

Projekt



INFRAPLANT

NDVI-basierte Früherkennung von Pflanzenstress

Fachgebiet

Technik

Wettbewerbssparte

Jugend forscht
Baden-Württemberg, 2026

Teilnehmer

Juri Müller-Sénécheau, (15 Jahre)
Droste-Hülshoff-Gymnasium, Freiburg

David Brücher, (17 Jahre)
Montessori Zentrum Angell, Freiburg

Erarbeitungsort

Marie-Curie-Gymnasium, Kirchzarten

Projektbetreuer

Wolfgang Wolff
Marie-Curie-Gymnasium, Kirchzarten

Projektüberblick und Kurzfassung

Mit unserem Projekt „InfraPlant“ wollen wir ein kostengünstiges, automatisiertes System zur großflächigen Untersuchung des Pflanzenzustands entwickeln. Dazu nutzen wir den **NDVI (Normalized Difference Vegetation Index)**, der auf der unterschiedlichen Reflexion von rotem und nahinfrarotem Licht durch gesunde bzw. gestresste Pflanzen basiert. Pflanzen reflektieren abhängig von ihrem Chlorophyllgehalt unterschiedlich viel rotes bzw. nahes Infrarotlicht.

Wir setzen eine Drohne mit zwei modifizierten GoPro-Kameras ein. Diese sind jeweils mit Filtern für den roten (660 nm) und den nahinfraroten (NIR, >715 nm) Spektralbereich ausgestattet.

Insgesamt lässt sich das Projekt in mehrere Teilgebiete aufteilen:

- Entwicklung eines Kamerasystems für den Rot- bzw. Infrarot-Bereich
- Feintuning und Bau der autonomen Drohne
- Entwicklung der Software für die Datenverarbeitung

Um den aktuellen Stand des Kamera-Moduls zu erreichen, waren mehrere Prototypen erforderlich. Der erste Proof of Concept diente als Beweis dafür, dass sich eine günstige Action-Cam für die Anfertigung von NDVI-Aufnahmen eignet. Im zweiten Schritt wurde durch den Umstieg auf eine andere Kamera die Bildqualität erhöht. Bei einem praktischen Versuch, bei dem Basilikumpflanzen unterschiedlichen Stressleveln ausgesetzt wurden, haben wir unser System getestet und Probleme festgestellt, die zu mangelhaften Ergebnissen bei der NDVI-Darstellung führten. Es folgten Tests und eine umfassende Problemanalyse, bei der wir mit Hilfe eines selbstgebauten Spektrometers ein Transmissionsdiagramm des verwendeten Filters erstellten. Auf Grundlage unserer Erkenntnisse entstand der dritte Prototyp. Dieser erreicht über zwei getrennte Kameras eine gute Spektraltrennung und qualitativ hochwertige Aufnahmen.

Auch die Software durchlief während ihrer Entwicklung mehrere Stufen. Anfangs wurden einzelne Bilder manuell und teilweise automatisch perspektivisch angeglichen und verrechnet. Durch den Einsatz von Open-Source-Kartierungssoftware können wir nun nicht nur einzelne NDVI-Bilder, sondern auch ganze, für die bequeme Auswertung geo-referenzierte Karten berechnen. Für die Erstellung dieser Karten wurden diverse Software-Tools entwickelt, die die Zwischenschritte weitgehend automatisieren.

Für den autonomen Drohnenflug zur Kartierung ausgewählter Flächen arbeiten wir mit einer Kombination aus Open-Source-Software und selbst entwickelten Programmen. Durch Fine-Tuning an der Flugsteuerung und viele Testflüge konnten wir den autonomen Flug optimieren.

Das Projekt stellte uns im Allgemeinen vor große Herausforderungen, da es im Internet nahezu keine Dokumentation ähnlicher Projekte gibt, die sich mit dem Bau eines NDVI-Systems befassen. Deshalb ist es uns besonders wichtig, unsere Erkenntnisse der Öffentlichkeit zur Verfügung zu stellen. Wir planen, unser Projekt Open Source zu machen.

Unsere Ergebnisse belegen, dass mit unserem System eine schnelle, objektive und flächendeckende Vegetationsanalyse mit kostengünstiger und leicht verfügbarer Technik möglich ist.

Derzeit entwickeln wir eine Technik, mit der sich der Wassergehalt von Pflanzen über Messungen im SWIR-Bereich bestimmen lässt.

Eine Kooperation mit einem Landwirt soll uns dabei helfen, unsere NDVI-Karten zu bewerten. Dazu prüfen wir die Bodenqualität und erkundigen uns nach den verschiedenen Ursachen schlechter NDVI-Werte.

Inhaltsverzeichnis

1.	Motivation und Fragestellung	5
2.	Hintergrund und theoretische Grundlagen	5
3.	Vorgehensweise, Materialien und Methoden	6
3.1.	Günstige, modifizierte Action-Cam	6
3.2.	GoPro 5 mit blauer Filterfolie	7
3.3.	Erste Entwicklungsstufe der Software zu Auswertung des Praxisversuchs	8
3.4.	Fehleranalyse	8
3.5.	Dual GoPro und neue Halterung	10
3.6.	Zweite Entwicklungsstufe der Software	10
3.7.	Daten-Logger zum Erfassen zusätzlicher Umweltdaten	11
3.8.	Umstieg vom manuellen Fliegen zur autonomen Navigation	12
3.9.	Dritte Entwicklungsstufe zur Kartierung	12
4.	Ergebnisse	14
5.	Fazit und Diskussion	14
6.	Ausblick	14
6.1.	Zusammenarbeit mit Landwirtschaft	14
6.2.	Infraplant 2.0	14
6.3.	Veröffentlichung als Open-Source-Projekt	15
7.	Quellenverzeichnis	16
8.	Unterstützungsleistungen	16
9.	Abbildungsverzeichnis	16

1. Motivation und Fragestellung

Ideenfindung

2025 hat unser Teammitglied David am CanSat-Wettbewerb teilgenommen. Bei diesem Wettbewerb ging es darum, einen Mini-Satelliten in der Größe einer Getränkedose zu bauen. Dieser wurde auf 1,5 km Höhe geschossen und musste auf dem Weg nach unten eine vom Team ausgearbeitete Mission erfüllen. Schon damals wurde versucht mit normalen Kameras in Kombination mit KI den Gesundheitszustand von Vegetation zu bestimmen. Dies ist nur ansatzweise gelungen. Bei der weiteren Recherche fiel auf, dass es bereits Satelliten-Systeme gibt, die mit Hilfe von NDVI Vegetations-Werte kartieren. David beschloss deshalb dieses Verfahren später nochmal in einem eigenen Projekt mit einem neuen Team genauer unter die Lupe zu nehmen. So wurde die Idee hinter InfraPlant geboren.

Fragestellung

Der Klimawandel stellt Pflanzen weltweit vor neue Herausforderungen: Hitze, Trockenheit und andere Umweltstressoren können die Gesundheit von Pflanzen deutlich beeinträchtigen und langfristig ganze Ökosysteme verändern. Da Pflanzen essenziell für unsere Nahrung, für Lebensräume und für das Klima selbst sind, ist es wichtig, Stress frühzeitig zu erkennen und zu verstehen, wie stark er ist. Klassische Methoden der Pflanzenbeurteilung, bei denen Personen einzeln Proben entnehmen oder Pflanzen visuell beurteilen, sind zeitaufwendig, subjektiv und oft nicht flächendeckend anwendbar. Genau hier setzt unser Projekt an. Ziel unseres Systems ist es eine günstige Möglichkeit zu entwickeln, mit der man die Vegetation schnell, objektiv und auch an schwer erreichbaren Stellen analysieren kann. Auch soll das System als Open-Source-Projekt veröffentlicht werden, da im Internet bisher keine ausreichenden Dokumentationen und Informationen über dieses Thema vorhanden sind. Unser Motto ist es, clevere Lösungen zu finden, um teure Technik zu ersetzen.

2. Hintergrund und theoretische Grundlagen

Die Fernerkundung-gestützte Erfassung des Vegetationszustands basiert auf der spezifischen Reflexionseigenschaft photosynthetisch aktiver Pflanzen. Gesunde Vegetation mit hohem Chlorophyll-Gehalt absorbiert einen Großteil des einfallenden roten Lichts (um 660 nm) während sie im nahen Infrarot-Bereich (NIR, 700–900 nm) stark reflektiert (siehe Abbildung 1).

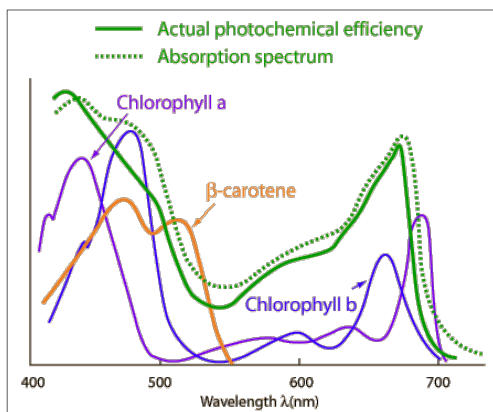


Abbildung 1: Absorptionsspektrum von Pflanzen

Quelle: <https://worldbuilding.stackexchange.com/questions/11547/alternative-absorption-spectra-for-plants>, Anonym, 06.03.2026

Diese Eigenschaft wird bei NDVI zu Nutze gemacht und lässt sich mit folgender Formel berechnen.

$$NDVI = \frac{NIR - Rot}{NIR + Rot}$$

Der berechnete Index gibt so Werte für die Chlorophyll-Dichte pro Fläche an. Anhand dieses Index kann man Rückschlüsse auf die Gesundheit der Pflanzen treffen. NDVI-Werte sind aber nie absolute Messwerte. Die Messwerte eignen sich lediglich zum Vergleichen verschiedener Pflanzen, nicht zum Messen des exakten Chlorophyll-Gehaltes.

Das NDVI-Verfahren wird seit Jahrzehnten in der satellitengestützten Fernerkundung eingesetzt und weltweit zur großflächigen Beurteilung von Vegetationsdichte und -vitalität benutzt.

Bisherige Ansätze zur NDVI-Erfassung im kleinen Maßstab – etwa für die Präzisions-Landwirtschaft oder ökologische Feldstudien – nutzen oft teure, spezialisierte Multispektral-Kameras. Uns ist es wichtig die Kosten und die Komplexität unseres Systems so weit wie möglich zu senken, damit möglichst viele Nutzer davon profitieren können. Die große Datengrundlage soll uns als Gemeinschaft helfen, besser gegen den Klimawandel kämpfen zu können.

Ebenfalls wichtig zu erwähnen ist, dass Multispektral-Drohnen, die sich für das NDVI-Verfahren eignen, hauptsächlich vom chinesischen Hersteller DJI verkauft und entwickelt werden. Nur in den USA gibt es kaum nennenswerte Konkurrenz. Europa hat nach unserer Recherche keine eigenen Alternativen zu diesen chinesischen bzw. amerikanischen Produkten. Hier sehen wir InfraPlant als eine mögliche Option und Alternative, die wir als Open-Source-Technologie zur Verfügung stellen wollen.

3. Vorgehensweise, Materialien und Methoden

3.1. Günstige, modifizierte Action-Cam

Bei unserem ersten Versuch haben wir eine möglichst günstige Action-Cam verwendet. Action-Cams werden sonst häufig im Sportbereich verwendet, wo man kleine und robuste Kameras braucht, um sportliche Aktivitäten zu filmen. Eine Action-Cam eignet sich für uns besonderes auf Grund ihrer geringen Größe und ihres geringen Gewichts, da wir eine Kamera benötigen, die an eine Drohne montiert werden kann.

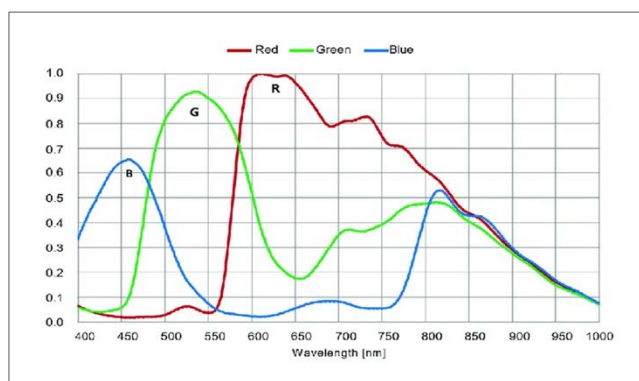


Abbildung 2: Typische Empfindlichkeit eines CMOS-Bildsensors
(Quelle: https://www.researchgate.net/figure/Spectral-sensitivity-for-a-typical-CMOS-sensor-37_fig1_371432862
uploaded by *M.J. (Thinus) Booysen*, 06.03.2026)

Speziell aber haben wir uns für ein preisgünstiges Kameramodell entschieden, um den Infrarotumbau der Kamera zu testen. Nach unserer Recherche kann jeder gewöhnliche CMOS-Sensor Bilder im Infrarotbereich aufnehmen, jedoch muss dazu ein IR-Block-Filter ausgebaut werden (Abbildung 2).

Wir haben dann auf die Kamera eine einfache blaue Filterfolie aufgebracht. Zu Beginn haben wir nur eine Kamera für die Lichtmessung im blauen und dem Infraroten Kanal verwendet. Dabei filtert der blaue Filter in der Theorie alle Wellenlängen außer den blauen und den infraroten heraus. Der rote Farbkanal der Kamera wird dazu verwendet, die Intensität des nahen infraroten Lichtes zu messen. Der blaue Kanal ist zudem wichtig, da er den ursprünglichen roten Kanal in der Formel der NDVI-Berechnung ersetzt. Abweichend von der verbreiteten Formel für NDVI, verwenden wir hier also das blaue und das infrarote Licht. Allerdings wurde dieser Versuch schnell beendet, da die verwendete Kamera einen zu geringen Dynamikumfang bot und wir deshalb keine verwertbaren Ergebnisse bekommen haben. Die Bilder der günstigen Action-Cam waren an den hellen Stellen schnell überbelichtet und an den dunkleren Stellen gab es keine Details mehr. Der Testaufbau hat aber die Machbarkeit des Infrarot-Umbaus bewiesen.

3.2. GoPro 5 mit blauer Filterfolie

Unsere Idee war es nun eine modifizierte Kamera mit höherer Qualität zu verwenden, die einen höheren Dynamikumfang hat. Wir haben weiterhin mit nur einer einzelnen Kamera gearbeitet, welche die blaue Filterfolie verwendet.

Um die Aussagekraft der Kameramessungen zu überprüfen, führten wir parallel einen kontrollierten Versuch mit Basilikum Pflanzen durch (Abbildung 3). Hierbei setzten wir die Pflanzen gezielt verschiedenen Wasserstressniveaus aus: Mehrere Pflanzen wurden jeweils in einen Topf mit der gleichen Menge an Erde gepflanzt. Eine Pflanzen-Wachstumslampe diente als gleichmäßige Lichtquelle. Diese leuchtete Tag und Nacht und emittierte das für das Pflanzenwachstum wichtige Licht.

Insgesamt wurden die Pflanzen in vier gleich große Gruppen mit je zwei Pflanzen eingeteilt. Die Gruppen bekamen alle zwei Wochen 20, 40, 60 und 80 ml Wasser. Die unterschiedliche Bewässerung führt bei den Pflanzen zu einem unterschiedlichem Stresslevel. Beispielsweise durch Überbewässerung oder durch Trockenheit.



Abbildung 3: Versuch mit Basilikumpflanzen im Keller

Die Intention war es zu beobachten, wie sich der Chlorophyll-Gehalt und damit die NIR-Reflexion der Pflanzen unter unterschiedlichen Stressbedingungen verändern. Ziel war es, die Messungen unseres Systems mit konkreten physiologischen Veränderungen zu vergleichen. Außerdem ließen sich so die

Stressreaktionen im zeitlichen Verlauf beobachten, da Pflanzen nicht sofort, sondern schrittweise auf Wassermangel oder -überschuss reagieren. Dieser Versuch half uns, die Zuverlässigkeit unseres Systems einzuschätzen.

3.3. Erste Entwicklungsstufe der Software zu Auswertung des Praxisversuchs

Beim Erstellen von NDVI-Aufnahmen mit den Bildern der modifizierten GoPro entsteht zunächst ein Schwarz-Weiß-Bild. Jeder Pixel repräsentiert mit seiner Helligkeit das Ergebnis der Berechnung, welche anhand der Formel vollzogen wurde. Da man aus der Darstellung wegen zu geringem Kontrast keine Erkenntnisse ziehen konnte, haben wir mit Hilfe von KI ein Python-Tool programmiert. Dieses Tool wendet nach dem Berechnen der NDVI-Darstellung eine Color-Map auf die ursprünglich schwarz-weiße Darstellung an. Eine grüne Fläche (entspricht dem NDVI-Wert von 1) steht für einen Bereich in dem viel Photosynthese betrieben wird. Gelbe Flächen (entspricht dem NDVI-Wert von 0) markieren Stellen, an denen keine Photosynthese stattfindet. An roten Stellen (entspricht dem NDVI-Wert von -1) verhält sich die Reflektion der betrachteten Wellenlängen genau gegensätzlich zu den charakteristischen Reflektions-Mustern von Pflanzen.



Abbildung 4: Linkes Bild Rohdaten. Rechtes Bild erste berechnete NDVI-Darstellung mit Color-Map

Die berechneten Darstellungen (Abbildung 4) waren allerdings noch nicht zuverlässig. Zwar wurden Pflanzen als grün dargestellt (stellvertretend für eine hohe Chlorophylldichte), jedoch geschah das beispielsweise auch für die weiße Platte im Hintergrund, welche keinerlei photosynthetische Aktivität aufweisen sollte. Diese sollte eigentlich einen Wert gegen 0 oder tiefer aufweisen.

3.4. Fehleranalyse

Die falsche Darstellung verschiedener Objekte in der NDVI-Darstellung konnte verschiedene Gründe haben. Eine Hypothese, die wir genauer untersuchten, war die eventuell mangelnde Qualität der bisher verwendeten blauen Folie als Filter. Hierbei handelt es sich um einfache Absorptionsfilter, die normalerweise für Bühnenscheinwerfer verwendet werden. In einem Test mit einem selbstgebauten Spektrometer (Abbildung 5) haben wir ein Transmissionsdiagramm der blauen Filterfolie erstellt. Praktisch umgesetzt wurde der Versuch mit einer 3D-gedruckten Halterung, in die man den untersuchten Filter einspannt, und hinter der sich lichtgeschützt, ein Sparkfun AS7343 Spektralsensor befand. Die Sensordaten des Spektralsensors wurden von einem Arduino UNO R4 Wifi ausgelesen. Als Lichtquelle wurde ein Halogenstrahler verwendet. Dieser stellte sich als beste Wahl heraus, da er

ein sehr breites Lichtspektrum emittiert, das bis in den Infrarotbereich reicht. Moderne LEDs bieten sich für den Versuch nicht an, da diese nahezu kein Infrarotlicht emittieren.



Abbildung 5: Selbstgebautes Spektrometer

Um herauszufinden wieviel des vom Strahler abgestrahlten Lichts durch die Folie transmittiert, wurde eine Lichtmessung für jeden Kanal des Spektrometers ohne Filter durchgeführt und anschließend eine Messung für jeden Kanal des Spektrometers mit Filter. Wenn nun die Intensitätsmesswerte jedes Kanals des Sensors mit Filter, durch die Intensitätswerte jedes Kanals ohne Filter geteilt werden, ergibt sich für jeden Kanal ein prozentualer Transmissionswert (Abbildung 6). Die Ergebnisse dieser Berechnung wurden entsprechend ihrer Wellenlänge in ein Diagramm eingetragen.

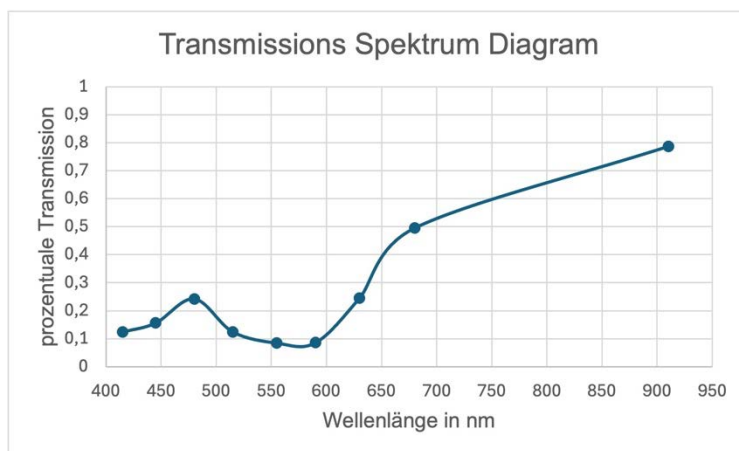


Abbildung 6: Transmissionsdiagramm der blauen Filterfolie

Das gemessene Transmissionsdiagramm bietet viele Aufschlüsse. Es zeigt klar einen Peak bei einer Wellenlänge von circa 480 nm, was der Wellenlänge von Blau entspricht. Sehr interessant ist aber der Verlauf des Diagramms für die Wellenlängen ab circa 630 nm. Hier zeigt der Graph einen deutlichen Anstieg der Transmissionsrate, die im nahen Infrarotbereich sehr hohe Werte annimmt. Für unser angewandtes Verfahren, bei dem nur eine Kamera mit einem blauen Filter verwendet wird, ist die Transmission im nahen Infrarotbereich sehr wichtig, jedoch dürfte der Graph nicht so früh ansteigen. Der Messung nach zufolge lässt der blaue Filter auch schon rotes Licht transmittieren. Dies verfälscht die Messwerte, was zu schlechten Ergebnissen bei der Darstellung der NDVI-Werte führen kann. Der ursprüngliche rote Kanal sollte eigentlich nur zur Messung des Infrarotlichts dienen. Wenn nun fälschlicherweise rotes Licht auf den Kamerasensor fällt, wird auf dem roten Kanal nicht nur das Infrarotlicht gemessen, sondern auch das zusätzliche rote Licht, das eigentlich gar nicht hätte durch den

Filter transmittieren sollen. Das resultiert schlussendlich in zu hohen Messungen des nahen Infrarotlichts. Unser günstiger blauer Filter trennte also die blauen Wellenlängen nicht gut genug von den roten Wellenlängen. Ein Lösungsansatz für dieses Problem ist die Verwendung von hochwertigen Interferenzfiltern.

3.5. Dual GoPro und neue Halterung

Wir haben festgestellt, dass wir mit der blauen Filterfolie keine zufriedenstellenden Ergebnisse erzielen können. Darum haben wir beschlossen, für eine saubere Spektral-Trennung zwei Kameras zu verwenden. Eine, die nur das NIR (ca. 700-900 nm) Spektrum aufnimmt und eine weitere Kamera, die das rote Spektrum aufnimmt (ca. 660 nm).

Sowohl beim Einsatz der GoPro-Kameras auf einem Stativ als auch an der Drohne, ist eine stabile Halterung der GoPros notwendig. Dabei sollen die Kameras in der Vorrichtung sicher und geschützt sein. Darüber hinaus sollte man die Vorrichtung mit den Kameras einfach von der Drohne lösen können. Bei der Konstruktion der Kamerahalterung (Abbildung 7) wurde auf die Minimierung der Abstände zwischen den Linsen geachtet. Ist dies nicht der Fall, ergeben sich vor allem bei der Untersuchung von Objekten, die nah an der Linse liegen Probleme, da die GoPros Bilder aus leicht unterschiedlichen Perspektiven aufnehmen. Dieser Effekt wird minimiert, indem man den Abstand zum zu untersuchenden Objekt maximiert. Jedoch verschwinden diese perspektivischen Verschiebungen nie vollständig.

Weitere wichtige Anforderungen, die bei der Konstruktion der Halterung beachtet wurden, ist die Minimierung des Gewichts und der Größe. Außerdem wurden Aussparungen für Bedienelemente der Kameras berücksichtigt und Öffnungen für den Ladeport eingeplant. Mithilfe von 6 Schrauben lässt sich eine Adapterplatte aus TPU-Kunststoff (das TPU dient zur Absorption von Vibrationen) an die Kamerahalterung montieren. Mit der Adapterplatte können die Kameras fest und schnell an der Drohne montiert werden. Die Kamerahalterung bietet zudem die Möglichkeit, die benötigten Filter so zu montieren, dass sich leicht entfernen lassen, um sie zu reinigen oder auszutauschen.

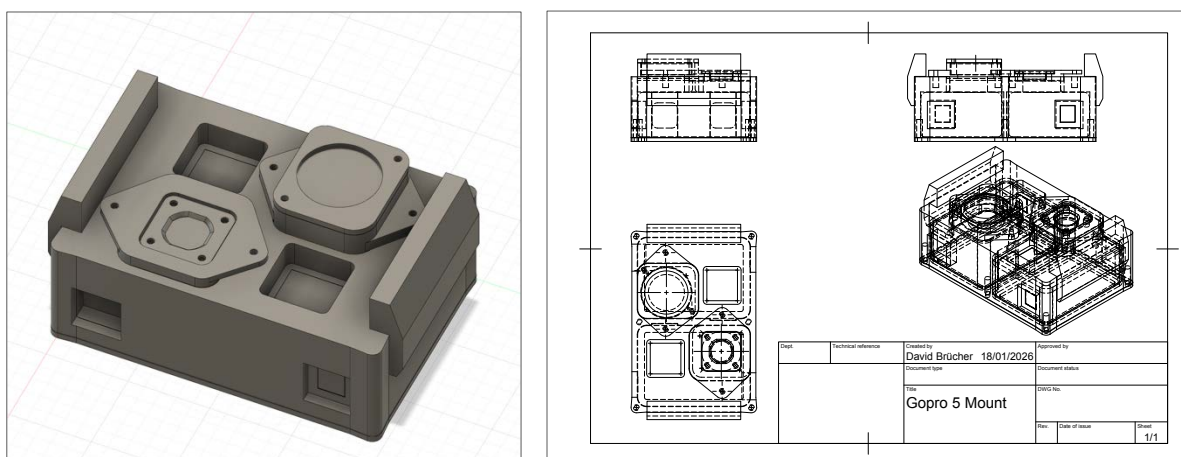


Abbildung 7: Konstruktion GoPro Cage

3.6. Zweite Entwicklungsstufe der Software

Um aus den Bildern eine NDVI-Darstellung zu errechnen, müssen die Rohdaten zunächst genau „übereinanderlegt“ werden. Wir haben mit Hilfe von KI ein Tool programmiert, mit dem man Bilder „übereinanderlegen“ kann und dann die Skalierung, Verschiebung und Verzerrung manuell anpassen

kann. Bei unserem Beispiel wurde aus einer sehr geringen Entfernung fotografiert, weshalb die perspektivische Angleichung nicht ganz genau funktioniert, bei größerer Distanz existiert das Problem nicht in diesem Maße. Jedoch wird man dieses Problem nie ganz los, wenn sich Objekte in einem Bild befinden, die unterschiedliche Entfernungen zur Kameraeinheit haben.

Nachdem wir die Bilder angeglichen und abgespeichert haben, wird jetzt noch die NDVI-Darstellung berechnet. Dazu haben wir mit KI ein Werkzeug programmiert (Abbildung 8), in das man die Bilder hochladen kann. Das Berechnen der NDVI-Darstellung funktioniert gut. Tote Materie wird von der Software, im Gegensatz zum Ansatz mit der blauen Filterfolie, problemlos von pflanzlicher Materie unterschieden.

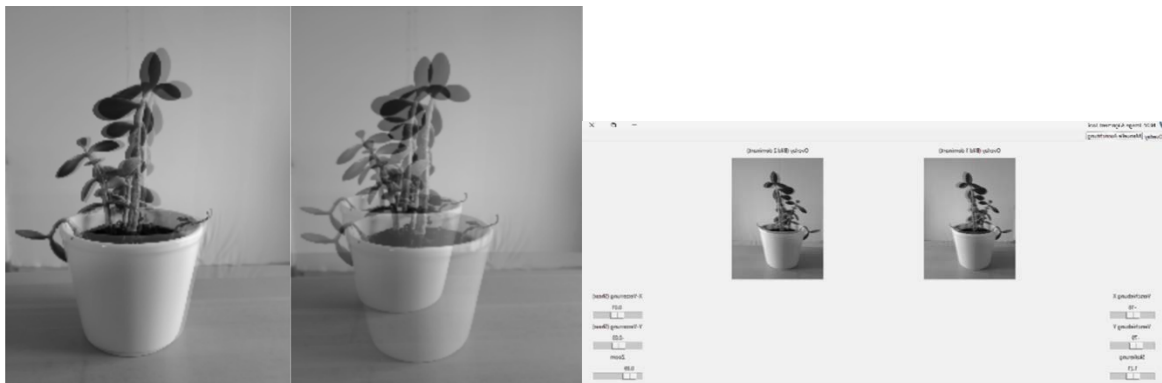


Abbildung 8: Tool zum Angleichen der Perspektive

Wie man in Abbildung 9 sehen kann, sind die gesunden Pflanzen hellgrün, während tote Pflanzen oder Objekte, die keine Pflanzen sind, gelb oder braun dargestellt werden. Damit können wir gesunde und kranke Pflanzen mit einem hohen bzw. niedrigem Chlorophyll-Gehalt auf dem Bild ausfindig machen. Da unser System alle Pflanzen grün markiert, die man auch anhand ihrer Form als Pflanzen ausgemacht hätte, beweist dies die grundsätzliche Funktion des Systems.

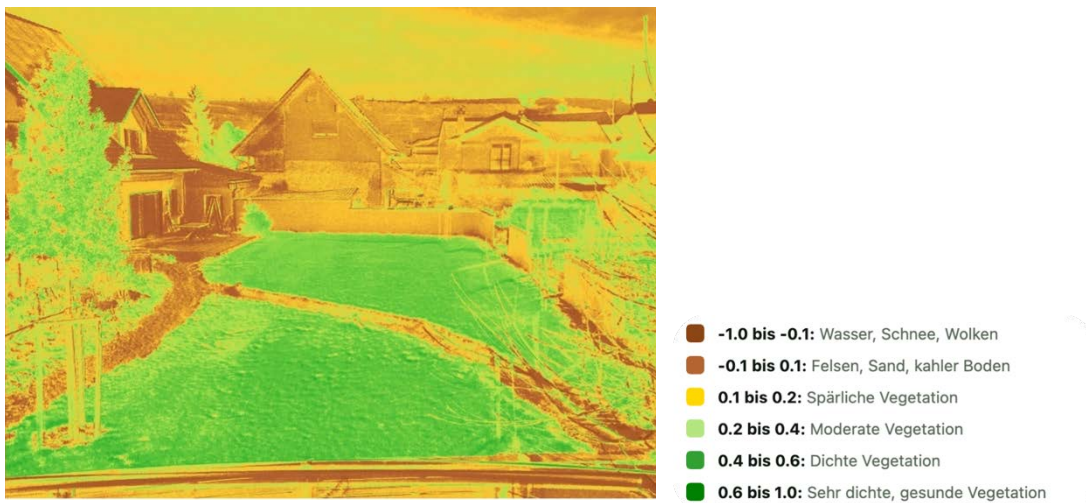


Abbildung 9: Erste Aufnahmen mit der Dual GoPro

3.7. Daten-Logger zum Erfassen zusätzlicher Umweltdaten

Für den späteren, voraussichtlich autonomen Drohnen-basierten Einsatz des NDVI-Systems brauchen wir eine Möglichkeit, beide Kameras zeitlich zu synchronisieren. Es wäre außerdem hilfreich, wenn man zu den aufgenommenen Bildern die passende Position hätte, an dem die Bilder aufgenommen wurden.

Eine weitere Messung, die bei der Datenauswertung nützlich wäre, ist die Intensität des Umgebungslichts. In einer weiterentwickelten Version unseres Systems sollen diese Helligkeitsmessungen dazu dienen, die NDVI-Werte von verschiedenen Flügen zu vergleichen und um ungleichmäßige Sonneneinstrahlung berücksichtigen zu können.

Um diese Anforderungen zu erfüllen haben wir ein auf einem Arduino Nano basierendes Gerät entwickelt, das zusätzlich an der Oberseite der Drohne befestigt werden soll. Unsere Idee liegt darin, eine Videoaufnahme auf beiden GoPros zu starten. Das von uns entwickelte Gerät greift das Arming Signal (Startsignal, dass die Motoren starten lässt) der Drohne ab und spielt dann einen kurzen Ton ab. Dieser Ton dient zur späteren Synchronisation der GoPro-Aufnahmen mittels der Ton-Spur. Ab diesem Ton startet außerdem ein Time-Code auf dem Arduino. In regelmäßigen Abständen werden die Helligkeitswerte des Sensors zusammen mit dem dazugehörigen Zeitstempel auf einer SD-Karte gespeichert.

3.8. Umstieg vom manuellen Fliegen zur autonomen Navigation

Für den autonomen Flug der Drohne (Abbildung 10) mussten wir uns intensiv mit „INAV“ auseinandersetzen. „INAV“ ist eine Software, die es unserer selbstgebaute Drohne ermöglicht, anhand vorprogrammierter Waypoints eine Route automatisch abzufliegen. Dies gestaltete sich nicht ohne Schwierigkeiten. So musste beispielsweise der Kompass der Drohne konfiguriert und kalibriert werden, damit er funktioniert, ohne dass die magnetischen Felder der Motoren diesen stören. PID-Parameter mussten über mehrere Testflüge so optimiert werden, dass die Drohne ihren vorgegebenen Kurs beibehält und nicht in Schwingungen gerät. Außerdem haben wir eine Software entwickelt, die es ermöglicht, Web-basiert Flächen auszuwählen, die kartiert und untersucht werden sollen. Unsere Software generiert dann eine effiziente Flug-Route in Gitter-Form, die dann auf der Drohne gespeichert werden kann.



Abbildung 10: Drohne mit Kameramodul

3.9. Dritte Entwicklungsstufe zur Kartierung

Um ganze NDVI-Karten zu erstellen, haben wir zunächst versucht ein eigenes Feature-Matching-Tool als Python-Programm zu entwickeln. Dieses sollte anhand der Überlappung der Video-Frames und mit Hilfe der Python-Bibliothek „OpenCV“ und dem Algorithmus „ORB“ (**O**riented **F**ast and **R**otated **B**rief) die

Einzelbilder zusammensetzen. Damit hatten wir nur Erfolg bei Testbildern aus Google-Maps, jedoch nicht mit unseren eigenen Drohnen-Bildern. Wir erkannten schnell die Komplexität und die Rechenleistung, die ein solches Verfahren mit sich bringt und haben nach Alternativen gesucht. So sind wir schließlich auf „OpenDroneMap“ gestoßen, eine Open-Source-Kartierungssoftware, die mittels Photogrammetrie aus Bilddaten detaillierte 3D-Modelle und darauf basierend auch orthografische Karten erstellt. Die orthografischen Karten eignen sich perfekt für unsere Zwecke, da sie linear sind und nicht auf eine Perspektive bezogen sind. Ein von uns eigens entwickeltes Programm verrechnet die „rote“-Karte mit der „infraroten“-Karte zu einer NDVI-Karte. Das Ergebnis ist eine NDVI-Karte im tif-Format, das sich beispielsweise in Google Earth direkt als Overlay öffnen lässt. Eine erhebliche Qualitätsverbesserung haben wir erreicht, indem wir die einzelnen Frames, vor dem Zusammensetzen zu einer Karte, in den Metadaten mit GPS-Koordinaten versehen haben. Dazu extrahieren wir nach jedem Drohnen-Flug aus den sogenannten Blackbox-Daten der Drohne, die GPS-Position der Drohne zu jedem Zeitpunkt, und kombinieren diese mit einem eigenen Tool mit den Bilddaten. So ist jeder Pixel der späteren geoTiff-Datei mit echten Koordinaten verknüpft, was die Auswertung der Daten bequemer macht.

Die Belichtung der einzelnen Bilder hat eine sehr große Auswirkung auf die Qualität der NDVI-Darstellung. Weil der rote Filter und der Infrarotfilter unterschiedlich viel Licht transmittieren, ist es nicht möglich die Bilder mit einheitlichen Kameraeinstellungen aufzunehmen. Die besten NDVI-Ergebnisse werden dadurch erzielt, indem die Helligkeit der Bilder in der Nachbearbeitung manuell so angepasst wird, dass beide Bilder mit dem Auge betrachtet ungefähr die gleiche Helligkeit haben.

Der gesamte Ablauf des Prozesses wird in Abbildung 11 gezeigt.

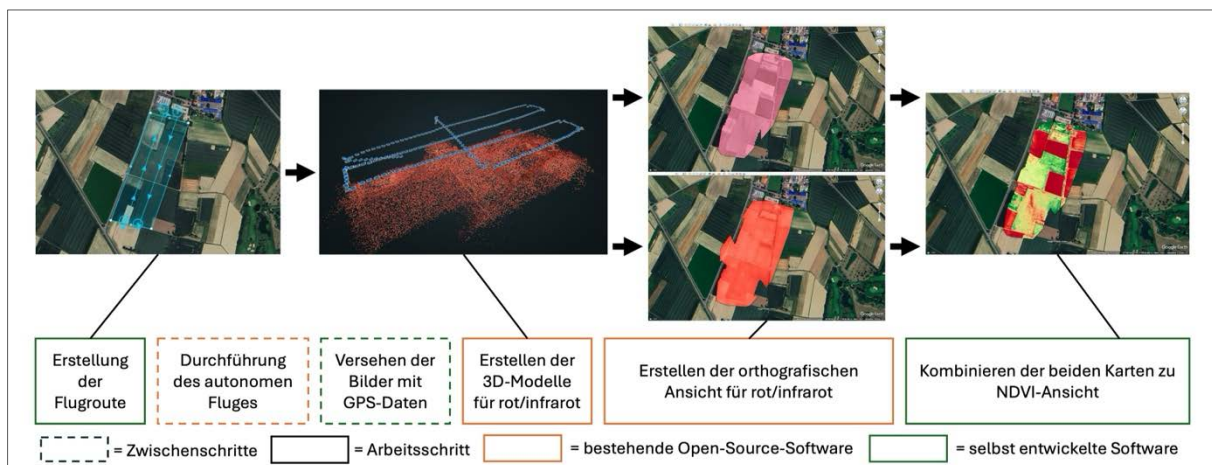


Abbildung 11: Workflow der Kartenerstellung

4. Ergebnisse

Die Bilder für sich sind mit der Dual GoPro-Methode aussagekräftig. Wie man in Abbildung 12 sehen kann, sind die gesunden Pflanzen hellgrün, während tote Pflanzen oder Objekte, die keine Pflanzen sind, gelb oder rot dargestellt werden. Damit können wir gesunde und kranke Pflanzen mit einem hohen bzw. niedrigem Chlorophyll-Gehalt auf dem Bild ausfindig machen. Da unser System alle Pflanzen grün markiert, die man auch anhand ihrer Form als Pflanzen ausgemacht hätte, beweist dies die grundsätzliche Funktion des Systems.



Abbildung 12: NDVI-Karte

5. Fazit und Diskussion

Das Projekt zeigt, dass eine kostengünstige NDVI-Analyse mit handelsüblichen Kameras technisch realisierbar ist. Das entwickelte System ermöglicht eine deutliche Unterscheidung verschiedener Vegetationszustände und stellt eine preiswerte Alternative zu kommerziellen Lösungen dar.

Für genauere Ergebnisse wäre es sinnvoll, die Kameras auf ihre Empfindlichkeit zu verschiedenen Wellenlängen zu testen. Weitere Störfaktoren, die theoretisch in unserem Aufbau die Qualität der Ergebnisse negativ beeinflussen könnten, wären Vignettierung oder chromatische Aberration.

6. Ausblick

6.1. Zusammenarbeit mit Landwirtschaft

Für die Zukunft planen wir unser funktionierendes System auf seine Grenzen und Praxistauglichkeit zu testen. Wir möchten feststellen, wie zuverlässig unser System ist und was wir noch verbessern müssen. Dazu haben wir eine Kooperation mit einem Landwirt begonnen. Wir werden mit unserem System seine Felder und Wiesen in regelmäßigen Abständen kartieren. In Kombination mit Bodenproben und Umweltdaten möchten wir die Ursachen schlechter Vegetationswerte untersuchen und auf Grundlage dieser Messungen unsere Karten bewerten.

6.2. Infraplant 2.0

Eine hohe Priorität für die weitere Entwicklung unseres Systems hat die Erfassung und Auswertung weiterer Wellenlängen. Wir wollen das Potential der drohnengestützten Fernerkundung voll ausschöpfen und Pflanzen mit Wellenlängen untersuchen, die aufgrund der Atmosphäre für Satelliten

nicht nutzbar sind. Genauer gesagt finden wir den SWIR (kurzwelliger Infrarotbereich) Bereich interessant, da Messungen in diesem Bereich auf den Wassergehalt der Pflanzen schließen lassen. Um die Funktionsweise zu beweisen, wollen wir zunächst einen Demonstrator bauen, der mit Hilfe einer speziellen InGaAs-Fotodiode und Infrarot-LEDs in einem abgedunkelten Raum, einzelne Blätter auf ihren Wassergehalt untersuchen soll. Später, so die Idee, soll eine einzelne Fotodiode, die an der Drohne angebracht ist, den Untergrund abtasten. Anstatt teure InGaAs-Bildsensoren zu verwenden, wollen wir die Kosten deutlich senken.

Das Motto unseres Projektes liegt darin, clevere Lösungen zu entwickeln, um qualitativ gleiche oder sogar bessere Ergebnisse wie mit teuren Systemen zu erhalten. Die Nutzung der Wellenlängen im kurzwelligen Infrarot-Bereich wäre, laut unserer Recherche, eine Innovation im Bereich der Multispektraldrohnen.

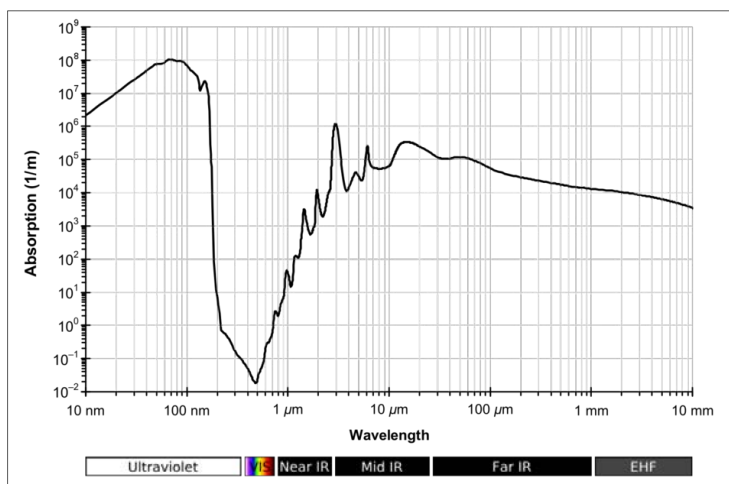


Abbildung 13: Absorptionsspektrum Wasser

Quelle: https://de.wikibooks.org/wiki/Datei:Absorption_spectrum_of_liquid_water.png, Anonym, 06.03.2026

6.3. Veröffentlichung als Open-Source-Projekt

Schon seit Beginn unseres Projektes war es uns wichtig, unser System aus einfachen und leicht erschwinglichen Komponenten zu entwickeln. Den Gedanken, das Projekt als Open-Source-Projekt zu veröffentlichen, hatten wir schon früh und daran halten wir immer noch fest. Für die Zukunft ist es geplant, Bauanleitungen, Software sowie 3D-Modelle der Öffentlichkeit beispielsweise auf „Codeberg“ zur Verfügung zu stellen.

7. Quellenverzeichnis

Wikipedia: https://de.wikipedia.org/wiki/Normalized_Difference_Vegetation_Index: 06.03.2026

Public Lab: <https://publiclab.org/-/wiki/ndvi>: 06.03.2026

Fe-Lexikon: fe-lexikon.info: 06.03.2026

8. Unterstützungsleistungen

Herr Wolfgang Wolff hat uns im Rahmen des Freiburg-Seminars bei der Organisation unterstützt.

ChatGPT so wie Manus AI wurden ausschließlich zur Erstellung der Codes für die Auswertungssoftware verwendet.

9. Abbildungsverzeichnis

Abbildung 1: Absorptionsspektrum von Pflanzen	5
Abbildung 2: Typische Empfindlichkeit eines CMOS-Bildsensors	6
Abbildung 3: Versuch mit Basilikumpflanzen im Keller	7
Abbildung 4: Linkes Bild Rohdaten. Rechtes Bild erste berechnete NDVI-Darstellung mit Color-Map ..	8
Abbildung 5: Selbstgebautes Spektrometer.....	9
Abbildung 6: Transmissionsdiagramm der blauen Filterfolie	9
Abbildung 7: Konstruktion GoPro Cage	10
Abbildung 8: Tool zum Angleichen der Perspektive	11
Abbildung 9: Erste Aufnahmen mit der Dual GoPro	11
Abbildung 10: Drohne mit Kameramodul	12
Abbildung 11: Workflow der Kartenerstellung.....	13
Abbildung 12: NDVI-Karte.....	14
Abbildung 13: Absorptionsspektrum Wasser	15