

Abschlussbericht

Entwicklung eines optischen Verfahrens zur Diagnostik von Pathogenen in Obstplantagen

– ApfelPathosensor –



Januar 2023

Europäischer Landwirtschaftsfonds für die Entwicklung des ländlichen Raums:
Hier investiert Europa in die ländlichen Gebiete unter Beteiligung des Landes Nordrhein-Westfalen



Ministerium für Landwirtschaft
und Verbraucherschutz
des Landes Nordrhein-Westfalen



Inhaltsverzeichnis

A Kurzdarstellung (in Alltagssprache)	1
I. Ausgangssituation und Bedarf	1
II. Projektziel und konkrete Aufgabenstellung	2
III. Mitglieder der OG	2
IV. Projektgebiet	4
V. Projektlaufzeit und -dauer	5
VI. Budget	5
VII. Ablauf des Vorhabens	5
VIII. Zusammenfassung der Ergebnisse	8
B Eingehende Darstellung	10
I. Verwendung der Zuwendung	10
II. Detaillierte Erläuterung der Situation zu Projektbeginn	10
III. Ergebnisse der OG-Arbeit	12
IV. Ergebnisse des Innovationsprojektes	13
V. Nutzen der Ergebnisse für die Praxis	36
VI. (Geplante) Verwertung und Nutzung der Ergebnisse	37
VII. Wirtschaftliche und wissenschaftliche Anschlussfähigkeit	37
VIII. Wo relevant: Nutzung Innovationsdienstleister (IDL)	38
IX. Kommunikations- und Disseminationskonzept	38

A Kurzdarstellung (in Alltagssprache)

I. Ausgangssituation und Bedarf

In einer modernen Landwirtschaft sollte die Produktion ausreichender Mengen hochwertigen Lebensmitteln bei minimalem Pflanzenschutzmitteleinsatz im Vordergrund stehen, wie es die Prinzipien des Integrierten Pflanzenbaus fordern. Nach diesen Grundsätzen sollten Pflanzenschutzmittel idealerweise nur dann eingesetzt werden, wenn ein Befall auftritt und signifikante Ertragseinbußen drohen. Zusätzlich würde ein gezielter Einsatz von Pflanzenschutzmitteln zu einem Zeitpunkt in der Entwicklung eines Krankheitserregers, der für dessen Ausbreitung wesentlich ist, einen hohen Wirkungsgrad erzielen. Somit würde es möglich, die Aufwandmengen eines Mittels bei einem geringen Resistenzrisiko zu reduzieren und so Agrarprodukte nachhaltig herzustellen. Für die Vorhersage eines optimalen Behandlungszeitraum, würde ein digitales System, welches das Auftreten von Krankheitserregern direkt vor Ort autonom bestimmen und auswerten kann, ein wichtiger Baustein sein und die Ziele des integrierten Pflanzenschutzes nachhaltig unterstützen. Bisher fehlen solche Systeme, die einerseits kostengünstig sind, um einen großflächigen Einsatz zu ermöglichen und andererseits zuverlässig genug sind, um Fehldiagnosen auszuschließen.

Die derzeit auf dem Markt befindlichen Hilfsmittel zur Ermittlung eines optimalen Behandlungszeitpunkts zur Krankheitsprävention bei Nutzpflanzen sind zum einen Messvorrichtungen zur Bestimmung der Sporenkonzentration in der Luft, so genannte Sporenfallen, und zum anderen Prognose- und Simulationsmodelle. Mit den heutigen Sporenfallen kann der Sporenflug nicht direkt bestimmt werden. Vielmehr wird hier kontinuierlich oder in Intervallen ein Luftstrom eingesogen und die Sporen fixiert, später erfolgt eine manuelle Auswertung des Sporenflugs am Mikroskop. Dazu werden aus den Sporensammlern in Abständen von mehreren Tagen Trägerplatten oder Haftstreifen entnommen und auf Sporen untersucht. Dieses Verfahren dient eher der allgemeinen Vorhersage des zu erwartenden Sporenflugs, basierend auf Analysedaten der Vergangenheit. Zusätzlich werden die Daten zur Optimierung von Algorithmen für Prognose- und Simulationsmodelle als konkrete Behandlungsempfehlungen verwendet. Den Landwirt*innen stehen heute verschiedene dieser Prognose- und Simulationsmodelle zur Verfügung. Diese Warnsysteme berechnen anhand von Wetterdaten und spezifischen Algorithmen die Risiken für einen Sporenflug und für mögliche Infektionen. Die Genauigkeit solcher Systeme hängt stark von der Qualität der Wetterdaten und -prognosen ab, berücksichtigt aber nicht den aktuellen Sporenflug.

Von großer Bedeutung für den Apfelanbau ist die Überwachung der Belastung der Luft mit Sporen von *Venturia inaequalis*. Die durch diesen Erreger verursachte Krankheit (Apfelschorf) führt zu massiven Ertragseinbußen und ist die weltweit bedeutendste Obstkrankheit. Der Bedarf eines frühzeitigen Erkennens des Schaderregers ist

besonders wichtig, damit eine gezielte Bekämpfung der Sporen erfolgen kann und dient damit der nachhaltigen Produktion von Äpfeln.

II. Projektziel und konkrete Aufgabenstellung

Das Ziel dieses Projektes war die Entwicklung eines elektronischen Warnsystems mit automatisierter Diagnose von *Venturia inaequalis*, dem Erreger des Apfelschorfs, der weltweit wichtigsten Obsterkrankung. Die innovative Idee war, ein Gerät zu entwickeln, das in Plantagen autonom Sporen ansaugt, diese mikroskopiert, mittels maschinellen Lernens die Schorfsporen identifiziert und zählt und das Ergebnis für eine weitere Verarbeitung übermittelt - der „ApfelPathosensor“. Danach soll eine Software mit zusätzlichen Informationen, unter anderem dem lokalen Wetter, das Infektionsrisiko errechnen und detaillierte Empfehlungen für Obstanbauern zur frühzeitigen, wirkungsoptimierten Bekämpfung der Krankheit erstellen.

Die Aufgaben in dem Projekt lassen sich in drei Themengebiete aufteilen:

1. Planung, Entwicklung und Bau eines Pathosensors.
2. Bereitstellung von Sporenmateriale zur Entwicklung und zum Training einer Software zum maschinellen Lernen, für das selbstständige Erkennen von Apfelschorfsporen.
3. Programmierung eines Softwaretools, das die Ergebnisse des Pathosensors und des nachgelagerten maschinellen Lernens mit weiteren Daten zusammenführt und daraus eine Empfehlung zur Behandlung generiert.

Die Innovation in diesem Projekt wird die Erfassung des tatsächlichen Sporenflugs in Plantagen, nahezu in Echtzeit und die automatische Zusammenführung dieser Information mit einem Simulationsmodell sein. Bei Infektionsgefahr soll direkt eine Behandlungsempfehlung ausgelöst und proaktiv an die Anwender*innen gesendet werden, so dass wichtige Pflanzenschutzmaßnahmen zeitnah durchgeführt werden können. Ziel ist es, dass weder bei Infektionswetter ohne Sporenflug noch bei Sporenflug ohne Infektionswetter Behandlungen durchgeführt werden. Am Beispiel der Apfelschorferkrankung sollte gezeigt werden, dass durch eine Kombination aus der Bestimmung des Sporenflugs und dem Infektionswetter eine effiziente Bekämpfung von Pflanzenkrankheiten bei reduziertem Pflanzenschutzmitteleinsatz möglich ist.

III. Mitglieder der OG

Die Operationelle Gruppe (OG) setzte sich aus der Firma amagrar GmbH, einer wissenschaftlichen Arbeitsgruppe der RWTH Aachen University und sechs Obstbaubetrieben zusammen.

Im Einzelnen handelte es sich um folgende OG-Mitglieder:

amagrar GmbH - Beratungsunternehmen für Integrierten Pflanzenschutz. Die amagrar GmbH wurde als ein Diagnose-, Monitoring- und Beratungssystem aufgebaut, mit dem Landwirt*innen ihren Einsatz von Pflanzenschutzmitteln deutlich reduzieren und gleichzeitig ihre Erträge steigern können. Zusammen mit Partnern aus Forschung und Industrie bemüht sich die amagrar GmbH die Entwicklung hin zu einer umweltverträglicheren Landwirtschaft mitzugestalten. Die amagrar GmbH entwickelt seit Jahren innovative Systeme, um die hohen Anforderungen an einen wirtschaftlichen Pflanzenbau mit umweltpolitischen Forderungen weitgehend in Einklang zu bringen. Dazu gehört unter anderem die Entwicklung der Software *amagrar* zum umweltschonenden Einsatz von Pflanzenschutzmitteln. Die amagrar GmbH übernimmt die Leadfunktion im vorliegenden Projekt.

RWTH Aachen University, Institut für Biologie III, RiBa-Lab – Molekularbiologisches Labor zur Erforschung von Wirt-Parasit-Beziehungen, Ausstattung zur Kultivierung und zum Umgang mit Pathogenen und deren Wirtspflanzen, histochemische und genetische Untersuchungen zum Auftreten von Pathogenen und deren Bekämpfung; langjährige und erfolgreiche Tätigkeiten in verschiedenen Verbundprojekten des BMBF und BMEV (z.T. lead-funktion).

Obsthof Brünagel – Der Obsthof Brünagel ist seit drei Generationen im Obstanbau tätig und auf Stein- und Kernobst spezialisiert. Seit über zehn Jahren produziert die Familie nach den Richtlinien des Integrierten Pflanzenschutzes. Ganz bewusst arbeiten Sie schon heute mit Sporenfallen und Schorfwarngeräten zur Pilzbekämpfung.

Obstplantage Clostermann – Tradition und gelebte Moderne kennzeichnen seit Generationen die Geschichte des Hofbetrieb Clostermann. Die niederrheinische Obstbauernfamilie bewirtschaftet ca. 20 ha biologisch-dynamisch nach den Richtlinien von Demeter. Als "Demonstrationsbetrieb Ökologischer Landbau" öffnet sie regelmäßig Türen und Tore für Besucher. Bei Ihnen stehen der Apfel und verschiedene Produkte, die daraus gewonnen werden, im Mittelpunkt.

Obstbau Knein – Der Betrieb liegt in der Voreifel in Nideggen. Zum Hof gehört neben den eigenen Obstbäumen auch eine Baumschule. Im Hofladen können Obst und Natursäfte gekauft werden. Die Bewirtschaftung erfolgt nach Bioland-Richtlinien.

Obstplantagen Krämer – Die Obstplantagen vom Betrieb Krämer liegen in Meckenheim, südlich von Bonn. Die Familie wirtschaftet auf insgesamt ca. 20 ha Land. Der Betrieb wurde im Jahr 2001, mit dem Generationenwechsel, auf die biologische Produktion umgestellt. Sie arbeiten nach den Demeter-Richtlinien.

Naturhof Wolfsberg – Der Familienbetrieb liegt in einem Tal am Naturpark Kottenforst vor den Toren Bonns. Sie bewirtschaften einen 30 ha großen Kernobstbetrieb nach Naturland-Richtlinien. Das Obst vermarkten sie zum einen über den eigenen Hofladen und zum anderen über den eigenen Vertrieb, die RheinBioFrucht.

Geschwister Roosen – Die Geschwister Roosen bewirtschaften einen Betrieb in Baesweiler-Beggendorf in konventioneller Landwirtschaft. In Ihrem Hofladen findet sich sowohl Kern- und Beerenobst als auch Spargel und Kartoffeln. Sie beschicken Wochenmärkte in der Region.

IV. Projektgebiet

Das Projektgebiet erstreckte sich vom Niederrhein bei Wesel über die Städtereion Aachen und die Voreifel bis hin an die Grenze zu Rheinland-Pfalz in die Obstanbauregion rund um Bonn und Meckenheim.

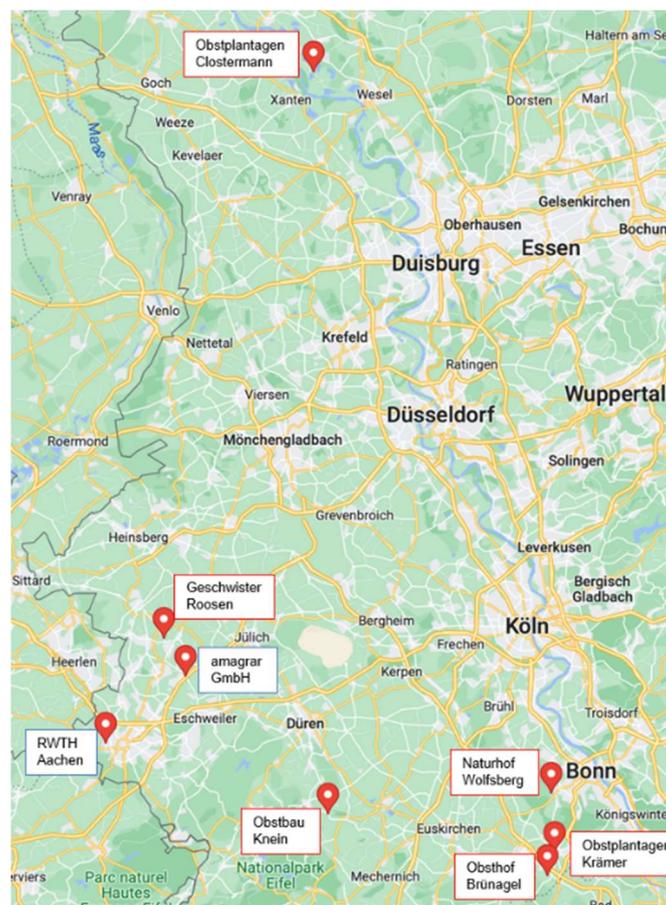


Abbildung 1. Ausschnitt einer Landkarte im westlichen Nordrhein-Westfalen, zwischen dem Niederrhein bei Wesel, der Aachener Region und Meckenheim. Auf der Karte sind die Standorte der acht OG-Partner gekennzeichnet.

V. Projektlaufzeit und -dauer

Beantragt und geplant war eine Projektlaufzeit vom 01.01.2020 bis zum 31.12.2022. Das Projekt startete unter einem vorzeitigen Maßnahmenbeginn am 14.02.2020. Der offizielle Bescheid wurde am 30.04.2020 ausgestellt.

Da die Operationelle Gruppe nicht alle Arbeiten selbst leisten konnte, wurde unter Vorbehalt einer Bewilligung zeitnah nach Gewährung des Antrags auf vorzeitigen Maßnahmenbeginn mit der Suche nach externen Partnern begonnen. Das Vergabeverfahren für die externen Projektanteile nahm einige Zeit in Anspruch, so dass das komplette Team, inklusive zweier weiterer Partner, am 30.06.2020 feststand.

VI. Budget

Das Budget wurde in folgenden Positionen und Höhe zum Projektbeginn bewilligt:

Gesamtkosten der Maßnahme **425.015,37 €**

Zusammenarbeit in der Operationellen Gruppe:

Personalkosten OG, inkl. Gemeinkostenpauschale 92.0901,60 €

Durchführung des Innovationsprojektes:

Personalkosten 115.752,00 €

Aufwandsentschädigungen 73.626,00 €

Fremdaufträge 134.480,00 €

Reisekosten 4.652,40 €

Material- und Sachkosten 2.740,29 €

Geringfügige Investitionen 863,08 €

Davon in Anspruch genommen (Stand Dez. 2022) **331.767,06 €**

VII. Ablauf des Vorhabens

Das Vorhaben lässt sich in sechs Arbeitspakete gliedern. Bei den Arbeitspaketen eins bis fünf handelt es sich ausschließlich um Arbeiten im Innovationsprojekt. Das Arbeitspaket sechs beschreibt hauptsächlich die Koordination und die Zusammenarbeit innerhalb der Operationellen Gruppe und die Außendarstellung bzw. Öffentlichkeitsarbeit. Im folgenden Netzplan sind die Abfolge und Abhängigkeiten der Arbeitspakete untereinander schematisch dargestellt.

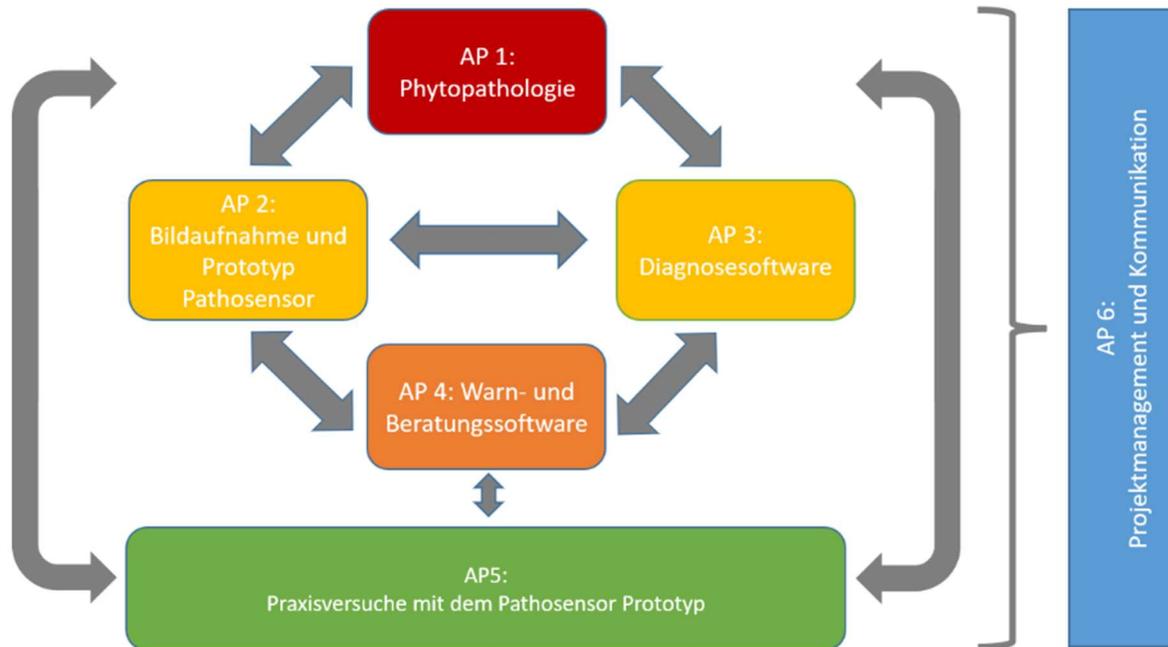


Abbildung 2. Netzplan der Arbeiten zum ApfelPathosensor Projekt.

Arbeitspaket 1 **Phytopathologie**

Die Identifikation und Gewinnung von Asco- und Konidiosporen von *Venturia inaequalis* bildeten die Basis für dieses Arbeitspaket. Ihre Gewinnung aus infizierten Apfelblättern des jeweiligen Vorjahres und des aktuellen Jahres dienten dem Anlernen der Software zum maschinellen Lernen, einem Teilaspekt von „Künstlicher Intelligenz“ (KI).

Es wurden Dauerpräparate mit Sporenmaterial angefertigt, um standardisierte Vergleichspräparate für die Tests in Arbeitspaket 2 und 3 zu haben. Das infizierte Material wurde parallel genutzt, um in natürlicher Umgebung mit klassischen Methoden die Apfelschorfprognose über die *amagrar* Software und die Detektion mit dem Prototyp des Pathosensors zu verifizieren. Die Arbeiten mit dem Probenmaterial wurden für den Praxiseinsatz standardisiert. Für eine einheitliche Klassifizierung der Sporen im Labor wurden ein Histogramm und eine Bestimmungshilfe erstellt.

Arbeitspaket 2 **Bildaufnahme und Prototyp Pathosensor**

Zu Beginn der Entwicklung des Prototypen wurden die Minimalanforderungen an die Bildaufnahme im Pathosensor ermittelt, sowie Aufnahmen von Bildern für die Softwareentwicklung mit Hilfe eines Teststandes anhand von Sporenproben (AP1) erstellt. Dabei wurden verschiedene Bildaufnahmekomponenten getestet. Über mehrere Schritte konnte die geeignete Technik für die Bildaufnahme im Pathosensor

Prototyp identifiziert werden. Aufgrund von Lieferschwierigkeiten und einem starken Preisanstieg, ausgelöst durch die Coronapandemie und dem nachfolgenden Einbruch internationaler Lieferketten, mussten bereits als ideal getestete Komponenten wiederholt gegen andere, in der Projektlaufzeit lieferbare und preislich realistischere, ausgetauscht werden. Parallel dazu wurden das Pathosensorgehäuse und der Sporensammler entwickelt. In Labortests wurden verschiedene Flächen und Materialien für die Anhaftung des Sporenmaterials getestet. Anschließend wurde eine Möglichkeit entwickelt diese im Pathosensor für die Bildaufnahmen optimal zu platzieren.

Arbeitspaket 3 **Diagnosesoftware**

Auf den im Labor unter optimalen Bedingungen und vom Pathosensor aus AP 2 generierten zahlreichen mikroskopischen Bildern wurden manuell Ascosporen von Apfelschorf markiert (Labeln) und so über die Zeit eine immer umfangreichere Bilddatenbank aufgebaut. Insgesamt wurde ein Softwarepaket erstellt, bestehend aus der Bilddatenbank, Bildannotationswerkzeugen sowie Bildsegmentierungsverfahren, die mit Hilfe maschinellen Lernens die Sporen selbstständig in den Bildern identifizieren, zählen und vermessen kann. Die entsprechende Software wurde entwickelt und programmiert.

Arbeitspaket 4 **Warn- und Beratungssoftware**

Die Sporenflugdaten (AP 3) wurden in diesem Arbeitspaket mit Wetter- und Bestandesdaten der Obstanbauflächen kombiniert und zu einem funktionstüchtigen, anwenderfreundlichen Software-Tool mit einer übersichtlichen Anzeigentafel (Dashboard) entwickelt. Die Programmierung einer Applikation (App) für mobile Endgeräte ermöglicht den Nutzer*innen auch unterwegs im Arbeitsalltag jederzeit den Überblick über die Pflanzengesundheit in ihren Plantagen zu behalten und die wichtigen Behandlungsempfehlungen zeitnah zu erhalten.

Arbeitspaket 5 **Praxisversuche mit dem Pathosensor Prototyp**

Im Arbeitspaket 5 sollte der Praxiseinsatz des Pathosensors mit dazugehöriger Beratungssoftware entwickelt und validiert werden. Es war geplant dabei die saisonalen Arbeitsabläufe der beteiligten konventionell und ökologisch wirtschaftenden Betriebe zu berücksichtigen. Dies konnte aufgrund der Coronapandemie und der darauf folgenden Lieferprobleme nicht erreicht werden. Es

wurde ein Businessplans mit Marktanalyse für die Erstellung eines innovativen Konzeptes auf Basis der in diesem Projekt entwickelten Pathosensors angefertigt.

Arbeitspaket 6 **Projektmanagement und Kommunikation**

Im letzten Arbeitspaket stand sowohl die Koordination der Arbeiten, der Firmen und der Mitarbeiter*innen als auch die Öffentlichkeitsarbeit im Vordergrund. Das Projekt wurde bei verschiedenen Onlinekonferenzen und im abschließenden Projektjahr auch in Präsenz stattfindenden Veranstaltungen vertreten und präsentiert. Es wurde ein Artikel in einer Fachzeitschrift für Obstanbau veröffentlicht (gartenbauprofi 05/2022) und eine Internetseite mit einem Blog (<https://www.amagrar.com/apfelpathosensor/>) eingerichtet. Dort wurden im Verlauf des Projektes diverse Blogeinträge veröffentlicht.

VIII. Zusammenfassung der Ergebnisse

Aufgrund der Coronapandemie und den teilweise monatelangen Schließungen wichtiger Märkte und Häfen in Asien kam es zwischenzeitlich zu massiven Lieferschwierigkeiten verschiedener technischer und optischer Komponenten für den Bau der Prototypen. Dieses führte dazu, dass mehrfach umgeplant werden musste und die Erprobung der Prototypen auf Praxisflächen nicht wie geplant durchgeführt werden konnte. Diese Arbeiten wurden so gut wie möglich durch Versuche im Labor und im Freiland an der RWTH und bei der amagrar GmbH kompensiert. Zum Ende des Projektes standen die Prototypen mit der Gesamtausstattung allerdings fest. Die ApfelPathosensoren sind insgesamt deutlich größer als die bisher auf dem Markt befindlichen reinen Sporensammler, sie haben aber auch wesentlich umfangreichere Aufgaben zu erfüllen.

Die ApfelPathosensoren enthalten neben der Steuerung für das Einsaugen des Luftstroms alle erforderlichen Komponenten für mikroskopische Bildaufnahmen (Optik, Lichtquelle, Kamera, motorgetriebene Fokussiereinstellung des Objektivs), einen in zwei Dimensionen beweglichen Achsentisch mit einer Aufnahmemöglichkeit für mehrere Haftflächen für Sporenmaterial und einen Kleinstcomputer. Dieser ist ausgestattet mit einer über viele Iterationsschritte angelernten Software, die mittels maschinellen Lernens die typischen Sporen von *Venturia inaequalis* selbstständig identifizieren und zählen kann.

Die Ergebnisse der Messungen aus den ApfelPathosensoren werden in Form von stündlichen Datensätzen auf einen Server übertragen. Zur weiteren Verarbeitung werden diese Daten über eine Programmierschnittstelle (API = Application Programming Interface), in eine Datenbank des *amagrar* Expertensystem übertragen.

Parallel zu den Arbeiten am ApfelPathosensor wurde für die Nutzer*innen eine Anzeigentafel (Dashboard) für die stationäre Anwendung am PC und eine Web-App zum mobilen Einsatz am Smartphone als Erweiterung der *amagrar* Software, einem Prognose- und Simulationsmodell mit Empfehlungsmodul für den Einsatz von Pflanzenschutzmitteln, entwickelt. Die Nutzer*innen können hier Ihre Apfelplantagen virtuell anlegen, Behandlungsempfehlungen einsehen und Rückmeldungen von Fungizidmaßnahmen eintragen. Sie erhalten im Dashboard alle wichtigen Informationen zum gemessenen Sporenflug, zu wichtigen Wetterdaten und zum berechneten Infektionsrisiko. Alles wurde übersichtlich und benutzerfreundlich gestaltet.

B Eingehende Darstellung

I. Verwendung der Zuwendung

Siehe Formulare zum Schluss-Verwendungsnachweis und hier im Speziellen die Belegliste (Formular B).

II. Detaillierte Erläuterung der Situation zu Projektbeginn

Ausgangssituation

Apfelschorf gilt als die weltweit bedeutendste Obstkrankheit. Das Auftreten von *Venturia inaequalis*, dem Erreger dieser Krankheit führt zu massiven Ertragseinbußen. Von zentraler Bedeutung für den Apfelanbau ist daher das frühzeitige Erfassen der Ausbreitung von *Venturia inaequalis* Sporen und der punktgenaue Einsatz von Pflanzenschutzmitteln.

Der Lebenszyklus des Apfelschorf-Erregers kann innerhalb einer Anbausaison in zwei Phasen gegliedert werden. Die Primärinfektion im Frühjahr wird über das Ausschleudern von sogenannten Wintersporen (Ascosporen) aus pilzlichen Überdauerungsorganen verursacht. Diese reifen auf dem Falllaub aus dem Vorjahr heran. Bei optimalen Bedingungen und ausreichender Feuchtigkeit platzen die Überdauerungsorgane auf und entlassen die Sporen. Diese können mit dem Wind über sehr große Distanzen hinweg verbreitet werden und führen zu einer starken räumlichen Ausbreitung des Krankheitserregers. Die Primärinfektion erfolgt in der Regel zwischen März und Juni. Eine Sekundärinfektion über Sommersporen (Konidiosporen) kann dann im weiteren Saisonverlauf nur nach einer erfolgreichen Erstinfektion stattfinden. Sommersporen reifen, im Gegensatz zu den Wintersporen, sehr schnell heran und werden in Massen produziert. Sie sind größer und schwerer. Ihre Ausbreitung begrenzt sich auf einen engen Raum, innerhalb eines oder weniger Bäume einer Plantage. Damit es nicht zur Bildung der Sommersporen und damit einer epidemischen Ausbreitung kommt, ist die Bekämpfung der Wintersporen ein enorm wichtiger Baustein. Gelingt es die Gefahr von Erstinfektionen zu Beginn des Wintersporenflugs im Frühjahr sicher zu erfassen und umgehend Behandlungen durchzuführen, dann bleiben die Apfelplantagen das ganze Jahr über weitestgehend befallsfrei, da die Bildung und die starke Ausbreitung über Konidiosporen nicht erfolgen kann und ein Sporeneintrag von außerhalb ist später im Jahr nicht mehr möglich.

Zur erfolgreichen Bekämpfung des Apfelschorfs sind in einer Anbausaison zahlreiche Pflanzenschutzmaßnahmen erforderlich. Den Anbauer*innen stehen hierbei verschiedene Methoden für die Unterstützung bei der Entscheidung „Pflanzenschutzmaßnahme ist aktuell erforderlich“ zur Verfügung. Neben

Empfehlungen durch Berater oder offizielle Stellen stehen Ihnen heute bereits Möglichkeiten zur Bestimmung des Sporenflugs und eines Infektionsrisikos zur Verfügung. Es gibt mehrere Anbieter von Sporenfallen mit Sammelvorrichtungen. Bei diesen Geräten wird kontinuierlich ein Luftstrom eingesogen. Anschließend erfolgt eine manuelle Auswertung des Sporenflugs am Mikroskop. Dazu werden aus den Sporensammlern in Abständen von mehreren Tagen Trägerplatten entnommen und am Mikroskop analysiert. Diese Methode ist zeitaufwändig, erfordert ein geschultes Personal und kann nicht den aktuellen Sporenflug angeben, weil die Trägerplatten im Abstand von mehreren Tagen entnommen und bestimmt werden. Diese Art der allgemeinen Vorhersage des Sporenflugs wird daher eher von zentralen Stellen (Beratung) übernommen und dient meist der Optimierung der Algorithmen von Prognose- und Simulationsmodellen. Auf dem Markt gibt es einige Anbieter von Prognose- und Simulationsmodellen. Allen gemeinsam ist, dass diese Warnsysteme anhand von Wetterdaten und spezifischen Algorithmen die Risiken für den Sporenflug und mögliche Infektionen berechnen. Die Genauigkeit solcher Systeme hängt daher stark von der Qualität der Wetterdaten und -prognosen ab.

Projektaufgabenstellung

Damit Apfelplantagen vor einer Ausbreitung von Schorf nachhaltig geschützt werden können und dabei gleichzeitig die Ausbringung von Pflanzenschutzmitteln optimiert wird wäre es ideal, beide bisher auf dem Markt befindlichen Systeme (siehe Ausgangssituation) zusammenzubringen und zusätzlich die manuelle Auswertung des Sporenflugs zu automatisieren, um das Infektionsmaterial in nahezu Echtzeit zu erfassen. Diese Idee bildet die Grundlage für die Entwicklung des ApfelPathosensors.

Die innovative Idee dieses Projektes ist es, ein Gerät zu entwickeln, das in Obstplantagen autonom Sporen ansaugt, diese mikroskopiert, mittels maschinellen Lernens die Schorfsporen identifiziert und quantifiziert und das Ergebnis zur weiteren Verarbeitung an einen zentralen Server übermittelt. Daraufhin errechnet eine Warn- und Beratungssoftware mit zusätzlichen Informationen, wie dem lokalen Wetter, das Risiko von Infektionen und erstellt daraufhin eine detaillierte Empfehlung für den Obstanbauer zur frühzeitigen, wirkungsvollen Bekämpfung der Krankheit.

Die Erfassung des tatsächlichen Sporenflugs in der Plantage, nahezu in Echtzeit und die automatische Zusammenführung dieser Information mit einem Simulationsmodell mit anschließender proaktiver Beratungsausgabe bilden die Innovationen in diesem Projekt.

III. Ergebnisse der OG-Arbeit

Zusammenarbeit organisatorisch und praktisch

Die Mitglieder der Operationellen Gruppe (OG) standen bereits vor Antragstellung fest. Lediglich die externen Partner wurden über Vergabeverfahren erst zum Beginn der Projektlaufzeit gesucht. Die Zusammenarbeit aller OG-Partner hat sich aufgrund der besonderen Umstände einer weltweiten Pandemie von Anfang an schwieriger gestaltet als ursprünglich geplant. Persönliche Treffen wurden aufgrund der jeweils vorherrschenden Auflagen, Bestimmungen und der Ansteckungsgefahr auf ein Minimum reduziert, stattdessen fanden regelmäßige Onlinetreffen und ein reger Telefon- und E-Mail-Kontakt statt.

Insgesamt haben fünf Projekttreffen mit den OG-Partnern und unter Teilnahme einer Vertretung des Innovationsdienstleisters (IDL) stattgefunden, meistens auch unter Beteiligung der externen Partner. Dabei wurden stets die Arbeiten der letzten Monate präsentiert und Raum für Diskussionen und Besprechungen eingeräumt. Häufig entstanden neue Impulse, die für die weitere Umsetzung mitgenommen wurden.

Onlinetreffen in einer kleineren Konstellation, aus zeitlichen und organisatorischen Gründen ohne Beteiligung der Obstbauern und des Innovationsdienstleisters, fanden in einigen Projektphasen monatlich statt.

Die Zusammensetzung der Operationellen Gruppe hat sich im zweiten Jahr in einem geringem Rahmen verändert, von Seiten des Partners RWTH Aachen kam offiziell ein zweiter Mitarbeiter hinzu, welcher noch einmal neue Ansätze, Ideen und umfangreiches Wissen beisteuerte.

Mehrwert eines OG Formates

Der Mehrwert durch die Gründung einer Operationellen Gruppe wurde den Akteuren dieser OG im Verlauf des Projektes nicht deutlich. Sowohl der wirtschaftliche als auch der wissenschaftliche Partner hatten bereits vor diesem Projekt umfangreiche Erfahrungen bei der Bearbeitung von Forschungsprojekten. Auch ohne Gründung einer OG kam es bei diesen vorherigen Forschungsvorhaben zu einer guten Teambildung, die Ziele des jeweiligen Forschungsprojektes wurden erfolgreich umgesetzt und ein Produkt generiert. Eventuell ist die Gründung einer OG entscheidender, wenn die Idee aus den Reihen der landwirtschaftlichen Betriebe heraus erfolgt und z.B. die Gründung einer Erzeugergemeinschaft im Vordergrund steht, dieses ist hier nicht der Fall.

Um ein Projekt, inklusive der Gründung einer Operationellen Gruppe, auf ein solides Fundament zu bauen wäre es eventuell besser, wenn eine bestehende Gruppe eine gemeinsame Idee aus ihren Reihen entwickelt und schließlich die Idee für ein Projekt

entsteht. Das würde dazu führen, dass sich alle Projektpartner stärker mit dieser Idee und dem späteren Produkt identifizieren und aktiver am Projekt mitarbeiten. Die Idee zur Entwicklung eines ApfelPathosensors kam mit der amagrar GmbH vom einem Projektpartner aus der Wirtschaft. Dem wissenschaftlichen Partner und den beteiligten Obstbaubetrieben wurde die Idee als solches zunächst telefonisch und später bei einem Treffen vor Einreichung der Skizze präsentiert, an dem aber aus terminlichen Gründen auch nicht alle Partner teilnehmen konnten. Das ist, neben der ausgebliebenen Feldversuche, wahrscheinlich der entscheidende Grund, warum sich die Obstbaubetriebe daher nie vollständig mit der Projektidee identifiziert haben. Die OG Teilnehmer hatten sich erhofft, dass durch die Praxiserprobung der Prototypen wichtige Impulse für die Weiterentwicklung entstehen würden. Dies wurde jedoch durch die Coronapandemie und die nachfolgenden Lieferprobleme für Bauteile unmöglich gemacht.

Weitere Zusammenarbeit der Operationellen Gruppe nach Abschluss

Die Zusammenarbeit der OG-Partner war insgesamt gut, sie hat sich zum Ende der Projektlaufzeit allerdings etwas verschlechtert. Dieses ist sicherlich zum großen Teil auf die Durchführung von reinen Onlinetreffen und besonders auf die verzögerte Fertigstellung der Prototypen zurückzuführen. Das Projekt soll fortgesetzt werden, aber nicht unter Beteiligung aller Projektpartner. Der Schwerpunkt soll dann auf der Praxiserprobung und Verbesserung der Prototypen liegen, die aus o.g. Gründen nicht innerhalb der Projektlaufzeit durchgeführt werden konnten.

IV. Ergebnisse des Innovationsprojektes

Zielerreichung

Sporenfallen bzw. -sammler gibt es verschiedene auf dem Markt. Die Weiterentwicklung eines Sporensammlers hin zum Pathosensor, der mit einer ausgereiften Optik und maschinellem Lernen ausgestattet ist und vor Ort in der Obstplantage Sporen nahezu in Echtzeit identifiziert und quantifiziert, ist einzigartig. In Kombination mit einer Warn- und Beratungssoftware, die den optimalen Behandlungstermin vorhersagt, wurde mit diesem Projekt ein großer, innovativer Schritt bei der Digitalisierung im Obstanbau erreicht.

Abweichungen zwischen Projektplan und Ergebnissen

Bei den Arbeitspaketen 1, 2 und 4 gab es inhaltlich keine Abweichungen zum ursprünglichen Plan. Es mussten zum Teil zeitliche Anpassungen vorgenommen werden, dieses wurde häufig ausgelöst durch eine Verzahnung der Arbeiten im Gesamtprojekt und dadurch schlussendlich auch bei diesen Arbeitspaketen durch eine längere Wartezeit bei der Beschaffung von Material und dem verspäteten Bau der Prototypen, verursacht durch die Coronapandemie (siehe unten).

Der zeitweise Zusammenbruch der internationalen Lieferketten im Verlauf der Coronapandemie, insbesondere im Bereich Computertechnik führte zu einer schlechten Verfügbarkeit und einer deutlichen Verteuerung wichtiger Bauteile, dieses musste kompensiert werden, indem die Konstruktion des Pathosensors verändert wurde (Arbeitspaket 3). Hierbei kam dem Verzicht auf die Autonomie der Prototypen eine zentrale Rolle zu.

Entscheidende Abweichungen zu den geplanten Arbeiten gab es bei Arbeitspaket 5, hier wurden nicht alle Arbeiten vollumfänglich durchgeführt. Aufgrund der mehrmonatigen Lieferverzögerung konnten die Freilandversuche mit den Prototypen nicht wie geplant in den Jahren 2021 und 2022 unter Praxisbedingungen durchgeführt werden. Daher fehlen zum Projektende wichtige praktische Ergebnisse aus den ursprünglich geplanten Versuchen. Für weitere Informationen dazu siehe unter Projektverlauf, Arbeitspaket 5: Praxisversuche mit dem Pathosensor Prototyp.

Die fehlenden Praxisversuche wirkten sich entscheidend auf die Erstellung einer Ökobilanz und eines Businessplans aus, die auch Teil des Arbeitspakets 5 waren. Bei den geplanten Arbeiten hierzu ergaben sich folgende Änderungen:

1. Anpassung des Business Plans. Im ursprünglichen Projektplan war vorgesehen direkt Obstbauern und Genossenschaften etc. als potenzielle Kunden anzusprechen. Die Markteinführung wird sich deshalb um ein bis zwei Jahre verzögern. Jetzt soll die Markteinführung in zwei Schritten durchgeführt werden. So sollen zunächst Behörden, Ämter und Beratungsunternehmen als Kunden geworben werden, die die regionale Erfassung der Sporenbelastung für angegliederte Obstbauern als Dienstleistung erfassen und in Ihre Beratung einbauen. So können die „nicht-autonomen“ Pathosensoren der ersten Generation auf Versuchsgeländen mit passender technischer Infrastruktur aufgestellt werden. Erst nach Weiterentwicklung hin zu autonomen Systemen kann auch der Obstbauer als Kunde adressiert werden.
2. Die Erstellung der Ökobilanz konnte nur auf Basis von Literaturrecherchen und der Extrapolation auf das Komplettsystem (*amagrar* Expertensystem) vorgenommen werden. Die Verifizierung dieser Annahmen durch den Praxiseinsatz war nicht möglich. So wird die Ökobilanz erst im Nachgang der Praxisversuche 2023 um diesen Aspekt ergänzt werden können.

Im Projekt waren fünf Aufgaben mit wichtigen Meilensteinen eingeplant. Die folgende Tabelle führt die im Antrag geplanten Meilensteine auf und deren mögliche Zielerreichung an.

Tabelle 1. Projektaufgaben mit Meilensteinen und deren geplante und erreichte Umsetzung.

<i>Aufgaben mit Meilensteinen</i>	<i>Zielerreichung</i>
Bau von Funktionsprototypen und von technischen Prototypen aus den zuvor bestimmten Komponenten	Zwei Funktionsprototypen konnten mit einer Verzögerung von einigen Monaten gegenüber der ursprünglichen Planung im zweiten Projektjahr gebaut werden. Ein technischer Prototyp, ausgestattet mit allen zuvor ermittelten Komponenten, wurde zum Ende des Projektes gebaut. Weitere Exemplare werden voraussichtlich einige Wochen nach Projektende fertiggestellt.
Erstellen eines Diagnosemoduls bestehend aus einer digitalen Bildanalyse in Kombination mit maschinellem Lernen zur Identifikation von <i>Venturia</i> -Sporen	Das Diagnosemodul wurde innerhalb der ursprünglichen Zeitplanung erstellt und das maschinelle Lernen in mehreren iterativen Schritten angelehrt.
Entwicklung eines autonomen Softwaremoduls zur Berechnung von Behandlungsempfehlungen für konventionellen und ökologischen Apfelanbau auf Basis kombinierter Wetter- und Sporenflugdaten	Die Entwicklung des Softwaremoduls inkl. Anzeigetafel wurde wie geplant erreicht.
Entwicklung einer App für die Warnmeldungen	Diese Aufgabe wurde vollumfänglich erreicht. Dabei lagen die Arbeiten zum ersten Meilenstein bei der Entwicklung der App (erste funktionsfähige Testversion) sogar einige Wochen vor der ursprünglichen Planung.
Ernteauswertung, Bilanzierung, Probennahme zur Rückstandsanalyse	Diese Aufgabe inklusive des Meilensteins wurde nicht innerhalb der Projektlaufzeit erreicht.

Projektverlauf

Arbeitspaket 1 Phytopathologie

Der Lebenszyklus von *Venturia inaequalis* innerhalb einer Anbausaison kann in zwei Phasen gegliedert werden. Die Primärinfektion im Frühjahr wird über das Ausschleudern von sogenannten Wintersporen (Ascosporen) aus pilzlichen Überdauerungsorganen verursacht, diese reifen auf den Apfelblättern (Falllaub) aus dem Vorjahr heran. Die Sekundärinfektion im Sommer wird über sogenannte Konidiosporen verursacht. Wesentlich für den Apfelanbau ist es die Frühjahrsinfektionen durch Ascosporen zu bekämpfen, damit es nicht zur Bildung der Sommersporen kommt. Die Gefahr der Erstinfektion zu Beginn des Ascosporenflugs im Frühjahr sollte daher genau erfasst und umgehend eine Behandlung durchgeführt werden, dann bleiben die Apfelplantagen das ganze Jahr über weitestgehend befallsfrei, da die Ausbreitung über Konidiosporen nicht erfolgen kann.

Für das Projekt war es wichtig, ausreichende Mengen an Ascosporen zur Verfügung zu haben, um so eine Grundlage für die Laboruntersuchungen zu schaffen und den Aufbau einer Bilddatenbank für das maschinelle Lernen (AP 3) generieren zu können. Dazu wurde jeweils im Herbst, bevor die spezifischen Hygienemaßnahmen bei den Obstanbaubetrieben, wie z.B. unterarbeiten der infizierten Blätter in den Boden, durchgeführt wurden, Blattmaterial aus verschiedenen Plantagen mit unterschiedlich anfälligen Apfelsorten, sowohl direkt vom Baum als auch vom Boden gesammelt. Idealerweise wurde dabei stark infiziertes Blattmaterial eingesammelt. Damit es zur Bildung der wichtigen Überdauerungsorgane kommen konnte, musste das gesammelte Blattmaterial über den Winter den natürlichen Wetterbedingungen ausgesetzt werden. Bei sehr feuchtem Material wurde dieses zunächst getrocknet. Danach wurden die Blätter entweder mehrschichtig in Netze gefüllt (siehe Abbildung 3) oder einschichtig in extra für das Projekt an der RWTH entworfene und gebaute Rahmen gefüllt (Abbildung 4, A) und über die nächsten Wochen bzw. Monate der natürlichen Witterung ausgesetzt.



Abbildung 3. Beschriftete Netze gefüllt mit Apfellaub, ausgelegt im Freiland auf dem Firmengelände eines Projektpartners. Das Laub stammt von Bäumen, die in der Saison Apfelschorfinfektionen gezeigt hatten.

Aus den Netzen bzw. Rahmen wurden immer wieder Proben entnommen und sowohl makro- als auch mikroskopisch die Reife der Dauerorgane mit ihren Ascosporen bestimmt. Am Ende des Winters, als die Ascosporen herangereift waren, wurde das Blattmaterial zur Konservierung eingefroren. Somit stand den Projektpartnern für den gesamten Projektverlauf ausreichendes Blattmaterial für Laboruntersuchungen, Bildaufnahmen, Auslegen von Sporenbrettern und Tests des ApfelPathosensors zur Verfügung. In 2022 wurde das Blattmaterial in den Rahmen belassen und im Verlaufe der Apfelschorfsaison auf den Beginn und den Verlauf der Ascosporenfreisetzung hin untersucht.

Bedingt durch den natürlichen Ursprung des Materials aus Apfelplantagen, war eine direkte mikroskopische Untersuchung der Blattoberfläche durch Verunreinigungen (z.B. Luftpartikel wie Staub, Pollen etc.) und Kontaminationen mit anderen Pilzen erschwert. Aus diesem Grund wurden an der RWTH Methoden zur Sporenfreisetzung implementiert und optimiert. Hierbei wurde zunächst eine Methode nach Kollar et al. (1998) erprobt. Hierbei wird ein Gramm getrocknetes, befallenes Blattmaterial ohne die Blattmittelrippe zerkleinert und in 50 ml Wasser für eine Stunde geschwenkt. Der Überstand wurde durch einfache Filtration über Gaze gewonnen und die enthaltenen Sporen durch Zentrifugation angereichert. Anschließend wurde die Konzentration der Sporen in einem Milliliter Lösung mit Hilfe einer Zählkammer nach Thoma bestimmt. Eine Spore pro Zählfeld entspricht dabei $10.000 \text{ Sporen} \cdot \text{ml}^{-1}$ (Abbildung 4, B).

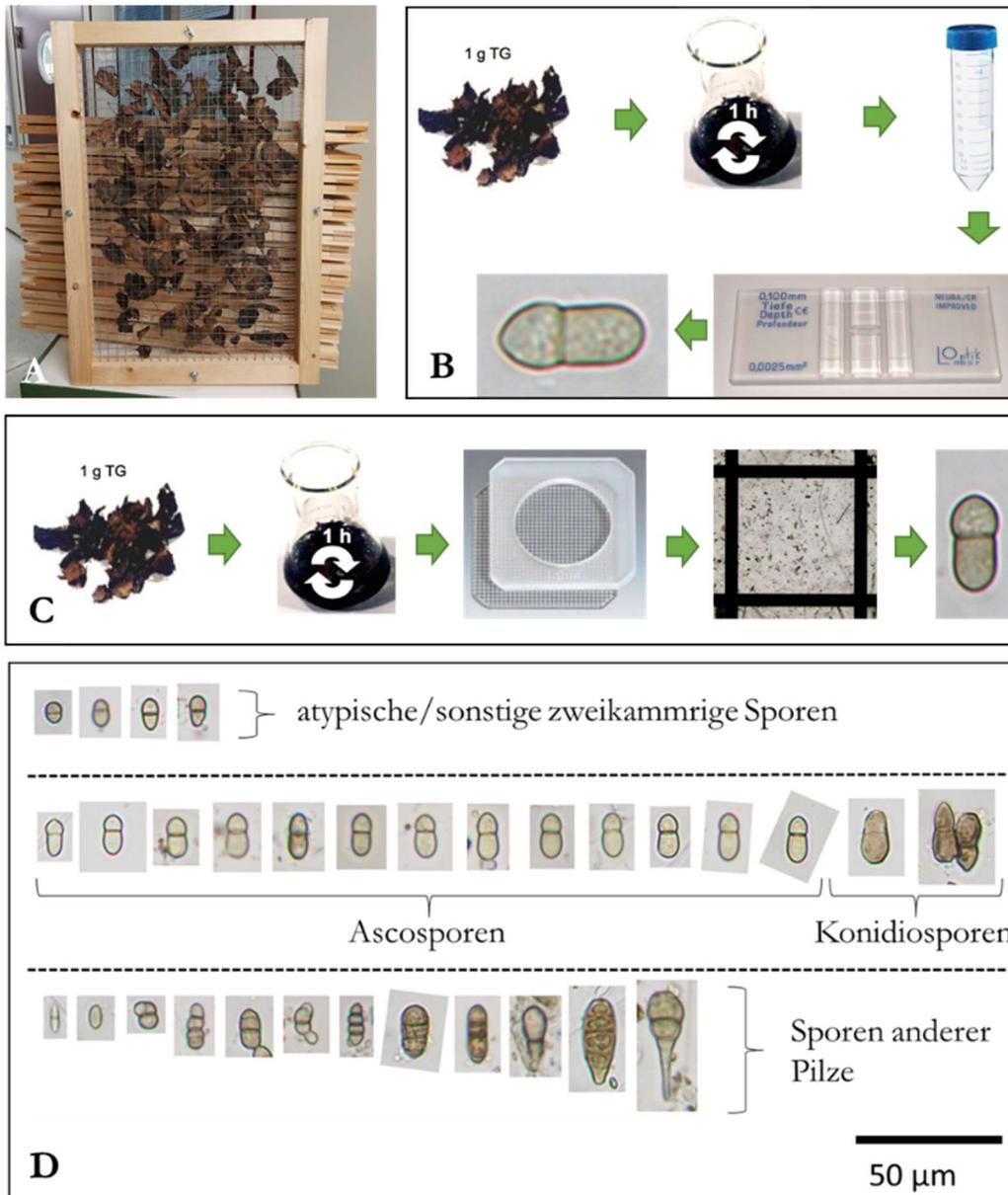


Abbildung 4. Versuche zur Materialgewinnung, Lagerung und Sporenbestimmung an der RWTH. Befallenes Material aus verschiedenen Quellen wurde in hierfür angefertigten Trocknungsrahmen im Freien gelagert („überwintert“) und anschließend getrocknet (A). Zur Generierung von Referenzmaterial für die KI-Anlernung wurden zwei Standard-Methoden an der RWTH implementiert und für Projektzwecke optimiert. Ursprünglich wurde eine definierte Menge Blattmaterial in Wasser geschüttelt und der Überstand zentrifugiert um Ascosporen für die Mikroskopie anzureichern (B). Die Verwendung von Planktonzählkammern stellte eine deutliche Erleichterung dar, da auf den Zentrifugationsschritt verzichtet werden konnte (C). Zur Anlernung der KI konnten aus dem so gewonnenen Material Referenzbilder des Asco- und Konidiosporenspektrums auf den Apfelblättern erzeugt werden (D).

Im Laufe der Untersuchungen wurde klar, dass die Methode zwar geeignet ist, Sporen auszuschwemmen und auch zu quantifizieren, aber durch die Notwendigkeit der Aufkonzentrierung durch Zentrifugation auch Nachteile entstehen. Zum einen stellt die Zentrifugation einen zusätzlichen apparativen Aufwand dar, der nicht bei allen Projektpartnern verfügbar war und zum anderen können durch diesen zusätzlichen Schritt auch weitere Ungenauigkeiten bei der Quantifizierung entstehen. Des Weiteren

liegt ein Schwachpunkt der Methode in der Verwendung von Thoma- bzw. Neubauerzählkammern, da diese, wie oben bereits erwähnt, auf die Bestimmung von höheren Konzentrationen an Partikeln ausgelegt sind. Hierdurch kann gerade zu Beginn der Saison eine deutliche Untererfassung des Ascosporenpotentials entstehen.

Um diesen Problemen entgegenzuwirken konnten im Verlauf des Projektes neue Zählkammern beschafft werden. Bei diesen Zählkammern handelt es sich um sogenannte „Plankton-Zählkammern“ der Firma Hydrobios. Diese Zählkammern verfügen über ein Volumen von 0,5 ml und ein 1x1 mm Zählraster. Die Methode der Sporenausschwemmung wurde in den ersten Schritten wie oben beschrieben durchgeführt: 1 g zerkleinertes Blattmaterial wurde in 50 ml Wasser für eine Stunde geschwenkt. Die darauffolgende Filtration und Zentrifugation entfiel. Stattdessen konnten direkt 0,5 ml aus dem Überstand genommen werden. Eine Auszählung von 30 Zählquadraten erlaubte eine Quantifizierung von deutlich geringeren Sporenkonzentrationen (Berechnung: Sporenanzahl in einem ml = Summe der Sporen geteilt durch 30 mal 769,2; 30 = Anzahl der gezählten Quadrate; 769,2 = kammerspezifischer Umrechnungsfaktor) (Abbildung 4, C). Diese Methode stellte sich als geeigneter für die Zwecke des Projekts heraus. Ausserdem wurde so ein direkter Vergleich mit den am JKI (Julius Kühn Institut) Dossenheim erfassten und herausgegebenen Sporenpotential-Daten ermöglicht.

Die hier vorgestellten Methoden erlaubten eine Gewinnung von Sporenlösungen, die geeignet waren um eine Bilderfassung an den Forschungsmikroskopen an der RWTH durchzuführen. Ziel war es zum einen, Bildmaterial für die Anlernung des Maschinellen Lernens (KI) zu erzeugen (vgl. Abbildung 12 und 13) und zum anderen Erfahrungen bzgl. der zu verwendenden Optiken bzw. Vergrößerungen zu sammeln und in die Prototypenentwicklung einfließen zu lassen.

Im Verlauf der Mikroskopie konnte das Spektrum der auf dem Blattmaterial vorhandenen Sporen des Zielorganismus, sowie von anderen Pilzen (Nicht-Zielorganismen/Kontamination) umfänglich erfasst und dokumentiert werden (Beispiel in Abbildung 4, D). Neben dem Anlernen der KI konnte aus den Bilddaten eine Sporen-Bestimmungshilfe für die interne Verwendung der Projektpartner erzeugt werden.

An der RWTH erfolgten neben den hier beschriebenen Arbeiten zur Bilddatenerzeugung auch die Testung und Optimierung des ersten Prototypen der Sporenfalle. Dieser Prototyp verfügte noch nicht über die Bilderfassungs- und Verarbeitungshardware, sondern diente der Erprobung der Sporensaugung und Sedimentierung. An der RWTH konnten diese Versuche sowohl im Freien (Abbildung 5, A), als auch unter kontrollierten Laborbedingungen durchgeführt werden (Abbildung 5, B).

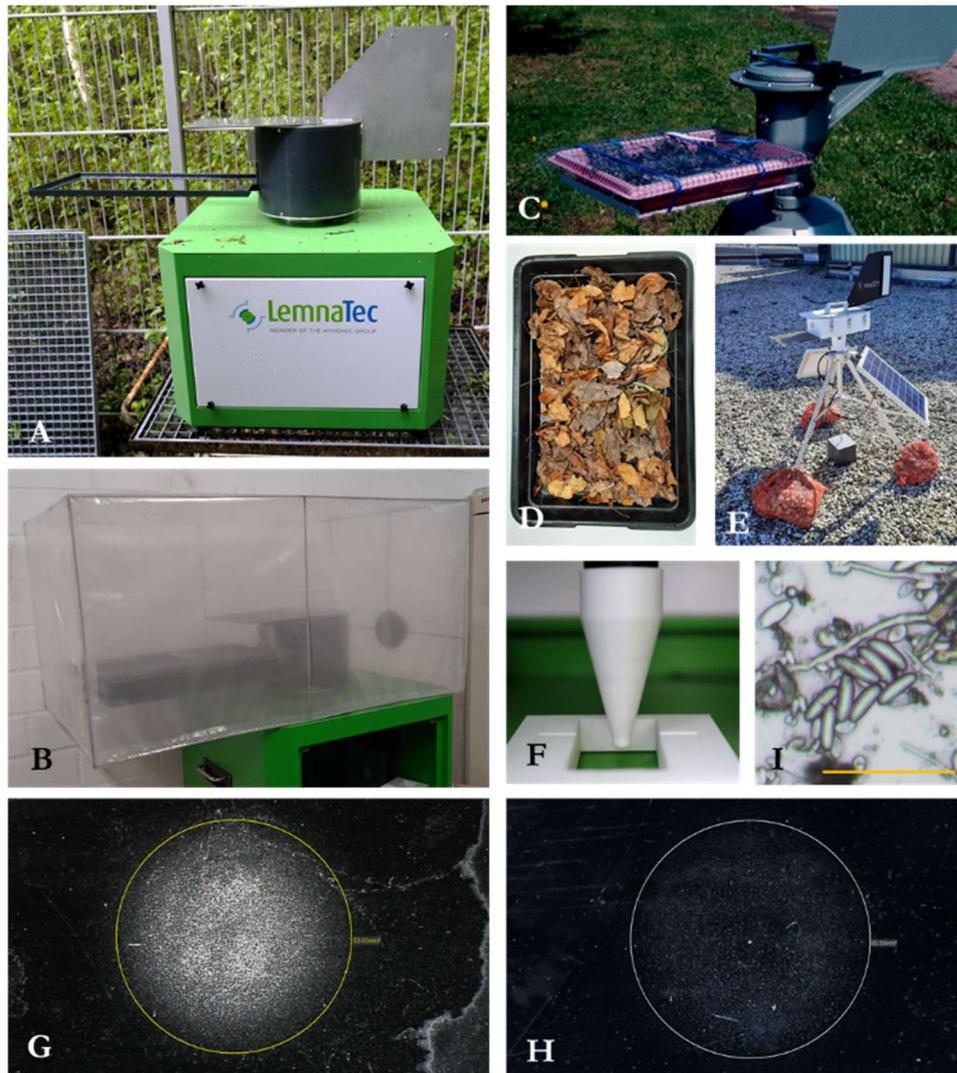


Abbildung 5. Optimierung und Testung des Prototypen an der RWTH

Die erste Prototypenversion wurde zunächst im Freien aufgestellt (A). Nach der Apfelschorfsaison wurde der Prototyp dann für Exaktversuche im Labor betrieben (B). Basierend auf Erfahrungen aus der Praxis und von herkömmlichen Trommel-Sporenfallen (C) erfolgte die erste Modifikation in Form einer Halterung für eine Schale mit infiziertem Blattmaterial („booster-Schale“) (D). Im Laufe des Projektes konnte der Prototyp im Vergleich zu einem Konkurrenzprodukt (herkömmlicher Bautyp) verglichen werden (E). Während der Testphasen konnte der Düsenabstand (F) und die Sporensedimentierung (G) für die Bilderfassung optimiert werden. Dabei wurde sowohl die Sedimentierung von Sporen in der Umgebungsluft (G), als auch die Sedimentierung von Mehltausporen aus den Exaktversuchen untersucht (H, I).

Eine erste Modifikation erfolgte durch Anbringung eines Halters für eine Schale mit infiziertem Blattmaterial, analog zu Modifikationen von herkömmlichen Sporenfallen (Klebestreifen-Methode) aus der Praxis (Abbildung 5, C und D). Eine solche herkömmliche Sporenfalle mit sogenannter „Booster-Schale“ wird z.B. am JKI in Dossenheim eingesetzt um die Menge an Sporen auf den Klebestreifen zu erhöhen und somit die manuelle Auszählung zu erleichtern. Es wird Teil zukünftiger Untersuchungen sein, ob eine solche Schale am ApfelPathosensor überhaupt noch

notwendig sein wird. Im Laufe des Projekts war es zudem möglich an der RWTH mit projektfremden Mitteln eine herkömmliche Sporenfalle zu erwerben, die zu Vergleichszwecken ebenfalls mit einer Halterung für infizierte Apfelblätter ausgestattet worden ist (Abbildung 5, E). Bei den Untersuchungen wurde deutlich, dass das ApfelPathosensor-Konzept der online-Auswertung der herkömmlichen Nacherfassung des Sporenfluges überlegen ist.

Ein wesentlicher Teil der Optimierungsarbeiten bezog sich auf Ansaugung und Sedimentation der Sporen aus der Luft, wobei der Düsenabstand zum Objektträger (siehe Abbildung 5, F) und die Beschaffenheit des Objektträgers (siehe unten) im Fokus standen. An der RWTH wurden Experimente zur Bestimmung dieser Parameter sowohl im Freien (siehe sedimentiertes Material im Dunkelfeldbild in Abbildung 5, G) als auch unter Laborbedingungen durchgeführt. Hierbei stellten sich Mehltaukonidien als ideale Versuchsobjekte zur Optimierung heraus (Abbildung 5, H und I), da diese einfach und in großen Mengen bereitgestellt werden konnten.

Parallel zu den Laborarbeiten wurden Freilandversuche mit klassischen Sporenbrettern durchgeführt. Die Sporenbretter wurden an mehreren Standorten ausgelegt und der Ascosporenflug an verschiedenen Tagen im Labor mikroskopisch ausgewertet (Abbildung 6).



Abbildung 6. Foto eines mit infizierten Apfelblättern bestücktem Sporenbretts. Zum Mikroskopieren der ausgeschleuderten Ascosporen sind in einem Abstand über den Apfelblättern Objektträger angebracht. Diese wurden während der Saison regelmäßig entnommen, im Labor mikroskopiert und gegen neue Objektträger ausgetauscht.

Die Daten dieser jährlich durchgeführten ergänzenden Untersuchungen dienen zur Verbesserung des Apfelschorf-Algorithmus und seiner Infektionsrisiko-Vorhersage im *amagrar* Expertensystem. Außerdem konnten so die Ergebnisse zum Ascosporenflug an einzelnen Tagen mit den Daten aus dem ApfelPathosensor verglichen werden.

Arbeitspaket 2 Bildaufnahme und Prototyp Pathosensor

Nachdem über ein Vergabeverfahren der Partner für die Arbeiten am ApfelPathosensor gefunden war, ging es schnell daran die Ideen eines Pathosensors aus den Köpfen und den ersten Papierskizzen umzusetzen. Die Arbeit bestand daraus alle benötigten Komponenten zu identifizieren und eine erste technische Skizze anzufertigen (Abbildung 7).

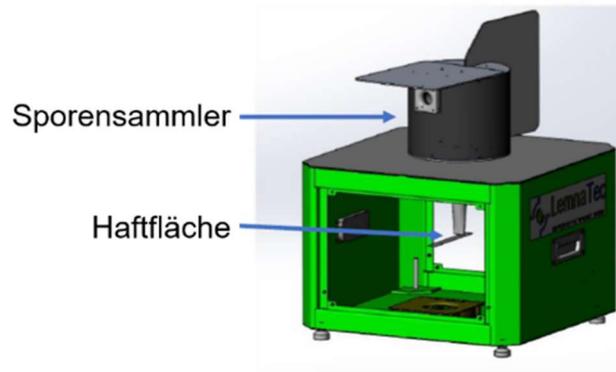


Abbildung 7. Erste grobe technische Skizze des ApfelPathosensors.

Schnell stellte sich heraus, dass der Fokus bei der weiteren Planung auf eine ideale Optik gelegt werden musste. Ausführliche Recherchen führten dazu, dass im Laufe der ersten Monate diverse komplett ausgestattete (USB-) Mikroskope und Einzelkomponenten ausgeliehen oder gekauft und ausführlich getestet wurden. Es wurde deutlich, dass neben Vergrößerungseigenschaften das Auflösungsvermögen eine entscheidende Rolle spielt. Viele der günstigen und kompakten USB-Mikroskope, die zunächst favorisiert wurden, lieferten lediglich eine gute elektronische Vergrößerung, aber keine gute Auflösung. Die verschiedenen getesteten Einzelkomponenten hingegen lieferten meist ein zufriedenstellenderes Ergebnis beider Faktoren. Das vergrößerte den Testaufwand, bis alle Bestandteile der Optik für den ApfelPathosensor aus Einzelkomponenten zusammengestellt waren.

Zusätzlich gab es bei der Auswahl der technischen Komponenten leider einige Rückschläge. Aufgrund der Coronapandemie waren die Wirtschaftswege von Asien nach Europa deutlich schwieriger. Die Lieferzeiten erhöhten sich deutlich und zum Teil waren die Waren erheblich teurer geworden, das spiegelte sich und spiegelt sich auch aktuell noch unter anderem in der Chipherstellung, aber auch bei optischen Geräten und selbst bei der Stahlproduktion wider. Daher mussten, teilweise auch um den finanziellen und zeitlichen Rahmen nicht zu überschreiten, einige bereits getestete und ausgewählte Komponenten wieder umgeplant und auf ähnliche, aber günstigere und „sicher“ lieferbare, Teile ausgewichen werden. Dieses verzögerte den Zusammenbau des Pathosensors in vollständiger Ausstattung erheblich.

Gleiches gilt für die Ausstattung des ApfelPathosensors mit dem benötigten Kleinstcomputer, dem Gehirn des Ganzen, auf dem die Software für das maschinelle Lernen aufgespielt werden sollte. Auch hier traten große Lieferschwierigkeiten auf.

Die Planung und der Bau der Sammelfunktion und der äußeren Ausstattung des ApfelPathosensors verlief etwas einfacher und mit weniger Rückschlägen. Die ersten beiden ApfelPathosensoren, zwar ohne Optik und maschinellem Lernen, aber sonst mit voller Funktion konnten daher bereits im zweiten Projektjahr innerhalb der Sporenflugsaison fertiggestellt und getestet werden.

Die ersten beiden Prototypen besaßen äußerlich eine unterschiedlich gestaltete Aufnahmeplatte für mit Schorf infizierte Apfelblätter (Abbildung 8), waren aber

ansonsten gleich ausgestattet. Äußerlich war die Box, neben der Aufnahme­fläche für die Blätter („Booster-Schale“), mit einem Drehkopf mit Gleitlager und einer kleinen Fahne zum Ausrichten in Windrichtung und einer Einsaugöffnung mit einem abschließenden Gitter ausgestattet. Im Inneren befanden sich neben der Stromversorgung und einem Lüfter, die Aufprallfläche für den Luftstrom. Die Aufprallfläche war zunächst in der ersten Ausbaustufe noch feststehend, die Trägerplatten mussten daher über die Serviceluke täglich gewechselt werden.



Abbildung 8. Fotos der beiden ersten Prototypen des ApfelPathosensors. Beide mit unterschiedlichen Modifikationen für die Aufnahme für infizierte Apfelblätter („Booster-Schale“), als Quelle für das Sporenschleudern. Links wurde ein Rahmen mit einer großen Schale für viele Blätter angebracht, überspannt war das Ganze mit einem Drahtgeflecht. Rechts war eine kleinere Fläche für wenige Blätter angebracht, das Ganze war mit einem Netz gesichert.

Erste Testreihen mit den Prototypen verliefen vielversprechend. Die Ansaugfunktion war in ausreichendem Maße gegeben, der Luftstrom gelangte auf die Aufprallfläche, Sporen blieben haften und konnten mikroskopiert werden. Es wurde überlegt als Aufprall- und Haftfläche Objektträger zu verwenden. Dazu wurden im Labor verschiedene Tests durchgeführt, welche Objektträger sich, vor allem im Hinblick auf die spätere Vermarktung des ApfelPathosensors, am besten eignen. Manuell mit Vaseline bestrichene Standardobjektträger dienten dabei als Referenz und wurden gegen drei verschiedene maschinell beschichtete Objektträger, so genannte Adhäsionsobjektträger, getestet. Histobonds® haben dabei besonders gut abgeschnitten. Dabei handelt es sich um Objektträger mit einer silanisierten Oberfläche, die mit einer permanenten positiven Ladung beschichtet sind, an dieser werden Sporen und andere Objekte dauerhaft gebunden. Ein weiterer Vorteil von Adhäsionsobjektträgern ist die Möglichkeit, mit Ihnen ohne Zugabe von Wasser und Auflegen eines Deckglases, also trocken, mikroskopieren zu können. Als Aufprall- und Haftfläche für den ApfelPathosensor sind sie daher sehr gut geeignet.

Bei den Freilandversuchen mit den ersten ApfelPathosensoren traten verschiedene Mängel und Probleme auf. Unter anderem waren die Gleitlager undicht, so dass es zum Wassereintritt kam. Auch war die Fahne, die den Drehkopf und somit den Lufteinlass im Wind ausrichten sollte zu klein geplant. Beides wurde neu überlegt und in der nächsten Ausbaustufe des Pathosensors verändert umgesetzt.

Aufgrund der oben beschriebenen Schwierigkeiten beim Erwerb der optischen Komponenten und der zu verbauenden Kleinstcomputer konnten die vollumfänglich ausgestatteten ApfelPathosensor-Prototypen erst nach Ende der Sporenflugsaison im letzten Projektjahr gebaut und letzten Tests unterzogen werden.



Abbildung 9. Finale technische ApfelPathosensor-Prototypen. A) Sechs Prototypen in verschiedenen Fertigungsstufen. B) Ansaugstutzen, Mikroskop und beweglicher Objektstisch im Inneren des ApfelPathosensors C) Jetson Nano mit Anschlüssen und Schaltkasten D) einsatzbereiter ApfelPathosensor

Die Versuchsreihen mit den Prototypen im letzten Projektabschnitt verliefen vielversprechend. Das Ansaugen von Sporen und die Fixierung des Materials auf spezifischen Objektträgern funktionierte wie geplant. Die automatische Steuerung von Ansaugung, Bewegen der Objektträger und die vollautomatische Bildaufnahme sind voll funktionstüchtig. Der kritischste Aspekt der Optik-Entwicklung war die Qualität der mikroskopischen Aufnahmen ohne Deckglas und Medium. Hier wurde das gesteckte Ziel mit der ausgewählten Technik erreicht. Sporen können so gut aufgelöst dargestellt werden, dass die KI diese auswerten kann.

Die autonome Fokussierung der Sporen erfolgt über ein Zusammenspiel von Hardware und Software. Der Pathosensor nimmt automatisch Fotos von mehreren Schärfeebenen an jeder der verschiedenen Positionen im Fixierungsbereich der angesaugten Sporen auf (siehe Abbildung 10).

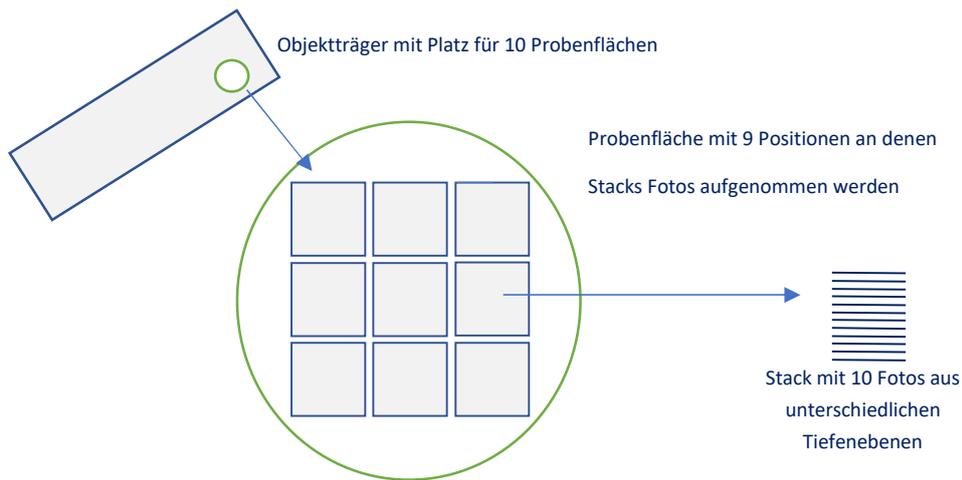


Abbildung 10. Schema der Bildaufnahmen im Pathosensor

Auf einem Objektträger können 10 bis 20 Probenflächen angefahren und dort die angesaugten Sporen fixiert werden. Unter dem Digitalmikroskop werden an neun Positionen Fotos aufgenommen. An jeder Position ein Stapel (Stack) von 10 Fotos, die in unterschiedlichen Ebenen aufgenommen werden.

Ein Softwareprogramm im Pathosensor unterscheidet zwischen Aufnahmen, die außerhalb des Schärfebereichs liegen (Abbildung 11 A, B, C) und solchen, auf denen klar definierte Strukturen erkennbar sind (Abbildung 11 D, E). Letztere werden nachfolgend von der KI analysiert. Die Anzahl der gezählten *Venturia* Asco- und Konidiosporen ist das jeweilige Ergebnis.

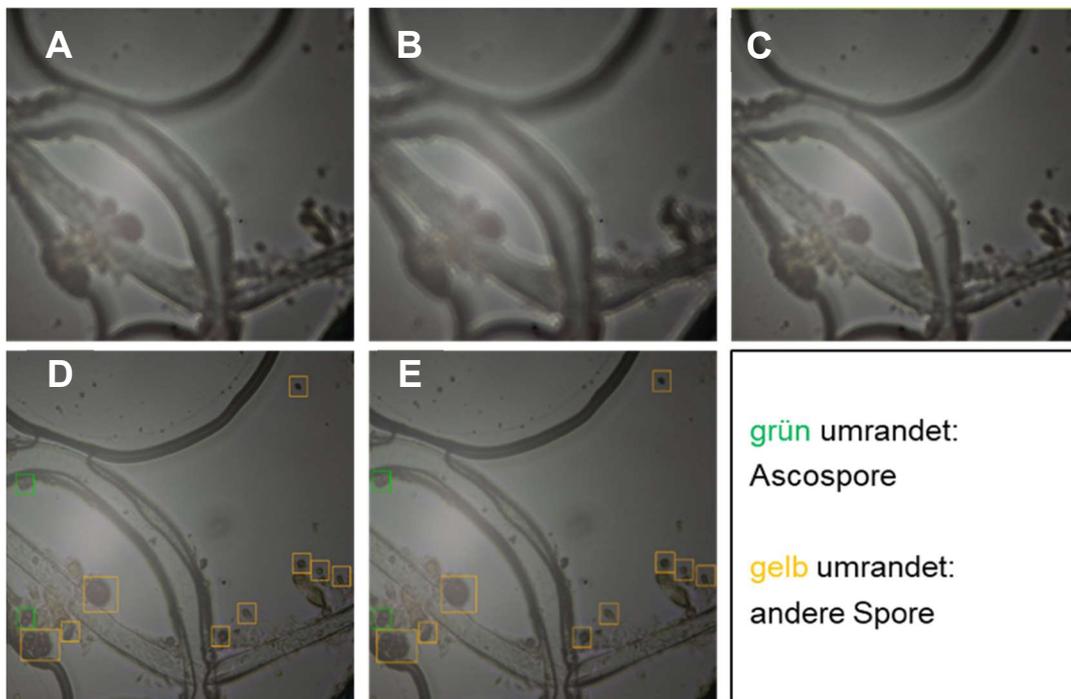


Abbildung 11. A-E Stapel (Stack) von Serienaufnahmen in unterschiedlichen Schärfenebenen zur Fokussierung der Präparate. (Fertigpräparate von *Venturia inaequalis* aus dem Projekt). A-C unscharfe, D-E scharfe Ebenen mit annotierten Sporen aus einem Stack.

Arbeitspaket 3 Diagnosesoftware

Einen großen Teil der Arbeiten an diesem Projekt haben die beträchtlichen Mengen an Fotos der mikroskopischen Untersuchungen von *Venturia inaequalis* Sporen für die Bilddatenbank in Anspruch genommen (siehe AP 1). Aber Fotos alleine nutzen der Software zum maschinellen Lernen wenig. Viel menschliche Fleißarbeit am Computer war deshalb notwendig, um die Ascosporen auf den Aufnahmen zu markieren. Dazu wurde ein „Labelling-Tool“ genutzt, also ein Werkzeug um Strukturen auf einem Bild digital zu kennzeichnen. Es wurden drei Kriterien für die Markierung festgelegt: mit grün wurden Ziel-Organismen (Ascosporen von *Venturia inaequalis*), mit rot wurden Nicht-Ziel-Organismen (andere Sporen) und mit blau wurde Hintergrundrauschen (unspezifische Reste) markiert.

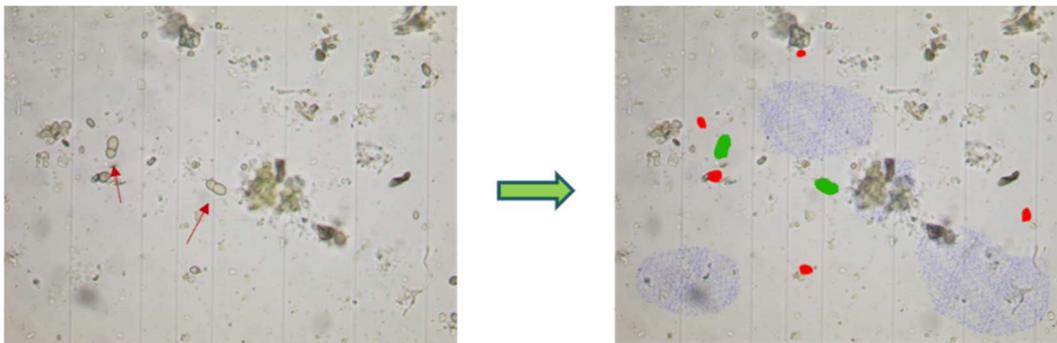


Abbildung 12. Mikroskopische Aufnahme von Ascosporen von *Venturia inaequalis* (linkes Bild). Das rechte Bild zeigt dieselbe Aufnahme nach dem manuellen Markieren mit dem Labelling-Tool. Grün = Ziel-Organismus (Ascosporen von *V. inaequalis*), rot = Nicht-Ziel-Organismus (andere Sporen), blau = Hintergrundrauschen

Über die gesamte Projektlaufzeit wurden immer wieder auf mikroskopischen Aufnahmen manuell Sporen markiert und so eine umfangreiche Bilddatenbank aufgebaut. Die Aufnahmen wurden für zahlreiche iterative Lernschritte des maschinellen Lernens genutzt.

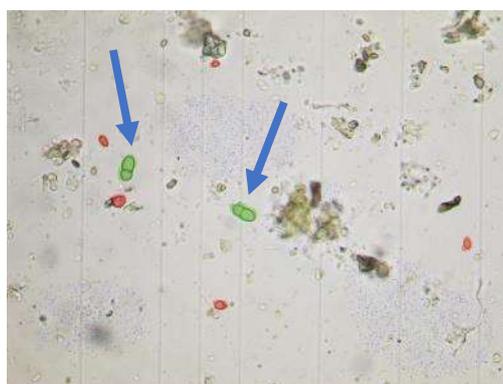


Abbildung 13. Ergebnis des maschinellen Lernens aus einem der ersten Lernschritte mit idealen Bildaufnahmen von Sporen. Die zwei Ascosporen von *Venturia inaequalis* im Bildausschnitt wurden vom System selbstständig erkannt (grüne Markierung).

Wie in Abbildung 13 anhand der Markierung (blaue Pfeile) zu erkennen ist, konnte die Software zum maschinellen Lernen über die gelabelten Aufnahmen mit Ascosporen

soweit trainiert werden, dass sie auf Bildern Ascosporen von *Venturia inaequalis* selbstständig erkannt hat (grün markierte Sporen). Es kam aber auch immer wieder zu fehlerhaften Markierungen durch das Programm. Entweder wurden Zielorganismen nicht erkannt oder Nicht-Zielorganismen als Ascosporen von Apfelschorf markiert. Dieses wurde durch manuelles Eingreifen korrigiert. Über weitere iterative Schritte wurde das maschinelle Lernen fortgesetzt trainiert. Dabei musste auch beachtet werden, dass die ersten Aufnahmen im Labor unter idealen Bedingungen mit Mikroskopen höchster Qualitätsstufe erstellt wurden. Spätere mikroskopische Aufnahmen wurden daher an einem Teststand mit der Optik aus dem ApfelPathosensor und schlussendlich mit dem voll ausgestatteten Pathosensor-Prototyp erstellt. Auf diese Weise wurde die Software zum maschinellen Lernen schrittweise angelernt, um später zuverlässig Ascosporen von *Venturia inaequalis* auch auf Aufnahmen zu identifizieren, die unter nicht idealen Bedingungen erstellt wurden. Dazu gehören genauso Aufnahmen mit vielen Sporen des Typs „Nicht-Zielorganismus“, als auch Aufnahmen mit viel Hintergrundrauschen, unscharfe Fotos, weil das Zielobjekt nicht im Fokus ist, und solche Bilder unter nicht optimaler Belichtung. Je größer die Datenbank mit den Fallbeispielen wurde und in Zukunft noch wird, desto besser und zielsicherer wird das maschinelle Lernen Asco- und Konidiosporen von *Venturia inaequalis* selbstständig erkennen.

Arbeitspaket 4 Warn- und Beratungssoftware

Über ein Vergabeverfahren konnte innerhalb der ersten Monate nach Beginn des Projektes ein externes Partnerunternehmen für die Programmierarbeiten gefunden werden. Die Einarbeitung in das bereits bestehende System erfolgte zügig und so konnte zeitnah mit den eigentlichen Aufgaben in diesem Arbeitspaket begonnen werden.

Als Grundlage der Warn- und Beratungssoftware für den Apfelanbau in diesem Projekt diente das *amagrar* Expertensystem. Dabei handelt es sich um eine browserbasierte Beratungssoftware für den Ackerbau deren Anwendung im Sinne des integrierten Pflanzenschutzes, zur frühzeitigen Identifikation und Bekämpfung von Pflanzenkrankheiten, genutzt wird. Das Expertensystem dient als digitale Schnittstelle zwischen den Landwirt*innen und den Berater*innen, es unterstützt bei der Kommunikation der Laborergebnisse (Untersuchungen von eingesandten Pflanzen durch amagrar), der Boniturergebnisse (Rückmeldungen vom Landwirt*innen) und der täglich berechneten Infektionsrisiken. Es unterstützt die Landwirt*innen aktiv dabei den Einsatz von Pflanzenschutzmitteln zu optimieren und zu reduzieren und das bei gleicher Qualität und Erträgen. Zum Beginn des Projektes war das Grundgerüst eines Prognose- und Simulationsmodells, auf dem aufgebaut werden konnte, schon vorhanden. Ansatzweise war auch bereits ein Apfelschorf-Algorithmus im System integriert, der im Laufe des Projektes anhand von Ergebnissen der Untersuchungen zum Sporenflug mittels klassischer Sporenbretter, der Erkenntnisse der

Laboruntersuchungen und der Ergebnisse des ApfelPathosensors angepasst und überarbeitet wurde.

Die ersten Schritte in diesem Arbeitspaket bestanden darin, ein Konzept für die Anzeigentafel (Dashboard) für die stationäre Anwendung des *amagrar* Expertensystems für den Apfelanbau zu entwickeln. Gemeinsam mit den OG-Partnern wurde während der ersten Onlinekonferenzen überlegt und diskutiert, welche Informationen essentiell für eine übersichtliche Anzeigentafel für die Warnsoftware im Apfelanbau wären. Es wurden wichtige Faktoren für eine anwenderfreundliche Darstellung herausgearbeitet. Daraus entstand zunächst ein grober Entwurf der zusammen mit dem externen Partner in einem ersten Schritt verfeinert und schließlich programmiertechnisch umgesetzt wurde.

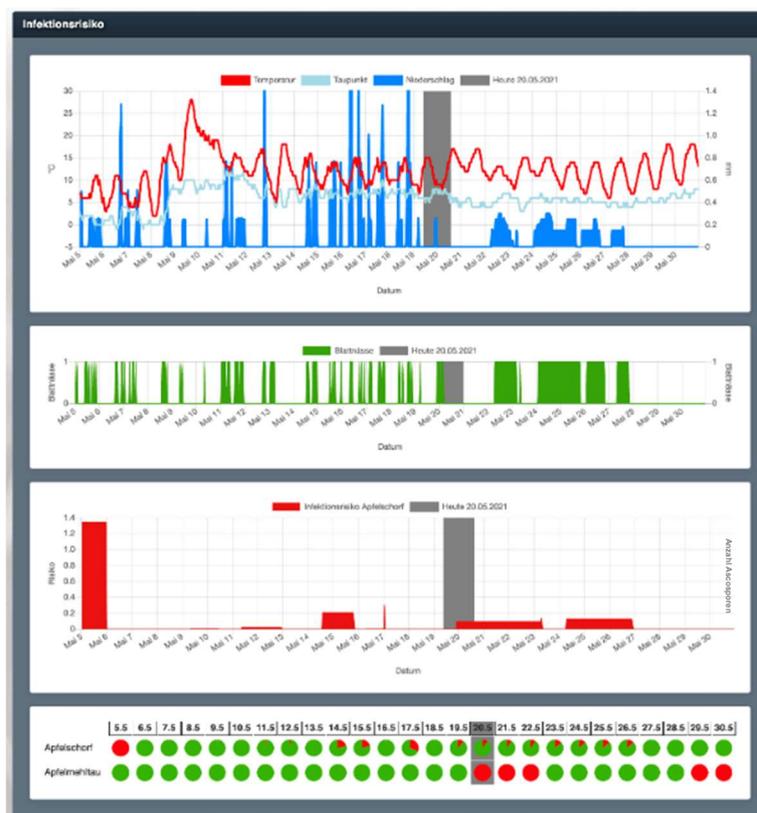


Abbildung 14. Dashboard zur Anzeige des Infektionsrisikos für *Venturia inaequalis* (Apfelschorf) im *amagrar* Expertensystem. Vier Graphen mit Informationen zum Wetter (oben), zur Blattnässe (zweiter Graph von oben), dem berechneten Infektionsrisiko und der Sporenflugdaten aus dem ApfelPathosensor (dritte Graphik) und schließlich einer Zusammenfassung des Risikos für Apfelschorf in einem Tortendiagramm (untere Graphik).

Das entwickelte Dashboard besteht aus vier Graphiken. Die ersten beiden Graphiken enthalten wichtige, standortspezifische Wetterinformationen über Niederschlag, Temperatur, Taupunkt und Blattnässe. Über einen Algorithmus wird das Infektionsrisiko für Apfelschorf berechnet und zusammen mit den Ergebnissen des Sporenflugs aus dem ApfelPathosensor in der dritten Graphik dargestellt. Eine letzte

Graphik fasst die oberen Wetter- und Risikodaten zusammen und stellt in schnell verständlichen Tortendiagrammen das tägliche Apfelschorfinfektionsrisiko kompakt dar.

Für die Integration der gemessenen aktuellen Sporenflugdaten über der Parzelle wurden zunächst sogenannte API-Endpunkte (Application Programming Interface) entwickelt, dabei handelt es sich um Programmierschnittstellen. Sie bilden die Grundvoraussetzung für die Anbindung des ApfelPathosensors an das bestehende Expertensystem. Um einen sicheren Austausch dieser Schnittstellen mit dem ApfelPathosensor zu gewährleisten wurde eine entsprechende Dokumentation zu den API-Endpunkten erstellt. Des Weiteren wurde eine Datenbank angelegt um die Ergebnisse des ApfelPathosensors tabellarisch speichern und verarbeiten zu können. Darüberhinaus wurde ein Server mit SFTP (Secure File Transfer Protocol) Datenübertragungsprotokoll eingerichtet, auf dem die Fotos und die Berechnungen aus den ApfelPathosensoren sicher abgelegt und gespeichert werden.

Darüber hinaus mussten im bestehenden Beratungssystem verschiedene Bereiche um die Kultur „Apfel“ erweitert werden. Viele Programmstrukturen konnten aber übernommen und entsprechend angepasst werden. So ist es möglich Apfelparzellen als Dauerkulturen anzulegen und virtuell mit einer Apfelsorte zu bepflanzen. Es wurden Literaturrecherchen durchgeführt, um diverse Apfelsorten mit ihren verschiedenen spezifischen Eigenschaften ins System zu integrieren. Ebenso verhält es sich mit Pflanzenschutzmitteln für den konventionellen und biologischen Apfelanbau.

Eine weitere große Aufgabe in diesem Arbeitspaket bestand in der Entwicklung einer Progressiven Webapplikation (PWA oder Web-App), um den Nutzer*innen eine mobile Anwendung der Warn- und Beratungssoftware für den Apfelanbau zu ermöglichen. Die ersten Schritte zur Entwicklung der Web-App sahen vor, skizzenhafte Mockups, also digitale Entwürfe für eine mobile Webseite, für den Login-Bereich, Rückmeldungen und Warnanzeigen zu entwerfen. Diese wurden anschließend in den darauffolgenden Monaten angepasst und konkretisiert.



Abbildung 15. Drei beispielhafte Ansichten der entwickelten Web-App. Auf der linken Seite ist die Kulturübersicht mit den angelegten Parzellen und den weiteren Menüpunkten „Prognosen“ und „Rückmeldung“ zu sehen. In der Mitte ist die Übersicht über die Wetterprognose, den Sporenflug und das Infektionsrisiko dargestellt. Die einzelnen Felder können über einen Pfeil ausgeklappt werden. Die rechte Abbildung zeigt die Möglichkeit für die Nutzer*innen Rückmeldungen über die Bestandessituation und mögliche durchgeführte Pflanzenschutzmaßnahmen einzugeben und speichern zu können.

Durch die Entwicklung der Web-App ist es möglich, auf mobilen Endgeräten die Warn- und Beratungssoftware zu nutzen und dabei das parzellenspezifische Infektionsrisiko für Apfelschorf anzuschauen und Rückmeldungen zur Bestandessituation und einer möglichen Pflanzenschutzmaßnahme eingeben zu können. Dabei wurde auch hier darauf geachtet, das Ganze übersichtlich und möglichst aufgeräumt darzustellen. Es stehen viele Informationen zur Verfügung, aber durch die Möglichkeit einzelne Informationsfelder hinzuschalten oder zuklappen zu können, kommt es nicht zu einer Überforderung des Betrachters. Von den ersten Praktiker*innen, die die Web-App getestet haben, wurde ihr eine gute Übersichtlichkeit und eine einfache Bedienung bescheinigt. Sie wurde als zusätzliche Bereicherung zum Dashboard auf dem Computer bezeichnet.

Arbeitspaket 5 Praxisversuche mit dem ApfelPathosensor Prototyp

Die Praxisversuche auf den beteiligten Obstbaubetrieben fanden leider nicht statt. Zunächst wurde der Beginn der Projektarbeiten an diesem Arbeitspaket wegen eines langwierigen Vergabeverfahrens verzögert. Dann folgte die schwierige Auswahl der idealen Optik für den ApfelPathosensor und schlussendlich haben die schlechten Lieferbedingungen von optischen Komponenten und der Chipmangel dafür gesorgt, dass zwar Experimente im Freiland mit den Prototypen stattgefunden haben, aber keine groß angelegten Praxisversuche durchgeführt werden konnten. Das hatte auch zur Folge, dass eine Betreuung der Partner im Pflanzenschutz auf Versuchspartzen nicht wie ursprünglich geplant stattgefunden hat.

Die aktuellen Berechnungen zur ökologischen Bilanz des ApfelPathosensors basieren auf Literaturdaten, die in Zusammenhang mit der Erfassung des tatsächlichen Sporenfluges und des Einsatzes von Prognosemodellen stehen.

Rückschlüsse auf den ökologischen Fußabdruck ermöglichen die Daten der EU (Richtlinie 2009/128/EG) die standardisierte Indexwerte für die Gewichtung der Umweltbeeinträchtigung liefern. Wie in der nachfolgenden Abbildung (16) zu sehen ist, haben die ausgewählten Fungizide bei fachgerechtem Einsatz einen sehr unterschiedlichen Einfluss auf die Umwelt. In der Abbildung sind praxisübliche Mittel aufgeführt, die sämtliche, derzeit gegen den Apfelschorf zugelassenen Wirkstoffe, repräsentieren. Auffällig ist, dass die Mittel des Ökolandbaus (Funguran Progress, Cuprozin Progress) und das am häufigsten eingesetzte Mittel des konventionellen Anbaus (Caption), neben Luna Care, die höchste Umweltbelastung aufweisen.

Somit kommt dem ApfelPathosensor eine besondere Bedeutung bei der Reduktion der Umweltbelastung durch Fungizide zu. Der Einsatz der Fungizide kann durch die sichere Erfassung des Ascosporenfluges signifikant reduziert werden, da die Primärinfektionen effizient verhindert werden. Hinzu kommt der Effekt, dass durch den Einsatz des Apfel-Moduls (AP 4) Aufwandmengen und Auswahl der ausgebrachten Fungizide optimiert und um sechs bis acht Applikationen reduziert werden können¹ (Belz and Ruess 2002). Zudem liegen mit der neuen, in Planung befindlichen, EU-Richtlinie Daten vor, auf deren Basis sich der Umwelteinfluss einzelner Wirkstoffe berechnen lässt. So kann die Software, zusätzlich zum Verzicht auf unnötige Behandlungen durch die Erfassung des Sporenfluges, den Umwelteinfluss der empfohlenen Maßnahmen auf Basis der Richtlinie 2009/128/EG noch weiter reduzieren. Für die Saison 2023 ist die Überprüfung dieser Annahmen in der Praxis vorgesehen.

¹ Belz, J. and F. Ruess (2002). "Auswirkungen unterschiedlicher Pflanzenschutzstrategien auf Ertrag, Qualität und Kostenaufwand von schorffresistenten Apfelsorten." aus: Markus Ribbert (2004) Herstellung von Antikörpern gegen *Venturia inaequalis* zur Entwicklung von Biosensoren.

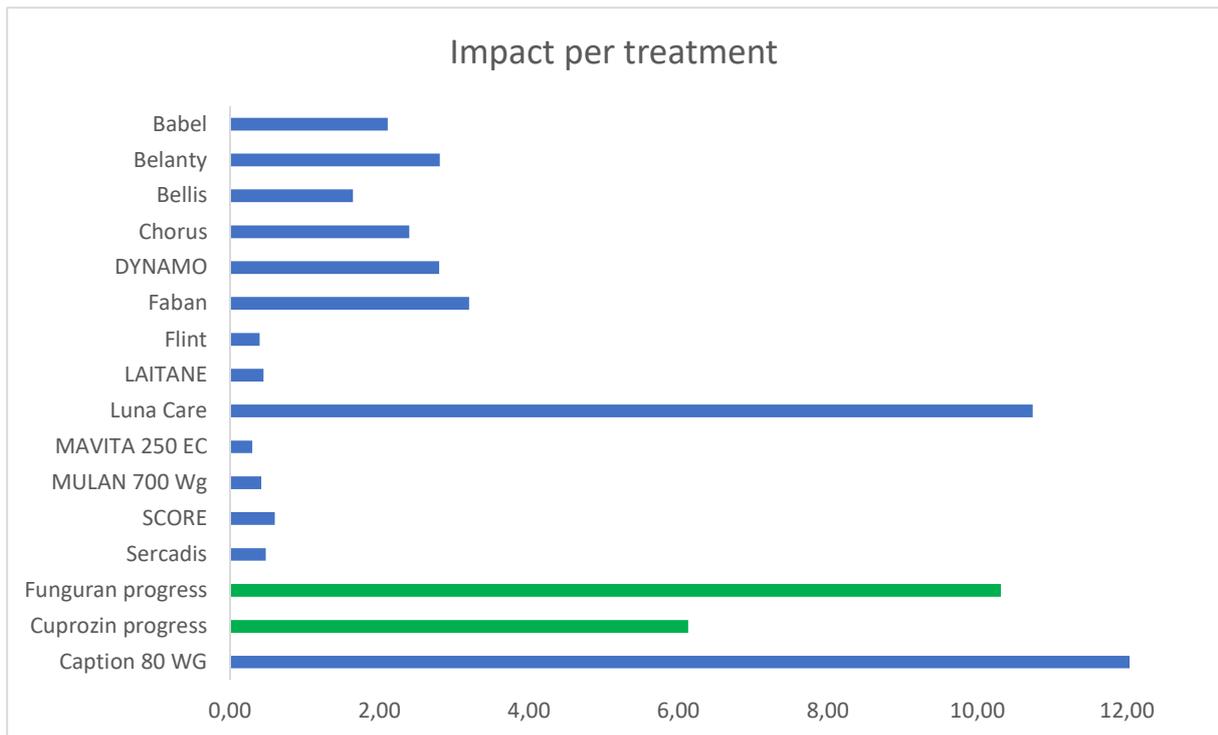


Abbildung 16. Umwelteinfluss der aktuell zugelassenen Fungizide im Apfelanbau bei einmaliger Anwendung. Blau dargestellt sind Mittel, die im konventionellen Anbau zugelassen sind und grün jene Mittel, die im konventionellen und ökologischen Anbau zugelassen sind. Die Werte der x Achse stellen Indexwerte für den Umwelteinfluss auf Basis des Produktes aus dem Gewicht [kg/ha] der Wirkstoffe und des Indexwertes für die schädigende Wirkung auf die Umwelt dar [i/kg*ha] (Richtlinie 2009/128/EG).

Es wurde ein Businessplan mit den wichtigsten Punkten Strategie, kurze Zusammenfassung, Branche und Markt, Realisierungsplan inklusive Chancen und Risiken, Planungsberechnungen und Investitionsbedarf und Sensitivitätsanalyse erstellt. Ein Ergebnis der Analyse ist, dass die Realisierung nur zusammen mit einem Partner aus dem Technikbereich erfolversprechend ist. Nach Abschluss der Praxiserprobung wird bestimmt, ob dies in Form eines Joint Ventures erfolgen kann.

Angestrebt wird ein Vermietungsmodell für den Apfelanbau, wobei zunächst Institutionen, Genossenschaften und Berater*innen mit den Pathosensoren ausgestattet werden sollen. Diese bekommen den ApfelPathosensor gegen eine Jahresmiete und ein Beratermodul der Software gegen eine Lizenz für die Zeit der Apfelsaison zur Verfügung gestellt. Landwirt*innen, die diesen Betreibern der ApfelPathosensoren zugeordnet sind, erhalten dann Zugang zur Web-App für das *amagrar* Apfel-Modul, um die Pflanzenschutzempfehlungen von Ihren jeweiligen Berater*innen zu erhalten. So soll zunächst ein Netz von ApfelPathosensoren für das regionale Sporenmonitoring aufgebaut werden. Beratungsinstitutionen, wie zum Beispiel Landwirtschaftskammern und Dienstleistungszentren können die Monitoringdaten aus den angemieteten ApfelPathosensoren, aber auch direkt von der *amagrar* Plattform und dem Gesamtnetz der Pathosensoren beziehen, um ihre eigenen Warn- und Beratungsangebote zu verbessern. Hierfür wird ein Preiskonzept erstellt, dass sich nach der Anzahl der Obstbaubetriebe richtet. In einem zweiten

Schritt der Markteinführung sollen dann auch die Landwirt*innen direkt Analyseeinheiten für die jeweilige Wachstumssaison mieten und dazu ein Datenauswertungspaket buchen können. Sie erhalten somit betriebsspezifische Empfehlungen direkt von amagrar über einen Softwarezugang und eine individualisierte Web-App.

Die Berechnungen mit Werten aus Literaturrecherchen zum Businessplan und der Ökobilanz ergeben, dass die theoretischen jährlichen Einsparungen bei Nutzung des ApfelPathosensors in Zusammenspiel mit dem *amagrar* Expertensystems für einen durchschnittlichen Betrieb (EU je 30 ha) im biologischen Apfelanbau bei 3.000 € und bei einem konventionellen Betrieb bei 5.000 € liegen können. Diese Zahlen müssen durch weitere Daten rund um den Praxiseinsatz noch überprüft werden.

Der Markt für den ApfelPathosensor geht weit über Nordrhein-Westfalen hinaus, denn aufgrund der angestrebten autonomen Arbeitsweise und der internetgestützten Datenübertragung können ApfelPathosensoren weltweit in Apfelanbaugebieten verwendet werden. In Europa sind die wichtigsten Märkte Polen, Frankreich und Deutschland.

In der EU soll zudem der Einsatz von Pflanzenschutzmitteln bis 2030 um 50 % gesenkt werden, was dem hier vorgestellten Konzept sehr entgegenkommt, da dieses Ziel mit Hilfe des ApfelPathosensors bei der Apfelschorfbekämpfung sicher erreicht werden kann.

Die Sensitivitätsanalyse ergibt, dass ab dem dritten Jahr der Markteinführung mit ersten Gewinnen gerechnet werden kann.

Bei einer erfolgreichen Anwendung für Apfelschorf besteht die Möglichkeit, im Anschluss an das Projekt das Prinzip auf andere Sporenarten und Kulturen zu übertragen. Hierbei können weitere Krankheiten im Obstbau adressiert werden und die Methode kann auf Krankheiten von Gemüse- oder Feldkulturen übertragen werden. Zudem kann der ApfelPathosensor neben Sporen auch Pollen detektieren, wodurch das Gerät durch Erweiterung des maschinellen Lernens auch im Allergiebereich Anwendung finden kann, was ein neues Geschäftsfeld eröffnet.

Arbeitspaket 6 Projektmanagement und Kommunikation

Für die Öffentlichkeitsarbeit, einem Teilaspekt von Arbeitspaket 6, wurde zu Beginn ein Blog über das Projekt eingerichtet. In vier Kategorien 1. Apfelplantage 2. Labor 3. Prototyp und Warnsoftware und 4. Sonstiges, wurde während der gesamten Projektlaufzeit regelmäßig über die Fortschritte im Projekt und das Netzwerken berichtet. Der Blog ist unter: www.amagrar.com/apfelpathosensor erreichbar.



Abbildung 17. Beispielhafte Darstellung einiger Artikel aus dem Blog zum ApfelPathosensor Projekt.

Dadurch war es möglich, Interessierte ausführlicher über die Idee und die Durchführung des Projektes zu informieren. Diejenigen, die öfter beim Blog vorbeigeschaut haben, konnten immer mal etwas Neues entdecken.

Nach einer Recherche geeigneter Fachzeitschriften zum Apfelanbau und dem Kontakt zu einem Redakteur der Zeitschrift „gartenbauprofi“ gab es ein Angebot einen Artikel über das ApfelPathosensor-Projekt zu veröffentlichen. Dieser ist in der Mai-Ausgabe 2022 der Zeitschrift „gartenbauprofi“ unter dem Titel „Digitalisierung im Obstanbau“ erschienen.



Abbildung 18. Foto der ersten beiden Seiten des Artikels „Digitalisierung im Obstanbau“ aus der Zeitschrift „gartenbauprofi“ Ausgabe 05/ 2022.

Aufgrund der Coronapandemie gab es wenige Möglichkeiten das Projekt in Präsenz auf Messen oder Feldtagen zu vertreten. Eine Chance konnte trotzdem wahrgenommen werden. Auf der regionalen Veranstaltung „Land- und Ernährungswirtschaft im (Struktur-)Wandel - Das Rheinische Revier geht voran“ in Erkelenz wurde das Projekt mit einem Stand präsentiert.



Abbildung 19. Stand der OG ApfelPathosensor zusammen mit einem der externen Partner auf der Veranstaltung „Land- und Ernährungswirtschaft im (Struktur-)Wandel - Das Rheinische Revier geht voran“.

Beitrag zu den förderpolitischen EIP-Zielen

Mit der Entwicklung des ApfelPathosensors wurde ein Beitrag zur Digitalisierung in der Landwirtschaft geleistet. Der Bau des ApfelPathosensor und die Nutzung von maschinellem Lernen, einem Teilbereich der „Künstlichen Intelligenz“ (KI), erfüllt in vollem Umfang die förderpolitischen Ziele des EIP zum Ausbau der Digitalisierung. Auch mit der Erweiterung und Integration der Warn- und Beratungssoftware *amagrar* für die Anwendung im Apfelanbau und die Entwicklung einer Progressiven Webapplikation (PWA, Web-App) wurde dieses unterstützt.

Die Ziele des integrierten Pflanzenschutzes, die Anwendung von chemischen Pflanzenschutzmitteln auf das notwendige Maß einzuschränken, wurden mit der Entwicklung des ApfelPathosensors unterstützt. Der Anbau von Kernobst ist behandlungsintensiv, das heißt es werden eine hohe Anzahl an Spritzungen zur Gesunderhaltung der Kultur durchgeführt. Die Bestimmung des realen Sporenfluges direkt vor Ort in der Obstplantage in Kombination mit einer eigens für den Einsatz des ApfelPathosensors angepassten Warn- und Beratungssoftware, kann zu einer deutlichen Reduktionen der Fungizidanwendungen führen. Beim derzeitigen Stand der Technik kommt es im Obstanbau häufig zu einer starken Abdrift von Pflanzenschutzmitteln. Durch eine deutlich reduzierte Anzahl an Behandlungen werden daher viel weniger Pflanzenschutzmittel sowohl auf die Zielkultur als auch in die benachbarte Umwelt verbracht. Gleichzeitig werden weniger Fahrten zur und auf der Obstplantage selbst durchgeführt. Dadurch kommt es zu deutlich geringeren Emissionen und zu weniger Verdichtungen auf den Flächen. All das kann zu einer nachhaltigeren Landwirtschaft und zu einer verbesserten Biodiversität beitragen.

Nebenergebnisse

Als ein Nebenergebnis wurde die Grundlage zur Berechenbarkeit des Umwelteinflusses durch die eingesetzten Fungizide in die *amagrar* Datenbank implementiert. Die Werte basieren auf der aktuellen Vorlage für die Farm-to-Fork-Strategie der EU. Somit können nach einer Weiterentwicklung der Software im Anschluss an das Projekt, den Obstanbaubetrieben gezielt die Mittel vorgeschlagen werden, die unter Berücksichtigung aller praxisrelevanten Parameter, die günstigste Umweltbewertung haben und unmittelbar der Erreichung der gesteckten Ziele zur Reduktion des Pflanzenschutzmitteleinsatzes in der EU dienen.

Arbeiten, die zu keiner Lösung geführt haben

Es wurden keine Arbeiten durchgeführt, die zu keiner Lösung geführt haben.

V. Nutzen der Ergebnisse für die Praxis

Zum Ende des Projektes wurden Prototypen entwickelt. Die Erfahrungen aus dem Bau dieser technischen Prototypen können zur Weiterentwicklung hin zur Serienproduktion genutzt werden. Gleichzeitig stehen die gebauten Prototypen zur Verfügung, um diese in der Praxis (Testparzellen, Vorführungen) einzusetzen.

Die umfangreiche Bilddatenbank und die Software hinter dem maschinellen Lernen stehen der Praxis nur indirekt zur Verfügung, sie sind lediglich eine Komponente innerhalb des ApfelPathosensors zur Identifizierung von *Venturia inaequalis* Sporen. Eine direkte Nutzung der Datenbank durch Externe ist nicht vorgesehen.

Der Aufbau und die Programmierung des Dashboards und die Ergänzungen der Datenbanken im *amagrar* Expertensystem haben zu einem neuen Apfeltool geführt, das heute bereits eingesetzt werden kann. Das Ganze ist benutzerfreundlich eingerichtet, das Anlegen von Obstanbauflächen und die Rückmeldung von Bonituren und Pflanzenschutzmaßnahmen ist selbsterklärend und einfach gestaltet. Das Dashboard ist übersichtlich und beinhaltet alle wichtigen Prognosen zum Schorfinfektionsrisiko. Über diese Warn- und Beratungssoftware können bereits Behandlungsempfehlungen ausgesprochen werden, das unterstützt die Obstbauern dabei Fungizidmaßnahmen einzusparen.

Auch die Web-App kann bereits in der Praxis genutzt werden, sie versetzt die Nutzer*innen in die Lage auch mobil stets über die Risiken auf den Anbauflächen auf dem Laufenden zu sein und zeitnah Rückmeldungen über die Bestandessituation einzugeben.

VI. (Geplante) Verwertung und Nutzung der Ergebnisse

Auf längerfristige Sicht hin ist geplant, den technischen Prototyp des ApfelPathosensors zu verwenden, um in eine Serienproduktion zu investieren. Das während des Projektes entwickelte neue Apfel-Modul im *amagrar* Expertensystem zusammen mit der Web-App dient dazu, den ApfelPathosensor in die Anbaupraxis zu integrieren und die Kommunikation mit dem Nutzer sicherzustellen. Aufgrund der autonomen Arbeitsweise kann der ApfelPathosensor weltweit in Apfelanbaugebieten eingesetzt werden.

Bis es zur Serienproduktion kommt sollen zwischenzeitlich die im Projekt entwickelten Prototypen genutzt werden, um das System in Feldversuchen bei Obstanbauer*innen und vor allem Beratungsstellen, wie z.B. dem DLR Rheinpfalz, dem JKI in Dossenheim oder der Landwirtschaftskammer NRW zu validieren. Zu allen drei Institutionen bestehen Kontakte durch die OG-Mitglieder*innen. Auf einer Tagung, auf der der ApfelPathosensor vorgestellt wurde (Zukunftslandwirtschaft - Innovative Entwicklungen, 10. Nov. 2022) zum Beispiel, wurde mit Interessent*innen ein Praxistest am Standort Klein Altendorf, mit Begleitung der ansässigen Forschungseinrichtungen besprochen. Es ist geplant, gleichzeitig einerseits die Funktion und Zuverlässigkeit des ApfelPathosensors als auch andererseits die Beratungssoftware als eigenständige Lösung und parallel die Integration der Sporenflugdaten in die bestehenden Beratungsangebote zu prüfen. Dieses parallele Vorgehen soll die ausgefallene Praxissaison teilweise kompensieren. Außerdem soll die Zeit genutzt werden, um 1. das Produkt bekannter zu machen und 2. den Bedarf besser abschätzen zu können.

Kurzfristig ist geplant die Web-App um andere, im *amagrar* System bestehende, ackerbauliche Kulturen zu erweitern und Bestandes- und Neukund*innen in der kommenden Saison bereits zur Verfügung zu stellen.

VII. Wirtschaftliche und wissenschaftliche Anschlussfähigkeit

Es besteht die Überlegung, den ApfelPathosensor und das Softwarepaket rund um das maschinelle Lernen zukünftig zu nutzen, um den Flug anderer Sporen in weiteren landwirtschaftlichen Kulturen nachweisen zu können. Es werden sowohl andere Obstkulturen als auch eine Erweiterung der Methode auf Krankheiten von Gemüse- und ackerbaulichen Feldkulturen ins Auge gefasst. Dazu wären Umbauten an der Box notwendig und vor allem die Anlage weiterer umfangreicher Bilddatenbanken und das Training der Software zum maschinellen Lernen erforderlich.

VIII. Wo relevant: Nutzung Innovationsdienstleister (IDL)

Die Rolle als Vermittler zwischen der Operationellen Gruppe und dem LANUV hat der Innovationsdienstleister (IDL) sehr gut ausgefüllt. Mit Frau Leibrock hatte der IDL in NRW eine sehr gute Vertreterin. Sie war stets bei allen Fragen der OG da. Sie hat die OG während der gesamten Projektlaufzeit immer kompetent beraten und unterstützt, und das nicht nur bei den Mittelabrufen. Bei den OG-Treffen hatte sie immer ein offenes Ohr und hat Anregungen gegeben. Hervorzuheben ist auch ihr Engagement uns, trotz der besonderen Pandemie-Umstände, auf eine Möglichkeit für eine regionale Präsentation unseres Projektes in Präsenz hinzuweisen. Insgesamt war der Innovationsdienstleister eine große Hilfe für den reibungslosen administrativen Ablauf des Projektes.

IX. Kommunikations- und Disseminationskonzept

Kommunikation und Verbreitung der Ergebnisse

Zu Beginn des Projektes wurde ein Blog eingerichtet. Hier wurde bis heute in mehr als 20 Beiträgen über den aktuellen Stand im Projekt und über die Teilnahme an verschiedenen Veranstaltungen berichtet. Zu erreichen ist der Blog unter: www.amagrar.com/apfelpathosensor

Auf den Internetseiten der amagrar GmbH, des RiBa-Lab (Biologie III) RWTH Aachen und des externen Partners LemnaTec GmbH wurde jeweils auf das Projekt hingewiesen.

amagrar: <https://www.amagrar.com/home/forschungsprojekte/>

RWTH: <https://www.bio3.rwth-aachen.de/go/id/jniof>

LemnaTec: <https://www.lemnatec.com/imaging-and-artificial-intelligence-for-apple-scab-sensing/>

Das Projekt wurde auf verschiedenen Veranstaltungen Online und in Präsenz vertreten bzw. präsentiert:

- 4. Bundesweiter EIP agri Workshop für OG und IDL (Aug. 2020)
- 1. Digitalkonferenz „Innovationen in der Landwirtschaft“ (Okt. 2020)
- 5. Bundesweiter EIP agri Workshop für OG und IDL (Aug. 2021)
- ZeLE – Klimawandel & Landwirtschaft - Innovative Entwicklungen (Sept. 2021)
- 6. Europäische Fachtagung Kupfer als Pflanzenschutzmittel (Nov. 2021)

- Land- und Ernährungswirtschaft im (Struktur-)Wandel - Das Rheinische Revier geht voran – Messestand (Apr. 2022)
- 1. Agrarforschungstag NRW – Posterpräsentation (Sept. 2022)
- ZeLE – Zukunftslandwirtschaft - Innovative Entwicklungen – Poster (Nov. 2022)

In der Mai-Ausgabe der Fachzeitschrift „gartenbauprofi“ wurde im Jahr 2022 ein Artikel über das Projekt unter dem Titel „Digitalisierung im Obstanbau“ veröffentlicht.

Grundsätzliche Schlussfolgerungen

Die EIP-Förderung ist grundsätzlich sehr gut dazu geeignet, innovative Projekte voranzubringen und Ideen aus der Wirtschaft oder Wissenschaft in sehr enger Zusammenarbeit mit der Praxis zu verwirklichen. Der Verwaltungsaufwand ist manchmal etwas unüberschaubar und für OG-Partner ohne Erfahrung mit Forschungsvorhaben zunächst zu umfangreich und daher abschreckend, aber durch die Hilfe des Innovationsdienstleisters schlussendlich auch für unerfahrene Projektpartner gut zu bewältigen.

Die zum Teil sehr langen Wartezeiten bis zur Auszahlung von Finanzmitteln hatten zur Folge, dass der Leadpartner mehrfach die Einlagen auf das OG-Konto übernehmen musste, dieses führte hier nicht zu finanziellen Problemen, trägt aber großes Potential für Probleme in sich.

Insgesamt bleibt der OG ApfelPathosensor nur ein positives Gesamtfazit über das Projekt und die Förderung zu ziehen.

Danksagung

Ein großer Dank geht an alle, die am Projekt gearbeitet und die OG ApfelPathosensor in den letzten Jahren geformt haben.

amagrar GmbH	Dr. Marcel Thieron
RWTH, RiBa-Lab	Prof. Dr. Ulrich Schaffrath, Dr. Marco Löhner, Louisa Wirtz
Obstanbaubetriebe	Guido Brünagel, Rolf Clostermann, Aloysius Knein, Lothar Krämer, Dr. Andreas Mager, Ursula & Frank Roosen
Codezilla GmbH	David Enns, Nikolai Enns
LemnaTec GmbH	Dr. Robert Tietz, Dr. Marcus Jansen, Hans-Georg Luigs, Sascha Holzschneider, Markus Radermacher, Rüdiger Götz

Ein besonderer Dank geht an Prof. Dr. Ulrich Schaffrath, Dr. Marco Löhner und Dr. Marcel Thieron, die beim Schreiben des Abschlussberichts mit Ihren Korrekturen und zum Teil eigenen Textpassagen geholfen haben.

Alsdorf, Januar 2023

Nicole Spees, Projektkoordinatorin