

Sachbericht AgriNose-ATB

**WIR! – LIL - AgriNose - Elektronische Nasen für das Monitoring
landwirtschaftlicher Flächen basierend auf miniaturisierten Arrays von
Affinitätssensoren**

Teilprojekt C – Einsatz von UAV-basierten, fernerkundlich-optischen Methoden zur
Detektion von Krankheiten in Winterroggenbestände - AgriNose-ATB



Schlussbericht

Zuwendungsempfänger	Förderkennzeichen (FKZ)
Leibniz-Institut für Agrartechnik und Bioökonomie e.V. (ATB) Max-Eyth-Allee 100 14469 Potsdam	03WIR3013C
Vorhabenbezeichnung	Einsatz von UAV-basierten, fernerkundlich- optischen Methoden zur Detektion von Krankheiten in Winterroggenbestände -
Akronym	AgriNose-ATB
Laufzeit des Vorhabens	01.01.2022 bis 31.12.2024
Projektleitung	Dr. Michael Schirrmann (Berichtsautor)

Die Verantwortung für den Inhalt dieser Veröffentlichung liegt beim Autor.

Inhaltsverzeichnis

1	Kurzbericht.....	2
1.1	Ausgangslage, Zielsetzung und wissenschaftlicher Hintergrund.....	2
1.2	Zielorientierter Projektverlauf mit Ergebnisdarstellung.....	2
2	Eingehende Darstellung.....	4
2.1	Die im Rahmen des Vorhabens durchgeführten Arbeiten.....	4
2.2	Konzeption des Monitoringsystems und Versuchsvorbereitung (AP 4.1).....	4
2.3	Erfassung des Pflanzenzustandes und der VOCs im ersten Versuchsjahr (AP 4.2)	5
2.4	Charakterisierung des Pflanzenzustandes und der VOCs erstes Projektjahr (AP 4.3).....	6
2.5	Experimentelle Erfassung des Pflanzenzustandes und der VOCs zweites Versuchsjahr (AP 4.4).....	9
2.6	Charakterisierung des Pflanzenzustandes und der VOCs zweites Versuchsjahr (AP 4.4).....	11
2.7	Optimierung des Monitoringssystems (AP 4.5).....	13
2.8	Feldversuche zur Konditionierung der elektronischen Nase (AP 5.3).....	14
2.9	Integration der eNose in das Monitoringsystem (AP 4.6).....	19
2.10	Fazit.....	21
2.11	Wichtigste Positionen des zahlenmäßigen Nachweises.....	22
2.12	Notwendigkeit und Angemessenheit der geleisteten Arbeit.....	22
2.13	Voraussichtlicher Nutzen, insbesondere der Verwertbarkeit des Ergebnisses im Sinne des fortgeschriebenen Verwertungsplans.....	22
2.14	Während der Durchführung des Vorhabens dem Zuwendungsempfänger bekannt gewordener Fortschritt.....	23
2.15	Erfolgte oder geplante Veröffentlichungen der Ergebnisse.....	23

1 Kurzbericht

1.1 Ausgangslage, Zielsetzung und wissenschaftlicher Hintergrund

Der Wandel in der Gesellschaft und im Klima führen zu einem Umdenken in der deutschen und europäischen Agrarpolitik von einer mono-basierten, intensiven Landwirtschaft hin zu einer struktur- und artenreicheren, nachhaltigen Landwirtschaft, die z. B. in der Lage ist, Forderungen der BürgerInnen zu einem geringeren Pestizideinsatz oder eine stärkere Resilienz gegenüber extremen Wetterereignissen umzusetzen. So verpflichtet zum Beispiel die EU Biodiversitätsstrategie bis 2030 eine Reduzierung des Risikos und den Einsatz von chemischen Pestiziden um 50%. Eine möglichst frühe und spezifische Erkennung von Pflanzenkrankheiten wäre dabei ein wichtiger Faktor für einen nachhaltigen Pflanzenschutz. Optische Fernerkundungsverfahren können zwar bereits wichtige Informationen über den Pflanzenzustand liefern, sind aber in der Regel nur fähig, Stresssituationen unspezifisch zu erkennen. Gleichzeitig zeigen zahlreiche Studien, dass Pflanzen unter pathogenem Stress die Emissionen von flüchtigen organischen Verbindungen (VOCs) verändern. Diese Emissionen können bereits sehr früh erscheinen– noch vor dem Auftreten sichtbarer Symptome. Elektronische Nasen (eNose), die auf Sensor-Arrays basieren und durch KI-gestützte Mustererkennung VOC-Profile analysieren, wurden in der Forschung bereits erfolgreich zur Krankheitsdiagnose eingesetzt. Allerdings fehlt bisher die praktische Umsetzung dieser Sensortechnik in einem Monitoringsystem für den präzisen Pflanzenschutz aufgrund fehlender Vereinfachung, Miniaturisierung und integrierter Auswertung bei gleichsam hoher Signalauflösung der Sensorik die notwendig ist um die geringen Konzentrationen der VOCs im Pflanzenbestand hinreichend zu differenzieren. Besonders im Roggenanbau, der für Regionen wie Brandenburg und die Lausitz eine hohe wirtschaftliche Bedeutung hat, treten regelmäßig ertragsschwächende Mischinfektionen durch Pilzkrankheiten wie Braunrost, Mehltau und Blattfleckenkrankheit auf. Angesichts geplanter EU-Vorgaben zur Halbierung des Pestizideinsatzes ist eine Weiterentwicklung des Krankheitsmonitorings dringend erforderlich – idealerweise durch die Kombination etablierter Fernerkundung mit innovativer VOC-Sensorik. Das Teilprojekt C von AgriNose verfolgte daher das Ziel, zu untersuchen, inwiefern ein sensorgestütztes Monitoringsystem zur spezifischen und frühzeitigen Erkennung von Pflanzenkrankheiten im Winterroggen, basierend auf UAV-gestützter Fernerkundung, durch den Einsatz einer elektronischen Nase zur VOC-Erfassung sinnvoll erweitert werden kann.

1.2 Zielorientierter Projektverlauf mit Ergebnisdarstellung

Der Projektverlauf wurde maßgeblich durch die Arbeitspakete AP 4.1 bis 4.6 vorgegeben, die mehrere Ziele beinhalteten. Diese waren zeitlich so organisiert, dass zum einen saisonbedingt eine Umsetzung der Feldversuche durchführbar war, zum anderen bereits im letzten Projektjahr erste Schlussfolgerungen für eine praxisnahe Erprobung gezogen werden konnten. Eine detaillierte Darstellung erfolgt im Kapitel „Eingehende Darstellung“. Im Folgenden findet sich eine Kurzdarstellung der Einzelziele des Teilprojekts und deren jeweiliger Umsetzung und Ergebnisse im Projektverlauf.

Das erste Ziel verfolgte, das Potenzial optisch-fernerkundlicher Verfahren für das Monitoring von Winterroggen hinsichtlich Spezifität, Detektionszeitpunkt und räumlicher Erfassbarkeit von Pilzkrankheiten zu untersuchen. Hierzu wurden in zwei aufeinanderfolgenden Jahren (2022/2023) Feldversuche mit Winterroggen angelegt und über die Saison UAV-Befliegungen mit einem multispektral-thermalen Kamerasystem und Sensormessungen im Pflanzenbestand durchgeführt. In der Vegetationsperiode 2022 konnte gezeigt werden, dass aufgrund des durch die Frühsommertrockenheit verursachten Trockenstress, eine klare Unterscheidung mit

dem UAV gestützten Monitoring zwischen Krankheitsstress und Trockenstress nicht möglich war. Die Differenzierung der Krankheitsparzellen gelang erst im Feldversuch 2023, wo der Trockenstress über die Saison weitaus geringer war. Die UAV Daten zeigten eine zeitliche Korrelation mit dem Braunrostbefall und bestätigten die Eignung optischer Verfahren für die Detektion bei hohem Krankheitsdruck. Bei konkurrierenden Stressfaktoren (Trockenheit, Nährstoffmangel) ist die Trennschärfe jedoch eingeschränkt – was die Notwendigkeit zusätzlicher Sensorik (z. B. VOC-Analyse) unterstreicht.

Das zweite Ziel war die Identifikation krankheitsspezifischer VOC-Profile gesunder und infizierter Winterroggenpflanzen. Hierzu wurden umfangreiche Laborversuche in Pflanzenwuchskammern durchgeführt, welche durch Freilandanalysen erweitert wurden. Es wurden zunächst Roggenjungpflanzen unter kontrollierten, praxisnahen Bedingungen angezogen und anschließend gezielt mit Braunrostsporen inokuliert. Parallel dazu wurden identische Pflanzen als gesunde Kontrolle gehalten. Es wurde zudem eine veränderter Probenahmetechnik (SBSE) der VOCs etabliert. Hierbei adsorbiert ein mit Polydimethylsiloxan (PDMS) beschichtetes Träger die VOCs aus der Luft und reichert sie an. Diese Methode erhöhte die Sensitivität der Messungen erheblich und machte eine aussagekräftige Analyse erst möglich. Dabei konnten u. a. 1,5-Hexandiol und 6,10,14-trimethyl-2-Pentadecanon als potenzielle Marker-VOCs für Braunrost identifiziert werden. Letztere Substanz zeigte einen signifikanten Anstieg in zwei Infektionsphasen und erwies sich als besonders relevant für die zeitlich präzise Erkennung. Die Ergebnisse bestätigen, dass eine krankheitsspezifische VOC-Analyse im Roggen grundsätzlich möglich ist – trotz geringer Emissionen und konkurrierender biotischer/abiotischer Einflüsse. Als abschließendes Ziel wurde die praxisnahe Erprobung und Integration eines elektronischen Sensorsystems (eNose) zur Detektion von Pflanzenkrankheiten im Winterroggenbestand angestrebt. Hierzu wurde ein Feldaufbau mit aktivem Luftansaugsystem konzipiert und erfolgreich umgesetzt. Dieser wurde zunächst zur Verbesserung der Anreicherung der VOCs mit SBSE für die GCMS Analysen genutzt. Der gleiche Feldaufbau wurde für die Implementierung eines bereits erhältlichen Sensor (BME680; Bosch) im Feld mit dem Ansaugsystem genutzt. Diese alternative elektronische Nase unterscheidet sich zwar hinsichtlich des physikalischen Messprinzips vom ursprünglich vorgesehenen Zielsensor, ähnelt diesem jedoch in zentralen technischen Parametern weitgehend. Dadurch konnte die grundlegende Fähigkeit zur Sensorintegration im Freiland erfolgreich überprüft werden. Die Ergebnisse deuten darauf hin, dass infektionsbedingte Veränderungen der VOC-Profile durch den Sensor tendenziell erfassbar sind, auch wenn das Sensorsystem aufgrund seiner Integrationsmessung keine spezifische Differenzierung einzelner Verbindungen erlaubt. Aber die Ergebnisse des Feldversuchs zeigen umso deutlicher, dass ein spezifischer Sensor mit höherer Sensitivität benötigt wird, um Infektionen eindeutig zu detektieren. Im Rahmen des Projekts wurde gezeigt, dass optische UAV-gestützte Verfahren bei günstigen Bedingungen Krankheitsstress spezifisch erfassen können, jedoch bei konkurrierenden Stressfaktoren stark limitiert sind. Parallel dazu wurden mittels GCMS-SBSE-Kopplung, trotz der allgemein niedrigen VOC-Expression des resilienten Winterroggens, sowohl im Labor als auch unter Freilandbedingungen krankheitsspezifische VOC-Profile erfolgreich differenziert. Die praktische Integration eines eNose-Systems in ein sensorgestütztes Monitoringsystem wurde technisch validiert, zeigte aber, dass sehr spezifische und sensitive Sensoren erforderlich sind. Die Integration in ein realitätsnahes Monitoringsystem mit Luftstromführung ist technisch machbar. Somit legen die Ergebnisse des Projektes eine wichtige Grundlage für die Weiterentwicklung von Monitoringsystemen für einen nachhaltigen Pflanzenschutz im Roggenanbau im Sinne der Zielsetzungen der EU-Biodiversitätsstrategie.

2 Eingehende Darstellung

2.1 Die im Rahmen des Vorhabens durchgeführten Arbeiten

Alle folgend dargestellten Arbeiten wurden entlang der im Teilprojekt C definierten Arbeitspakete (AP) innerhalb des Projektzeitraums 01.01.2022 bis 31.12.2024 durchgeführt mit Ausnahme einiger wenigen Vorarbeiten, die zusätzlich Erwähnung finden.

2.2 Konzeption des Monitoringsystems und Versuchsvorbereitung (AP 4.1)

Im Fieldlab for Digital Agriculture (Feldversuchsstation) am ATB in Marquardt (52°27'54.03"N, 12°57'32.53"O; Brandenburg) wurde ein Standort für die Feldexperimente eingerichtet, der typisch für den Anbau von Winterroggen in der Lausitz ist. Der Standort ist durch lehmigen Sand (S12) bei Boden-pH Werten zwischen 6,6 und 8, einer mittleren jährlichen Niederschlagssumme von 450 mm sowie einer mittleren Jahrestemperatur von 8,3 °C charakterisiert.

Zur Vorbereitung der Versuchsanlage wurde bereits vor Projektstart am 28.09.2021 Winterroggen der Sorte KWS Receptor auf einer Fläche von 0,2 ha mit einer Körnerdichte von 220 Kö/m² gedreht. Diese Sorte wurde gewählt, da sie eine relativ hohe Krankheitsanfälligkeit gegenüber Pilzinfektionen aufweist. Der Feldversuch wurde als randomisierte vollständige Blockanlage mit drei Faktoren und sechs Wiederholungen angelegt (Kontrollparzelle (C), künstlich infizierte Parzellen (I), natürlich infizierte Parzellen (IN)). Jede Parzelle wies die Kantenlängen 6 x 9 m auf. Die Kontrollparzellen (C) wurden nach guter fachlicher Praxis durch Fungizidmaßnahmen frei von Pilzkrankheiten gehalten. Für die infizierten Parzellen I und IN hingegen wurden keine Fungizidmaßnahmen durchgeführt. Da nicht eindeutig war, ob der natürliche Krankheitsdruck ausreichend ausfällt, wurde der dritte Parzellentyp (I) eingeführt. Hierbei wurden in jede Parzelle Pflanztöpfe mit Braunrost infizierten Roggenpflanzen eingebracht.

Für das fernerkundlich-optische Monitoring wurde eine rotor-basierte UAV Plattform ausgewählt (DJI Matrice 300 RTK). Diese Drohne ermöglichte es, kleinräumige Flugkampagnen für photogrammetrische Aufnahmen über dem Feldversuch durchzuführen. Für die Aufnahme der Luftbilder wurde eine Multispektralkamera (Altum-PT, Micasense) genutzt. Jedes Altum-PT-Kamerakit enthält ein Reflexionspanel für die Kalibrierung vor Ort sowie einen DLS2-Lichtsensor für die Messung von Bestrahlungsstärke und Sonnenwinkel. Dadurch können bei der Luftbildaufnahme unterschiedliche Wetter- und Lichtbedingungen berücksichtigt werden. Die Kamera differenziert die Wellenlängen 475, 560, 668, 717, 842 nm und 8-14 µm und deckt somit den visuellen, nahinfraroten (VisNIR) und thermalen Bereich im elektromagnetischen Spektrum ab. Am 24.02.2022 erfolgte eine erste Befliegung des Feldversuchs mit der vollständig assemblierten Drohne. Es wurden verschiedene Flugparameter getestet und schließlich für alle Flugkampagnen eine Flughöhe von 20 m mit einem Überlappungsgrad in Vorwärts- und Seitenrichtung von 90% des Bildmaterials festgelegt. Dies entsprach einer Bodenauflösung von 0.88 cm (VisNIR) und 13.6 cm (thermal) der Luftbilder.

Des Weiteren wurden verschiedene Pflanzensensoren für zerstörungsfreie Messungen im Pflanzenbestand bereitgestellt: Der SPAD 502DL Plus (Spectrum Technologies) zur manuellen Einschätzung des Chlorophyllgehalts direkt am Pflanzenblatt, das SunScan Canopy Analysis System (AT Delta-T Devices Ltd.) zur Ableitung des Blattflächenindex (LAI) auf Basis der Ermittlung der bestandsdurchdringenden Strahlung und das LI-600 (LI-COR

Biosciences), welches gleichzeitig die stomatale Leitfähigkeit und die Chlorophyll-a-Fluoreszenz am Pflanzenblatt ermittelt. Zudem wurden zwei Mikroklimastationen angeschafft, kalibriert und in die Randflächen des Feldversuchs positioniert.

Erweiterung des Versuchskonzepts: Integration der Referenzanalytik in die Freilandversuche

Das im Antrag beschriebene Versuchskonzept zur Erfassung und Charakterisierung der von den Pflanzen emittierten flüchtigen organischen Verbindungen (VOCs) wurde bereits in der frühen Projektphase um Freilandversuche erweitert. Ursprünglich sollten ausschließlich wöchentlich pflanzenphysiologische Untersuchungen im Labor parallel zu den Freilandversuchen erfolgen. In ersten Vorversuchen wurde jedoch deutlich, dass die realen Freilandbedingungen einen signifikanten Einfluss auf die VOC-Emissionen haben. Um die von den Pflanzen unter praxisrelevanten, variablen Umweltbedingungen emittierten VOCs zu erfassen, musste die Referenzanalytik im Freiland integriert werden. Hierfür musste ein neues methodisches Konzept zur Durchführung der Referenzmessungen im Freiland erarbeitet werden, da es dafür keine etablierten Methoden gab. Dies erwies sich als anspruchsvoll, ermöglichte jedoch eine realitätsnahe Datenerhebung und die anschließende Korrelation der Referenzdaten mit parallelen Feldmessungen, etwa aus der Fernerkundung. Zudem konnte das entwickelte System zugleich als Grundlage für die Integration der opto-elektronischen Nase dienen. Die Integration der Freilandkomponente erforderte einen höheren Ressourceneinsatz (Zeit, Personal), führte jedoch zu deutlich belastbareren Ergebnissen und einer erhöhten Aussagekraft hinsichtlich der praktischen Anwendbarkeit der entwickelten Methoden.

Bei ersten Versuchen zur Erfassung der Emissionen von VOCs aus Roggenbeständen ergab sich zudem, dass aufgrund der sehr geringen VOC-Emissionen eine andere Probenahme erforderlich ist, da die Konzentrationen der entnommenen Gasproben zu gering waren, um eine aussagekräftige Analyse durchzuführen. Deshalb wurden die emittierten VOCs mittels Stir Bar Sorptive Extraction (SBSE) erfasst und keine einfachen Gasproben entnommen. Bei der Probenahme mittels SBSE werden die VOCs mittels Adsorptionskörper aus der Luft adsorbiert und angereichert. Diese Extraktionsmethode ermöglicht eine deutlich erhöhte Sensitivität der Messungen. Dazu musste zunächst mit Investitionsmitteln des ATB die GC/MS um einen Thermodesorber mit integriertem Autosampler erweitert werden. Der Umbau erfolgte im ersten Projektjahr. Die Methode ermöglichte neben der ortsunabhängigen Probenahme außerdem einen deutlich erhöhten Probenumfang sowie einen leichten Probentransport. Für die Erfassung der VOCs wurde eine geeignete Messmethode mit entsprechender Probenahme entwickelt.

2.3 Erfassung des Pflanzenzustandes und der VOCs im ersten Versuchsjahr (AP 4.2)

Ab dem 05.04. bis zum 14.6.2022 wurde der Feldversuch wöchentlich mit der UAV Plattform befliegen. Für jeden Versuchsplot wurden zu jeder Überfliegung über die Handsensoren die Photosyntheseleistung, Blattfläche und Chlorophyllgehalt im Bestand ermittelt. Die Messungen erfolgten dabei entlang einer Beganglinie die durch die Mitte der Parzelle verlief. Des Weiteren wurden das Wachstumsstadium und die Pflanzenkrankheiten bonitiert. Für die Krankheitsbonitur wurden 30 Pflanzen pro Parzelle entlang der Mittellinie ausgewählt, wobei jeweils die letzte erschienene Blatttage oder ab BBCH 39 die obersten 3 Blatttagen. Am 12.04.2022 erfolgte eine Fungizidbehandlung bei BBCH 31 mit INPUT® (1,25 l/kg/ha) und eine zweite Behandlung am 20.5.22 bei BBCH 61 mit CARAMBA auf den Kontrollparzellen.

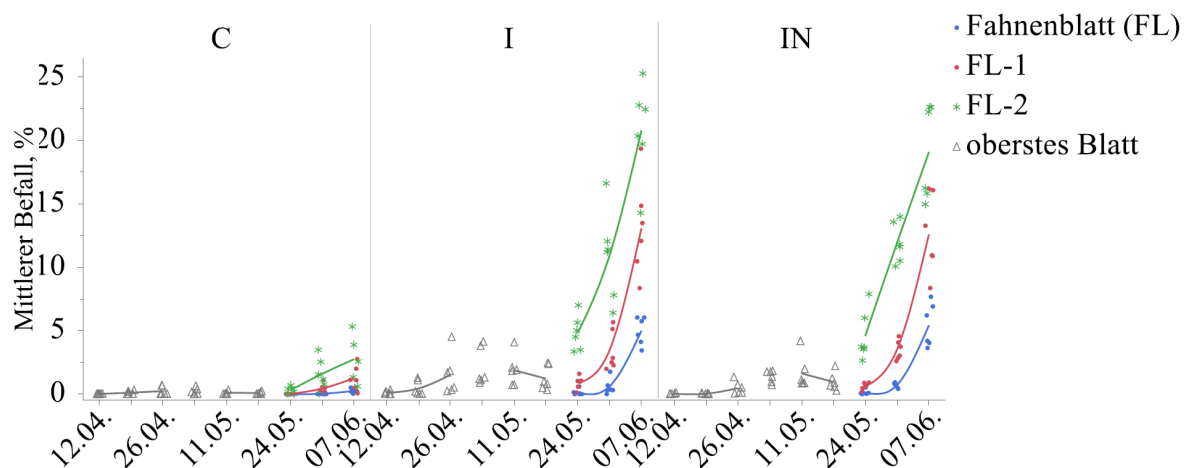


Abb. 1. Darstellung des zeitlichen Verlaufs der Erkrankung auf Basis der Boniturdaten in den Kontrollparzellen (C, links), inokulierten Parzellen (I, mittig) und natürlich infiziert (IN, rechts) in der Saison 2022.

Der Verlauf der Krankheit Braunrost ist in Abbildung 1 dargestellt. Aufgrund der Bonituren kann eine starke Befallsausbreitung ungefähr auf den 24.05.2022 datiert werden. Ab diesem Zeitpunkt erfolgte eine exponentielle Zunahme der typischen Braunrostsymptome (rostbraune, ovale Pusteln an Blattoberseiten) im Bestand und die Krankheit breitete sich in den infizierten Parzellen aus. Dabei konnten keine bedeutenden Unterschiede zwischen den künstlich infizierten und natürlich infizierten Parzellen festgestellt werden. Die Kontrollparzellen dagegen blieben im Vergleich weitestgehend erkrankungsfrei. Aufgrund starker Trockenheit in der Versuchssaison besonders zwischen Mitte April bis Mitte Mai kam es im Verlauf zu vermehrtem Trockenstress im Roggenbestand. Die Pflanzen waren vermehrt durch eingerollte Blätter, vermindertes Wachstum, lockerem Bestand und einem allgemeinen Rückgang der Photosyntheseaktivität gekennzeichnet.

Für die Charakterisierung der VOCs Emission wurden Versuche in Pflanzenwuchskammern mit separaten Roggenpflanzen durchgeführt, die direkt in diesen angezogen wurden, um krankheitsfreie Proben zu gewährleisten. Hierbei wurden Jungpflanzen gezogen, für die Vernalisation (Kältereizphase) in eine Kühlkammer überführt, um diese schließlich während der Bestockungsphase mit zuvor isolierten Braunrostsporen zu infizieren. Gesunde und infizierte Pflanzen konnten so, ohne weitere Einflussparameter direkt verglichen und charakterisiert werden. Die Anzucht ist mit mehr als 90 Tagen zwar sehr zeitintensiv, ermöglicht jedoch Untersuchungen außerhalb der eigentlichen Saison im Freiland (Apr-Jun). Messungen der VOCs-Emissionen im Freiland konnten aufgrund der engen Saison nur eingeschränkt durchgeführt werden. Aufgrund der beschriebenen Anpassung des GC/MS, war eine enge Verzahnung der VOC-Analysen mit den fernerkundlichen Untersuchungen im ersten Versuchsjahr noch nicht möglich.

2.4 Charakterisierung des Pflanzenzustandes und der VOCs

erstes Projektjahr (AP 4.3)

Alle UAV Luftbildreihen der Flugkampagnen 2021 wurden innerhalb der Software Metashape V1.84 (Agisoft LLC, Russia) photogrammetrisch mit Structure-from-Motion verarbeitet, um Orthophotos und 3D-Punktwolken zu erzeugen. Aus diesen Daten wurden Vegetationsindizes,

Bestandeshöhen sowie Oberflächentemperaturen berechnet und mit den Referenzdaten in einem GIS zusammengeführt. Als Vegetationsindex wurde der Leaf Chlorophyll Index (LCI) nach Datt genutzt:

$$LCI = \frac{R_{850} - R_{680}}{R_{850} - R_{710}} \approx \frac{NIR - RED}{NIR - RE}$$

Beispielhaft sind in Abbildung 2 die Karten für LCI, Oberflächentemperatur und der Pflanzenhöhe für den Messtermin am 31.05.2022 abgebildet. Zu diesem Zeitpunkt war der Braunrost bereits stark in den infizierten Parzellen verbreitet. Der Befall blieb allerdings zu den Folgejahren vergleichsweise niedrig. Begleitend herrschte in der Saison 2022 eine intensive Trockenheit, so dass Trockenstress im Pflanzenbestand auftrat. Dieser hatte einen signifikanten Einfluss auf die fernerkundlich-optischen Daten. Es stellte sich als Folge schwierig heraus, eine genaue Unterscheidung zwischen dem Trockenstress und dem durch den Braunrost verursachten Stress auf die Pflanzengesundheit auf Basis der fernerkundlich-optischen Daten vorzunehmen. In einer linearen Regressionsanalyse wurde getestet, inwiefern signifikante Unterschiede auf einen Krankheitseffekt bzw. auf einen Ortseffekt zurückzuführen sind. Als Ortseffekt wurde der Ost-West Gradient gewählt, da dieser standortspezifisch aufgrund leichter Unterschiede der Bodenart (etwas höherer Sandanteil in den östlichen Parzellen) geprägt ist. Die Ergebnisse zeigten, dass der Krankheitsbefall keinen signifikanten Einfluss auf den LCI, die Oberflächentemperatur oder die Pflanzenhöhe hatte ($p > 0.1$ in allen Fällen). Im Gegensatz dazu zeigte sich ein deutlicher Ost-West-Effekt: Sowohl der LCI als auch die Pflanzenhöhe nahmen signifikant in westlicher Richtung ab ($p < 0.001$), der auf den starken Einfluss der Standortbedingungen innerhalb des Versuchsfeldes hinweist, welche als Folge hatte, dass sich Trockenstress in den Parzellen durchsetzte. Eine klare Trennung der UAV Daten zwischen Trockenstress und Krankheitsbefall war in diesem Versuch nicht möglich. Die Ergebnisse wurden in einen bereits akzeptierten Konferenzbeitrag zusammengefasst, welche auf der ECPA 2023 in Bologna präsentiert werden sollen.

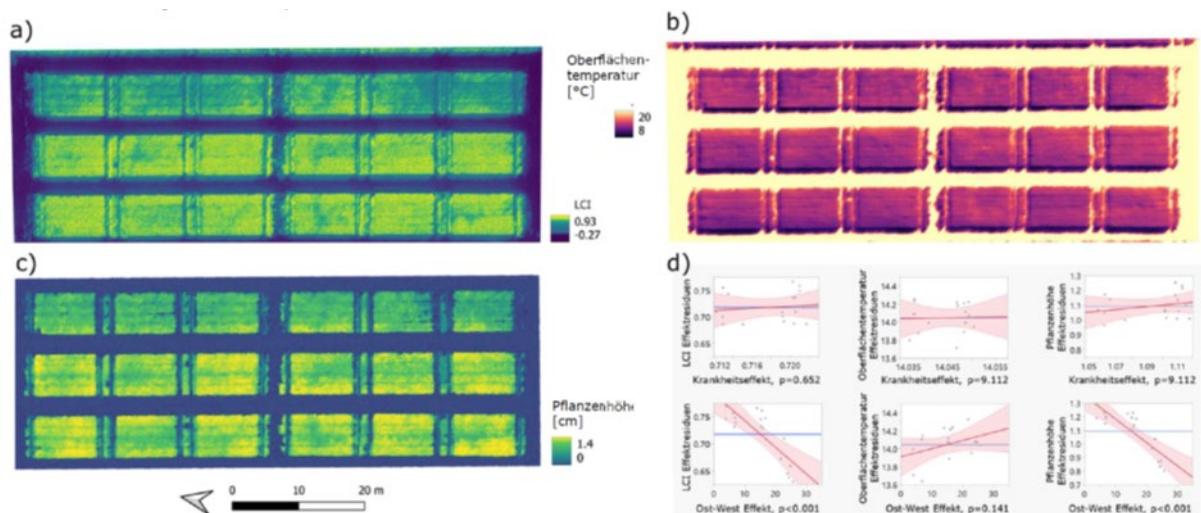


Abb. 2. Karten des Leaf Chlorophyll Index (LCI) (a), der Oberflächentemperatur (b) und der Pflanzenhöhe (c). Das Modell in (d) zeigt für LCI und Pflanzenhöhe eine starke Abhängigkeit durch den Ost-West Trend, welcher durch den Einfluss von Trockenstress gekennzeichnet ist.

Neben den ersten Messungen im Freiland wurden zur Charakterisierung der VOCs verschiedene Messungen im Labor durchgeführt. Dazu wurden sowohl im Labor gezogene als

auch aus dem Freiland entnommene Pflanzen verwendet. Insgesamt emittiert der verwendete Roggen vergleichsweise wenig VOCs. Es wurde jedoch ersichtlich, dass die Identifikation möglicher Marker-VOCs, welche eine Infektion mit spezifischen Rostpilzen anzeigen, durch eine Mischinfektion bzw. schwankenden Einflüssen (Rostkrankung und bspw. Blattläuse, Trockenstress, Wettereinflüsse etc.) erschwert wird. Die Identifikation relevanter VOCs sollte daher zunächst im Labor mit gezogenen kontaminationsfreien Pflanzen unter einheitlichen simulierten Bedingungen erfolgen. Die identifizierten Marker-VOCs können dann im Freilandversuch, auch unter erschwerten Bedingungen und bei niedrigen Konzentrationen einfacher detektiert/identifiziert werden.

Tabelle 1 gibt eine Zusammenstellung der VOCs wieder, die im Zusammenhang mit einer Braunrostinfektion künstlich infizierter Pflanzen relevant erscheinen. Es handelt sich einerseits um VOCs dessen Emission nach der Infektion abnehmen und mit den pflanzenphysiologischen Synthesewegen in Zusammenhang stehen. Andererseits konnten VOCs ausgemacht werden, welche nach einer Infektion deutlich zunahmten und entweder auf eine direkte Reaktion der Pflanze auf die Infektion oder um Emissionen des Rostpilzes selbst zurückzuführen sind. Letztere sind als Marker-VOCs voraussichtlich am besten geeignet, möglicherweise in Zusammenspiel mit einzelnen anderen VOCs. Im Fokus stehen momentan vor allem 2-propyl-1-Heptanol und 1,5-Hexanediol, um als Marker VOCs eine Braunrostinfektion anzuzeigen. Diese Ergebnisse waren jedoch noch nicht abschließend verifiziert und weitere tiefergehende Untersuchungen erfolgten in den weiteren Projektjahren. Darüber hinaus zeigte der Vergleich zu ähnlichen Untersuchungen an Weizen, dass die identifizierten VOC mit denen dieser Studien nicht direkt vergleichbar sind.

Tab. 1: Als relevant betrachtete VOC-Emissionen gesunder (Kontrolle) und mit Braunrost inkubierter Roggenpflanzen.

VOC	RI Messung	Kontrolle	Inkubiert	Richtung	Literaturangabe
1-Hexanol	1363	0.02 ± 0.02 ^a	0.17 ± 0.19 ^a	↗ ¹	1314–1396
Acetic acid	1462	1.45 ± 0.5 ^a	0.48 ± 0.08 ^b	↘	1402–1498
1-Hexanol, 2-ethyl-	1501	0.29 ± 0.2 ^a	0.29 ± 0.07 ^a	–	1441–1522
Formic acid	1516	4.07 ± 1.58 ^a	1.07 ± 0.19 ^b	↘	1510
Hexadecane	1607	0.68 ± 0.32 ^a	0.2 ± 0.14 ^b	↘	–
1-Heptanol, 2-propyl-	1680	0.03 ± 0.07 ^a	0.19 ± 0.03 ^b	↗	–
2-Undecenal	1780	0.57 ± 0.41 ^a	0.28 ± 0.06 ^a	–	1740
1,5-Hexanediol	>2000 ²	0.05 ± 0.11 ^a	0.98 ± 0.23 ^b	↗	–
1-Hexadecanol	>2000 ²	18.19 ± 11.49 ^a	0.42 ± 0.1 ^b	↘	2332–2400

RI = retention index

¹nicht signifikant

²Identifikation nur eingeschränkt möglich, da außerhalb der verwendeten Alkanreihe

2.5 Experimentelle Erfassung des Pflanzenzustandes und der VOCs zweites Versuchsjahr (AP 4.4)

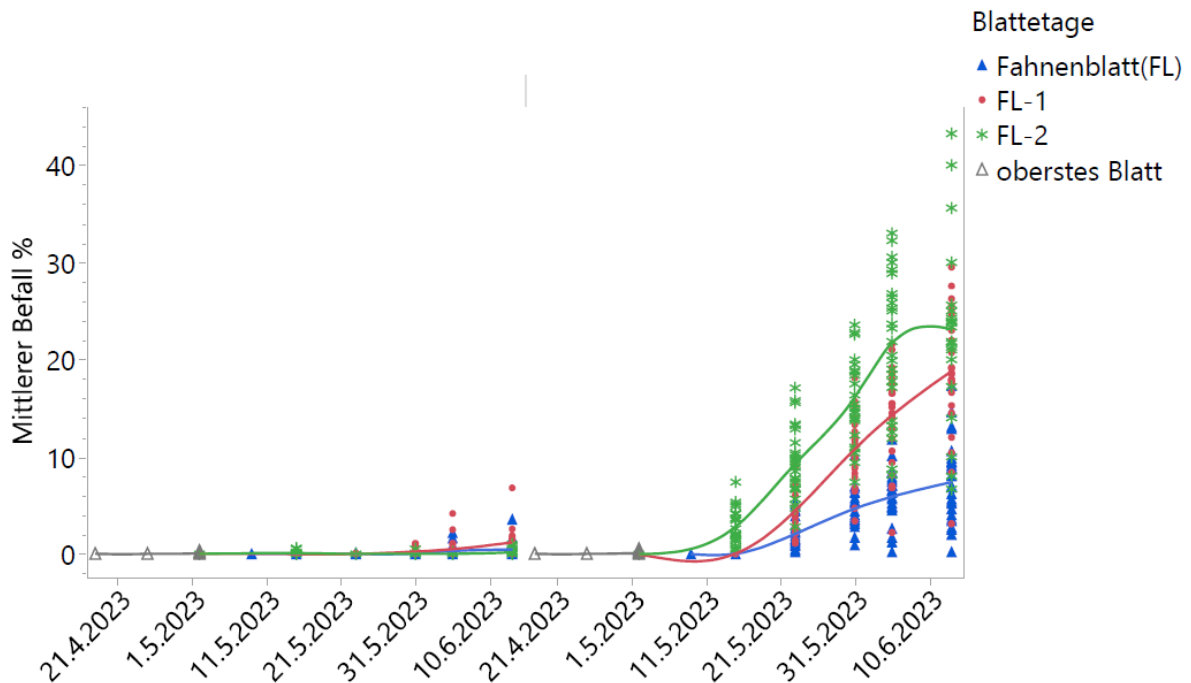


Abb. 3. Darstellung des Verlaufs der Erkrankung auf Basis der Boniturdaten in den Kontrollparzellen (links) und natürlich infizierten Parzellen (rechts).

Für das zweite Versuchsjahr (2023) wurde ein Feldversuch analog zum ersten Jahr angelegt mit der Ausnahme, dass auf künstlich infizierte Parzellen verzichtet wurde, da der natürliche Krankheitsdruck ausreichend ist. Der Feldversuch wurde in diesem Jahr ab dem 18.04.2023 wöchentlich mit der UAV Plattform befliegen. Zu jeder Überfliegung wurden für alle Versuchspartellen das Wachstumsstadium und die Pflanzenkrankheiten bonitiert sowie die Parameter Photosyntheseleistung, Blattfläche und Chlorophyllgehalt über Sensoren direkt im Bestand gemessen. Die 2022 angeschaffte Mikroklimastation wurde in den Feldversuch integriert. Die Fungizidbehandlung erfolgte am 27.04.2023 auf den Kontrollparzellen mit INPUT®, um diese krankheitsfrei zu halten. Der Verlauf der Krankheit Braunrost verlief zeitlich ähnlich wie im Vorjahr. Aufgrund der Bonituren kann eine starke Befallsausbreitung ungefähr auf den 21.05.2023 datiert werden. Ab diesem Zeitpunkt erfolgte eine exponentielle Zunahme der typischen Braunrostsymptome (rostbraune, ovale Pusteln an Blattoberseiten) im Bestand und die Krankheit breitete sich über alle infizierten Parzellen aus. Insgesamt war der Befall stärker als im Vorjahr bis rund 30 – 40 % Ende Mai. Die Kontrollparzellen blieben dagegen weitestgehend erkrankungsfrei (vgl. Abb.3).

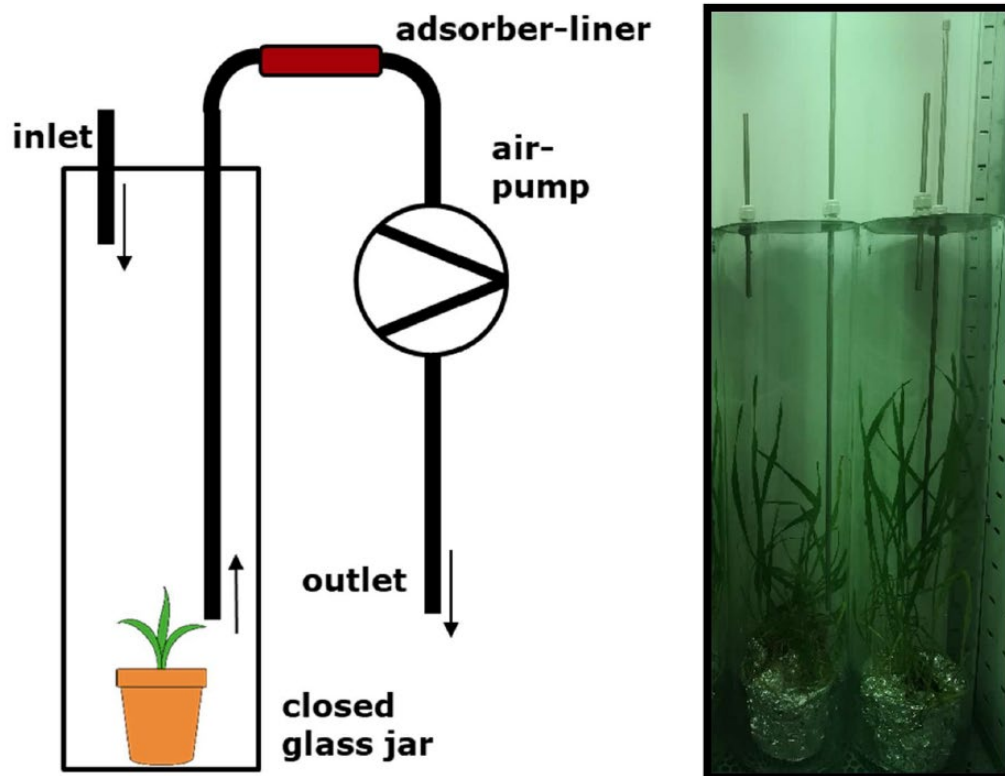


Abb. 4. Schematischer Versuchsaufbau zur Charakterisierung der VOC-Emissionen gesunder und mit Braunrost infizierter Winterroggenpflanzen (links) und verwendete Gefäße (rechts).

Zur Charakterisierung der VOCs und Identifizierung geeigneter Marker-VOCs wurden die Versuche unter einheitlichen simulierten Bedingungen im Labor fortgesetzt. Die in der Pflanzenwuchskammer angezogenen Jungpflanzen, mussten für die Vernalisation (Kältereizphase) wieder 90 Tage in eine Kühlkammer überführt, und in der anschließenden sog. Bestockungsphase mit zuvor isolierten Braunrostsporen infiziert werden. Um die grundlegenden Mechanismen detaillierter zu untersuchen wurde der Versuchsaufbau und -ablauf modifiziert und optimiert. Im Unterschied zum Vorjahr wurde vor allem auf ein aktives System umgestellt, um weitere Einflussparameter zu eliminieren und die Aussagekraft zu verbessern. Dabei befindet sich die zu untersuchende Einzelpflanze in einem geschlossenen System, welches mit einem definierten Luftstrom durchströmt wird. Die emittierten VOCs werden mittels Stir Bar Sorptive Extraction (SBSE) aus diesem adsorbiert (Abb. 4). Für die Untersuchungen wurden Stir Bars mit PDMS (polydimethylsiloxane) Beschichtung verwendet.

Um eine enge Verzahnung der VOC-Analysen mit den fernerkundlichen Untersuchungen und Bonituren zu ermöglichen, wurden diese in allen Versuchspartellen parallel zu den anderen Untersuchungen gemessen. Die Analyse der emittierten VOCs erfolgte mittels SBSE. Dabei wurden die VOCs mittels Adsorptionskörper passiv aus der Luft adsorbiert und angereichert. Diese Extraktionsmethode ermöglichte eine deutlich erhöhte Sensitivität der Messungen. Dies war notwendig, da die Konzentrationen der entnommenen Gasproben im Vorjahr zu gering waren, um eine aussagekräftige Analyse durchzuführen. Dazu musste u.a. auch eine geeignete Messmethode mit entsprechender Probenahme entwickelt werden. Die Stir Bars wurden in jeder Parzelle etwa in 25 cm Höhe installiert und haben dort für 24 h VOCs aus der umgebenen Luft adsorbiert. Aufgrund multipler Einflüsse (unterschiedliche Erkrankungen und Stresssituation bei den Pflanzen, Witterungseinflüsse) ist eine differenzierte Analyse im

Freiland bedingt möglich. Bei der Charakterisierung der gemessenen VOCs wurde der Fokus daher zunächst auf die in den Laborversuch identifizierten relevanten Verbindungen gelegt.

2.6 Charakterisierung des Pflanzenzustandes und der VOCs

zweites Versuchsjahr (AP 4.4)

Insgesamt war die Trockenheit in der Versuchssaison 2023 geringer als im Vorjahr. Dadurch kam es im Verlauf der Saison zwar zu individuellem Trockenstress im Roggenbestand allerdings war dieser weitaus geringer als im Vergleich zum Vorjahr. Die Bedingungen für die Entwicklung der Pilzkrankung Braunrost waren 2023 günstiger, wodurch der Befall weitaus stärker im Bestand sichtbar war. Die Daten des SPAD Sensors zeigten, dass der Chlorophyllgehalt in den erkrankten Parzellen stärker abnahm als im Vergleich zu den mit Fungizid behandelten Parzellen. Die Pflanzen in den infizierten Parzellen waren zudem deutlich schneller in der Abreife und zeigten eher Seneszenzmerkmale auf. Das spiegelte sich schwächer auch in den UAV Daten wider. Ab dem 06.05.2023 konnte zunächst eine leichte und ab dem 20.05.2023 eine stärkere Abnahme der LCI Werte innerhalb der infizierten Plots im Vergleich zu den Kontrollparzellen festgestellt werden (Abb. 5). Daraus lässt sich feststellen, dass in dieser Versuchssaison aufgrund des geringeren Trockenstress und des deutlich höheren Krankheitsdrucks eine Differenzierung zwischen erkrankten und nicht erkrankten Parzellen bei stärkerem Braunrostbefall auch anhand der UAV-Daten möglich war.

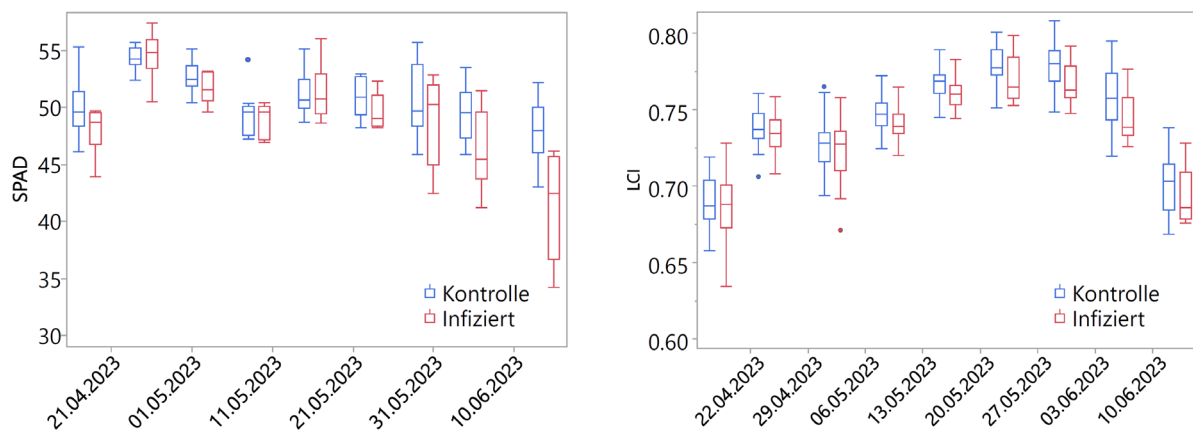


Abb. 5. Zusammengefasste Werte für SPAD Messungen am Blatt und LCI aus UAV Luftbildern über die Versuchssaison 2023.

In drei Versuchsreihen zeigten viele der in 2022 identifizierten VOCs ähnliche Emissionen im Zusammenhang mit einer Braunrostinfektion künstlich infizierter Pflanzen. Als geeignete Marker-VOC wurden vorrangig die Verbindungen betrachtet, welche nach einer Infektion stärker emittiert wurden, entweder als direkte Reaktion der Pflanze oder weil es sich um Emissionen des Rostpilzes selbst handelt. Von den zwei VOCs, welche im ersten Versuchsjahr festgestellt wurden (2-propyl-1-Heptanol und 1,5-Hexanediol), konnte in den Versuchswiederholungen jedoch nur 1,5-Hexanediol verifiziert werden. Die Verbindungsklasse legt nahe, dass die Emission eher vom Pilz selbst als von der Pflanze stammt. Für 1,5-Hexanediol sind jedoch keine RI-Werte in der Literatur vorhanden, welche für eine eindeutige Identifikation notwendig wären. Dennoch halten wir die Zuordnung für weitgehend plausibel, da eine sehr hohe Übereinstimmung mit der gemessenen Verbindung vorliegt.

Zusätzlich zu 1,5-Hexandiol konnte 6,10,14-trimethyl-2-Pentadecanon als eine weitere Verbindung in allen 3 Versuchen identifiziert werden, welche im Zusammenhang mit einer Braunrostinfektion steht. Die Verbindung konnte dabei eindeutig mit Literaturangaben abgeglichen und identifiziert werden. Es zeigte einen signifikanten Anstieg, der direkt nach der Infektion und erneut nach dem sichtbar werden von Infektionssymptomen auftrat (Abb. 5). Nach einer vorläufigen Hypothese führt die lokal beschränkte Erstinfektion zu einer direkten Reaktion der Pflanze, welche nach kurzer Zeit wieder abklingt. Nachdem die ersten Braunrostkolonien soweit gewachsen sind, dass sie verstärkt neue Sporen bilden und sich die Infektion somit ausbreiten kann (sichtbare Symptome), führt dies zu einer neuerlichen Erstinfektion gesunder Blätter die wiederum eine direkte Reaktion auslöst. Dies zeigt auch, dass der Nachweis einer Infektion über die Emission von 6,10,14-trimethyl-2-Pentadecanon vom Zeitpunkt der Infektion bzw. der Wachstumskinetik des Braunrostes abhängig ist. Dies ist auch die Ursache dafür, dass diese Verbindung in den ersten Untersuchungen 2022, in denen der zeitliche Infektionsverlauf nicht untersucht wurde, nicht als relevant betrachtet wurde. Es zeigt zudem die zeitliche Abhängigkeit des Monitorings zur Früherkennung von Infektionen und unterstreicht den Nutzen eines Sensorverfahrens zur Bestimmung von VOCs in Pflanzenbeständen für den Pflanzenschutz. In der Literatur wird beschrieben, dass 6,10,14-trimethyl-2-Pentadecanon bei anderen Pflanzenarten u.a. als Reaktion auf Schädlingsbefall gebildet wird. Die Verbindung könnte also als direkter Indikator einer Rostpilzinfektion dienen.

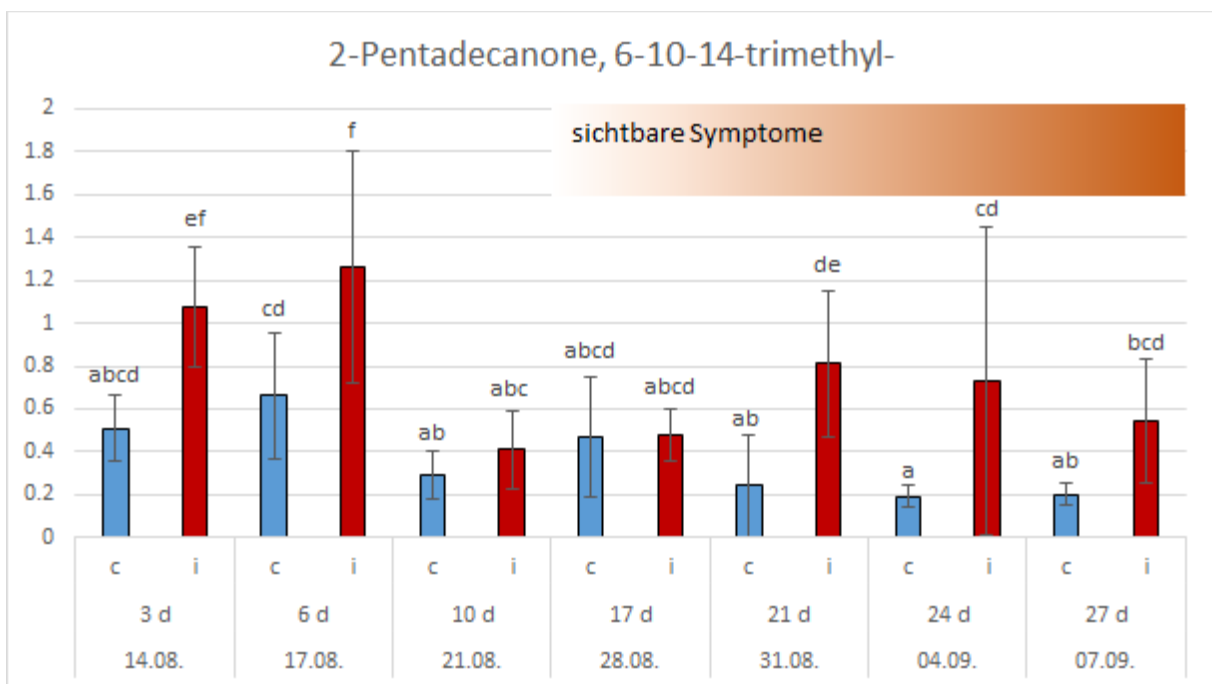


Abb. 6. Emissionen von 6,10,14-trimethyl-2-Pentadecanon gesunder (blau) und infizierter (rot) Winterroggenpflanzen. Die Emissionen erhöhen sich signifikant innerhalb der ersten 6 Tage nach Infektion sowie nach mehr als 21 Tagen.

Im Freilandversuch 2023 wurden insgesamt 55 VOCs bestimmt von denen jedoch nur 14 signifikante Unterschiede zwischen den infizierten und nicht infizierten Pflanzenbeständen aufwiesen (vgl. Tabelle 2a). Die Bewertung fällt hierbei schwer, da die Konzentrationen dieser Verbindung durchweg sehr gering waren, weshalb schwankende externe Faktoren wie Witterungsverhältnisse die Effekte einer Infektion leicht überlagern können. Es wurden daher verschiedene statistische Modelle angewandt um die Unterschiede besser erfassen zu können. Hierbei wurden u.a. die einzelnen Messpositionen normiert, um lokale Einflüsse zu

reduzieren. Dennoch konnten keine signifikanten Unterschiede in den Emissionen von 1,5-Hexandiol festgestellt werden. Auch 6,10,14-trimethyl-2-Pentadecanon zeigt lediglich beim Versuchsbeginn etwas höhere Emissionen in den infizierten Beständen, da die Konzentrationen hier etwas höher liegen. Da jedoch nicht kontinuierlich gemessen werden konnte und die Messreihe versuchsbedingt zeitlich niedrig aufgelöst ist, sind valide Aussagen nur eingeschränkt möglich. Die räumliche Nähe der infizierten/behandelten Parzellen zueinander erzeugt bei den flüchtigen VOCs im Unterschied zu den anderen bestimmten Parametern möglicherweise Wechselwirkungen, da auch nicht infizierte Bestände auf das VOC 6,10,14-trimethyl-2-Pentadecanon mit einer Emission selbiger reagieren (autokatalytische Reaktion). Es wurde daher angestrebt das Versuchsdesign zur Messung der VOCs im Freiland für die Saison 2024 weiter zu optimieren (1.6).

Tab. 2: Unterschiede in den Emissionen ausgewählter VOCs zwischen gesunden (Kontrolle) und mit Braunrost befallenden Roggenbeständen in der Saison 2023. Graue Felder markieren Messtage mit signifikantem Unterschied voneinander.

Saison 2023	17.04.2023	11.05.2023	16.05.2023	23.05.2023	30.05.2023	06.06.2023	13.06.2023
Acetic acid, hexyl ester							
1-Hexanol							
Acetic acid							
Decanal							
Undecanal							
Dimethyl Sulfoxide							
2-Methyl-2-decanol							
Heptadecane							
Pentanoic acid							
2-Pentadecanone							
Heneicosane							
n-Decanoic acid							
Pentanoic acid, 4-oxo-							
1-Hexadecanol							
2-Pentadecanone, 6,10,14-trimethyl-							

2.7 Optimierung des Monitoringssystems (AP 4.5)

Auf Basis der zurückliegenden Versuchsjahre wurde eine grundlegende Veränderung des Freilandversuches durchgeführt für die Optimierung des Monitoringssystems. Statt einer randomisierten vollständigen Blockanlage wurden zwei separate und räumlich hinreichend voneinander getrennte Felder (A und B) angelegt. Feld A wird als Kontrollfeld genutzt, bei dem eine Infektion durch eine konventionelle Pflanzenschutzapplikation unterdrückt wird (analog zur Kontrollparzelle der Vorjahresversuche). In Feld B wird bis auf eine kleine Zone die etwa 10 % der Gesamtfläche ausmachen soll, nicht behandelt. Dadurch soll verhindert werden, dass nicht infizierte Pflanzen möglicherweise auf die Emissionen in der Nähe befindlicher infizierter Bestände reagieren und dadurch erhöhte Emissionen der Marker-VOC. initiiert werden. Als Vergleich dazu dient die behandelte Zone im Feld B welche in unmittelbarer Nähe zu den infizierten Pflanzenbeständen liegt. Dadurch wurde einerseits eine differenziertere

Betrachtung der Wechselwirkungen realisiert und andererseits ermöglicht, dass eine ausreichend große Fläche zu Verfügung stand, um detektierbare Infektionsherde im Bestand zu Erzeugen.

2.8 Feldversuche zur Konditionierung der elektronischen Nase (AP 5.3)

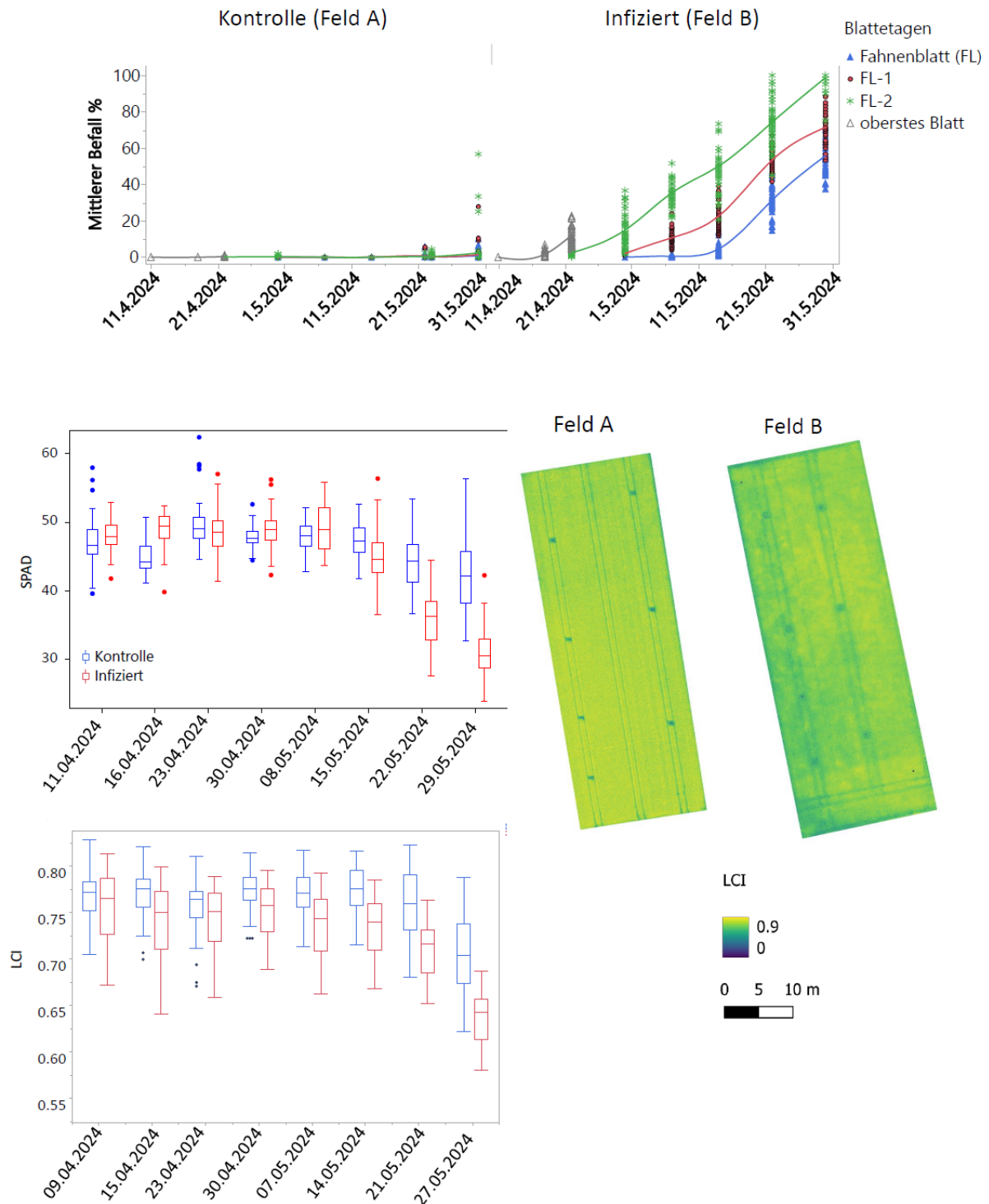


Abb. 7. Ergebnisse der Bonituren und der UAV Befliegungen für den Feldversuch 2024. Oben der Befallsgrad von Braunrost in Feld A (Kontrolle) und Feld B (Infiziert).

In Abbildung 7 sind die Ergebnisse, die sich zunächst aus den Bonituren und den UAV Befliegungen für den Feldversuch 2024 ergaben, zusammengefasst. Im Vergleich zeigt sich, dass im gesamten Beobachtungszeitraum im Kontrollfeld (A) nahezu kein Braunrost festgestellt werden konnte mit Ausnahme des letzten Termins, wo leichte Erscheinungen in den obersten Blatttagen auftraten. Im infizierten Feld (B) dagegen wurde ab Mai eine Ausbreitung von Braunrost festgestellt, der zu einem sehr starken Befall im Bestand führte (höchster Befall im gesamten Projektzeitraum). Parallel dazu sanken im infizierten Feld sowohl die SPAD-Werte als auch die LCI-Werte, die zum Chlorophyllgehalt korrelieren und damit die Blattgesundheit widerspiegeln. Diese Abnahme war besonders deutlich ab Mitte Mai verifizierbar. Bereits am 7. Mai waren deutlich Unterschiede zwischen den UAV Luftbildern (LCI) von Feld A und B erkennbar. Während Feld A eine gleichmäßig hohe LCI Verteilung räumlich aufwies, zeigte Feld B eine deutlich inhomogenere Verteilung der Werte mit vermehrt schwächeren Bereichen, was insgesamt auf eine reduzierte Vitalität und stärkeren Krankheitsstress hindeutet, der sich zunächst lückenhaft im Bestand durchsetzte.

Um die Qualität und Sensitivität der VOC-Messungen im Freiland zu optimieren, soll die Anreicherung der VOCs nicht mehr nur passiv erfolgen. Luftproben sollen über Schläuche und batteriebetriebenen Gaspumpen parallel und kontinuierlich von verschiedenen Messpunkten im Feld durch einen Liner mit enthaltenen Stir Bar geleitet werden (Abbildung 8). Dieser Aufbau ist analog zu den Laborversuchen nachempfunden und ermöglicht eine Quantifizierung des durchlaufenden Volumenstroms. Der Versuchsaufbau wird erstmals für diese Art der Analytik realisiert und stellt gleichfalls einen Pionierversuch dar. Über diesen Versuchsaufbau kann ebenfalls die konzeptionelle Integration der AgriNose in das Monitoringsystem erfolgen. Anstatt der Stir Bars, soll die elektronische Nase den mittels einer Pumpe aus dem Feld gezogenen Luftstrom analysieren. Die Messzeit wird aufgrund der direkten Messung jedoch nur einen Bruchteil der SBSE Adsorptionszeit betragen, weshalb alle Messpunkte im Feld nacheinander mit der gleichen elektronischen Nase gemessen werden können. Die Ergebnisse der SBSE können somit Messungen direkt mit denen der Nase korreliert werden, da an identischen Messpunkten mit gleichen Volumenstrom gemessen wird. Zusätzlich soll die Nase auch an anderen Punkten im Feld zum Einsatz kommen, um eine räumlich höher aufgelöste Verteilung der Signale zu ermöglichen.

Im Freilandversuch 2024 wurden mehr als 60 VOCs bestimmt von denen jedoch nur 23 signifikante Unterschiede zwischen den infizierten und nicht infizierten Pflanzenbeständen aufwiesen (vgl. Tabelle 3). Die Ergebnisse zeigen, dass das Spektrum der erfassten VOCs auch stark vom Probenahmesystem abhängen. Es wurden einerseits mehr VOCs identifiziert, bei denen klare Unterschiede zwischen den Varianten, wenn auch nur temporär, ersichtlich waren. Andererseits wurden auch VOCs erfasst die im Vorjahr nicht gemessen werden konnten. Dies hängt einerseits mit einer verbesserten Sensitivität des aktiven Systems zusammen, zum anderen werden zwangsläufig viele VOCs erfasst, welche nicht aus dem eigentlichen Bestand stammen. Diese Fremd-VOCs können je nach Umgebungs- und Witterungsbedingungen von Jahr zu Jahr stark variieren.

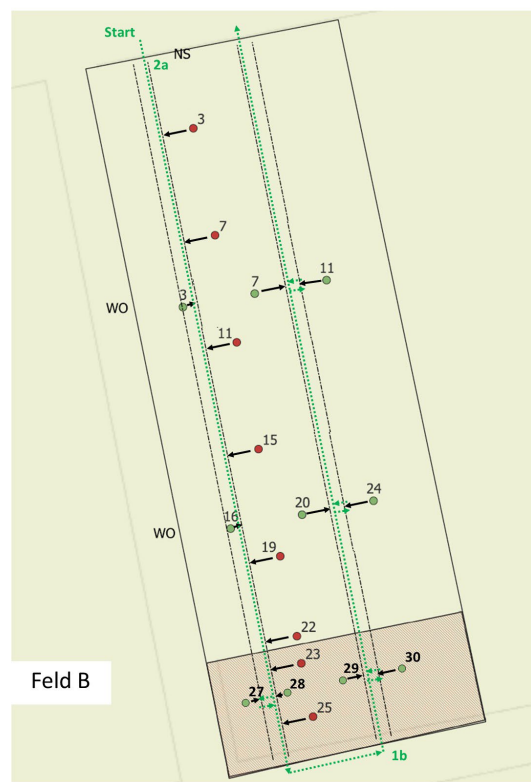
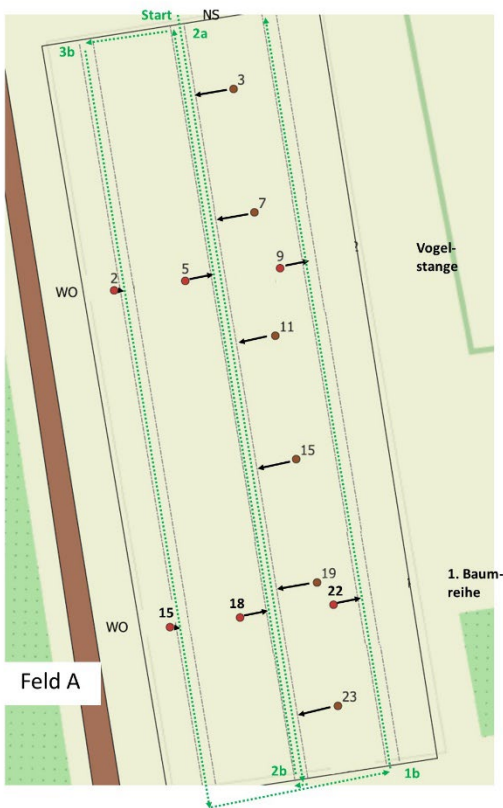
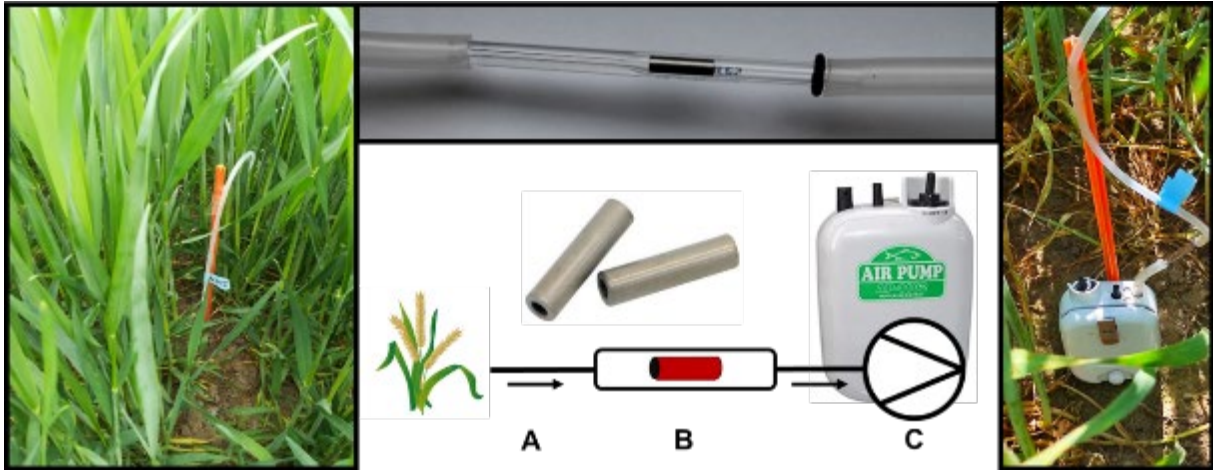


Abb. 8. Aktive Anreicherung der VOCs im Freiland: Luft wird von verschiedenen Messpunkten im Feld (unten) jeweils über Schläuche (a) und mittels batteriebetriebener Gaspumpen (c) kontinuierlich durch einen Liner mit enthaltenen Stir Bar (b) geleitet, welcher die VOCs adsorbiert.

Tab. 3: Unterschiede in den Emissionen ausgewählter VOCs zwischen gesunden (Kontrolle) und mit Braunrost befallenden Roggenbeständen in der Saison 2024. Graue Felder markieren Messtage mit signifikanten Unterschied voneinander.

Saison 2024	10.04.2024	17.04.2024	24.04.2024	30.04.2024	08.05.2024	15.05.2024	22.05.2024
Acetic acid, hexyl ester							
1-Hexanol							
1-Tridecene							
Acetic acid							
1-Hexanol, 2-ethyl-							
Benzaldehyde							
1-Octanol							
Hexanoic acid, hexyl ester							
Tetramethylbutanedinitrile							
Oxime-, methoxy-phenyl- ₂							
Formamide							
5,9-Undecadien-2-one, 6,10-dimethyl-, (Z)-							
Butanoic acid, phenylmethyl ester							
Benzyl Alcohol							
Butylated Hydroxytoluene							
Benzisothiazole							
Hexadecanal							
Octanoic Acid							
2-Pentadecanone, 6,10,14-trimethyl-							
Pentatriacontane							
n-Decanoic acid							
Benzoic acid							

Im Rahmen der VOC-Analysen konnten insgesamt 15 flüchtige organische Verbindungen (VOCs) identifiziert werden, die in mindestens einem der beiden Versuchsjahre (2023 oder 2024) signifikante Unterschiede zwischen Kontroll- und infizierten Beständen aufwiesen: 1) Acetic acid hexyl ester, 2) 1-Hexanol, 3) Acetic acid, 4) 1-Octanol, 5) Heptadecane, 6) Formamide, 7) 6,10-dimethyl-5,9-Undecadien-2-one, 8) Benzyl Alcohol, 9) Benzothiazole, 10) Octanoic Acid, 11) Hexadecanal, 12) 6,10,14-trimethyl-2-Pentadecanone, 13) Heneicosane, 14) n-Decanoic acid und 15) 1-Hexadecanol. Fünf dieser Substanzen zeigten in beiden Jahren an mindestens einem Messtag signifikante Abweichungen (kursiv geschrieben).

Dabei zeigten insbesondere 1-Hexanol und Acetic acid, hexyl ester als leicht flüchtige Verbindungen eine verbesserte Nachweisbarkeit im Vergleich zum Vorjahr, was möglicherweise auf die optimierte Probenahme zurückzuführen ist. 1-Hexanol wies dabei erneut, in Übereinstimmung mit vorangegangenen Laborversuchen, erhöhte Konzentrationen in infizierten Beständen auf. Ein ähnlicher Verlauf zeigte sich auch für Acetic acid, hexyl ester und Benzylalkohol, deren Emissionsmuster eng mit dem von 1-Hexanol korrelierten und auf mögliche gemeinsame Regulationsmechanismen oder metabolische Kopplungen hinweisen. Diese Unterschiede waren bereits früh im Verlauf der Messreihe sichtbar.

Im Gegensatz dazu zeigte sich bei 6,10,14-trimethyl-2-Pentadecanon ein abweichendes Muster (Abb. 9). In der Kontrolle stiegen die Emissionen im Versuchsverlauf signifikant an. Dieser Anstieg konnte auch in eine dritten Behandlungsvariante beobachtet werden. Hierbei wurde ein Teil der infizierten Fläche zusätzlich mit Pflanzenschutzmitteln behandelt, wodurch das Braunrostwachstum ähnlich wie in der Kontrolle eingedämmt werden konnte, sich die Pflanzen jedoch weiterhin in direkter Nachbarschaft zu infizierten Pflanzen befanden, sodass eine VOC-basierte Kommunikation ermöglicht wurde. Die Emissionen dieser Variante stiegen im späteren Verlauf analog zur Kontrolle ebenfalls an. Dies begründet sich möglicherweise als Reaktion auf die nun doch durchbrechende Infektion in diesen Varianten. Auch bei den infizierten Pflanzen zeigte sich ein zeitversetzter Anstieg als mögliche Reaktion der erhöhten Emissionen. Es ist möglich, dass in der infizierten Variante ein früher Emissionspeak von 6,10,14-trimethyl-2-Pentadecanon bereits vor Beginn der Messreihe aufgetreten ist, jedoch nicht erfasst wurde. Zum frühen Zeitpunkt des Versuchs war die Pflanzenbiomasse noch sehr gering, was die Messung flüchtiger Verbindungen stark erschwerte. Insbesondere bei ohnehin niedrigen Konzentrationen – wie sie für diese Verbindung charakteristisch sind – könnten die Emissionen unterhalb der Nachweisgrenze gelegen haben. Die Annahme, dass ein früher Anstieg stattgefunden hat, der messtechnisch nicht erfassbar war, erscheint daher plausibel, muss jedoch in zukünftigen Versuchen noch experimentell überprüft werden.

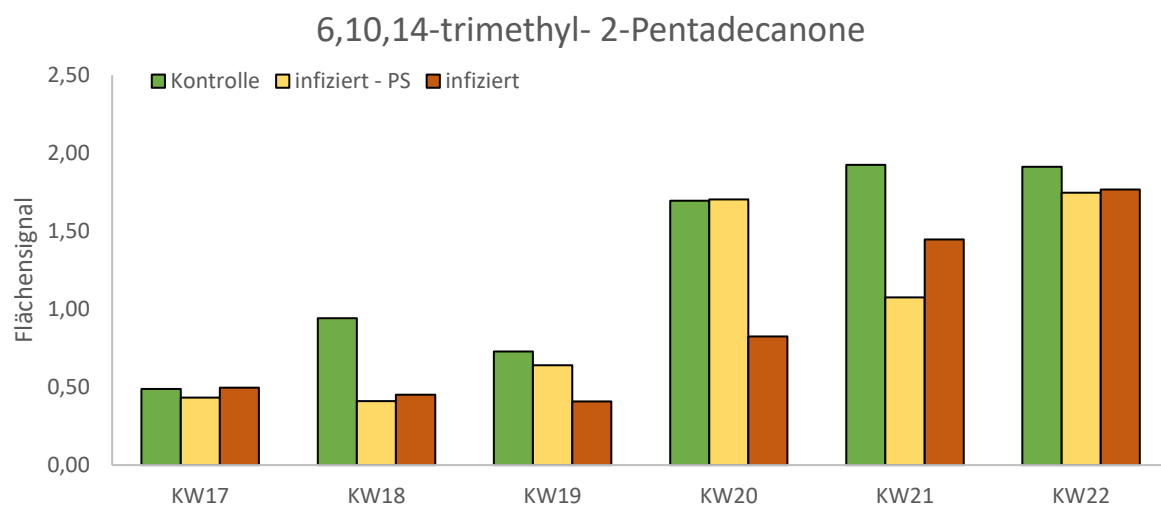


Abb. 9. Verlauf der 6,10,14-trimethyl- 2-Pentadecanone Emissionen im Versuchsjahr 2024 eines Roggenbestandes ohne Pflanzenschutz (infiziert), mit Pflanzenschutz in direkter Nachbarschaft zum infizierten Feld (infiziert – PS) und einem abgegrenzten mit Pflanzenschutz behandelten Kontrollfeld (Kontrolle).

Aufgrund unterschiedlicher Versuchskonzepte (Blockversuch vs. Getrennte Felder) und abweichender Probenahmemethoden (passiv vs. aktiv) zwischen den beiden Jahren ist eine abschließende Bewertung der Ergebnisse jedoch derzeit nur eingeschränkt möglich. Die teils variierenden Befunde unterstreichen die Notwendigkeit einer weiterführenden Validierung, weshalb ein weiterer Versuch außerhalb des Projektes für das Jahr 2025 geplant ist. Dieser soll analog des Freilandversuches aus 2024 durchgeführt werden, um konsistente und vergleichbare Daten zu generieren und die bisherigen Ergebnisse eindeutig bewerten zu können.

2.9 Integration der eNose in das Monitoringsystem (AP 4.6)

In einem abschließenden Testszenario wurde das Sensornetzwerk zusammen mit dem Pumpsystem mit einem Bosch Gassensor BME680 getestet. Dieser alternative Sensortyp unterscheidet sich zwar hinsichtlich des physikalischen Messprinzips vom ursprünglich vorgesehenen Zielsensor, ähnelt diesem jedoch in zentralen technischen Parametern weitgehend. Dazu zählen insbesondere elektrische Leistungsaufnahme, geometrische Abmessungen, Messfrequenz, Speicherkapazität sowie die Anzahl und Art der verfügbaren Messkanäle. Die Auswahl dieses alternativen Sensors diente dem Zweck, die prinzipielle technische Machbarkeit und Integrationsfähigkeit eines Sensorsystems mit vergleichbaren Anforderungen unter realen Einsatzbedingungen zu evaluieren. Durch die gezielte Auswahl eines funktional und betrieblich ähnlichen Ersatzsensors konnten aussagekräftige Erkenntnisse hinsichtlich Einbau, Energieversorgung, Datenhandling und Systemkompatibilität gewonnen werden. Die gewonnenen Ergebnisse sind damit direkt auf die spätere Integration des angestrebten Sensors übertragbar, sodass der Feldversuch als technischer Machbarkeitsnachweis gewertet werden kann.

Der BME680 nutzt metalloxidbasierte Sensorelemente (MOx) auf deren Oberflächen VOC kondensieren bzw. bei aufheizen wieder verdampfen. Über temperaturmodulierte Heizprofile innerhalb von acht konfigurierbaren Kanälen kann der Sensor dadurch unterschiedliche VOCs anhand ihres Reaktionsverhaltens erfassen und charakterisieren. Der Sensor ermöglicht dabei jedoch keine selektive Detektion einzelner VOCs, sondern gibt ein integriertes, nicht-spezifisches Summensignal aller vorliegenden VOCs aus.

Der Sensor wurde an verschiedenen Punkten in Feld A und B ausgebracht. Die Ergebnisse sind in Abbildung 10 und der Sensor im Feld in Abbildung 11 dargestellt. Über unterschiedliche Heizprofile des BME680 zeigten sich gruppenspezifische Unterschiede zwischen Kontroll- und infizierten Proben. Insgesamt lagen die gemessenen Werte im Bereich von ca. 1,5 bis 4,5, wobei Kanal 0 das stärkste Signal lieferte. In mehreren Kanälen (insbesondere 0, 2, 3, 4 und 6) zeigten infizierte Proben tendenziell höhere Mittelwerte als die Kontrollgruppe. Allerdings waren alle Gruppen auch durch eine vergleichsweise hohe Streuung gekennzeichnet. Die Ergebnisse deuten darauf hin, dass eine Infektion das VOC-Profil am Sensor beeinflussen kann, auch wenn das Sensorsystem auf Grund seiner Integrationsmessung keine spezifische Differenzierung einzelner Verbindungen erlaubt. Die Ergebnisse des Feldversuchs zeigen umso deutlicher, dass ein spezifischer Sensor mit höherer Sensitivität benötigt wird, um die Unterschiede klarer zu erfassen. Nur so können VOC-Emissionen im niedrigen Konzentrationsbereichen unter realen Bedingungen klar detektiert und bewertet werden. Darüber hinaus zeigte sich, dass die Messdauer an einem einzelnen Messpunkt sorgfältig abgewogen werden muss: Einerseits ist eine möglichst kurze Verweildauer aus Gründen der Praxistauglichkeit und Effizienz wünschenswert, andererseits unterliegen die Messsignale äußeren Einflüssen (bspw. Wind, Temperaturgradienten, Sonneneinstrahlung), weshalb eine ausreichend lange Erfassungszeit notwendig ist, um ein stabiles und valides Signal zu gewährleisten. Zur Erhöhung der Messpräzision wird der Einsatz eines aktiven Probenahmesystems empfohlen, das einen konstanten und gerichteten Messluftstrom zum Sensor führt. Dies könnte Schwankungen reduzieren und die Signalqualität verbessern. Gleichzeitig ergibt sich daraus jedoch eine neue Herausforderung, da der zusätzliche Energiebedarf für den Betrieb einer Pumpe o.ä. die verfügbare Gesamtmesszeit einschränken würde. Dies müsste bei der Systemauslegung entsprechend berücksichtigt werden.

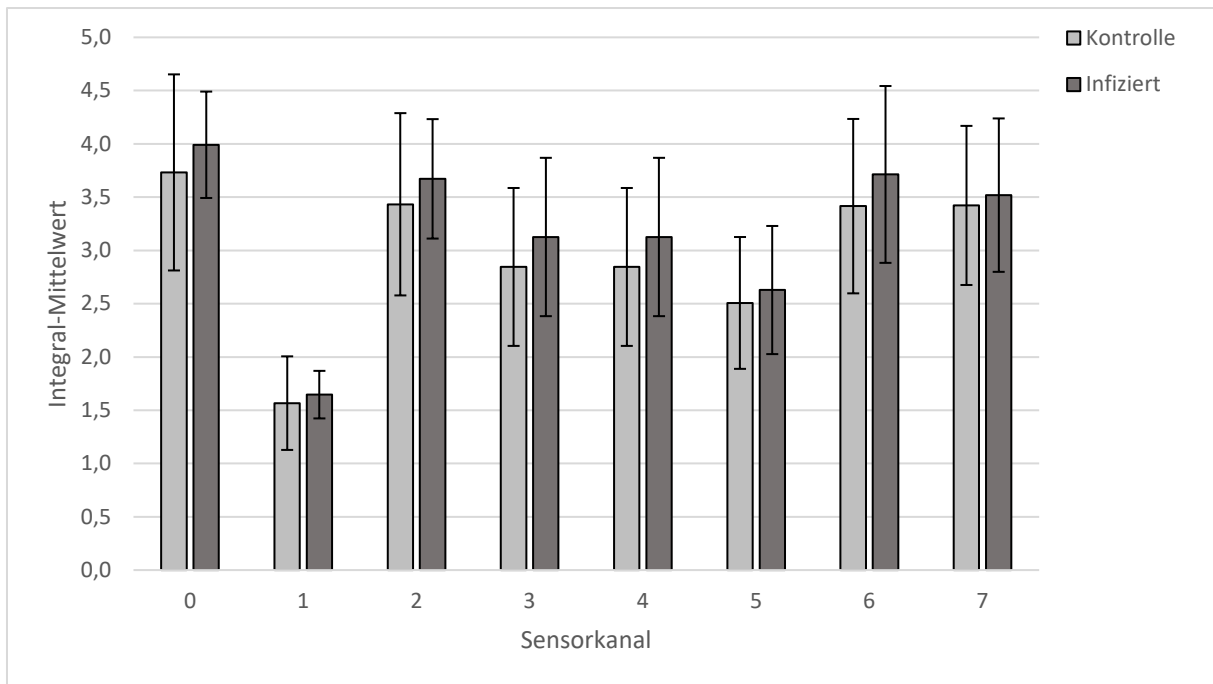


Abb. 10 (oben). Ergebnisse der Gasmessungen mittels Bosch Gassensor BME680 zwischen gesunden (Kontrolle) und mit Braunrost befallenden Roggenbeständen.



Abb. 11 (links). Integration eines Bosch Gassensor BME680 in das bestehende Probenahmesystems der Referenzanalytik: Luft wird von verschiedenen Messpunkten im Feld jeweils über Schläuche und mittels batteriebetriebener Gaspumpen kontinuierlich durch einen Glasbehälter mit eingebetteten Bosch Gassensor geleitet, welcher den Luftstrom misst.

2.10 Fazit

Das Teilprojekt C des AgriNose-Projektes hatte zum Ziel, ein UAV-gestütztes optisches Monitoringsystem zur frühzeitigen Erkennung von Krankheiten in Winterroggenbestände durch eine elektronische Nase (VOC-Sensorik) zu ergänzen. Dabei wurden zum einen fernerkundliche (Multispektralmessungen) Untersuchungen durchgeführt und die Referenzanalytik mittels GCMS verwendet sowie für den Einsatz im Freiland weiterentwickelt. Die Ergebnisse zeigten, dass die Kombination der Fernerkundung und VOC-Detektion einen interessanten Ansatz für ein verbessertes Krankheitsmonitoring ermöglichen könnte, denn mehrjährige Feldversuche im Teilprojekt belegten, dass das Potenzial der UAV-Fernerkundung für das Monitoring von Pflanzenkrankheiten eingeschränkt ist. Aufgrund erhöhter Trockenheit, trat im ersten Projektjahr vermehrt Trockenstress im Roggenbestand auf. Dies beeinflusste die optische Erkennung des Braunrostbefalls so stark, dass eine Differenzierung zwischen erkrankten und gesunden Parzellen nicht möglich war. Dies gelang erst im darauffolgenden Projektjahr bei weitaus geringerer Trockenstresssituation aus den UAV Multispektraldaten. Somit schränken konkurrierende Stressfaktoren (z.B. Trockenheit, Nährstoffmangel) die spezifische Detektion von Krankheitsstress mittels UAV-Daten ein, sodass ergänzende Sensorik und Bodendaten für eine Diagnose beim Monitoring notwendig sind. Da eine einfache Entnahme von Gasproben im Feld aufgrund der auftretenden sehr geringen VOC-Konzentrationen bei gleichzeitig starker Umweltwirkung keine verwertbaren Daten liefern, wurde für die Analyse der VOC-Emissionen im Teilprojekt erstmals ein aktives Anreicherungsverfahren (SBSE) etabliert. Die SBSE-Methode steigert die Empfindlichkeit der GCMS-Analyse deutlich und ermöglichte erstmals die Identifikation spezifischer VOCs (z.B. 1,5-Hexandiol, 6,10,14-Trimethyl-2-Pentadecanon), die durch infizierte Pflanzen in höheren Mengen emittiert wurden. Dies belegt die Machbarkeit, den Braunrostbefall über charakteristische VOC-Profile frühzeitig zu erkennen. Mangels eines ausgereiften eNose-Prototyps wurde im dritten Jahr testweise ein kommerzieller MOx-Gassensor (BME680) mit aktivem Luftansaugsystem im Feld eingesetzt. Das Sensorsignal war in infizierten Parzellen tendenziell erhöht, jedoch verhinderten hohe Messwertstreuungen eine zuverlässige Differenzierung. Für eine verlässliche Früherkennung sind daher empfindlichere, selektivere Sensoren erforderlich, wie sie im Projekt angestrebt wurden. Dennoch zeigte der Feldtest die grundsätzliche Machbarkeit eines Echtzeit-VOC-Monitorings im Pflanzenbestand.

2.11 Wichtigste Positionen des zahlenmäßigen Nachweises

Die wichtigsten Positionen entfielen auf die Personalmittel. Wobei diese zum einen anteilig in eine PostDoc Stelle flossen, die fokussiert auf dem Thema der VOCs Bestimmung sowie anteilig in eine Doktorandenstelle, die fokussiert auf dem Thema des fernerkundlich-optischen Monitoring, gearbeitet haben. Des Weiteren wurden Mittel für wissenschaftliche Hilfskräfte benötigt, die unterstützend bei der Datenaufnahme und -aufbereitung die Feldversuche und Versuchsauswertung begleitet haben. Weitere wichtige Positionen waren die Anschaffung der Felddatenlogger zur Bestimmung des Mikroklimas im Pflanzenbestand sowie Verbrauchsmittel für GC/MS und UAV Plattform. Außerdem wurden Reisemittel genutzt vordergründig zur Teilnahme der Konferenz: „14th European conference on precision agriculture“ in Bologna, Italien (ECPA 2023) sowie zur Teilnahme an Projekttreffen.

2.12 Notwendigkeit und Angemessenheit der geleisteten Arbeit

Die Diagnose von Pflanzenkrankheiten im Ackerbau stützt sich überwiegend auf manuelle Bonituren oder die visuelle Erkennung im Feld, was jedoch arbeitsintensiv und zum Teil subjektiv ist. Eine automatisierte und frühzeitige Erkennung über sensorbasierte Verfahren ist daher notwendig, um effizient und gezielt Pflanzenschutzmaßnahmen ergreifen zu können. Bisherige Monitoringansätze mit Drohnen liefern zwar allgemeine vegetationsphysiologische Informationen, können jedoch Stressursachen – etwa durch Trockenheit oder Krankheit – nicht sicher voneinander abgrenzen. Das Projekt AgriNose adressierte diese Herausforderung durch das Ziel eine elektronische Nase in ein bestehendes fernerkundlich-optisches Monitoringsystem zu integrieren. Die Kombination der Fernerkundung mit spezifischen Emissionsprofilen flüchtiger organischer Verbindungen (VOCs) ist angemessen, um eine wesentliche technologische Weiterentwicklung der bisherigen Monitoringansätze zu erreichen. Die systematische Erfassung und Charakterisierung von VOCs im Labor und im Freiland sowie deren zeitliche Entwicklung im Krankheitsverlauf zeigten, dass bestimmte Marker-VOCs mit einer Braunrostinfektion assoziiert sind. Eine elektronische Nase könnte somit ein wichtiges Werkzeug zur spezifischen und frühzeitigen Detektion für Pflanzenkrankheiten sein. Durch die Entwicklung geeigneter Messmethoden zur VOCs Bestimmung über GC/MS (z. B. SBSE) im Feldeinsatz in Kombination mit einem sensorgestützten Luftstromsystem wurden Ansätze geschaffen, eine elektronische Nase in ein praktisches Monitoringsystem zu integrieren. Dabei entsprechen die im Projekt durchgeführten Arbeiten auch dem politisch motivierten Ziel der Reduktion des Pflanzenschutzmitteleinsatzes– wie es u. a. in der EU-Biodiversitätsstrategie 2030 formuliert ist. Wir sehen zudem ein hohes Transferpotenzial für weitere Kulturarten und Pilzkrankheiten.

2.13 Voraussichtlicher Nutzen, insbesondere der Verwertbarkeit des Ergebnisses im Sinne des fortgeschriebenen Verwertungsplans

Im Rahmen des Teilprojektes entstand eine Masterarbeit von Nele Handtke zur Unterscheidung des Stressverhaltens im Winterroggenbestand mit UAV Fernerkundung in Zusammenarbeit mit der Berliner Hochschule für Technik (BHT). Die Ergebnisse des Projekts fließen in Teilen in die Vorlesung Technologien in der Präzisionslandwirtschaft an der MLU Halle mit ein. Ergebnisse des Teilprojekts wurden zudem auf einem Fachtransfertreffen beim GC/MS Forum in Berlin verwertet.

Aus den mehrjährigen Feldversuchen sollen zwei Veröffentlichungen hervorgehen: Die erste mit dem Fokus auf das fernerkundlich-optische Monitoring von Pilzkrankheiten im Winterroggen, die zweite auf die Charakterisierung flüchtiger organischer Verbindungen

(VOCs) in Winterroggenbeständen, die von Braunrost befallen sind. Auf der Basis erster Projektergebnisse wurde bereits im Juni 2023 ein EIC Pathfinder Antrag gestellt, der jedoch leider trotz sehr guter Score-Werte, die alle oberhalb des Grenzwertes für die Förderung lagen, nicht gefördert wird. Im Konsortium ist eine weitere Antragstellung in Planung, um die gemeinsamen Arbeiten fortzuführen.

2.14 Während der Durchführung des Vorhabens dem Zuwendungsempfänger bekannt gewordener Fortschritt auf dem Gebiet des Vorhabens bei anderen Stellen

Nach unserem Wissen sind keine neuen F&E-Ergebnisse veröffentlicht worden, die eine Bestimmung von Pilzkrankheiten mit elektronischen Nasen derzeit ermöglicht.

2.15 Erfolgte oder geplante Veröffentlichungen der Ergebnisse

Hobart, M.; Giebel, A.; Schirrmann, M. (2023): Plant health assessment with thermal and multi-spectral UAV imagery in winter rye crops. In: Stafford, J.(eds.): Precision Agriculture '23, Papers presented at the 14th European Conference on Precision Agriculture. 14th European Conference on Precision Agriculture (ECPA 2023). Wageningen Academic Publishers, Wageningen, p. 917-924.

Geplant:

Rux, Schirrmann et al. (2026). Identification and Characterization of Novel Volatile Biomarkers Emitted by Winter Rye (*Secale cereale*). Crop Science.

Rux, Schirrmann et al. (2026). Integration of reference analytics with FPE components for automated GC-MS analysis of BVOC emissions from winter rye under field conditions. Landtechnik.

Schirrmann, Rux et al. (2026). Disentangling Disease and Drought: Challenges in UAV-based Spectral Detection of Fungal Infections in Winter Rye, Computers and Electronics in Agriculture