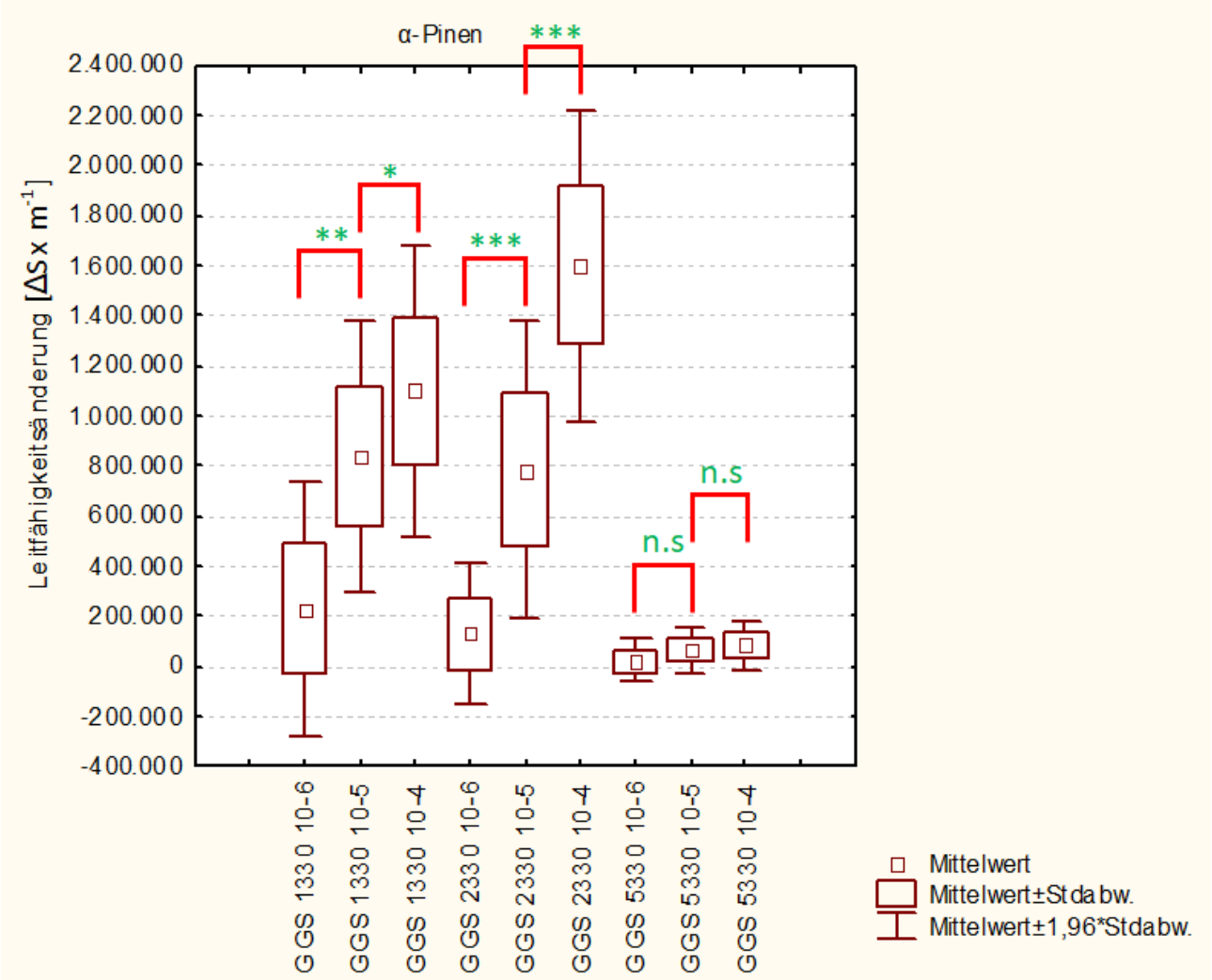

Abb. 1 zeigt die Reaktion der drei Sensoren auf unterschiedliche Konzentrationen von α-Pinen.

Im Rahmen des Projektes PROTECT^{FOREST}© wurde der vom Projektpartner CADMIUM gebaute Sensor unter näherungsweise realen Bedingungen auf Reaktion gegenüber α-Pinen getestet. Dazu wurde eine Messumgebung nachgestellt, die über dem Kronendach zum Jahresanfang (Erstbefall) zu erwarten ist (zwei realistische Windgeschwindigkeiten [29], drei rel. niedrige Temperaturen, zwei Abstände zur Krone, zwei geringe Mengen α-Pinen). Mit Hilfe eines PID Sensors wurde die reale Konzentration von α-Pinen unter den später für den Sensor verwendeten Bedingungen getestet. Weitere PID Versuche zur Versuchsvalidierung werden bis Projektende durchgeführt.

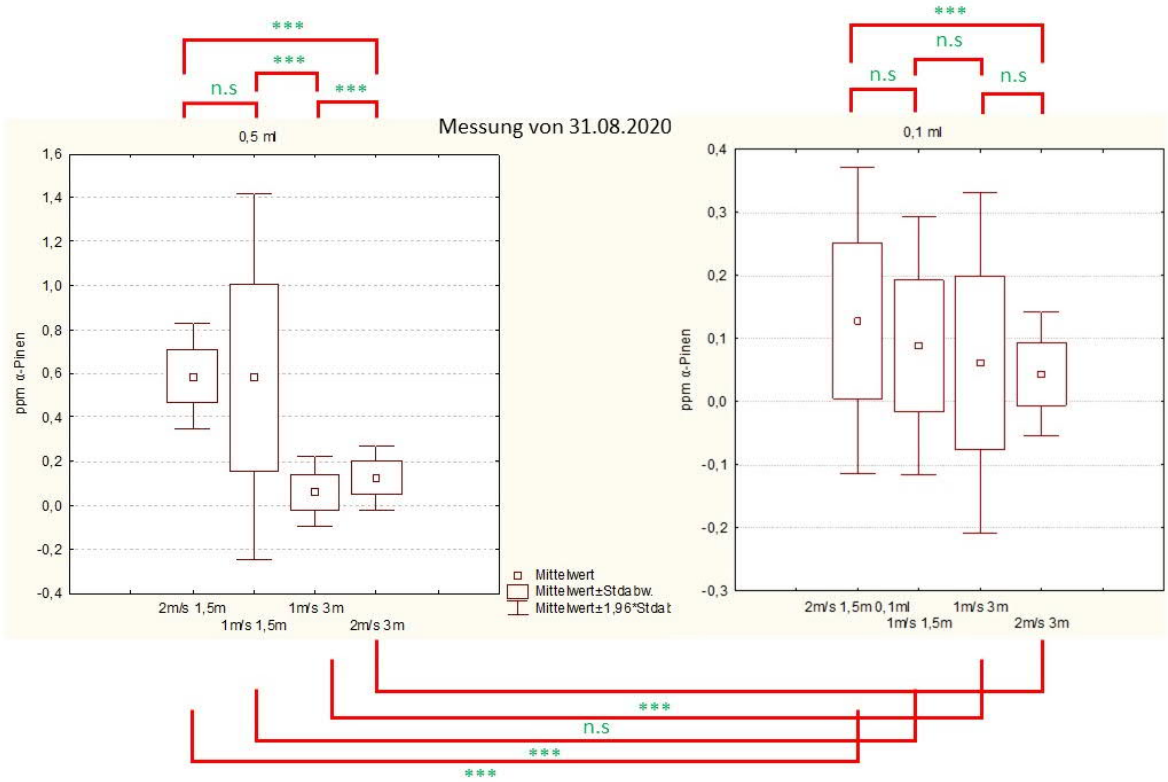

Abbildung 2 zeigt die Ergebnisse zur vom PID Sensor ermittelten α-Pinen Konzentration bei entsprechender α-Pinen Menge bei 20 °C unter den entsprechenden Wind / Abstandskombinationen.

In Abb. 2 wurden alle Datensätze mit Hilfe des t-Test für unabhängige Stichproben miteinander verglichen. Die mit dem PID gemessene Konzentration ist bis auf die Kombination kurzer Abstand zur Quelle / geringe Windgeschwindigkeit immer hochsignifikant unterschiedlich. Die geprüften relativ niedrigen Windgeschwindigkeiten (bis 7,2 km/h) zeigen keinen signifikanten Einfluss auf die mit dem PID gemessene Konzentration. Eine Ausnahme ist der 3 m Abstand bei 0,5 ml, wobei die beiden Mittelwerte hier nah beieinander liegen (33 % Differenz niedriger Wert zu hohem Wert). Die Abstände haben einen sehr unterschiedlichen Einfluss auf die Sensorreaktion mit teils signifikant zunehmenden Werten bei höherem Abstand und teils abnehmenden Werten bei höherem Abstand. Die Werte für 3 und 1,5 m Abstand bei 1 $m \times s^{-1}$ und 0,1 ml sind nicht signifikant unterschiedlich. Insgesamt entsprechen diese Ergebnisse den im Folgenden für die Halbleitergassensoren berechneten Signifikanzen (Tabelle 2-4).

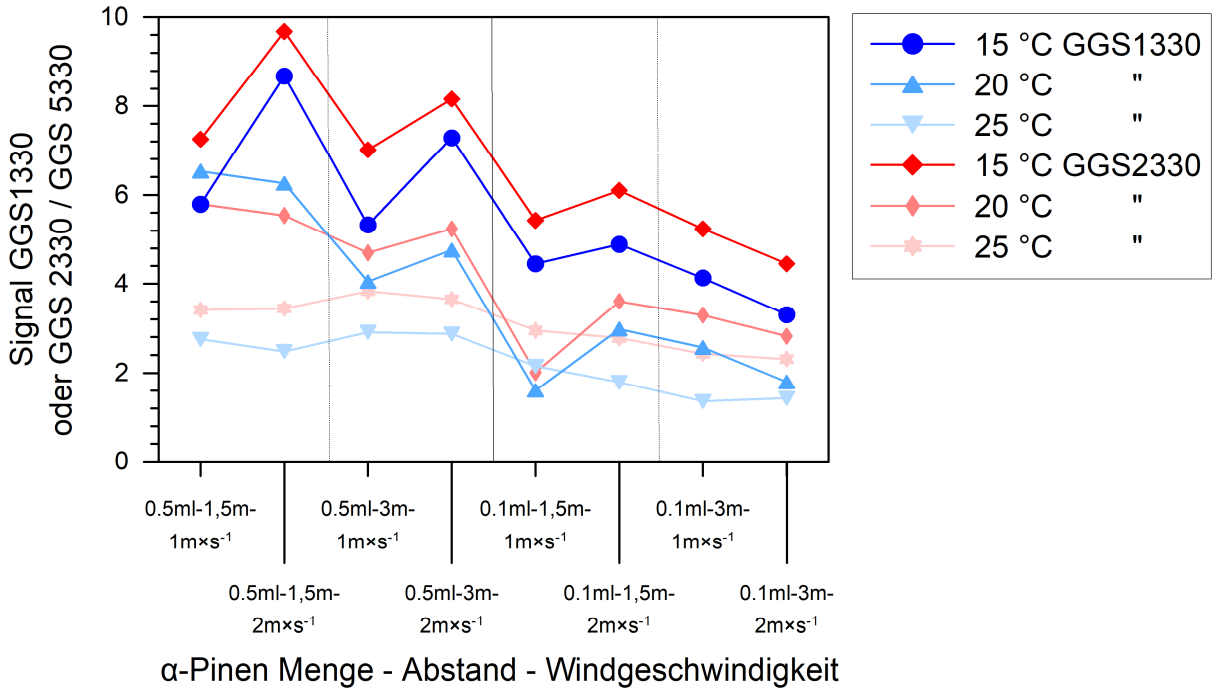

Abbildung 3 zeigt die Ergebnisse der mit realitätsnahen Parametern im Labor nachgestellten Sensorexperimente. Die mit Linien verbundenen Punkte dienen der übersichtlichen Darstellung und stellen keine mathematische Interpolation dar.

Die Sensorsignale zeigen mit zunehmender Temperatur und abnehmender α-Pinen Menge (98 %ige Lösung) eine geringere Schwankung. Grundsätzlich führen die größere α-Pinen Menge zu tendenziell höheren Signalen. Eine höhere Windgeschwindigkeit hat bei niedriger Temperatur eine verdünnende Wirkung. Ein höherer Abstand zur Geruchsquelle hat bei diesen Temperaturen ebenfalls eine verdünnende Wirkung. Bei 25 °C führt ein höherer Abstand zu einem leichten Anstieg des Signals bei höherer Konzentration. Bei niedriger Konzentration kehrt sich diese Tendenz um. Diese ausgewählten Interpretationsbeispiele zeigen die hohe Dynamik der VOC-Ausbreitung im Nahbereich zur Quelle selbst unter laminarem Luftstrom. Aus diesem Grund wurden die einzelnen Datensätze paarweise statistisch verglichen (U- oder T-Test), um die einzelnen Einflussfaktoren (Temperatur, Konzentration, Abstand zur Quelle, Windgeschwindigkeit) getrennt voneinander zu analysieren.

Tabelle 1 zeigt die signifikanten Unterschiede der Sensorreaktionen bei unterschiedlichen Kombinationen von α-Pinen Menge, Abstand zur α-Pinen-Quelle, Windgeschwindigkeit und Raumtemperatur.

	Menge α-Pinen [ml]	Abstand [m]	Wind [m×s^{-1}]	Temperatur [°C]		
				15	20	25
GGS1330	0,5	1,5	1	a	a	b
			2	a	ab	b
		3,0	1	a	b	c
			2	a	ab	b
	0,1	1,5	1	a	b	c
			2	a	b	b
		3,0	1	a	b	b
			2	a	a	a
GGS2330	0,5	1,5	1	a	a	b
			2	a	ab	b
		3,0	1	a	b	b
			2	a	a	a
	0,1	1,5	1	a	b	b
			2	a	b	b
		3,0	1	a	b	c
			2	a	a	ab

Bei nahezu allen Faktorkombinationen (Ausnahme nur bei GGS1330; 0,1; 3; 2 und GGS2330; 0,5; 3; 2) zeigt sich ein signifikanter Unterschied zwischen den Temperaturen. Daher kann als gesichert gelten, dass die Sensorsignale mit der Umgebungstemperatur korrelieren, da diese bei Anstieg den Dampfdruck von α-Pinen erhöhen. Grund für die Ausnahmen sind die zunehmenden Varianzen der Sensorsignale bei relativ großem Abstand und erhöhter Windgeschwindigkeit.

Eine genauere statistische Analyse der Zusammenhänge zwischen Sensorsignal und α-Pinen Menge zeigte eine Zunahme der Sensorreaktion bei höherer α-Pinen Menge (Tab. 2)

Tabelle 2 zeigt die signifikanten Unterschiede zwischen den Sensorsignalen bei kleiner (0,1 ml) und großer (0,5 ml) Menge von α-Pinen (98 %ige Lösung) bei unterschiedlichen Temperaturen, Abständen und Windgeschwindigkeiten.

Menge α-Pinen 0,1 ml zu 0,5 ml (98 %ige Lösung)					
Sensor	Abstand [m]	Wind [m×s^{-1}]	Temperatur [°C]		
			15	20	25
GGS1330	1,5	1	*	***	n.s
		2	n.s	***	n.s
	3,0	1	**	***	n.s
		2	n.s	**	n.s
GGS2330	1,5	1	*	***	n.s
		2	n.s	***	*
	3,0	1	*	**	**
		2	n.s	*	*

Bei dem Sensor GGS1330 gleicht eine zunehmende Temperatur den Einfluss der Quellkonzentration aus. Hohe Temperaturen ermöglichen also eine deutlich bessere Detektion des freigesetzten α-Pinens. Eine niedrige Temperatur bei erhöhter Windgeschwindigkeit zeigt ebenfalls keinen signifikanten Unterschied zwischen den α-Pinen Mengen, was durch den verdünnenden Einfluss des Windes bei geringer Emissionsrate verursacht wird (sh. auch Tab.1, GGS1330; 0,1; 3; 2 und GGS2330; 0,5; 3; 2). Daher werden niedrige Temperaturen bei Wind als limitierend für den Sensoreinsatz über dem Bestand angesehen. Den Einfluss der Windgeschwindigkeit auf die Parameterkombinationen zeigt Tabelle 3.

Tabelle 3 zeigt die signifikanten Unterschiede der Sensorreaktionen zwischen niedriger (1 m×s^{-1}) und erhöhter (2 m×s^{-1}) Windgeschwindigkeit.

Wind 1 m × s^{-1} zu2 m × s^{-1}					
	Menge α-Pinen [ml]	Abstand [m]	Temperatur [°C]		
			15	20	25
GGS1330	0,1	1,5	n.s	**	n.s
		3,0	n.s	n.s	n.s
	0,5	1,5	n.s	n.s	n.s
		3,0	n.s	n.s	n.s
GGS2330	0,1	1,5	n.s	*	n.s
		3,0	n.s	n.s	n.s
	0,5	1,5	n.s	n.s	n.s
		3,0	n.s	n.s	n.s

Eine Gegenüberstellung der Signalstärken bei den beiden getesteten Windgeschwindigkeiten zeigt einen nur sehr geringen Einfluss des Windes unter sonst gleichen Bedingungen. Dies legt nahe, dass auf geringe Distanz eine Detektion von Käfernestern möglich ist, auch wenn die Windstärke im niedrigen Bereich variiert. Die ausgewählten Windgeschwindigkeiten liegen nach Mayer, 1976, im oberen möglichen Bereich für die über dem Bestand zu erwartenden Winde [29].
Weiterhin wurden die Sensorsignale auf den Einfluss des Abstandes untersucht. Tab. 4 zeigt die Ergebnisse.

Tabelle 4 zeigt die signifikanten Unterschiede der Sensorreaktionen zwischen niedrigem (1,5 m) und hohem (3,0 m) Abstand. Rot bedeutet eine Zunahme des Sensorsignals von 1,5 auf 3 m, während blau eine entsprechende Abnahme des Sensorsignals bedeutet.

Abstand 1,5 m zu 3,0 m					
	Menge α-Pinen [ml]	Wind [m×s^{-1}]	Temperatur [°C]		
			15	20	25
GGS1330	0,1	1	n.s	*	**
		2	n.s	*	*
	0,5	1	n.s	***	n.s
		2	n.s	*	n.s
GGS2330	0,1	1	n.s	*	n.s
		2	n.s	n.s	*
	0,5	1	n.s	*	n.s
		2	n.s	n.s	n.s

Bei 15 °C sind die Sensorwerte durchweg nicht signifikant, was auf eine hohe Trägheit der Duftwolkenausbreitung bei geringer Temperatur hinweist. Da die Signifikanzen bei 20 °C und 25 °C sehr heterogen sind und die Sensorwerte mal zu und mal abnehmen, muss von abstandsbedingten Verwirbelungseffekten ausgegangen werden. Dies zeigt, dass im Nahbereich der Geruchsquelle bei höheren Temperaturen der Abstand einen nicht vorhersehbaren Einfluss auf die detektierte Konzentration von α-Pinen hat. Dieser Umstand ist entscheidend für die Weiterentwicklung des Verfahrens, da im Nahbereich die Intensität des Sensorsignals nicht in Relation zur Nähe der Geruchsquelle steht. Auf Grund der mit 3 m sehr geringen Distanz (ca. Kronendurchmesser von hiebsreifen Fichten) wird dies die Effizienz des Verfahrens nicht wesentlich beeinflussen.

ANHANG Teilvorhaben nach 1b Merkblatt Abschlussbericht

Teilvorhaben 1 (22005617)
Entwicklung der Halbleitergassensorik für die geruchsbasierte Forstschädlingsdetektion

1. Ziel und Gegenstand des Teilvorhabens

Ziel des Teilvorhabens war die Verbundkoordination, der Bau und das Testen eines Halbleitergassensors und der Bau und das Testen eines VOC Sammelsystems.

2. Bearbeitete Arbeitspakete

AP A1: Internes Projektmanagement
Das interne Projektmanagement wurde in Bezug auf den Aufbau des Sensorteststandes (Umwidmungsantrag) und die Berichterstattung durchgeführt. Interne Absprachen zur Organisation der Versuchsdurchführung wurden mit der Zentrallaborleitung getroffen. Parallel zum laufenden Projekt wurde ein Analysegerät für VOCs (GC-MS) über DFG Mittel aquiriert.

AP A2: Fachliche Besprechungen/Fachkonferenzen
Es wurden über die Projektlaufzeit zahlreiche Telefonkonferenzen und zehn Projektmeetings in Göttingen, Rottenburg, Regenstauf, Biberbach und Münchehof durchgeführt. Für Details ist auf die obige Beschreibung des AP A2 (S. 8) verwiesen.

AP A3 Gemeinsame Feldtests
Im Rahmen der Feldtest wurde der Halbleitergassensor getestet und VOC Proben mit der Drohne genommen.

AP H1 Projektmanagement
Das Vernetzen der Partner wurde erfolgreich durchgeführt und führte zu einer koordinierten technischen Entwicklung und zur Durchführung von Feldtests, bei denen sowohl Messergebnisse erzielt wurden als auch Barrieren zum technischen Durchbruch des drohnenbasierten Sensorsystems identifiziert wurden. Auch die Koordination der Öffentlichkeitsarbeit wurde erfolgreich kooperativ durchgeführt und resultierte in vielen Zeitungsartikeln und Fernsehbeiträgen in teils hochrangigen Medien.

AP H2 Aufbau und Kalibrierung VOC-Sammelsystem
Das VOC-Sammelsystem wurde bei den Feldtest getestet, zudem wurde ein auf einer kommerziellen DJI Plattform basierendes selbstgebautes VOC-Sammelsystem entwickelt. Weiterhin wurde ein ferngesteuertes mehrfach-VOC-Sammelsystem für die dreidimensionale VOC Konzentrationsvermessung über die Vergabe eines Unterauftrag gebaut (Abb. 2 auf S. 12). Die Ergebnisse einer Messung über einem Bestand sind im Detail auf S. 10 des Antrags beschrieben.

AP H3 Aufbau und Kalibrierung Sensorsystem
Der Halbleitergassensor wurde mit Hilfe eines selbstgebauten Kalibrierstandes getestet und mit einem kommerziellen PID Sensor der Firma ISM validiert. Abweichend vom ursprünglichen Projektplan übernahm der Partner CADMIUM den Sensoraufbau, die Sensorentwicklung und die Sensorwartung.

3. Wesentliche Ergebnisse des Teilvorhabens

Der Projektverbund wurde in Bezug auf technische Absprachen, Durchführung der Feldtests, Öffentlichkeitsarbeit und Kommunikation mit dem Projektträger erfolgreich gemanaged. In enger Zusammenarbeit mit dem Partner CADMIUM wurden das VOC Probennahmesystem und der Halbleitergassensor gebaut, kalibriert und im Feld getestet. Weiterhin wurde ein stand alone VOC Sammelsystem gebaut, welches eine dreidimensionale Vermessung des VOC Profils im Bestand ermöglicht. Dadurch kann die Ausbreitung einer VOC Quelle, z.B. ein Käferbaum, untersucht werden und das drohnenbasierte Messkonzept validiert und angepasst werden.

Teilvorhaben 2 (22009018)
Entwicklung der webbasierten Sensorsignaldatenverarbeitung mittels OGC Sensor Web Enablement

1. Ziel und Gegenstand des Teilvorhabens

Ziel des Teilvorhabens war die Verarbeitung der optischen Informationen aus den Feldtests zu dreidimensionalen Oberflächenmodellen des Bestandes und die Darstellung der georeferenzierten Sensorsignal-HeatMaps. Die entsprechende Datenverarbeitung sollte automatisiert werden und über ein OGC-Web Enablement im Internet für Anwender in der Forstpraxis verfügbar gemacht werden. Weiterhin sollte ein Businessplan erstellt werden, der potentielle Geschäftsfelder für die neuartige Drohnentechnologie aufzeigt.

2. Bearbeitete Arbeitspakete

AP A1: Internes Projektmanagement
Die Serverarchitektur der Abteilung wurde für die Datenverarbeitung und Bereitstellung aufbauend auf der existierenden Hardware erweitert. Interne Absprachen für die Verwendung der Abteilungsdrohne für die Multispektralaufnahmen wurden getätigt. Die Berichtserstattung zum Projektträger wurde durchgeführt, insbesondere wurde ein Antrag auf kostenneutrale Projektverlängerung gestellt.

AP A2: Fachliche Besprechungen/Fachkonferenzen
Es wurden über die Projektlaufzeit zahlreiche Telefonkonferenzen und zehn Projektmeetings in Göttingen, Rottenburg, Regenstauf, Biberbach und Münchehof durchgeführt. Für Details ist auf die obige Beschreibung des AP A2 (S. 8) verwiesen.

AP A3 Gemeinsame Feldtests
Im Rahmen der Feldtest wurden Multispektralaufnahmen gemacht und Waypoint Flüge mit einprogrammiertem Höhenprofil (aus AP F1) durchgeführt.

AP F1 Aufnahme / Auswertung von optischen Informationen (IR/Vis)
Es wurden Multispektralaufnahmen der Testbestände durchgeführt und zu dreidimensionalen Bestandesoberflächenmodellen verarbeitet. Die Details zum Workflow sind auf S. 15 aufgelistet. Aus dem Höhenmodell wurden Wegepunkte generiert, die zur Programmierung des automatischen Höhenflugs der Sensordrohne verwendet wurden. Aus den so generierten Sensordaten wurden HeatMaps berechnet, die neben den interpolierten Sensordaten auch die vom Boden aus lokalisierten potentiell befallenen Bäume verorteten.

AP F2 OGC Sensor Web Enablement
Die ursprüngliche Idee des online Datenübertrags wurde auf Grund der unzureichenden Netzverfügbarkeit über Wäldern nur technisch vorbereitet, aber nicht in der Praxis umgesetzt. Bei Erweiterung der Netzverfügbarkeit steht die Konnektivität zur Verfügung. Es wurde eine Auswerteroutine programmiert, die eine serverbasierte Veröffentlichung der

automatisch generierten HeatMap ermöglicht. Diese Routine funktioniert aktuell semi-automatisch und kann zu einer automatischen Routine weiterentwickelt werden. Details zum Systemdesign der Geodateninfrastruktur sind in Abb. 11 auf S. 21 gezeigt und im entsprechenden Text beschrieben.

AP F3 Anschlussverwertung Business Plan
Es wurden unterschiedliche Businesspläne für die Verwertung der Ergebnisse auf verschiedenen Geschäftsfeldern in Zusammenarbeit mit CADMIUM und FORESTOPERATION entwickelt. Dabei wurde ein Dienstleistungskonzept und ein Drohnenvermarktungskonzept aufgestellt. Details zu den Verwertungskonzepten finden sich unter AP F3 auf Seite 21 des Berichts.

3. Wesentliche Ergebnisse des Teilvorhabens

Die wesentlichen Ergebnisse des Teilvorhabens sind eine semi-automatische Auswerteroutine zur Erstellung der HeatMaps aus den Sensordaten, die über eine Serverarchitektur veröffentlicht werden kann. Weiterhin wurde eine Routine zur Erstellung eines dreidimensionalen Bestandesoberflächenmodells entwickelt, das zur Extraktion von Höhenbezugspunkten für den automatisierten WayPoint-Flug der Drohne verwendet wurde. Die Businessmodelle ergaben die Möglichkeit zur Vermarktung einer Dienstleistung und zur Vermarktung der Drohnentechnologie. Geschäftsfelder fanden sich im Forst, aber auch bei entsprechender technischer Weiterentwicklung potentiell im Weinbau und in der Agrarfeldwirtschaft.

Teilvorhaben 3 (22008918)
Entwicklung der Drohnenplattform zu halbleitergassensorbasierten Forstschädlingsdetektion

1. Ziel und Gegenstand des Teilvorhabens

Ziel des Teilvorhabens war die Konstruktion einer Drohnenplattform, die den komplexen Ansprüchen an den Konturflug über dem Kronendach bei gleichzeitiger Generierung von Sensordaten gerecht wird. Weiterhin sollte der Halbleitergassensor auf der Drohne integriert werden und ein drohnenbasiertes VOC Sammelsystem konstruiert werden. Die Senosrdaten sollten mit Hilfe eines OGC Web Enablement online in das Internet gesendet werden.

2. Bearbeitete Arbeitspakete

AP A1: Internes Projektmanagement
Firmenintern wurde das Projekt kommuniziert und die Ressourcen in Bezug auf die Konzeption und den Bau des Geruchssensors und der Drohnenplattform verteilt. Es wurden bei der Koordination insbesondere der Kontakt zur Forstpraxis betont, dies geschah durch Lenkung der zahlreichen Praxisanfragen bis hin zur Durchführung von Bestandesbegehungen mit Waldbesitzern. Auch der public relation Aspekt des Projektes wurde firmenintern gemanaged.

AP A2: Fachliche Besprechungen/Fachkonferenzen
Es wurden über die Projektlaufzeit zahlreiche Telefonkonferenzen und zehn Projektmeetings in Göttingen, Rottenburg, Regenstauf, Biberbach und Münchehof durchgeführt. Für Details ist auf die obige Beschreibung des AP A2 (S. 8) verwiesen.

AP A3 Gemeinsame Feldtests
Im Rahmen der Feldtest wurde die Drohnenplattform und der Sensor getestet. Es wurden weiterhin Bestandesbegehungen gemacht, um die Befallssituation mit der HeatMap zu korrelieren.

AP C1 Integration des VOC Sammelsystems
Das VOC Sammelsystem wurde in das Sensorsystem integriert, so dass es möglich war eine Drohne für beide Anwendungen zu verwenden. Da die Sensorpumpe über die Fernsteuerung an- und ausschaltbar ist, kann durch Fixierung eines Messröhrchens an der Spitze der Kapillare eine VOC Messung mit der Drohne durchgeführt werden.

AP C2 Integration des Sensors auf Drohnenplattform
Der Sensor wurde erfolgreich auf der Drohnenplattform verbaut und mit der Drohnenplatine verbunden. Dadurch war die Stromversorgung der Drohne nutzbar und die GPS Koordinaten konnten mit den Sensordaten zusammen gespeicher und so korreliert werden. Weiterhin wurde eine Kapillare verbaut, die das Ansaugen der Umgebungsluft ausserhalb

der Rotorabwinde der Drohne erlaubte. Details zu dem AP sind auf S. 13 beschrieben.

AP C3 Integration OGC Sensor Web Enablement/OGC Web Processing Service auf Drohnenplattform
Das OGC Sensor Web Enablement wurde vorbereitet, indem ein leistungsstarker Computer als Sensorrechner verbaut wurde, der für die Datenübertragung über das Handynetz aktiviert werden kann. Auf Grund der schlechten Netzabdeckung über deutschen Wäldern ist diese Sendefunktion aber erst perspektivisch praktikabel. Daher wurde eine Routine programmiert, die den automatischen Datentransfer auf einen USB Stick erlaubt und so den Datentransfer auf einen Laptop im Wald vor Ort ermöglicht.

3. Wesentliche Ergebnisse des Teilvorhabens

Im Rahmen des Projektes wurde eine Drohnenplattform entworfen, die in Bezug auf Abwindminimierung, Flugzeit und Payload den Ansprüchen an das Sensormesskonzept weitestgehend gerecht wurde. Allerdings war ein Fliegen nahe den Baumkronen nicht möglich, da sowohl ein verbessertes Positionierungssystem als auch Abstandssensoren notwendig wären, um einen sicheren Flug nahe über das Kronendach zu ermöglichen. Weiterhin wurde der Halbleitergassensor gebaut und auf der Drohnenplattform integriert. Das Pumpensystem wurde so angepasst, dass mit dem gleichen System eine Probennahme von VOCs mit Hilfe eines Messröhrchens möglich war. Weiterhin wurden Bestandesbegehungen mit Waldbesitzern durchgeführt und es wurde erfolgreich ein Netzwerk im Geschäftsfeld Forstwirtschaft aufgebaut. Auch eine erfolgreiche Öffentlichkeitsarbeit war ein Ergebnis des Teilvorhabens.

Teilvorhaben 4 (22011018)
Arbeitseffizienzbewertung der drohnengestützten Forstschädlingsdetektion

1. Ziel und Gegenstand des Teilvorhabens

Ziel des Teilvorhabens war die Evaluation des drohnenbasierten Messkonzepts in Bezug auf Wirtschaftlichkeit und Arbeitseffizienz. Dabei sollten auch Handlungsempfehlungen für die Forstpraxis generiert werden, z.B. in Bezug auf eine Abwägung von konventioneller Bestandesbegehung und drohnenbasierte Käferbaumdetektion.

2. Bearbeitete Arbeitspakete

AP A1: Internes Projektmanagement
Das Projekt wurde in Bezug auf Berichtserstattung (Umwidmung, Aufstockungsantrag als Projektverlängerung) zunehmend maßgeblich betreut. Die gestellten Sensortests (Labor und Feld) wurden betreut und die Räumlichkeiten für die Sensorkalibrierung (Projektpartner HFR) zur Verfügung gestellt. Die Vorbereitungen für die kooperativen Feldtests sowie der Materialaustausch und die Gerätewartung mit und durch den Partner CADMIUM wurden intern vorbereitet.

AP A2: Fachliche Besprechungen/Fachkonferenzen
Es wurden über die Projektlaufzeit zahlreiche Telefonkonferenzen und zehn Projektmeetings in Göttingen, Rottenburg, Regenstauf, Biberbach und Münchehof durchgeführt. Für Details ist auf die obige Beschreibung des AP A2 (S. 8) verwiesen.

AP A3 Gemeinsame Feldtests
Im Rahmen der Feldtest wurden Zeitstudien gemacht, um die Arbeitseffizienz bewerten zu können. Im Laufe des Projektes wurden zunehmend Sensordrohnenflüge durchgeführt und die Drohnentechnik evaluiert. Es wurden parallel zum Partner CADMIUM Bestandesbegehungen durchgeführt, um den Waldzustand mit den Ergebnissen aus der HeatMap zu korrelieren.

AP FO1 Analyse Arbeitsverfahren Drohneneinsatz
Das Arbeitsverfahren Drohneneinsatz wurde in funktionale Abschnitte unterteilt und im Rahmen von Zeitstudien wurden diese Abschnitte zeitlich quantifiziert. Die Daten wurden in FO2 verwendet, um die Arbeitseffizienz im Vergleich zur konventionellen Bestandesbegehung zu berechnen. Die Studien erlaubten auch eine Identifikation des Optimierungspotentials in Bezug auf bestimmte Arbeitsabläufe, z.B. Vor- und Nachbereitung des Drohnenfluges. Durch entsprechende technische Innovationen (insbesondere Abstandssensoren, Precise Point Positioning System), kann dieses Optimierungspotential ausgeschöpft werden.

AP FO2 Entwicklung Handlungsempfehlungen und Web Service Integration
Es wurden umfangreiche Studien zur Arbeitseffizienzbewertung des Drohneneinsatzes

durchgeführt. Dazu musste auch die Arbeitseffizienz der konventionellen Bestandesbegehung modelliert werden. Im Ergebnis lohnt sich der Drohneneinsatz im Vergleich zur Bestandesbegehung vor allem bei großen Flächen und bei starkem Unterbewuchs, der die Begehung zu Fuß behindert.

3. Wesentliche Ergebnisse des Teilvorhabens

Wesentliche Ergebnisse des Teilvorhabens waren die Klassifizierung und zeitliche Quantifizierung der Arbeitsschritte des drohnenbasierten Verfahrens. Dies diente als Vorbereitung der Wirtschaftlichkeitsbewertung und diente auch der Identifikation technischer Optimierungsnotwendigkeiten. In Folge wurde basierend auf den Ergebnissen ein Folgeantrag (FORST^{PRAX}) generiert. Es wurde modellhaft ein wirtschaftlicher Vergleich zwischen konventioneller Bestandesbegehung und drohnenbasierter Käferdetektion berechnet. Ergebniss dieser Betrachtung war, dass das drohnenbasierte Verfahren vor allem bei großen Waldflächen und bei dichtem Unterbewuchs dem konventionellen Verfahren überlegen ist. Es war allerdings auf Grund der im Rahmen des Projektes indentifizierten technischen Hemmnissen noch nicht möglich, einen proof of principle durchzuführen. Daher wurde ein Folgeprojekt (FORST^{PRAX}) entworfen, um diese technischen Hemmnisse zu überwinden.
Weiterhin wurde eine Projektwebpage gelauncht (https://uni-goettingen.de/de/631556.html) und die Öffentlichkeitsarbeit im Projekt koordiniert.