

Forschungsbericht

Nr. 174

Automatisierte mechanische Unkrautbekämpfung in Reihenkulturen

Verfasser:

Dipl.-Ing. Matthias Müter

Prof. Dr. Peter Schulze Lammers

Dr. Lutz Damerow

Institut für Landtechnik

Herausgeber: Lehr- und Forschungsschwerpunkt „Umweltverträgliche und Standortgerechte Landwirtschaft“, Landwirtschaftliche Fakultät der Rheinischen Friedrich-Wilhelms-Universität Bonn

Meckenheimer Allee 172 15, 53115 Bonn
Tel.: 0228 – 73 2285; Fax.: 0228 – 73 1776
www.usl.uni-bonn.de

Forschungsvorhaben im Auftrag des Ministeriums für Umwelt und Naturschutz, Landwirtschaft und Verbraucherschutz des Landes Nordrhein-Westfalen
Bonn, Dezember 2013

ISSN 1610-2460

Projektleitung: Prof. Dr. Peter Schulze Lammers
Dr. Lutz Damerow

Projektbearbeiter: Dipl.-Ing. Matthias Müter

Institut für Landtechnik
Nussallee 5
53115 Bonn

Zitiervorschlag:

MÜTER, M.; P. SCHULZE-LAMMERS UND DAMEROW, L. (2013): Automatisierte mechanische Unkrautbekämpfung in Reihenkulturen. Landwirtschaftliche Fakultät der Universität Bonn, Schriftenreihe des Lehr- und Forschungsschwerpunktes USL, Nr. 174, 42 Seiten.

Inhaltsverzeichnis

Inhaltsverzeichnis	IV
Abbildungsverzeichnis	VI
1 Problemstellung und Zielsetzung	- 1 -
2 Material und Methoden	- 4 -
2.1 <i>Maschinenlabor</i>	- 4 -
2.2 <i>Computersimulation</i>	- 6 -
2.3 <i>Bilderfassung</i>	- 6 -
2.4 <i>Bildverarbeitung</i>	- 10 -
2.5 <i>Motorsteuerung</i>	- 14 -
2.6 <i>Anbauversuchsträger</i>	- 15 -
2.7 <i>Außenversuche</i>	- 18 -
3 Ergebnisse	- 21 -
3.1 <i>Kinematik der Rotationshacke</i>	- 21 -
3.2 <i>Vergleich von RGB-Sensor und Kamera</i>	- 23 -
3.3 <i>Motorsteuerung</i>	- 25 -
3.4 <i>Zuckerrüben im Zweiblattstadium</i>	- 26 -
3.5 <i>Zuckerrüben im Vierblattstadium</i>	- 27 -
3.6 <i>Zuckerrüben im Sechsbblattstadium</i>	- 29 -
3.7 <i>Zuckerrüben kurz vor Reihenschluss</i>	- 31 -
3.8 <i>Durchwachsene Silphie</i>	- 32 -
4 Diskussion	- 34 -
5 Zusammenfassung	- 37 -
6 Schlussfolgerungen für die Umsetzung in die Praxis	- 38 -
7 Literaturverzeichnis	- 39 -

8	Vorträge	- 40 -
9	Kurzfassung.....	- 41 -

Abbildungsverzeichnis

Abb. 1: Intra-row-Bereich (orange) entlang einer Pflanzenreihe mit weiß markiertem Schutzbereich um die Kulturpflanze.....	- 3 -
Abb. 2: Pro/Engineer CAD-Modell der Bodenrinne: Darstellung des translatorisch bewegten Versuchsträgers mit 3 rotierenden Hackwerkzeugen und der resultierenden Bahnkurve eines Hackwerkzeuges (blau)	- 4 -
Abb. 3: Schematischer Versuchsaufbau zur Veranschaulichung des Zusammenhangs zwischen Pflanzenerkennung und mechanischem Eingriff. Als Bindeglied zwischen Sensoren und Servomotor verarbeitet ein Echtzeit-Prozessor die Eingangsdaten zu einem Ausgangssignal zur Ansteuerung des Motors	- 5 -
Abb. 4: Bilderfassung mit einer CCD-Kamera auf der Bodenrinne (links) und Aufnahmeperspektive der Kamera (rechts)	- 6 -
Abb. 5: Spektrale Empfindlichkeit der blauen, grünen, roten und nah-infraroten Pixel bezogen auf die Wellenlänge.....	- 7 -
Abb. 6: Bispektral-Kamera mit Darstellung des Strahlenganges und der Aufteilung auf einen Farb- und einen NIR-Chip (JAI, 2012).....	- 8 -
Abb. 7: Farb- und Nahinfrarotbild von Zuckerrüben im Vierblattstadium (aufgenommen mit einer Bispektralkamera).....	- 9 -
Abb. 8: Für die Rotationshacke entwickelte LabVIEW Benutzeroberfläche mit Einstellmöglichkeiten und aktuellen Werten (Bilder) aus der Bildverarbeitung und der Motorsteuerung (Werkzeugposition).....	- 10 -
Abb. 9: Ausschnitt aus dem LabVIEW-Programm zur Steuerung der Rotationshacke	- 11 -
Abb. 10: Segmentierung des Farbbildes (links) durch Schwellwertverfahren.....	- 11 -
Abb. 11: Ergebnis einer Schnellen Fourier-Transformation FFT zur Filterung des Binärbildes (Entfernen kleiner Partikel und Randglättung größerer Partikelcluster).....	- 12 -
Abb. 12: Pflanzenunterscheidung und Markierung anhand von Größe und Form ...	- 13 -

Abb. 13: mögliche Konstellationen der Pflanzenabstände innerhalb der Pflanzenreihe: Idealabstand (oben), Doppelstellen (2. Reihe von oben) und Fehlstellen (unten)	- 13 -
Abb. 14: Erkennung und Speicherung der Nutzpflanzenpositionen.....	- 14 -
Abb. 15: vereinfachte Darstellung des Motorregelkreises.....	- 14 -
Abb. 16: Morphologischer Kasten, in dem verschiedene Kombinationen aus Trägerfahrzeug, Pflanzendetektion und Art der Behandlung dargestellt werden.....	- 15 -
Abb. 17: Ethernet-basierte Bus-Kommunikation zwischen den Hauptbaugruppen..	- 16 -
Abb. 18: An einem Traktor angebauter Versuchsträger mit 2 Motoren, einer Box für Kameras und Beleuchtung (grün) und einem Schaltschrank zur geschützten Unterbringung der Mess- und Echtzeit-Rechner sowie der Servoumrichter und der restlichen elektronischen Komponenten	- 17 -
Abb. 19: Rotations- (links) und Schwinghacke (rechts), die über Tasträder in der Höhe geführt werden.....	- 17 -
Abb. 20: Pflanztopfversuche unter einem Wetterschutzdach (links), Versuchsaufbau mit Pflanze, Beleuchtung, CCD-Kamera und Notebook zur Bildakquisition.....	- 18 -
Abb. 21: Versuchsfläche mit dreireihigen Parzellen (links), fahrzeuggebundener Versuchsaufbau zur Bildaufnahme während der Fahrt	- 19 -
Abb. 22: Erste Hackversuche im Zweiblattstadium	- 19 -
Abb. 23: Kontrolle der Positionsgenauigkeit der Hackwerkzeuge	- 20 -
Abb. 24: Ausschnitt aus der Versuchsübersicht	- 20 -
Abb. 25: ProE-Modell mit Bahnkurve (links) und veränderter Motorposition (rechts).....	- 21 -
Abb. 26: Bahnkurvenprojektion der Hackwerkzeuge bei 3 Hackarmen.....	- 21 -
Abb. 27: Genauigkeit der Positionsbestimmung von RGB-Sensor und CCD-Kamera.....	- 23 -
Abb. 28: RGB-Pflanzenerkennung mit Punktsensor.....	- 24 -
Abb. 29: RGB-Abtastung der Pflanzenreihe entlang einer genauen Linie.....	- 24 -

Abb. 30: RGB-Abtastung der Pflanzenreihe unter Einfluss von Lenkbewegungen ...	- 24 -
Abb. 31: Hackresultate bei geschwindigkeits- (links) und positionsgesteuerten Algorithmen (bei 2 m/s Vorfahrtgeschwindigkeit)	- 25 -
Abb. 32: Unkrautererkennung (weißer Bereich) im Zweiblattstadium der Zuckerrüben (farbig).....	- 26 -
Abb. 33: Nicht erkannte Zuckerrübe (rot markiert) im Zweiblattstadium	- 27 -
Abb. 34: Unkrautererkennung (lila Bereich) im Vierblattstadium der Zuckerrüben ...	- 27 -
Abb. 35: Differenz zwischen realer und berechneter Pflanzenposition im Vierblattstadium.....	- 28 -
Abb. 36: Zuckerrüben im Sechsbblattstadium.....	- 29 -
Abb. 37: Differenz zwischen realer und berechneter Pflanzenposition im Sechsbblattstadium	- 30 -
Abb. 38: Monokotyle und Dikotyle Unkräuter vor und nach der mechanischen Unkrautregulierung	- 31 -
Abb. 39: korrekt erkannte Zuckerrüben kurz vor Reihenschluss	- 32 -
Abb. 40: Fehler bei der Erkennung der Zuckerrüben bei beginnendem Reihenschluss. Zwei Zuckerrüben werden nicht als Einzelobjekte erkannt	- 32 -
Abb. 41: Erkennung von Durchwachsene Silphie im Dreiblattstadium	- 33 -
Abb. 42: Erkennung von Durchwachsene Silphie im Sechsbblattstadium	- 33 -
Abb. 43: Erkennungswahrscheinlichkeit von Zuckerrüben in unterschiedlichen Wachstumsstadien.....	- 35 -

1 Problemstellung und Zielsetzung

Das Institut für Landtechnik beschäftigt sich seit einigen Jahren mit der Entwicklung einer Hacke zur mechanischen Unkrautbekämpfung für den Bereich innerhalb der Pflanzenreihe. Die konventionelle Maschinenhacke, die zwischen den Reihen (inter-row) arbeitet, deckt ca. 80 % der Fläche in Reihenkulturen ab (GOBOR, 2007). Unkräuter treten jedoch auch in der Reihe zwischen den Pflanzen (intra-row) und in unmittelbarer Nähe der Pflanzen (close-to-crop) auf und haben dort als Nährstoffkonkurrenten einen großen Einfluss auf die Entwicklung der Nutzpflanzen. Trotzdem sind bisher keine Maschinen auf dem Markt, die diesen Bereich zufriedenstellend behandeln können. Die Erkennung und Positionsbestimmung der Pflanzen im online-Verfahren sind die Hauptprobleme, die für diesen Zustand verantwortlich sind.

Für die inter-row Unkrautkontrolle sind eine große Anzahl passiver oder aktiver Werkzeuge auf dem Markt verfügbar. Dies sind verschiedene Formen von Hacken, Eggen, Striegeln und Bürstenhacken sowie schneidende Werkzeuge wie Freischneider. Die Qualität der Unkrautbekämpfung hängt sehr stark von der Geräteeinstellung und Lenkgenauigkeit des Trägerfahrzeuges sowie der Reihentreue der Kulturpflanzen ab. In den letzten Jahren werden zunehmend Bildverarbeitungssysteme zur Lenkung der Werkzeuge eingesetzt, die entweder den gesamten Rahmen oder einzelne Werkzeuge steuern. Damit konnten zwar größere Fahrgeschwindigkeiten (bis zu 15km/h, Fa. Eco-Dan, Dänemark) und eine verbesserte Arbeitsqualität erreicht werden, aber der Bereich zwischen den Kulturpflanzen (intra-row) wird nicht bearbeitet. Aufgrund dieser Einschränkung wurde nach Möglichkeiten gesucht auch den intra-row Bereich zu bearbeiten. Die Mechanisierung dieser Arbeit ist jedoch aufgrund der hohen Anforderungen an die Arbeitsgeschwindigkeit, den Schutz der Kulturpflanzen und der variablen Pflanzenabstände sehr komplex. Zwei verschiedene Ansätze zur Lösung des Problems wurden angestrebt: der Einsatz passiver bzw. der Einsatz aktiver Werkzeuge. Zu den passiv arbeitenden Werkzeugen, die auch kommerziell verfügbar sind, gehören Fingerräder/-bürsten und Federzinken, die direkt in der Pflanzenreihe arbeiten. Die Arbeitsqualität ist sehr unterschiedlich und häufig nicht befriedigend. Aktiv im intra-row Bereich arbeitende Systeme werden in verschiedenen Ländern konzipiert und entwickelt. All diese Systeme sollen selektiv arbeiten. Dabei wird in Abhängigkeit von einem Erkennungssystem, das eine Unterscheidung von Nutzpflanze und Unkrautpflanze ermöglichen soll, das eigentliche Bearbeitungswerkzeug aktiviert (Åstrand 2002, 2005; Griebentrog 2005). Das von ÅSTRAND vorgestellte System besteht aus einer Farbkamera, einer Bildanalysesoftware, die anhand von maximal 19 Merkmalen Nutz- und Unkrautpflanzen unterscheiden kann und einem im rechtem Winkel zur Pflanzenreihe schnell

rotierendem ca. 30 mm breiten Hackwerkzeug, das auf ein entsprechendes Signal der Bildanalysesoftware mittels eines Hydraulikzylinders abgesenkt und angehoben wird. Das System der Fachhochschule Osnabrück, das auch von GRIEPENTROG genutzt wird, verfügt über einen rotierenden Zylinder, der sich vertikal über der Pflanzenreihe befindet und an dem im Kreis angeordnete Finger montiert sind. Durch diese Anordnung der Systemkomponenten ist die Unkrautbekämpfung an die freie Höhe zwischen Zylinder und Boden gebunden. Die Erkennung der Pflanzen erfolgt über eine Vielzahl verschiedener Sensoren. Ein System der Universität Wageningen (Bakker et al. 2006) arbeitet ebenso wie das System der University Cranfield (Dedousis et al. 2006) mit rotierenden Scheiben, die beidseitig der Pflanzenreihe parallel zur Erdoberfläche geführt werden. Dadurch werden im günstigsten Fall die Unkrautpflanzen zerschnitten jedoch erfolgt keine Bodenbearbeitung, die beim Hackvorgang ebenfalls von wesentlicher Bedeutung ist. Auf der Agritechnica 2009 wurde erstmals ein kommerzielles Hacksystem, das sowohl im intra-row als auch im inter-row Bereich arbeitet, vorgestellt. Der inter-row Bereich wird vom System konventionell bearbeitet. Der intra-row Bereich wird durch ein schnell aus dem inter-row-Bereich in die Pflanzenzwischenräume bewegtes Hackmesser bearbeitet. Die pneumatische Steuerung erfolgt jedoch durch eine Kamera und eine Bildanalysesoftware. Über die Arbeitsleistung und über die Arbeitsqualität sind bisher keine Angaben bekannt. Aufgrund der Kinematik der Werkzeugbewegung und der Werkzeugform sind Probleme bei kleineren Pflanzenabständen (< 100 mm, Gemüsebau) und größeren Pflanzenabständen (> 250 mm, Gemüsebau) zu erwarten.

Am Institut für Landtechnik wurde ein Hacksystem für die Unkrautbekämpfung in der Reihe entwickelt, das aus einem Schrittmotor und drei oder mehreren an der Nabe befestigten Armen besteht, die um die horizontale Achse oberhalb der Reihe rotieren (GOBOR, 2007). Das daraus resultierende kinematische Modell wird durch die Fahrgeschwindigkeit, den Pflanzensollabstand und einer sensorbasierten online-Erkennung der Pflanzen in der Reihe gesteuert. Erste Versuche in der Bodenrinne des Instituts für Landtechnik mit einem elektrisch angetriebenen Experimentalmodell verliefen erfolgreich. Die Versuche waren aufgrund der geringen Wegstrecke in der Bodenrinne auf eine Geschwindigkeit von 0,2 m/s begrenzt. In der Praxis wird jedoch eine Fahrgeschwindigkeit bis zum 5 km/h (1,4 m/s) angestrebt. Die Steuerung des Werkzeugträgers (Rotors) erfolgt mittels eines Programms, dessen Eingangsdaten der Sollpflanzenabstand und der Ist-Pflanzenabstand, ermittelt durch einen speziellen Laser-Reflexionstaster, sind. Die theoretischen Arbeiten und die Erprobung im Labor wurden im Rahmen des DFG-Graduiertenkollegs „Use of Information Technologies for Precision Crop Protection“ durchgeführt und im Dezember 2007 beendet. Die Ergebnisse dieser Arbeiten (GOBOR, 2007) zeigten, dass die Überführung des kinematischen Modells in ein praxisrelevantes System möglich ist.

Das Ziel des Forschungsprojektes ist die Weiterentwicklung und Felderprobung des vom Institut für Landtechnik bereits entwickelten und im Labor erfolgreich getesteten Systems zur mechanischen Unkrautbekämpfung innerhalb der Pflanzenreihe (intra-row-Bereich) (in **Abb. 1** orange markierte Fläche), das auf einem neuen kinematischen Ansatz beruht. Ein Teilziel ist die Implementierung einer echtzeitfähigen Regelung für die Ansteuerung der Hackwerkzeuge, um Fahrgeschwindigkeiten von bis zu 2 m/s zu erreichen. Um die Pflanzen auch auf dem Feld außerhalb von Laborbedingungen erkennen zu können, ist ferner der Einsatz eines Bilderkennungssystems erforderlich. Dieses System muss die Pflanzen auf den Bildern erkennen, die von einer Kamera aufgenommen werden, und deren Position an die Echtzeit-Regelung weitergeben. Der Versuchsträger muss dann in der Lage sein, die Nutzpflanzen in verschiedenen Wachstumsstadien erfolgreich zu erkennen und deren berechnete Position als Eingangssignal der Motorsteuerung zur Verfügung zu stellen. Diese errechnet aus den Pflanzenpositionen ein Bewegungsprofil für den Motor, so dass die Hackwerkzeuge zwischen den Nutzpflanzen in den Boden eintauchen und den Bereich von Unkräutern befreien.



Abb. 1: Intra-row-Bereich (orange) entlang einer Pflanzenreihe mit weiß markiertem Schutzbereich um die Kulturpflanze

2 Material und Methoden

2.1 Maschinenlabor

Für die ersten Versuche sowie zur Einstellung der einzelnen Komponenten wird eine Bodenrinne (**Abb. 2**) im Maschinenlabor des Institut für Landtechnik (ILT) eingesetzt. Die Bodenrinne besteht aus einem 9 m langen Kasten, der mit 3 verschiedenen Bodenarten gefüllt ist. Für die Versuche werden künstliche Pflanzen aus Kunststoff eingesetzt, die bei Wiederholungen von Versuchen eine bessere Vergleichbarkeit erzeugen. Ein elektrisch angetriebener Schlitten simuliert das Fahrzeug, das in der realen Umgebung über das Feld fahren würde.

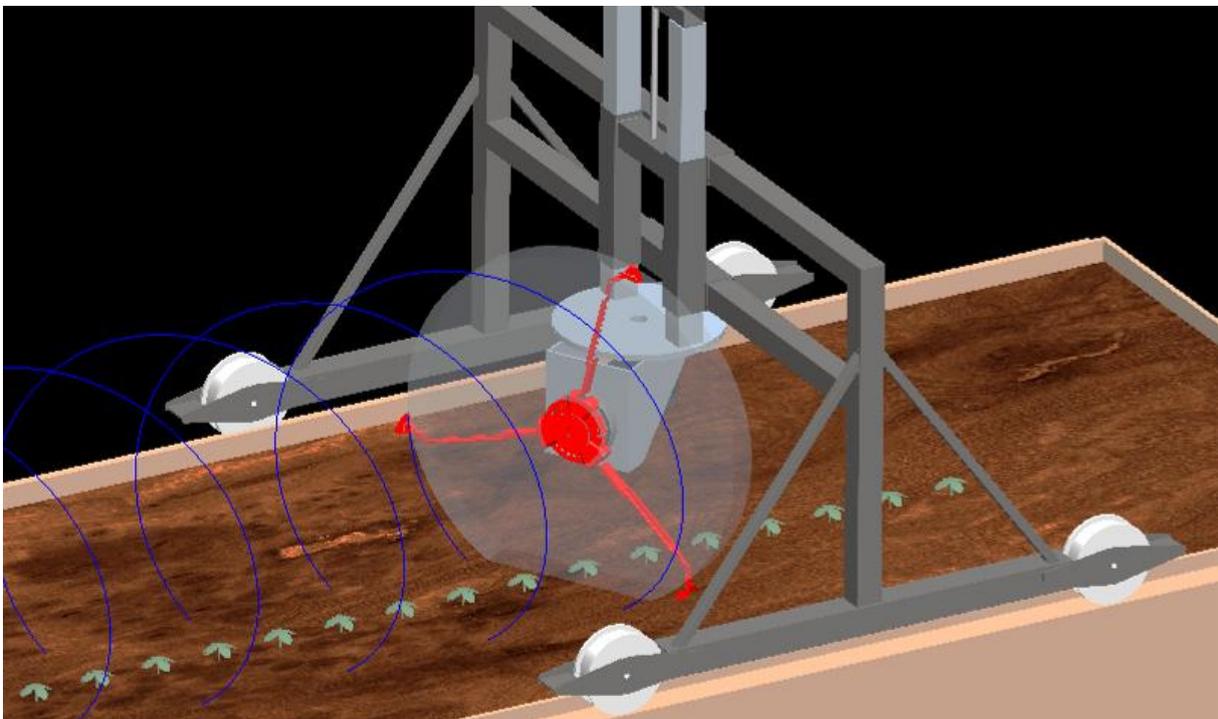


Abb. 2: Pro/Engineer CAD-Modell der Bodenrinne: Darstellung des translatorisch bewegten Versuchsträgers mit 3 rotierenden Hackwerkzeugen und der resultierenden Bahnkurve eines Hackwerkzeuges (blau)

Für alle Hackversuche wird ein Schrittmotor mit einem Hackstern am Schlitten montiert. Für die Erkennung der Pflanzen können unterschiedlichste Sensoren am Versuchsschlitten montiert werden. Neben einfachen RGB-Farbsensoren oder Laser-Distanzsensoren auch Kamerasysteme oder Kombinationen dieser Sensoren. Der grundsätzliche Aufbau besteht aber immer aus einem Sensor zur Pflanzendetektion, einem Sensor zur Messung der

Vorfahrtgeschwindigkeit, einem Servo- oder Schrittmotor und einem Prozessor (**Abb. 3**). Dies gilt auch für Versuchsträger auf dem Feld. Der Sensor liefert Informationen über die Boden- und Pflanzenoberfläche. Im Fall eines RGB-Sensors eine Farbinformation, die sich nur auf einen Punkt bezieht. Ein Laserdistanzsensor ermittelt den Abstand zwischen Sensor und Boden/Pflanze. Diese Information bezieht sich aber auch nur auf einen einzelnen Punkt, so dass erst bei einer Vorwärtsbewegung des Schlittens ein Höhenprofil gemessen wird. Der für alle weiteren Versuche eingesetzte Sensor ist eine Farbkamera, die Bilder der Erdoberfläche an den Messrechner schickt. Die Kamera liefert deutlich mehr Informationen als die beiden anderen Sensoren, was einerseits ein größeres Potential für die Erkennung der Nutzpflanze bietet, andererseits bedeutet das aber auch deutlich längere Berechnungszeiten. Nach der Berechnung der Pflanzenpositionen benötigt der Prozessor die Ist-Drehzahl/Ist-Position des Servomotors und die Vorfahrtgeschwindigkeit/Ist-Position des Schlittens, um in einem geschlossenen Regelkreis die Soll-Drehzahl für den Motor zu berechnen. Der so in Rotation versetzte Hackstern bewegt sich dann im Idealfall so, dass die Hackwerkzeuge den Boden zwischen den Pflanzen durchdringen.

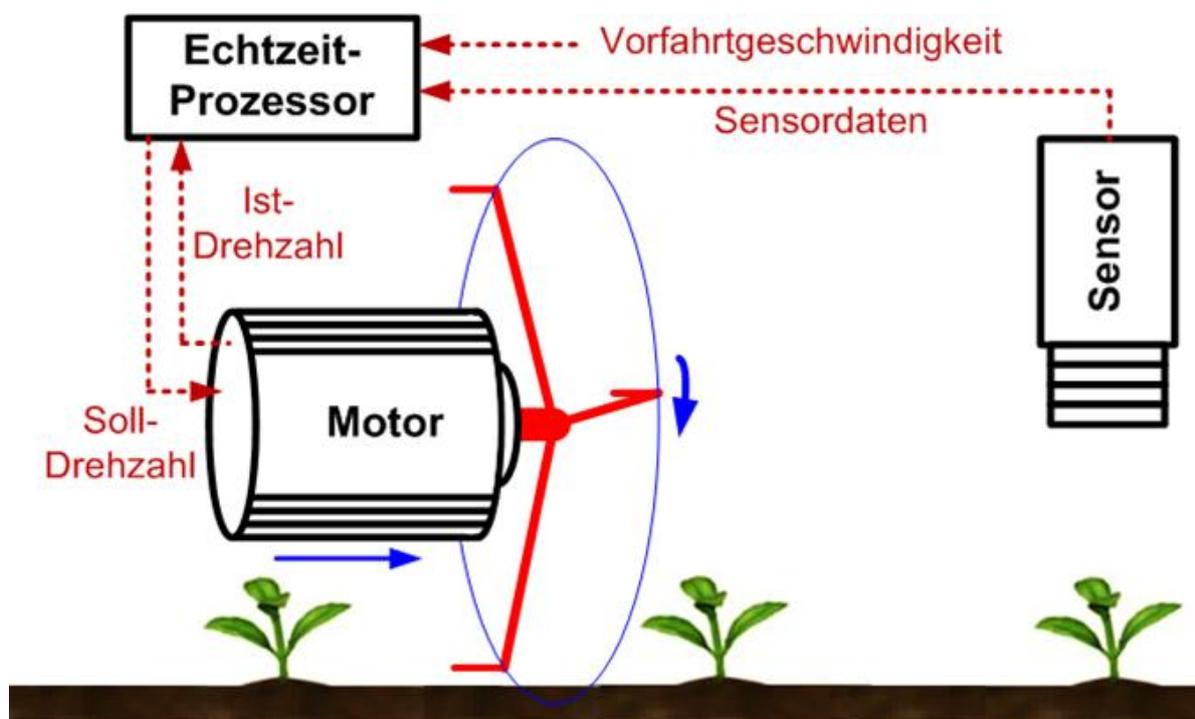


Abb. 3: Schematischer Versuchsaufbau zur Veranschaulichung des Zusammenhangs zwischen Pflanzenerkennung und mechanischem Eingriff. Als Bindeglied zwischen Sensoren und Servomotor verarbeitet ein Echtzeit-Prozessor die Eingangsdaten zu einem Ausgangssignal zur Ansteuerung des Motors

2.2 Computersimulation

Um die Versuche auf der Bodenrinne und auf dem Feld besser beschreiben zu können, wird parallel ein Computermodell (**Abb. 2**) genutzt, mit dessen Hilfe die Kinematik untersucht wird. Ein mit Hilfe der CAD-Software (engl.: computer-aided design, rechnerunterstütztes Konstruieren) Pro/ENGINEER Wildfire 5.0 erstelltes Modell des Versuchsaufbaus erlaubt eine komplette Beschreibung der Position, Geschwindigkeit und Beschleunigung einzelner Punkte des Modells. Durch die Messung des Lastmoments am realen Motor wird die Simulation auch zur Bestimmung von kinetischen Größen, wie Kräften und Momenten, eingesetzt.

2.3 Bilderfassung

Der erste Schritt zur Bestimmung der Pflanzenpositionen ist das Sammeln von Informationen über das zu bearbeitende Feldareal. Bei Benutzung einer Kamera sind das Farbinformationen, die später vom Rechner analysiert werden können. Um die Rechenintensität nicht durch schlechte Bildaufnahmen zusätzlich zu erhöhen, müssen einige Dinge bei der Aufnahme der Bilder beachtet werden. Die Kamera ist bei allen Versuchen so positioniert, dass die Aufnahmeachse orthogonal zum Boden liegt (**Abb. 4**), damit die Positionsbestimmung der Pflanze vereinfacht wird.



Abb. 4: Bilderfassung mit einer CCD-Kamera auf der Bodenrinne (links) und Aufnahmeperspektive der Kamera (rechts)

Neben der Kamera spielt auch die Beleuchtung eine wichtige Rolle für die Bildqualität. Da die Bilder aufgenommen werden, während sich die Kamera relativ zum Boden bewegt, muss die Belichtungsdauer kurz eingestellt werden, um scharfe Bilder zu erzeugen. Um trotz kurzer Belichtungszeiten helle und damit auswertbare Bilder zu bekommen, ist eine Beleuchtung notwendig. Dies gilt sowohl für Laborversuche als auch für Feldtests, da die Intensität der Sonneneinstrahlung nicht konstant ist. Für die Versuche auf der Bodenrinne und im Gewächshaus werden konstant leuchtende Halogenstrahler eingesetzt, die mit Elektrizität aus dem Stromnetz betrieben werden. Da der Feldversuchsträger die elektrische Energie selbst bereitstellen muss bzw. aus dem Bordstromnetz des Traktors bezogen wird, muss in diesem Fall eine energiesparende Lösung eingesetzt werden. Dazu gehören zum einen der Einsatz von Hochleistungs-LEDs mit einem hohen Wirkungsgrad und zum anderen das sogenannte Blitzen der LEDs mit einem Blitz-Controller. Dabei werden die LEDs nur im Moment der Bildaufnahme eingeschaltet und erzeugen somit ein markantes stroboskopartiges Aufblitzen. Außerdem werden die LEDs gezielt übersteuert. Das heißt, die LEDs werden mit mehr als der maximalen Stromstärke betrieben, um eine höhere Intensität zu erreichen. Dies ist möglich, da die LEDs im Gegensatz zum Dauerbetrieb in der Zeit zwischen den Pulsen abkühlen können.

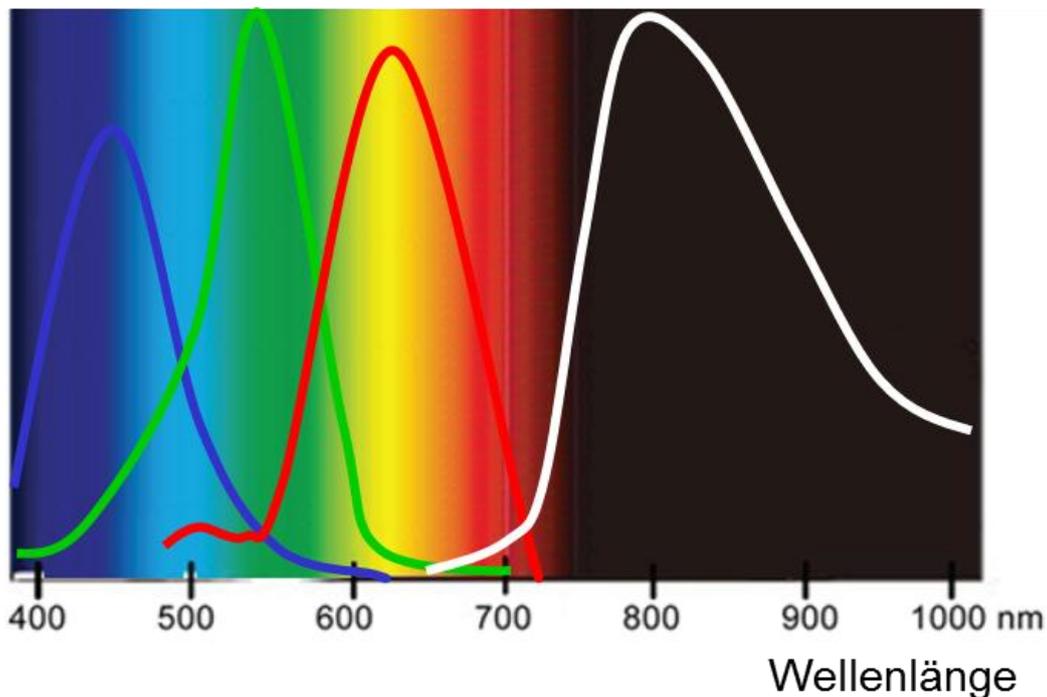


Abb. 5: Spektrale Empfindlichkeit der blauen, grünen, roten und nah-infraroten Pixel bezogen auf die Wellenlänge

Für die Versuche zur Pflanzenerkennung werden verschiedene Kameras eingesetzt, die sich in zwei Gruppen aufteilen lassen. Neben CCD-Farbkameras (engl.: charge-coupled device, ladungsgekoppeltes Bauelement), die in der Fabrikautomation weit verbreitet sind, wird auch eine Bispektralkamera (2-CCD-Kamera) (**Abb. 6**) eingesetzt, die neben einem Farbbild ein Bild im Nahinfrarotspektrum (NIRS) aufnimmt (**Abb. 5**). Auf dem Bild ist die spektrale Empfindlichkeit der Pixel auf den Kamerachips zu sehen. Links die drei Farben des BAYER-Farb-CCD-Chip und im rechten Bereich die Empfindlichkeit des Nahinfrarotchips, der seine maximale Empfindlichkeit bei 800 nm aufweist.

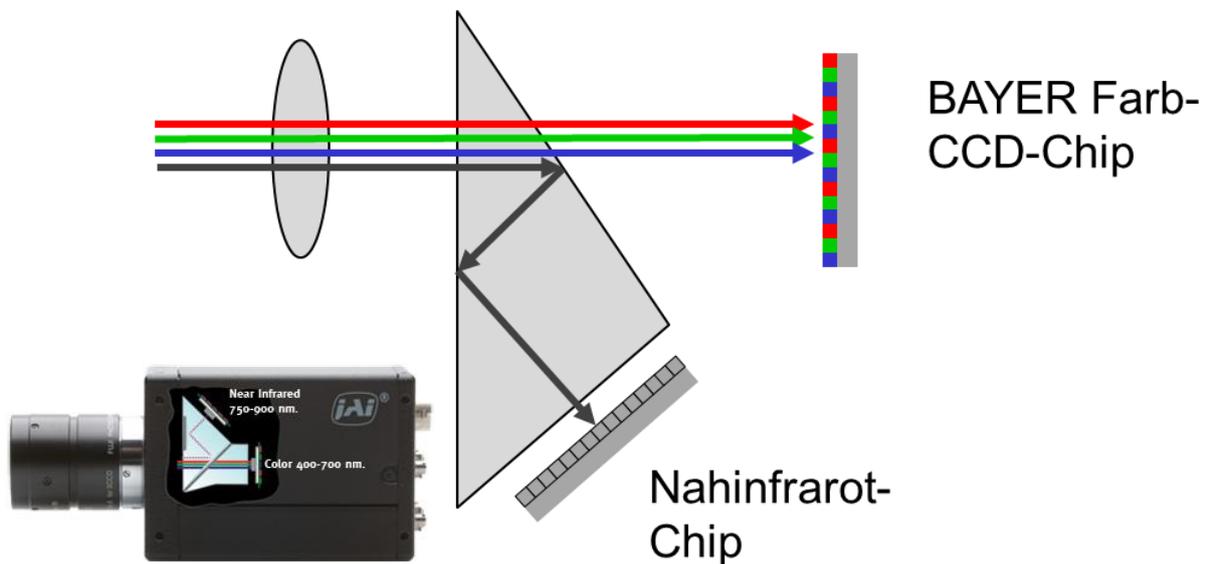


Abb. 6: Bispektral-Kamera mit Darstellung des Strahlenganges und der Aufteilung auf einen Farb- und einen NIR-Chip (JAI, 2012)

Das einfallende Licht wird innerhalb der Kamera mit einem Prisma auf zwei verschiedene Chips aufgeteilt. Einen NIR-Chip und einen Farb-Chip. So stellen das Nahinfrarot- und das Farbbild stets den gleichen Bildausschnitt dar. Dies ist mit zwei einzelnen Kameras nicht möglich, da bei nebeneinander montierten Kameras immer zwei unterschiedliche Bilder entstehen. Dieser Effekt dient den beiden menschlichen Augen zur Berechnung eines dreidimensionalen Bildes, ist aber bei dieser Anwendung störend, da exakte Bildausschnitte miteinander verglichen werden sollen.

Das Nahinfrarotbild eignet sich besonders zur Erkennung von Pflanzen, da diese eine sehr hohe Reflexion in diesem Spektralbereich aufweisen (**Abb. 7**). Im linken Teil ist das Farbbild dargestellt. Rechts daneben ist der gleiche Bildausschnitt zu sehen, hier jedoch im Nahinfrarotspektrum. Bei der Überlagerung der Bilder ist es möglich, die Informationen beider Aufnahmen zu nutzen. So leuchten Steine, Kunststoffe oder Pflanzenreste wie z.B. Stroh auf NIR-Bildern hell auf, sind aber auf den Farbbildern leicht zu erkennen. Umgekehrt sind die Konturen der Pflanzen auf den NIR-Bildern häufig besser zu erkennen. Dies hat mit der Informationsdichte der Bilder zu tun. Bei den NIR-Bildern müssen die Bildverarbeitungsalgorithmen nur die Helligkeit zwischen den einzelnen Bildpunkten unterscheiden. Im Farbbild erscheinen die Pflanzen allerdings in unterschiedlichen Grüntönen, die je nach Lichtreflexion in sehr dunkle oder sehr helle Farbtöne verwischen.

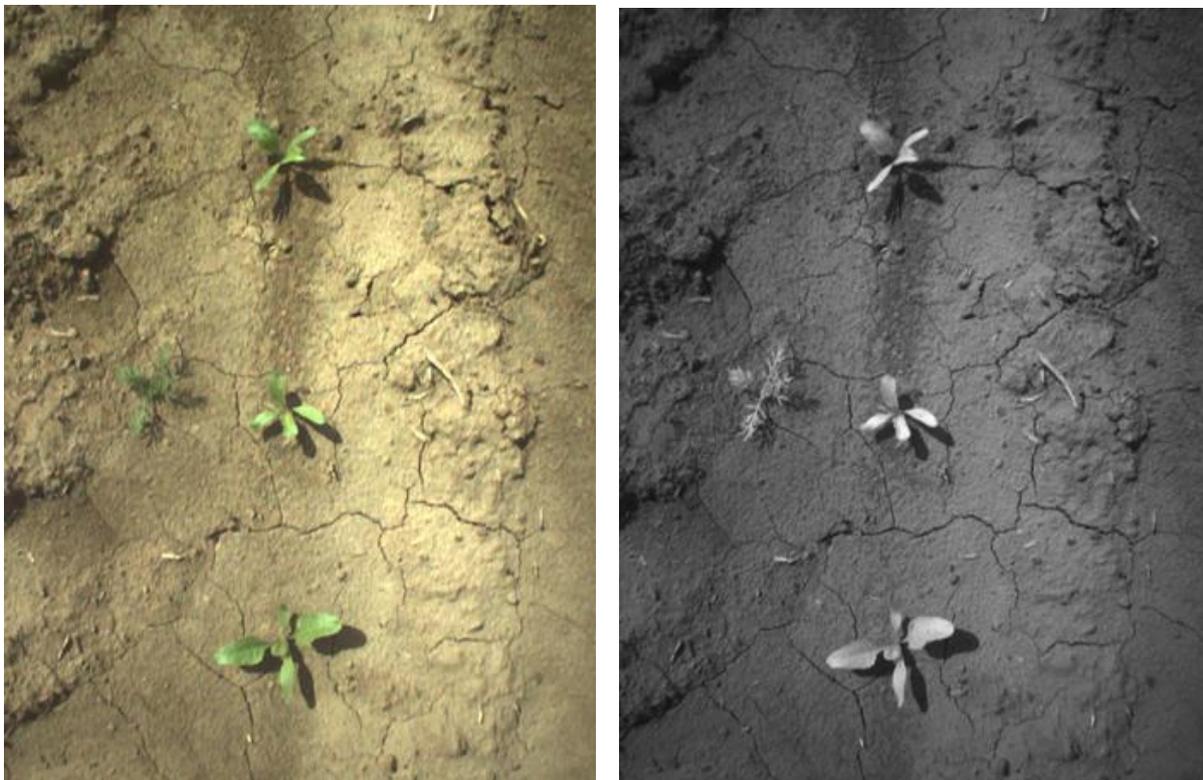


Abb. 7: Farb- und Nahinfrarotbild von Zuckerrüben im Vierblattstadium (aufgenommen mit einer Bispektralkamera)

2.4 Bildverarbeitung

Die von der Kamera aufgenommenen Bilder enthalten eine Vielzahl von Informationen, die nun zu simplen Koordinaten der Nutzpflanzen heruntergerechnet werden müssen. Was für das menschliche Gehirn eine relativ leichte Aufgabe darstellt, ist für den Computer eine große Herausforderung. Die einzelnen Rechenschritte in Form von Algorithmen müssen erst für diese spezielle Aufgabe angepasst werden. Als Programmierumgebung dient in diesem Fall das Programm LabVIEW, das im Weiteren auch für die Signalerfassung und Motorregelung eingesetzt wird. Um dem Benutzer die Eingabe von Parametern und die Überwachung der Bildverarbeitung zu ermöglichen, wird eine Benutzeroberfläche (Abb. 8) erzeugt. Dort werden das Originalbild der Kamera und das verarbeitete Bild angezeigt. Auf beiden Bildern werden zusätzlich Fadenkreuze an den errechneten Pflanzenpositionen eingefügt, die eine Kontrolle durch den Bediener erleichtern. Die eigentlichen Algorithmen werden im Hintergrund ausgeführt und müssen auf der LabVIEW Programmierenebene (Abb. 9) zusammengesetzt werden.

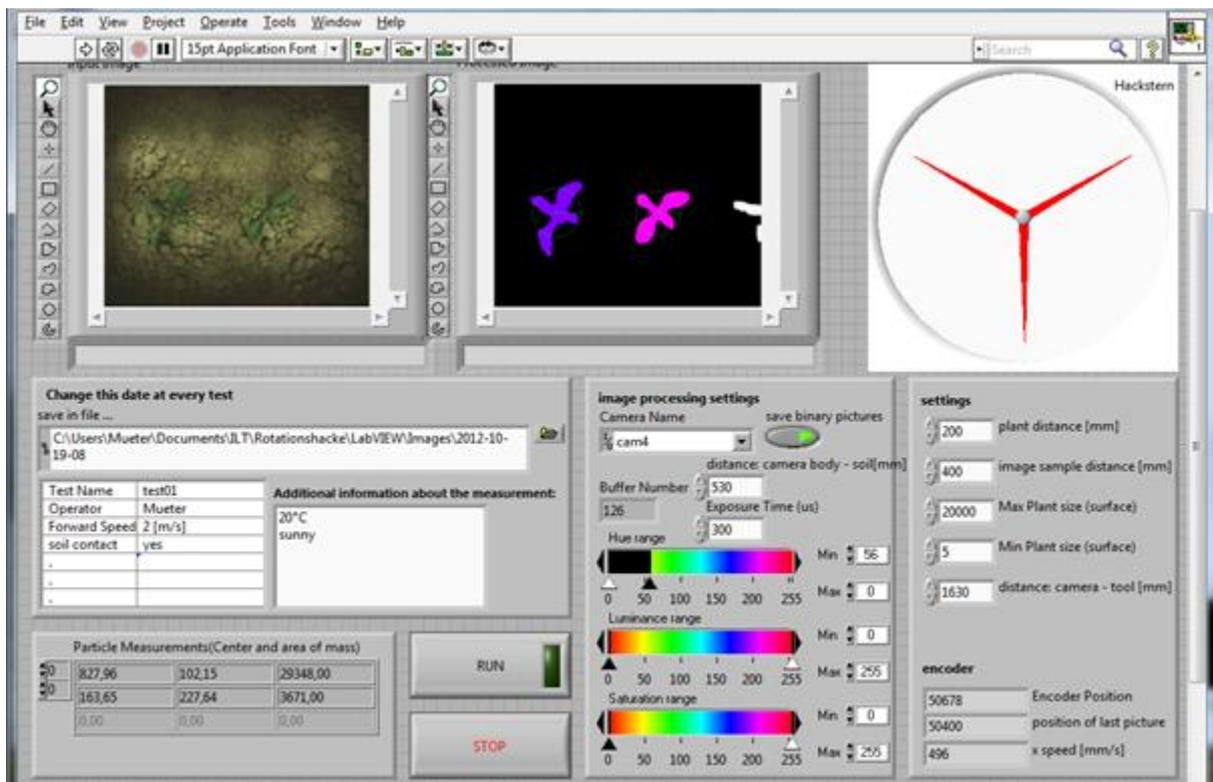


Abb. 8: Für die Rotationshacke entwickelte LabVIEW Benutzeroberfläche mit Einstellmöglichkeiten und aktuellen Werten (Bilder) aus der Bildverarbeitung und der Motorsteuerung (Werkzeugposition)

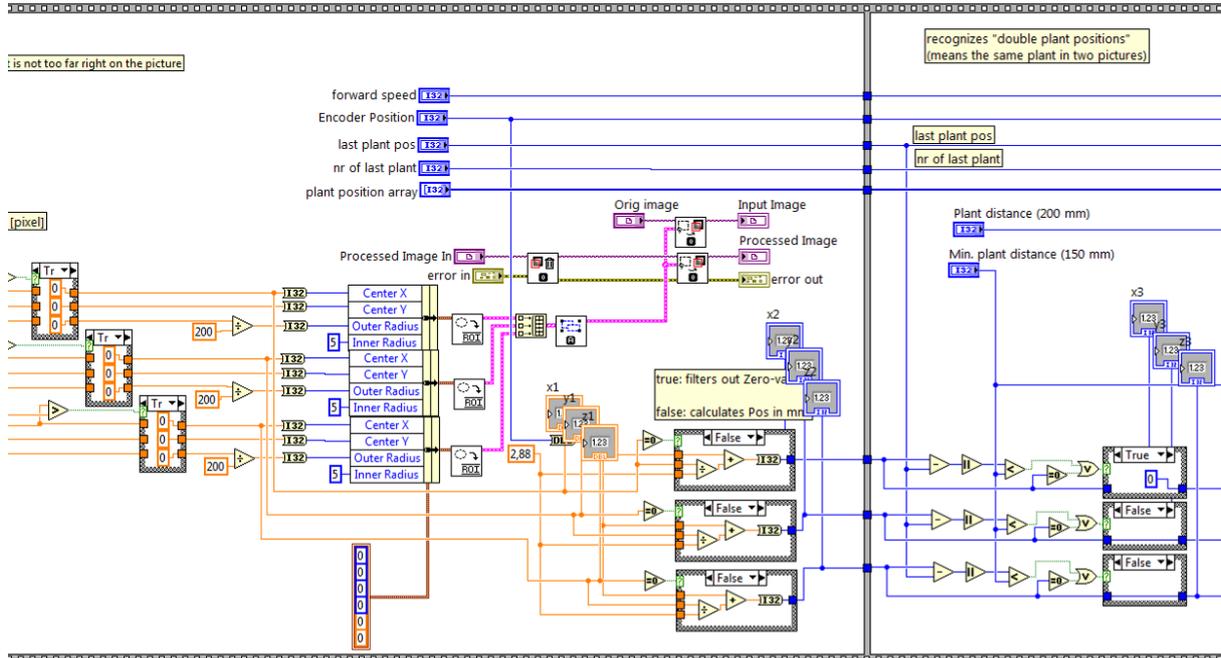


Abb. 9: Ausschnitt aus dem LabVIEW-Programm zur Steuerung der Rotationshacke

Der erste Schritt der Bildverarbeitung besteht im Komprimieren der Bilder mit einer sogenannten Wavelet-Transformation. Dadurch gehen kaum Informationen verloren, aber alle nachfolgenden Algorithmen können deutlich schneller ausgeführt werden. Im nächsten Schritt wird das Farbbild mit dem Schwellwertverfahren (Abb. 10) in ein Binärbild verwandelt. Mit Hilfe des HSL-Farbraummodelles werden den einzelnen Bildpunkten Farbton (engl.: Hue), Farbsättigung (engl.: Saturation) und relative Helligkeit (engl.: Lightness) zugewiesen. Durch das Festlegen von Schwellwerten dieser Eigenschaften kann der Computer Farben herausfiltern, in diesem Fall die Grüntöne der Nutzpflanzen.

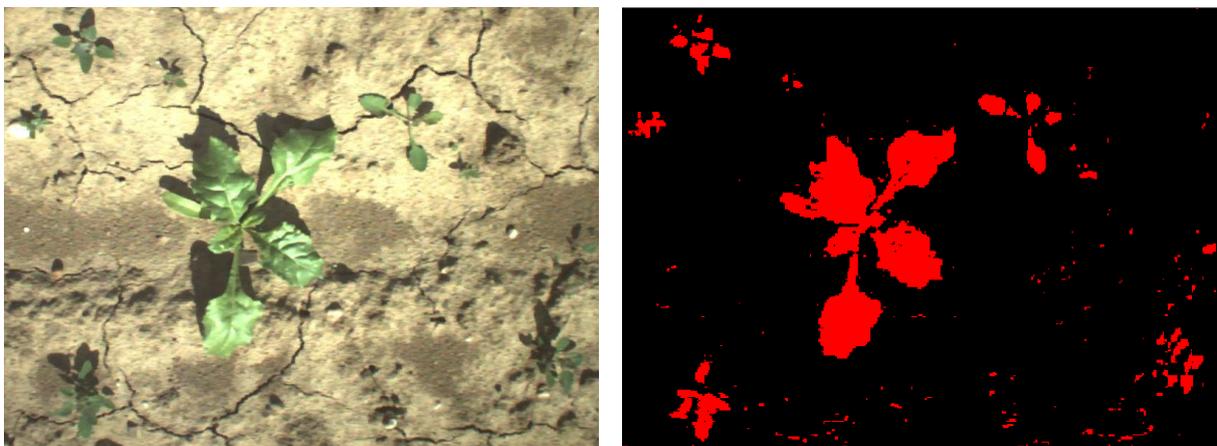


Abb. 10: Segmentierung des Farbbildes (links) durch Schwellwertverfahren

In dem errechneten Bild sind sowohl Nutzpflanzen als auch Unkräuter sowie diverse Fragmente zu erkennen, die als nächstes herausgefiltert werden. Die Schnelle Fourier-Transformation FFT (engl.: fast Fourier transform) ermöglicht eine Tiefpass-Filterung, durch die kleinere Fragmente herausgefiltert und die Konturen der verbliebenen Objekte geglättet werden (**Abb. 11**). Diese Einstellung muss dem Wachstumsstadium angepasst werden, da es ansonsten zu starken Konturenveränderungen bis hin zur Zersetzung einzelner Objekte kommen kann. Bei zu geringer Filterwirkung bleiben störende Fragmente sowie Defekte innerhalb der Objekte, die eine weitere Bearbeitung ebenfalls erschweren.

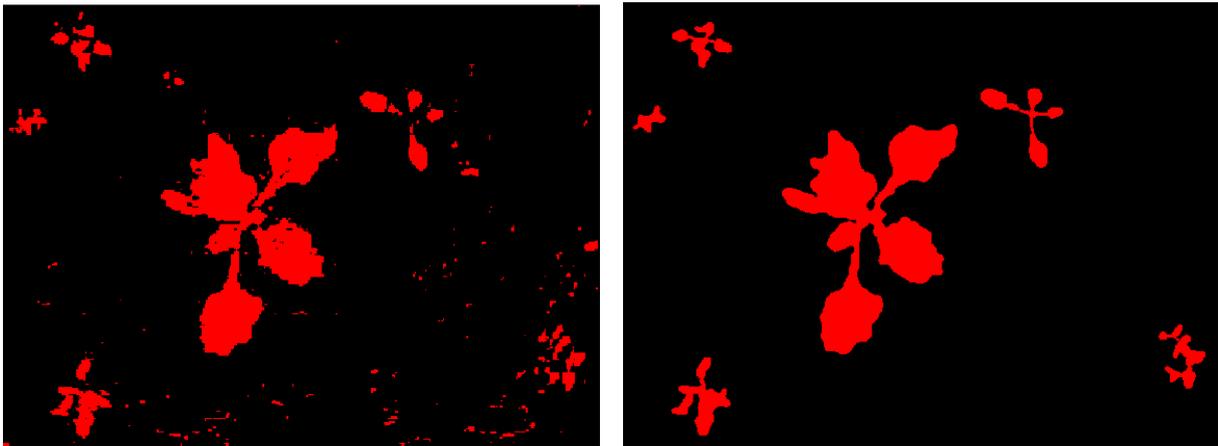


Abb. 11: Ergebnis einer Schnellen Fourier-Transformation FFT zur Filterung des Binärbildes (Entfernen kleiner Partikel und Randglättung größerer Partikelcluster)

In dem bearbeiteten Bild sind nun mehrere Objekte erkennbar, die vom Computer als Pflanze angesehen werden. Die bisherigen Schritte sind noch vergleichsweise einfach, da die Algorithmen bereits aus der industriellen Bildverarbeitung bekannt sind. Um nun die Pflanzen voneinander zu unterscheiden, würde man in der industriellen Bildverarbeitung die Objekte mit Beispielobjekten aus einer Datenbank vergleichen. Da es sich hier nicht um präzise gefertigte Bauteile wie Zahnräder handelt, deren Kontur unverändert bleibt, ist der Aufwand deutlich höher. So entscheiden Wind, Sonne, Wasser, Nährstoffgehalt des Bodens und Pflanzensorte über das Wachstum und die Ausrichtung der Blätter. Eine Möglichkeit wäre eine Datenbank mit tausenden Beispielkonturen der Nutzpflanze, so dass die Objekte auf den Bildern mit der Datenbank abgeglichen werden können. Die dazu benötigte Rechenleistung ist derzeit allerdings nicht mobil verfügbar, so dass ein anderer Weg beschritten wird. Als erstes wird die Größe der Objekte mit einem Minimal- und Maximalwert abgeglichen, so dass zu kleine oder große Pflanzen gelöscht werden (**Abb. 12**). Im zweiten Schritt wird die Objektform untersucht. Über Formfaktoren werden filigrane Objekte wie z.B. Gräser erkannt und entfernt.

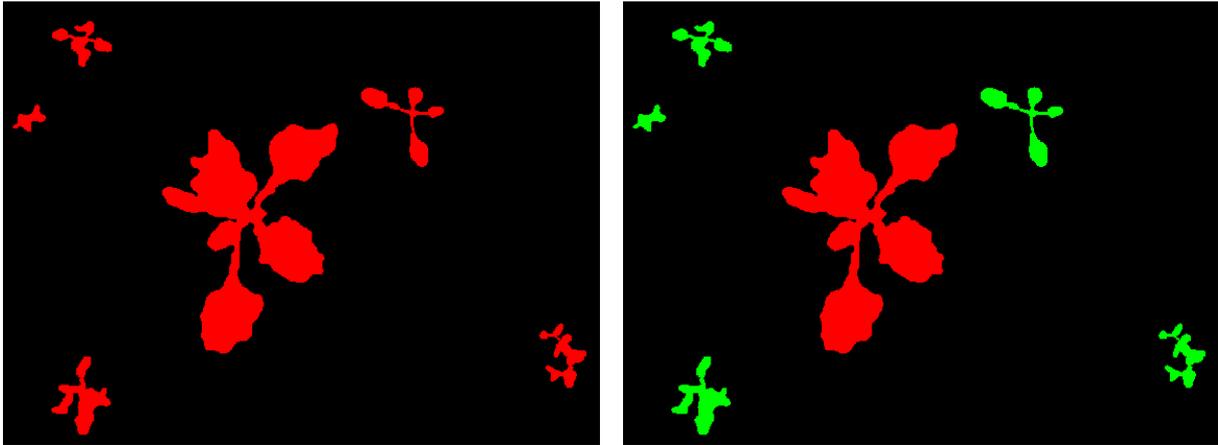


Abb. 12: Pflanzenunterscheidung und Markierung anhand von Größe und Form

Alle verbliebenen Pflanzenpositionen werden im letzten Schritt einer statistischen Untersuchung unterzogen. Dabei wird untersucht, welche der erkannten Pflanzen aus statistischen Gründen nicht als Nutzpflanze in Frage kommen. Hierbei spielen der von der Einzelkornsämaschine vorgegebene Soll-Abstand zwischen den Pflanzen sowie die seitliche Abweichung von der statistisch errechneten Pflanzenreihe eine Rolle. So ist in der oberen Pflanzenreihe (Abb. 13) ein idealer Pflanzenabstand zu sehen, in dem alle Pflanzen vom Rechner als Nutzpflanze erkannt werden (weiße kreisrunde Flächen markieren die statistisch akzeptierten Nutzpflanzen).

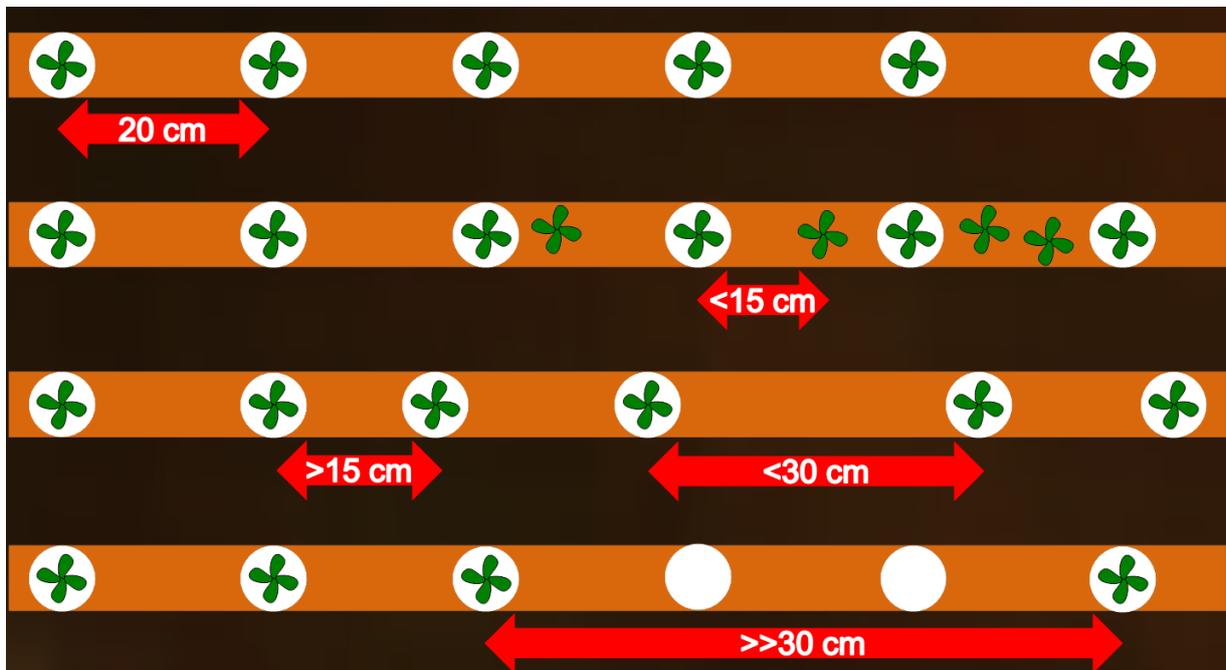


Abb. 13: mögliche Konstellationen der Pflanzenabstände innerhalb der Pflanzenreihe: Idealabstand (oben), Doppelstellen (2. Reihe von oben) und Fehlstellen (unten)

Passt eine Pflanze nicht in das statistische Schema, wird sie nicht akzeptiert, wie das Beispiel in Reihe zwei (**Abb. 13**) zeigt. Kleinere Abweichungen von der Statistik wie in Reihe drei (**Abb. 13**) werden akzeptiert. Wird keine Pflanze auf dem Bild erkannt, werden künstliche Pflanzenpositionen erzeugt, an denen sich statistisch gesehen eine Nutzpflanze befinden muss (untere Reihe **Abb. 13**). Alle Pflanzenpositionen, die jetzt noch in Frage kommen, werden markiert (**Abb. 14**) und in einer Liste abgespeichert.

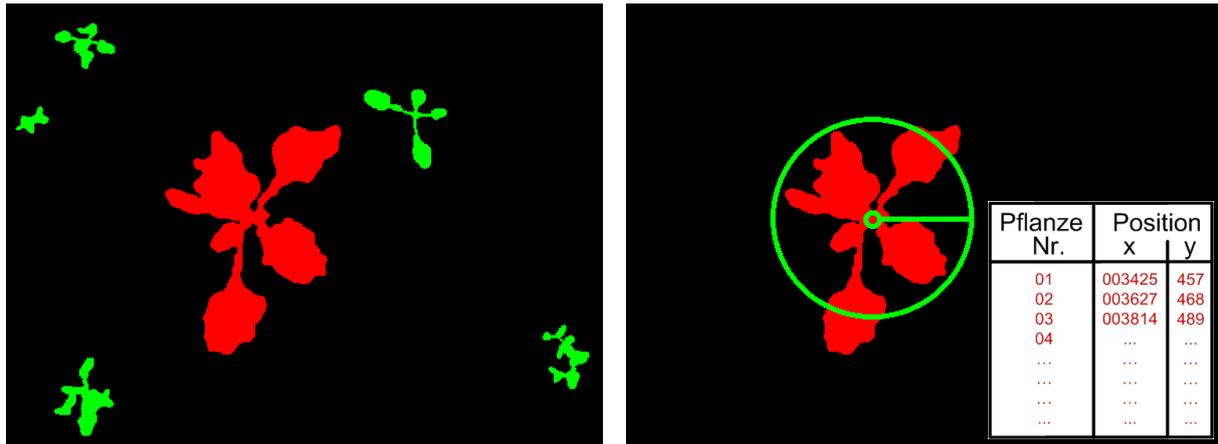


Abb. 14: Erkennung und Speicherung der Nutzpflanzenpositionen

2.5 Motorsteuerung

Bei der Ansteuerung der Servomotoren ergeben sich aus den Umgebungsbedingungen zwei Möglichkeiten: Die Regelung über einen Geschwindigkeits- oder über einen Positionsregelkreis. Um eine möglichst hohe Dynamik mit einem geringen Schleppfehler zu erreichen, werden in diesem Fall beide Regelkreise verwendet (**Abb. 15**). Die blauen Kästen markieren den eigentlichen Regelkreis, der von den äußeren Einflüssen (grün) beeinflusst wird und auf den mechanischen Hackmechanismus (rot) einwirkt. So wirken sich Änderungen der Führungsgrößen Traktorposition und Pflanzenabstand direkt auf den Regelkreis aus und bewirken eine Regelabweichung, die von der Motorsteuerung ausgeglichen werden muss.

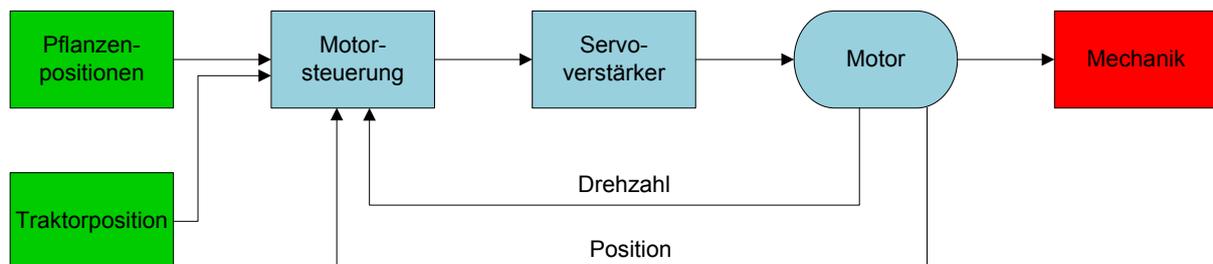


Abb. 15: vereinfachte Darstellung des Motorregelkreises

Die neue Motorposition wird an den Servoverstärker und von da direkt an den Motor weitergegeben. Die aktuelle Geschwindigkeit und Position wird wiederum zurück an die Motorsteuerung gemeldet und die neue Regelabweichung berechnet. Die Algorithmen der Motorsteuerung sind wie die Bildverarbeitung LabVIEW-basiert und werden in Echtzeit auf einem CompactRIO-Prozessor von National Instruments ausgeführt.

2.6 Anbauversuchsträger

Nach den ersten Tests auf der Bodenrinne (rote Linie **Abb. 16**) werden die weiteren Tests an einem traktorgebundenen Versuchsträger (blaue Linie **Abb. 16**) durchgeführt. Die Detektion der Pflanzen erfolgt mit einer Kamera. Eine große Änderung gegenüber dem stationären Aufbau auf der Bodenrinne ist die konsequente Nutzung Ethernet-basierter Kommunikationsstandards aus der Industrie (**Abb. 17**). So kommunizieren der Benutzer-PC, die Kamera und der cRIO-Echtzeitprozessor über ein Gigabit-Ethernet-Protokoll. Dies erlaubt eine hohe Datenrate bei gleichzeitiger Echtzeitfähigkeit, die z.B. eine handelsübliche USB-Verbindung nicht ermöglicht. Die Servomotoren werden auch über ein Ethernet basiertes Protokoll angesteuert.

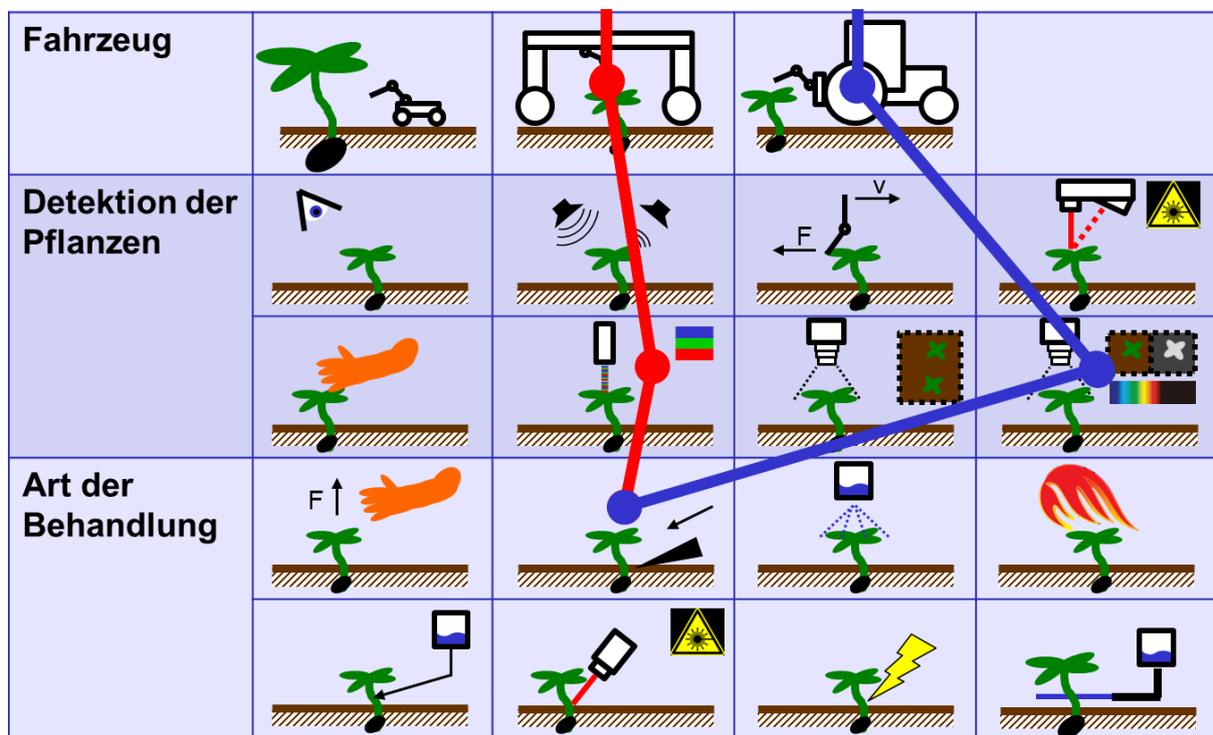


Abb. 16: Morphologischer Kasten, in dem verschiedene Kombinationen aus Trägerfahrzeug, Pflanzendetektion und Art der Behandlung dargestellt werden.

Der aus der Automationsindustrie stammende EtherCAT-Standard wird zur Kommunikation zwischen dem Echtzeitprozessor und den Servoumrichtern eingesetzt. Um die Sensorik, die Rechner und die Motoren auch im Feld betreiben zu können, sind bis zu 8 kW elektrischer Leistung notwendig, die bis auf wenige Ausnahmen (John Deere 6210RE) von keinem modernen Standardtraktor zur Verfügung gestellt werden können. Um den Versuchsträger an dem vorhandenen Versuchstraktor zu betreiben wird deshalb ein Notstromaggregat im Frontanbau eingesetzt. Neben einem 400 V-Anschluss für die Motoren verfügt das Gerät über eine unterbrechungsfreie Stromversorgung (USV), die die Messtechnik bei einem Ausfall des Generators für eine begrenzte Zeit mit Spannung versorgen kann. So wird sichergestellt, dass alle Daten gespeichert und die empfindlichen Rechner ordnungsgemäß heruntergefahren werden können.

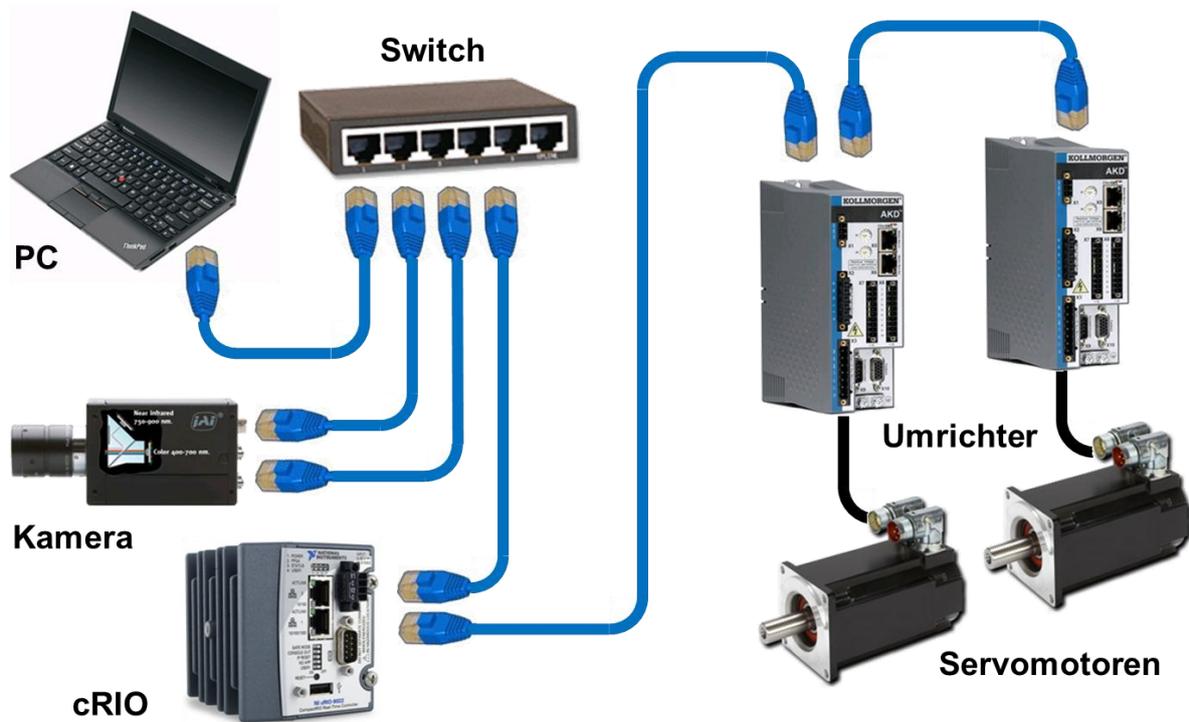


Abb. 17: Ethernet-basierte Bus-Kommunikation zwischen den Hauptbaugruppen

Der Versuchsträger selbst besteht aus einem Standardrahmen für Bodenbearbeitungs- und Sätechnik (**Abb. 18**). Daran sind ein Kasten für die Kamera, ein Schaltschrank mit der gesamten Meß- und Regeltechnik und zwei Hackaggregate befestigt. Die Kamera befindet sich mit der Beleuchtung in einem Gehäuse, um die Sonneneinstrahlung abzuschirmen und damit störende Effekte wie Überbelichtung und Schattenwurf auf den Bildern zu vermeiden. Die beiden Hackaggregate (**Abb. 19**) sind über ein Parallelogramm mit dem Rahmen verbunden und werden über einstellbare Tasträder in der Höhe geführt.



Abb. 18: An einem Traktor angebauter Versuchsträger mit 2 Motoren, einer Box für Kameras und Beleuchtung (grün) und einem Schaltschrank zur geschützten Unterbringung der Mess- und Echtzeit-Rechner sowie der Servoumrichter und der restlichen elektronischen Komponenten



Abb. 19: Rotations- (links) und Schwinghacke (rechts), die über Tasträder in der Höhe geführt werden

Neben der Rotationshacke wird noch eine andere Kinematik eingesetzt, die im rechten Teil von **Abb. 19** zu sehen ist. Der Servomotor treibt über ein Koppelgetriebe einen Hackarm an, dessen Gegenstück sich über ein Rädergetriebe genau entgegengesetzt bewegt. Die Hackarme bewegen sich zwischen zwei Nutzpflanzen aufeinander zu und schwenken auseinander, wenn eine Nutzpflanze passiert wird. Im Gegensatz zur Rotationshacke sind die beiden Werkzeuge dauerhaft im Eingriff mit dem Boden.

2.7 Außenversuche

Neben den Versuchen direkt auf dem Feld werden in Pflanztöpfen angezogene Zuckerrüben eingesetzt. Die kontrollierten Wachstumsbedingungen durch konstante Wasser- und Nährstoffversorgung erzeugen einen gleichmäßigen Aufwuchs, so dass sich das Blattwerk der Zuckerrüben nicht stark voneinander unterscheidet. Die Pflanzen werden in verschiedenen Wachstumsstadien stationär mit einer Farbkamera abgelichtet (**Abb. 20**) und stellen so die ersten Schritte der Bildverarbeitung dar.



Abb. 20: Pflanztopfversuche unter einem Wetterschutzdach (links), Versuchsaufbau mit Pflanze, Beleuchtung, CCD-Kamera und Notebook zur Bildakquisition

Der nächste Schritt waren Versuche auf dem Feld. Hierzu werden drei Reihen im Abstand von 500 mm gesät. Diese Parzellen sind jeweils von einer Fahrspur umrahmt, so dass Traktoren und ein für Bildaufnahmen eingesetztes Auto über die Parzellen fahren können (**Abb. 21**). Der Einsatz eines Autos hat dabei den Vorteil, die 20 km entfernten Versuchsflächen sehr schnell erreichen zu können. Allerdings können in diesem Fall auch nur Bilder aufgenommen werden, so dass diese Versuche vor allem zur Erstellung einer Bilddatenbank der Pflanzen in ihren verschiedenen Wachstumsstadien eingesetzt wurden. Im Gegensatz zu den Pflanztopfversuchen wurden auf den auf dem Feld aufgenommenen Bildern auch die Auswirkungen von Wind und Wetter auf das Aussehen des Blattwerks deutlich.



Abb. 21: Versuchsfläche mit dreireihigen Parzellen (links), fahrzeuggebundener Versuchsaufbau zur Bildaufnahme während der Fahrt

Die im Heck angebaute Kamera speichert während der Fahrt Nahinfrarot- und Farbbilder der jeweiligen Parzellen. In diesem Fall wird auf eine Beleuchtung verzichtet, so dass die Belichtungszeit der vorherrschenden Sonneneinstrahlung angepasst werden muss. Parallel zu den reinen Bildaufnahmen werden auf denselben Flächen die Versuche mit dem angebauten Versuchsträger, also die eigentlichen Hackversuche, durchgeführt (**Abb. 22**). Neben der Untersuchung der Motordynamik wird die Präzision der Pflanzenerkennung und der damit einhergehenden Genauigkeit der Hackwerkzeuge getestet (**Abb. 23**).



Abb. 22: Erste Hackversuche im Zweiblattstadium



Abb. 23: Kontrolle der Positionsgenauigkeit der Hackwerkzeuge

Nach jedem Versuch zeigen die Sichtkontrollen auf dem Feld oder die Analyse der Bild- und Positionsdaten ein Verbesserungspotential der Algorithmen. Um die geänderte Software über einen längeren Zeitraum in den verschiedensten Wachstumsstadien zu überprüfen, werden deshalb alle 3 Wochen neue Versuchspflanzen gesät. In **Abb. 24** ist ein Ausschnitt aus der Versuchsübersicht, in der neben den Daten zum Wachstumsstadium auch Einstellparameter der Kamera, Wetterbedingungen und Ergebnisse zu den Hackversuchen eingetragen werden.

	folder (date)	location	sector	species	generation	Temp.	cloudy	partly cloudy	bunny	time	camera distance to soil [mm]	Exposure time [µsec]	aperture	2 leaf	4 leaf	number of plants	correct detected plants	not detected plants	false detected plants	correct detected plants [%]	not detected plants [%]	false detected plants [%]
75	2012-09-19-04	CKA		sb	07	16°C	<input checked="" type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	16:00	530	300	wide open	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	45	41	4	7	91,11	8,89	15,56
76	2012-09-19-05	CKA		sb	07	16°C	<input checked="" type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	16:00	530	300	wide open	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	607	436	171	72	71,83	28,17	11,86
77	2012-09-23-01	CKA		sb	07	16°C	<input checked="" type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	16:00	530	300	wide open	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	114	114	0	14	100,00	0,00	12,28
78	2012-09-23-02	CKA		sb	07	16°C	<input checked="" type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	16:00	530	300	wide open	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	25	25	0	5	100,00	0,00	20,00
79	2012-09-23-03	CKA		sb	07	16°C	<input checked="" type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	16:00	530	300	wide open	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	48	48	0	13	100,00	0,00	27,08
80	2012-09-23-04	CKA		sb	07	16°C	<input checked="" type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	16:00	530	300	wide open	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	103	103	0	15	100,00	0,00	14,56
81	2012-09-23-05	CKA		sb	07	16°C	<input checked="" type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	16:00	530	300	wide open	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	63	63	0	7	100,00	0,00	11,11
82	2012-09-23-06	CKA		sb	07	16°C	<input checked="" type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	16:00	530	300	wide open	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	0			#DIV/0!	#DIV/0!	#DIV/0!	
83	2012-09-23-07	CKA		sb	07	16°C	<input checked="" type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	16:00	530	300	wide open	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	0			#DIV/0!	#DIV/0!	#DIV/0!	
84	2012-10-01-01	CKA		sb	07	18°C	<input checked="" type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	17:00	530	300	wide open	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	91	91	0	44	100,00	0,00	48,35
85	2012-10-01-02	CKA		sb	07	18°C	<input checked="" type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	17:00	530	300	wide open	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	36	36	0	27	100,00	0,00	75,00
86	2012-10-01-03	CKA		sb	07	18°C	<input checked="" type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	17:00	530	300	wide open	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	66	66	0	12	100,00	0,00	18,18
87	2012-10-01-04	CKA		sb	07	18°C	<input checked="" type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	17:00	530	300	wide open	<input type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>	27	27	0	10	100,00	0,00	37,04
88	2012-10-01-05	CKA		sb	07	18°C	<input checked="" type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	17:00	530	300	wide open	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	71	71	0	10	100,00	0,00	14,08
89	2012-10-01-06	CKA		sb	07	18°C	<input checked="" type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	17:00	530	300	wide open	<input type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>	79	79	0	13	100,00	0,00	16,46
90	2012-10-01-07	CKA		sb	07	18°C	<input checked="" type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	17:00	530	300	wide open	<input type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>	0			#DIV/0!	#DIV/0!	#DIV/0!	
91	2012-10-01-08	CKA		sb	07	18°C	<input checked="" type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	17:00	530	300	wide open	<input type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>	0			#DIV/0!	#DIV/0!	#DIV/0!	
92	2012-10-01-09	CKA		sb	07	18°C	<input checked="" type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	17:00	530	300	wide open	<input type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>	0			#DIV/0!	#DIV/0!	#DIV/0!	
93	2012-10-19-01	CKA		sb	08	20°C	<input checked="" type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	12:00	530	300	wide open	<input checked="" type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	0			#DIV/0!	#DIV/0!	#DIV/0!	
94	2012-10-19-02	CKA		sb	07	20°C	<input checked="" type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	12:00	530	300	wide open	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	0			#DIV/0!	#DIV/0!	#DIV/0!	
95	2012-10-19-03	CKA		sb	08	20°C	<input checked="" type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	12:00	530	300	wide open	<input checked="" type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	0			#DIV/0!	#DIV/0!	#DIV/0!	
96	2012-10-19-04	CKA		sb	08	20°C	<input checked="" type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	12:00	530	300	wide open	<input checked="" type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	0			#DIV/0!	#DIV/0!	#DIV/0!	
97	2012-10-19-05	CKA		sb	08	20°C	<input checked="" type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	12:00	530	300	wide open	<input checked="" type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	290	161	129	80	55,52	44,48	27,59
98	2012-10-19-06	CKA		sb	08	20°C	<input checked="" type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	12:00	530	300	wide open	<input checked="" type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	18	16	2	2	88,89	11,11	11,11
99	2012-10-19-07	CKA		sb	08	20°C	<input checked="" type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	12:00	530	300	wide open	<input checked="" type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	152	124	28	24	81,58	18,42	15,79
100	2012-10-19-08	CKA		silphie	02	20°C	<input checked="" type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	12:00	530	300	wide open	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	0			#DIV/0!	#DIV/0!	#DIV/0!	
101							<input checked="" type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>					<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	0			#DIV/0!	#DIV/0!	#DIV/0!	

Abb. 24: Ausschnitt aus der Versuchsübersicht

3 Ergebnisse

3.1 Kinematik der Rotationshacke

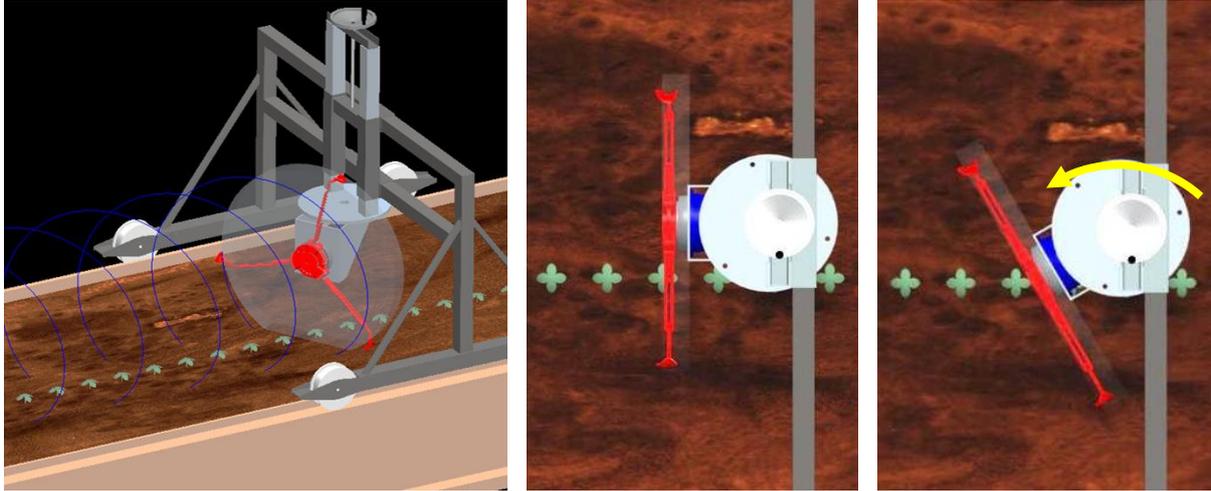


Abb. 25: ProE-Modell mit Bahnkurve (links) und veränderter Motorposition (rechts)

Bei Versuchen auf der Bodenrinne ist sofort zu erkennen, dass die Werkzeuge den Boden nicht orthogonal zur Fahrtrichtung bearbeiten. Die mit einer ProE-Simulation (Abb. 25 links) aufgezeichneten Bahnkurven der Werkzeuge eines in Fahrtrichtung angeordneten Motors (Abb. 25 Mitte) sind zur Veranschaulichung als zweidimensionale Projektion in Abb. 26 dargestellt.

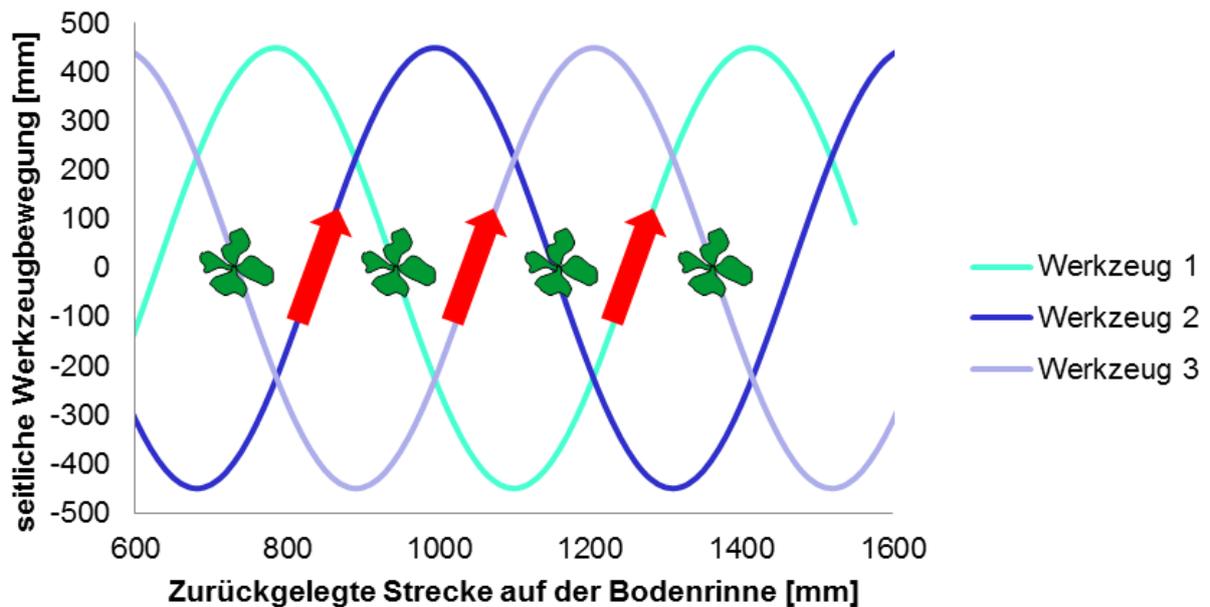


Abb. 26: Bahnkurvenprojektion der Hackwerkzeuge bei 3 Hackarmen

Diese Ansicht ist eine Draufsicht, wobei die x-Achse die Fahrtrichtung des Schlittens bezeichnet. Die roten Pfeile markieren den Bereich, in dem die Werkzeuge den Boden zwischen den grün dargestellten Kulturpflanzen bearbeiten. Hier wird deutlich, dass der Winkel zwischen Pfeilrichtung und Fahrtrichtung nicht rechtwinklig ist. Um dies zu korrigieren, muss der Antriebsmotor um die Horizontalachse gedreht werden (**Abb. 25** rechts). Dies wurde sowohl im ProE-Modell, als auch auf der Bodenrinne durchgeführt. Der Drehwinkel ist abhängig von der Anzahl der Hackwerkzeuge am Rotor, der Werkzeugarmlänge, dem Pflanzenabstand und der Anzahl der Hackbewegungen zwischen zwei Pflanzen. In **Tabelle 1** ist eine Übersicht für verschiedene Kombinationen dargestellt. Hierbei wurde ein Pflanzenabstand von 200 mm angenommen. Allgemein kann jedoch gesagt werden, dass ein größerer Pflanzenabstand zu größeren Winkeln führen wird. Untersuchungen zu unterschiedlichen Armlängen wurden bereits von (GOBOR, 2007) durchgeführt, so dass auf weitere Untersuchungen verzichtet werden kann. Die Ergebnisse in **Tabelle 1** beziehen sich daher alle auf eine Armlänge von 450mm.

Tabelle 1: Übersicht verschiedener Hack-Kinematiken bei 200 mm Pflanzenabstand und die dazu berechneten Winkel zwischen Motorachse und Fahrtrichtung, die zu einer optimalen Werkzeugbewegung im Boden führen.

Anzahl montierter Werkzeuge	Hackbewegungen pro Pflanzenabstand	Winkel zwischen Motorachse und Fahrtrichtung
3 Werkzeuge	1	13,63°
	2	6,82°
	3	4,54°
6 Werkzeuge	1	27,27°
	2	13,63°
	3	9,09°
9 Werkzeuge	1	40,10°
	2	20,45°
	3	13,63°

3.2 Vergleich von RGB-Sensor und Kamera

Da die vorangegangenen Versuche von Gobor (GOBOR, 2007) mit einem RGB-Sensor durchgeführt wurden und der neue Versuchsträger mit einer Kamera arbeitet, soll zunächst bewiesen werden, dass die Kamera gleichwertige oder bessere Ergebnisse liefert. Hierbei wird erst mal außer Acht gelassen, welche weiteren Möglichkeiten eine Kamera bietet. Für den Vergleich werden künstliche Pflanzen in einem Abstand von 200 mm in einer Reihe auf der Bodenrinne platziert. Die Pflanzen befinden sich dabei genau auf einer Geraden parallel zur Bewegungsrichtung des Schlittens, so dass die darauf montierten Sensoren genau über die Pflanzen fahren. Dabei erreicht die Kamera eine deutlich höhere Präzision, wie in **Abb. 27** zu sehen ist. Auf der horizontalen Achse sind die Pflanzenpositionen und auf der vertikalen Achse die Abweichungen in Fahrtrichtung aufgetragen. Im Durchschnitt weicht die ermittelte Position der Kamera 8 mm von der korrekten Position ab. Der RGB-Sensor weicht durchschnittlich 16 mm ab.

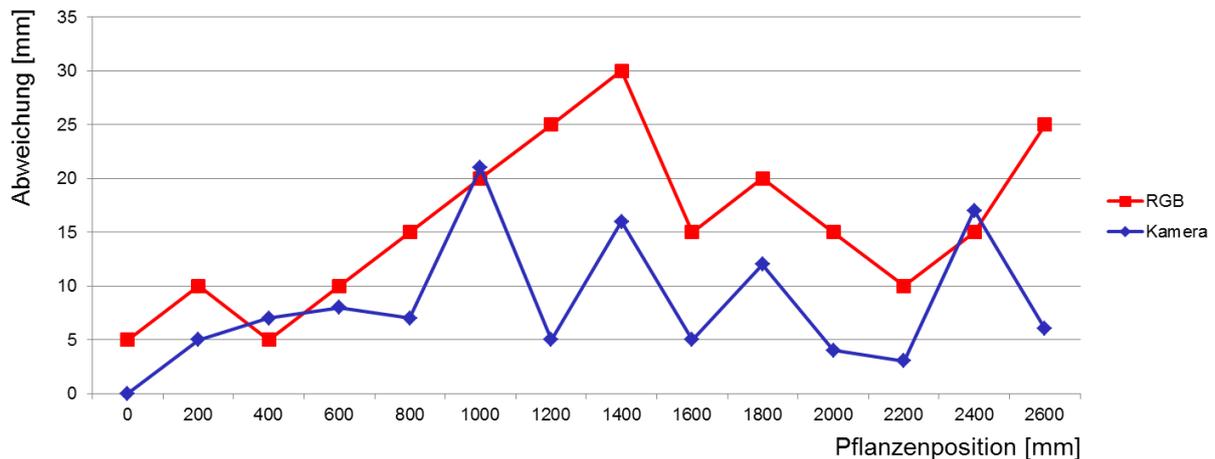


Abb. 27: Genauigkeit der Positionsbestimmung von RGB-Sensor und CCD-Kamera

Die größeren Abweichungen ergeben sich durch die punktförmige Abtastung des RGB-Sensors. In **Abb. 28** ist die Abtastspur eines RGB-Sensors als blaue Linie dargestellt, der sich von links nach rechts bewegt. Bereiche, in denen die Reflexionen durch die Blätter dem Sensor eine Pflanze signalisieren, sind rot dargestellt. Im linken Bildausschnitt ist eine korrekte Erkennung dargestellt. Der Sensor erhält von 2 Blättern ein Reflexionssignal und detektiert die Mitte der Pflanze in der Mitte der roten Linie (als hellgrüner Kreis dargestellt), welche auch dem Zentrum der Pflanze, dem Stiel, entspricht. Im rechten Bildbereich ist die gleiche Pflanze mit einer leichten Rotation dargestellt. Der Bereich der Reflexion verkürzt sich und verschiebt sich nach rechts, da überwiegend ein einziges Blatt für die Reflexion verantwortlich ist. Dadurch verschiebt sich auch der detektierte Pflanzenmittelpunkt nach rechts und entfernt sich somit von der realen Pflanzenmitte.

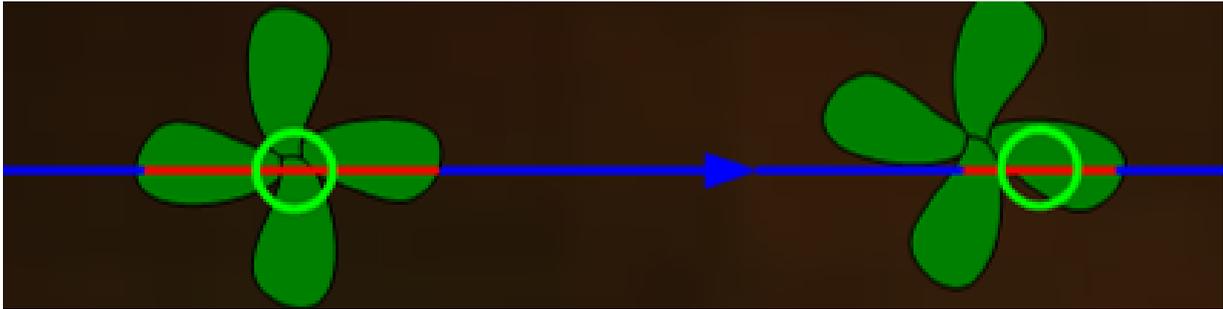


Abb. 28: RGB-Pflanzenerkennung mit Punktsensor

Auf dem Feld kommt noch eine weitere Komponente hinzu, die die Genauigkeit gegenüber einem Kamerasystem negativ beeinflusst. Auf der Bodenrinne können die Pflanzen exakt auf einer Linie angeordnet werden, die parallel zur Bewegungsrichtung des Sensors liegt. Auf dem Feld allerdings sind durch unterschiedliche Wachstumsbedingungen Abweichungen von der Ideallinie vorhanden (**Abb. 29**), wodurch die Ungenauigkeit der Positionsbestimmung steigt. Ferner ist es auf der Bodenrinne möglich, die Sensorik durch den Schlitten auf einer exakten Linie über die Pflanzen zu führen. Allerdings erzeugt der Versuchsträger auf dem Feld aufgrund von Lenkbewegungen des Traktors eine Schlingerbewegung, die im Extremfall dazu führt, dass der Sensor ganze Pflanzen übersieht (**Abb. 30**). Ein weiteres Problem stellt die Unterscheidung zwischen Nutzpflanzen und Unkräutern dar. Da der RGB-Sensor viele Unkräuter aufgrund des gleichen Farbtons nicht von der Nutzpflanze unterscheiden kann, sind verunkrautete Flächen ein Hindernis für eine zuverlässige Nutzpflanzenerkennung. Deshalb werden bei allen weiteren Versuchen auf der Bodenrinne und auf dem Feld ausschließlich Kameras eingesetzt.

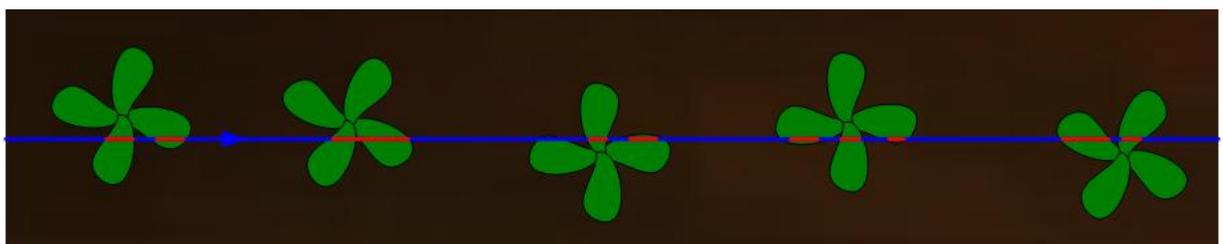


Abb. 29: RGB-Abtastung der Pflanzenreihe entlang einer genauen Linie

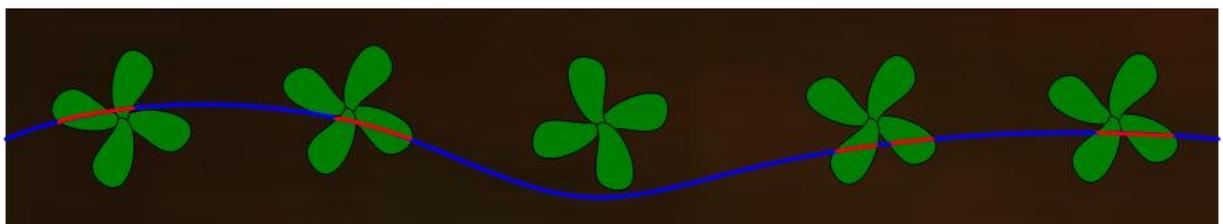


Abb. 30: RGB-Abtastung der Pflanzenreihe unter Einfluss von Lenkbewegungen

3.3 Motorsteuerung

Die Servomotoren der Hacke können auf zwei Arten angesteuert werden: Positionsgesteuert und Geschwindigkeitsgesteuert. Dies hat nichts mit der Regelung der Motoren zu tun, die schon im Material- und Methoden-Teil erläutert wurde. Die Regelung benötigt in beiden Fällen ein Positions- sowie ein Geschwindigkeitssignal vom Motor. Bei genau ermittelten Pflanzenpositionen soll der Motor die Werkzeuge genau zwischen den Pflanzen durch den Boden bewegen. Um dies zu erreichen, werden mit LabVIEW Sollwerte für die zukünftigen Positionen der Motorachse errechnet. Eine große Abweichung (Schleppfehler) zwischen dem Soll- und dem Istwert der Motorachsenposition bedeutet daher, dass die Werkzeuge den Boden an einer nicht gewollten Position bearbeiten.

Bei ersten Tests wurde eine LabVIEW-basierte Geschwindigkeitssteuerung eingesetzt, mit der es auf der Bodenrinne keine Probleme gab. Die maximale Testgeschwindigkeit auf dem Feld ist jedoch mit 2 m/s deutlich höher und führte teilweise zu großen Schleppfehlern, wodurch keine genaue Bearbeitung mehr möglich war. In **Abb. 31** ist links zu erkennen, dass das Werkzeug die Nutzpflanze getroffen hat und damit mindestens 100 mm von der Sollposition abgewichen ist. Nach diversen Tests erreicht die letzte Generation des positionsgesteuerten Algorithmus deutlich bessere Ergebnisse, wie in **Abb. 31** rechts zu sehen ist.



Abb. 31: Hackresultate bei geschwindigkeits- (links) und positionsgesteuerten Algorithmen (bei 2 m/s Vorfahrtgeschwindigkeit)

3.4 Zuckerrüben im Zweiblattstadium

Da der erste Hacktermin bereits im Zweiblattstadium erfolgen kann (HEYLAND, 1999), wurden die Versuche bei diesem Stadium beginnend bis hin zum Reihenschluss durchgeführt. Im Zweiblattstadium ist eine korrekte Erkennung noch sehr schwierig. Da sich die Unkräuter durch die zuvor durchgeführte Bodenbearbeitung bei der Aussaat teilweise im selben Wachstumsstadium befinden, sind Unkräuter aufgrund der Form kaum von den Zuckerrüben zu unterscheiden. Deshalb spielt vor allem die Größe der Blattoberfläche bei der Bildererkennung eine Rolle. So sind Pflanzen mit einer deutlich größeren Blattoberfläche, wie das in **Abb. 32** weiß markierte Blattwerk, relativ einfach als Unkraut zu kategorisieren.

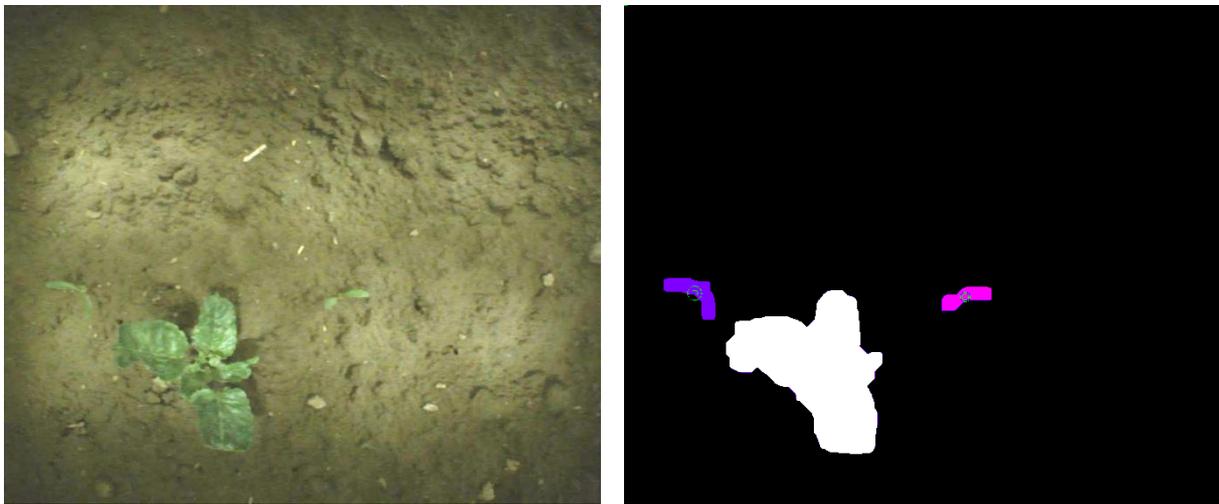


Abb. 32: Unkrautererkennung (weißer Bereich) im Zweiblattstadium der Zuckerrüben (farbig)

Bei relativ kleinen Unkräutern wird dies deutlich schwieriger. So kommt es in den Versuchen häufiger vor, dass bei zu knapp gewählten Minimal- oder Maximalwerten, Zuckerrüben nicht erkannt (**Abb. 33**) oder als Unkraut detektiert werden. Bei den letzten Hackversuchen wurden durchschnittlich 81,58 % der Zuckerrüben erkannt und 15,79 % Unkräuter als Nutzpflanze klassifiziert. Der Anteil der Unkräuter bezieht sich hier nicht auf die Anzahl der Gesamtunkräuter, sondern auf die reale Zahl der Zuckerrüben. Dies führt nicht zwangsläufig dazu, dass die Hacke Kulturpflanzen beschädigt, da die nach der Bildverarbeitung folgenden Statistikalgorithmen die Fehler in den meisten Fällen kompensieren. Im Fall der in **Abb. 33** nicht detektierten Zuckerrübe erkennt das Programm, dass an dieser Stelle rein statistisch eine Pflanze stehen müsste und berechnet eine Pflanzenposition genau in der Mitte der im Bild detektierten und markierten (Pink/Lila) Pflanzen.

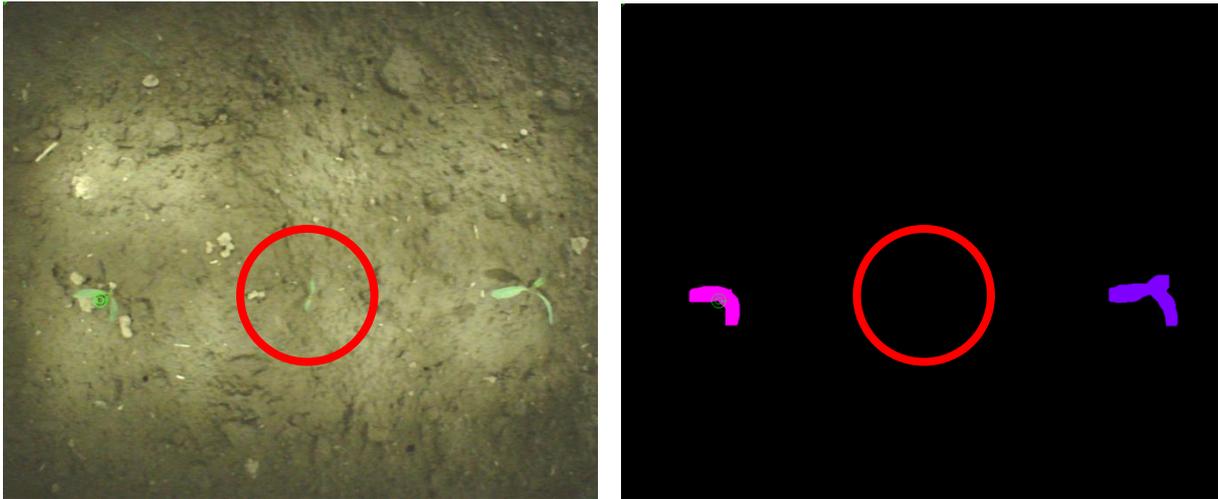


Abb. 33: Nicht erkannte Zuckerrübe (rot markiert) im Zweiblattstadium

3.5 Zuckerrüben im Vierblattstadium

Die Zuckerrüben im Vierblattstadium (**Abb. 34**) sind deutlich besser als im Zweiblattstadium zu erkennen. So konnten bei den Hackversuchen 91,11 % der Zuckerrüben als Nutzpflanze erkannt werden. Der Anteil der als Nutzpflanze klassifizierte Unkräuter liegt mit 15,56 % auf dem Niveau des Zweiblattstadiums. Dies ist überraschend, da die Zuckerrübe aus Sicht des menschlichen Betrachters deutlich einfacher von den Unkräutern zu unterscheiden ist, als im Zweiblattstadium. Um eine Verbesserung dieses Wertes zu erreichen, sind bei weiteren Versuchen schärfere Merkmalsabgrenzungen in den Algorithmen anzustreben. Für diese Unkräuter gilt wiederum, dass die nachfolgenden Statistikalgorithmen die Mehrzahl der fehlerhaften Positionen aus der Positionstabelle eliminieren.

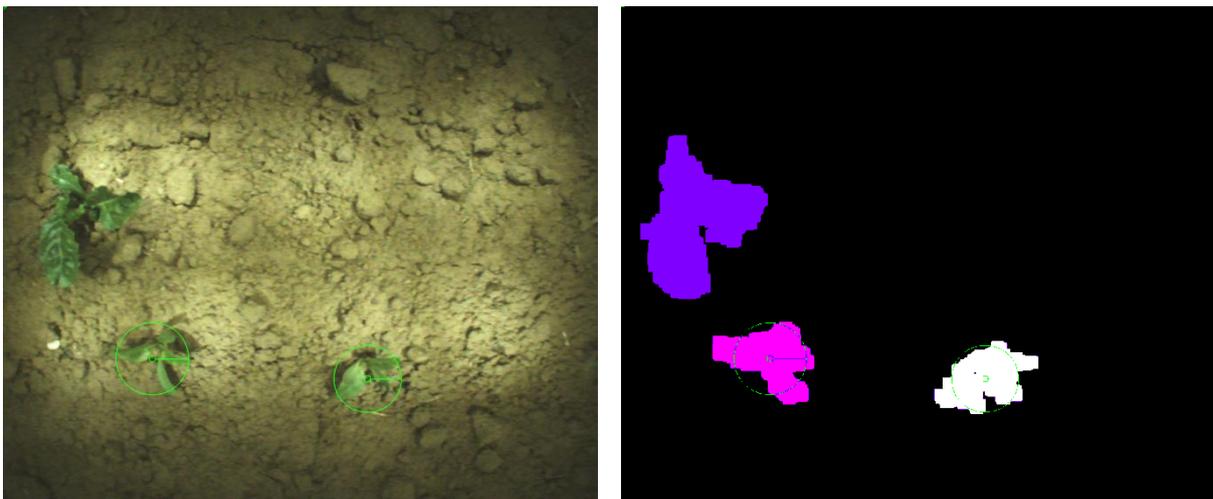


Abb. 34: Unkrautererkennung (lila Bereich) im Vierblattstadium der Zuckerrüben

Um eine präzise Unkrautregulierung zu ermöglichen, ist eine genaue Bestimmung des Pflanzenmittelpunkts notwendig. Dies ist im Zweiblattstadium mit nur geringen Abweichungen möglich. Mit zunehmender Blattgröße wird die Berechnung schwieriger, da die Blätter durch Wind und unterschiedliche Lichtverhältnisse nicht mehr symmetrisch wachsen. Um die Bilderkennung bei dem Einsatz unterschiedlicher Kamerasysteme zu bewerten, wurden die Pflanzenpositionen gemessen und mit den Werten der Bildverarbeitung verglichen. In **Abb. 35: Differenz zwischen realer und berechneter Pflanzenposition im Vierblattstadium** sind auf der linken Seite die Ergebnisse für einen Algorithmus dargestellt, der reine Farbbilder als Grundlage nutzt. Der Boxplot zeigt, dass die maximale Abweichung 34,4 mm beträgt. 50 % der Abweichungen befinden sich im Bereich zwischen 1,7 mm und 7,6 mm. Der Median beträgt 4 mm.

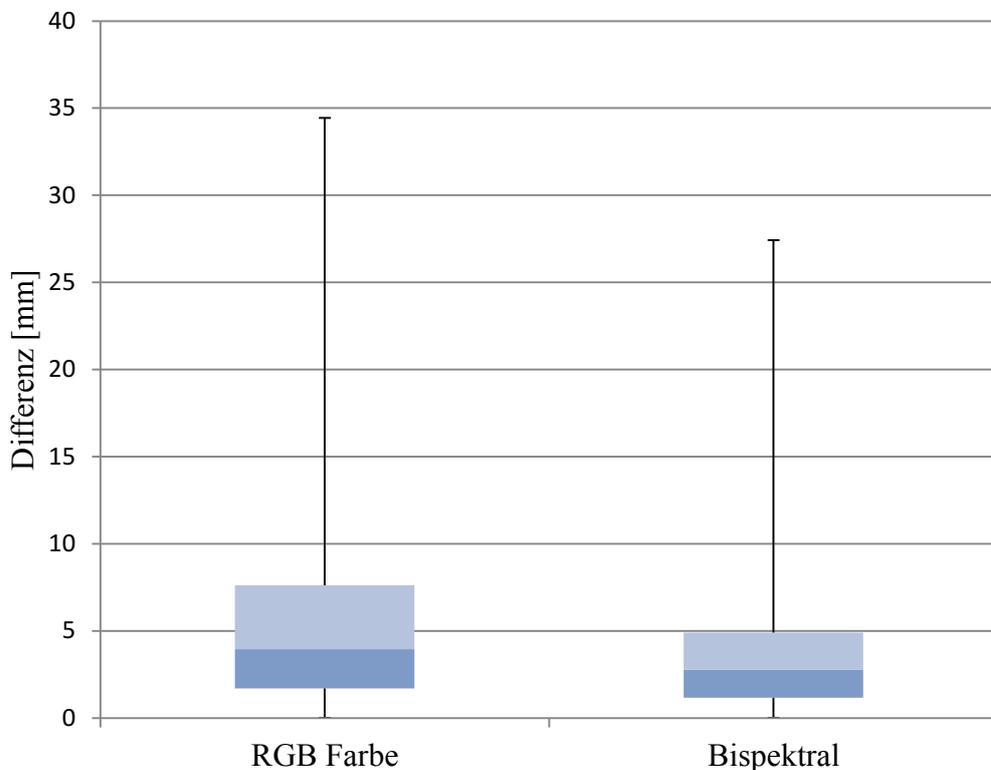


Abb. 35: Differenz zwischen realer und berechneter Pflanzenposition im Vierblattstadium

Auf der rechten Seite von **Abb. 35** sind die Ergebnisse bei der gleichzeitigen Verwendung von Farb- und Infrarotbildern zu sehen. Die maximale Abweichung beträgt 27,4 mm. 50 % der Abweichungen befinden sich im Bereich zwischen 1,2 mm und 4,9 mm. Der Median beträgt 2,8 mm. Insgesamt werden durch die Nutzung der Bispektraldaten bessere Ergebnisse,

also eine geringere Abweichung, erzielt.

3.6 Zuckerrüben im Sechsstadium

Beim Vergleich mit den anderen Wachstumsstadien schneiden die Zuckerrüben im Sechsstadium (**Abb. 36**) eindeutig am besten ab. So wurden 100 % der Zuckerrüben als Nutzpflanze erkannt. Der Wert der als Nutzpflanze klassifizierte Unkräuter liegt mit 14,08 % etwas unter den Werten in den vorherigen Wachstumsstadien. Um eine Verbesserung zu erreichen, gilt das gleiche wie unter Punkt 3.5.



Abb. 36: Zuckerrüben im Sechsstadium

In **Abb. 35** sind auf der linken Seite die Ergebnisse für den Algorithmus dargestellt, der reine Farbbilder als Grundlage nutzt. Die maximale Abweichung beträgt 22,5 mm. 50 % der Abweichungen liegen zwischen 2,9 mm und 8,1 mm. Der Median beträgt 5,4 mm. Auf der rechten Seite von **Abb. 35** sind die Ergebnisse der Bispektralbilder dargestellt. Die maximale Abweichung beträgt 24,5 mm. 50 % der Abweichungen befinden sich im Bereich zwischen 2,8 mm und 7,8 mm. Der Median beträgt 5,1 mm. Insgesamt werden wie beim Vierblattstadium durch die Nutzung der Bispektraldaten bessere Ergebnisse, also eine geringere Abweichung, erzielt. Die Ergebnisse im Sechsstadium sind insgesamt etwas schlechter, da die größeren übereinanderliegenden Blätter eine Mittelpunktbestimmung erschweren.

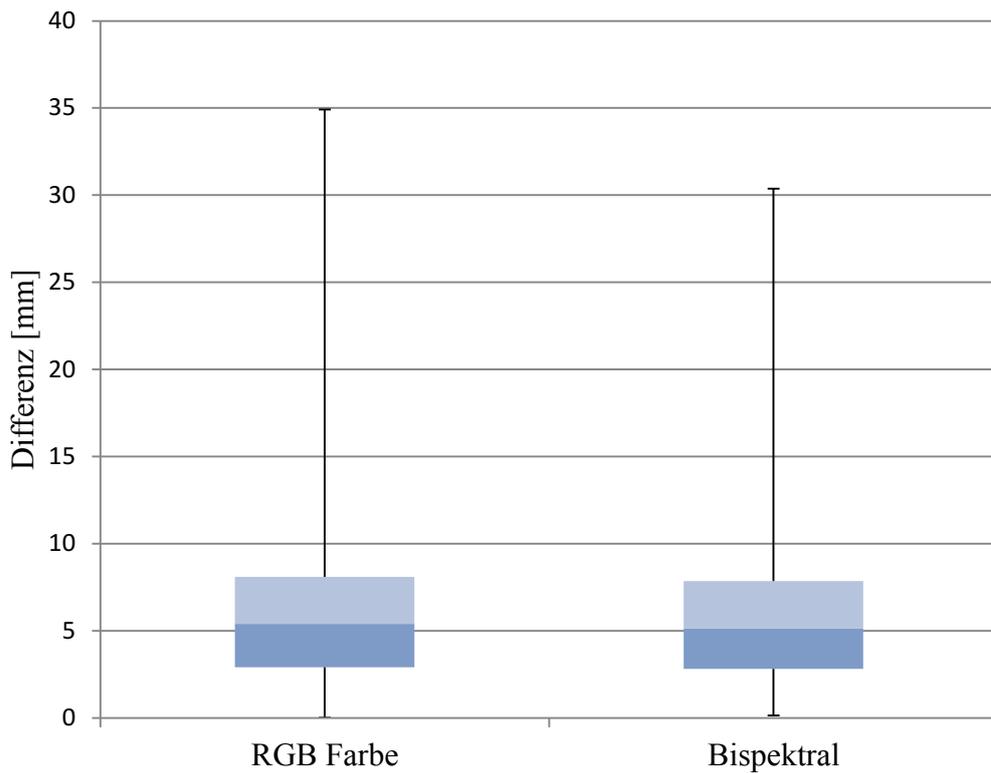


Abb. 37: Differenz zwischen realer und berechneter Pflanzenposition im Sechsstattblattstadium

Bei den Hackversuchen wurde jeweils vor und nach dem Hackvorgang eine Bonitierung vorgenommen. Die Unkräuter wurden dabei in Dikotyle (Zweikeimblättrige Pflanzen) und Monokotyle (Einkeimblättrige Pflanzen) unterteilt. Eine Betrachtung der einzelnen Spezies ist nicht erforderlich, da die Bilderkennung nicht die einzelnen Unkräuter unterscheiden kann, wohl aber eine Differenzierung zwischen Ein- und Zweikeimblättrigen Pflanzen vornimmt. Bei der Annahme, dass zuvor 100 % der Unkräuter im Hackbereich stehen, so teilen sich diese Unkräuter in 6,2 % Monokotyle und 93,8 % Dikotyle auf. Die Hackwerkzeuge konnten 91,8 % der Unkräuter entfernen. Die verbliebenen 8,2 % teilen sich auf in 1,8 % Monokotyle und 6,4 % Dikotyle. Diese Unkräuter fanden sich vor allem im Sicherheitsbereich der Zuckerrüben, der bei den Versuchen im Sechsstattblattstadium einen Radius von 35 mm hatte. Neben den Unkräutern werden auch Zuckerrüben von den Hackwerkzeugen verletzt oder weggehackt. Bei den Versuchen im Sechsstattblattstadium wurden 2,3 % der Rüben von den Werkzeugen entfernt.

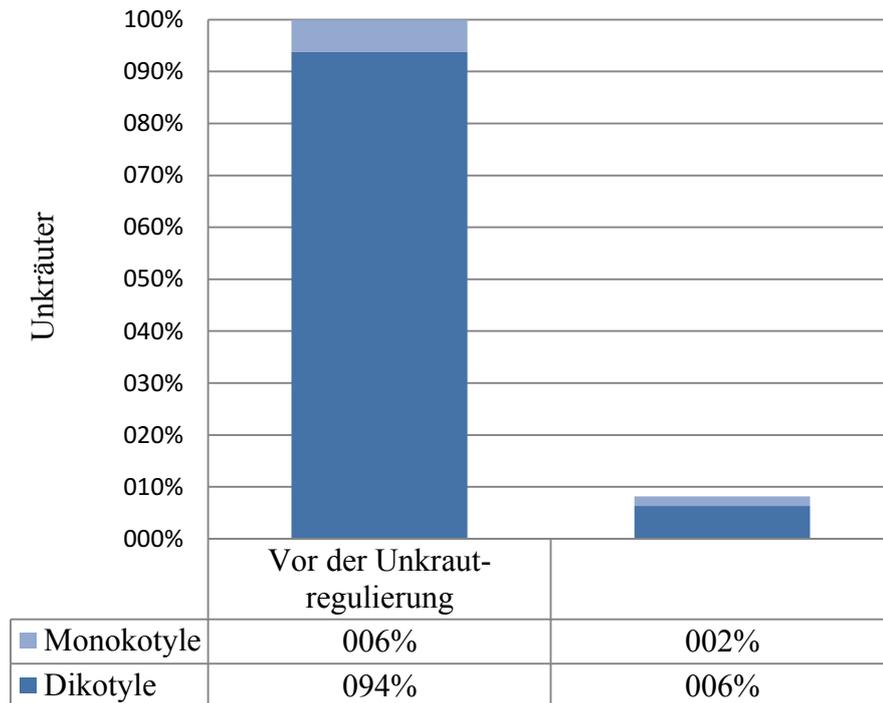


Abb. 38: Monokotyle und Dikotyle Unkräuter vor und nach der mechanischen Unkrautregulierung

3.7 Zuckerrüben kurz vor Reihenschluss

Um zu untersuchen, bis zu welcher Wachstumsphase eine Erkennung und auch das Hacken möglich sind, wurden die Pflanzen bis zur Phase des Reihenschlusses fotografiert. Kurz vor Reihenschluss treten dabei zwei Probleme auf. So ist es aufgrund der sehr dicht beieinanderliegenden Blätter kaum möglich, den intra-row-Bereich zu hacken, ohne mit den Armen des Hackrotors die Blätter zu beschädigen. Dies ließe sich nur durch einen anderen Hackmechanismus oder eine deutliche niedrigere Fahrgeschwindigkeit erreichen. Das zweite Problem ist die Erkennung der Pflanzen. So funktioniert die Erkennung teilweise sehr gut (**Abb. 39**), aber in gleichem Maße hat die Software Probleme mit Überlappungen (**Abb. 40**). Da die Blätter aus Sicht des Computers die gleiche Farbe haben und sich überlappen, formt die Software aus zwei Pflanzen eine einzelne. Mit den derzeitigen Algorithmen ist eine Positionsbestimmung und damit eine Steuerung der Hacke beim Übergang zum Reihenschluss zu unzuverlässig.



Abb. 39: korrekt erkannte Zuckerrüben kurz vor Reihenschluss



**Abb. 40: Fehler bei der Erkennung der Zuckerrüben bei beginnendem Reihenschluss.
Zwei Zuckerrüben werden nicht als Einzelobjekte erkannt**

3.8 Durchwachsene Silphie

Neben Zuckerrüben wurden Versuche mit der Durchwachsenen Silphie durchgeführt, die derzeit als Energiepflanze untersucht wird. Da es bislang keine zugelassenen Pflanzenschutzmittel gibt und die Jungpflanzen relativ konkurrenzschwach sind, müssen die Unkräuter mit einer Maschinenhacke sowie von Hand gehackt werden. Erste Tests mit der Bilderkennungssoftware zeigen, dass eine Erkennung und Positionsbestimmung der Nutzpflanzen möglich ist.



Abb. 41: Erkennung von Durchwachsene Silphie im Dreiblattstadium

In **Abb. 41** ist die Erkennung im Dreiblattstadium und in **Abb. 42** im Sechsbblattstadium dargestellt. Hackversuche wurden allerdings noch nicht durchgeführt, da die Versuchspartellen noch für Bonituren genutzt werden. Weitere Bilderkennungsversuche und erste Hacktests sind deshalb im Frühjahr 2014 geplant.



Abb. 42: Erkennung von Durchwachsene Silphie im Sechsbblattstadium

4 Diskussion

Die ersten Versuche mit einer Rotationshacke im Maschinenlabor (GOBOR, 2007) haben gezeigt, dass der prinzipielle mechanische Aufbau für eine Hacke im Intra-row-Bereich geeignet ist. Die fortgeführten Versuche auf der Bodenrinne und die CAD-Simulationen führten zu dem Ergebnis, dass die Drehung der Servomotoren um die Horizontalachse zu einer verbesserten Kinematik der Hackwerkzeuge führt. Die darauf folgenden Tests mit dem Anbauversuchsträger haben gezeigt, dass die Rotationshacke aus dem Versuchslabor auch auf dem Feld einsetzbar ist.

Die zwei wesentlichen Punkte zur Erreichung dieses Ziels waren die Echtzeitsteuerung, die in den ersten Versuchen auf der Bodenrinne (GOBOR, 2007) noch nicht möglich waren, sowie der Einsatz einer Kamera und der dazugehörigen Bildverarbeitungssoftware. Die dazu entwickelten Algorithmen auf Basis von LabVIEW sind auf jedem PC lauffähig. Um ein echtzeitfähiges System aufzubauen, musste allerdings ein Rechner eingesetzt werden, auf dem ein solches System auch in Echtzeit arbeitet. Der bei den Versuchen eingesetzte CompactRIO-Controller bietet genau dies auf zwei Ebenen. Unterprogramme, die eine besonders hohe Verarbeitungsgeschwindigkeit benötigen und parallele Prozesse aufweisen, werden auf einem deterministischen FPGA (engl.: Field Programmable Gate Array, im Anwendungsfeld programmierbarer integrierter Schaltkreis) ausgeführt. Alle weiteren Echtzeit-Programme laufen auf dem integrierten Echtzeitprozessor. Damit auch die Kommunikation zwischen den elektronischen Komponenten die Echtzeitdaten in Echtzeit weiterleitet, basieren alle Bus-Verbindungen auf dem Ethernet-Standard. Das GigE-Ethernet stellt dabei die Verbindung zwischen Kamera, Echtzeitprozessor und Notebook her und erlaubt eine einfache Anbindung weiterer Komponenten, die diesen Standard beherrschen. Der Industriestandard EtherCAT gestattet nicht nur die echtzeitfähige Weitergabe der Befehle an den Motor, sondern bietet aufgrund der hohen Datentransferrate auch eine sehr hohe Abtastrate des Motorencoders, so dass die Winkelposition bei einer Auflösung von 2^{20} Signalen pro Umdrehung auch ausreichend schnell ausgelesen werden kann.

Auf dem Feld hat sich gezeigt, dass die derzeitigen Algorithmen eine zuverlässige Bilderkennung sowie Ansteuerung der Servomotoren bei bis zu 7,2 km/h erlauben. Die Grenzen werden hier vor allem durch die Hackwerkzeuge gesetzt, da mit erhöhter Vorfahrtgeschwindigkeit die Drehzahl proportional ansteigt und damit der Erdaufwurf ansteigt. Die Bilderkennung und -Verarbeitung funktioniert auch bei einer Vorfahrtgeschwindigkeit von 10 km/h.

Bei Untersuchungen zur Erkennung von Zuckerrüben in unterschiedlichen Wachstumsstadien zeigt sich, dass 81,58 % der Rüben im Zweiblattstadium erkannt und 15,79 % Unkräuter (bezogen auf die Anzahl der Nutzpflanzen) als Nutzpflanze klassifiziert werden. Im Vierblattstadium steigt der Anteil der erkannten Nutzpflanzen auf 91,11 % und erreicht im Sechsblattstadium mit 100 % den Höchstwert. Der Anteil der als Nutzpflanze klassifizierten Unkräuter bleibt mit 15,56 % im Vierblattstadium und 14,08 % im Sechsblattstadium ungefähr auf dem Niveau des Zweiblattstadiums. Vergleicht man die Erkennung der Pflanzen in den unterschiedlichen Wachstumsstadien, zeigt sich ein linearer Zusammenhang (Abb. 43). Die erfolgreiche Erkennung der Nutzpflanzen steigt somit linear zum Pflanzenwachstum. Der Anteil fehlinterpretierter Unkräuter ist dagegen nicht vom Wachstumsstadium der Nutzpflanze abhängig. Die Grenzen des Bilderkennungssystems liegen derzeit bei zu dicht nebeneinander stehenden Pflanzen. Dies gilt sowohl für Unkräuter, die den Nutzpflanzen ähnlich sehen, als auch für nebeneinander stehende Kulturpflanzen. Auf den Versuchsflächen trat dieses Problem nur vereinzelt auf, wodurch die Hacke den Intra-row-Bereich präzise bearbeiten konnte.

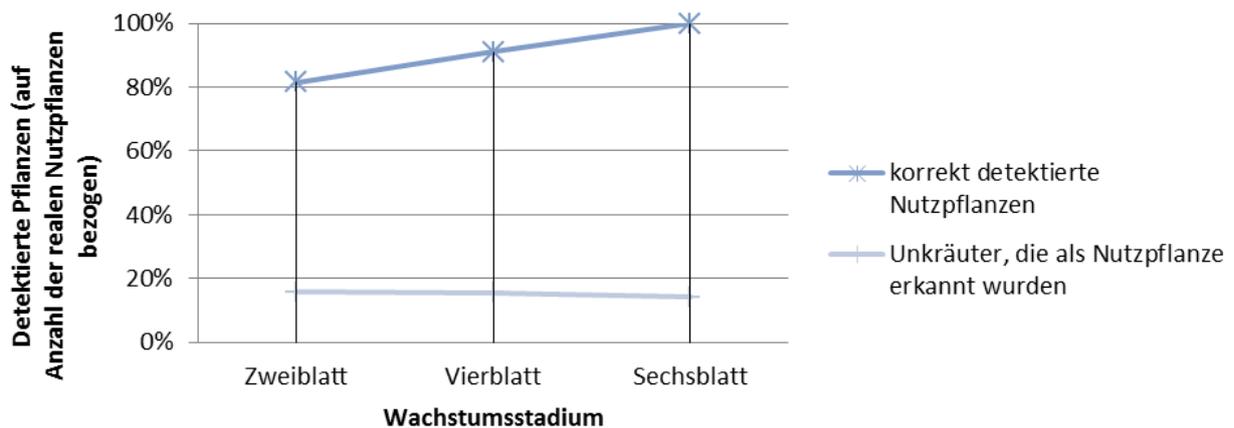


Abb. 43: Erkennungswahrscheinlichkeit von Zuckerrüben in unterschiedlichen Wachstumsstadien

Die Hackversuche haben gezeigt, dass ca. 92 % der Unkräuter entfernt werden können. Die verbleibenden 8 % befinden sich im Sicherheitsbereich der Zuckerrüben. Um die Anzahl der entfernten Unkräuter zu erhöhen, muss der Sicherheitsbereich also verkleinert werden. Wie bei der konventionellen Reihenhacke steigt damit die Gefahr, die Zuckerrüben zu verletzen. Bei einem Sicherheitsradius von 35 mm wurden 2,3 % der Zuckerrüben weggehackt. Dies passt zu den Ergebnissen der Mittelpunktberechnung der Zuckerrüben (siehe Abb. 35, Abb. 37), wo einzelne Abweichungen fast 35 mm erreichen. Dies führt dazu, dass der jeweilige Sicherheitsbereich so weit verschoben wird, dass sich die Zuckerrübenpflanze nicht mehr im

Zentrum, sondern am Rand der Sicherheitszone befindet. Somit wird ein Kontakt zu den Hackwerkzeugen wahrscheinlicher. Um die Nutzpflanzenverluste zu verringern, muss dementsprechend die Bilderkennungssoftware verbessert werden.

Die Versuche mit der Durchwachsenen Silphie beschränkten sich auf die Bilderkennung mit dem Versuchsträger. Dies hatte zum einen damit zu tun, dass die Pflanzen für Keimfähigkeitsuntersuchungen eingesetzt werden und zum anderen damit, dass die Bildverarbeitungsalgorithmen vor allem für Zuckerrüben angepasst wurden, Die Aufnahme der Bilder diente vor allem zur Entwicklung geeigneter Parameter, um bei einer erneuten Aussaat die automatisierte Hacke einsetzen zu können.

Die Versuche haben gezeigt, dass die anspruchsvolle Aufgabe des Hackens in der Reihe mit derzeit verfügbaren Komponenten und Standards aus der Automationsindustrie zu bewerkstelligen ist. Die größten Probleme bereitete dabei die Bilderkennung, da es noch keine passenden Algorithmen für die Pflanzenerkennung gab und diese erst entwickelt werden mussten. Für eine Anwendung in der Praxis müssen diese Algorithmen allerdings noch anpassungsfähiger werden, um die Hacke auch bei unbekanntem Pflanzenarten einsetzen zu können, ohne dass der Bediener über große Programmierkenntnisse verfügt. Deshalb muss das derzeit genutzte LabVIEW-Programm, welches in dieser Form zu viele Einstelloptionen für die unterschiedlichen Erkennungsparameter und Regelgrößen bietet, anwenderfreundlicher gestaltet werden. Als Einstellparameter dürfen nur die Pflanzenart und evtl. das Wachstumsstadium eingegeben werden. Auf lange Sicht sollte es sicherlich ein Ziel sein, dass es nur noch eine Blackbox gibt und die Maschine die Pflanzenart und das jeweilige Stadium automatisch erkennt, so dass der Landwirt das Gerät nur noch anbaut und direkt starten kann.

5 Zusammenfassung

Das Ziel des Forschungsprojektes war die Weiterentwicklung und Felderprobung eines vom Institut für Landtechnik bereits entwickelten und im Labor erfolgreich getesteten Systems zur mechanischen Unkrautbekämpfung. Um dieses System auf dem Feld anwenden zu können, wurde ein Versuchsträger mit zwei Hackaggregaten entwickelt, der an einen Traktor gekoppelt wird. Für die Detektion der Pflanzen wurde eine Kamera eingesetzt. Der Schwerpunkt lag dabei auf der Entwicklung eines echtzeitfähigen Algorithmus für die Pflanzenerkennung und die Ansteuerung der Motoren. Die dazu entwickelten Algorithmen auf LabVIEW-Basis werden auf einem CompactRIO-Controller ausgeführt, dessen Betriebssystem eine Echtzeitregelung erlaubt. Auf dem Feld hat sich gezeigt, dass die derzeitigen Algorithmen eine zuverlässige Bilderkennung sowie Ansteuerung der Servomotoren bei bis zu 7,2 km/h erlauben. Die Grenzen werden hier vor allem durch die Hackwerkzeuge gesetzt, da mit erhöhter Vorfahrtgeschwindigkeit die Drehzahl proportional ansteigt und damit der Erdaufwurf ansteigt.

Die Versuche zur Erkennung von Zuckerrüben in unterschiedlichen Wachstumsstadien zeigen, dass 81,58 % der Rüben im Zweiblattstadium erkannt und 15,79 % Unkräuter (bezogen auf die Anzahl der Nutzpflanzen) als Nutzpflanze klassifiziert werden. Im Vierblattstadium steigt der Anteil der erkannten Nutzpflanzen auf 91,11 % und erreicht im Sechsbblattstadium mit 100 % den Höchstwert. Der Anteil der als Nutzpflanze klassifizierten Unkräuter bleibt mit 15,56 % im Vierblattstadium und 14,08 % im Sechsbblattstadium ungefähr auf dem Niveau des Zweiblattstadiums. Die Grenzen des Bilderkennungssystems liegen derzeit bei zu dicht nebeneinander stehenden Pflanzen. Dies gilt sowohl für Unkräuter, die den Nutzpflanzen ähnlich sehen, als auch für nebeneinander stehende Kulturpflanzen.

Neben der reinen Bilderkennung wurden auch die Hackergebnisse dokumentiert. So wurden die Zuckerrüben und Unkräuter vor und nach dem Hacken bonitiert. Bei den Hackversuchen im Sechsbblattstadium wurden durchschnittlich 92 % der Unkräuter entfernt. Dabei kam es auch zu Verlusten bei den Zuckerrüben. So wurden 2,3 % der Zuckerrüben von den Hackwerkzeugen weggehackt. Die auf dem Feld verbliebenen Unkräuter stehen vor allem in der Nähe der Zuckerrüben. Die vorher festgelegte Sicherheitszone rund um die Zuckerrüben schützt somit auch die Unkräuter in direkter Umgebung, ist aber notwendig, um die Zuckerrüben nicht zu beschädigen.

6 Schlussfolgerungen für die Umsetzung in die Praxis

Durch die Nutzung von Komponenten und Standards aus der Automationsindustrie ist eine Überführung in ein praxistaugliches Gerät möglich. Dabei darf allerdings nicht vergessen werden, dass Anwender aus der Praxis ein Gerät mit einfacher Bedienung wünschen und auch benötigen. Deshalb muss das derzeit genutzte LabVIEW-Programm, welches in dieser Form zu viele Einstelloptionen für die unterschiedlichen Erkennungsparameter und Regelgrößen bietet, anwenderfreundlicher gestaltet werden. Als Einstellparameter dürfen nur die Pflanzenart und evtl. das Wachstumsstadium eingegeben werden. Auf lange Sicht sollte es sicherlich ein Ziel sein, dass es nur noch eine Blackbox gibt und die Maschine die Pflanzenart und das jeweilige Stadium automatisch erkennt, so dass der Landwirt das Gerät nur noch anbaut und direkt starten kann.

Eine Umsetzung in die Praxis ist auch noch von der Entwicklung der Traktoren abhängig. So wird der Versuchsträger von einem zusätzlichen Aggregat mit Spannung versorgt. Dies kann nur eine Übergangslösung sein, da der Anwender Plug-and-play-Lösungen verlangt und eine generelle Zulassung dieser Kombination aufgrund fehlender Standards unsicher ist. Dies kann durch Traktoren wie John Deere 6210RE (JOHN DEERE, 2011) oder Deutz Fahr Agrottron TTV 630 (ZF, 2011) gelöst werden, die mit leistungsfähigen Generatoren und Starkstromanschlüssen ausgestattet sind. Die Landtechnikmesse „Agritechnica“ in Hannover hat 2011 gezeigt, dass das Angebot an Maschinen, die eine hohe elektrische Leistung benötigen, deutlich gestiegen ist. Neben einer elektrisch angetriebenen Anhängerachse (FLIEGL, 2011) wurden eine Kreiselegge (MOBILE-POWER, 2012) sowie ein Kunstdüngerstreuer (RAUCH, 2011) gezeigt, deren Antrieb rein elektrisch erfolgen.

Die Richtung geht also ähnlich wie in der Automobilindustrie ganz klar in Richtung Elektrifizierung. Die elektrischen Antriebe in der Agrartechnik haben zwar mit den gleichen Problemen (hohe Kosten, Gewicht) zu kämpfen, können aber den Vorteil der besseren Regelbarkeit gegenüber anderen Antriebssystemen besser ausnutzen. Die Rotationshacke ist dafür ein ausgezeichnetes Beispiel und wird deshalb im kommenden Jahr weiter untersucht werden.

7 Literaturverzeichnis

Åstrand B. 2002. An agricultural mobile robot with vision-based perception for mechanical weed-control. Autonomous robots 13. pp.21-35

Åstrand, B. 2005. Vision based perception for mechatronic weed control. Chalmers University of Technology: Department of Computer Sciences and Engineering. p.107

Bakker, T., Asselt, C. v., Bontsema, J., Müller, J. und Straten, G. v. 2006. Autonomous navigation with a weeding robot. In: Rothmund, M. Automation Technology for Off-road equipment. pp.51-57

Bond, W., Turner, R. J. and Grundy, A. C. 2003. A review of non-chemical weed management. Report prepared as part of Defra project OF0315. p.81

Dedousis, A. P., O'Dogherty, M. J., Godwin, R. J., Tillett, N. D. und Brighton, J. L. 2006. A novel approach to precision mechanical weed control with a rotating disc for inter and intrarow weed hoeing. In: Proceedings of the 17th Triennial Conference of the International Soil Tillage Research Organisation.

Fliegl 2011, Triebachse PowerDriveElect, <http://www.fliegl-agrartechnik.de> , Produktseite, Januar 2012

Gobor, Z. 2007: Development of a novel mechatronic system for mechanical weed control of the intra-row area in row crops based on detection of single plants and adequate controlling of the hoeing tool in real-time. Forschungsbericht Agrartechnik Nr. 464, 2007, 151 Seiten

Griepentrog, H. W. 2005. Weed Control by Autonomous Vehicle Systems. In: Workshop Proceedings Precision Farming - Sensing and Robotics, Hohenheim University, pp.6-9

Heyland, K.-U.; Diepenbrock, W.; Fischbeck, G. und Knauer, N.; 1999. Spezieller Pflanzenbau, 3. Auflage, p. 203

JAI 2012, 2-CCD-Kameras, <http://www.jai.com/en/products/ad-080ge> , Produktseite, Mai 2012

John Deere 2011. John Deere Innovationen der Agritechnica, <http://www.deere.co.uk> , Pressemitteilungen 2011

Merfield, C. 2000. Organic Weed Management: A Practical Guide. Available at www.merfield.com/research/organic-weed-management-a-practical-guide.pdf. Accessed June 25, 2007. p.29

Wiedemann W. 2012, Interview, Mobile Power Nr. 01-2012, pp.14

Parish, S. 1990. A review of non-chemical weed control techniques. *Biological Agriculture and Horticulture* 7, pp.117-137

Rauch 2011, E-drive – der Antrieb der Zukunft, <http://www.rauch.de> , Produktseite, Mai 2012

ZF Antriebs- und Fahrwerkstechnik 2011. ZF Antriebssysteme für Landmaschinen, Produktkatalog, pp.10

8 Vorträge

1) Müter, M.; Schulze Lammers, P.; Damerow, L.: „Automatisierte mechanische Unkrautbekämpfung in der Reihe“; Kleiner Rübentag, Bonn, 17. Mai 2011

2) Schulze Lammers, P.; Müter, M.; Schmittmann, O.; Gobor, Z.; Kam, H.; „Mechanische Unkrautregulation zwischen und in den Reihen“; Präzisionslandwirtschaft im Ökologischen Landbau: Stand der Technik und ihr Einsatz in der Praxis, USL, Bonn, 18. Januar 2012

3) Müter, M.; Schulze Lammers, P.; Damerow, L.: „Automated mechanical weed control“; Chinese Agricultural University, College of Information and Electrical Engineering, Peking, 12. November 2012

4) Müter, M.; Schulze Lammers, P.; Damerow, L.: „Development of an intra-row weeding system using electric servo drives and machine vision for plant detection “; 71st Conference LAND TECHNIK - AgEng, Hannover, 09. November 2013

9 Kurzfassung

Das Institut für Landtechnik beschäftigt sich seit einigen Jahren mit der Entwicklung einer Hacke zur mechanischen Unkrautbekämpfung für den Bereich innerhalb der Pflanzenreihe. Die online-Erkennung der Position einzelner Pflanzen und die Unterscheidung zwischen Unkraut und Nutzpflanze sind die Hauptprobleme einer mechanischen Unkrautbekämpfung in der Reihe. Das Ziel des Forschungsprojektes war die Weiterentwicklung und Felderprobung des im Labor erfolgreich getesteten Systems zur mechanischen Unkrautbekämpfung. Um dieses System auf dem Feld anwenden zu können, wurde ein am Traktor angebauter Versuchsträger entwickelt, an dem eine Kamera, LED Scheinwerfer und zwei Hackaggregate für die Detektion und die mechanische Unkrautbehandlung eingesetzt werden. Der Schwerpunkt lag dabei auf der Entwicklung eines echtzeitfähigen Algorithmus für die Pflanzenerkennung und die Ansteuerung der Motoren. Die dazu entwickelten Algorithmen auf LabVIEW-Basis werden auf einem CompactRIO-Controller ausgeführt, dessen Betriebssystem eine Echtzeitregelung erlaubt. Auf dem Feld hat sich gezeigt, dass die derzeitigen Algorithmen eine zuverlässige Bilderkennung sowie Ansteuerung der Servomotoren bei bis zu 7,2 km/h erlauben. Die Grenzen werden hier vor allem durch die Hackwerkzeuge gesetzt, da mit erhöhter Vorfahrtgeschwindigkeit die Drehzahl proportional ansteigt und damit der Erdaufwurf ansteigt. Untersucht man die Erkennung von Zuckerrüben in unterschiedlichen Wachstumsstadien, zeigt sich, dass 81,58 % der Rüben im Zweiblattstadium erkannt und 15,79 % Unkräuter (bezogen auf die Anzahl der Nutzpflanzen) als Nutzpflanze klassifiziert werden. Im Vierblattstadium steigt der Anteil der erkannten Nutzpflanzen auf 91,11 % und erreicht im Sechsbblattstadium mit 100 % den Höchstwert. Der Anteil der als Nutzpflanze klassifizierten Unkräuter bleibt mit 15,56 % im Vierblattstadium und 14,08 % im Sechsbblattstadium ungefähr auf dem Niveau des Zweiblattstadiums. Betrachtet man hingegen die Erkennung der Nutzpflanzen in unterschiedlichen Wachstumsstadien, lässt sich ein linearer Zusammenhang zwischen dem Wachstumsstadium und der Erkennung der Nutzpflanzen herleiten, so dass gesagt werden kann, dass die erfolgreiche Erkennung der Nutzpflanzen mit dem Pflanzenwachstum steigt. Die Grenzen des Bilderkennungssystems liegen derzeit bei zu dicht nebeneinander stehenden Pflanzen. Bei den Hackversuchen im Sechsbblattstadium wurden durchschnittlich 92 % der Unkräuter entfernt. Dabei kam es auch zu Verlusten bei den Zuckerrüben. So wurden 2,3 % der Zuckerrüben von den Hackwerkzeugen weggehackt. Die auf dem Feld verbliebenen Unkräuter stehen vor allem in der Nähe der Zuckerrüben. Die vorher festgelegte Sicherheitszone rund um die Zuckerrüben schützt somit auch die Unkräuter in direkter Umgebung, ist aber notwendig, um die Zuckerrüben nicht zu beschädigen.

The Institute of Agricultural Engineering has been working several years to develop a mechanical weed control system for the area within the plant row. The physical prototype was realized using a servodrive with direct software control, providing rotational speed adjustment according to the forward speed of the tractor, intra-row distance between crop plants and the observed position of the arms. The online detection of plant positions and the determination between weed and crop are the main problems of mechanical weed control in the row. The main goal of the research project was the further development and field testing of the mechanical weed control system, which got successfully tested in the laboratory. In order to apply this system to field conditions, a tractor mounted test rig was developed. For detecting the plants, a camera and LED spot lights are mounted on the test device. As actuators for chopping the weed, two servo motors with hoeing tools were mounted to the frame by single parallelograms. The focus was on the development of a real-time algorithm for plant identification and motor control. The algorithms developed for this purpose, are based on LabVIEW code. Main parts of LabVIEW are running on a CompactRIO controller, whose operating system allows real-time control. The field tests have shown that the current algorithms allow a reliable image recognition and motor control up to 7.2 km/h forward speed. The limits are set primarily by the hoeing tools, because with increased driving speed, the rotational speed rises in proportion and thus the earthwork grows. The investigation for recognizing sugar beet at different growth stages shows, that 81.58 % of the beet in the two-leaf stage are recognized and 15.79 % (based on the number of crops) are classified as crop. In the four-leaf stage, the proportion of detected crops increases up to 91.11 % and closes at 100 % in the six-leaf stage. The percentage of crop classified as weeds remain with 15.56 % in the four-leaf stage and 14.08 % in the six-leaf stage at about the level of the two-leaf stage. However, looking at the crop recognition in different stages of growth, a linear relationship between the growth stage and the detection of the crops can be derived, so that it can be said that the successful detection of the crops increases with the growth stage of plants. The boundaries of the image detection system are currently at plants that are too close together. This applies to weed that look similar to the crop, as well as crops standing side by side. In the experiments with sugar beet plants in the six leaf stage 92% of the weeds were removed. It also came to losses of sugar beet plants. Thus, 2.3% of the sugar beet plants were hoed from the hack tools. The remaining weed plants on the field are especially close to the sugar beet plants. In this way the predetermined safety area around the sugar beet plants also protects the weeds in the immediate vicinity, but is necessary to prevent damage to the beet.

