Abschlussbericht

Sachbericht zum Abschlussnachweis

Zuwendungsempfänger:

Technische Universität Ilmenau
PF 10 05 65
98684 Ilmenau

Förderkennzeichen: 03WIR3603
Kassenzeichen: ANB23620090

Thema:
„Basistechnologieevaluation WIR!-Holz-21-regio Startervorhaben II“

Projektlaufzeit: 01.10.2022 – 31.05.2024

Berichtszeitraum: 01.10.2022 - 31.05.2024

TU Ilmenau
Fachgebiet Qualitätssicherung und Industrielle Bildverarbeitung
Univ.-Prof. Dr. rer. nat. Gunther Notni

GEFÖRDERT VOM
Bundesministerium für Bildung und Forschung

Die Verantwortung für den Inhalt dieser Veröffentlichung liegt beim Autor.

Inhaltsverzeichnis

Inhaltsverzeichnis 2
Abbildungsverzeichnis 3
Tabellenverzeichnis 4
I Kurze Darstellung 5
1. Gesamtziel des Startervorhabens 5
2. Stand der Wissenschaft und Technik – Ausgangssituation der Region 5
2.1 2D- und 3D-Sensorik 5
2.2 Multispektrale Sensorik 5
2.3 Bewegungssysteme/Schreitsysteme 6
3. Planung und Ablauf des Vorhabens 6
4. Wesentliche Ergebnisse 7
II Eingehende Darstellung 9
1.1 Wissenschaftlich-technische Ergebnisse 9
1.1.1 Vordefinition Umweltparameter – Vorbereitung Versuchsfläche 9
1.1.2 AP1 Untersuchung Basistechnologien 2D-3D-Bilderfassung und Bildverarbeitung für den Einsatz in Wald- und Forstwirtschaft 13
1.1.3 AP2 Untersuchung Basistechnologien multispektraler Bilderfassung und Bildverarbeitung für den Einsatz in Wald- und Forstwirtschaft 17
1.1.4 AP3 Untersuchung Basistechnologien verschiedener bodendruck-armer Bewegungssysteme für den Einsatz in Wald- und Forstwirtschaft 30
1.2 Notwendigkeit und Angemessenheit 36
1.3 Nutzen und Verwertbarkeit im Sinne des Verwertungsplanes 36
1.4 Fortschritt bei anderen Stellen 36
1.5 Erfolgte Veröffentlichung 37
1.6 Referenzen 37

Abbildungsverzeichnis

Abbildung 1: Typische Fläche nach Kahlschlag. Hindernisse wie Wurzelteller, Äste sowie auch starke Gefälle stellen hohe Anforderungen an die technische Unterstützung im klimaresilienten Waldumbau 6
Abbildung 2 Außentechnikraum mit Demonstrator aus AP2 8
Abbildung 3 Gelände der Versuchsfläche in Cursdorf. 9
Abbildung 4 Ermittelte Windgeschwindigkeiten auf der Versuchsfläche Cursdorf 10
Abbildung 5 Einfluss der Belichtungszeit I auf eine sich im Wind bewegente Douglasie 10
Abbildung 6 Auf der Versuchsfläche in Cursdorf einfallende Solarstrahlung über einen Tag. Messzyklus der Installierten Wetterstation alle 15 Minuten..... 11
Abbildung 7 Lufttemperaturen auf der Versuchsfläche während der Wachstumsperiode Oktober 2023 bis Mai 2024 12
Abbildung 8 Spektrale Zusammensetzung des Sonnenlichtes nach durchschreiten der Erdatmosphäre [2] 12
Abbildung 9 Beispiel Szene "Plants" [3] (oben, links), Disparitätskarten erstellt mit IGEV-Stereo [15] (oben, mittig), RAFT-Stereo [16] (oben, rechts), CREStereo [17] (unten, links), SDR [18] (unten, mittig) (ZBS e.V.). und klassisches SGBM (unten, rechts) (TU-I) 15
Abbildung 10 3D-Falschfarbendarstellung eines Kieferzweiges (links) und 2D-Realfarbaufnahme (rechts) 16
Abbildung 11 Ausschnitt einer mittels Stereomatching generierenten 3D-Punktewolke mit Baumstumpf und Winterlinden 17
Abbildung 12 Beispiel aus dem erstellten Datensatz: Reflexionsspektrum eines Buchenblatts unter Wassermangel 22
Abbildung 13 Links: Spektralkamerapaar aus zwei Basler acA1300 – 60 gm(NIR), Rechts: Kameras im Schwenk-Neigekopf: „Axis T99“ 25
Abbildung 14 Demonstratoraufnahme einer Wiese mit Blumen, links nach rechts: 830 nm -Kanal, 630 nm-Kanal, charakteristisches Ergebnis mittels ORB-Punktmatching,, Überlappung mittels unseres Wavelet Approach..... 25
Abbildung 15 RGB Aufnahmen und mittels Demonstrators aufgezeichnete NDVI Falschfarbenbilder einer Douglasie und Birke auf der Versuchsfläche 26
Abbildung 16 NDVI Verlauf der Douglasie zwischen 21 August und 1 November. 2% und 6% Gesundheitsgrenzen ermittelt aus dem Mittelwert der ersten 10 Messungen 26
Abbildung 17 NDVI Verlauf der Birke zwischen 21 August und 1 November. 2% und 6% Gesundheitsgrenzen ermittelt aus dem Mittelwert der ersten 10 Messungen 27
Abbildung 18 Baumharz in verschiedenen Polymerisationszuständen: frisch- Gelb und alt-Blau. Auf Verschieden Forsttypischen Trägermaterialien: 0– Harzknolle ohne Trägermaterial als Referenz, 1– innere Rinde, 2– Moos, 3 und 4 – äußerer Rinde 28
Abbildung 19 Mittels des NDRI (Gleichung 1) berechnete Indexbilder für die Proben in Abbildung 18 29
Abbildung 20 Übersicht der verschiedenen Faktoren im Forst..... 32
Abbildung 21 Robotnik „RB-Watcher“ (schwarz-silber, unten links) und Boston Dynamic „Spot“ (gelb, mittig oben) im hohen Gras bzw. Wildhimbeeren auf der Versuchsfläche. Der Spot ist vollständig im Gras „versunken“ 35

Tabellenverzeichnis

Tabelle 1 Auswahl aktueller am Markt verfügbarerer 3D-Gesamtsysteme *14*
Tabelle 2 Übersicht über aktuelle für den Forst geeigneter Spektralsysteme *20*
Tabelle 3 Typische Vegetation Indizes mit Wellenlängenbereich. Geordnet nach Messgröße *21*
Tabelle 4 Minimal benötigte Kombination an spektralen Kanälen für die Erfassung der Gesundheit von Forstpflanzen *23*
Tabelle 5 Zusammenfassung der Kamerasysteme für den Forst *24*
Tabelle 6: Spezifische Bodendrücke verschiedener Maschinen/Objekte auf dem Waldboden *30*
Tabelle 7 Übersicht ausgewählte Robotersysteme *31*
Tabelle 8 Anforderung an die Schreitrobotik und die Erfüllung durch den „Spot“ *33*

I Kurze Darstellung

1. Gesamtziel des Startervorhabens

Das zentrale Ziel des Startervorhaben Basistechnologieevaluation ist die gezielte Informationsgewinnung für weitere Forschungsvorhaben bezüglich technologischer Innovationen für das Bündnis Holz-21-regio. Hierfür werden neueste Technologien und Systeme die aktuell am Markt verfügbar sind unter dem Gesichtspunkt der Nutzung im forst- und holztechnischen Umfeld evaluiert. Besonderes Augenmerk soll hierbei auf den Innovationsbereich klimaresilienter Waldumbau gelegt werden. Hier sieht der Antragsteller sehr große Potenziale für die Entwicklung neuer bildgebender Sensoren mit multimodaler Auswertung. Ausgehend von Technologien, die dem Antragsteller bereits im Haus vorliegen, aber auch neue Technologien, die zum Teil in Zusammenarbeit mit Unterauftragnehmern und Technologiepartnern untersucht werden, bilden das Fundament wichtiger Technologieuntersuchungen für zukünftige Forschungsinhalte des Bündnisses. Neben den Basistechnologieevaluationen im Bereich der Sensorik sollen ebenfalls Untersuchungen hinsichtlich möglicher Bewegungskonzepte in verschiedenen realen Testszenarien gesammelt werden. Diese bilden informationstechnisch die Grundlage für Neuentwicklungen von Spezialkinematiken im Rahmen von Forschungsprojekten vor dem Hintergrund der Bewegung in typischen Mittelgebirgsflächen (teilweise sehr steil, komplizierte Hindernisse (Bestockung)). Die gesammelten Informationen hinsichtlich der Basistechnologieevaluationen werden im Rahmen dieses Technologieberichtes für die Vorbereitung neuer Forschungsansätze auf diesem Gebiet sowie zur Weiterentwicklung vielversprechender vorhandener Systeme genutzt.

2. Stand der Wissenschaft und Technik – Ausgangssituation der Region

Der Schwerpunkt der Evaluation von marktverfügbaren Systemen im Rahmen des *Startervorhabens 2* ist in drei Bereiche aufgeteilt:

2.1 2D- und 3D-Sensorik

Erstere bildetet die Marktsituation im Bereich der dreidimensionalen Bildgebung ab, mithilfe das Wachstum von Jungbäumen dokumentiert werden sollte. Als Ausgang dienten hier verschiedenste Messprinzipen der dreidimensionalen Messtechnik aus den Bereichen der Laufzeitbasierten Verfahren wie Lidar und den Triangualtionsverfahren wie Photogrammetrie und Stereomatching. Im Detail erfolgten Versuche mit luftbasierten Systemen wie der DJI Mini 3 und bodenbasierten Systemen wie dem GOBO Projektor des Fraunhofer IOF. Hauptaugenmerkt liegt hierbei auf einer schnellen und genauen Erfassung unter natürlichen Wetter und Belichtungsbedingungen.

2.2 Multispektrale Sensorik

Der zweite Bereich deckt die Situation der multispektralen Bildgebung ab. Hier erlaubt das besonderer Reflexionsspektrum von Pflanzen einen Rückschluss auf deren Gesundheitszustand. Insbesondere im Bereich der Landwirtschaft sind dabei bereits Kamerasysteme verbreitet, welche durch die Kombination des Infrarotbereiches (etwa 800 nm) und des sichtbaren Rotbereiches (etwa 680 nm) den Chlorophyllgehalt, und damit den Gesundheitsstatus, von Nutzpflanzen durch den NDVI (Normalizes difference in vegetation index) abbilden. Schwerpunkt der durchzuführenden Untersuchung stellt die Validierung des NDVI und

weiterer Vegetationsindizes mit Kamerasystemen unter den forstlichen Bedingungen dar. Darauf basierend soll auch die Entwicklung eines Demonstrators erfolgen

2.3 Bewegungssysteme/Schreitsysteme

Der dritte Bereich bildet die Möglichkeiten ab, die genannten Messysteme unter forstlichen Bedingungen zu ihrem Einsatzort zu transportieren. Im Sinne der Schonung des Waldbodens sollten möglichst leichte Bewegungssysteme mit geringem Bodendruck im Waldbereich zum Einsatz kommen Zugleich stellen Kahlschlagflächen durch Baumstümpfe, Wassersenken, Ästen und Gras eine herausfordernde Bewegungsumgebung dar, Abbildung 1. Gemäß den Ideen aus dem Umsetzungskonzept sollen vor allem auf Bewegungssysteme nach Schreitprinzip gelegt werden. Hierfür sind bereits einige Systeme am Markt die hauptsächlich im militärischen und Baustellenbereich Aufgaben übernehmen, wie beispielsweise der „Spot“ von Boston Dynamics. Betrachtet werden sollen dazu Parameter wie Effizienz, Kostenaspekt, Navigationsfähigkeiten, Steuerung/Aktorik, Stabilität und andere Faktoren sowohl innerhalb der Schreitwerkklasse aber auch in Bezug auf radgetriebene Robotik.

Abbildung 1: Typische Fläche nach Kahlschlag. Hindernisse wie Wurzelteller, Äste sowie auch starke Gefälle stellen hohe Anforderungen an die technische Unterstützung im klimaresilienten Waldumbau

3. Planung und Ablauf des Vorhabens

Für die Erreichung der im Abschnitt 1 und 2 beschriebenen Ziele erfolgte die Bearbeitung der drei Bereiche jeweils in einem Arbeitspaket:

- AP1: Untersuchung Basistechnologien 2D- 3D-Bilderfassung und Bildverarbeitung für den Einsatz in Wald- und Forstwirtschaft
- AP2: Untersuchung Basistechnologien multispektraler Bilderfassung und Bildverarbeitung für den Einsatz in Wald- und Forstwirtschaft
- AP3: Untersuchung Basistechnologien verschiedener bodendruckarmer Bewegungssysteme für den Einsatz in Wald- und Forstwirtschaft

Zudem erfolgte die Vergabe von Unteraufträgen für jedes Arbeitspaket. Diese umfassten neben dem bereitstellen von Versuchsequipment und Expertise für die einzelnen Bereiche auch eine Präparation der oben gezeigten Versuchsfläche. Hier erfolgte im Laufe des Bearbeitungszeitraumes der Aufbau einer energetisch autonomen Testumgebung, in welcher der zu entwickelnde und nachfolgende Demonstratoren untergebracht und versorgt werden können.

4. Wesentliche Ergebnisse

Bei der Bearbeitung des Arbeitspaketes AP1 erfolgten Vergleichsmessungen mit verschiedenen 3D-Sensorik-Technologien, um die beste Lösung für die automatisierte Vermessung von Jungbäumen im Forstbereich zu ermitteln. Im Fokus standen dabei die Geschwindigkeit und Genauigkeit der Systeme, da feine Strukturen wie Nadeln auch bei geringen Windgeschwindigkeiten bereits eine hohe Dynamik aufweisen. LIDAR-Systeme zeigten zwar eine hohe Genauigkeit bei der Punktdichte, waren jedoch aufgrund ihrer langen Messdauer nicht praktikabel. Time-of-Flight (TOF)-Kameras dagegen bieten zwar deutlich schnellere Messzeiten sind aber bezüglich Punktewolkedichte (zweidimensionale Auflösung) und Tiefenauflösung nur bedingt für die feinen Nadeln von Douglasien und Lärchen geeignet. Stereokameras, wie die handelsübliche Intel Realsense D435i, erwiesen sich als ungeeignet für die Erfassung feiner Baumstrukturen aufgrund der geringen Tiefenauflösung. Für dreidimensionale Kartierungsaufgaben, insbesondere zur Pfadplannung der Robotik aus AP3, zeigen jedoch photogrammetrischen Ansätze mit handelsübliche Flugdrohnen aus den Hobbybereich wie die DJI Mini 3 hohe Potential für weiterführende Arbeiten. In der Literatur werden Structured-Light-Systemen oder aktiven Stereosystemen oft geringe Messgeschwindigkeiten bei gleichzeitig hoher Genauigkeit zugeschrieben. Hier zeigen moderne Entwicklungen wie etwa dem GOBO-Projektor des Fraunhofer IOF neue Möglichkeiten wie Echtzeitmessungen mit bis zu 30 Bildern pro Sekunde bei einer hohe Tiefenauflösung von unter 0,2 mm sowie eine hohe Punktdichte von über 2MP. Durch die Musterprojektion innerhalb der atmosphärischen Banden bei 940 nm ist dieses System für den Einsatz in Forst bestens geeignet.

Bei der Bearbeitung des Arbeitspaketes AP2 erfolgten zunächst spektrale Untersuchungen anhand lokal wachsender Baumarten wie Birke, Ahorn, Fichten und Kiefern um relevante Spektralkanäle für abiotischen Stress, hier Wassermangel, mit Literaturwerten aus dem Bereich der Landwirtschaft zu validieren. Ausgang stellten hier die verbreiteten Vegetationsindizes, welche anhand der Reflektion von wenigen Wellenlängenbereichen Kennzahlen zum Gesundheitsstatus liefern. Neben dem in der Agrawirtschaft weit verbreiteten NDVI (normalized difference in vegeation index), wurden hier noch weiterer Indizes wie der PRI, MCARI, REIP, oder der NEI auf ihre Tauglichkeit evaluiert. Als Kernwellenlängen für eine Forstsystem konnten hier 515 nm, 550nm, 571 nm, 670 nm, 700nm, 750nm, 780nm und 850 nm definiert werden, welche durch die Vegetation Indizes Aussagen über die Photosyntheseaktivität waldtypischer Pflanzen und deren Chlorophyllgehalt und damit deren Nährstoffhaushalt an jungen und ausgewachsenen Bäumen ermöglicht. In Absprache mit dem Forst erfolgte eine Ausweitung dieser Untersuchung um Harzreste als Reaktion auf Borkenkäferbefall an ausgewachsenen Fichten zu detektieren und zu datieren. Hier konnte das Repertoire der Vegetationindizes durch den entwickelten NDRI (normalized difference in resin index) mit den relevanten Wellenlängen bei 1093nm und 1688nm erweitert werden.

Die anschließende Marktanalyse und durchgeführte Test zeigten auf, dass aktuell keine Multispektralkamera auf den Markt existiert, welche diese relevanten Spektralbereiche Bildgebend unter forstlichen Bedingungen auch bei Vernachlässigung des SWIR Bereich über 1000 nm aufzeichnen kann. Hier muss zugunsten einer hohen und zeitgleichen Aufnahmegeschwindigkeit aller spektralen Kanäle auf Snapshotkameras zurückgegriffen werden. Die Technologiebedingte geringe Bildauflösung kann dabei durch eine geringe Aufnahmedistanz oder eine Zoomoptik ausgeglichen werden.

Innerhalb des dritten Arbeitspaketes wurden Außentest auf der Versuchsfläche mit dem Schreitroboter „Spot“ der Firma Boston Dynamics sowie dem Radgetrieben System RB Watcher der Firma Robotnik durchgeführt. Hierbei erfolgte neben den Vergleich der Bewegungsprofile des einzelnen Systems und deren Eignung für die von hohen Gräsern, Wildwuchs und Holzresten vom Schlag geprägten Kalamitätsflächen ebenfalls Untersuchungen zur Nutzung der Robotik zur Unterstützung Forstwirtschaftlicher Tätigkeiten. Hier zeigen Schreitroboter wie der „Spot“ durch ihren hohen Bewegungsfreiheitsgrad und Fähigkeit ungleichmäßige Belastungen auszugleichen hohes Potential für weiterführende Arbeiten, insbesondere in den Bereichen der autonomen Aufforstung und Setzlingkontrolle. Die Dichte und Höhe des Bewuchses setzt allerdings alternative Ansätze zur Routenplanung der Robotik aus, da die internen Sensoren und Sicherheitsmechanismen der Robotik diese als unüberwindbare Hindernisse erkennen.

Abseits der drei Arbeitspakete wurde die Versuchsfläche im Wald bei Cursdorf für anschließende Projekte vorbereitet. Es erfolgten zunächst eine Aufforstung mit für die Region untypischen Baumarten wie, Europäischen Lärchen, Douglasien oder Walnüssen, welche während der Projektlaufzeit in regelmäßigen Abständen kontrolliert und Dokumentiert wurden. Dabei versprechen die Baumarten Winterlinde, Hainbuchen, Rotbuchen, Douglasie sowie die Lärche einen hohen Anwuchsserfolg zwischen 76 % und 91 % (Winterlinde), während Nussarten wie die Schwarz- und Walnuss oder die Esskastanie durch ihrer geringen Anwuchsquote von 20 %, 50 % und 0 % auf der Fläche als Ausgang für zukünftige Vergleichsmessungen herangezogen werden können, um die genauen Ursachen zu definieren.

Durch den von uns auf der Fläche aufgebauten autarken Außentechnikraum sowie der im Feld installierten Wetterstation steht die Grundarchitektur für weiterführende Untersuchungen zur Verfügung.

Abbildung 2 Außentechnikraum mit Demonstrator aus AP2

II Eingehende Darstellung

1.1 Wissenschaftlich-technische Ergebnisse

Die wissenschaftlich-technischen Ergebnisse aus dem Startervorhaben sind entsprechend der einzelnen Arbeitspakete des Arbeitsplans erbracht worden. Für die Definition der Umweltparametern des Forstes erfolgte zusammen mit den Präparationsmaßnahmen auf der Versuchsfläche noch eine Umfängliche Definition der Messumgebung „Wald“.

1.1.1 Vordefinition Umweltparameter – Vorbereitung Versuchsfläche

Um eine Bewertung aktuellster Technologien der drei Arbeitspakete zu ermöglichen, galt es zunächst die Randbedingungen der Messumgebung zu definieren. Ausgangspunkte stellte hierbei die von der Gemeinde Cursdorf zur Verfügung gestellte Versuchsfläche im Thüringer Wald, welche aufgrund der Vermehrten Verbreitung von Borkenkäfern geschlagen wurde. Dieses eingezäunte Kahlfläche stellt die aktuelle Lage der Wälder repräsentative dar. Als Ausgangspunkt für anschließende Projekte wurde diese Fläche im Verlauf des Projektes „Startervorhaben 2“ als autarkes Feldlabor hergerichtet. Hier wurden die Räumlichkeiten zur Unterbringung der Solarmodule und Rechentechnik für Felddemonstratoren aufgebaut. Auch erfolgte die Installation der Wetterstation „NEXT Wetterstation Eco- Bewässerung“ zu Beginn in der Projektphase. Die Daten bezüglich Windgeschwindigkeit, Temperatur, Sonnenstunden sowie Boden- und Umgebungsfeuchte ergaben den ersten Satz von Anforderungen an die Messtechnik für AP1 und AP2.

Abbildung 3 Gelände der Versuchsfläche in Cursdorf.

So ist Beispielsweise ganzjährig mit typischen Gebirgswinden von durchschnittlich 1,7 m/s zu rechnen, wobei diese auch Zeitweise (< 15 Minuten) deutlich höhe Werte zwischen 3-5 m/s im Laufe des Tages erreichen. Hinzu kommen kurzzeitige (<20 s) Böen mit nochmals höheren Werten.

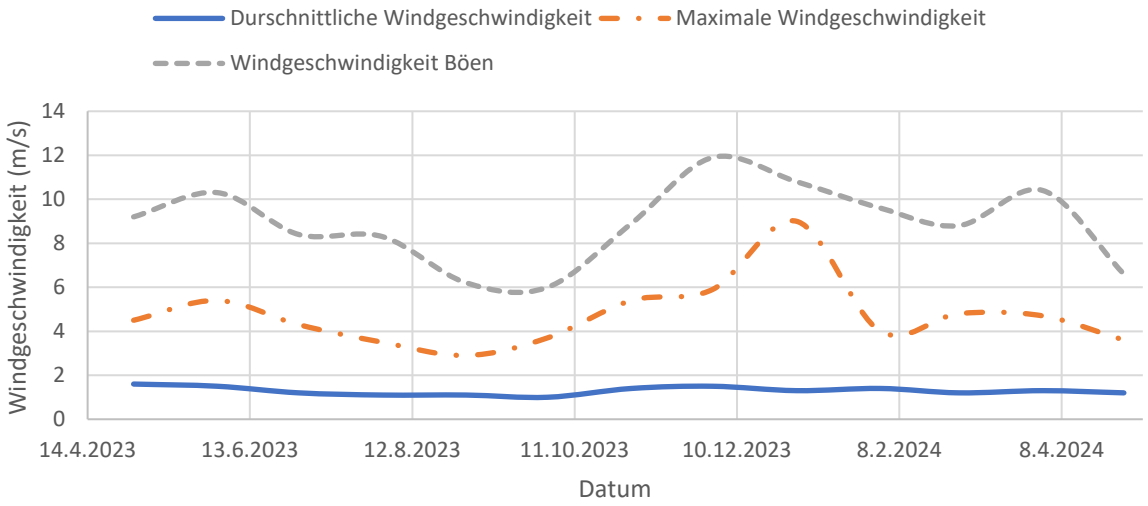


Abbildung 4 Ermittelte Windgeschwindigkeiten auf der Versuchsfläche Cursdorf

Die Auswirkung dieser Windstärken verdeutlich die Wechselwirkung mit der Vegetation, insbesondere den Setzlingen. Da diese nur eine geringe Stammdicke von wenigen Millimetern aufweisen, werden sie bereits bei geringen Windgeschwindigkeit einer hohen Dynamik ausgesetzt. Diese erfordert eine sehr kurze Aufnahmezeit von wenigen Millisekunden für die bildgebenden Systeme, da sonst die Bewegungsunschärfe Details wie Nadeln verdeckt. Abbildung 5 stellt die Auswirkung einer Windgeschwindigkeit von 3m/s in Kombination mit der Bewegungsunschärfe bei verschiedenen Belichtungszeiten anhand einer Douglasie dar. Für ein fehlerfreies Bild muss eine Bildaufnahme möglichst unter 35 ms bzw. mit einer Aufnahmerate von mindesten 29 Bildern pro Sekunde erfolgen.

Abbildung 5 Einfluss der Belichtungszeit I auf eine sich im Wind bewegente Douglasie

Zugleich stellt die Beleuchtungssituation im Wald erhöhte Anforderungen an die bildgebenden Systeme. Über den Tag ist, bedingt durch Verdeckung von Wolken und Schatten der Begleitvegetation, mit einer hohen Dynamik in der Umgebungsbeleuchtung zu rechnen. Da die Wetterstation nur einen Messzyklus von 15 Minuten aufweist, konnte die Dimension der Schwankung nur bedingt erfasst werden. Vereinzelten Messungen nach kann jedoch von einer Halbierung des Umgebungslichtes ausgegangen werden, wie eine repräsentative Messung vom 10. Juli 2024 zeigt, Abbildung 6. Dies bedingt wieder eine möglichst hohe Aufnahmegeschwindigkeit in den Messungen auch bei Windstille, um Verfälschungen in der Belichtung zu vermeiden. Zugleich gibt es eine hohe Schwankung über das Jahr verteilt. Eine weitere Herausforderung stellen die Messungen von Oktober 2023 bis April 2024 dar. In diesen Monaten steht nur ein Bruchteil des Umgebungslichtes zur Verfügung, während hier zugleich die kritische Anpflanz- und-Wachstumsphase der Jungbäume stattfinden [1]. Hierdurch müssen die zwei- und dreidimensionalen Messysteme auch bei schlechten Lichtverhältnissen schnell und genau die Messungen durchführen können.

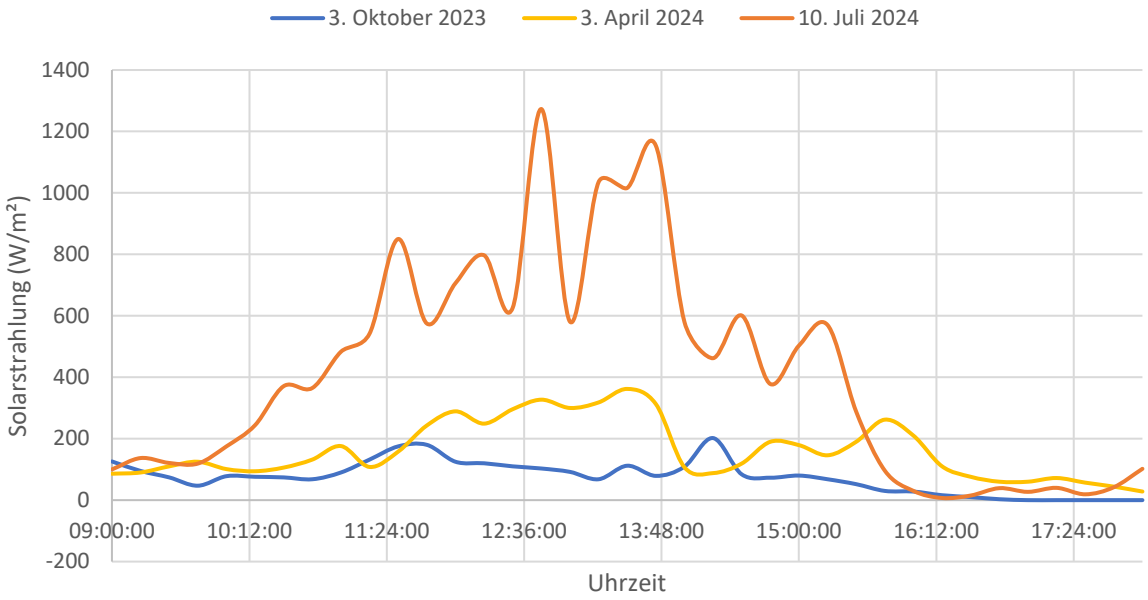


Abbildung 6 Auf der Versuchsfläche in Cursdorf einfallende Solarstrahlung über einen Tag. Messzyklus der Installierten Wetterstation alle 15 Minuten.

Im gleichen Zeitraum sind ebenfalls Temperaturen unterhalb von 15 °C zu erwarten, Abbildung 7. Während Messungen bei negativen Außentemperaturen bzw. Schneefall wenig sinnvoll erscheinen, könnten Messungen vor Schneefall und bei einsetzten des Tauwetters relevant zu Bewertung der Winterbeständigkeit für Jungpflanzen sein.

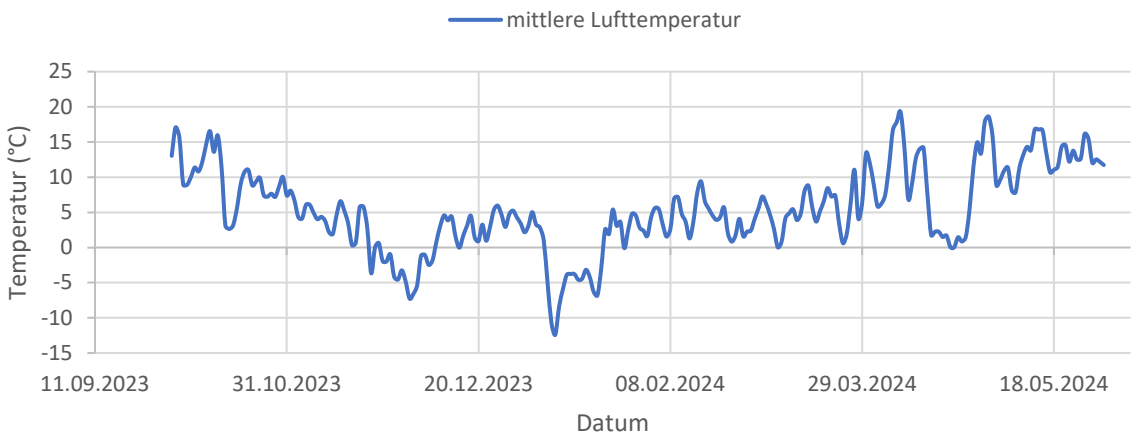


Abbildung 7 Lufttemperaturen auf der Versuchsfläche während der Wachstumsperiode Oktober 2023 bis Mai 2024

Im Weiteren gilt es für die Messsysteme die spektrale Zusammensetzung des natürlichen Sonnenlichtes effektiv zu nutzen. Dies beinhaltet insbesondere die Beachtung der „spektralen Banden“ in den Spektralbereichen um 760 nm, 940 nm, 1150 nm und 1390 nm, in welchen wenig bis kein natürliches Licht zu Verfügung steht.

Für die Definition des Messvolumens wurde des Entwicklungsprozesses mehrere zu Projektstart gepflanzter Pflanzentypen (Douglasien, Lärchen, Winterlinde, Hainbuche sowie Schwarz- und Walnüsse) stichprobenartig dokumentiert. Basierend auf der Pflanzengröße gilt es einen Messvolumen von mindesten 0,3 Quadrat- bzw. Kubikmeter zu erfassen. Als kleinstes relevantes Detail wurden die Nadeln der Douglasie und Lärche gewählt mit einer Länge von rund 1 cm bei einer Breite von unter 1 mm.

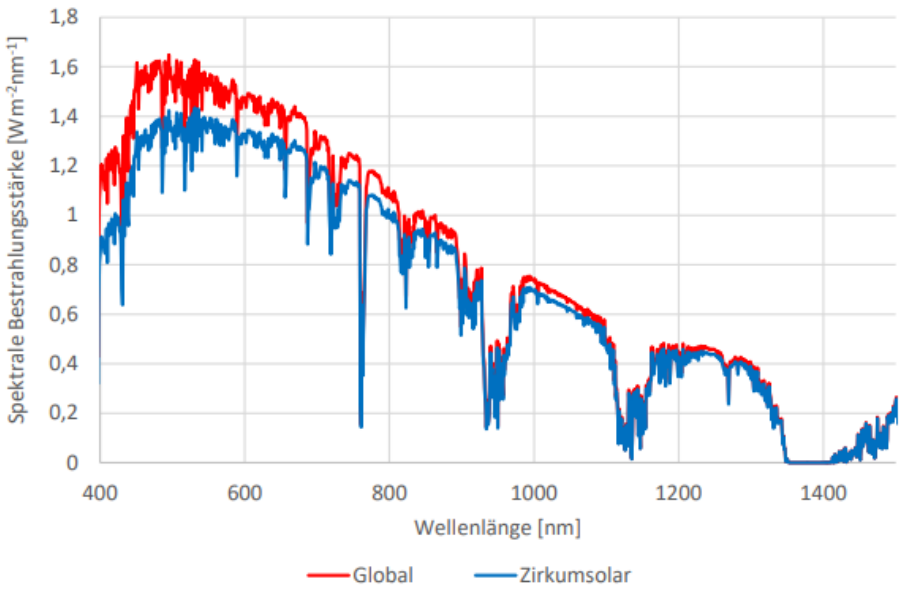


Abbildung 8 Spektrale Zusammensetzung des Sonnenlichtes nach durchschreiten der Erdatmosphäre [2]

1.1.2 AP1 Untersuchung Basistechnologien 2D-3D-Bilderfassung und Bildverarbeitung für den Einsatz in Wald- und Forstwirtschaft

Bei der Bearbeitung des Arbeitspaketes 1 wurden aktuellste zwei- und dreidimensionalen Messysteme für den Einsatz in der im Abschnitt 1.1.1 definierten Anforderungen evaluiert. Nach einer initialen Sondierung der Marktlage erfolgte eine Vorsortierung basierend auf den technischen Restriktionen der zugrundeliegenden Messprinzipen, welche nach aktueller Marktlage in Laufzeitfahren: Time of Flight und Lidar, und die photogrammetrischen Verfahren mit aktiver Musterprojektion (Structured Light) und ohne (passiv) aufteilen. Eine Auswahl aktuelle Geräte am Markt zeigt die folgende Tabelle 1. Hauptaugenmerk lag hierbei auf Messystemen, welche von Herstellerseite in der Lage sind 3D-Messungen durchzuführen. Besonders im Bereich der passiven Stereovision kann durch die Kombination zweier identischer Kameras ein umfänglicher Messbereich abgedeckt werden. Die Gesamtqualität der 3D-Messungen ist jedoch abseits von der Qualität der optischen Komponenten maßgeblich von den angewendeten Algorithmen für die Stereokorrespondenz abhängig. Mittlerweile gibt es neben methodenbasierten Algorithmen (klassisch), wie Semi-Global-Blockmatching (SGBM) oder DAISY, auch KI-basierte Ansätze. Letztere versuchen einige Herausforderungen der methodenbasierten Algorithmen, wie die Auflösung feiner Strukturen (Baumnadeln) zu lösen. Mangels einer Beispielszene aus dem Forstbereich wurde auf den gängige Middlebury Stereo Vision Datensatz [3] genutzt. Hier wurden neueste frei verfügbare Methoden wie IGEV- oder RAFT-Stereo. Diese Methoden sind unter Idealbedingungen in der Lage, qualitativ hochwertige Korrespondenzpunktbilder (Disparitätskarten) zu liefern. Aufgrund der datengestützten Algorithmik (KI-basiert) sind die Ergebnisse (Disparitäts- und Tiefenkarten) stark abhängig vom vortrainierten Modell, welche auf umfangreichen Datensätzen basiert wie Abbildung 9 darstellt. Nach derzeitigem Stand existieren keine frei verfügbaren Datensätze für die 3D-Vermessung von Forstpflanzen. Die Generierung eines eigenen Anwendungsspezifischen Datensatzes war im Rahmen dieses Projektes nicht umsetzbar, aufgrund der zeitintensiven Datengenerierung, Datennachverarbeitung und der Referenzdisparitätskarten. Die Erstellung eines solchen Datensatzes aus 2D-, 3D- und Multispektraldaten zum antrainieren und weiterentwickeln der KI-Modelle könnte für zukünftige Projekte unabdingbar sein. Seitens des 3D-Systems muss das System hier „Out of the Box“ in der Lage sein genaue 3D-Daten für diesen Zweck zu generieren. Zugleich sind passive Stereosysteme auf das Umgebungslicht angewiesen, wodurch Fremdlichteinflüsse unvermeidbar sind, was bei den klassischen Ansätzen zu Fehlzuweisungen und damit zu ungenauen 3D-Daten führen kann (vergleiche Abbildung 9, SGBM). Die dargestellten Ergebnisse wurden im Rahmen einer von uns an den ZBS e.V. vergebenen Technologiestudie: „Optische 3D-Technologien für Anwendungen in der Forstwirtschaft“ erarbeitet und im Zuge eines Übergabeworkshops am 22. Januar 2024 präsentiert.

Tabelle 1 Auswahl aktueller am Markt verfügbarerer 3D-Gesamtsysteme

	Kameramodell	**Entfer-nungsbe-reich (m)**	**Sichtfeld**	**Entfer-nungs-rauschen**	**Belich-tungs-zeit/Mess-dauer**	**Wellen-länge**	**Auflösung (Pixel)**
TOF	LUCID Helios2 Ray [4]	0,3-8,33	69° x 51°	0,6 mm	13 / 88 / 350 µs	940 nm	640 x 480
	Basler blaze-101 [5]	0-10	67° x 51°	< 2 mm	program-mierbar	940 nm	
	Basler blaze-102 [6]	0,3-10	67° x 51°	< 0,8 mm	program-mierbar	850 nm	
	MS Azure Kinect [7]	0,5-3,86	75° x 65°	< 17 mm	12,8 ms	850 nm	640 x 576
		0,25-2,21	120° x 120°	< 17 mm	20,3 ms	850 nm	1024 x 1024
Stereo	Stereolabs ZED 2 [8]	0,3-20	110° x 70°	10 mm @ 1 m	15 FPS	(passiv)	2208 x 1242
Structured-Light (Aktiv)	GOBO Projektor (Fraunhofer IOF)	0,2-0,5	24° x 16°	<0,2 mm	>30FPS	940 nm	2048x1200
	IDS Ensenso N46 [9]	1,1-1,9	28° x 18°	0,7 mm @ 1 m	8 FPS	465 nm, 835 nm	1936 x 1216
	Luxonis OAK-D Pro [10]	0,7-8	69° x 50°	10 mm @ 1 m	120 FPS	940 nm	1280 x 800
	Intel Realsense D435i [11]	0,3-3	89° x 58°	40 mm @ 2 m	30 FPS	850 nm	1280 x 720
LIDAR	Leica BLK360 [12]	0,5-45	360° x 270°	4 mm	< 180 s	830 nm	(0,6 mm)
	Leica RTC360 [13]	0,5-130	360° x 300°	1,3 mm	60 s	1550 nm	ca. 1 mm
	Trimble X12 [14]	0,3-365	360° x 320°	< 0,3 mm	> 167 s	1500 nm	(0,63 mm)

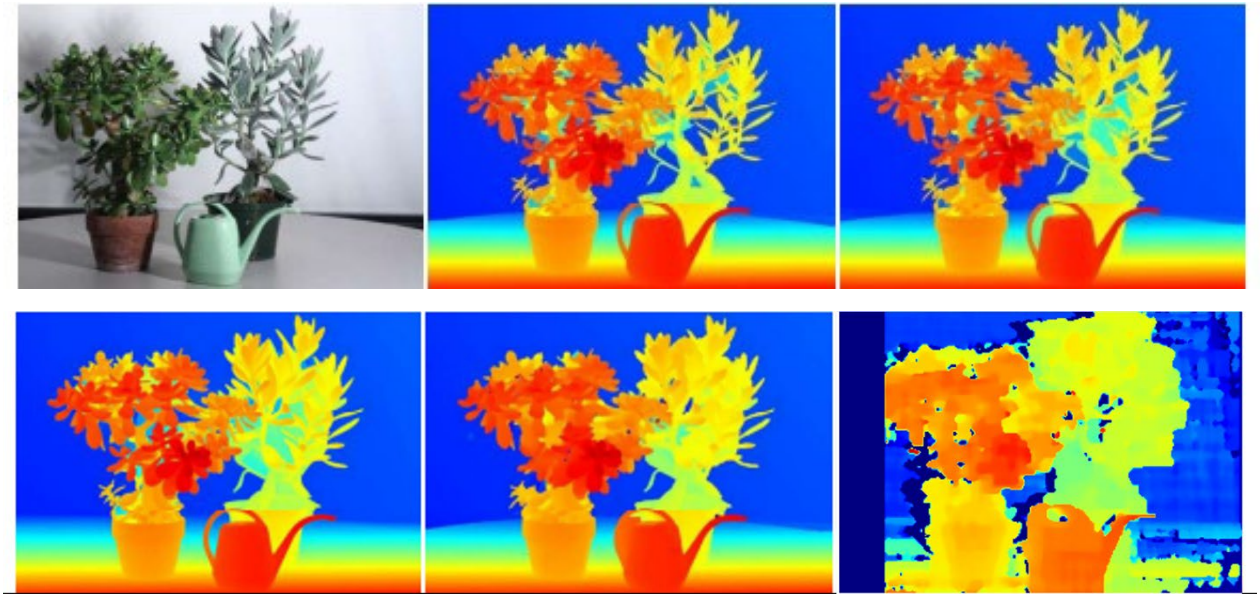


Abbildung 9 Beispiel Szene "Plants" [3] (oben, links), Disparitätskarten erstellt mit IGEV-Stereo [15] (oben, mittig), RAFT-Stereo [16] (oben, rechts), CREStereo [17] (unten, links), SDR [18] (unten, mittig) (ZBS e.V.). und klassisches SGBM (unten, rechts) (TU-I)

Wie die Vergleichstabelle zeigt, sind nur wenige 3D-Systeme aktuell auf dem Markt, welche in der Lage sind hohe Tiefenauflösungen mit hoher zweidimensionaler Auflösung zu kombinieren. Insbesondere die Time of Flight Systeme sind zwar potentiell in der Lage 3D-Auflösungen unter 1mm zu erzielen, bei jedoch sehr geringer 2D-Auflösung (Punktwolkendichte). Durch das Ausnutzen der atmosphärischen Absorptionsbanden bei 940 nm sind diese jedoch robust gegenüber Fremdlicht.

LIDAR Systeme sind aufgrund ihrer hohen Messdauer und geringen Punktwolkendichte für Jungbäume im Forst gänzlich ungeeignet. Die Verwendung einer Abtastwellenlänge von 1500 nm macht diese jedoch sehr robust gegenüber Fremdlichteinflüssen.

Die Structured Light Stereosysteme, bzw. aktives Stereo stellen nach den hier durchgeführten Betrachtungen den vielversprechendsten Messansatz dar, welcher die Vorteile der Einzelsysteme: hohe Punktwolkedichte bei hohen Messvolumen (Stereovision), hohe Tiefenauflösung, geringer Fremdlichteinfluss (TOF) kombinieren. Während marktverfügbare Komplettmodule Messgenauigkeit und Geschwindigkeit zu Gunsten der Gerätekompaktheit eintauschen, ermöglicht der vom Fraunhofer IOF patentierte GOBO Projektor die angestrebte Modularität. Analog zu den passiven Stereosystemen besteht dabei die Möglichkeit hoher Punktwolkedichten, bei zugleich hoher Tiefenauflösung durch eine geeignete Paarung der Stereokamera und der Wellenlänge des Musterprojektors. Da der Musterprojektor zugleich die benötigte Belichtung liefert können die Absorptionsbanden der Atmosphäre effizient genutzt werden. Die von uns evaluierte Variante, erreichte bei einer Wellenlänge von 940 nm eine Bildfrequenz von 30 bis 50 Bildern pro Sekunde und ist damit echtzeitfähig. Zugleich konnten auch einzelne Nadelstrukturen gut erfasst werden, Abbildung 10. Die Demonstration des Systems erfolgte während des Übergabeworkshops der vom Fraunhofer IOF durchgeführten Technologiestudie: „Konzeptstudie von 3D-Messsystemen für Schreitrobotik im Bereich der Wald- und Forstwirtschaft“.

Entsprechend ist dieses System nach aktuellem Stand für den Einsatz im Forst zu empfehlen.

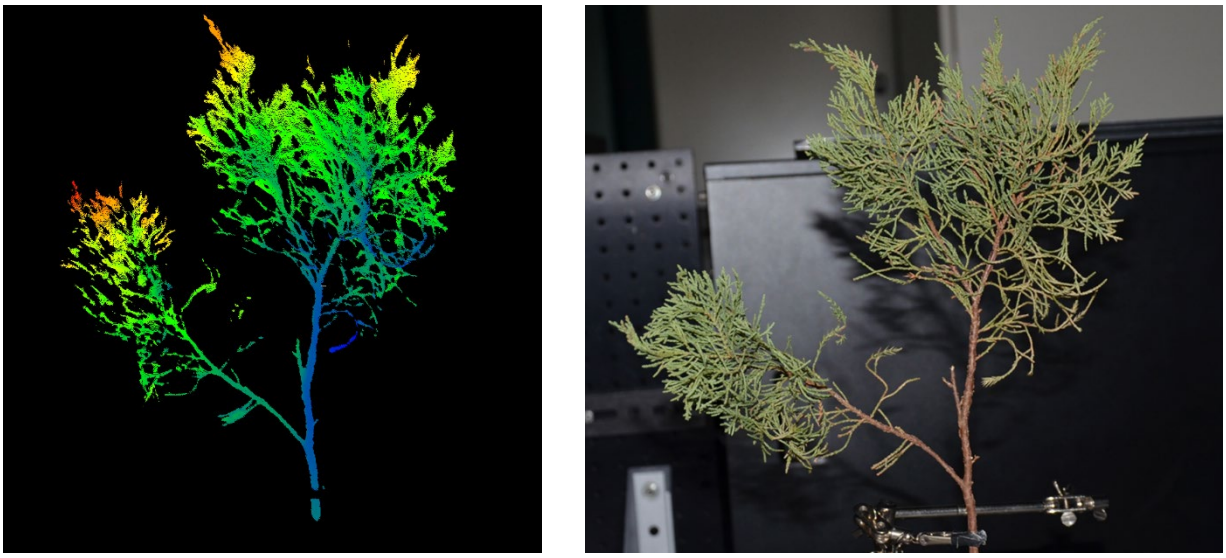


Abbildung 10 3D-Falschfarbendarstellung eines Kieferzweiges (links) und 2D-Realfarbaufnahme (rechts)

Abseits der Strukturmessung wurden zudem Versuche zur automatisierten Höhenmessung der Jungbäume auf der Fläche durchgeführt. Hierbei erfolgte eine Befliegung der Versuchsfläche mittels Unmanned Aerial Vehicles (UAV – dt. Unbemannte Flugobjekte bzw. umgangssprachlich „Drohnen“). Diese stellen in der Forstwirtschaft bereits ein verbreitetes Mittel zur Vitalitätsuntersuchung dar. Die geringeren Flughöhen (120 m über Grund) ermöglichen im Vergleich zu Satellitenaufnahmen (Erdorbit) oder flugzeuggestützten Luftaufnahmen spontane und aktuelle Aufnahmen mit hoher Auflösung. Zugleich sind die Kosten für Drohnen aus dem Hobbyfotografiemarkt mit einen Startgewicht unter 250 g und hochauflösenden Farbkameras verhältnismäßig gering. Hierdurch ergibt sich Potential für einfache Vermessungs- und Kontrollaufgaben haben, bevor die kostenintensiverer Robotiksysteme (siehe AP3 Abschnitt 1.1.4) zum Einsatz kommen müssen. Analog zum Stereomatching kann aus der Flugbewegung der Drohne auch mit nur einer Kamera die aufgezeichnete Szene dreidimensional Rekonstruiert werden. Erprobt wurden dabei zwei Ansätze zur Rekonstruktion. Das klassische Stereomatching, mit frei verfügbaren Softwarepaketen (OpenCV) sowie Photogrammetrisch, mittels der Bezahlsoftware Agisoft Metashape. Ersteres ermöglicht aufgrund des Flugschreibers das Drohen eine 3D-Rekonstruktion in metrischen Einheiten, jedoch nur für jeweils ein Bildpaar aus 2 Positionen. Die dabei erreichbaren Messgenauigkeiten liegen im Bereich von 1 dm bei einer Flughöhe von 8 m. Abbildung 10 zeigt eine Rekonstruierte 3D-Szene der Versuchsfläche mit einer Winterlinde deren Höhe mittels Handvermessen mit 102 cm bestimmt wurde. Aus der Punktewolke wurde dagegen eine Höhe von 110 cm bestimmt. Bei kleineren Bäumen, insbesondere bei Nadelbäumen sank die Qualität des Stereomatchings stark, sodass eine genaue Vermessung nicht möglich ist. Bei Teilen der Fläche mit hohem Aufkommen von Begleitvegetation (Gras) liefert die 3D-Rekonstruktion ebenfalls keine verwertbaren Referenzdaten für eine Höhenbestimmung von Jungbäumen.

Diese Fehler sind auch bei einer Rekonstruktion mittels Photogrammetriesoftware präsent, wodurch eine automatisierte Höhenmessung von Bäumen mittels Luftbilder nur geringe Erfolge verspricht. Jedoch erlaubte die Photogrammetrie eine komplette Rekonstruktion der Fläche in einem Durchgang im Gegensatz

zu einem Bildpaar, wobei jedoch die metrische Skalierung verloren geht. Inwiefern dieser digitale Zwilling zum Zwecke der Roboternavigation (AP3) auf Versuchsfläche bzw. im Feld herangezogen werden kann, muss in nachfolgenden Projekten validiert werden. Basierend auf den Versuchen mit der Robotik wird eine zwei- oder dreidimensionale Kartierungen jedoch unabdingbar sein, siehe AP3.

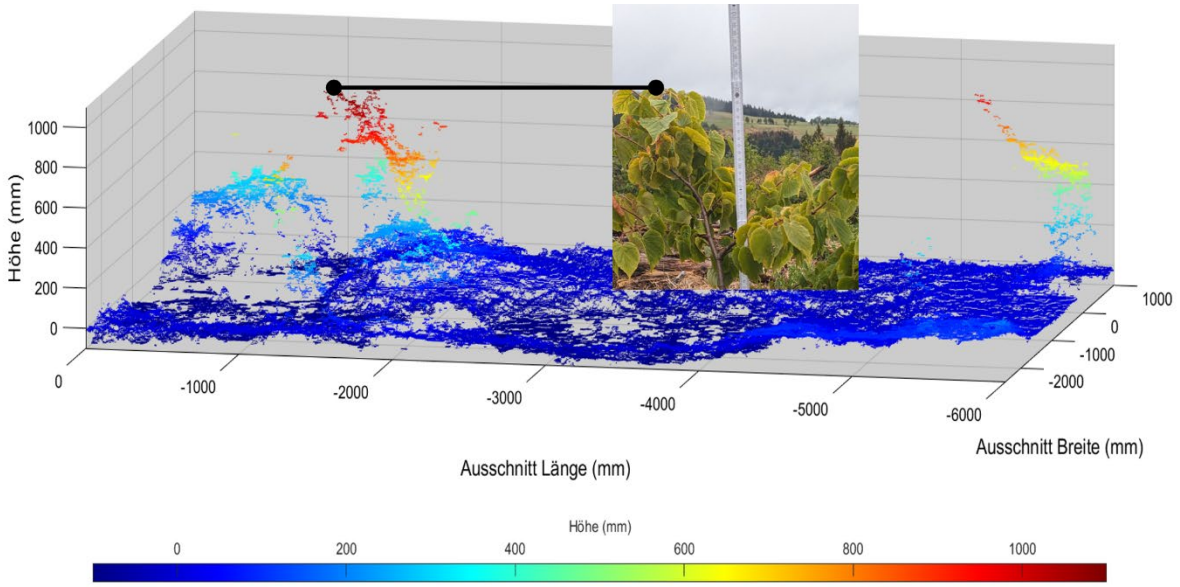


Abbildung 11 Ausschnitt einer mittels Stereomatching generierenten 3D-Punktewolke mit Baumstumpf und Winterlinden

1.1.3 AP2 Untersuchung Basistechnologien multispektraler Bilderfassung und Bildverarbeitung für den Einsatz in Wald- und Forstwirtschaft

Bei der Bearbeitung des Arbeitspaketes 2 erfolgte ebenfalls zunächst eine Analyse des Marktes bezüglich aktueller Kameratechnologien und sich anbahnende Trends. Hierbei sind die aktuellen bildgebenden Technologien zur erzeugen der spektralen Informationen in vier Methoden aufzuteilen:

Spectral Staring:

Die Aufnahme der örtlichen Spektralinformationen erfolgt für jeden Spektralkanal zeitlich nacheinander. Beispielsweise durch das nacheinander platzieren von Spektralfilter vor dem Kamerasensor.

Spectral Scanning:

Die Aufnahme der Spektralkanäle erfolgt entlang einer Bildzeile zeitgleich. Zur Generierung eines Gesamtbildes muss der Scanner um eine Pixelbreite weiterbewegt werden. Die Aufteilung des einfallenden Lichtes in seine spektralen Bestandteile erfolgt hier typischerweise durch Glasprismen oder Diffraktionsgitter.

Snapshot:

Die Aufnahme aller Spektralkanäle erfolgt Zeitgleich innerhalb einer Aufnahmeperiode für das gesamte Sichtfeld der Kamera. Beispielsweise durch eine Spektralfiltermatrix vor dem Bildsensor analog zum Bayernpattern bei Farbkameras (Multi-Filter-Array, MFA) oder mehreren Kameras mit je einem Spektralfilter (Multikamera). Durch die Aufteilung des Bildsensors in einzelne Spektralkanäle sinkt jedoch die nutzbare Fläche des proportional zur Filteranzahl, wodurch mit steigender Filteranzahl die erreichbare Auflösung ohne Interpolation der Spektralkanäle reduziert [19]. Zugleich sind die einzelnen Spektralkanäle um wenige Pixel zueinander verschoben. Eine Möglichkeit die Anzahl an Kanälen ohne weitere Auflösungsverluste und Bildverschiebungen zu erhöhen liefern Lichtfeldkameras bzw. Plenoptische Kameras zu erhöhen. Anstelle eines Spektralfilters vor dem Bildsensor ist hier eine Matrix mit Mikrolinsen vor dem Sensor platziert, vor welchem wiederum der Spektralfilter platziert ist. Jede Linse zeichnet hier je ein Spektralkanal auf. Da das zeit- und kostspielige Auftragen der Spektralfilter auf den Sensor entfällt können größerer Bildsensoren und damit mehr Spektralkanäle verwendet erzielt werden, Vergleich Tabelle 2 Snapshot: Cubert/Ultris 20 mit 164 Spektralbänder zwischen 350 nm und 1000 nm zu Mosaiksensoren wie Silios/ Toucan mit nur 10 Bändern bei ähnlicher Bildfläche. Nachteilig ist hier jedoch, dass kein Tausch des Objektivs möglich ist [20].

Spatio-Spectral Scanning:

Mischform aus den oberen drei Varianten. Die Aufnahme des Spektralbildes erfolgt sowohl zeitlich als auch örtlich versetzt. Jede Pixelreihe auf einem Bildsensor ist mit einem Spektralfilter versehen. Nach jeder Zeilenaufnahme muss der Sensor oder das Objekt um eine Pixelreihe verschoben werden, um die Spektralinformationen für diese Position zu ergänzen [21].

In Abhängigkeit der in diesen Methoden angewendeten Filtertechnologien sind diese mehr oder weniger für die Echtzeitmessung geeignet. Insbesondere Systeme basierend auf Spectral Staring oder Spatio-Spectral Scanning sind aufgrund der benötigte Scannbewegung einerseits durch die Objektdynamik dem Jungbaum und der benötigten linearen Scanbewegung der Kamera ungeeignet für den Einsatz Im Forst. Zwar existieren mit der iberOptics „BlackBullet“ und der Specim „Specim IQ“ handliche Geräte, welche den benötigten Vorschub der Scanbewegung bereist intern verbaut, die Messzeit für ein Hyperspektralbild liegt hier jedoch bei 4 s aufwärts (Die „Specim IQ“ konnte ihn der Konferenzgleitenden SPIE Defense + Commercial Sensing 2022 Expo hierhingehend evaluiert werden). Systeme welche eine externe Bewegung der Kamera benötigen (Linearmotor oder Rotation) entfallen aufgrund der Komplexität und geringen Mesgeschwindigkeit ebenfalls. Entsprechend kommen für Feldmessungen nur die Spectral Staring und Snapshot Methoden für gültige Spektralaufnahmen im Feld infrage. Interessante neu Entwicklung stellen hier die Hinalea Model 4250 und die Senop HSC-2 dar, welche beide im Strahlengang ein durchschaltbares Fabry-Pérot Filterelement aufweisen. Dies bedeutet, dass der Abstand der spiegelnden Flächen innerhalb des Filters mittels eines Mikroantriebes verstellbar ist. Bei bestimmten Abständen zwischen den Spiegeln entstehen konstruktive und destruktive Interferenzen, die dazu führen, dass nur bestimmte Wellenlängen verstärkt und durchgelassen werden, während andere ausgelöscht werden. Die Wellenlängenwahl und die Abtastreihen sind hierbei annährend frei wählbar, wodurch beispielswiese die HSC2 auf für Drohnenmessungen bzw. bewegliche Szenarien geeignet ist [22]. Die spektralen Sensoren für MFA-Kameras der Firma IMEC arbeiten mit demselben Prinzip, jedoch ist das Fabry-Pérot-Element mit festem Spiegelabstand jedem Pixelelement aufgebracht. Zu beachten ist jedoch das neben der Nennwelle auch für die ganzzahligen Interferenzordnungen durchlässig ist. Für ein Beispielfilter von 800 nm bedeutet dies, dass

ebenfalls 400 nm (2. Ordnung: 800nm/2) und 266.7 (3. Ordnung 800/3) durchlässig sind. Womit die angegeben Spektralbereiche der Sensoren zu erklären sind. Während die Senop HSC-2 dies durch ein zwei Sensor Aufbau löst, ist nicht veröffentlicht wie Hinaleas VNIR4250 dies ausgleicht. Klassische Metalloxidationsfilter besitzen diese Eigenschaft nicht.

Mit der BaySpec „GoldenEye“ und der Nireos „Hera“ sind mittlerweile auch Filterlose Bildgebenden Spektralkameras am Markt verfügbar. Stattdessen basieren diese Fourier-Transformations-Spektroskopie (FT), wobei die Interferenz des Lichts zur Messung der Spektren genutzt wird. Das Licht wird in zwei kollineare, zeitverzögerte Replikate aufgeteilt, deren Interferenzmuster von einem Detektor als Funktion ihrer Verzögerung gemessen wird. Die Fourier Transformation des resultierenden Interferogramms ergibt das Spektrum der Wellenform mit kontinuierlicher Intensität. Auch hier ist ein annährend lückenloses Spektrum für jeden Bildpixel möglich. Prinzipiell sind alle Varianten für den Einsatz im Forst geeignet, Abzüge ergeben sich nur bei den durchschaltbaren Fabry-Pérot Filtern, welche nach Herstellerangaben und Fachgesprächen mit dem Hersteller auf der SPIE Defense + Commercial Sensing 2022 Expo nicht für Temperaturen unter 15 °C geeignet sind und entsprechend zur Vermeidung von Kondenswasser dauerhaft beheizt werden müssen.

Teile der hier dargestellten Ergebnisse wurden im Rahmen einer von uns an die TUIL Transfer GmbH vergebenen Technologiestudie: „Erfassung der Vitalparameter von Bäumen mit optisch-spektroskopischen Methoden“ erarbeitet und im Zuge eines Übergabeworkshops am 22. Februar 2024 präsentiert.

Tabelle 2 Übersicht über aktuelle für den Forst geeigneter Spektralsysteme

Messprinzip	**Filtertyp**	**Hersteller/ Modell**	**Spektralbereich (nm)**	**Spektralbänder @ Bandbreite**	**Ortsauflösung (px)**	**Aufnahmerate**
Spectral Staring	Verstellbare Fabry-Pérot	Hinalea/ Model 4250 VNIR [23]	400-1000	300 @ 4nm	1920 x 1200	~(1,5ms+I)/ Band
	Verstellbare Fabry-Pérot mit Doppelsensor	Senop/ HSC-2 [22]	450-800 500-900	1000 @ 15-25 nm	1024 x 1024	maximal 149 Kanäle/s
	Interferometrisch	Nireos/ Hera [24]	400-1000	Variabel @ 1-10 nm	1280 x 1024	unbekannt, wenige Millisekunden für Kubus
Snapshot	Interferometrisch	BaySpec/ GoldenEye [25]	400-1100	140 @ 5 nm	648 x 488	1 Spektralkubus/s
	3x3 Mosaik	Silios/ CMS-V (CMS4-V) [26]	550-830	8 @ 30 nm	426 x 339 (682 x 682)	37 Spektralkuben/s
	3x3 Mosaik	Silios/ CMS-C (CMS4-C) [26]	430-700	8 @ 30-40 nm	426x339 (1,3MP) (682x682 (4MP))	65 Spektralkuben/s
	4x4 Mosaik	Silios/ Toucan[27]	400-900	10 @ 30 nm	512 x 512	65 Spektralkuben/s
	4x4 Mosaik	IMEC (Sensor)/ IMEC SSM4x4 VIS [28]	460-600	16 @ ~10 nm	512 x 272	65 Spektralkuben/s
	4x4 Mosaik	IMEC (Sensor)/ SSM4x4 RedNIR [28]	600-800	16 @ 15 nm	512 x 272	120 Spektralkuben/s
	5x5 Mosaik	IMEC (Sensor) / SSM5x5 NIR2 [28]	660-950	25 @ 10-15 nm	409 x 217	170 Spektralkuben/s
	Lichtfeld - Hyperspectral	Cubert/ Ultris 20 [20]	350-1000	164 @ 10 nm	410 x 410	8 Spektralkuben/s

Tabelle 3 Typische Vegetation Indizes mit Wellenlängenbereich. Geordnet nach Messgröße

Abkürzung	**Bezeichnung**	**Wellenlängen** (R für Reflektion)	**Referenz**
		Wassergehalt	
WBI	Water Band Index	$\frac{R970}{R900}$	[29]
WI	Water Index	$\frac{R900}{R1600}$ oder $\frac{R900}{R970}$	[30, 31]
		Chlorophyllgehalt	
SIPI	Structure Insensitive Pigment Index	$\frac{R800-R445}{R800-R680}$ oder $\frac{R800-R450}{R800+R650}$	[29]
NPQI	Normalized phaeophytinization index	$\frac{R415-R435}{R415+R435}$	[29]
NPCI	Normalized pigments chlorophyll ratio index	$\frac{R680-R430}{R680+R430}$	[32]
$NDVI_{680}$	Normalized Difference Vegetation Index	$\frac{R810-R680}{R810+R680}$	[31]
RENDVI	Red Edge Normalized Difference Vegetation Index	$\frac{R750-R705}{R750+R705}$	[31, 32]
REIP	Red Edge Inflexion Point Index	$R700 + 40 \cdot \frac{R670-R780}{R740-R700}$	[33]
CCI	Chlorophyll Content Index	$\frac{R940}{R620}$ oder $\frac{R931}{R653}$ oder $\frac{R940}{R660}$	[34, 35]
MCARI	Modified Chlorophyll Absorption in Reflectance Index	$[R700 - R670 - 0.2 \cdot (R700 - R550)] \cdot \frac{R700}{R670}$	[36]
		Photosynthetische Aktivität	
PRI	Photochemical Reflectance Index	$\frac{R531-R570}{R531+R570}$ oder $\frac{R528-R567}{R528+R567}$ oder $\frac{R570-R539}{R570+R539}$	[31, 37, 38]
NEI	Nitrogen Efficiency Index	$\frac{\left[\left(1{,}8 + {}^{R680}/_{R850}\right) \cdot R760 + R680\right]}{(R850 + R680)}$	[39]

Um Mindestanforderungen an die Filtercharakteristiken der Kameras zu definieren erfolgten spektrale Versuchsmessungen zum Verhalten lokaler Baumarten, wie Fichten, Kiefern und Linden unter Wasserstress. Hierfür wurden Proben, Äste mit Nadeln bei Nadelbäumen bzw. lose Blätter bei Laubbäumen, mittels eines hyperspektralen Scanners am Fachgebiet nach dem Spectral Scanning Prinzip regelmäßig während des Austrocknens aufgezeichnet. Anhand dieses Datensatzes erfolgten Untersuchungen zur Anwendbarkeit, Aussagefähigkeit und Güte verschiedener, in Land- und Forstwirtschaftlicher Literatur zitierter, Vegetationsindizes und bewertet. Eine Übersicht der untersuchten Indizes ist in Tabelle 3 dargestellt. Der Hauptvorteil der Vegetationsindizes liegt hierbei beim Erfassen und nummerischen Ausdrücken von bio-chemischen Stressreaktionen bzw. dem Wasser oder Chlorophyllgehalt der Pflanze durch eine geringe Anzahl an optischen Kanälen, typischerweise zwischen zwei bis vier Wellenlängen. Beispielsweise reduziert sich der zwischen -1 und 1 normierte RENDVI-Wert einer Buche, von 0,58 (Einheitenlos) im gesunden Zustand innerhalb kurzer Zeit auf 0,48. Im annährend ausgetrockneten Zustand liegt der Wert nur noch bei 0,35. Der Wassermangel als Ursache lässt sich durch die steigende Reflexion bei 1450 nm validieren, während der sinkende Chlorophyllgehalt durch das abnehmen der Reflexion bei 550 nm (Grün) im fortgeschrittenen Stadium für den Menschen sichtbar wird.

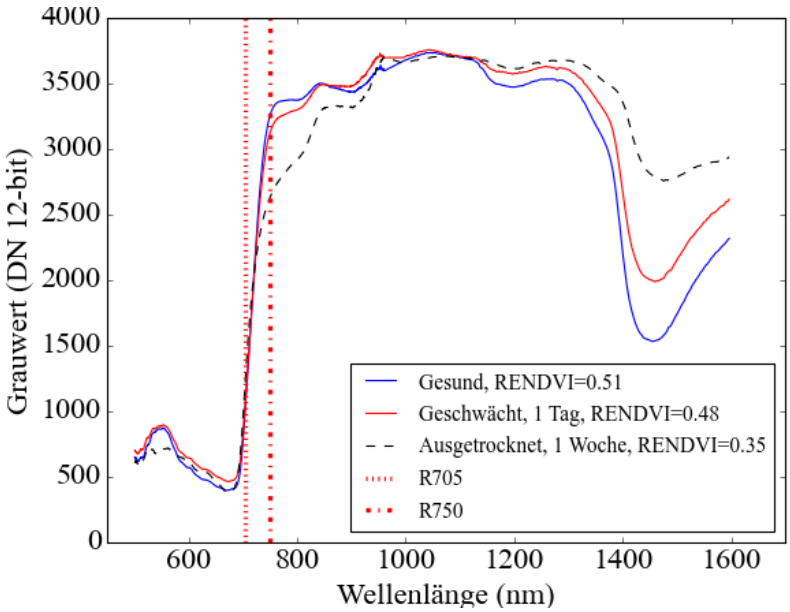


Abbildung 12 Beispiel aus dem erstellten Datensatz: Reflexionsspektrum eines Buchenblatts unter Wassermangel

Die Ergebnisse der an diesem Datensatz durchgeführten Versuche wurden im Rahmen der SPIE Defense + Commercial Sensing Konferenz 2023 im Paper „A review of different multispectral indices for monitoring plant health in mid-mountain sites“ und auf der 2024 Tagung der Gesellschaft für Qualitätswissenschaft e.V. im Paper „Definition von Grenzen zur multispektralen Überwachung der Pflanzenvitalität“ dem Fachpublikum präsentiert.

Im ersten Beitrag konnte gezeigt werden, dass an Forstpflanzen bereits eine geringe Selektion von idealerweise 8 spektralen Kanälen ein umfassender Gesundheitszustand abgebildet werden kann. Hierbei konnte durch Simulation verschiedener Filtereigenschaften zugleich deren Einflussfaktoren bestimmt werden. Insgesamt sollten dabei die Halbwertsbreiten bei spektralfiltern mit gaußkurvenähnlicher Verteilung nicht 20 nm bis 30 nm übersteigen. Hinsichtlich der Zentralwellenlänge des Filters sollte wiederum

eine möglichst hohe Näherung an den Nennwert der Indizes angestrebt werden, wobei bei manchen Indizes wie dem MCARI oder dem NEI auch Verschiebung um 10 nm nur geringe Einflüsse auf den Indexwert haben. Dies wiederum ermöglichten eine vielseitige Substitution und die Definition der 8 Wellenlängen nach Tabelle 4:

Tabelle 4 Minimal benötigte Kombination an spektralen Kanälen für die Erfassung der Gesundheit von Forstpflanzen

Nr.	Wavelength (nm)	Index
1	515	PRI|515 nm
2	550	MCARI, PRI|550 nm
3	571	PRI|515 nm PRI|571 nm
4	670 - 680	NEI, NDVI, MCARI, REIP

Nr.	Wavelength (nm)	Index
5	700	REIP, MCARI, RENDVI
6	750	RENDVI, REIP, NEI
7	780 - 800	NDVI
8	850	NEI

Keine der oben genannten MFA-Kameras erfüllt aktuell genau diese Spezifikation, eine technische Umsetzung wäre jedoch auf Basis von Fabry-Perot Filtern möglich, da auch die Interferenzen 2. Ordnung der höchsten Wellenlänge von 850 nm mit 425 nm unterhalb der geringsten Wellenlänge liegen. Bei den Marktaktuellen MFA-Kameras erfüllt der IMEC SSM 5x5 NIR2 Sensor diese jedoch am besten mit einer typischen Abweichung von 6 - 10 nm, jedoch ist hier der PRI nicht bestimmbar.

Letztendlich sind alle in Tabelle 2 aufgeführten Systeme mit Abzügen für den Forst einsetzbar. Nachteile wie eine geringe Bildauflösungen können beispielsweise durch geeignete Objektivwahl oder Zoomobjektive verbessert werden, jedoch erlaubt beispielswiese die Ultris 20 kein Objektivtausch. Wesentlich kritischer gilt es daher Faktoren wie die Arbeitstemperatur zu bewerten, da die Temperaturen in den Wachstumsperioden (Oktober-April) generell unterhalb 15 °C bzw. 10 °C liegen. Für diese Zeiträume sind nur Systeme mit Heizelementen geeignet. Da hier Zugleich nur eine geringe Solarleistung vorliegt, um die nötige Stromversorgung zu gewähren, sollte zunächst von einem statischen Einsatz abgesehen werden.

Tabelle 5 Zusammenfassung der Kamerasysteme für den Forst

	Objektiv	Bildauf-lösung	Aufnahmege-schwindigkeit	Spektrale Auflö-sung	Kosten	Arbeitstem-peratur
Mehrkamera	C-Mount	hoch	sehr schnell	gering/Anzahl der Kameras	gering	0 - 50 °C
MFA-Kamera	C-Mount	niedrig	sehr schnell	mittel	hoch	0 - 50 °C
Lichtfeld	statisch	niedrig	sehr schnell	sehr hoch	sehr hoch	keine An-gabe
Interferometrisch	C-Mount	mittel	schnell	sehr hoch	hoch	10 - 50 °C
Schaltbare Fabry-Perot	C-Mount	hoch	schnell	sehr hoch	hoch	15 - 10 °C

In der zweiten genannten Veröffentlichung konnte zusätzlich noch erste Grenzwerte definiert werden, welche ein menschliches Eingreifen in den Anwuchs durch Aktionen wie Wassernachfuhr eingeleitet werden müssen. Für den RENDVI und den NDVI konnten prozentuelle Indexreduktion von 1 % bzw. 2 % eines gesunden Ausgangswertes als Warngrenze verstanden werden, während ab Wertverminderung über 6 bis 8 % mit einem Ausfall der Pflanz zu rechnen ist. Eine genaue Definition und Validierung dieser Grenzen gilt zusammen mit weiten Informationen wie den Wetterdaten zu validieren.

Basierend auf den durchgeführten Versuchen entschieden wir uns für einen Technologiedemonstrator auf Basis des NDVI zu entwerfen. Da dieser nur zwei Spektralkanäle benötig, ist dieser zudem kosteneffizient durch zwei hochauflösende Einzelkameras mit Spektralfilter realisierbar. Die Wahl fiel auf die 1,3 Megapixel Basler acA1300 – 60 gm, mit einen 650 nm Spektralfilter ausgestattet und dem Infrarotverstärkte Version Basler acA1300 – 60 gmNIR mit einen 830 nm Spektralfilter. Die Abweichung der Wellenlängen von denen in Tabelle 4 genannten ist durch die Verfügbarkeit der Filter zur Zeit der Bestellung zu erklären. Beide Kameras sind mit einem identischen 25 mm Objektiv ausgestattet, Abbildung 13, links. Um ein Monitoring von mehreren Pflanzen auf der Versuchsfläche zu ermöglichen, sind die Kameras in einer um 360° drehbaren und 135° neigbaren Kopf (Axis T99A10) aus der Sicherheitstechnik montiert.

Für die Überlagerung der Einzelbilder der beiden Kameras und der daraus erfolgenden Berechnung wurde ein Algorithmus entwickelt. Dieser Algorithmus ermöglicht die lineare Verschiebung der Bilder basierend auf dem im Bild vorhanden Kanten der Szenerie. Im Vergleich zu traditionellen Methoden wie dem ORB oder SIFT Verfahren, welche ähnlich zum Blockmatching (Stereovision, siehe AP1) anhand von Schlüsselpunkten gleiche Punkte in dem Bildpaar suchen, um die Verschiebung zu bestimmen, ist der entwickelte Ansatz stabiler gegenüber den unterschiedlichen Reflexionseigenschaften grüner Vegetation zwischen den beiden Wellenlängen, Abbildung 14. Näherer Informationen zu unserem Wavelet Transform basierend Ansatzes können dem Paper: „ Alignment of multi-camera spectral images using wavelet transform“ entnommen werden, dessen Ergebnisse auf der IEEE I2MTC 2024 präsentiert wurden.

Abbildung 13 Links: Spektralkamerapaar aus zwei Basler acA1300 – 60 gm(NIR), Rechts: Kameras im Schwenk-Neigekopf: „Axis T99“

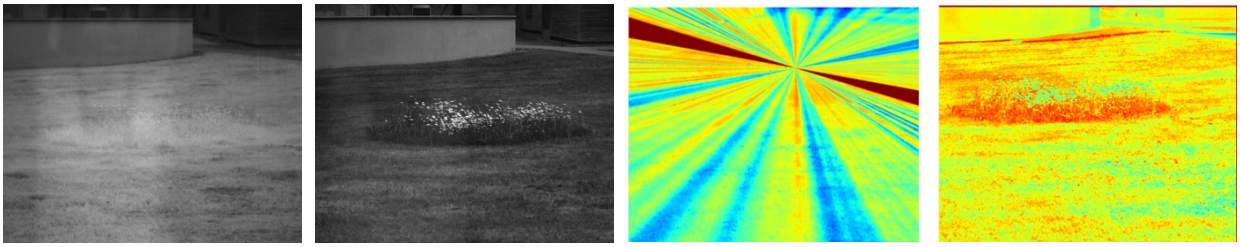


Abbildung 14 Demonstratoraufnahme einer Wiese mit Blumen, links nach rechts: 830 nm -Kanal, 630 nm-Kanal, charakteristisches Ergebnis mittels ORB-Punktmatching,, Überlappung mittels unseres Wavelet Approach

Mit der Fertigstellung des Außentechnikraums erfolgte die Installation des Demonstrators im Feld und das Monitoring einzelner Pflanzen im Sichtfeld wurde gestartet. Abbildung 15 zeigt zwei Beispielpflanzen von unserer Versuchsfläche, eine Douglasie, links, und eine Birke, rechts. Die Farbaufnahmen erfolgten händisch, währen die darunter dargestellten NDVI Falschfarbenbilder vom Demonstrator stammen, welcher dreimal täglich jede Pflanze anfährt. Anhand der händischen Definition einer Maske für die Pflanzen, erfolgte hier analog zu den Laborversuchen eine Mittelung der NDVI-Werte. Den Gesundheitsverlauf der Pflanzen zum diesjährigen Herbsteinbruch zeigen Abbildung 17 für die Douglasie und Abbildung 16 für die Birke, inklusiver der vorläufig ermittelten Warn- und Eingriffsgrenzen für den NDVI mit 2 % und 6 % negativer Abweichung vom gesundem Zustand, hier Mittelwert der ersten 10 Messung.

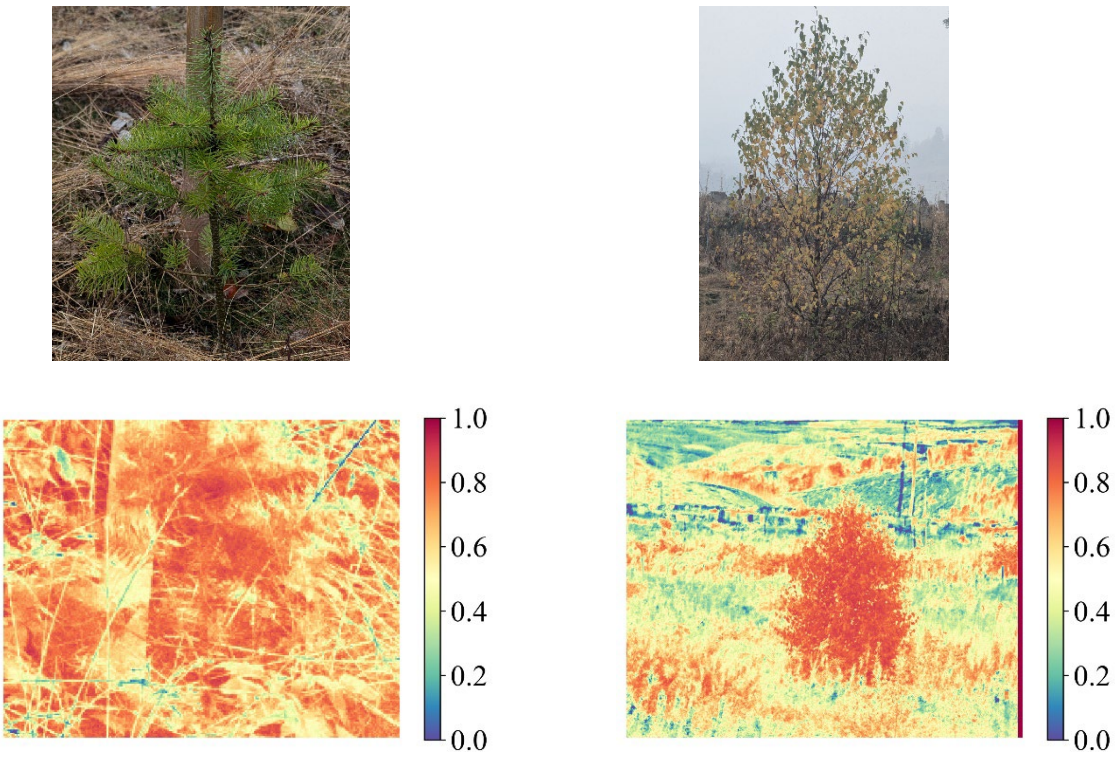


Abbildung 15 RGB Aufnahmen und mittels Demonstrators aufgezeichnete NDVI Falschfarbenbilder einer Douglasie und Birke auf der Versuchsfläche

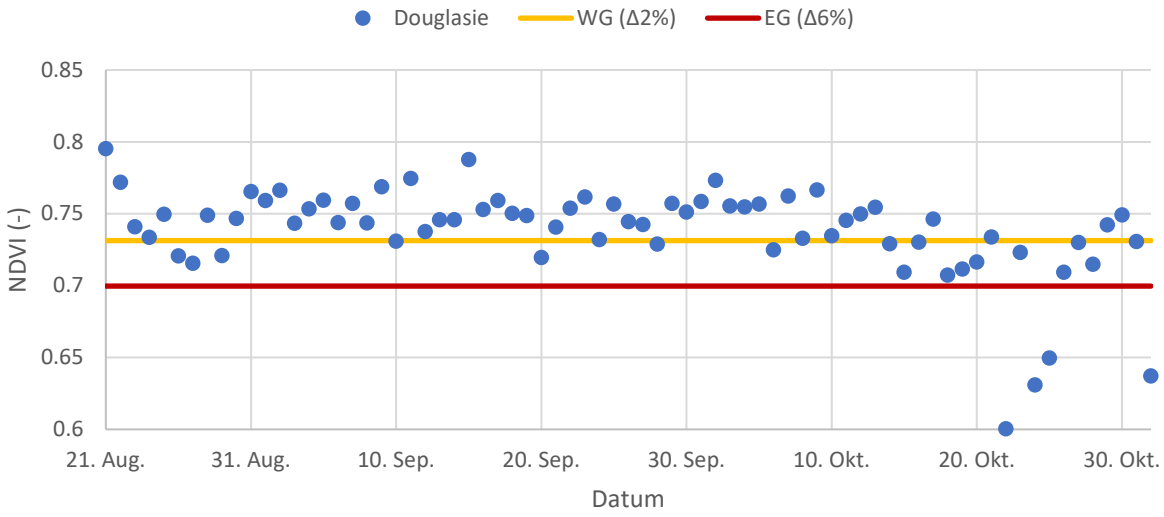


Abbildung 16 NDVI Verlauf der Douglasie zwischen 21 August und 1 November. 2% und 6% Gesundheitsgrenzen ermittelt aus dem Mittelwert der ersten 10 Messungen

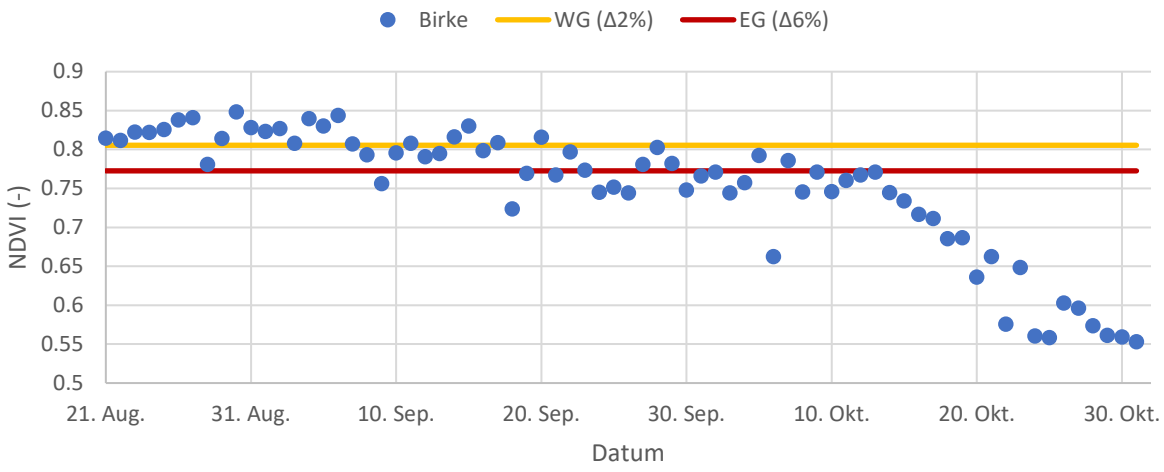


Abbildung 17 NDVI Verlauf der Birke zwischen 21 August und 1 November. 2% und 6% Gesundheitsgrenzen ermittelt aus dem Mittelwert der ersten 10 Messungen

Gut erkennbar ist der Unterschied zwischen Laubbäumen und Dauergrün. Während die NDVI-Werte für die Douglasie annährend stabil bleiben und bis auf einige, durch Wettereffekte wie Nebel bedingte, Ausreißer nur Wertschwankungen unter 6 % aufweisen, ist bei der Birke bereits frühzeitig ein abfallender Trend beobachtbar. Ab Oktober liegt die Werteabweichung oberhalb von 6 % und fällt weiter drastisch ab. Dabei ist natürlich zu beachten, dass der Laubabwurf eine jahreszeittypische Reaktion für Laubbäume ist, und wie der Vergleich zur Douglasie zeigt, nicht durch Wasser- oder Nähstoffmangel zu begründen ist. Die Entwicklung eines Modells, welches diese baumartspezifischen Informationen mit den Spektralinformationen, den Wetterstationsdaten und weiteren Standortfaktoren verknüpft, ist für die zukünftige Forschung notwendig, um eine automatisierte Bewertung zu erhalten. Insbesondere KI basierte Modelle könnten hier langfristig eine Gesundheitsprognose ermöglichen. Mindesten jedoch sollten hier die Möglichkeiten aktueller KI-Modelle zur Segmentierung der Jungbäume von dahinterliegender Vegetation näher untersucht werden, um eine stabilere Bestimmung der Spektraldaten bzw. Index-Werte zu ermöglichen im Vergleich zur manuellen Segmentierung.

In Absprache mit Förstern erfolgten erste Untersuchungen zur Definition forstspezifischer Vegetationsindizes. Der Fokus lag auf der frühzeitigen Detektion des Borkenkäferbefalls in Bestandbäumen. Anstelle des Laubs der Bäume sollten dabei jedoch der Baumharzaustritt um die Eintrittsstelle des Borkenkäfers in dem Stamm detektiert werden. Analog zu den Vegetationsindizes am Blattwerk, Abbildung 12, erfolgte hier die Aufnahme eines Referenzspektrum mittels einer Harzknolle (Abbildung 18: Probe 0). Anhand dieser, angelegte an das NDVI Format, eine hoch und eine niedrig reflektierende Spektralpaarung ermittelt wurde. Mögliche Paarung wurden hier an Harzproben mit unterschiedlichem Fortschritt der Polymerisation, frisch und transparent (Abbildung 18: Gelb) hin zu semi- und intransparent (Abbildung 18: Blau) auf verschieden Trägermaterialien, wie innerer und äußere Rinde und Moos.

Abbildung 18 Baumharz in verschiedenen Polymerisationszuständen: frisch- Gelb und alt-Blau. Auf Verschieden Forsttypischen Trägermaterialien: 0– Harzknolle ohne Trägermaterial als Referenz, 1– innere Rinde, 2– Moos, 3 und 4 – äußerer Rinde

Der hieraus bestimmte Harzerkennungs-Index NDRI (**N**ormalized **d**ifference in **r**esin **i**ndex, dt. Normierte-Differenz Harzindex) zeigte bei einer Wellenlängenpaarung von 1688 nm mit 1093 nm für alle Proben eine sehr hohe Differenz zwischen dem Harz, mit typischen Indexwerten zwischen 0,4 und 0,8 je nach der frische des Harzes, und den Trägermaterialien, mit typischen Indexwerten um 0. Hierbei zeigte die Paarung der Wellenlängen von 1688 nm und 1093 nm, berechnet nach Gleichung 1, hohe Indexwerte für die Harzreste auf den Proben, während sich die Reflexionen der Trägermaterialen ausgleichen, was in niedrigen Indexwerten um 0±0.1 resultiert.

$$NDRI = \frac{R_{1093} - R_{1688}}{R_{1093} + R_{1688}} \tag{1}$$

Hierdurch wird das Baumharz deutlich hervorgehoben, Vergleich Abbildung 19. Zugleich erlaubt die Dimension des Index erste Rückschlüsse auf das Alter des Harzes, wobei die frischen Reste höhere und die semi- und intransparenten Harzreste niedrigere Indexwerte produzieren. Näherer Details sind dem beigefügten auf dem IMEKO 2024 XXIV World Congress präsentierten Beitrag: „A NOVEL VEGETATION INDEX FOR THE DETECTION AND AGE DETERMINATION OF TREE RESIN“ zu entnehmen.

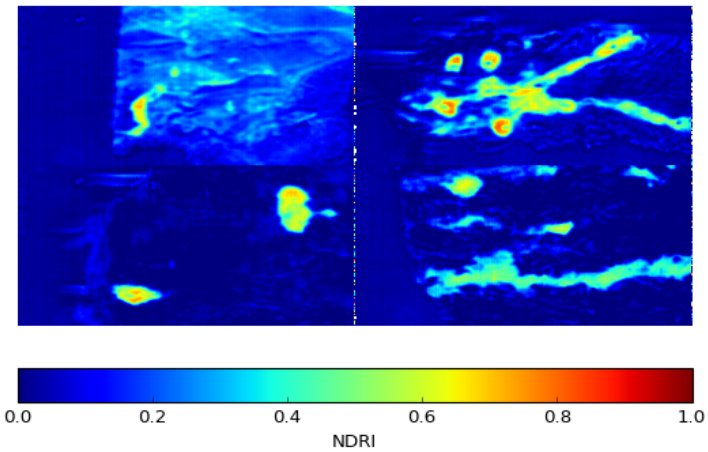


Abbildung 19 Mittels des NDRI (Gleichung 1) berechnete Indexbilder für die Proben in Abbildung 18Abbildung 18

Aktuell ist auf dem Markt kein multispektrales System vertreten, was bildgebend und nach dem, für den Forst geeigneten Verfahren (Snapshot, Spectral Staring, Interferometrisch) Spektraldaten, für den Sichtbare, kurz und langwelligen Infrarotbereich (500-1700 nm) aufzeichnen kann. Zwar exzitieren mittlerweile Sensoren wie der Sony IMX990 welche in der Lage sind diesen gesamten Spektralbereich zu erfassen, jedoch exzitieren hier noch keine multispektralen Varianten. Für ausgewachsene Bäume, welche durch ihrer ausgeprägte Stammdicke weniger vom Umgebungswind beeinflusst werden können jedoch Filterradkameras, also eine Auszeichnung der Kanäle kurz hintereinander in Betracht gezogen werden.

1.1.4 AP3 Untersuchung Basistechnologien verschiedener bodendruck-armer Bewegungssysteme für den Einsatz in Wald- und Forstwirtschaft

Die Bearbeitung des Waldes findet aktuell vorwiegend mit Hilfe von schweren Maschinen, wie Harvester oder Forwarder, statt. Um die Belastung des Waldbodens so gering wie möglich zu halten, werden diese so weit wie möglich, nur auf den Rückegassen verwendet. Im Zwischenraum der Rückegassen kommen leichtere Fahrzeuge oder Rückepferde zum Einsatz. Die Tabelle 6 zeigt einen Vergleich der Bodenbelastungen zwischen schweren (Harvester, Forwarder und Spezial-Forwarder) und leichteren Maschinen (Raupenbagger und Forstraupe) sowie der Belastungen durch einen Menschen, einem Pferd und einen ausgewählten Schreitroboter (Boston Dynamics Spot). Anhand dieser berechneten Werte kann abgelesen werden, dass der idealisiert berechnete spezifische Bodendruck nicht als das alleinige Kriterium zur Bewertung der Bodenbelastung ausreicht. Das Rückepferd würde Beispielsweise mit seinem Bodendruck den Boden stärker belasten als der Raupenbagger, was nicht den beobachteten Zuständen im Wald entspricht.

Tabelle 6: Spezifische Bodendrücke verschiedener Maschinen/Objekte auf dem Waldboden

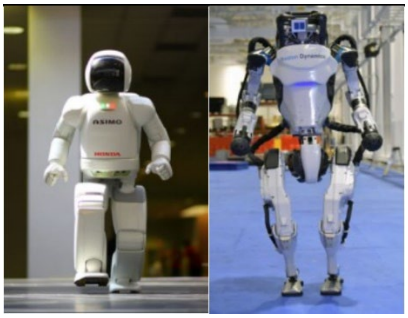
Maschine / Objekt	**Masse in kg**	**Fläche**	**Bodendruck in kg/cm³**	**Quelle**
Harvester John Deer 1270e	24 000		1,60	[40]
Forwarder Ponsse Buffalo	28 000		2,40	[40]
Spezial-Forwarder EMB Elliator (starres Kettenlaufwerk)	41 000	140 000 cm²	0,296	[40]
Raupenbagger Liebherr R914 Compact Litronic[1]	16 550	300 cm · 70 nm · 2	0,39	[41]
Moritz Forstraupe	1 405	165 cm · 30 cm · 2	0,14 … 0,33	[42]
Mensch, einbeinig, Schuhgröße 44	80	25 cm · 10 cm	0,32	-
Rückepferd, dreibeinig	800	15 cm · 15 cm · 3	1,18	[43–45]
Bosten Dynamic Spot, dreibeinig mit max. Nutzlast	46,5[2]	5 cm · 5 cm · 3	0,62	[46, 47]

Zum einen muss beachtet werden, dass von Menschen, Pferd und Spot nur eine punktuelle Belastung ausgeht, im Gegensatz zur flächigen Belastung von Rad- und Kettenfahrzeugen. Zum anderen kann die flächig wirkende Belastung den Bodendruck insbesondere dann erhöhen, wenn Unebenheiten oder Hindernisse überfahren werden. Weiterhin findet die punktuelle Belastung nicht immer auf denselben Stellen des Waldbodens statt. Mensch, Pferd und Spot wählen bei jedem Gang neue, zufällige Punkte. Rad- und Kettenfahrzeuge hingegen befahren die immer gleichen Spuren und erzeugen dadurch wiederkehrende Bodenverdichtung, wobei die erste Überfahrt die stärkste Bodenverdichtung erzeugt. Aus diesen Gründen ist die punktuelle Bodenbelastung der flächigen vorzuziehen und wird in dem Kapitel anhand von Robotertechnik weiter untersucht. Eine Zusammen aktueller Robotiksysteme mit Beispielen und deren Charakteristischen Merkmalen ist in Tabelle 7 dargestellt.

[1] Verschiedene Varianten verfügbar. Hier: Monoblockausleger 4,60 m; mit Schild; Bodenplatten 70 cm

[2] Gewicht Spot: 32,5 kg; Maximale Nutzlast: 14 kg

Tabelle 7 Übersicht ausgewählte Robotersysteme

Beinroboter (Schreitroboter)	**Bild**	**Merkmale**
Zweibeinige Roboter Honda ASIMO, Boston Dynamics Atlas (hier erste Generation)		➢ Menschliches Gehen nachahmen ➢ Komplexe Balancekontrolle ➢ Flexibilität und Manövrierfähigkeit ➢ Eingeschränkte Geländeanpassung
Vierbeinige Roboter ANYbotics, Boston Dynamics Spot		➢ Tierisches Gehen nachahmen ➢ Bessere Stabilität und Tragfähigkeit ➢ Vielfältige Gangarten ➢ Ausgezeichnete Geländeanpassung
Mehrbeinige Roboter Boston Dynamics RHex, Robugtix T8X		➢ Insektenbewegung nachahmen ➢ Extrem hohe Stabilität ➢ Langsam, aber stark in der Hindernisüberwindung ➢ Komplexes Kontrollsystem
Radroboter (Bsp. Robotnik RB-Watcher Überwachung Roboter)		➢ Hohe Effizienz ➢ Einfache mechanische Struktur ➢ Stabilität und Zuverlässigkeit ➢ Flexible Handhabung ➢ Breites Anwendungsspektrum ➢ Technologische Erweiterbarkeit
Kettenroboter (Bsp. Mobiler Raupenroboter Bunker Mini 2.0 (UGV))	ROS	➢ Hohevorragende Geländeanpassung ➢ Hohe Stabilität und Tragfähigkeit ➢ Gute Steigfähigkeit und Hindernisüberwindung ➢ Geeignet für den Einsatz in rauen Umgebungen ➢ Multifunktionalität und Anpassbarkeit ➢ Niedrigere Bewegungsgeschwindigkeit

Die Anforderungen an die Schreitrobotiksystem werden in dem nachfolgenden Mindmap, Abbildung 20 veranschaulicht. Wie zu erkennen ist, sind die Herausforderungen vielfältig. Die Recherche umfasst eine vielzahl an verschiedenen Robotertypen (rad-/kettengetriebene sowie diverse zwei- bzw. mehrbeinige Roboter). Das Ergebnis der Bewertung anhand der Anforderungen aus der Mindmap ergab, dass der Boston Dynamics Schreitroboter Spot, wie er bereit in der Tabelle 6 und Tabelle 7 erwähnt wurde, sich als geeignet herausstellte. Er wurde bereits auf der Versuchsfläche in Cursdorf auf seine Feldtauglichkeit hin getestet und konnte hier seine Fähigkeiten beweisen, komplexes Terrain zu navigieren, die Ergebnisse sind hier in Tabelle 8 zusammengefasst.

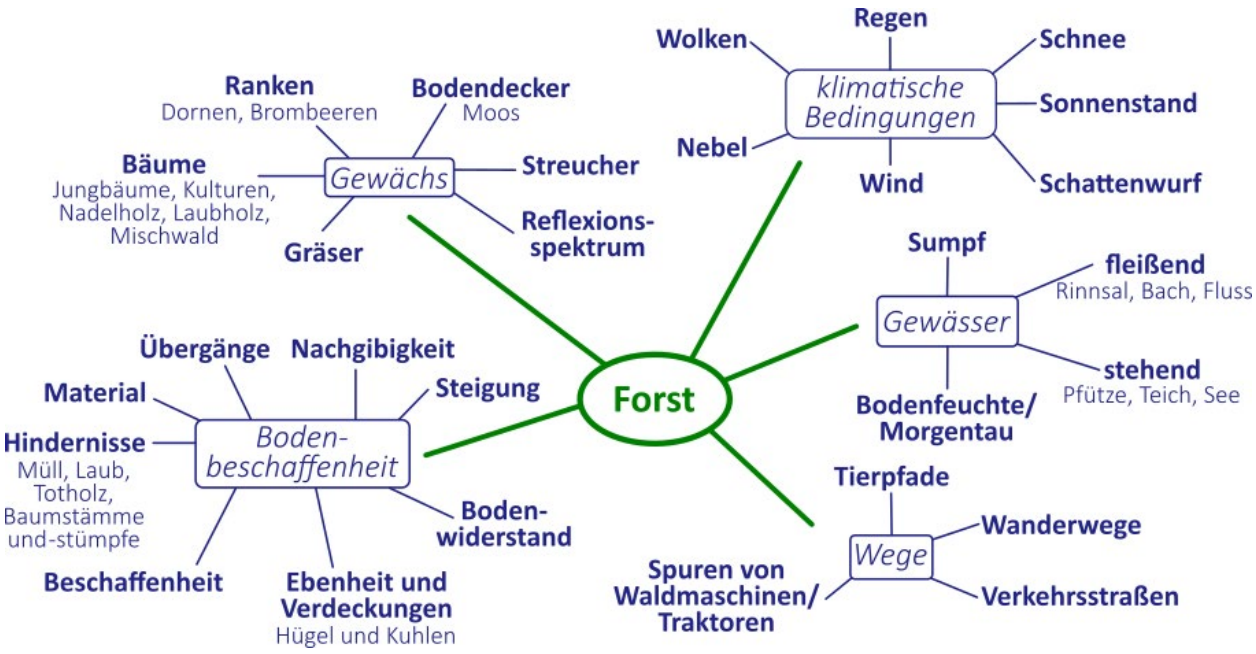


Abbildung 20 Übersicht der verschiedenen Faktoren im Forst

Tabelle 8 Anforderung an die Schreitrobotik und die Erfüllung durch den „Spot“

Anforderung	Beschreibung der Anforderung	Erfüllung durch „Spot“
Bewegungsspielraum	Der Roboter muss in der Lage sein, verschiedene Gänge und Gangarten zu beherrschen. Schrittlänge, Laufhöhe und Geschwindigkeit müssen variabel sein, um Hindernisse überwinden zu können.	Spot hat erfolgreich verschiedene Gangarten (Walk, Crawl) mit variierenden Laufhöhen und Schritt- längen demonstriert. Die Anpassung der Geschwindigkeit wurde implementiert, um Hindernisse effektiv zu überwinden.
Sicht und Erkennung der Kameras	Erkennung von Hindernissen und Umgebungsmerk- malen in unterschiedlichen Lichtverhältnissen.	Die Kameras ermöglichen die Hinderniserkennung, aber die Leistung bei schlechten Lichtverhältnissen war suboptimal. Anpassungen der Kameraeinstellungen sind erforderlich, um die Sicht zu verbessern.
Maximale Steigungsfähigkeit	Bewältigung steiler Neigungen, sowohl vorwärts als auch rückwärts.	Spot konnte Steigungen bis 35° auf feuchter Blumenerde bewältigen, zeigte jedoch Instabilitäten bei stärkerer Neigung oder glatterem Untergrund.
Überwindung von Hindernissen	Roboter muss dynamische Hindernisse erkennen und überwinden können.	Spot kann Hindernisse, wie z. B. Ranken, mit einer Zugkraft von bis zu 180 N überwinden. Die Hinderniserkennung muss jedoch weiter optimiert werden, um kleinere Hindernisse und dynamische Objekte besser zu erfassen. Zudem ist eine präzisere Positionierung vor dem Überwinden eines Hindernisses sinnvoll.
Anpassung an verschiedene Untergründe	Anpassung der Gangart und Geschwindigkeit an unterschiedliche Bodenbeschaffenheiten wie Gras, Schlamm und Schotter.	Spot zeigte eine gute Anpassungsfähigkeit auf verschiedenen Untergründen, hatte aber Leistungseinschränkungen auf rutschigem oder sehr unebenem Terrain. Die implementierte dynamische Anpassung der Haftreibungswerte führte zu spürbaren Veränderungen im Bewegungsverhalten.
Erkennung und Vermeidung von Gefahren	Der Roboter soll Löcher, Abgründe und große Hindernisse erkennen und sicher umgehen.	Die Sensoren waren in der Lage, größere Gefahren wie Abhänge zu erkennen. Bei der Erkennung kleinerer und weniger sichtbarer Gefahren wie tiefem Laub oder Löchern im Boden gibt es jedoch noch Verbesserungspotenzial.

Maximale Tragfähigkeit	Der Spot muss in der Lage sein, Lasten bis zur angegebenen Kapazität ohne Leistungseinbußen zu tragen.	Die maximale Tragfähigkeit wurde erfolgreich getestet, und Spot konnte Lasten bis zum angegebenen Grenzwert transportieren, ohne dass es zu einem spürbaren Leistungsabfall kam. Allerdings zeigte er eine erhöhte Anfälligkeit gegenüber äußeren Einflüssen wie Wind.

Während der Evaluation des „Spots“ zusammen mit dem „RB-Watcher“, Abbildung 21, stellten insbesondere die hohen Gräser das Haupthindernis dar. Innerhalb diesen „versinkt“ der Spot, trotz einer typischen Stand- und Laufhöhe von 450 mm. Zugleich kann die im „Spot“ verbaute 360° Hinderniserkennung, basierend auf Structured-Light- Stereovision mit geringer Ortsauflösung, nicht zwischen passierbaren Hindernissen (Gras) oder unpassierbaren (Baumstümpfe) unterscheiden. Damit der „Spot“ sich innerhalb des Grases fortbewegen kann, mussten diese Hinderniserkennung abgeschaltet werden. Auf das Laufverhalten und die Stabilität hatte dies jedoch keinen erfassbaren Einfluss. Unter dieser Voraussetzung kann zusammengefasst werden, dass der „Spot“ Ziele auf der Versuchsfläche, ähnlich zum Menschen, anlaufen konnte. Nicht erkennbare Bodenunebenheiten wurden entweder durch die Gewichtsverlagerung, oder durch Ausweichschritte von der internen Regelung ausgeglichen. Schwer passierbare Vegetation, wie Himbeerbüsche, konnten nur bedingt durchquert werden, da sich hier durch die geringe schritthöhe Ranken die Beine umschlingen und diese blockieren. Obwohl ein Durchlaufen nicht möglich war, konnte der Roboter seine Stabilität aufrechterhalten. Der Einfluss auf die Vegetation ist zugleich gering, besonders im Vergleich zum Radsystem mit weniger Bodenfreiheit, welches deutliche Spuren hinterlässt.

In Rahmen des durchgeführten Tests wurden beide Systeme per Hand ferngesteuert und so unpassierbare Hindernisse vermieden. In Anbetracht auf eine zukünftige (Teil-)Automatisierung müssen hier Kartierungsoptionen in Erwägung gezogen werden. Wie in AP1 beschrieben könnten zwei- oder dreidimensionale Luftkarten mittels UAV herangezogen werden, in welcher die Zielpositionen (Jungbäume) und Hindernisse (Baumstümpfe, Dichter Wildwuchs) vermerkt sind. Da ein Einbinden externer Karten in den „Spot“ nach aktuellem Softwarestand nicht möglich ist, gilt es hier für den Forsteinsatz eine plattformunabhängige Steuerung zu entwickeln.

Abbildung 21 Robotnik „RB-Watcher“ (schwarz-silber, unten links) und Boston Dynamic „Spot“ (gelb, mittig oben) im hohen Gras bzw. Wildhimbeeren auf der Versuchsfläche. Der Spot ist vollständig im Gras „versunken“

1.2 Notwendigkeit und Angemessenheit

Es wurden nur für die Projektinhalte notwendige Arbeiten durchgeführt. Die Recherche zum Stand der Wissenschaft und Technik, Optimierung und Weiterentwicklung des Kamerasystems und der Algorithmen der Bildverarbeitung bzw. der Software zu der Erarbeitung des Demonstrators waren für die Projektziele angemessen.

1.3 Nutzen und Verwertbarkeit im Sinne des Verwertungsplanes

Im Sinne des Verwertungsplanes wurden die erarbeiteten Ergebnisse bereits in Forschung- und Lehre verwertet.

Als wissenschaftliche Verwertung ist auf Basis der im *Startervorhaben 2* erzielten Ergebnisse das Verbundvorhaben *Waldmonitor - Überwachung biotischer und abiotischer Faktoren beim Waldumbau* in Kooperation mit dem Fraunhofer-Institut für Angewandte Optik und Feinmechanik, der IMMS GmbH, Orbit GmbH und dem Forstliches Forschungs- und Kompetenzzentrum Gotha entstanden. Dieses Verbundvorhaben ist bereits durch Projektträger Jülich bewilligt und im Jahr 2023 gestartet worden (Förderkennzeichen 03WIR3607D). Das Hauptziel des Teilvorhabens an der TU Ilmenau ist die Erweiterung des multispektralen Kamerasystems auf Basis des entwickelten Demonstrators durch die Integration von 3D-Farbbildaten und Umweltfaktoren in einen gemeinsamen Datenmodell für eine gezielterer Aussage über den Gesundheitsverlauf der Jungbäume.

Im Verbundvorhaben *Raute - Robotik- und Automatisierungstechnologien für den klimaresilienten Waldumbau* sollen die gewonnen Ergebnisse und Potentiale im Bereich der Robotik in Zusammenarbeit mit dem Fachgebiet Biomechatronik der TU Ilmenau, dem Fachbereich Wald- und Forstwirtschaft der Fachhochschule Erfurt und den Industriepartnern Ingenieurbüro Welschof sowie Hohe Tanne GmbH und die Möglichkeiten und Fähigkeiten der Roboter detaillierter und den Aufgaben des Waldumbaus zu definieren. Dieses Verbundvorhaben befindet sich derzeit im Bewilligungsprozess beim Projektträger Jülich (Aktenzeichen XY)

Darüber hinaus ist noch ein weiteres Verbundvorhaben *SchwarmWald* (Schwarmbasierte Robotik- und Automatisierungstechnologien für den Waldumbau) in Zusammenarbeit mit dem Fraunhofer-Institut für Angewandte Optik und Feinmechanik, dem Thüringen Forst AöR, und vier weiteren industriellen Partnern entstanden. Dieses Verbundvorhaben befindet sich derzeit im Bewilligungsprozess beim Projektträger Jülich (Aktenzeichen XY). Das Hauptziel des Teilvorhabens an der TU Ilmenau ist die Weiterentwicklung der Roboterplattformen zum gezielten unterstützen des Waldumbaus durch autonomes Pflanzen und Pflegen der Jungbäume.

1.4 Fortschritt bei anderen Stellen

Im Zeitraum der Durchführung des Startervorhabens 2 wurde keine Fachliteratur bezüglich aktueller Technologien in den Bereichen 3D-Bildgebung, multispektrale Bildgebung und Robotik für den Einsatz im Forstlichen Umfeld durch andere Stellen veröffentlicht.

1.5 Erfolgte Veröffentlichung

Während der Bearbeitung des Startervorhabens 2 wurden folgende Veröffentlichungen erzielt:

Titel	Konferenz
A review of different multispectral indices for monitoring plant health in mid-mountain sites	SPIE Defense + Commercial Sensing 2023
Alignment of Multi-Camera spectral images using Wavelet Transform	IEEE I2MTC 2024
Novel vegetation index for the detection and age determination of tree resin	IMEKO 2024 XXIV World Congress
Definition von Grenzen zur multispektralen Überwachung der Pflanzenvitalität	GQW Tagung 2024

1.6 Referenzen

[1] Bernhard Henning, “Tipps für die Aufforstung,” FORESTBOOK, Online, Apr. 2024. [Online]. Available: https://www.forestbook.info/news/tipps-fuer-die-aufforstung/

[2] D. Vehar, J. Rainer, and R. Nestler, “Optische 3D-Technologien für spezifische Anwendungen in der Wald- und Forstwirtschaft,” Ilmenau, Dec. 2023.

[3] R. Szeliski, D. Scharstein, and H. Hirschmüller, *Middlebury Stereo Vision Page.* [Online]. Available: https://vision.middlebury.edu/stereo/eval3/ (accessed: Dec. 1 2023).

[4] Lucid Vision Labs, *Helios2: The next generation of Time-of-Flight.* [Online]. Available: https://thinklucid.com/helios-time-of-flight-tof-camera/ (accessed: Nov. 27 2023).

[5] Basler AG, *blaze-101.* [Online]. Available: https://docs.baslerweb.com/blaze-101 (accessed: Nov. 27 2023).

[6] Basler AG, *blaze-102.* [Online]. Available: https://docs.baslerweb.com/blaze-102 (accessed: Nov. 27 2023).

[7] Microsoft, *Hardwarespezifikationen für Azure Kinect DK.* [Online]. Available: https://learn.microsoft.com/de-de/azure/kinect-dk/hardware-specification (accessed: Nov. 30 2023).

[8] StereoLabs*, *ZED 2: Versatile stereo camera for spatial perception.* [Online]. Available: https://www.stereolabs.com/zed-2/ (accessed: Dec. 1 2023).

[9] IDS Imaging Development Systems GmbH, *Ensenso N-Serie: 3D-Stereo-Vision - präzise, robust und einfach.* [Online]. Available: https://de.ids-imaging.com/ensenso-3d-camera-n-series.html (accessed: 01.012.2023).

[10] Luxonis, *OAK-D Pro.* [Online]. Available: https://docs.luxonis.com/projects/hardware/en/latest/pages/DM9098pro/ (accessed: Dec. 1 2023).

[11] intel RealSense, *Intel RealSense Depth Camera D435i.* [Online]. Available: https://www.intelrealsense.com/depth-camera-d435i/ (accessed: Dec. 1 2023).

[12] Leica Geosystems, Ed., *LEICA BLK360: Reality Capture. Jetzt.* Imaging Laser Scanner. Accessed: Nov. 23 2023. [Online]. Available: https://leica-geosystems.com/-/media/files/leicageosystems/products/datasheets/leica-blk360---specsheet.ashx?la=de-de&hash=48AA64BEFEF9C45F36AFF725BF0AE1F2

[13] Leica Geosystems, Ed., *Leica RTC360 3D-Reality-Capture-Lösung: Schnell. Agil. Präzise.* Accessed: Nov. 23 2023. [Online]. Available: https://leica-geosystems.com/-/media/files/leicageosystems/products/datasheets/leica%20rtc360%20ds%20872752%200620%20de%20lr.ashx?la=de-de&hash=AB8A1A25780A8964E263BE4235AD796A

[14] Trimble Germany GmbH, Ed., *Trimble X12: 3D - Laserscanning - System.* Accessed: Nov. 23 2023. [Online]. Available: https://trl.trimble.com/docushare/dsweb/Get/Document-1029280/022516-644A-de-DE_Trimble%20X12_DS_0722_LR%20-%20sec.pdf

[15] G. Xu, X. Wang, X. Ding, and X. Yang, “Iterative Geometry Encoding Volume for Stereo Matching,” *2023 IEEE/CVF Conference on Computer Vision and Pattern Recognition (CVPR)*, pp. 21919–21928.

[16] L. Lipson, Z. Teed, and J. Deng, *RAFT-Stereo: Multilevel Recurrent Field Transforms for Stereo Matching*, *2021 International Conference on 3D*.

[17] J. Li *et al.,* “Practical Stereo Matching via Cascaded Recurrent Network With Adaptive Correlation,” *2022 IEEE/CVF Conference on Computer Vision and Pattern Recognition (CVPR)*, pp. 16242–16251.

[18] T. Yan, Y. Gan, Z. Xia, and Q. Zhao, *Segment-Based Disparity Refinement With Occlusion Handling for Stereo Matching*, *IEEE Transactions on Image Processing*, vol. 28.

[19] IMEC, *Snaptshot Mosaic SWIR Range Hyperspectral Imaging Camera.* [Online]. Available: https://www.imec-int.com/drupal/sites/default/files/inline-files/Mosaic%20SWIR%203x3%20snapshot%20SWIR%20range%20hyperspectral%20imaging%20camera_0.pdf

[20] Cubert GmbH, Ed., *Ultris X20.* [Online]. Available: https://www.cubert-hyperspectral.com/products/ultris-x20

[21] IMEC, *Snapscan VNIR Hyperspectral Imaging Camera.* [Online]. Available: https://scientificimaging.com/shop/hyperspectral-imaging/imec-snapscan-vnir-hyperspectral-imaging-camera/

[22] J. J. Sousa *et al., UAV-Based Hyperspectral Monitoring Using Push-Broom and Snapshot Sensors: A Multisite Assessment for Precision Viticulture Applications*, *Sensors*, 22 (17).

[23] HinaLea, Ed., *Model 4250: 400-1000nm VIS-NIR*, 2022. [Online]. Available: https://hinaleaimaging.com/wp-content/uploads/2022/06/Model-4250-Intelligent-Imaging-System-2022.pdf

[24] Nireos, Ed., *HERA Hyperspectral Camera: VIS-NIR 400-1000nm.* [Online]. Available: https://www.nireos.com/wp-content/uploads/2022/07/HERA-brochure.pdf?_gl=1*klxxpu*_up*MQ.*_ga*MTE3NDI5NjAxNy4xNzEwMjQ3NDYx*_ga_V160CRDDR9*MTcxMDI0NzQ1OS4xLjAuMTcxMDI0NzQ1OS4wLjAuMA.

[25] BaySpec, Ed., *GoldenEye-The Ultimate Snapshot Imager: Captures All in One Shot for VIS/NIR*.

[26] SILIOS Technologies, Ed., *CMS: Multi-Spectral Camera: CMS19100112.* [Online]. Available: https://www.silios.com/cms4-series

[27] SILIOS Technologies, Ed., *Toucan Camera.* [Online]. Available: https://www.silios.com/toucan-camera

[28] IMEC, *Imec's Photonfocus Snapshot Series Cameras.* [Online]. Available: https://pro-lite.co.uk/products-services-index/spectroscopy/hyperspectral-imaging/multispectral-imaging/multispectral-imager-filter-on-chip/imec-photonfocus-snapshot/

[29] J. Penuelas, I. Filella, C. Biel, L. Serrano, and R. Savé, “The reflectance at the 950-970 nm region as an indicator of plant water status,” *International Journal of Remote Sensing*, pp. 1887–1905.

[30] J. Penuelas, J. Pinol, R. Ogaya, and I. Filella, “Estimation of plant water concentration by the reflectance Water Index WI (R900/R970),” *International Journal of Remote Sensing*, pp. 2869–2875.

[31] R. Coelho, A. Sousa, A. E. Rato, and M. Vaz, Eds., *Response to salinity in young olive trees of three Iberian varieties*, 2014.

[32] J. Penuelas, J. A. Gamon, A. L. Fredeen, J. Merino, and C. B. Field, “Reflectance indices associated with physiological changes in nitrgen- and water-limited sunflower leaves,” *Remote Sensing of Environment*, pp. 135–146.

[33] G. Guyot, “Optical properties of vegetation canopies,” *Applications of remote sensing in agriculture*, pp. 19–43.

[34] Hansatech Instruments, *CL-01 Chlorophyll Meter: Chlorophyll conten meter.* [Online]. Available: https://www.hansatech-instruments.com/product/cl-01-chlorophyll-content-meter/ (accessed: Sep. 26 2022).

[35] A. D. Richardson, S. P. Duigan, and G. P. Berlyn, *An evaluation of noninvasive methods to estimate foliar chlorophyll content*, *New Phytologist*, vol. 153.

[36] D. Haboundane, J. R. Miller, N. Tremblay, P. J. Zarco-Tejada, and L. Dextraze, “Integrated narrow-band vegetation indices for prediction of crop chlorophyll content for application to precision agriculture,” *Remote Sensing of Environment*, August 2002, pp. 416–426, 2002.

[37] J. A. Gamon, J. Penuelas, and C. B. Field, “A narrow-waveband spectral index that tracks diurnal changes in photosynthetic efficiency,” *Remote Sensing of Environment*, Juli 1992, pp. 35–44, 1992.

[38] C. V. M. Barton, “Advances in remote sensing of plant stress,” in vol. 354, *Plant and Soil: An International Journal on Plant-Soil Relationships*, Springer Link, Ed., 2012, pp. 41–44.

[39] H.-Y. Zhang *et al.,* “Remotely assessing photosynthetic nitrogen use efficiency with in situ hyperspectral remote sensing in winter wheat,” *Remote Sensing of Environment*, November 2018, pp. 90–100, 2018.

[40] R. Riggert, H. Fleige, B. Kietz, T. Gaertig, and R. Horn, *Einfluss von üblichen Forst- und Spezialmaschinen auf die Bodenstruktur und –stabilität*. Rostock, *Jahrestagung der DBG 2013: Böden - Lebensgrundlage und Verantwortung.* Accessed: Aug. 24 2023. [Online]. Available: http://eprints.dbges.de/969/

[41] Liebherr-France SAS, Ed., *R 914 Compact Litronic: Liebherr Raupenbagger.* Accessed: Nov. 10 2023. [Online]. Available: https://www.liebherr.com/external/products/products-assets/068671e8-bcc0-4543-af2f-1833285b77a8/R914Compact-StageV-DE-PI-2022-05.pdf

[42] Pfanzelt Maschinenbau GmbH, Ed., *Produktprogramm 2023*, 2023. Accessed: Nov. 10 2023. [Online]. Available: https://www.pfanzelt.com/securedl/sdl-eyJ0eXAiOiJKV1QiLCJhbGciOi-JIUzI1NiJ9.eyJpYXQi-OjE3MTA3NjA2NDcsImV4cCI6MTcxMDkzNzA0NywidXNlciI6MCwiZ3JvdXBzIjpbMCwtMV0sIm-ZpbGUiOiJmaWx-lYWRtaW4vcmVkYWt0aW9uL1Byb3NwZWt0X3VuZF9QcmVpc2xpc3RlL1Byb2R1a3Rwcm9ncmFtbV8yMDIzLW5hY2hkcnVjay8yMzA5MjBfZ2VzYW10cHJvZ3JhbW1fMjAyM19hNF80Y19kZS1uYWN-oZHJ1Y2tfd2ViLnBkZiIsInBhZ2UiOjMwN30.VUGTLTtFoWuSa4d2bNB4VQZ6jK5LVn46XXgpTWv2kq0/230920_gesamtprogramm_2023_a4_4c_de-nachdruck_web.pdf

[43] Hippoplast, *Hufbeschlag Größe 4.* [Online]. Available: https://www.hippoplast.de/p/hufbeschlag-groesse-4 (accessed: Nov. 14 2023).

[44] J. Sündermann and P. Röhe, Eds., *Bodenschonende Holzernte in geschädigten Eschenbeständen auf Nassstandorten: Erkenntnisse und Empfehlungen aus Fallstudien in Mecklenburg-Vorpommern*, 2023. Accessed: Nov. 10 2023. [Online]. Available: https://service.mvnet.de/_php/download.php?datei_id=104185

[45] J. Wirth and D. Wolff, “Vergleich von Pferde- und Seilschleppereinsatz beim Vorliefern von Vollbäumen,” *AFZ-Der Wald*, vol. 63, pp. 968–971, 2008.

[46] Boston Dynamics, Ed., *Payload Developer Guide*, 2023. Accessed: Aug. 24 2023. [Online]. Available: https://dev.bostondynamics.com/docs/payload/readme

[47] Boston Dynamics, *Defeatured Spot CAD Models*, 2022. Accessed: Nov. 9 2023. [Online]. Available: https://support.bostondynamics.com/s/article/Defeatured-Spot-CAD-Models

Berichtsblatt

1. ISBN oder ISSN geplant	2. Berichtsart (Schlussbericht oder Veröffentlichung) Schlussbericht

3. Titel

Basistechnologieevaluation WIR!-Holz-21-regio Startervorhaben II

4. Autor(en) [Name(n), Vorname(n)] Prof. Dr. Notni, Gunther M.Sc. Richter, Martin	5. Abschlussdatum des Vorhabens Mai 2024
	6. Veröffentlichungsdatum
	7. Form der Publikation
8. Durchführende Institution(en) (Name, Adresse) Technische Universität Ilmenau Fakultät für Maschinenbau Fachgebiet Qualitätssicherung und Industrielle Bildverarbeitung Gustav-Kirchhoff-Platz 2 98693 Ilmenau	9. Ber. Nr. Durchführende Institution
	10. Förderkennzeichen 03WIR3603
	11. Seitenzahl 40
12. Fördernde Institution (Name, Adresse) Bundesministerium für Bildung und Forschung (BMBF) 53170 Bonn	13. Literaturangaben 47
	14. Tabellen 8
	15. Abbildungen 21

16. Zusätzliche Angaben

17. Vorgelegt bei (Titel, Ort, Datum)

18. Kurzfassung

Im Rahmen des Startervorhaben 2 des Bündnisses Holz-21-regio erfolgte eine Evaluation aktuellster Messysteme in den Bereichen der dreidimensionalen und multispektralen Bildverarbeitungssysteme, sowie Roboterplattformen, insbesondere Schreitrobotik, für dem Einsatz im forstlichen Umfeld. Die geleisteten Arbeiten zeigen die aktuellen Fähigkeiten und Limitationen dieser Systeme unter den Bedingungen einer repräsentativen Kahlschlagfläche, welche im Rahmen des Projektes „Startervorhaben 2“ für nachfolgende Projekte als Versuchsfläche aufbereitet wurden. Im Bereich der multispektralen Bildgebung wurden zusätzlich Versuche zur berührungslosen Vitalparameterschätzung an typischen Forstpflanzen durchgeführt. Hieraus erfolgte der Entwurf und die Installation eines Demonstrators, welcher mittels des NDVI (Normalized Difference Vegetation Index), einer Kombination der Wellenlängen um 830nm und 670 nm erste Feldmessungen durchführt.

Während der Projektlaufzeit wurden vier Veröffentlichungen, drei auf internationalen Fachkonferenzen, eine nationale durchgeführt. Weiterhin wurden zwei studentische Master-Abschlussarbeiten und ein Projektseminar während der Bearbeitung dieses Projektes betreut und abgeschlossen. Auf Basis der Ergebnisse aus diesem Projekt sind drei Verbundprojekte mit anderen Universitäten, Forschungsinstituten und Unternehmen initiiert worden.

19. Schlagwörter

multispektrale Bildgebung, 3D-Bildgebung, Bildverarbeitung, Vitalparameterschätzung, Forst

20. Verlag	21. Preis