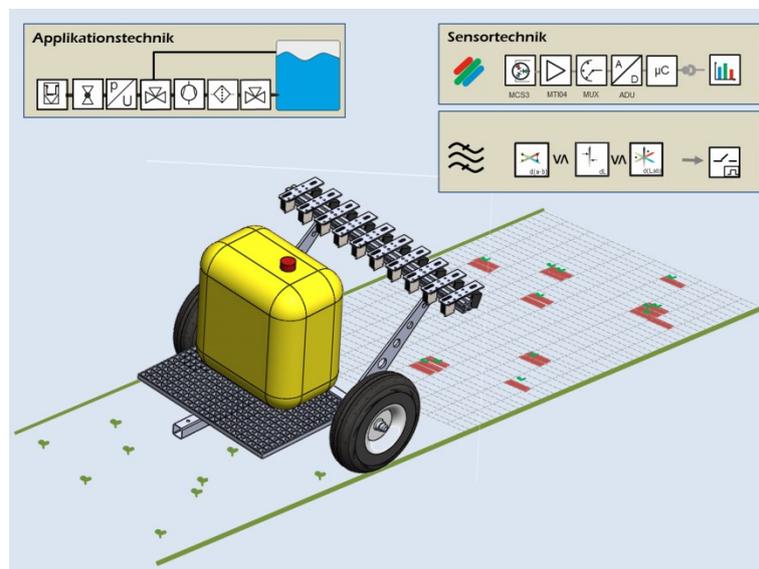


Entwicklung eines Sensorarrays als Grundlage für die punktgenaue Ausbringung von Herbiziden zur Einsparung chemischer Pflanzenschutzmittel und Schonung der Umwelt



Endbericht

DBU-Projekt
Az: 31602-05

Dr. Oliver Schmittmann
Prof.Dr.-Ing. Peter Schulze Lammers
Matthias Kuhl

Bonn, September 2015

Gefördert durch die Deutsche Bundesstiftung Umwelt





Name des herausgebenden Bewilligungsempfängers**Premosys GmbH**

Matthias Kuhl

HIGIS-Ring 17-20
D-54578 Wiesbaum / Germany
e-Mail: info@premosys.com**Institut für Landtechnik Universität Bonn**Prof. Dr. P. Schulze Lammers
Dr. O. SchmittmannNußallee 5
53115 Bonn
e-Mail: o.schmittmann@uni-bonn.de**Sachtitel**Entwicklung eines Sensorarrays als Grundlage für die
punktgenaue Ausbringung von Herbiziden zur Einsparung
chemischer Pflanzenschutzmittel und Schonung der Umwelt**Abschlussbericht**Förderung des Vorhabens durch die Deutsche Bundesstiftung Umwelt
(Az: 31602-05)**Verfasser:**Dr. Oliver Schmittmann
Prof. Dr. Peter Schulze Lammers
Matthias Kuhl

Bonn, September, 2015



06/02		Projektkennblatt der Deutschen Bundesstiftung Umwelt			
Az		Referat		Fördersumme 122.000	
Antragstitel		Entwicklung eines Sensorarrays als Grundlage für die punktgenaue Ausbringung von Herbiziden zur Verminderung der erforderlichen Menge von Pflanzenschutzmitteln und Schonung der Umwelt			
Stichworte		Pflanzenerkennung, Direkteinspeisung, Bioherbizide, Farbsensoren			
Laufzeit 12 Monate		Projektbeginn 1.Juni 2014		Projektende 31. Mai 2015	
Zwischenberichte		Projektphase(n) 1			
Bewilligungsempfänger		PREMOSYS GmbH HIGIS-Ring 17-20 D-54578 Wiesbaum		Tel.: 06593 - 99 862-10 Fax: 06593 - 99 862-19	
				Projektleitung Matthias Kuhl	
				Bearbeiter Matthias Kuhl	
Kooperationspartner		Universität Bonn Institut für Landtechnik Prof.Dr.Peter Schulze Lammers, Dr.Oliver Schmittmann Nußallee 5 53115 Bonn			
Zielsetzung und Anlaß des Vorhabens					
<p>Zu Reduzierung der Mengen von Pflanzenschutzmitteln, wird an eine dezentrale Einspeisung von Wirkstoffen direkt an der Einzeldüse gedacht. Das Einsparpotential liegt darin, dass nur bei Bedarf an einer vorher identifizierten Stelle Herbizid ausgebracht wird, an der auch eine Unkrautpflanze steht und diese punktgenau bekämpft wird. Voraussetzung hierfür ist eine hoch auflösende Pflanzenerkennung.</p> <p>Ziel des Projektes ist die Entwicklung eines Sensorarrays, mit der es möglich ist Einzelunkräuter zu erkennen und mit einem Steuersignal die Herbizidapplikation zu regulieren. Dazu soll ein Sensorarray, bestehend aus CIELab-Farbsensoren, entwickelt werden, mit dem Einzelpflanzen aufgrund ihres Grünwertes differenziert erkannt werden können und hiermit eine Applikationseinheit steuern mit der es möglich ist punktgenau eine Zielfläche von bis zu 10 x 10 cm zu benetzen. Durch eine punktuelle Behandlung ist es möglich, an diesen Stellen ebenso Totalherbizide einzusetzen.</p> <p>Mit Hilfe der zu entwickelnden Sensorik und einer einzeldüsenbezogen ansteuerbaren Spritze für konventionelle und ökologisch wirtschaftende Betriebe wird die Möglichkeit geschaffen mit deutlich reduziertem Pflanzenschutzmitteleinsatz nachhaltig hochwertige Lebensmittel zu produzieren.</p>					
Innovation					
<p>Es gibt momentan weltweit keine hochaufgelöste, echtzeitfähige und praxistaugliche Technologie Pflanzen oder Pflanzengruppen selektiv anzusprechen. In der Literatur beschriebene Verfahren erfüllen diese Anforderungen nicht, bzw. nur in einzelnen Punkten.</p> <p>Im Bereich der Applikationstechnik ist es in diesem einjährigen Projekt nicht möglich eine komplett neue Technologie zu entwickeln, vielmehr sollen vorhandene Baugruppen für die Anwendung von Bioherbiziden angepasst werden.</p> <p>Zur unmittelbaren Zielanwendergruppe gehören alle die sich mit der Pflege von Kulturpflanzen und der Landschaft befassen, sowohl Landschaftsgärtner als auch Landwirte.</p>					
Deutsche Bundesstiftung Umwelt • An der Bornau 2 • 49090 Osnabrück • Tel 0541/9633-0 • Fax 0541/9633-190 • http://www.dbu.de					

Inhaltsverzeichnis

I	Verzeichnis von Abbildungen und Tabellen.....	8
II	Verzeichnis von Begriffen und Definitionen	9
III	Zusammenfassung	10
1.	Einleitung.....	11
2.	Konzeption und Lösungsfindung	12
3.	Material und Methoden.....	15
3.1	Methodische Vorgehensweise.....	15
3.1.1	Sensorentwicklung.....	15
3.1.2	Sensortest.....	15
3.1.3	Aufbau des Versuchsträgers.....	16
3.2	Versuchsmaterial.....	17
3.2.1	Farbsensor und Equipment.....	17
3.2.2	Objekte und Hintergründe	18
3.2.3	Prüfeinrichtungen.....	20
3.3	Datenmanagement.....	21
3.3.1	Datengewinnung	21
3.3.2	Datenauswertung und Algorithmenentwicklung	22
4.	Ergebnisse und Diskussion	23
4.1	Konstruktion des Versuchsträgers.....	23
4.1.1	Sensor-Düseneinheit	23
4.1.2	Applikationstechnik	24
4.1.3	Aufbau des Trägers	25
4.2	Objekt- und Pflanzenerkennung	27
4.2.1	Sensorabstand.....	27
4.2.2	Objektgröße	28
4.2.3	Objektstellung	29
4.2.4	Datenbank zur Charakterisierung	29
4.2.5	Modellierung von Mischflächen.....	34
4.2.5	Erkennung und Differenzierung	38
5.	Fazit.....	43
5.1	Beurteilung der verwendeten Sensorik.....	43
5.2	Beurteilung der Pflanzenerkennung	43
5.3	Bewertung hinsichtlich der praktischen Anwendung.....	45
5.4	Ausblick.....	46
6.	Literaturverzeichnis	47





I Verzeichnis von Abbildungen und Tabellen

Abbildung 1: Vegetation und Boden versus Wellenlängen	12
Abbildung 2: Morphologischer Aufbau von Blättern	13
Abbildung 3: Darstellung des CIELab-Farbraumes	18
Abbildung 4: Verwendete Objekte und Hintergründe.....	19
Abbildung 5: Messanordnung mit dem stationären Messwagen.....	20
Abbildung 6: PR0126C-Tool von Premosys	21
Abbildung 7: Definition eines standardisierten Datenstrings.....	22
Abbildung 8: Sensor-Düseneinheit für den Zweikopf-Sensor	23
Abbildung 9: Sensor-Düseneinheit für den Einkopf-Sensor.....	24
Abbildung 10: Aufbau der Applikationseinheit	24
Abbildung 11: Prinzipieller Aufbau und Arbeitsprinzip des Versuchsträgers.....	25
Abbildung 12: Vollständig ausgestatteter und funktionsfähiger Versuchsträger	26
Abbildung 13: Farbwerte und Abstand zur Messfläche	27
Abbildung 14: Objektgröße versus Lab.....	28
Abbildung 15: Verteilung der Residuen der Schätzfunktionen.....	28
Abbildung 16: Einfluss des Objektwinkels zu Linse	29
Abbildung 17: Untersuchte Hintergründe.....	30
Abbildung 18: Histogramme der Lab-Werte ausgewählter Hintergründe.....	32
Abbildung 19: Befestigter Boden, ΔE und dessen Aufspaltung in ΔL , Δa und Δb	38
Abbildung 20: Weizenfläche, ΔE und dessen Aufspaltung in ΔL , Δa und Δb	39
Abbildung 21: Ampfer im Grünland, ΔE und dessen Aufspaltung in ΔL , Δa und Δb .	39
Abbildung 22: Objekterkennung auf befestigtem Boden.....	40
Abbildung 23: Objekterkennung auf Ackerboden	41
Abbildung 24: Objekterkennung in Winterweizen	41
Abbildung 25: Ampfererkennung im Grünland.....	42
Tabelle 1: Vergleich verschiedener Farbmesssysteme	17
Tabelle 2: Charakterisierung von Hintergründen	31
Tabelle 3: Charakterisierung ausgewählter Grüntöne	33
Tabelle 4: Interpretation und Beurteilung der ΔE -Werte	34
Tabelle 5: Mindestflächenanteil des Objektes an der Messfläche in %	35
Tabelle 6: Notwendige Flächenanteile verschieden gefärbter Pflanzen im Messbereich auf ausgewählten Hintergründen.....	37
Tabelle 7: Bewertung des Sensors hinsichtlich der praktischen Anwendung	45



II Verzeichnis von Begriffen und Definitionen

U	logische Verknüpfung: oder
ATV	All Terrain Vehicle
BFI	Blattflächenindex
CIE	Commission Internationale de l'Eclairage
HG	Hintergrund; Boden
Obj	Objekt, Pflanze
v.a.	vor allem
vgl.	vergleiche



III Zusammenfassung

Der Einsatz von Pflanzenschutzmitteln wird zukünftig immer kritischer beurteilt. Hier sind auf der einen Seite ökonomische und ökologische Aspekte von Bedeutung - so die immer weiter sinkende gesellschaftliche Akzeptanz und hohen Kosten als auch politische Vorgaben, den Einsatz von Herbiziden zu reduzieren.

Ein Ansatz, den Pflanzenschutzmitteleinsatz zu reduzieren, ist die dezentrale Einspeisung von Wirkstoffen direkt an der Einzeldüse. Vorausgesetzt wird hier jedoch eine hoch aufgelöste Pflanzenerkennung. Bildgebende Verfahren sind hierzu noch nicht in der Lage, da eine Zuordnung über Pflanzenkonturen bei Überlappungen schwierig ist und die Auswerte- und Reaktionszeiten der Spritz zu groß sind.

Ziel des Projektes war, die Entwicklung eines Sensorarrays aus optischen True-Color-Sensoren, für die Erkennung und Differenzierung von Unkräutern und Kulturpflanzen und eine anschließende Ansteuerung von Einzeldüsen zur gezielten Herbizidapplikation auf einer Breite von 10 cm.

Auch heute noch sehr teure Herbizide, die aus Pflanzenextrakten gewonnen wurden (Bioherbizide), bilden neben den herkömmlichen synthetischen Präparaten einen weiteren Fokus.

Aus den Untersuchungen können folgende Aussagen gemacht werden:

Drei verschiedene gängige Farbräume (Lab, XYZ und RGB) wurden untersucht, wobei sich der Lab Farbraum u.a. aufgrund der Unterscheidung zwischen Helligkeit und Farbwerten als am geeignetsten erwies. Der verwendete True-Color-Sensor bildet einen guten Kompromiss aus Qualität der Farbmessung, Geschwindigkeit und Kosten. Die Größe und Form (Kreis oder Rechteck) der Messfläche ist durch die Auswahl der Optik wählbar. Die Erkennung von Objekten ist von dem Hintergrundrauschen (= Farbheterogenität des Bodens) und der Größe des Objektivs, bzw. der Bildgröße abhängig. Die Versuchsergebnisse zeigten, dass Bedeckungsgrade von 3-5% ausreichend sind. Die Ausrichtung der Objektoberfläche wirkt sich auf die Reflexionsstärke aus – die Luminanz sinkt mit steigender Aufrichtung der Blätter – und kann als zusätzliches Detektionsmerkmal herangezogen werden.

Ein voll funktionsfähiger Versuchsträger mit Applikationseinheit, zehn Sensor-Düseneinheiten und einer Arbeitsbreite von einem Meter ist entwickelt worden und steht für den Feldeinsatz (Anbau an ATVs oder für manuellen Zug) zur Verfügung.

Dikotyledonen in Getreidebeständen und sogar Ampfer im Grünland können sicher erkannt und gezielt bekämpft werden.

Anhand den Ergebnisse und Erfahrungen dieses einjährigen Projektes wurde belegt, dass True-Color-Sensoren sich von vorhandenen Sensoren deutlich abheben und eine Differenzierung von Pflanzenarten mit den angewendeten und entwickelten Methoden möglich ist.



1. Einleitung

Der Einsatz von Pflanzenschutzmitteln wird zukünftig immer kritischer beurteilt. Hier sind auf der einen Seite ökonomische und ökologische Aspekte von Bedeutung - so die immer weiter sinkende gesellschaftliche Akzeptanz und hohen Kosten als auch politische Vorgaben, den Einsatz von Herbiziden zu reduzieren [BmELF, 2013]. Auf der anderen Seite wird es für die chemische Industrie immer kostenintensiver neue Wirkstoffe zu entwickeln und anzubieten.

Ein Ansatz, den Pflanzenschutzmitteleinsatz zu reduzieren, ist die dezentrale Einspeisung von Wirkstoffen direkt an der Einzeldüse. Ein Einsparpotential liegt darin, dass nur bei Bedarf an der Stelle gespritzt wird, an der auch eine Unkrautpflanze steht und diese mit dem entsprechenden Spezialherbizid bekämpft wird. Vorausgesetzt wird hier jedoch eine hoch aufgelöste Pflanzenerkennung. Bildgebende Verfahren sind hierzu noch nicht in der Lage, da eine Zuordnung über Pflanzenkonturen bei Überlappungen schwierig ist und die Auswerte- und Reaktionszeiten der Spritz zu groß sind.

Ziel des Projektes ist, die Eignung eines zu entwickelnden Sensorarrays aus True-Color-Sensoren, für eine mögliche Unkräutererkennung und anschließender Ansteuerung von Einzeldüsen zur gezielten Herbizidapplikation, zu untersuchen.

Mit dem aus CIELab-True-Color-Farbsensoren bestehenden Sensorarray sollen Einzelpflanzen aufgrund ihrer Reflexionseigenschaften (u.a. des Grünwertes) differenziert erkannt werden und eine ebenfalls zu entwickelnde Applikationseinheit ansteuern, um punktgenau eine Zielfläche von bis zu 10 x 10 cm zu benetzen. Durch diese punktuelle Behandlung ist es möglich, an diesen Stellen auch Totalherbizide einzusetzen.

Auch heute noch sehr teure Herbizide, die aus Pflanzenextrakten gewonnen wurden (Bio-Herbizide), bilden neben den herkömmlichen synthetischen Präparaten einen weiteren Fokus.

Somit bietet sich mit Hilfe der zu entwickelnden Sensorik und einer einzeldüsenbezogen ansteuerbaren Spritze für konventionelle und ökologisch wirtschaftende Betriebe die Möglichkeit effizient mit reduziertem Pflanzenschutzmitteleinsatz nachhaltig hochwertige Lebensmittel zu produzieren.



2. Konzeption und Lösungsfindung

Die Grünfärbung von Pflanzen hängt von den Chloroplasten und deren Chlorophyllgehalt ab. Der Chlorophyllgehalt wiederum wird von der Genetik der Pflanze und dem physiologischen Zustand der Pflanze bestimmt. Der Grad der Nährstoff- und Wasserversorgung beeinflusst den Chlorophyllgehalt und somit auch die Färbung der Pflanzen.

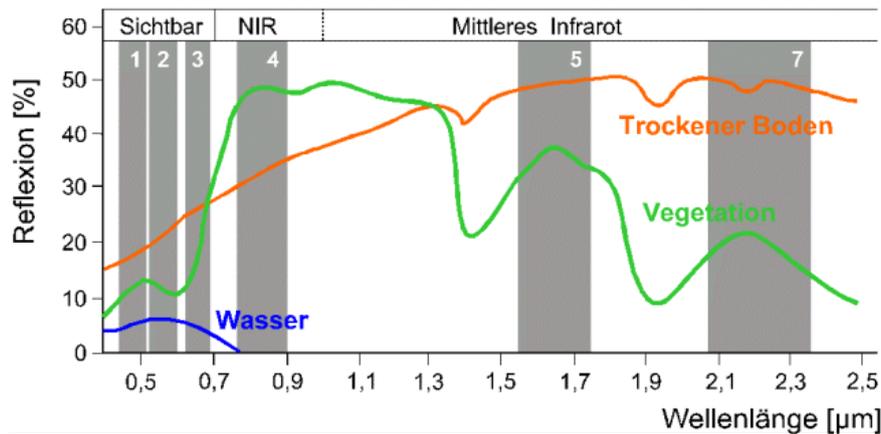


Abbildung 1: Vegetation und Boden versus Wellenlängen (ZUM, 2015)

Oberirdische Pflanzenteile, überwiegend Blätter, absorbieren, reflektieren oder transmittieren Licht bzw. Strahlung.

Grundsätzlich hängen die Rückstrahleigenschaften von der Morphologie des Blattes ab, die bei unterschiedlichen Pflanzenarten individuell abweicht. Messung mit optischen Farbsensoren wird zudem durch die charakteristische Blattstellung (Reflexionswinkel) beeinflusst. Oberflächenstrukturen, epidermale Merkmale wie Trichome und Geometrien beeinflussen die Reflexion und sind durch den Genotyp definiert. Sie können somit auch zur Artendifferenzierung herangezogen werden. Gleiches gilt für die Cutikula, die mit der Blattfeuchtigkeit interagiert.

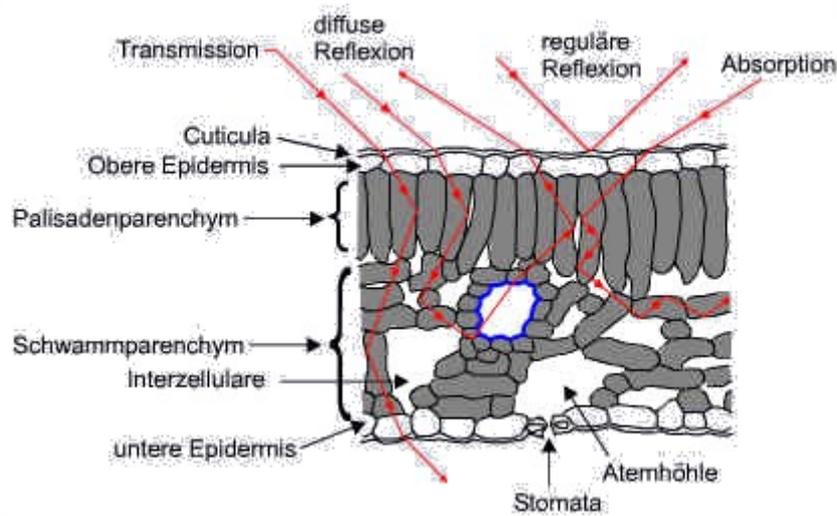


Abbildung 2: Morphologischer Aufbau von Blättern (ZUM, 2015)

Während das Reflexionsverhalten pflanzentypisch ist, variiert die wahrgenommene Färbung. Eine allgemeingültige Aussage über die Zuordnung von Grünfärbung und Pflanzenart bedarf also einer Kalibrierung (Vgl. YARA-N-Sensor).

Die für unkrautregulatorische Maßnahmen notwendige Trennschärfe ist die Unterscheidung zwischen Kultur- und Unkrautpflanze. In Bezug auf die selektive Wirkung synthetischer Wirkstoffe ist eine weitere Differenzierung in mono- und dikotyle Pflanzen gewünscht.

Der zu entwickelnde Sensor soll eine Messfläche von 10 x 10 cm² abdecken. Bei einer notwendigen Objektgröße von 3% dieser Fläche, ist zu erwarten, dass eine Erkennung von Pflanzen mit einer planen Oberfläche von 3 cm² möglich ist. Dieses entspricht bei Dikotyledonen ungefähr einer Pflanze im 2- bis 4-Blatt-Stadium. Dieses Stadium ist für eine effektive Unkrautbekämpfung besonders geeignet.

Das Sensorarray soll für den Einsatz in der Spritze für folgende Anwendungen flexibel konfigurierbar und einsetzbar sein:

- **Brachland, abgeerntete Flächen, befestigte Flächen, Bahndämme:**

Bei dieser Anwendung sind Grünpflanzen eindeutig vom Boden bzw. Messhintergrund abgesetzt, so dass mit dem Sensor im ersten Schritt Grünpflanzen generell und im nächsten Schritt Pflanzenarten zur Ansteuerung eines Spritzventils erfasst werden.

- **Reihenkulturen:**

Die Optik des Sensors bestimmt den Erfassungsbereich (Scanfenster). Durch eine variable Anpassung der Optik bzw. Konfigurierbarkeit des Sensors sollen in unterschiedlichen Kulturen und Reihenabständen im Zwischenreihenbereich Unkräuter zur Bekämpfung erkannt werden.

Die Pflanzenerkennung in der Reihe soll zur Erkennung der Kulturpflanze (Positiverkennung) einsetzbar sein und kann dazu dienen, die Pflanzenschutzmittelapplikation in diesem Bereich zu stoppen. Eine Erkennung und Differenzierung der Pflanzen in der Reihe ist ein weiterer Schritt.

Für eine praktische Anwendung sollen die Sensorik zur Reihen- und Zwischenreihenbekämpfung zu einem System verknüpft werden können.

- **Mulchflächen mit Grünpflanzen bzw. Grünpflanzenteilen:**

Der Sensor soll Grünpflanzen nicht nur auf eindeutig zu differenzierenden Untergrund wie Schwarzbrache erkennen, sondern auch abgestorbenem Mulch mit Grünpflanzen bzw. Grünpflanzenteilen.

- **Bestehende Grünflächen:**

Eine anspruchsvolle Anwendung ist Erkennung von Problemunkräutern auf grünem Untergrund, wie Getreideflächen oder Grasland. Ein Ansatz für Getreide ist hier neben der Differenzierung nach der Farbe, auch die nach der Bestimmung des Bedeckungsgrads, bei der nach Überschreitung auf Unkrautbesatz geschlossen werden kann.

- **Untersaat unter anderem im Ökologischen Landbau**

Im ökologischen Landbau ist eine Direktsaat in bestehende Bestände von Interesse. Hierbei sollen Problemunkräuter mit organischen Präparaten (Bio-Herbizide) punktuell eliminiert werden (Köpke, 2010).

- **Zusätzliche Anwendungen:**

Bei einer Positiverkennung von Pflanzen oder deren Früchte kann auch an eine Anwendung von Fungiziden, Insektiziden oder aber auch von Blattdüngern oder Pflanzenstärkungsmitteln ausschließlich auf die Kulturpflanze gedacht werden.



3. Material und Methoden

3.1 Methodische Vorgehensweise

3.1.1 Sensorentwicklung

Über die Grünfärbung wird die Qualität der Differenzierung von Pflanzen (bspw. Konstitution und Größe) sowohl auf blankem, bewuchsfreiem Boden, als auch auf einer Mulchauflage untersucht. Die Größe der Zielfläche wird durch die Auswahl der Optiken bestimmt.

Zur Erkennung der Pflanzen wird ein CIELab-Sensorsystem der Firma Premosys weiterentwickelt, das aus für den Indoor-Bereich eingesetzten Einzelsensoren besteht. Die Firma Premosys modifiziert die vorhandenen Einzelsensoren. Weitere Arbeitsschritte sind:

- *Komponentenauswahl*: optischer Komponenten wie Filter und spezielle Linsen werden ausgewählt.
- *Softwareentwicklung*: Zur Signalanalyse und Algorithmenentwicklung wurde eine Software entwickelt, die ebenfalls die Kommunikation zwischen den Sensoren, Sensorarray und Spritze bewerkstelligt.
- *Systemoptimierung*: Parallel zu den durchgeführten Versuchen werden die Algorithmen weiterentwickelt.

3.1.2 Sensortest

Sukzessive werden bei den Sensortests die Rahmenbedingungen von kontrollierten, reproduzierbaren Rahmenbedingungen hin zu unkontrollierter, praxisvergleichbaren Umgebung durchgeführt.

Sensorprüfstand: Mit einem geeigneten Prüfstand bzw. geeigneter Methodik werden statische und dynamische Messungen durchgeführt.

Folgende *Entwicklungs- und Arbeitsschritte* werden durchgeführt:

- a) Anpassung, Optimierung und Test der optischen Komponenten für die Farberkennung:



- Die im System integrierte Lichtquelle und die Receiver-Linse müssen für wechselnde Abstände und Winkel zwischen den zu detektierenden Pflanzen und den optischen Komponenten abgestimmt werden, bzw.
 - wird der Einfluss verschiedener Sensor-Pflanzenabstände untersucht
 - Einsatz von Farbschablonen, Kunststoff- und reale Pflanzen
 - Objektgröße und der Einfluss des Fremdlichtes (Sonneneinstrahlung) wird untersucht und in der Auswerteelektronik integriert werden.
 - Unterschiede unter definierten Labor- und Feldbedingungen
 - Einfluss der Winkel von Lichtquelle und Sensor zueinander und zur Pflanzenoberfläche
- b) Entwicklung der Hard- und Software mit erforderlicher Informationszuordnung und -verarbeitung.

Die Hardware muss hinsichtlich der gegebenen Infrastruktur weiter entwickelt werden. In dieser Studie bedeutet dies die Integration in einen geeigneten Versuchsträger mit Markiervorrichtung.

Eine geschützte Stromversorgung und ein System zur Kommunikation Sensor-Rechner-Ventil werden aufgebaut. Dabei muss über den Rechner sowohl die weg- und geschwindigkeitsabhängige Steuerung der Ventile der Spritze, als auch die Einstellung und Programmierung der Einzelsensoren möglich sein.

3.1.3 Aufbau des Versuchsträgers

Der *Versuchsträger* dient dazu, mit dem Sensorarray praxisvergleichbare Daten zu gewinnen und mit Hilfe einer Applikationseinheit erkannte Objekte bzw. Pflanzen zu markieren.

Die *Applikationstechnik* besteht aus Einzeldüsen bzw. vorgeschaltete Ventile, die durch die Einzelsensoren anzusteuern sind (Sensor-Düseneinheit). Geeignete Filter und Düsen müssen gefunden werden. Reaktionszeiten und Applikationsgenauigkeit werden auf dem Prüfstand untersucht und bei Bedarf verbessert.

Der *Sensorträger* mit Integration der Einzelsensoren und einer genauen Höhenführung über den Boden - um den Abstand Sensor-Pflanze konstant zu halten - wird konstruiert.

Die notwendigen technischen Grundlagen werden durch die Entwicklung des Sensorarrays und der Applikationseinheit geschaffen und werden abschließend regeltechnisch zusammengeführt. Dazu wird ein *Regelkreis* aufgebaut.

Das Gesamtsystem wird unter Praxisbedingungen getestet und nach Bedarf konstruktiv überarbeitet.



3.2 Versuchsmaterial

3.2.1 Farbsensor und Equipment

Die Sensorentwicklung basiert auf dem *True-Color-Sensor* PR0126C von Premosys. Er stellt einen Kompromiss aus Spektrometern mit sehr hoher Farbgenauigkeit und kostengünstigen RGB-Sensoren dar. Der Systemvergleich ist Tabelle 1 zu entnehmen.

Tabelle 1: Vergleich verschiedener Farbmesssysteme

	RGB-Sensoren	True-Color-Sensoren	Mehrbereichs-sensoren	Mini-Spektrometer	Spektrometer
Spektrale Information	Nicht vorhanden	Nicht vorhanden	Mittel	Mittel	Sehr hoch
Kosten	Gering	Gering	Mittel	Hoch	Sehr hoch
Geschwindigkeit	Sehr hoch	Sehr hoch	Sehr hoch	Mittel	gering
Farbgenauigkeit	Mittel	Sehr hoch	Sehr hoch	Hoch	Sehr hoch

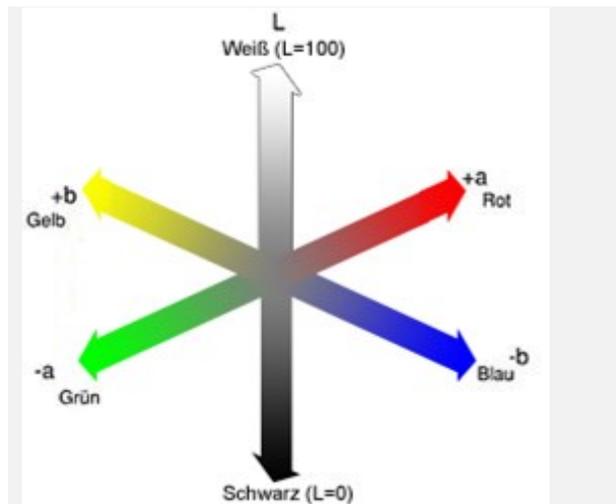
(Quelle: JENSEN, NIMZ, 2015)

True-Color-Sensoren enthalten zur absoluten Messung Interferenzfilter zur technischen Umsetzung von Farbstandards. Per Definition sind sie durch deren Filtercharakteristik in der Lage, Farben treffsicherer als das menschliche Auge zu messen (standardisiert nach DIN 5033). Diese Filter besitzen eine exakte Zuordnung des Empfindlichkeitswertes eines Farbkanals zur spektralen Wellenlänge. Durch eine Normierung werden die Farbwerte den XYZ-Koordinaten zugeordnet, die die Basis für die Umrechnung in weitere Farbräume darstellen. Mittels Normspektralwertfunktionen erreichen die True-Color-Sensoren eine mit dem menschlichen Auge vergleichbare absolute Genauigkeit.

Die gewonnenen Farbinformationen werden durch den CIELab-Farbraum beschrieben, der aus den XYZ-Koordinaten abgeleitet wird.

Der Lab-Farbraum oder auch CIELab-System beschreibt ein Farbsystem zur numerischen Darstellung von Farben. Das System wurde 1976 international von der Commission Internationale de l'Eclairage (CIE) eingeführt. Es zählt heutzutage zu den gebräuchlichsten 3D-Farbsystemen, ist geräteunabhängig und wahrnehmungsbezogen. Farben werden somit unabhängig von der Art der Erzeugung so dargestellt, dass sie sich der menschlichen Wahrnehmung anpassen. Hierzu wird der geometrische Abstand zwischen zwei Farben im Farbraum berechnet [BELEUCHTUNGSKOMMISSION]





Die Abkürzungen L, a und b stehen hierbei für die unterschiedlichen Koordinatenachsen der Farbberechnung.

- L: die Helligkeit (Luminanz), weiß hat den Wert 100, schwarz den Wert 0
- a: die rot-grün Achse, grüne Werte sind negativ, rote positiv
- b: die blau-gelb Achse, blaue Werte sind negativ, gelbe positiv

Abbildung 3: Darstellung des CIELab-Farbraumes

Das System verfügt über eine eigene Lichtquelle mit definierter Wellenlänge, wodurch es unempfindlich gegenüber Fremdlicht ist. Über Lichtleiter wird das LED-Licht einer Linse zugeführt, die die Messfleckgröße bestimmt. Über eine gleich Linse wird die vom Messobjekt reflektierte Strahlung über einen zweiten Lichtleiter der Messdiode zugeführt. Über eine verstellbare Halterung werden die Linsen aufeinander abgestimmt

Zur Unterstützung der Farbmessungen wird ein *Laser-Triangulationsabstandssensor* integriert, mit dessen Hilfe die durch unterschiedliche Messabstände entstehenden Luminanzunterschiede korrigiert werden.

3.2.2 Objekte und Hintergründe

Objekte und Hintergründe, wie in Abbildung 2 zu sehen, wurden im ersten Schritt künstlich in Form von ausgedruckten Karten erstellt.

Objekte bzw. Pflanzen wurden durch unterschiedliche Grüntöne simuliert, Böden durch Brauntöne.

Objektgrößen wurden durch Zusammenlegen mehrerer ausgestanzter Locherscheiben mit definierter Größe ($d=5\text{ mm}$, $A=19,6\text{ mm}^2$) variiert. Durch an einem Draht befestigte runde Plättchen wurden Kunstpflanzen nachempfunden.

Im ersten Schritt werden *Hintergründe* durch Karten erzeugt. Bei den mobilen Messungen wird zwischen anthropogenen und natürlichen Hintergründen unterschieden. Zu den künstlichen anthropogenen Böden gehören Schotter, Beton- oder Teerplätze oder Pflaster. Natürliche Böden sind Ackerflächen ohne Bewuchs, Stoppel- und Mulchflächen. Grünflächen wurden auch dieser Kategorie zugeordnet.

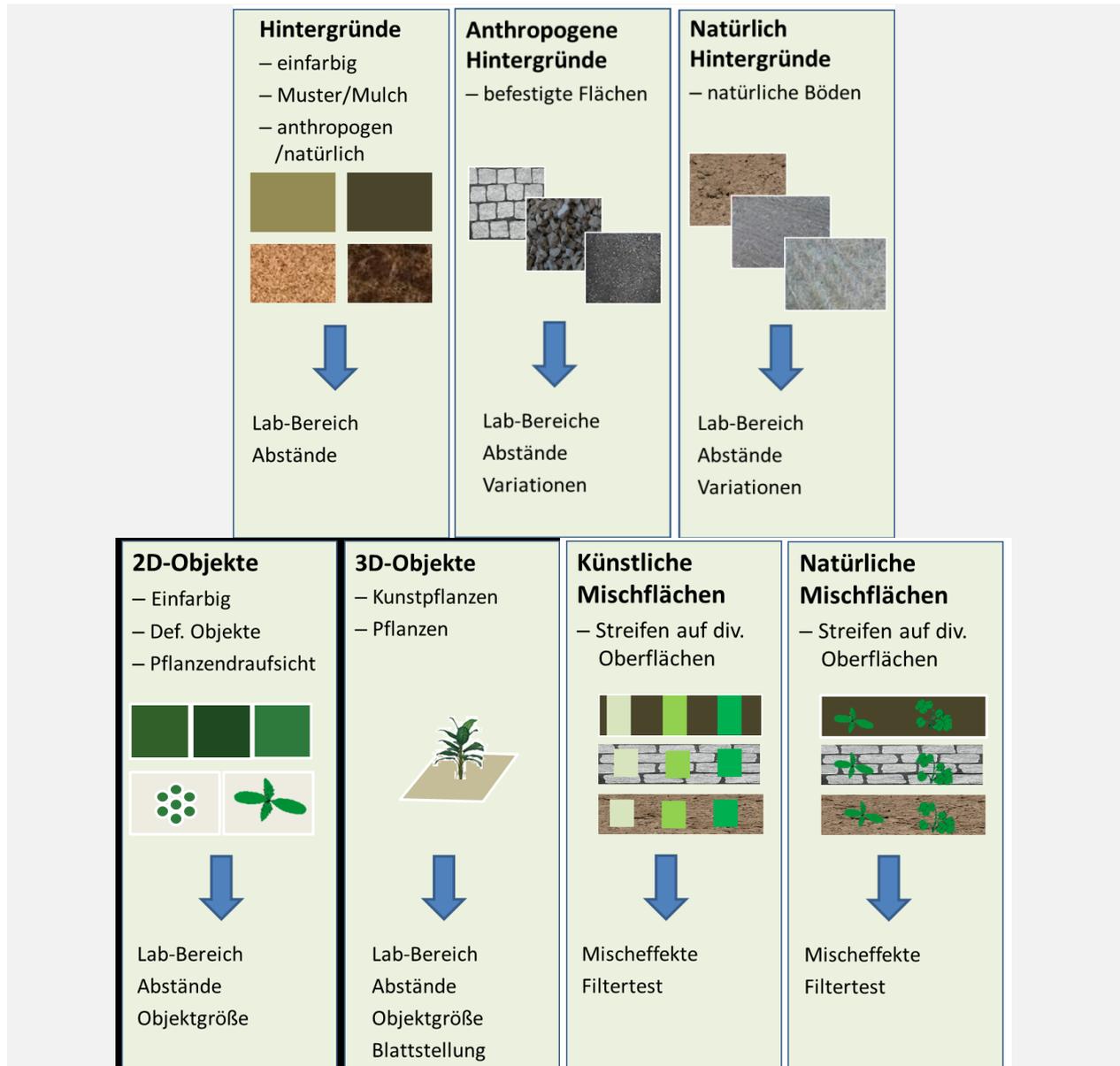


Abbildung 4: Verwendete Objekte und Hintergründe

3.2.3 Prüfeinrichtungen

- **Stativ:**
Statische Messungen ohne Bewegung von Objekten oder Sensor werden mittels Stativ durchgeführt.
- **Stationärer Messwagen:**

Reproduzierbare dynamische Messungen unter kontrollierten Laborbedingungen werden mit Hilfe eines angetriebenen Schienensystems durchgeführt. An einem Wagen wurde der Sensor in definierter Höhe befestigt und auf einer Strecke von 150 cm mit einer konstanten Vorfahrtgeschwindigkeit von $0,1 \text{ m s}^{-1}$ bewegt. Unter dem Sensor wurden in offene Kästen (3Stück) von jeweils 45 cm Länge Objekte, Hintergründe und Mischflächen nach Belieben angeordnet und vermessen werden. Messwertaufzeichnung erfolgte alle 0,1 sec. Es wurden also 10 Farbwerte pro Sekunde gemessen.



Abbildung 5: Messanordnung mit dem stationären Messwagen

- **Mobiler Messwagen:**

Für Messungen außerhalb des Labors bzw. im Gelände wird ein Messwagen konstruiert, der manuell oder mit einem Fahrzeug gezogen werden kann. Zeit- oder wegabhängig können Farbaufnahmen durchgeführt werden (Versuchsträger aus 4.1.3 ohne Spritzeinrichtung).

- **Versuchsträger:**

Aufbauend auf den vorher beschriebenen Messwagen wird ein Markiersystem erstellt, mit denen detektierte Objekte zur Kontrolle des Messerfolges gekennzeichnet werden können. Die Konstruktion wird in 4.1.3 beschrieben.

3.3 Datenmanagement

Gewonnene Farbmessungen von Objekten und Hintergründen dienen der Charakterisierung der Umgebung der zu entwickelnden Sensoranwendung. Diese Daten werden in Datenbanken zusammengefasst und bei der Entwicklung von Algorithmen und Entscheidungsmodellen zur Pflanzenerkennung herangezogen.

Des Weiteren dienen Aufnahmen von Mischflächen aus Boden und Pflanzen auch als Test für die Qualität der Erkennung und Bewertung der Entwicklungsschritte.

3.3.1 Datengewinnung

Die Datengewinnung kann mit der von Premosys mitgelieferten Software geschehen. Das Setup, Normierung der Sensoren, Visualisierung der Messdaten und zeitgesteuerten Aufzeichnung kann über diese Software geschehen.

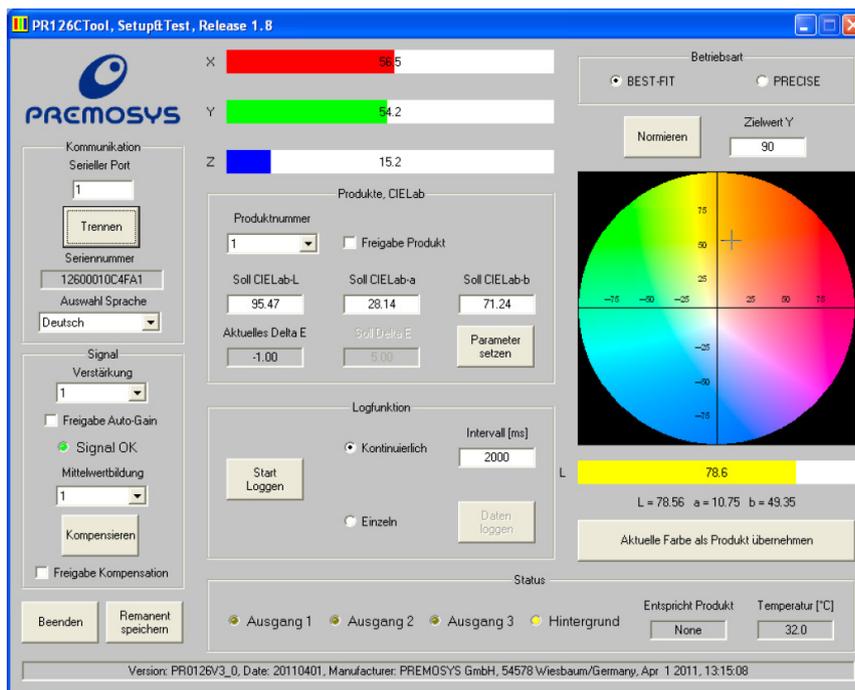


Abbildung 6: PR0126C-Tool von Premosys

(Quelle: PREMOSYS, 2014)

Die Definition eines Hintergrundes und die von drei ‚Produkten‘ kann mit dieser Software geschehen. Die Einzelsensoren können programmiert werden, so dass diese autark über drei unabhängige Schaltausgänge die Steueraufgabe übernehmen können

3.3.2 Datenauswertung und Algorithmenentwicklung

Die implementierte Auswertelogik basiert auf den ΔE -Wert, der sich aus der Wurzel der addierten Abweichungsquadrate der Lab-Kanäle zwischen dem Produkt- Messwert ergibt.

Für das Projekt sind jedoch weitere Aspekte von Bedeutung: Weggesteuerte Datenaufnahmen von Strecken bzw. Flächen, Aufzeichnung der Daten in einem definierten Format (Abbildung 5), Visualisierung der Messwerte als Kurvendiagramm und als Farbbalken und, ganz wesentlich, die Möglichkeit weitere Algorithmen zu testen. Diese Funktionen müssen online, aber auch im Post-Processingverfahren durchgeführt werden können, um bereits gewonnene Aufzeichnungen beim Test der Algorithmen zu berücksichtigen. Zu diesem Zweck ist eine weitere Software (PE²) entwickelt worden.

Das definierte Datenformat ist in folgender Abbildung dargestellt:

Datenstring:										Dateityp: .csv					
L	a	b		X	Y	Z		R	G	B		Weg	Abstand	...	

Abbildung 7: Definition eines standardisierten Datenstrings

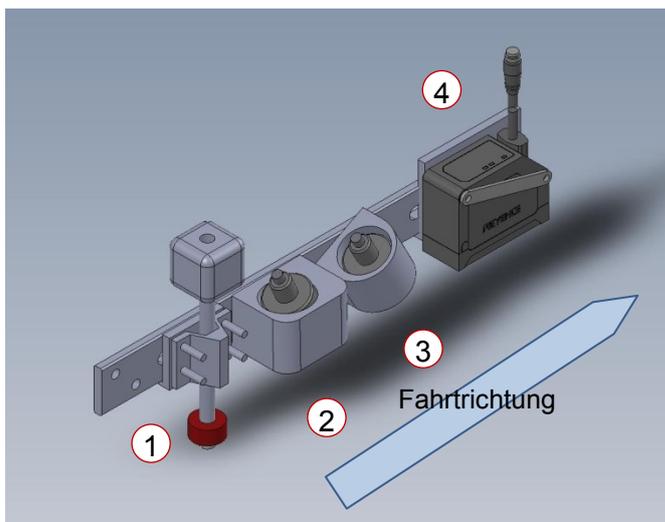
4. Ergebnisse und Diskussion

4.1 Konstruktion des Versuchsträgers

Der Versuchsträger dient der Sensoraufnahme für dynamische Messungen im Outdoor-Bereich. In den aufeinander folgenden Versuchen soll eine Sensor, das gesamte Sensorarray und im letzten Schritt eine Spritz- bzw. Markiervorrichtung installiert werden.

4.1.1 Sensor-Düseneinheit

Bei der Entwicklung der Sensor-Düseneinheit ist eine präzise Abstimmung von Transmitter (Beleuchtung), Receiver (Sensordiode) und der zur Markierung notwendigen Düse von Bedeutung. Bei Zweikopfsystemen muss entsprechend des Abstandes zum Objekt eine Verstellung vorgenommen werden können.



Komponenten:

1. horizontal und vertikal verstellbare Düse
2. Receiverlinse mit 22,5° Anstellung
3. Ausrichtbare (drehbare) Lichtquellenlinse
4. Verschiebbarer Abstandssensor

Abbildung 8: Sensor-Düseneinheit für den Zweikopf-Sensor

Nach den ersten Versuchen mit dem oben gezeigten Sensor entwickelte PREMOSYS den Sensor weiter (PR0126-C4) und stattete diesen für das Projekt mit nur einer Linse aus, woraus sich der Vorteil ergibt, Transmitter und Receiver nicht mehr zueinander und abstandsabhängig ausrichten zu müssen.

Die dadurch vereinfachte neue Sensor-Düseneinheit ist in folgender Abbildung dargestellt:

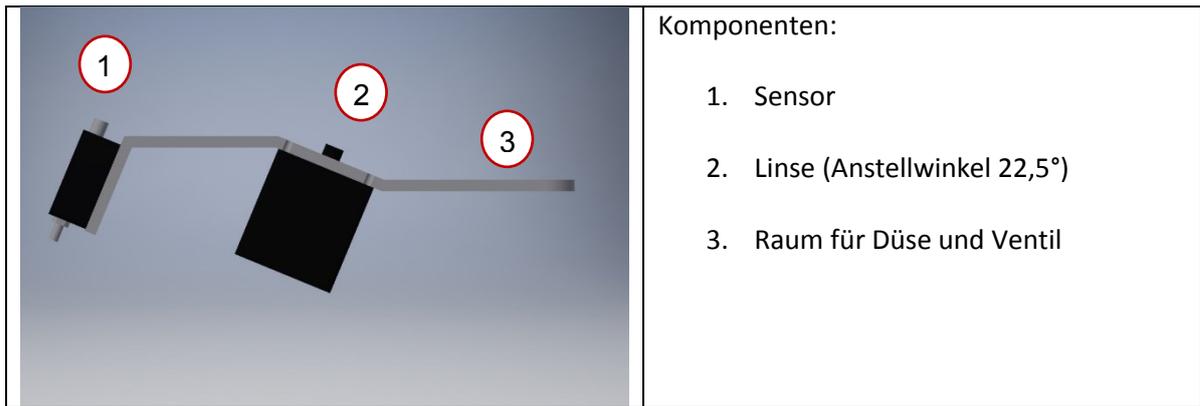


Abbildung 9: Sensor-Düseneinheit für den Einkopf-Sensor

4.1.2 Applikationstechnik

Der an konventionelle Spritzen angelehnte Aufbau der Applikationstechnik ist in folgender Abbildung dargestellt.

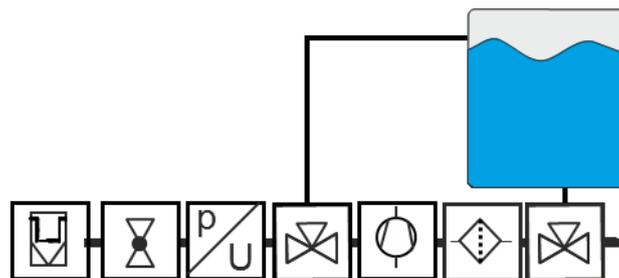


Abbildung 10: Aufbau der Applikationseinheit

Ein 50 l umfassender *Behälter* dient der Aufnahme der Flüssigkeit. Um bei den ohnehin geringen Flüssigkeitsmengen Restmengen zu vermeiden, besteht der Behälter aus einem aufrechtstehenden Zylinder mit einem Durchmesser von 400 mm und einem trichterförmigen Auslauf. Im oberen Teil befindet sich ein Einlauf, der auch zum Mischen und Rühren benutzt werden kann.

Am unteren Auslauf kann über einen *3-Wegehahn* manuelle zwischen Ansaugen auf dem Tank und Ansaugen aus einer Injektionsschleuse umgeschaltet werden.

Es folgt ein *Vorfilter* und eine *12V Membranpumpe* (Arbeitsdruck 2,5 bis 3,2 bar, Förderleistung x l/min). Die Förderleistung kann über eine Steuereinheit manuell begrenzt werden. Eine Ab- und Anschaltautomatik ist in der Pumpe integriert.

Über einen weiteren *3-Wegehahn* wird zwischen Rührfunktion (Rückleitung in den Tank) und Spritzfunktion (zum Gestänge) umgeschaltet.

Der ventilnahe nachgeschaltete *Drucksensor* dient ausschließlich der Kontrolle des Systemdrucks, kann aber auch zur Pumpensteuerung eingesetzt werden.

Am Spritzgestänge befinden sich im Abstand von 10 cm 10 individuell *schaltbare Ventile*, denen unmittelbar jeweils eine Düse (Abstrahlwinkel 10°) folgt.

Ventil, Düse, Sensor und Sensoroptik sitzen auf einer gemeinsamen Halterung.

4.1.3 Aufbau des Trägers

Der Träger ist so konzipiert, dass er zur Erstellung von Datenbanken über Hintergründe (Farbwerte verschiedener Böden) aber auch zur Aufnahme aller Spritzenbaugruppen geeignet ist. Dieser 1m breite Wagen kann manuell oder auch durch ATVs bewegt werden.

Weg- und Geschwindigkeitsinformationen werden durch einen im Rad integrierten Inkrementalgeber gewonnen. Über einen Mikrocontroller können so die Schaltventile gemäß der Geschwindigkeit und der Vorzögerungs- und Reaktionszeiten der Applikationstechnik geschaltet werden.

In folgenden Abbildungen ist der Träger mit Sensoren und Spritze dargestellt:

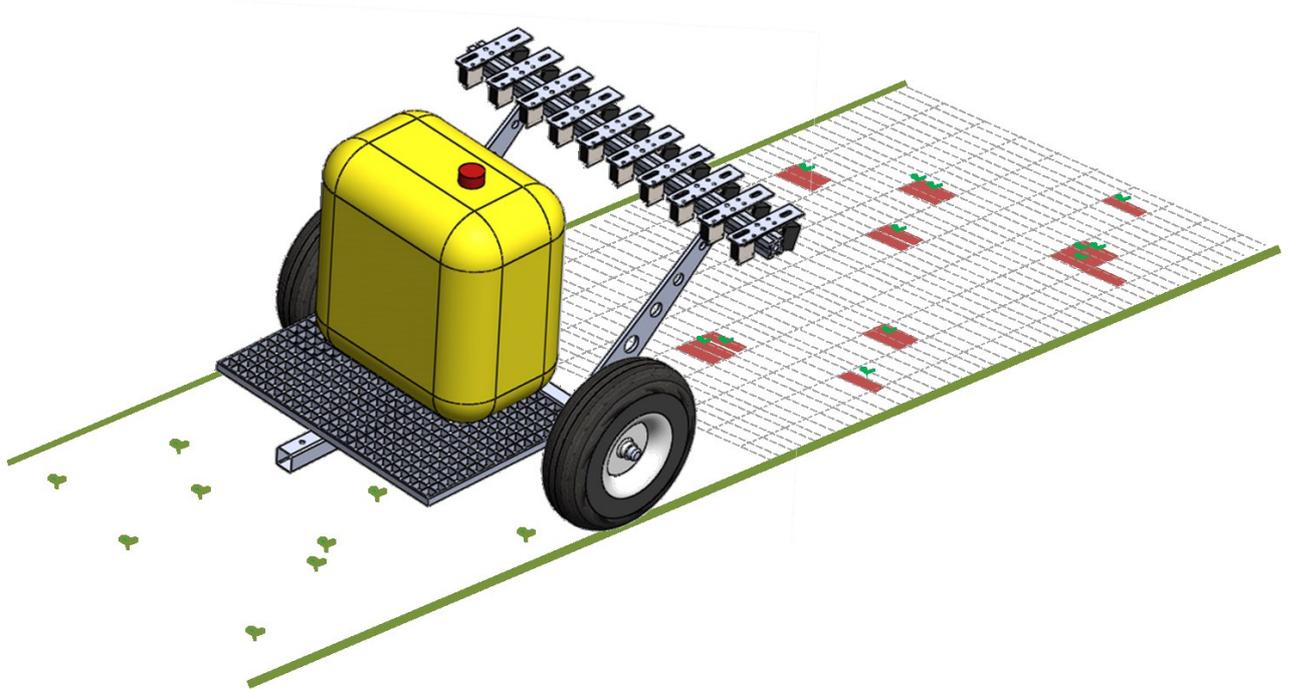


Abbildung 11: Prinzipieller Aufbau und Arbeitsprinzip des Versuchsträgers



Vollständig ausgestatteter Versuchsträger mit Zugeinrichtung



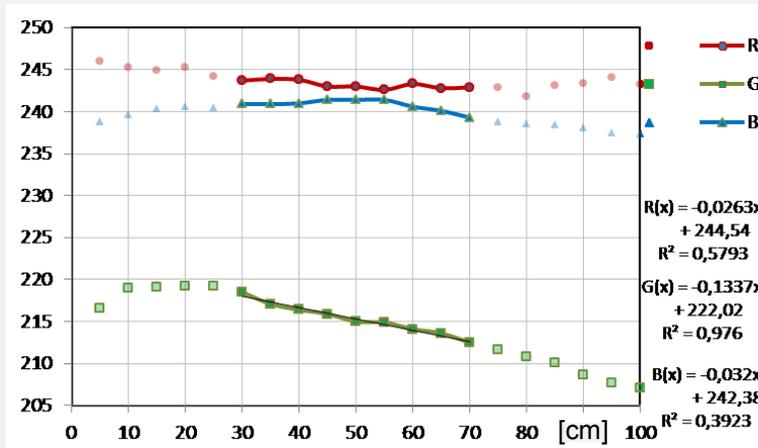
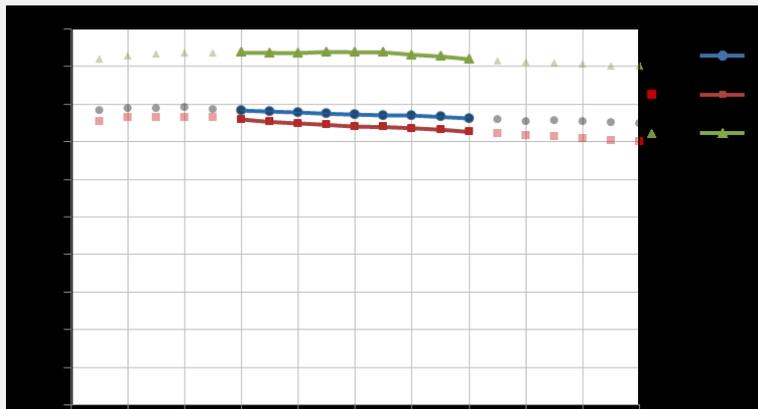
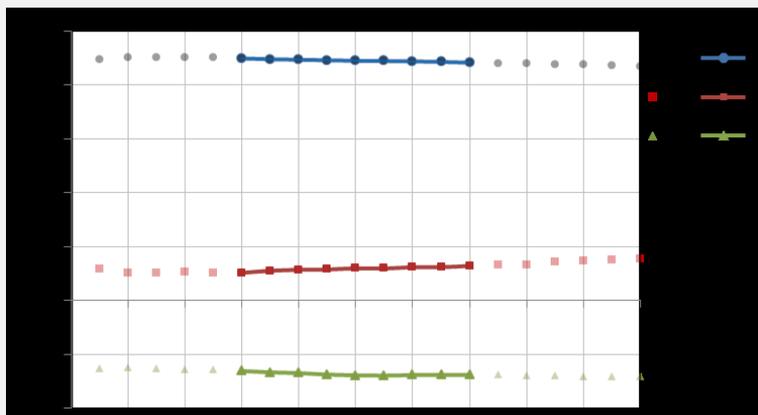
Gestänge mit 10 Sensor-Düseneinheiten

Abbildung 12: Vollständig ausgestatteter und funktionsfähiger Versuchsträger

4.2 Objekt- und Pflanzenerkennung

4.2.1 Sensorabstand

Zur Untersuchung, welchen Einfluss der Abstand zwischen Objekt und Linse hat wurde eine gleichfarbige Pappe mit den Farbwerten $L=88,94$, $a=11,96$, und $b=-27,76$ in unterschiedlichen Abständen vermessen.



Der Abstand der Linse zum Messobjekt beeinflusst das Messergebnis.

Die verwendete doppelkonkave Linse ist für eine Bildweite von 50 cm (+/- 20 cm (Angabe Premosys)) konzipiert.

1. Je größer der Abstand, desto heller erscheint das Objekt.
2. Je weiter der Abstand zur optimalen Bildweite, desto ungenauer wird die reale Objektfarbe ermittelt.

Bei Kenntnis des Objektabstandes kann aus den ermittelten Farbwerten die reale Objektfarbe mittels Schätzfunktionen errechnet werden. Diese Funktionen sind neben den Abbildungen für alle Kanäle mit deren Güte (R^2) angegeben. Ersichtlich ist, dass die Schätzfunktionen für Lab und XYZ geeigneter sind als die für RGB. Zudem befindet sich im Lab-Farbraum die Information der Helligkeit (L)

Abbildung 13: Farbwerte und Abstand zur Messfläche



4.2.2 Objektgröße

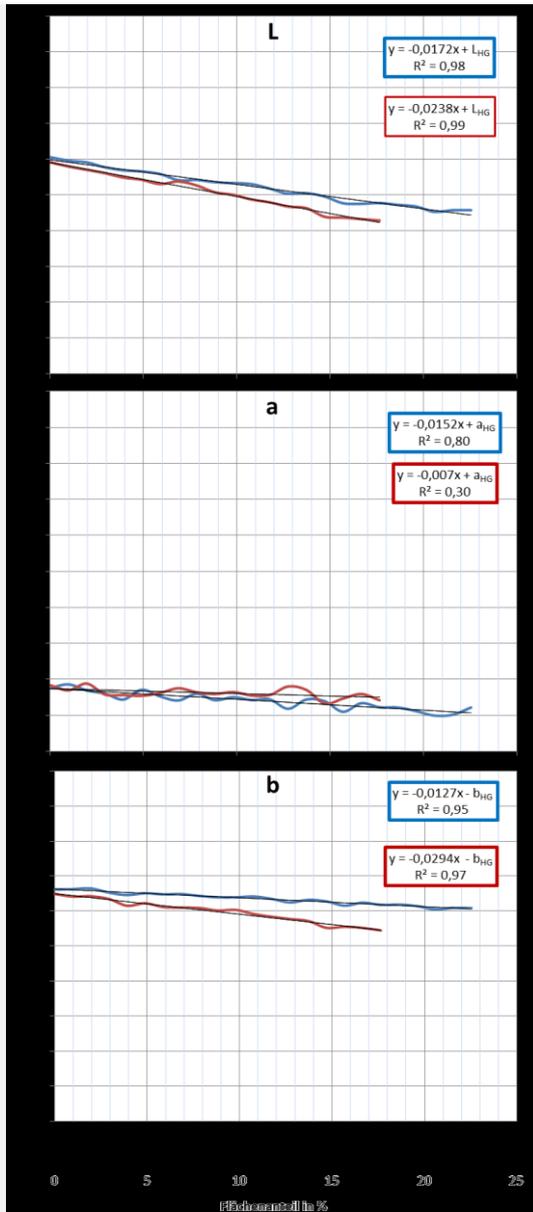


Abbildung 14: Objektgröße versus Lab

Mit Hilfe ausgestanzter Locherscheiben mit einer Fläche von jeweils 19,6 mm² wurden unterschiedlich große Objekte simuliert. Exemplarisch sind in der nebenstehenden Abbildung zwei Messreihen auf einem Hintergrund ($L_{HG}=80$, $a_{HG}=18$, $b_{HG}=46$).

Es besteht ein stark linearer Zusammenhang zwischen der Anzahl an Locherscheiben bzw. der Objektgröße und Veränderung der Werte der Kanäle. Besonders korreliert die Abnahme der Luminanz (L-Kanal), aber der b-Kanal mit einem R^2 von über 0,95 mit der Objektgröße sehr gut.

Der lineare Zusammenhang ergibt sich aus einem *konstanten Faktor*, dem jeweiligen Kanalwert des Hintergrundes, und der Steigung ergibt.

Die *Steigung* entspricht der Relation von Objekt- und Hintergrund.

Die Standardabweichung für die Schätzfunktionen liegen zwischen 0,3 und 0,8.

In Abbildung 13 ist die Verteilung der Abweichungsquadrate aufgeführt. Es wird deutlich, dass die Verteilung von Kanal L und b deutlich steiler ist als die von a.

Zur Abschätzung der Objektgröße sollten daher L und b geeigneter sein.

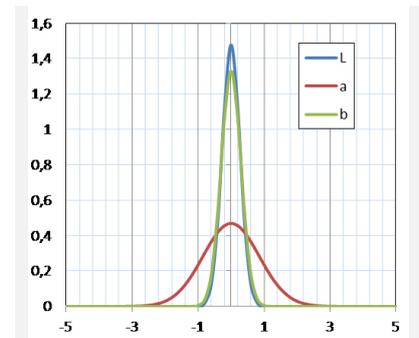
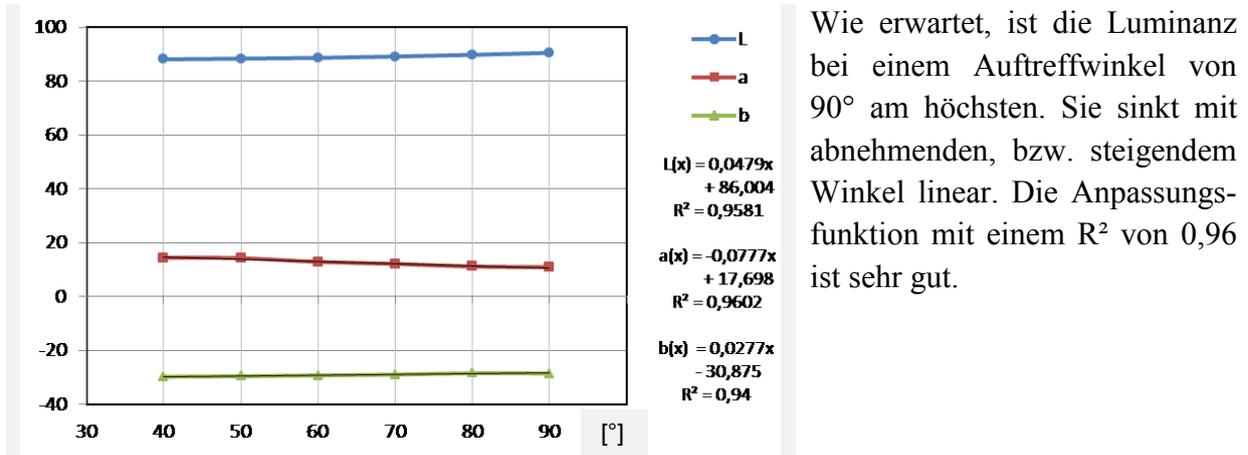


Abbildung 15: Verteilung der Residuen der Schätzfunktionen

4.2.3 Objektstellung

Wird der Winkel des Objektes variiert, so ändert sich auch die Reflexionsintensität. Um dieses zu untersuchen, wurde eine Papptafel 90, 80, 70, 60, 50 und 40° zum Objektiv gedreht.



Wie erwartet, ist die Luminanz bei einem Auftreffwinkel von 90° am höchsten. Sie sinkt mit abnehmenden, bzw. steigendem Winkel linear. Die Anpassungsfunktion mit einem R^2 von 0,96 ist sehr gut.

Abbildung 16: Einfluss des Objektwinkels zu Linse

Wie spätere Versuche zeigten, ist nicht unbedingt der Winkel des Objektes von Bedeutung, sondern den Variation. Schwankt bzw. rauscht der L-Wert stark, kann darauf geschlossen werden, dass die Objektoberfläche inhomogen ist, wie z.B. bei Gräsern. Ein gleichgroßes L deutet auf eine gleichmäßige Oberfläche hin, wie z.B. bei Dikotyledonen. Es ist somit vorstellbar, dass eine Differenzierung von ein- und zweikeimblättrigen Unkräutern möglich ist. Sinkt oder steigt L über eine Strecke, kann das auf die Blattstellung einer breitblättrigen Pflanze schließen lassen.

4.2.4 Datenbank zur Charakterisierung

In einzelnen Versuchen und Untersuchungen wurde mit Modellen gearbeitet. Dieses waren Karten, Locherscheiben oder Drahtmodelle mit einer einheitlichen, vorher definierten Farbe. In den später geplanten Praxiseinsätzen sind die Bedingungen allerdings weniger ‚optimal‘. Das führt zu der Aufgabenstellung: durch welche Lab-Werte lassen sich Objekte (Pflanzen) und Hintergründe (künstliche und natürliche Böden mit und ohne Bewuchs) charakterisieren und zudem: wie stark schwanken diese Lab-Werte (= Rauschen). Hierzu werden statistische Größen herangezogen und in Form von Häufigkeitsverteilungen dargestellt.

Aus diesen Ergebnissen sollen dann grundsätzliche Unterscheidungsmerkmale abgeleitet werden und eine Potentialabschätzung der Pflanzenerkennung und Differenzierung durchgeführt werden.



Abbildung 17: Untersuchte Hintergründe

Tabelle 2: Charakterisierung von Hintergründen

Befestigte Böden	L (MW)	St.	MW	MW	a (MW)	St.	MW	MW	b (MW)	St.	MW	MW
			+	-			+	-			+	-
			St.	St.			St.	St.			St.	St.
Graues Pflaster	18,69	0,62	19,31	18,07	2,80	1,00	3,80	1,80	20,81	0,54	21,35	20,27
Asphalt	12,91	0,34	13,25	12,57	2,16	1,71	3,87	0,45	13,53	1,12	14,65	12,41
Schotter	7,44	1,05	8,49	6,39	3,15	1,00	4,15	2,15	12,24	1,46	13,70	10,78
Steinplatten	13,55	0,50	14,05	13,05	2,34	0,52	2,86	1,82	15,44	0,76	16,2	14,68
Washbeton	15,55	0,55	16,10	15,00	3,90	0,50	4,40	3,40	18,52	0,84	19,36	17,68
Rotes Pflaster	15,28	1,28	16,56	14,00	13,61	2,89	16,50	10,72	24,12	0,91	25,03	23,21
Sandweg	11,45	0,41	11,86	11,04	4,90	1,62	6,52	3,28	19,72	1,18	20,90	18,54
Natürliche Böden												
Ackerboden (Parabraunerde)	11,32	0,13	11,45	11,19	4,81	0,70	5,51	4,11	20,10	0,47	20,57	19,93
Rasenfläche	10,35	0,96	11,31	9,39	-2,37	2,40	0,03	-4,77	22,74	2,06	24,80	20,68
Rasen mit Klee und Tau	9,80	2,23	12,03	7,57	-6,32	2,54	-3,78	-8,86	19,47	3,32	22,79	16,15

Der L-Kanal befindet sich bei den befestigten Böden in einem Bereich von 6,39 bis 19,31. Im Vergleich dazu befindet sich der L-Kanal der natürlichen Böden in einem Bereich von 7,57 bis 12,03. Dieser Bereich liegt innerhalb des Bereichs der befestigten Böden.

Für den a-Kanal lässt sich ein Bereich von 0,45 bis 6,52 für alle grauen und braunen befestigten Böden feststellen. Einzig der a-Kanal der Messung des roten Pflasters fällt heraus, er befindet sich in einem Bereich von 10,72 bis 16,50, da es hier einen deutlich höheren Rotanteil gibt. Auch im Bereich des a-Kanals lassen sich Überschneidungen bei befestigten und natürlichen Böden feststellen. Der Bereich des a-Kanals für natürliche Böden befindet sich zwischen -8,86 und 5,51.

Der negative Bereich wird durch die Grünfärbung der Rasenflächen verursacht. Somit lässt sich der Bereich für den a-Kanal auf einen gemeinsamen Bereich von -8,86 bis 6,52 zusammenfassen.

Auch der Bereich des b-Kanals lässt sich für die untersuchten befestigten und natürlichen Böden zusammenfassen. Der a-Kanal befindet sich bei den befestigten Böden in einem Bereich von 10,78 bis 25,03 und bei den natürlichen Böden von 16,16 bis 24,80. Der Bereich der natürlichen Böden befindet sich somit innerhalb des Bereichs der befestigten Böden. Gut von den Hintergründen zu unterscheiden sind jedoch die Grüntöne. Der L-Kanal der Grüntöne befindet sich in einem Bereich von 29,04 bis 44,85. Der a-Kanal befindet sich zwischen -62,32 und -14,95. Und der b-Kanal liegt für das 1. & 3. Grün in einem Bereich von 33,10 bis 52,37. Das 4. Grün befindet sich im b-Kanal in einem negativen Bereich von -4,72 bis -3,72, da dieser Grünanteil einen Blauanteil enthält. Bei keinem dieser Bereiche entsteht eine Überschneidung mit den Bereichen der Hintergründe.

Zusammenfassend lässt sich festhalten, dass verschiedene Grüntöne anhand der Lab-Kanäle deutlich unterschieden werden können. Hintergründe können für eine Filterentwicklung gut zusammengefasst werden, da es keine Überschneidungen mit den Lab-Kanälen der Grüntöne gibt. Auch die Streuung der Kanäle führt nicht zu Überschneidungen. Es lassen sich somit Filter für den Lab-Farbraum zur automatisierten Unkrautererkennung mit dem CIELab Farbsensor PR0126-C entwickeln. Jedoch muss der Sensor vor dem Gebrauch auf dem Feld normalisiert werden, da hier ansonsten schnell Ungenauigkeiten entstehen.

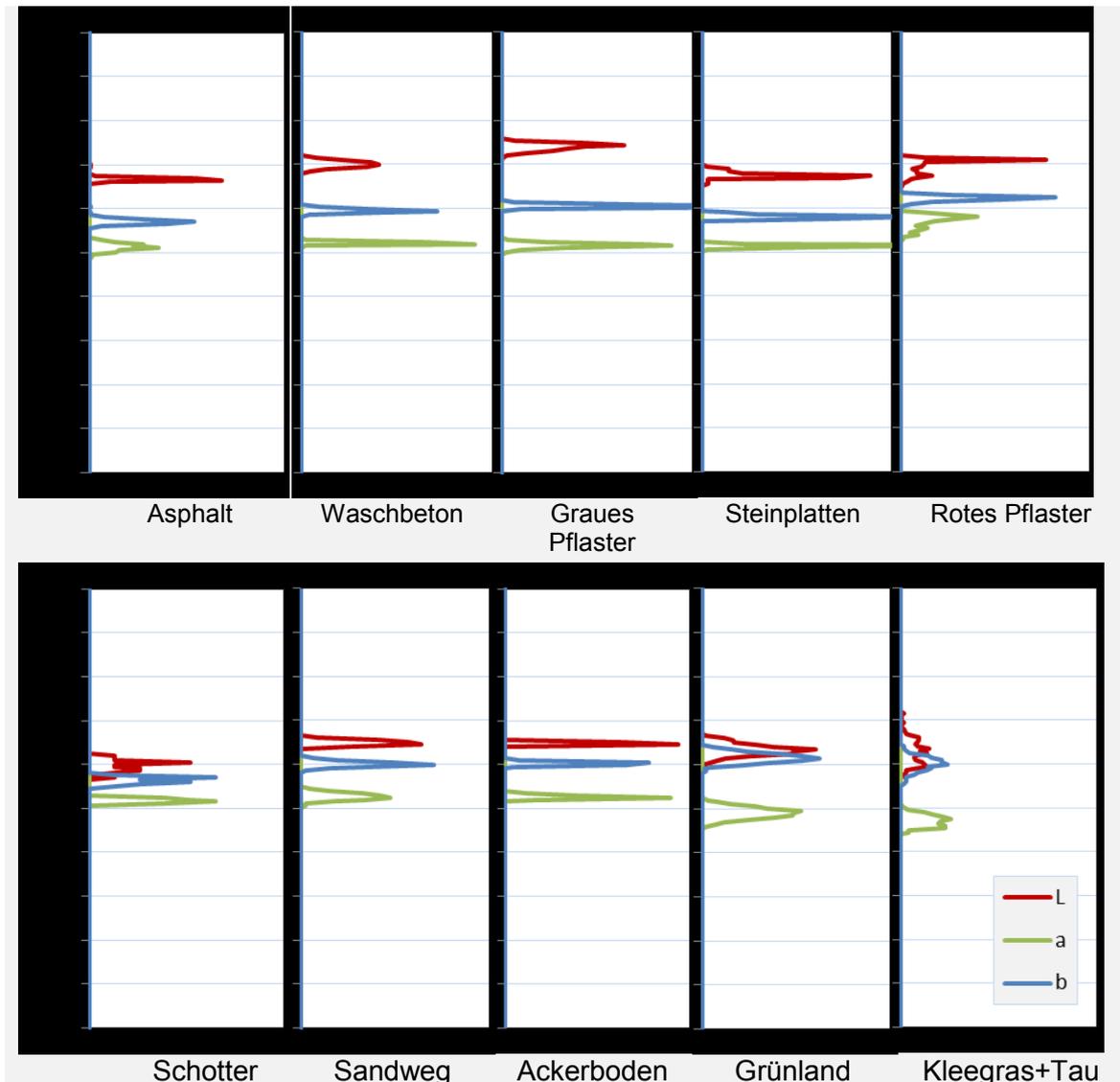


Abbildung 18: Histogramme der Lab-Werte ausgewählter Hintergründe

Nun ist zu untersuchen, in welchem Farbraum Grüntöne sind. In Tabelle 3 sind exemplarisch die Werte für vier verschiedene Töne aufgeführt:

Tabelle 3: Charakterisierung ausgewählter Grüntöne

	1. Grün			2. Grün			3. Grün			4. Grün		
	L	a	b	L	a	b	L	a	b	L	a	b
Median	44,78	-15,21	44,47	40,43	-26,27	51,75	33,95	-49,86	33,39	29,16	-61,65	-4,33
Mittelwert	44,80	-15,24	44,39	40,45	-26,18	51,80	33,95	-49,95	33,54	29,15	-61,51	-4,22
Minimum	44,71	-15,73	43,79	40,39	-26,83	50,82	33,78	-50,53	32,95	28,98	-63,01	-4,96
Maximum	44,86	-14,85	44,69	40,55	-25,60	52,91	34,06	-49,61	34,47	29,32	-60,35	-3,25
Spanne	0,15	0,88	0,90	0,16	1,23	2,09	0,28	0,92	1,52	0,34	2,66	1,17
Stabwn	0,05	0,29	0,29	0,047	0,38	0,57	0,07	0,29	0,44	0,11	0,81	0,50
VK	0,00	-0,02	0,01	0,00	-0,01	0,01	0,00	-0,01	0,01	0,00	-0,01	-0,12
Rel. (x/L) (b/a)	1	-0,34	0,99	1	-0,65	1,28	1	1,47	0,99	1	-2,11	-0,14
			-2,91			-1,98			-0,67			0,07

Der a-Kanal unterscheidet sich bei den Grüntönen signifikant von den gewählten Hintergründen und würde als alleiniges Kriterium ausreichen.

Weitere Kenngrößen können mathematische hergeleitet werden. So zum Beispiel die Berechnung der a- und b-Werte für ein definiertes L (=1) oder der Relation des b- zum a-Wertes (a/b).



4.2.5 Modellierung von Mischflächen

Die gewonnenen Datenbanken dienen der Potentialabschätzung, der Erkennung von Pflanzen auf verschiedenen Böden.

Gegeben sind Hintergrunddaten und Objektdaten (Mittelwerte Lab_{HG} , Lab_{Obj} und Standardabweichung $\sigma-Lab_{HG}$ und $\sigma-Lab_{Obj}$). Die Farbmischungen können durch folgendes Modell berechnet werden (x =Anteil der Bedeckung der Messfläche durch das Objekt, $x=0..100$):

$$L_x = L_{HG} + \frac{(L_{HG} - L_{Obj})}{100} \cdot x$$

$$a_x = a_{HG} + \frac{(a_{HG} - a_{Obj})}{100} \cdot x$$

$$b_x = b_{HG} + \frac{(b_{HG} - b_{Obj})}{100} \cdot x$$

1. Entscheidungsfindung über ΔE

Delta-E beschreibt den Farbabstand zweier Farborte im Lab-Farbraum und nach ISO 12647 und ISO 13655 für die Objekterkennung wie folgt berechnet:

$$\Delta E_{HG,Obj} = \sqrt{(L_{HG} - L_{Obj})^2 + (a_{HG} - a_{Obj})^2 + (b_{HG} - b_{Obj})^2}$$

Tabelle 4: Interpretation und Beurteilung der ΔE -Werte

ΔE	Bewertung
0,0 ... 0,5	kein bis fast kein Unterschied
0,5 ... 1,0	Unterschied kann für das geübte Auge bemerkbar sein
1,0 ... 2,0	unmerklicher Farbunterschied
2,0 ... 4,0	wahrgenommener Farbunterschied
4,0 ... 5,0	wesentlicher Farbunterschied, der selten toleriert wird
oberhalb 5,0	die Differenz wird als andere Farbe bewertet

In folgender Abbildung sind die theoretischen relativen Objektgrößen bei unterschiedlichen experimentell ermittelten Hintergründen für die gewünschte Eingruppierung in das ΔE -Farbschema berechnet. Die Lab-Werte sind als $L^*a^*b^*$ angegeben und setzen sich aus dem Farbort des Hintergrundes und der ermittelten Standardabweichung zusammen.



Tabelle 5: Mindestflächenanteil des Objektes an der Messfläche in %

				Grün 1			Grün 2			Grün 3			Grün 4		
				L	a	b	L	a	b	L	a	b	L	a	b
				44,8	-15,2	44,4	40,5	-26,2	51,8	34	-50	33,5	29,2	-61,5	-4,22
Graues Pflaster				ΔE											
			0,5	1,3		1,1		0,9		0,7					
L'	a'	b'	1	2,6		2,2		1,8		1,4					
19,3	1,8	21,4	2	5,2		4,3		3,6		2,9					
			4	10,4		8,6		7,3		5,8					
			5	13,0		10,8		9,1		7,2					
Asphalt				ΔE											
			0,5	1,1		0,9		0,9		0,7					
L'	a'	b'	1	2,2		1,9		1,7		1,5					
13,3	0,45	14,7	2	4,3		3,8		3,5		3,0					
			4	8,7		7,5		6,9		6,0					
			5	10,8		9,4		8,7		7,5					
Schotter				ΔE											
			0,5	1,0		0,9		0,8		0,7					
L'	a'	b'	1	2,0		1,7		1,6		1,4					
8,49	2,15	13,7	2	4,0		3,5		3,3		2,9					
			4	7,9		7,0		6,5		5,8					
			5	9,9		8,7		8,2		7,2					
Steinplatten				ΔE											
			0,5	1,1		1,0		0,9		0,7					
L'	a'	b'	1	2,2		1,9		1,7		1,5					
14,1	1,82	16,2	2	4,4		3,8		3,4		2,9					
			4	8,9		7,6		6,9		5,9					
			5	11,1		9,5		8,6		7,3					
Waschbeton				ΔE											
			0,5	1,2		1,0		0,9		0,7					
L'	a'	b'	1	2,4		2,0		1,7		1,4					
16,1	3,4	19,4	2	4,7		4,0		3,4		2,8					
			4	9,4		8,0		6,9		5,7					
			5	11,8		10,0		8,6		7,1					
Rotes Pflaster				ΔE											
			0,5	1,2		1,0		0,8		0,6					
L'	a'	b'	1	2,4		2,0		1,6		1,3					
16,6	8,71	25	2	4,8		4,0		3,2		2,6					
			4	9,6		8,0		6,5		5,2					
			5	12,0		10,0		8,1		6,5					
Sandweg				ΔE											
			0,5	1,1		1,0		0,8		0,7					
L'	a'	b'	1	2,2		1,9		1,7		1,4					
11,9	3,28	20,9	2	4,5		3,9		3,4		2,8					
			4	9,0		7,8		6,8		5,6					
			5	11,2		9,7		8,5		7,0					
Acker				ΔE											
			0,5	1,1		1,0		0,8		0,7					
L'	a'	b'	1	2,2		1,9		1,7		1,4					
11,5	4,11	20,6	2	4,4		3,8		3,3		2,8					
			4	8,8		7,7		6,7		5,5					
			5	11,0		9,6		8,3		6,9					
Rasen				ΔE											
			0,5	1,2		1,1		1,0		0,8					
L'	a'	b'	1	2,5		2,2		1,9		1,5					
11,3	-4,77	24,8	2	5,0		4,4		3,9		3,0					
			4	10,0		8,9		7,8		6,0					
			5	12,4		11,1		9,7		7,6					
Rasen, Tau				ΔE											
			0,5	1,3		1,1		1,0		0,8					
L'	a'	b'	1	2,5		2,3		2,1		1,6					
12	-8,86	22,8	2	5,0		4,5		4,2		3,2					
			4	10,1		9,1		8,4		6,5					
			5	12,6		11,3		10,5		8,1					



Aus der Ergebnistabelle lassen sich folgende Schlüsse ziehen: 10% Flächenabdeckung sind in der Regel notwendig, um bei den Mischprodukten merklich Farbunterschiede feststellen zu können ($dE=4$), 5% reichen für ‚unmerkliche‘ Farbunterschiede und bei ca. 2% kann ein geschultes Auge Farbunterschiede erkennen.

Bei den vier unterschiedlichen Grüntönen ist auffällig, dass sie die notwendigen Flächenanteile für eine Eingruppierung, trotz der verschiedenen Untergründe individuell nicht stark streuen. Bei Grün 1 & $dE=5$ schwanken die Flächenanteile zwischen 9,9 und 13,0%, bei Grün 4 & $dE=5$ zwischen 6,8 und 8,1. Es sei hier erwähnt, dass die reale Streuung der Farbwerte der Hintergründe bei der Kalkulation berücksichtigt ist.

Eine Differenzierung des Objektes (Objekt- oder Pflanzenfarbe) scheint somit grundsätzlich auch auf unterschiedlichen Hintergründen (Böden) möglich zu sein!

2. Entscheidungsfindung über mathematisches Modell:

Um spezifischere Methoden zu nutzen, wird der Ansatz über mathematische Modelle ebenfalls untersucht. Diese Modelle können alleine, oder in Verbindung mit einer Negativerkennung der Analyse über dE an verdächtigen Stellen angewendet werden.

Ein Objekt gilt als erkannt, wenn gilt:

$$\begin{aligned} L_x - L_{HG} &> \sigma_{LHG} + \sigma_{LObj} \\ \cup a_x - a_{HG} &> \sigma_{aHG} + \sigma_{aObj} \\ \cup b_x - b_{HG} &> \sigma_{bHG} + \sigma_{bObj} \\ \cup d_x - d_{HG} &> \sigma_{dHG} + \sigma_{dObj} \end{aligned}$$

Die notwendige prozentuale Bedeckung x kann somit wie folgt abgeschätzt werden:

$$x = \frac{100 \cdot (\sigma_{LHG} + \sigma_{LObj})}{\sqrt{(L_{Obj} - L_{HG})^2}}$$

$$x = \frac{100 \cdot (\sigma_{aHG} + \sigma_{aObj})}{\sqrt{(a_{Obj} - a_{HG})^2}}$$

$$x = \frac{100 \cdot (\sigma_{bHG} + \sigma_{bObj})}{\sqrt{(b_{Obj} - b_{HG})^2}}$$

Als weiteres Identifikationsmerkmal wird ein ‚virtueller‘ d -Kanal definiert, der Differenz zwischen a - und b -Wert.

Tabelle 6: Notwendige Flächenanteile verschieden gefärbter Pflanzen im Messbereich auf ausgewählten Hintergründen

	Grün 1				Grün 2				Grün 3				Grün 4			
	L	a	b	d	L	a	b	d	L	a	b	d	L	a	b	d
Graues Pflaster	2,6	7,2	3,5	3,0	3,6	7,7	8,5	7,1	5,9	3,6	16,4	5,2	9,2	5,7	6,8	12,2
Asphalt	1,2	11,5	4,6	4,4	1,8	10,3	8,4	7,7	2,9	5,0	13,3	5,9	4,2	6,8	12,8	12,3
Schotter	2,9	7,0	5,4	3,5	3,7	7,6	9,0	6,9	5,0	3,6	14,1	5,3	6,4	5,6	15,9	11,0
Steinplatten	1,8	4,6	3,6	3,4	2,5	6,1	7,8	7,1	3,8	2,8	12,7	5,3	5,4	5,0	9,8	11,6
Waschbeton	2,1	4,1	4,4	2,5	2,9	5,7	8,8	6,6	4,5	2,6	15,9	4,8	6,5	4,8	8,8	10,9
Rotes Pflaster	4,5	18,0	5,9	5,6	5,7	15,4	10,9	8,6	8,4	9,2	26,2	6,7	11,7	10,0	7,3	13,4
Sandweg	1,4	9,5	5,9	4,9	2,0	9,1	10,2	8,2	3,1	4,6	19,8	6,3	4,2	6,4	9,8	13,5
Acker	0,5	4,9	3,1	2,5	1,0	6,2	8,1	6,6	1,8	3,0	15,0	4,8	2,6	5,1	6,7	8,0
Rasen	2,9	21,0	10,8	8,8	3,7	15,2	14,3	11,5	5,3	7,0	33,6	8,9	6,9	8,5	11,9	20,4
Rasen Tau	6,5	31,8	14,4	15,2	7,8	18,9	16,8	15,6	10,4	7,9	34,8	12,7	13,3	9,4	18,9	25,2
			bei 5 cm Φ (20 cm ²)		bei 10 cm Φ (80 cm ²)											
0- 3,0			unter:	0,6 cm ²	unter:	2,4 cm ²	Pflanzengröße									
3,1- 5,0				1 cm ²		4 cm ²										
5,1- 7,5				1,5 cm ²		6 cm ²										
7,6-10				2 cm ²		8 cm ²										

Aus obiger Tabelle lässt sich ableiten, dass die vier Kanäle für die Erkennung unterschiedlicher Farbtöne unterschiedlich gut geeignet sind. Wie schon im vorherigen Punkt beschrieben, ist der Einfluss des Hintergrundes relativ gering. Ist bspw. ein Kanal auf grauem Pflaster gut geeignet, kann er auch auf Sand oder Ackerboden gut genutzt werden (siehe Grün 1). Bei Grün 3 ist Kanal b schwach, während der errechnete Kanal d zur Erkennung von Grün 4 durchweg schlecht geeignet ist.

Die notwendige Abdeckung der Messfläche mit dem Objekt liegt teilweise bei unter 2% (L-Kanal bei Grün 1 und 2). Weiter ist ersichtlich, dass unbewachsener Ackerboden die besten Erkennungserfolge bei den durchgeführten Messungen hatten.

3. Objektidentifikation

Die Identifikation von Objekten bzw. Pflanzen erscheint in einem mehrstufigen Modell möglich zu sein!

- I. Extraktion ‚verdächtiger‘ Stellen bzw. Messungen über eine Betrachtung von dE
- II. Gezielte Analyse dieser Messungen anhand der Einzelkanäle L,a,b und d
- III. Vergleich aller vier Kanäle relativ zueinander.
- IV. Größenanpassung. Wesentlich für den Einfluss auf die Farbmessung ist die Objektgröße (siehe oben). Grundsätzlich muss ein Objekt ‚groß genug‘ sein um erkannt zu werden. Ist dies der Fall, kann die Relation der vier Kanäle zueinander Auskunft über die Objektfarbe geben.

4.2.5 Erkennung und Differenzierung

Unter künstlichen oder auch anthropogen geschaffenen Mischflächen werden alle Flächen zusammengefasst die durch menschlichen Einfluss geschaffen wurden.

Unter natürlichen Mischflächen werden alle Flächen zusammengefasst die natürlich entstanden sind, bzw. von natürlicher Vegetation bewachsen sind (z.B. Rasenflächen).

Die Charakterisierung von Hintergründen ist wesentlicher Bestandteil zur automatisierten Unkrauterkenennung mit dem CIELab-Farbsensor. Wie oben beschrieben können Hintergründe auf unterschiedliche Art und Weise entstanden sein. Befestigte anthropogene Flächen, wie Parkplätze oder Pflasterwege haben viele Fugen, die bei einer Farbmessung erkannt werden. Solche Unterschiede müssen vom Farbsensor als Fugen und nicht als Unkraut erkannt werden. Innerhalb der natürlichen Mischflächen können auch sehr heterogene Strukturen vorliegen. Ackerflächen sind, je nach Bodengefüge und Art der Bewirtschaftung, sehr heterogen und verursachen ein Signalrauschen.

Die Charakterisierung von Hintergründen und Erstellung von Datenbanken zu den Hintergründen bildet somit eine wichtige Grundlage für die automatisierte Unkrauterkenennung mit den CIELab-Farbsenor.

Sowohl die künstlichen als auch die natürlichen Mischflächen wurden im vorherigen Kapitel beschrieben.

Verschiedene Ansätze der Objekterkennung sind untersucht worden:

1. Differenzierung über Farbähnlichkeit (ΔE)

Die Berechnung von Farbunterschieden zwischen der gemessenen Farborten (L_p, a_p, b_p) und zu prüfenden Übereinstimmung mit einem ‚bekannten‘ Farbort (L_0, a_0, b_0) (=euklidischer Abstand) wird anhand folgender Formel berechnet.

$$\Delta E = \sqrt{(L_0 - L_p)^2 + (a_0 - a_p)^2 + (b_0 - b_p)^2}$$

Zur Unterscheidung gibt es zwei Möglichkeiten: Positiverkennung, d.h. Unkräuter werden erkannt oder Negativerkennung, bei der Nichtunkräuter erkannt werden.

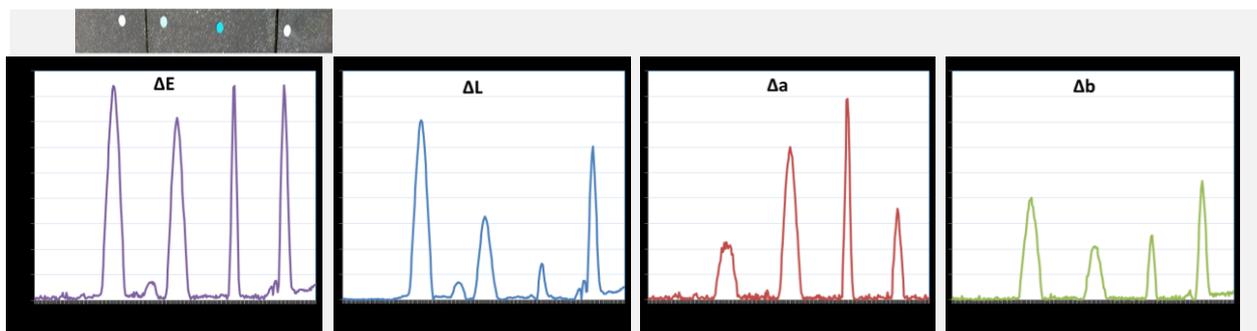


Abbildung 19: Befestigter Boden, ΔE und dessen Aufspaltung in ΔL , Δa und Δb

In obiger Abbildung 19 sind die Abstände exemplarisch für die Messungen auf befestigten Boden dargestellt. Die vier ausgelegten Objekte lassen sich eindeutig erkennen. Nach der Bewertungsskala aus Tabelle x und dem Vergleich delta-Werte ist bei den ab-Abweichungen am deutlichsten. Hier sind bei einem Wert von zwei Unkräuter zu erwarten. Das delta-E und Delta-L reagieren sehr stark auf dunkle Fugen. Ab einem delta von 5 können die grünen Objekte rausgefiltert werden, bei den Kanälen a und b ist dieses schon ab zwei möglich, da die Luminanz-Unterschiede nicht beeinflussend wirken.

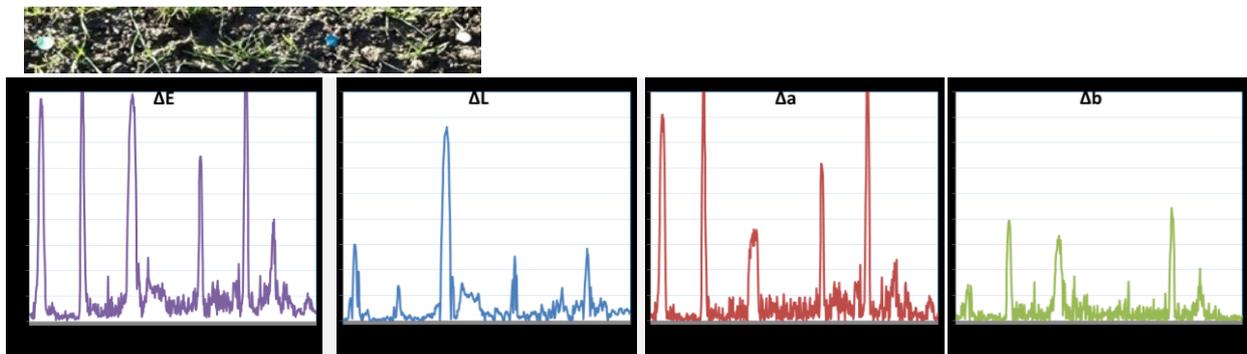


Abbildung 20: Weizenfläche, ΔE und dessen Aufspaltung in ΔL , Δa und Δb

Die Datenaufnahme in einem jungen Weizenbestand (BBCH 13, Foto Abbildung 20)) zeigt, dass eine Differenzierung möglich ist. Delta-E bildet den Bestand am besten ab. Ab einem Wert von 12 würde man auf eine Unkrautpflanze treffen. Die 6 Objekte lassen sich auch bei den Einzelabweichungen von Lab wiederfinden, ein Schwellenwert lässt sich jedoch schwierig ableiten.

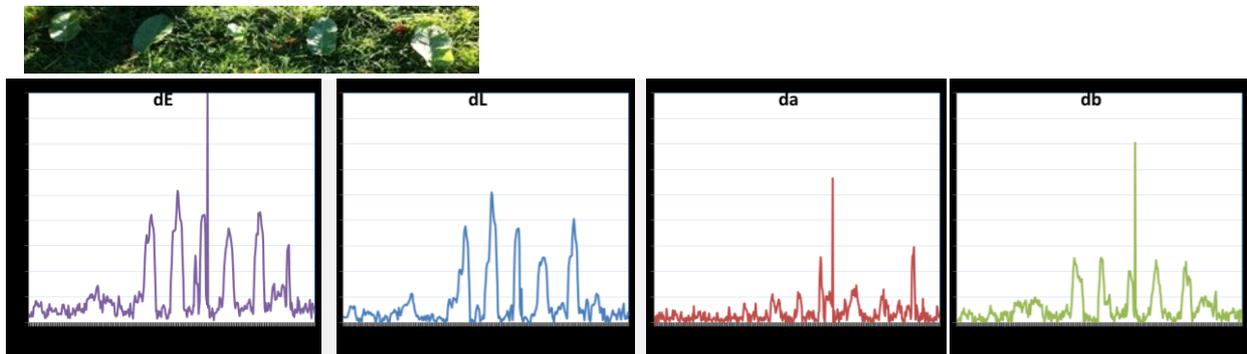


Abbildung 21: Ampfer im Grünland, ΔE und dessen Aufspaltung in ΔL , Δa und Δb

Ein anderes Bild ergibt sich in Abbildung x: Hier wurde Ampfer, als Vertreter breitblättriger Unkräuter im Grünland untersucht. Sowohl ΔE als auch ΔL zeigen die Unterschiede sehr gut. Bei einem Schwellenwert von ab 5 sind Unterscheidungen möglich. Während der a-Kanal geringe Unterschiede für die Festlegung eines Schwellenwertes zeigt, kann dieser im b-Kanal auch bei 5 festgelegt werden.

Die exemplarisch vorgestellten Ergebnisse zeigen, dass ΔE grundsätzlich ein gutes Maß ist, Objekte, die im Farbraum abweichen zu erkennen. Einflüsse durch Änderungen im Lab-Raum werden gleichgewichtet zur Beurteilung herangezogen. Diese Einflüsse können sich addieren, in einigen Fällen aber auch kompensieren.



2. Differenzierung über mathematische Modelle

Das Farbänderungen innerhalb der Kanäle als Kriterium der Unkrauterkenkung zu wählen ist eine weitere Möglichkeit, die im Folgenden beschrieben wird.

Um eine Differenzierung zwischen dem a-Kanal und dem b-Kanal vornehmen zu können, wurde der d-Kanal entwickelt. Der d-Kanal betrachtet die Differenz von a-Kanal und b-Kanal und wird nach folgender Formel berechnet:

$$d = b - a$$

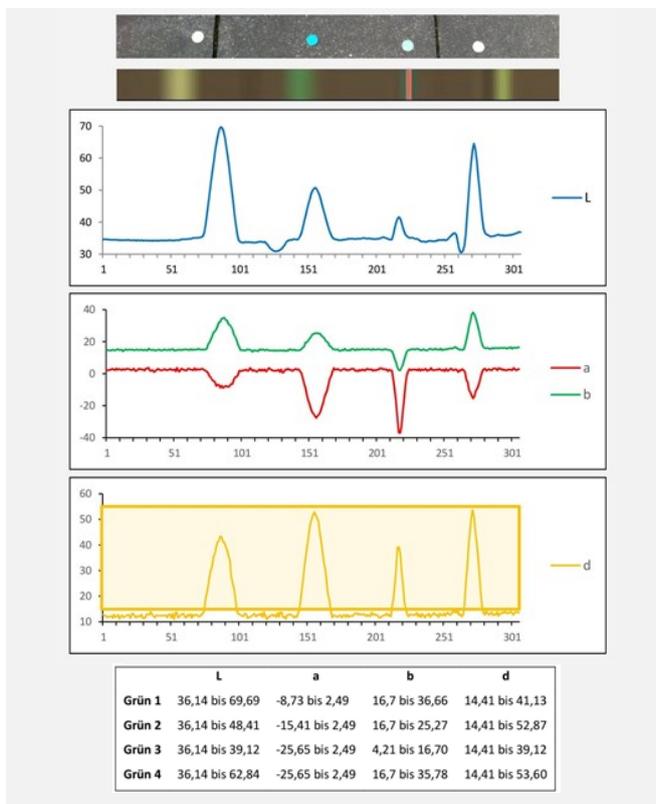


Abbildung 22: Objekterkennung auf befestigtem Boden

Für den Vergleich von 2D-Objekten auf anthropogenen Böden, zur Simulation der Pflanzendraufsicht, wurde ein Kreis in vier Grünstufen auf Waschbetonplatten gelegt. Wie erkennbar ist, lassen sich für alle Kanäle, außer dem b-Kanal, einheitliche Filter für die Farben Grün 1-4 der Kreisfläche entwickeln. Der b-Kanal zeigt bei Grün 3 ein anderes Farbbild als bei Grün 1,2 und 4. Hier wird ein höherer Blauanteil gemessen, was dazu führt dass es zu einem negativen Ausschlag kommt. Hier bietet jedoch der d-Kanal die Möglichkeit, trotz des negativen Ausschlages, einen einheitlichen Filter für alle Farben zu entwickeln.

Für den Vergleich von 2D-Objekten der Farben Grün 1-4 und Größen Kreis 1-3 wurden die Objekte pro Farbe in absteigender Fläche auf einem natürlichen

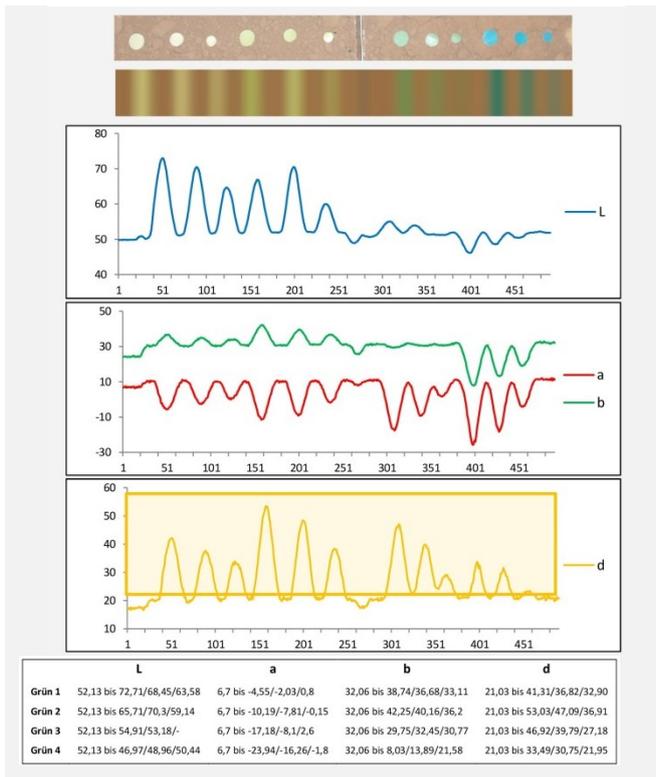


Abbildung 23: Objekterkennung auf Ackerboden

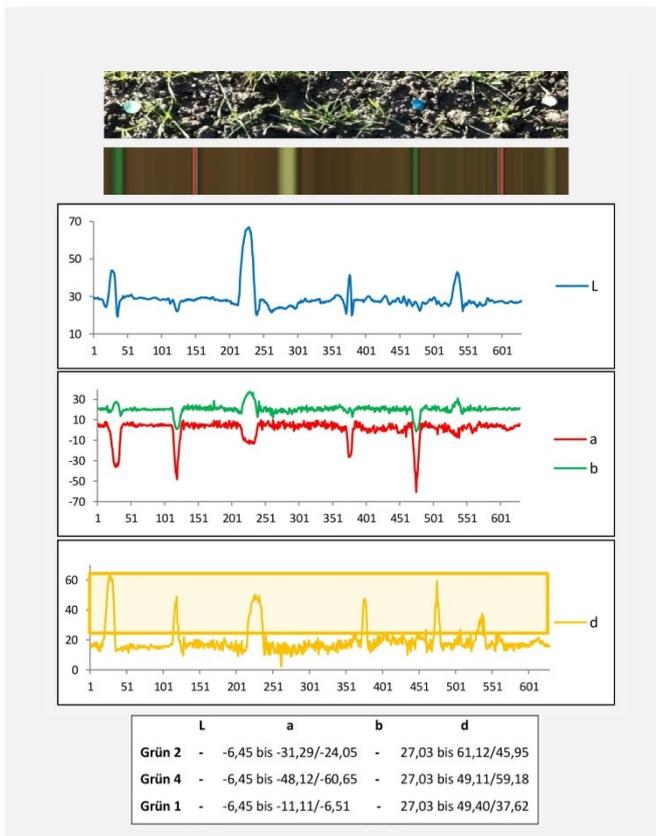


Abbildung 24: Objekterkennung in Winterweizen

Boden mit unterschiedlicher Körnung/ Krümelung ausgelegt.

Es eignen sich sowohl der a-Kanal, als auch der d-Kanal. In allen Kanälen ist der Übergang zwischen beiden Boxen klar erkennbar. Der L-Kanal unterscheidet Grün 1 und Grün2 eindeutig vom Hintergrund, für Grün 3 und Grün 4 ist ein Unterschied erkennbar, jedoch nicht eindeutig. Der b-Kanal zeigt keinen eindeutigen Filter für Grün 3. Da der d-Kanal sowohl die Werte des a-Kanals, als auch des b-Kanals berücksichtigt ist er für eine Filterentwicklung am besten geeignet.

Zur Simulation von 3D-Objekten in der Pflanzendraufsicht auf einem Ackerboden mit Vegetation wurden wie oben beschriebene Drahtmodelle in den Boden platziert.

Obwohl der Acker Vegetation aufweist, ist das Signalrauschen ähnlich groß wie auf einem Boden ohne Vegetation. Dies kann zum einen daran liegen, dass die Vegetation zum Zeitpunkt der Messung noch sehr gering war und somit keinen signifikanten Einfluss auf die Messung hat. Die Bodenheterogenität und das resultierende Signalrauschen verdeutlichen die Bedeutung eines Schwellenwertes für die jeweiligen Farbtöne. Erst ab einem Wert von 27,03 können Objekte im d-Kanal eindeutig als 3D-Objekte identifiziert werden. Obwohl die Werte, zwischen erster und zweiter Messung, abweichen können alle Grüntöne aufgrund ihrer Maxima im d-Kanal differenziert werden. Auf natürlichen Böden können somit sowohl Objekte erkannt, als auch differenziert werden, sofern sie sich nur in ihrer Farbe jedoch nicht in der Größe unterscheiden.

Betrachtet man das Farbband so sind grüne Farbbereiche, bedingt durch die Vegetation, erkennbar. Es ist davon



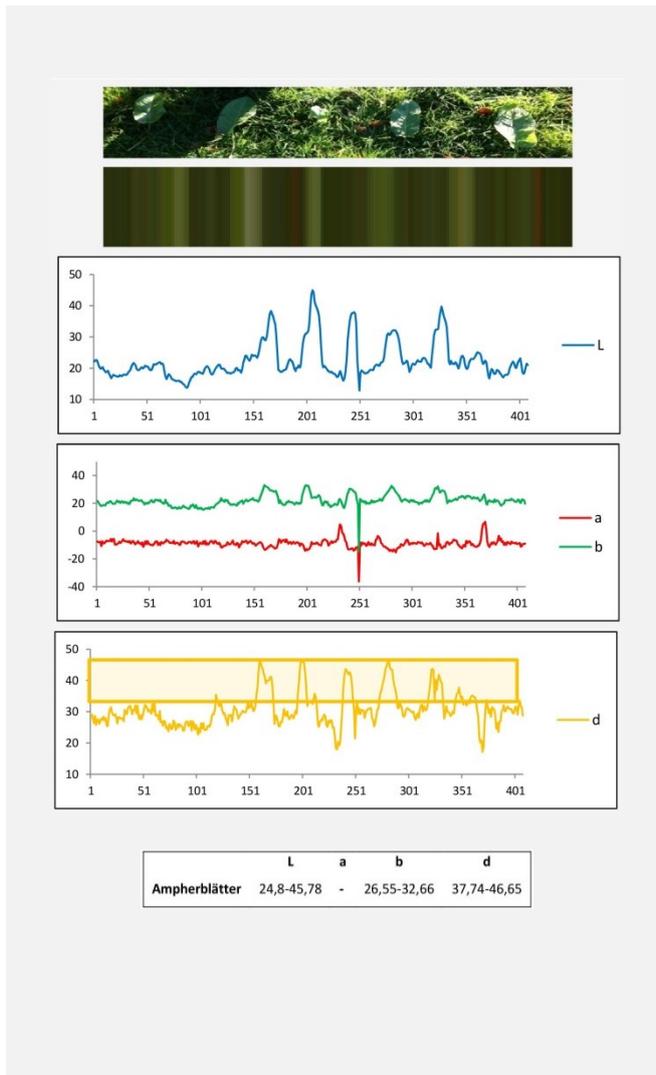


Abbildung 25: Ampfererkennung im Grünland

auszugehen, dass das Signalrauschen mit zunehmender Vegetation größer wird und sich die Kanäle die charakteristisch für Ackerboden sind verschieben hin zu Kanälen die charakteristisch für grüne Vegetation sind. Eine Erkennung der 3D-Objekte wäre zu einem späteren Zeitpunkt somit möglicherweise nicht so eindeutig und die Auswertung über den d-Kanal gewinnt an Bedeutung, da die Unterschiede im gesamten Farbspektrum berücksichtigt werden.

Zur Entwicklung von Filtern für Unkräuter die in der Praxis von großer Relevanz sind wurden Ampferblätter aufgenommen und auf Grasflächen gelegt.

Zur Erkennung eignen sich der L-Kanal, der b-Kanal und der d-Kanal. Der b-Kanal hingegen erkennt alle Blätter mit einer geringen Streuung der Maximalwerte.

Da sowohl der a-Kanal, als auch der b-Kanal eindeutige Veränderungen bei der Messung der Ampferblätter zeigen empfiehlt sich ein Filter auf Basis des d-Kanals.

Für den Vergleich von 2D-Objekten der Farben Grün 1-4 und Größen Kreis 1-3 wurden die Objekte pro Farbe in absteigender Fläche auf einem natürlichen Boden unterschiedlicher Körnung ausgelegt.

5. Fazit

Die Aufgabenstellung der einjährigen Studie war, die Eignung eines True-Color-Sensors bezüglich der Eignung zur Erkennung und Differenzierung von Unkräutern auf landwirtschaftlichen und kommunalen Flächen zu untersuchen. Dazu sind geeignete Testmethoden angewendet worden. Methodisch wurde von kontrollierten Laborbedingungen bis hin zu realen Bedingungen auf Feldern mit Bewuchs und Grünflächen die Qualität und das Potential des Sensors untersucht.

Folgende Aussagen können u.a. auch anhand einer Literaturrecherche und der durchgeführten Versuche bezüglich der Sensorik und Pflanzenerkennung getroffen werden:

5.1 Beurteilung der verwendeten Sensorik

- *Farbraum*: Drei verschiedene Farbräume (Lab, XYZ und RGB) wurden verwendet. Der Lab Farbraum erwies sich für das am geeignetsten, u.a. aufgrund der Unterscheidung zwischen Helligkeit und Farbwerten.
- *Farbmesssystem*: True-Color-Sensoren bilden einen guten Kompromiss aus Qualität der Farbmessung, Geschwindigkeit und Kosten.
- *Objektabstand*: es besteht ein linearer Zusammenhang zwischen dem Abstand und der Luminanz. Daraus folgt, dass mit Hilfe eines Abstandssensors die Messwerte für einen ‚Normabstand‘ berechnet werden können. (Bsp. 500 mm)
- *Messfläche*: Die Größe und Form (Kreis oder Rechteck) der Messfläche ist durch die Auswahl der Optik wählbar. Lediglich die Stärke der Lichtquelle stellte hier einen limitierenden Faktor dar.
- *Objektgröße*: Die Erkennung von Objekten ist von dem Hintergrundrauschen (= Farbheterogenität des Bodens) und der Größe des Objektivs, bzw. der Bildgröße abhängig. Die Versuchsergebnisse zeigten, dass Bedeckungsgrade von 3-5 % ausreichend sind.
- *Objektoberfläche*: Die Ausrichtung der Objektoberfläche wirkt sich auf die Reflexionsstärke aus – die Luminanz sinkt mit steigender Aufrichtung der Blätter.
- *Echtzeitfähigkeit*: Aufgrund dem im Einzelsensor integriertem Controller können Aktoren in Echtzeit angesprochen bzw. aktiviert werden. Der zu nutzende Auswertalgorithmus zur Pflanzenerkennung und das Entscheidungsmodell mit den aktuellen Kalibrierwerten werden dazu vor dem Einsatz durch einen Zentralrechner aktualisiert.

5.2 Beurteilung der Pflanzenerkennung

Inwiefern unterschiedliche Grüntöne qualitativ und quantitativ auf verschiedenen Untergründen mit True-Color-Sensoren bestimmt werden können, wurde untersucht. Die grundsätzliche Eignung des Sensors in Verbindung mit Datenbanken, Kalibrierungen und



unterschiedlichen Detektionsalgorithmen zur Steuerung von Aktoren für die Unkrautbekämpfung konnte durch eine systematische Versuchsanstellung belegt werden. Folgende Aussagen können gemacht werden:

- *Unterscheidung von Pflanzen anhand Farbtönen:* Geringste Unterschiede in der Färbung (a- und b-Kanal) können mit dem verwendeten Sensor in Echtzeit erkannt werden und zusammen mit der Reflexionsstärke (ableitbar über die Luminanz) zur Pflanzenbestimmung herangezogen werden. Vor dem Feldeinsatz muss der Sensor kalibriert werden (Aufnahme der Reflexionseigenschaften der Kulturpflanze und deren physiologischen Zustand). Berücksichtigt werden muss jedoch, dass überwiegend Mischflächen (Pflanzen und Untergrund) aufgenommen werden.
- *Charakterisierung von Objekten und Hintergründen:* Verschiedene künstliche und natürliche Hintergründe (Böden) sind aufgenommen worden, ebenso unterschiedliche Grünfärbungen und in Datenbanken eingebunden worden. In Ihnen sind die Lab-Werte und entsprechende Streuungsparameter integriert. Anhand der Datenbanken kann der Detektionserfolg abgeschätzt werden.
- *Einfluss der Farbkanäle:* Besonders der a-Kanal zeigt charakteristische Unterschiede zu den Böden und reicht zur Erkennung auf künstlichen Böden aus.
- *Mathematische Funktionen:* der berechnete Kanal d (a-b) zeigt sowohl auf künstlichen als auch auf natürlichen Böden eine sicherere Erkennung von Objekten/Pflanzen. Zur Bestimmung der Objektfärbung müssen dann die entsprechenden Lab-Werte herangezogen werden.
- *Die Differenzierung von Pflanzen* erscheint in einem mehrstufigen Modell möglich zu sein!
 - Extraktion ‚verdächtiger‘ Stellen bzw. Messungen über eine Betrachtung von ΔE
 - Gezielte Analyse dieser Messungen anhand der Einzelkanäle L,a,b und d
 - Vergleich aller vier Kanäle relativ zueinander.
- Dikotyledonen in Beständen von Monokotylen (z.B. Getreide) und sogar Ampfer im Grünland können sicher erkannt und gezielt bekämpft werden.

Ein voll funktionsfähiger Versuchsträger mit Applikationseinheit, zehn Sensor-Düseneinheiten und einer Arbeitsbreite von einem Meter ist entwickelt worden und steht für den Feldeinsatz (Anbau an ATVs oder für manuellen Zug) zur Verfügung.

Anhand den Ergebnisse und Erfahrungen dieses einjährigen Projektes wurde belegt, dass True-Color-Sensoren sich von vorhandenen Sensoren deutlich abheben und eine Differenzierung von Pflanzenarten mit den angewendeten und entwickelten Methoden möglich ist.



5.3 Bewertung hinsichtlich der praktischen Anwendung

Zur Bewertung der Sensoreignung werden die in der Einleitung beschriebenen Praxisanwendungen zugrunde gelegt.

Tabelle 7: Bewertung des Sensors hinsichtlich der praktischen Anwendung

Anwendung		Pflanzen- erkennung	Bemerkungen	Praxis- eignung
1	befestigte Flächen	👍	👍 für den gezielten Einsatz natürlicher und synthetischer Totalherbizide	👍
2	Bahndämme	👍		
3	Brachland	👍		
4	abgeerntete Flächen	👍		
5	Reihenkulturen		durch Sensorposition	
5.1	Zwischenreihe	👍	Positiverkennung	👍
5.2	In der Reihe	👍👉	Negativerkennung	
6	Getreide	👍👉	Unkrauterkennung über BFI Differenzierung von Mono- und Dikotyle	👍
7	Mulchflächen	👍	👍 für den gezielten Einsatz natürlicher und synthetischer Totalherbizide 👉 Mono- und Dikotyle	👍
8	Mulchflächen & Grünanteile	👍👉	👍 für den gezielten Einsatz natürlicher und synthetischer Totalherbizide 👉 Mono- und Dikotyle	👍
9	Grünflächen	-	👍 Mono- und Dikotyle	👍

Bem.: 👍 = sichere Erkennung; 👉 = ergänzende Untersuchungen nötig; - = nicht notwendig

Das Potential der Sensoren kann für folgende Anwendungen belegt werden:

- Pflanzenerkennung auf *vegetationsfreien Flächen* (1, 2, 3, 4) funktioniert schon bei sehr geringem Bewuchs. Eine zusätzliche Differenzierung – in der Praxis selten notwendig – ist generelle möglich, genauere Aussagen erfordern jedoch ergänzende Untersuchungen.



- In *Reihenkulturen* (5) können Unkräuter im Zwischenreihenbereich sicher erkannt werden. Die Differenzierung zwischen Kultur- und Unkrautpflanzen ist über Negativerkennung (Ausschlussprinzip über Erkennung der Kulturpflanzen) möglich. Eine weitere Differenzierung ist generell möglich. Durch die Kaskadierung der Sensoren zur Zwischen- und inner-Reihenerkennung können unterschiedliche Unkrautbekämpfungsverfahren gesteuert werden.
- In *Getreidebeständen* (Mischmessungen) können Unkrautnester anhand des größeren BFI grundsätzlich erkannt werden und praxisübliche Maßnahmen mit Spezialherbiziden einleitet werden. Eine Erkennung von zweikeimblättrigen Unkräutern ist möglich. Weitere Differenzierungen sind im Praxiseinsatz in der Regel nicht notwendig und wurden nicht untersucht.
- Pflanzenerkennung und Differenzierung auf *grünpflanzenfreien Mulchflächen* (7) sind möglich. Untersuchungen auf *Mulchflächen mit Pflanzenresten* (8) wurden nicht durchgeführt.
- Eine Erkennung von Ampfer im *Dauergrünland* (9) konnte durchgeführt werden und ist für Praxisanwendungen besonders von hoher Bedeutung sein.

Weiter zeichnet sich das Sensorsystem durch die *Echtzeitfähigkeit* aufgrund *direkter Kopplung von Sensor und Aktor* und der *individuellen Konfigurierbarkeit* bezüglich des Praxiseinsatzes und der *flexiblen Wahl des Messbereichs* durch Ausstattung mit unterschiedlichen Optiken aus. Im Vergleich zu vorhandenen Erkennungssystemen sind Pflanzendifferenzierungen möglich.

5.4 Ausblick

Nachdem die grundsätzliche Sensoreignung der Pflanzenerkennung anhand Farbunterschieden belegt wurde, sollten vegetationsbegleitende Untersuchungen durchgeführt werden, um die Reflexionseigenschaften realer Beständen in verschiedenen Entwicklungsstadien und physiologischen Zuständen auf unterschiedlichen Untergründen zu untersuchen.

In den Vorversuchen konnten durchweg positive Erfahrungen zur Eignung von True-Color Sensoren zur Unkrauterkenntung unter Praxisbedingungen gemacht werden. Diese sollten in weiteren Versuchen konkretisiert werden. Einerseits müssen für die Anwendungen notwendige Rahmenbedingungen, wie mindeste Pflanzengrößen, die in den Vorversuchen einem Bedeckungsgrad von 1-10 % der Messfläche entsprachen, ermittelt werden. Andererseits müssen Erkenntnisse über den Grad der Differenzierung von Unkrautpflanzen unter definierten Wachstumsbedingungen über die Unterscheidung in ein- und zweikeimblättrigen Pflanzen hinaus gewonnen werden.

Sensoroptimierungen sind hinsichtlich deren Leistung (Eigenlicht) und der Optiken erforderlich. Verfeinerung der Auswertelgorithmen und Entscheidungsmodelle, sowie die



Weiterentwicklung der Sensoren und des Gesamtsystems incl. BUS zur Produktreife sollten angestrebt werden.

6. Literaturverzeichnis

BELEUCHTUNGSKOMMISSION: CIELab. <http://www.cielab.de/>. 17. Februar 2015

DEUTSCHES INSTITUT FÜR NORMUNG: DIN 5033

JENSEN, K., NIMZ, T. : Welche Genauigkeiten erreicht man mit Farbsensoren und Mini-Spektrometern? <http://www.mazet.de/de/downloads/produkt-und-kundeninformationen/white-paper#.VRKkQ1Oh3JA>, 25.03.2015

LÜTTGE, U. , KLUGE, M., BAUER, G.: Botanik. VCH Verlagsgesellschaft, Weinheim, 1989

PREMOSYS: PC Tool CIELab Color Sensor. Handbuch, 2014

ZUM: Reflexion und Absorption. http://satgeo.zum.de/satgeo/methoden/physik_fernerkundung/spektrum/reflexion_absorption.htm, abgerufen am 10.09.2015

