

Projekt EIP Agri

**Entwicklung und Verbesserung eines Produktionssystems
für Biozuckerrüben**

Inhaltsverzeichnis

1	Autoren	4
2	Projekttitel	4
3	Zuwendungsempfänger	4
4	Leadpartner	4
5	Mitglieder der Operationellen Gruppe	4
6	Kurzzusammenfassung.....	5
7	Short Summary	7
8	Projektgebiet.....	9
9	Gesamtbudget	9
10	Ausgangssituation und Bedarf	10
10.1	Motivation.....	10
10.2	Stand der Forschung und der Technik.....	11
11	Aufgabenstellung	40
	Projektverlauf	42
12	Projektergebnisse	42
12.1	Darstellung der Ergebnisse	42
12.2	Diskussion der Ergebnisse	66
12.3	Zusammenfassung der Ergebnisse	74
13	Verwertung der Ergebnisse.....	76
13.1	Zielerreichung	76
13.2	Nutzen für die Praxis und geplante Verwendung.....	76
13.3	Beitrag zu förderpolitischen EIP-Zielen.....	76
14	Wirtschaftliche und Wissenschaftliche Anschlussfähigkeit und weiterführende Fragestellungen.....	76
14.1	Weiterentwicklung der Hardwarekomponenten für industrielle Anforderungen	76
14.2	Weiterentwicklung des Rotors	77
14.3	Weiterentwicklung des Werkzeuges	77
14.4	Vereinzelung der Zuckerrübe	78
14.5	Unkrautbekämpfung im Nahbereich	78

15	Kommunikations- und Disseminationskonzept	80
16	Literaturverzeichnis.....	81

1 Autoren

Stefan Heinrich jun.

2 Projekttitle

Entwicklung und Verbesserung eines Produktionssystems für Biozuckerrüben

3 Zuwendungsempfänger

Biorüben Forschungs GbR

Münchshöfenerstr.15

94363 Oberschneiding

Ansprechpartner:

Stefan Heinrich jun.

Tel.: +49 176 64165644

info@heinrichstefan.eu

4 Leadpartner

Planungsbüro Heinrich

Münchshöfenerstr.15

94363 Oberschneiding

Ansprechpartner:

Stefan Heinrich jun.

Tel.: +49 176 64165644

info@heinrichstefan.eu

5 Mitglieder der Operationellen Gruppe

Planungsbüro Heinrich

Münchshöfenerstr.15

94363 Oberschneiding

Ansprechpartner:

Stefan Heinrich jun.

Tel.: +49 176 64165644

Stefan Heinrich sen.

Landwirt

Münchshöfenerstr.15

94363 Oberschneiding

Tel.: +49 172 6995704

Pielmeier Automatisierungs GmbH & CoKG

Nürnbergerstr.4

94315 Straubing

Ansprechpartner:

Johann Pielmeier

Tel.: +49 9421 5698031

buero@pielmeier-automatisierung.de

Universität Hohenheim (externer Kooperationspartner)

Garbenstr.9

70599 Stuttgart

Ansprechpartner:

Prof. Dr. Joachim Müller

Tel.: +49 711 45922490

Joachim.Mueller@uni-hohenheim.de

6 Kurzzusammenfassung

Die Zuckerrübe ist im biologischen Ackerbau eine der anspruchsvollsten Kulturen. Sie ist aufgrund der langsamen Jugendentwicklung besonders konkurrenzschwach gegenüber Samenunkräutern wie Weißer Gänsefuß, Vogelknöterich oder Hühnerhirse. Die Bekämpfung der Beikräuter erfolgt im biologischen Anbau überwiegend mechanisch mithilfe von Hacksystemen zwischen den Reihen und mithilfe von Striegel und Fingerhacken innerhalb der Pflanzenreihe. Aufgrund der geringen Pflanzenstabilität in der Jugend ist ein aggressives Bearbeiten der Pflanzenreihe nicht möglich und folglich der Bekämpfungserfolg verhältnismäßig gering. Um eine Beerntung überhaupt zu ermöglichen und um der Nutzpflanze optimale Wachstumsbedingungen zu schaffen, wird mithilfe manueller Unkrautbekämpfungsmaßnahmen das restliche Beikraut nach den Hackeinsätzen in der Pflanzenreihe entfernt. Der Handarbeitsaufwand beträgt je nach Gegebenheiten zwischen 50 und 250 Arbeitsstunden pro Hektar. Zur Reduktion dieses Aufwands wurde in den vergangenen Jahren versucht, Selektivhacken aus dem Gemüsebau im biologischen Zuckerrübenanbau einzusetzen. Aufgrund der engen Pflanzabstände in der Reihe und des geringen Vorsprungs der Kulturpflanze gegenüber dem Beikraut

war der Schaden größer als der Gewinn durch die Arbeitseinsparung. Hauptgründe lagen sowohl in der Pflanzendetektion als auch in der Werkzeuggestaltung. Aktuelle optische Detektionssysteme nutzen überwiegend eine Trennung der Binärobjekte anhand von Farbinformationen und geometrischen Messungen. Die Werkzeuge beschränken sich überwiegend auf einen einfachen Einschwenkvorgang zwischen zwei Nutzpflanzen. Sobald die Nutzpflanze erreicht ist, wird wieder aus der Reihe ausgeschwenkt. Die Fahrgeschwindigkeit wird durch den Ein- und Ausschwenkvorgang begrenzt. Alle bisher verwendeten Werkzeuge besitzen keinen „Nulleingriff“, somit nimmt das Verschüttungsrisiko in der Jugendentwicklung proportional zur Fahrgeschwindigkeit zu.

In der vorliegenden Dissertation werden zunächst neue Konzepte zur Online-Pflanzenerkennung erarbeitet. Die Detektion von Zuckerrüben ist eine der komplexesten Aufgaben in der mechanischen Unkrautbekämpfung. Aufgrund des geringen Pflanzenabstandes und der Wuchsform fällt eine exakte Mittelpunktbestimmung der Kulturpflanze sehr schwer. Herkömmliche Verfahren aus der industriellen Bildverarbeitung sind hierfür nicht einsetzbar, da keine Pflanze der anderen gleicht. Um diese nun einzeln bestimmen zu können, müssen wichtige Attribute, wie die markante Blattspreite, herausgearbeitet und für die Detektion genutzt werden. Die grundlegende Aufgabenstellung ist die Entwicklung eines praxistauglichen Selektivhacksystems für Biozuckerrüben. Hierfür wird zuerst zwischen dem Grundkonzept eines Traktoranbaugerätes und einer autonomen Trägerplattform abgewogen. Aufgrund der geringen Leistungsbereitstellungsmöglichkeiten und der geringen Praxistauglichkeit wird die Entscheidung zugunsten des Anbaugerätes gefällt. Als Basis für die finale Entwicklung der Prototypen wird eine Fronthacke genutzt. Diese dient anfangs nur zur Gewinnung von Bildmaterial und im Anschluss als Ausgangsplattform zur Integration der Hackwerkzeuge. Beginnend mit den Ergebnissen aus der vorangegangenen Masterarbeit werden mithilfe klassischer Bildverarbeitungsalgorithmen Ansätze zur Detektion der Pflanzenmitte erarbeitet. Für die Einzelpflanzenerkennung werden je nach Stadium unterschiedliche Algorithmen genutzt. Bis Ende des Zweiblattstadiums weisen herkömmliche Verfahren mithilfe der Schwerpunktbestimmung sehr gute Resultate auf. Ab Vierblattstadium erreichen die neu entwickelten Kantendetektionsverfahren Detektionsgenauigkeiten von ± 20 mm. Die Einzelpflanzenerkennung erreichte bei unterschiedlichen Pflanzenstadien und Belichtungsszenarien Erkennungsraten von 50 % bis 98 %. Durch die Aussaat der Pflanzen im Dreiecksverband konnten auch unter schwierigen Einsatzbedingungen mit hohem Unkrautdeckungsgrad sehr gute Resultate erzielt werden. Dank der Verknüpfung der Daten mit dem Aussaatraster wurden trotz der niedrigen Einzelpflanzenerkennungsraten nur Kulturpflanzenverluste unter 1 % ermittelt.

Zur Umsetzung der Detektionsergebnisse wurde ausgehend von der an der Universität Bonn entwickelten Rotorhacke eine neue Kinematik konstruiert. Sie ist durch die hydromechanische Auflagedruckkontrolle deutlich weniger anfällig gegenüber schwierigen Bedingungen, da sie

eine weitaus bessere Boden Anpassung bietet. Durch die Schrägstellung und Verbreiterung des Werkzeuges am Rotor konnte der sogenannte „Nullleingriff“ entwickelt werden. Dieser gleicht durch den angepassten Schnittwinkel zur Reihe die Fahrgeschwindigkeit gänzlich aus und verhindert somit ein Verschütten der Kulturpflanze. Zur Realisierung einer robusten und preiswerten Plattform ist das Werkzeug hydraulisch angetrieben. Die verwendeten Komponenten sollten auch in einer zukünftigen Serienmaschine eingesetzt werden können. Die zum Antrieb des Rotors notwendige Kaskadenregelung erreichte eine Winkelgenauigkeit von unter $0,7^\circ$. Positionsdaten, die mithilfe des Detektionssystems gewonnen werden, konnten zusätzlich für die Entwicklung eines Reihenführungssystems genutzt werden. Hierfür wurde zusätzlich zur Traktorlenkung eine aktive Anbaugerätelenkung konstruiert. Diese verbesserte das Führungsverhalten der Rotorhacke. Um für jedes Stadium einen höchstmöglichen Regulierungseffekt zu erreichen, werden Scheibensech in Kombination mit Winkelmesser und Gänsefußscharen mit optionalen Häufelflügeln an den Zinkenträgern eingesetzt. Das In-Row-Werkzeugsystem wird an den Zinkenträger angebaut, um eine kompakte Einheit zu erhalten. Durch die Verknüpfung der Informationen aus der Aussaattechnik und der Bildverarbeitung ist es gelungen, ein äußerst robustes und fehlersicheres System zur Bekämpfung von Beikräutern im biologischen Zuckerrübenanbau zu entwickeln.

7 Short Summary

The production of organic sugar beets is one of the biggest challenges in organic farming. Due to its slow youth development, it is less competitive with seed weeds like white goosefoot, knotweed, or cockspur. The control in organic farming is mainly done mechanically with the help of hoeing systems between the rows and with harrow and finger weeders within the rows. The brittleness in the youth stages doesn't allow an aggressive deployment of the in-row methods mentioned before, so the results stay far behind the expectations. To raise the yields and to make a harvest at least possible a manual removal of the weeds is essential. The effort on manual labor is settled between 50 to 250 hours per hectare. To reduce the costs for manual weeding some attempts were made to use automatic weeding systems from the vegetable production. Due to the small distances between the plants and the missing head start of the crop, the losses of the used systems were higher than the generated benefits. The main reasons for the fail belong to the plant detection system and the tool design. State-of-the-art technology uses mainly color information and geometrical measurements to separate the plants from each other. Most of the tools use simple systems which open in front of a plant and close behind it. The driving speed is limited throughout the swing-in process. None of the tools that have been used so far have no "zero-intervention", so the risk of the plants being buried increases in proportion to the driving speed.

In the present dissertation, new concepts for online plant recognition are first developed. The detection of sugar beet is one of the most complex tasks in mechanical weed control. Due to the small distance between the plants and the special growth habits a precise detection of the center point is challenging. Common systems out of the industrial image processing field cannot be used directly, because of the small similarities between the plants. To get successful detection results important attributes like the distinctive leaf blade must be worked out. The main task is to develop a fully practical proofed selective weeding system. Therefore an evaluation between an autonomous platform and a tractor-mounted system has to be made. Due to the fact of the low power supply, it was decided to develop the tractor-mounted system. For the start, a common front weeding system is used to build the prototype. It is first used to collect image data. In the following steps, the platform is required to integrate the first in-row weeding tools. Starting with the results from the previous master thesis classical image recognition methods are used to develop different approaches for the detection of the center points. The approaches mainly differ in the plant growth stages. Until the two-leaf stage, binary operators deliver good results. Starting with the four-leaf stage, the new edge detection system for localizing the centerline of the leaf reaches an accuracy of up to 20 mm. The single plant detection system achieves recognition rates from 50 % to 98 % depending on different growth stages and lighting conditions. Thanks to the grid seeding system it was possible to reach excellent detection rates even under a high degree of weed cover and harsh conditions. By sowing the plants in a triangular arrangement, it was possible to reduce the plant losses below 1 %.

To bring the detection results to the ground the currently developed rotor weeding system from the University of Bonn was used as a starting point for developing new kinematics. It achieves throughout the hydromechanical contact pressure control a better ground contour following. It is also significantly less susceptible to difficult working conditions. Due to the inclination of the rotor, the so-called “zero-intervention” could be developed. Due to the adapted cutting angle to the row, the driving speed is completely compensated. This prevents the crops from covering with soil. The tool is hydraulically driven to create a robust and inexpensive platform. It should also be possible to use the components in future serial production. The cascade controller from the rotor achieved an angular accuracy below $0,7^\circ$. The plant positions primarily detected for the in-row system could also be used for the realization of a row guidance system. For this purpose, an active implement steering was designed in addition to the automatic tractor steering system. This improved the guiding behavior of the front weeding system. In order to achieve the highest possible regulating effect for every growth stage, disc colters are used in combination with optional angled shares. In later stages goosefoot shares with optional wings can be used to reach a higher pile effect. Also, the in-row system is fully integrated into the tine carrier to obtain a compact unit.

By linking the information from the sowing technology and the image processing, it has been possible to develop a highly robust and fail-safe system for mechanical weed control in organic sugar beet.

8 Projektgebiet

Die Umsetzung des Projektes erfolgte ausschließlich am Standort der Operationellen Gruppe

9 Gesamtbudget

A. Laufende Ausgaben für die Zusammenarbeit und für die Durchführung des Projekts		Brutto	Netto
1. Personalausgaben			
OG Management Stefan Heinrich jun	31 €/h * 1935 h	71,382 €	59,985 €
Assistenzkraft für Feldarbeit (evtl. Stefan Heinrich jun.)	18 €/h * 250 h	5,355 €	4,500 €
Entwicklungsarbeit Bildverarbeitung (evtl. Stefan Heinrich jun)	26 €/h * 400 h	12,376 €	10,400 €
Entwicklungsarbeit Johann Pielmeier	26 €/h * 500 h	15,470 €	13,000 €
Etwicklungsarbeit Maschinenbau und Kostruktion (450€ Stelle)	26 €/h * 621 h	16,200 €	16,200 €
2. Sachausgabepauschale (15 % der Personalausgaben)		18,579 €	15,613 €
3. Reisekosten			
Teilnahme an Feldtagen, Maschinenvorfürungen, Gespräche mit Maschinenherstellern, Vorträge	0,35 €/km * 60000 km		
4. Ausgaben für Öffentlichkeitsarbeit und Veröffentlichungen		5,712 €	4,800 €
Material für anfertigen Dissertation			
Erstellung Flyer			
Stand für Feldtage			
5. Ausgaben für Aufwandsentschädigung und Nutzungskosten		35,700 €	30,000 €
6. Gesamtausgaben Zusammenarbeit und Durchführung		205,764 €	175,498 €

B. Ausgaben für Leistungen Dritter		Brutto	Netto
7. Ausgaben für Leistungen Dritter wie z.B. projektbegleitende wissenschaftliche Untersuchungen, Durchführbarkeitsstudien und sonstige Studien, Analysen und Tests, sonstige projektbezogene Dienstleistung			
- Überprüfung unterschiedlicher Strategien zur Bildverarbeitung - Überprüfung unterschiedlicher Werkzeugsysteme - Auswertung der Versuchsergebnisse durch eine neutrale Stelle (z.B. Verband bayr. Zuckerrübenanbauer)		19,040 €	16,000 €
Umbau der Traktoren durch externen Dienstleister auf mit RTK-Spurführungsassistent, Frontkraftheber, Zusatzhydraulikleistung und evtl. Allradlenkung, Spezialbereifung		11,900 €	10,000 €
Umbau der Sämaschine durch externen Dienstleister auf Geoseed (zur Geopositionierten Dreiecksverbandsablage)		- €	- €
Umbau der Hackmaschine durch externen Dienstleister auf Verschieberahmen oder automatischer Reihenführung (Kamera- oder RTK- gesteuert)		13,423 €	11,280 €
Programmierung der Werkzeugansteuerung		- €	- €
Gesamtausgaben für Leistungen Dritter		44,363 €	37,280 €

C. Ausgaben für Verbrauchsgüter und Investitionen, die zur Durchführung des Projektes benötigt werden		Brutto	Netto
Ausgaben für projektbezogene Verbrauchsgüter (10% der Investitionssumme)		4,025 €	3,382 €
Bau und Entwicklung der Selektivhacke mit neu entwickelten Erkennungs-, Steuerungssystem und Werkzeugführung (6- oder 12-reihig)		40,246 €	33,820 €
Abschreibung Traktor		- €	- €
Abschreibung Reihenhackmaschine Standard		- €	- €
Abschreibung Einzelkornsämaschine Standard		- €	- €
10. Gesamtausgaben für Verbrauchsgüter und Investitionen		44,270 €	37,202 €
		Brutto	Netto
D Nicht zuwändungsfähige Ausgaben		- €	- €
		Brutto	Netto
E Geschätzte Ausgaben insgesamt		294,398 €	249,980 €

10 Ausgangssituation und Bedarf

10.1 Motivation

Aufgrund der steigenden Nachfrage nach Biozucker aus Rüben wurden die Anbauflächen in den letzten Jahren durch die Landwirte stark ausgedehnt. Die Rübe ist im biologischen Anbau aufgrund von hohem Schädlings- und Unkrautdruck eine der anspruchsvollsten Kulturen. Ohne Beizung ist sie im Keimstadium kaum gegen Schädlinge, wie Moosknopfkäfer oder Erdflöhe, geschützt. Zum Erreichen hoher Feldaufgangszahlen ist zwingend eine Aussaat unter optimalen Bedingungen durchzuführen. Durch ein unverzügliches Auflaufen der Kultur lassen sich die Ausfälle auf ein Minimum reduzieren. Danach konkurriert die Zuckerrübe im Jugendstadium mit dem Beikraut um Licht und Nährstoffe. Da der biologische Anbau den Einsatz von wirkungsvollen Herbiziden verbietet, muss das Unkraut zunächst mechanisch und im Anschluss manuell entfernt werden. Mit einem Handarbeitsaufwand von 100–250 h/ha ist der Personaleinsatz im Vergleich zu den anderen Unkrautregulierungsmaßnahmen mit Abstand der größte finanzielle Aufwand (Heinrich 20.08.20).

In der vorangegangenen Masterarbeit „Maschinenvergleich unterschiedlicher Selektivhacksysteme im biologischen Zuckerrübenanbau“ wurde in den Vergleichstests festgestellt, dass es noch einige Aufgabenstellungen in der selektiven Unkrautbekämpfung innerhalb der Pflanzenreihe zu lösen gilt. Durch die enorme Weiterentwicklung im Bereich der maschinellen Bildverarbeitung wurden in den letzten Jahren sehr leistungsfähige Algorithmen und Hardware entwickelt. Nun lassen sich auch neuronale Netze und komplexe Bildverarbeitungsfunktionen, wie z. B. Kantendetektion für große Datenmengen, in Echtzeit durchführen. Im Rahmen der Dissertation soll mithilfe dieser neuen Technologien versucht werden, die Idee einer vollautomatischen Hackmaschine umzusetzen.

10.2 Stand der Forschung und der Technik

Im folgenden Kapitel wird der aktuelle Stand der Technik im Bereich der Unkrautregulierung im ökologischen Landbau dargestellt. Der Fokus liegt hierbei auf der bereits etablierten Standardhacktechnik und neuen Entwicklungen in der Selektivhacktechnik. Im Anschluss werden aktuelle Forschungsbestrebungen zur Einzelpflanzen- und Reihendetektion beleuchtet.

10.2.1 Präventive Beikrautregulierung

Die Gestaltung der Fruchtfolge in Kombination mit dem Anbausystem trägt erheblich zum Unkrautpotential bei. Ein mehrjähriger Anbau von Klee gras oder Luzerne in der Fruchtfolge kann den Befallsdruck mit Disteln und weiteren Wurzelunkräutern reduzieren. Durch den mehrmaligen Schnitt werden beim erneuten Austreiben die Reservestoffe für die Überwinterung aufgebraucht und die Wiedereinlagerung durch den Schröpfungsschnitt verhindert. König et al. empfehlen als direkte Vorfrucht vor den Zuckerrüben verschiedene Getreidearten oder Körnerleguminosen (König et al. 2005). Eine intensive Stoppelbearbeitung der Vorfrucht sorgt nicht nur für eine Einmischung der Ernterückstände und eine schnelle Strohrotte, sondern reduziert auch das Samenunkrautpotenzial im Boden. Denn durch jede Bodenbearbeitung werden erneut Samen zum Keimen angeregt. Wird die Stoppelbearbeitung zusätzlich mit schneidenden Werkzeugen ausgeführt, trägt dies zu einer weiteren Schwächung der Wurzelunkräuter bei (Stumm et al. 2011). Zur weiteren Reduzierung der Anzahl der auflaufenden Samenunkräuter im Bestand legen viele Praktiker ca. 7 bis 10 Tage vor der Saat ein falsches Saatbeet an. Durch die zweimalige Überfahrt werden sowohl die Altverunkrautung als auch die frisch gekeimten Unkräuter noch einmal effektiv entfernt. Einen alternativen Ansatz verfolgt der regenerative Ackerbau. Hierbei werden direkt nach einer Halmfrucht winterharte Zwischenfrüchte gedrillt, welche im Frühjahr zusammen mit effektiven Mikroorganismen (Milchsäurebakterien) eingearbeitet werden. Durch diese gezielte Rottelenkung sollen Nährstoffe besser für die Folgefrucht verfügbar und durch den Rotteprozess die Keimung der Unkräuter unterdrückt werden (Heinrich 10.03.21). Die zuvor genannten Vorteile der Flächenrotte konnten aber noch nicht wissenschaftlich bestätigt werden (Böhler et al. 2018).

10.2.2 Ganzflächig arbeitende Verfahren

Die Regulierung nach der Aussaat kann in ganzflächig arbeitende Verfahren und Reihenhacksysteme unterteilt werden. Wichtigster Vertreter der ganzflächigen Verfahren ist der Striegel. Dieser legt mittels 6–10 mm breiten Stahlfederzinken die Unkrautfäden frei oder verschüttet diese. Im Voraufbau muss auf eine exakte Tiefenführung der Zinken geachtet werden, da ein zu tief laufender Zinken im Säschlitz zu Verrollungen oder Verletzungen des Keimlings führen kann. In Zuckerrübenbestand kann entweder im Voraufbau oder dann erst wieder ab dem

Vierblattstadium gestriegelt werden. Da die Rübe aufgrund der geringen Stabilität sehr empfindlich auf den Striegeleinsatz reagiert, ist der Regulierungserfolg im Vergleich zu anderen Kulturen wie Sojabohnen deutlich reduziert. Pflanzenverluste von 5 % bis 10 % sind laut Köller et al. bei einem Wirkungsgrad von nur maximal 70% nicht unüblich. Bei Kulturen mit langer Keimdauer kann das Feld wenige Tage vor dem Auflaufen thermisch mit einem Flammgerät behandelt werden. Hierbei ist darauf zu achten, dass die Bodenoberfläche ausreichend erhitzt wird. Das Ziel bei dieser Maßnahme ist es nicht die Pflanzen zu verbrennen, sondern lediglich das Zellgewebe zu zerstören (FIBL 2017). Somit stirbt die Pflanze schon im Keimblattstadium ab. Aufgrund des hohen Energieaufwandes von ca. 75 kg Flüssiggas pro ha, lohnt sich ein Einsatz in der Regel nur im Gemüsebau.

10.2.3 Anbaukonzepte für Scharhacken

Im Gegensatz zu den ganzflächig arbeitenden Verfahren, setzen Scharhacksysteme nicht darauf, dass die Kulturpflanze robuster gegen Striegeleinsatz als das Unkraut ist. Durch den Anbau der Kulturpflanzen in Reihen können die Bereiche zwischen den Pflanzenreihen intensiv bearbeitet werden, ohne die Pflanzen in der Reihe zu beschädigen. Der Anbau von Zuckerrüben erfolgt üblicherweise in Breiten von 45 oder 50 cm.

10.2.3.1 Heckhacke ohne Spurführung

Eines der einfachsten Scharhacksysteme stellt die Heckhacke ohne Spurführung dar (Abbildung 1). Hierbei fährt der Traktor manuell zwischen den Reihen. Bei exakter Fahrweise sind Hackbänder von unter 15 cm möglich. Ein großer Vorteil des Systems ist, dass mit relativ geringem Aufwand bei großen Reihenweiten ab 75 cm auch bei einem breiten Hackband von 15–20 cm schon sehr gute Regulierungseffekte erzielt werden. Durch die Oberlenkersteuerung kann das Abrutschen der Maschine am Seitenhang minimiert werden. Bewegt sich das Anbaugerät außermittig, verändert sich der Zugpunkt des Oberlenkers. Dieser dreht über Spurstangen am Anbaubock die Spurkranzräder der Maschine und bewirkt somit ein aktives Gegenlenken der Maschine.



Abbildung 1: Heckhacke ohne Verschieberahmen (Maschinenring Hannover 2020)

10.2.3.2 Heckhacke mit manueller Lenkung

Zur weiteren Erhöhung der Präzision der Heckhacke gibt es die Möglichkeit einer zusätzlichen manuellen Steuerung. Hiermit werden entweder Stützräder am Rahmen der Hackmaschine über die Änderung des Lenkwinkels gelenkt oder über eine hydraulische Steuerung der Verschieberahmen verschoben. Für dieses Konzept ist eine weitere Arbeitskraft auf der Hackmaschine zur Steuerung der Lenkung nötig. Diese Person sitzt im Idealfall direkt hinter den Werkzeugen, um eine gute Sicht auf diese zu haben (Abbildung 2).



Abbildung 2: Kamerahacke mit Verschieberahmen (Machinefabriek Steketee B.V. 2021)

10.2.3.3 Heckhacke mit Verschieberahmen

Der nächste Verbesserungsschritt ist der Einsatz einer kamera- oder GPS-gestützten Lenkung für den Verschieberahmen (Abbildung 3). Die Hackwerkzeuge werden hierbei über einen innenliegenden Hydraulikzylinder genau zwischen die Pflanzenreihen positioniert. Da die Kräfte

des Hydraulikzylinders senkrecht zur Fahrtrichtung verlaufen, können die entstehenden Kräfte nur über die Trag- bzw. Spurkranzräder des Verschieberahmens abgetragen werden. Bei großen Arbeitsbreiten über 6 m stellt dies oft eine Herausforderung dar, da die Stützräder nun nicht mehr den benötigten Seitenhalt für den Verschiebevorgang an den Boden abtragen können. Ein Überschwingen der Regelung und eine ungenauere Führung an der Pflanzenreihe sind die Folge. Durch den Einbau des Verschieberahmens wird das komplette Hackgerät deutlich schwerer und der Schwerpunkt der Gesamtmaschine entfernt sich zusätzlich je nach Hersteller um ca. 10–50 cm vom Traktordreipunkt. Dies erhöht zusätzlich die Hinterachslast des Traktors. Ein großer Vorteil ist die einfache Regelungstechnik, da unabhängig von der Fahrgeschwindigkeit die Verschiebgeschwindigkeit des Verschieberahmens immer konstant bleibt (siehe **Fehler! Verweisquelle konnte nicht gefunden werden.**). Somit wird bei einer fest definierten Ventilansteuerung der Verschieberahmen mit einer konstanten Geschwindigkeit bewegt. Der Rahmen kann als Parallelogrammverschiebung realisiert werden. Diese Version wird unter anderem von den Firmen Schmotzer und Steketee vertrieben. Vorteile gegenüber einem Linearverschieberahmen konnten bisher nicht belegt werden. Der größte Nachteil des Parallelogramms ist die zusätzliche Verlagerung des Maschinenschwerpunkts weg vom Anbaupunkt des Traktors, da die Parallelogrammarme deutlich mehr Platz als der Verschieberahmen benötigen. Dies führt noch zu einer zusätzlichen Erhöhung der Hinterachslasten und einem schlechteren Verhalten am Seitenhang.



Abbildung 3: Aufbau eines klassischen Verschieberahmens. Dieser entkoppelt den Hackrahmen vom Fahrzeug, damit sich dieser unabhängig vom Fahrzeugheck bewegen kann (Einböck GmbH 2020)

10.2.3.4 Heckhacke mit Unterlenkerverschiebung

Zusätzlich zum linearen Verschieberahmen gibt es noch die Möglichkeit, die Hackmaschine über die Unterlenkerstabilisatoren des Traktors zu verschieben. Mittels hydraulischer Unterlenkerstabilisatoren, kann das Anbaugerät bei einer Kat-III.-Aufnahme bis zu 125 mm in beide Richtungen verschoben werden (Ruckelshausen 2018). Durch das Schrägstellen des Anbaugerätes am Hang wird am Hang die Hangabdrift noch zusätzlich verstärkt. Driftet der Traktor am Hang mit der Hinterachse hangabwärts, muss die Hacke über den Unterlenker hangaufwärts geschoben werden. Wie in Abbildung 4 gezeigt, ändert sich somit der Winkel zum Zugfahrzeug noch weiter und drückt das Heck des Traktors noch weiter hangabwärts. Laufen nun auch die Werkzeuge der Scharhacke nicht mehr exakt in Fahrtrichtung, kommt es zu einer minimalen Verengung des Hackspaltes. Bei langen Hacksystemen, wie beispielsweise einer mit einer Scharhacke kombinierten Fingerhacke, kann es passieren, dass die Fingerhacke nicht mehr exakt auf der Reihe läuft, da sich diese oft bis zu einem Meter hinter der ersten Werkzeugreihe befindet.

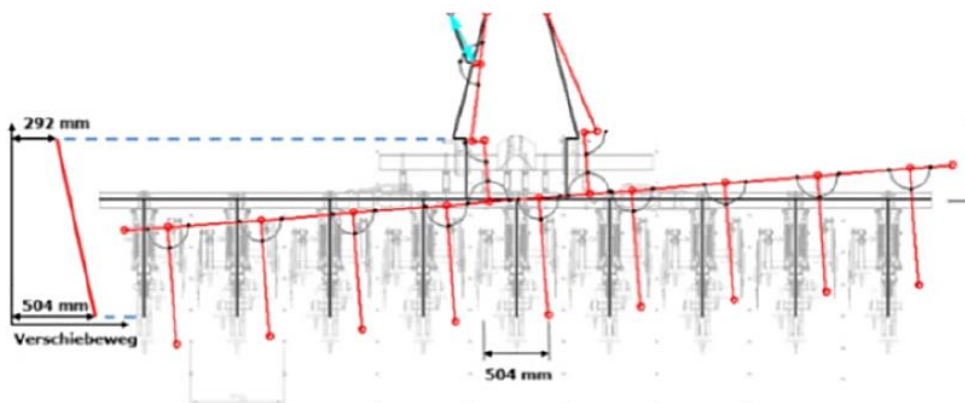


Abbildung 4: Skizzierte Kreisbahn der Unterlenkerverschiebung (Ruckelshausen 2018)

10.2.3.5 Heckhacke mit Lenkscheiben

Eine Alternative zum Verschieberahmen ist die Lenkung des Anbaugerätes über Lenkscheiben (Abbildung 5). Dieses System besitzt den Vorteil, dass die seitlich wirkenden Kräfte zum Verschieben des Hackgerätes über die Schrägfahrt der Sechsscheibe oder des Reifens abgetragen werden können. Die Konstruktion des Rahmens kann somit wesentlich leichter und einfacher gestaltet werden. Hierdurch erhöhen sich aber die Anforderungen an die Regelungstechnik, da auf lockerem Untergrund kein direkt proportionaler Zusammenhang zwischen einem gewissen Lenkwinkel, einer fest definierten Strecke und einer definierten Seitwärtsbewegung besteht (siehe Kaskadenregelung **Fehler! Verweisquelle konnte nicht gefunden wer-**

den.). Im Vergleich zum Verschieberahmen ist das Verhalten am Seitenhang wesentlich besser, da ähnlich wie bei der ungesteuerten Oberlenkersteuerung die Anbaugerätelenkung aktiv dem Hang entgegenlenkt und somit ein noch weiteres Abrutschen des Traktorhecks verhindert. Aktuell werden diese Systeme nur in Kombination mit einer GPS-Lenkung angeboten, das bedeutet, dass sowohl Anbaugerät als auch Traktor auf die gleiche Spur gelenkt werden. Eine Lenkung über Kamera ist bis dato noch nicht bekannt (Raven Industries, Inc. 2021).



Abbildung 5: Anbaugerätelenkung über Lenksechsscheiben (Raven Industries, Inc. 2021)

10.2.3.6 Fronthacke

Die zuvor genannten Systeme beschränken sich alle auf die Montageposition des Hackgerätes im Heck. Als Alternative vereint die Fronthacke die Vorteile des Zwischenachssystems mit der einfachen Ankuppelbarkeit eines Hecksystems (Abbildung 6). Das Fronngerät kann problemlos von einer Person bedient werden und unter optimalen Bedingungen auch sehr enge Hackspalte von 4 bis 6 cm realisieren. Der Anbauraum bietet eine hervorragende Übersicht über die Werkzeuge und garantiert somit auch unter schwierigen Bedingungen, wie hohem Unkrautdeckungsgrad oder schlechtem Feldaufgang, maximale Einsatzsicherheit. Ohne automatische Lenkung ist die Belastung für den Bediener sehr hoch, da für ein präzises Fahren höchste Konzentration erforderlich ist. Zum Erreichen eines direkten Lenkverhaltens muss ein Teil des Gewichtes des Anbaugerätes auf den Unterlenkern des Traktors lasten und nicht auf den passiv gelenkten Stützrädern der Maschine, da selbige bei zu starker Belastung sehr träge auf Lenkbewegungen reagieren. Größere Arbeitsbreiten und längere Hacksysteme mit Fingerhackelementen belasten bei Straßentransport zusehends die kleineren Vorderräder des Traktors. Nachteilig wirkt sich auch beim Straßentransport die starke Beeinträchtigung der Sicht bei Arbeitsbreiten über 3 m durch die Transportstellung der Maschine aus.



Abbildung 6: Geschobene Fronthacke mit Stützrädern zwischen Rahmen und Traktorvorderreifen (Thomas Hatzenbichler Agro-Technik GmbH)

10.2.3.7 Zwischenachshacke

Durch den Einbau einer Scharhacke im Achszwischenraum kann auf die Stütz- und Lenkräder zur Höhen- und Seitenführung verzichtet werden. Das Gewicht des Hackgeräts wird optimal zwischen Vorder- und Hinterachse verteilt. Der Fahrer besitzt einen optimalen Überblick über die Hackelemente und kann von der Kabine aus jedes einzelne Schar einsehen, was bei anderen Hacksystemen nicht der Fall ist. Die Größe der Hackmaschine wird durch den Längsholm begrenzt und auch der Einsatz von zusätzlichen Hackwerkzeugen wird durch den Achszwischenraum begrenzt. Der Einbau größerer Hacksysteme erfordert somit eine Anpassung des Trägerfahrzeuges (Abbildung 7).

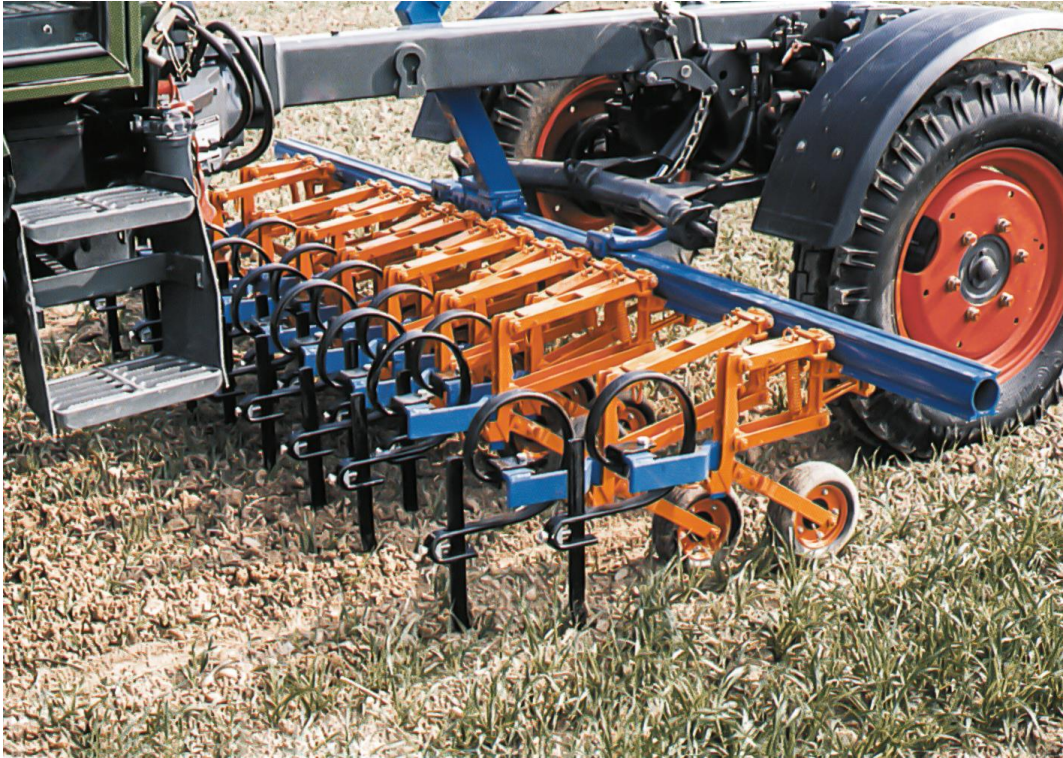


Abbildung 7: Zwischenachshacke der Firma Schmotzer

10.2.4 Kamerabasierte Reihenführungssysteme

Zur automatischen Steuerung der Hacksysteme entlang der Pflanzenreihe werden aktuell verschiedene Konzepte eingesetzt. Sie unterscheiden sich durch die Positionierung der Kamera und die verwendeten Algorithmen.

10.2.4.1 Kameraanbau

Zur Detektion der Pflanzenreihen gibt es unterschiedliche Möglichkeiten. Ein weit verbreitetes System ist die direkte Montage der Kamera auf dem Rahmen mit den Hackwerkzeugen (Abbildung 3). Hierbei wird über den Verschieberahmen die Kamera immer auf die exakt eingestellte Position über der Pflanzenreihe geregelt. Je größer der Abstand zwischen Kamerasichtfeld und Werkzeug wird, desto größer wird der Fehler zwischen Kamera und Werkzeug bei Kurvenfahrten oder am Hang. Das indirekte System hingegen beobachtet mithilfe einer Kamera am Traktor die Position des Hackrahmens zur Pflanzenreihe. Zur Erkennung der Position des Hackrahmens wird eine spezielle Referenztafel genutzt (Abbildung 8). Der Vorteil hierbei ist, dass die Erfassung der Pflanzenreihe so nah wie möglich beim Werkzeug stattfindet und somit unempfindlicher bei Kurvenfahrt und Seitenhang ist. Das Anbaugerät wird über die speziell umgerüsteten hydraulischen Unterlenker entlang der Reihe geführt. Dadurch, dass die Regelungstechnik für den Seitenverschub am Traktor montiert ist, können einfach Standardhacken ohne Verschieberahmen genutzt werden. Die Beobachtung mehrerer Pflanzenreihen ist aktuell noch nicht möglich (Nalatec GmbH 2019).



Abbildung 8: Direkter Positionsabgleich zwischen Kamera und Kulturpflanzenreihe (Nalatec GmbH 2019)

Ein weit verbreitetes Reihenführungssystem ist die Culti Cam der Firma Claas E-Systems GmbH (Abbildung 9). In ihrem Gehäuse befinden sich eine Nahinfrarot- und eine Farbkamera. Durch diese zwei Kameras ist das System in der Lage 3D-Informationen, wie den Arbeitsabstand und die Pflanzenhöhe, automatisch zu berechnen. Das System bietet sehr wenige Einstellparameter. Für die Reihenerkennung werden die Reihenbreite, der Abstand zwischen den Reihen und die Pflanzenhöhe angegeben. Für die Farbauswahl stehen die drei Modi gelbgrün, blau-grün und rot zur Verfügung. Für die Reihenerkennung wird vermutlich ein Average-Shifted-Histogramm genutzt.

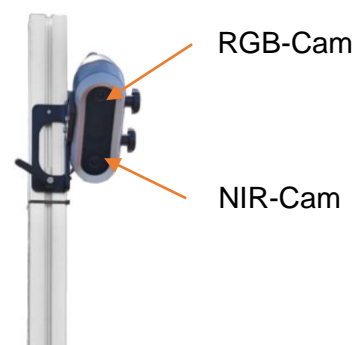


Abbildung 9: Detektionssystem Claas Culti Cam: Die NIR-Kamera befindet sich unter der RGB-Kamera oben. (Einböck GmbH 2020)

Der Vorteil dieser Systeme sind, dass kein Datenaustausch zwischen dem Aussaat- und dem Hacksystem nötig ist. Eine große Herausforderung für optische Systeme stellen hingegen unterschiedliche Beleuchtungsszenarien oder Bestände mit fast abgeschlossenem Reihenabschluss dar. Eine Anpassung der Maschine über den Tag an die unterschiedlichen Lichtverhältnisse muss oft durch den Bediener erfolgen, dies setzt ein gutes technisches Verständnis voraus. Die In-Row-Werkzeughöhe kann nicht unabhängig von den Inter-Row-Werkzeugen verstellt werden.

10.2.4.2 Bildverarbeitungsalgorithmen zur Identifizierung der Pflanzenreihe

Die mithilfe der Kameras aufgenommenen Bilder dienen nun der Positionierung der Hacke. Zur Lokalisierung der Pflanzenreihe wird im ersten Verarbeitungsschritt die Kulturpflanze vom Hintergrund getrennt. Hierfür wird das Ausgangsbild anhand verschiedenster Farbschwellenwertparameter binärisiert. Die Auswahl der Schwellenwertparameter kann entweder manuell oder dynamisch anhand von Clustering-Algorithmen vorgenommen werden. Zur Trennung des Originalbildes in zwei Gruppen kann die Methode von Otsu genutzt werden. Muss das Originalbild in mehrere Klassen aufgeteilt werden, können auch Algorithmen wie K-Means oder Nearest-Neighbour-Klassifikation genutzt werden (Guerrero et al. 2013). Im Anschluss werden aus den entstandenen Binärobjekten die Mittelpunkte skelettiert. Mittels anschließender Hough-Transformation können nun die einzelnen Pflanzenreihen erkannt werden. Die Mittelachse der beiden Kulturpflanzenreihen ergibt die vorgegebene Fahrspur (Rovira-Más et al. 2005).

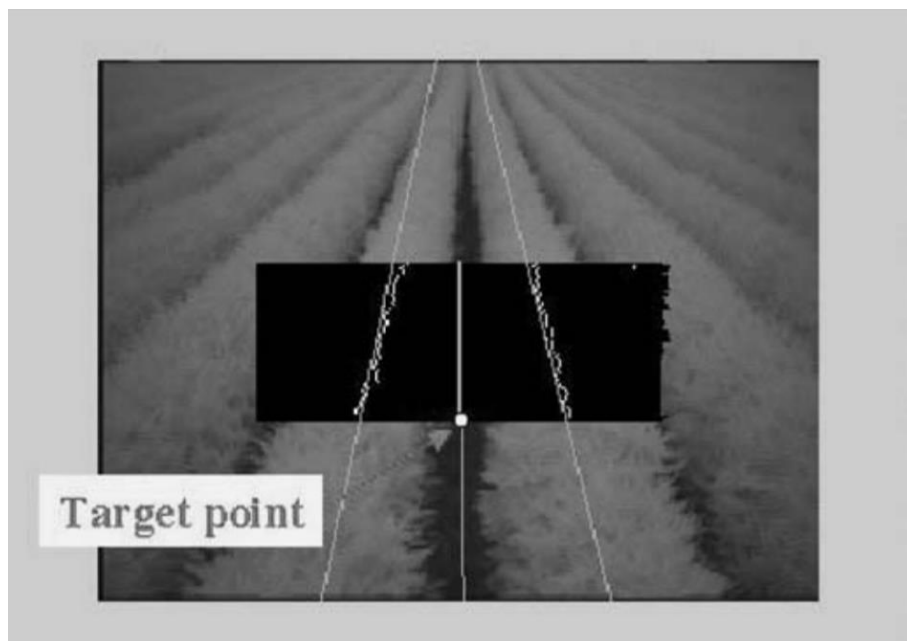


Abbildung 10: Berechnung der Zielspur aus zwei Pflanzenreihen. Die Mitte aus den beiden detektierten Pflanzenreihen ergibt die Zielspur (Rovira-Más et al. 2005)

Alternativ zur Reihenfindung mittels Hough-Transformation kann auch ein reihenbasiertes Template erstellt werden. Als Parameter für dieses Muster dienen die Breite der Pflanzenreihe und der Abstand zwischen zwei Reihen (Vidović et al. 2016).

10.2.4.3 HDR-Imaging

Bei der Detektion der Fahrspur treten durch das Anbaugerät aufgrund wechselnder Fahrtrichtungen und Sonnenstände immer andere Verschattungen im Kamerasichtfeld auf. Diese können das Blickfeld der Kamera stark beeinträchtigen. Ähnliche Situationen treten beim autonomen Fahren beim Verlassen eines Tunnels oder durch blendenden Gegenverkehr auf. Der Dynamikumfang einer Szene kann dabei bis zu 120 dB betragen (Asatsuma et al. 2019). Die besten Kamerachips ohne HDR-Funktion (High Dynamic Ratio) erreichen bis zu 73 dB Helligkeitsdynamik. Zur Erhöhung dieses Bereiches werden unterschiedliche Lösungsansätze verfolgt. Claas E-Systems GmbH setzt auf den Einsatz einer Doppelkamera mit jeweils einem NIR- und RGB-Chip. Somit kann jede Kamera unterschiedliche Belichtungszeiten verwenden. Wird nur eine Kamera verwendet, werden häufig mehrere Bilder mit unterschiedlichen Belichtungszeiten erstellt und aus den einzelnen Aufnahmen ein HDR-Bild erzeugt. Bei sich bewegenden Objekten, wie beispielweise im Automobilbereich oder bei der landwirtschaftlichen Spurführung, entstehen durch das Zusammensetzen eines Bildes aus mehreren Einzelbildern Bewegungsunschärfen, da sich die aufgenommene Szene während der Belichtungszeit ändert. Durch ein neues Sensordesign können einzelne Subpixel unterschiedlichen Belichtungszeiten ausgesetzt werden. Hierdurch lässt sich die Bewegungsunschärfe, wie in Abbildung 11 zu sehen ist, reduzieren.

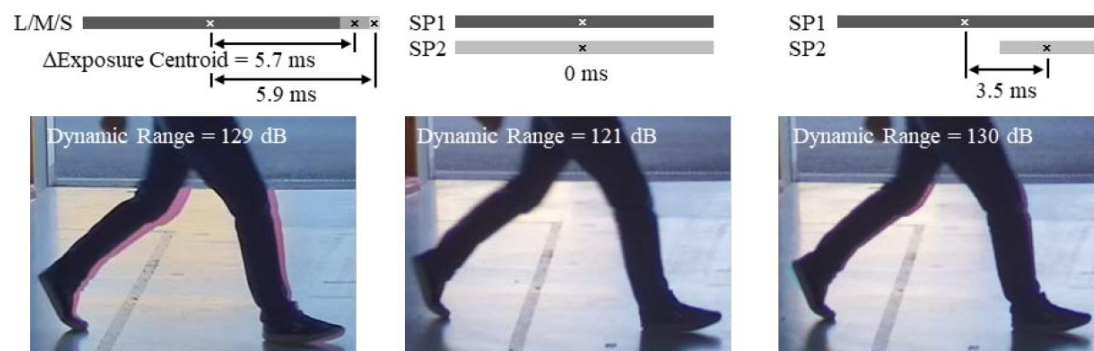


Abbildung 11: Darstellung der einzelnen HDR-Modi mit unterschiedlicher Bewegungsunschärfe.

Links: konventionelle Methode aus 3 Einzelbildern, mittig: kein HDR-Modus, rechts: HDR-Modus mit Subpixelunterdrückung

SP1: aktive Belichtung der ersten Subpixelgruppe; SP2: aktive Belichtung der zweiten Subpixelgruppe

L/M/S: Sequenzielle Belichtungsfolge (Long, Middle Short)

Die Sequenzielle Belichtungsabfolge benötigt 2,4 ms länger für die Belichtung als die Methode mit Subpixelunterdrückung und besitzt somit auch eine größere Bewegungsunschärfe (Asatsuma et al. 2019).

10.2.5 Beikrautregulierung im geschlossenen Bestand

Ist der Einsatz der Scharhacke aufgrund der Bestandshöhe nicht mehr möglich oder sinnvoll, kann das Beikraut entweder von Hand oder mithilfe von spezialisierten Systemen, die oberhalb des Bestands arbeiten, entfernt werden. Das Ziel dieser Methode ist nicht nur die Entfernung der Beikrautpflanzen zur Erhöhung des Ertrages, sondern dient der Verhinderung der Samenbildung und damit der Reduzierung des Unkrautsamenpotenzials im Boden. Die meisten Regulierungsmaßnahmen sollen lediglich die Samenstände der Unkräuter entfernen. Um diese nicht von Hand entfernen zu müssen, wurden in den letzten Jahren verschiedene Systeme entwickelt. Eine der einfachsten Methoden ist es, die Blütenstände der Beikrautpflanzen oberhalb des Pflanzenbestandes mithilfe von Doppelmesserbalken abzuschneiden (Abbildung 13 rechts). Um ein nachträgliches Abreifen der Samenstände im Schnittgut zu verhindern, werden diese im Anschluss in einem Bunker gesammelt und können vom Feld abgefahren werden (Abbildung 13 links). Alternativ dazu kann auch versucht werden, mittels schrägstehender rotierender Reifen die Pflanzen aus dem Boden zu ziehen (Abbildung 12 rechts). Dies geht aber nur bei optimaler Bodenfeuchte und Stabilität des Krauts. Bei zu trockenem Oberboden reißt die Pflanze im oberen Teil ab und der Rest des Samenstandes verbleibt auf der Parzelle. Mit den zuvor genannten Systemen kann das Samenpotenzial nur um max. 43 % reduziert werden, da zu viele Pflanzen verfehlt werden oder die Pflanzen beim Herausziehen abreißen. Ein Teil des Blütenstandes bleibt somit unterhalb der Bestandsoberfläche und reift ab (Simard et al. 2019).

Der thermoelektrische Ansatz hingegen versucht mit elektrischem Strom das Zellgewebe kurzzeitig so stark zu erhitzen, dass es bis in die Wurzel hinab zerstört wird (Abbildung 12 links). Hierfür sind Antriebsleistungen bis zu 150 kW bei 9 m Arbeitsbreite nötig, um einen ausreichenden Bekämpfungserfolg sicherzustellen. Diprose et al. konnten einen Bekämpfungserfolg von bis zu 80 % erzielen (Diprose et al. 1985).



Abbildung 12: Thermoelektrisches System links und ziehendes System rechts (Kttn News 2020; Simard et al. 2019)



Abbildung 13: Abschneiden der Samenstände mithilfe von Messerbalken
 Links: Messerbalken mit Bunker zur Aufnahme der abgeschnittenen Samenstände (Zürn Harvesting GmbH & Co. KG 2021). Rechts: Doppelmesserbalken (BB Umwelttechnik 2019)

10.2.6 In-Row Detektionssysteme

Alle zuvor genannten Systeme nutzen physikalische Unterschiede oder geometrische Anordnungen zwischen Kulturpflanze und Beikraut aus, um einen Bekämpfungserfolg zu erzielen. Selektiv arbeitende Systeme lokalisieren die Kulturpflanzenpositionen und versuchen gezielt, einen größtmöglichen Teil um die Kulturpflanze herum zu bearbeiten. Die aktuellen Entwicklungen am Markt lassen sich in bildverarbeitende Systeme zur Pflanzenerkennung und georeferenzierte Systeme einteilen. Beide Systeme steuern im Anschluss Aktoren an, welche das Beikraut in der Reihe entfernen.

10.2.6.1 Georeferenzierte Unkrautregulierungssysteme

Bei den georeferenzierten Systemen werden zwei Startkoordinaten festgelegt. Nach diesen Koordinaten wird das ganze Aussaatraster über die Fläche gelegt. Das Saatgut wird exakt auf den einzelnen Rasterpunkten platziert. Diese Systeme benötigen zum Erreichen dieser Genauigkeit eine eigene RTKGPS-Basisstation (Real Time Kinematic) oder ein sehr stabiles RTK-Netz.

Die wesentlichen Vorteile des Systems sind, dass eine GPS-gestützte Ablagepunktdetektion nahezu unabhängig von Umwelteinflüssen, wie beispielweise Beleuchtung und Verschattung durch zusätzliches Beikraut, ist. Für die Positionserfassung sind lediglich zwei GPS-Empfänger nötig, welche im Vergleich zur Kamertechnik deutlich preiswerter sind. Ein großer Nachteil der Systeme ist, dass durch die geforderte Ablagepräzision die Fahrgeschwindigkeit der Maschine drastisch reduziert werden muss. Das Saatgut wird nämlich über ein Zellenrad verteilt und fällt im Anschluss auf einen pneumatisch betätigten Schieber, welcher zum richtigen Zeitpunkt öffnet und das Saatkorn im Säschlitz platziert. Je höher die Fahrgeschwindigkeit des Trägerfahrzeugs ist, desto eher besteht die Gefahr für ein Verrollen der Pillen bei der Ablage. Die übliche Fahrgeschwindigkeit beträgt ca. 0,75 Km/h.

Das aktuelle System (Abbildung 14) erfordert allerdings zwingend einen Rechteckverband, wodurch in der Praxis keine Konturen oder Vorgewende angelegt werden können (FARMDROID ApS 2020)(Heinrich 14.04.20).



Abbildung 14: Sä- und Jätroboter FD 20 der Firma Farmdroid (FARMDROID ApS 2020)

Ein ähnliches System zur Aussaat bietet die Firma Kverneland mit dem Konzept Geoseed Level 2 an. Hierbei werden die einzelnen Saatkörner nach einem fest definierten Raster im Dreieck- oder Rechteckverband gedrillt (**Fehler! Verweisquelle konnte nicht gefunden werden.**). Die konventionelle Einzelkornsätechnik bietet im Vergleich zum FD 20 aufgrund der wesentlich höheren Fahrgeschwindigkeit von 6Km/h eine deutlich gesteigerte Flächenleistung. Der Vorteil des FD20 ist es, dass immer die gleiche Plattform zum Säen und Hacken verwendet wird. Dies birgt den Vorteil, dass das Abdriftverhalten, z. B. am Seitenhang, bei jeder Überfahrt immer ähnlich ist. Bei einem angebauten Gerät müssen die Positionsdaten der Rasterpunkte zuerst auf die Hackmaschine übertragen werden. Hierfür müssten zuerst die passenden Schnittstellen geschaffen werden. Bei größeren Abständen besteht die Möglichkeit auch quer zur Fahrtrichtung zu hacken. Bei Abständen von 20 cm ist dies aber nur bedingt möglich. Wird beim „Kreuz-und-quer-Hacken“ zuerst in Fahrtrichtung und im Anschluss quer zur Fahrtrichtung gehackt, ist eine optimale Einstellung der Hackwerkzeuge nur sehr schwer realisierbar, da die Fahrspuren und Rübenreihen kaum eine ruhige Werkzeugführung erlauben (Fösten KG). Versuche von Allmannsbeck im Raster 45 cmx45 cm und 50 cmx20 cm bestätigen die unzureichende Werkzeugführung (Heinrich 16.07.21).

10.2.6.2 Kamerabasierte Unkrautregulierung innerhalb der Pflanzenreihe

Alternativ zu den georeferenzierten Verfahren können Pflanzen auch optisch geortet werden. Konventionelle Bildverarbeitungssysteme ohne neuronale Netzwerke sind nur in der Lage einzelne Kulturpflanzen zu separieren, solange sich die Blätter der einzelnen Kulturpflanzen nicht gegenseitig berühren (Abbildung 15) (Heinrich 2018). Ein Großteil der aktuell eingesetzten Selektivhacken am Markt versucht nur über Grün/Braun oder Nahinfrarot die Blätter vom Boden zu trennen (Müter). Zuerst wird mithilfe eines Farbfilters versucht Vordergrund und Hintergrund zu trennen. Aus dem entstandenen Binärbild wird im Anschluss das Hintergrundrauschen entfernt. Mithilfe der Binärbildanalyse werden nun die geometrischen Eigenschaften der einzelnen Objekte bestimmt. Als geometrische Filter werden häufig der maximale geometrische Durchmesser und der Schwerpunkt des jeweiligen Binärobjektes genutzt. Die aus der Bildverarbeitung gewonnenen Daten werden statistisch analysiert und im Anschluss als Koordinaten an das Werkzeug weitergegeben. Diese Systeme machen es sich zunutze, dass die Kulturpflanze eine andere Farbe oder einen Größenunterschied gegenüber dem Beikraut besitzt.

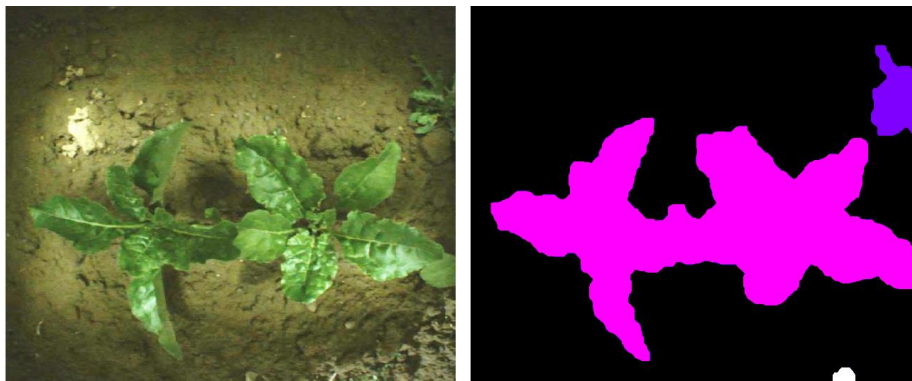


Abbildung 15: Ein mit der klassischen Binärbildanalyse schwierig auszuwertendes Bild bei sich gegenseitig überlappenden Pflanzen (Müter)

Die beiden bereits etablierten kamerabasierten Systeme werden als Frontanbaugerät (Abbildung 16) oder als Heckanbaugerät an den Traktor angebaut (Abbildung 17). Bei der Frontversion ist die Maschine über einen Verschieberahmen mit dem Traktor gekoppelt. Im Arbeitseinsatz wird die Hacke über die beiden Sechräder gelenkt, der Verschieberahmen befindet sich dann in Schwimmstellung. Die Kamera ist in einer Höhe von ca. 1,7 m montiert und weist eine Erfassungsbreite von ca. 2 m auf (Heinrich 04.05.2019). Es handelt sich um eine Farbkamera mit Gigabit-Ethernet-Schnittstelle. Durch die Neigung der Kamera wird das Erfassungsfeld der Kamera verlängert, die entstandene perspektivische Entzerrung muss aber im Vorfeld der Bildverarbeitung korrigiert werden.



Abbildung 16: Robocrop InRow Weeder im Frontanbau mit gelenkten Sechrädern (Garford Farm Machinery Ltd 2021)

Die Rotoren des Garford Robocrop InRow Weeder in Abbildung 16 werden hydraulisch angetrieben. Ein Encoder zwischen Hydraulikmotor und Werkzeug übernimmt die Positionserfassung der Werkzeuge. Die gesamte Ölversorgung läuft über ein doppelwirkendes Steuergerät und einen drucklosen Rücklauf. Als alternative Lösung zur hydraulischen Variante wird noch eine elektrische Variante angeboten. Hierbei werden die hydraulischen Antriebe durch bürstenlose 42-Volt-Gleichstrommotore ersetzt. Zur Energieversorgung muss im Heck ein Zapfwellenaggregat montiert werden. Durch die separate Aufhängung der Rotoren am Parallelogramm lässt sich der Rotor unabhängig von den starr montierten Werkzeugen justieren.

Bei IC-Weeder der Firma Steketee befinden sich die Kameras unter einer Abdeckung mit eigener externer Beleuchtung. Die Hackwerkzeuge werden mittels eines Verschieberahmens auf der Reihe geführt. Ein Nachteil dieser Konstruktion ist der geringe Arbeitsabstand der Kamera. Hierdurch entstehen bei höheren Kulturpflanzen größere perspektivische Verzerrungen. Die zusätzliche Beleuchtung unter der Abdeckung sorgt für eine homogene Ausleuchtung des Sichtfeldes. Bei niedrigen Sonnenständen besteht die Gefahr, dass Sonnenlicht unter die Abdeckung dringt und die Bilderkennung beeinflusst. Die Bildvorverarbeitung erfolgt ähnlich wie bei der Variante der Firma Garford. Zunächst werden Vordergrund und Hintergrund durch Farbfiler voneinander getrennt. Im Unterschied zum Garford Robocrop InRow werden nicht die Pflanzenmittelpunkte, sondern die detektierte Blattfläche zur Ansteuerung des Werkzeugs genutzt. Dies führt bei Pflanzendurchmessern ab 5 cm zu dem Problem, dass unterschiedliche

Durchmesser zu einer unterschiedlichen bearbeiteten Fläche führen. Das eigentliche Ziel des Hackvorganges in Rüben ist es, auch unter den Blättern arbeiten zu können ohne den Wurzelraum im Zentrum nicht zu beschädigen. Die zu bearbeitende Fläche lässt sich bei Zuckerrüben nicht so leicht aus der Blattoberfläche ableiten als beispielsweise beim Kopfsalat, der durch seine radialsymmetrische Wuchsform einen engen Bezug zwischen Blattfläche und Wurzelzentrum besitzt.



Abbildung 17: IC-Weeder im Heckanbau: Verschieberahmen und Kameras befinden sich unter der Abdeckung (Heinrich 2018)

Die Werkzeuge des IC-Weeders werden über einen pneumatischen Zylinder in die Reihe eingeschwenkt. Sie bestehen aus Sichelmessern, die über ein gelagertes Drehgelenk an den Zylindern befestigt sind. Die Prozessluft wird über einen Zapfwellenkompressor erzeugt (Abbildung 17, Abbildung 18,). Die Höhenführung der Werkzeuge erfolgt über doppelte Tasträder, welche rechts und links der jeweiligen Pflanzenreihe laufen. Die Spindelverstellung sorgt für eine werkzeuglose Verstellung der Schare. Die In-Row-Werkzeuge lassen sich aber nicht werkzeuglos und unabhängig von den anderen Hackmessern am Körper verstellen. Aufgrund des geringen Arbeitsabstandes besitzt das System bei hohen Pflanzen nur eine begrenzte Tiefenschärfe und auch die perspektivischen Verzerrungen nehmen zu. Bei tiefstehender Sonne scheint diese unter der Abdeckung durch und beeinträchtigt die Pflanzendetektion in den Randleihen. Die Positionsbestimmung erfolgt über einen Encoder am Maschinentastrad. Durch den großen Abstand zwischen Kamera und Werkzeug wirken sich geringe Änderungen des Schlupfs stark auf die Positionierung der Werkzeuge aus.



Abbildung 18: Die pneumatischen Werkzeuge des IC-Weeders schwenken über eine 90°-Bewegung in die Reihe (Maschinenfabrik Steketee B.V. 2021)

10.2.7 Inter-Row-Werkzeuge

Scharhacken werden für die Beikrautregulierung im Reihenzwischenraum am häufigsten eingesetzt. Die Werkzeughalterungen lassen sich in Gamma- und in Vibrozinken unterscheiden. Gammazinken werden überwiegend in großen Reihenabständen ab 75 cm und hochwachsenden Kulturen, wie z. B. Sonnenblumen und Mais, eingesetzt. Das System bietet durch die aggressive Zinkenstellung einen hervorragenden Einzug auch unter harten Bedingungen. Der große Scharwinkel zum Boden sorgt zusätzlich für eine intensive Durchmischung des Bodens und für einen starken Häufeleffekt in der Pflanzenreihe.

Der Vibrozinken hingegen arbeitet mit einem flacheren Einzugswinkel und sorgt durch die Konstruktion mit dem starren Stiel dafür, dass sich die Arbeitstiefe bei unterschiedlich harten Bedingungen kaum ändert. Durch das flache Unterschneiden der Unkräuter werden die Unkräuter gekappt und entwurzelt, ohne bei schmalen Hackbändern den Wurzelraum der Kulturpflanze zu beeinträchtigen. Durch den reduzierten Erdwurf ist ein genaueres Hacken an der Kulturpflanzenreihe möglich. Durch den starren Stiel lässt sich jeder Vibrozinken unabhängig

vom Reihentastrad in der Arbeitstiefe separat einstellen. Außerdem kann statt des Gänsefußscharns auch ein Winkelmesser montiert werden.



Abbildung 19: Darstellung unterschiedlicher Zinkensysteme
Links: Herkömmliche Gammazinken; Rechts: Vibrozinken (Schmotzer 2021)

10.2.8 In-Row-Werkzeugkonzepte

Zum mechanischen Entfernen der Unkräuter in der Reihe wurden bereits viele verschiedene Ansätze entwickelt. Als praxistauglich haben sich die nachfolgenden Ansätze herauskristallisiert.

Eine der einfachsten Lösungen ist es ein Hackmesser in die Reihe einzuschwenken (siehe Farmdroid FD 20, Steketee IC-Weeder, F. Poulsen Engineering Robovator). Der hydraulische, pneumatische oder elektrische Aktor schließt im Zwischenbereich und öffnet beim Erreichen der nächsten Pflanze wieder (Abbildung 20, Abbildung 18). Dieses System ist sehr preiswert in der Konstruktion und Entwicklung, da nur wenige, einfache Komponenten benötigt werden. Auch durch den Verzicht auf Proportional- oder Servotechnik ist der regelungstechnische Aufwand als gering anzusehen. Dem Maschinenkonzept sind durch diese Technik Grenzen im Bereich der Fahrgeschwindigkeit und Genauigkeit gesetzt. Durch den Einschwenkvorgang entsteht bei einer Vorwärtsfahrt keine senkrechte Bewegung zur Reihe, sondern es folgt einer Bahnkurve (Fischer 2012, S. 122; Bucher 2018). Je höher die Fahrgeschwindigkeit wird, desto weniger Fläche wird tatsächlich im Reihenzwischenraum bearbeitet (Abbildung 21).

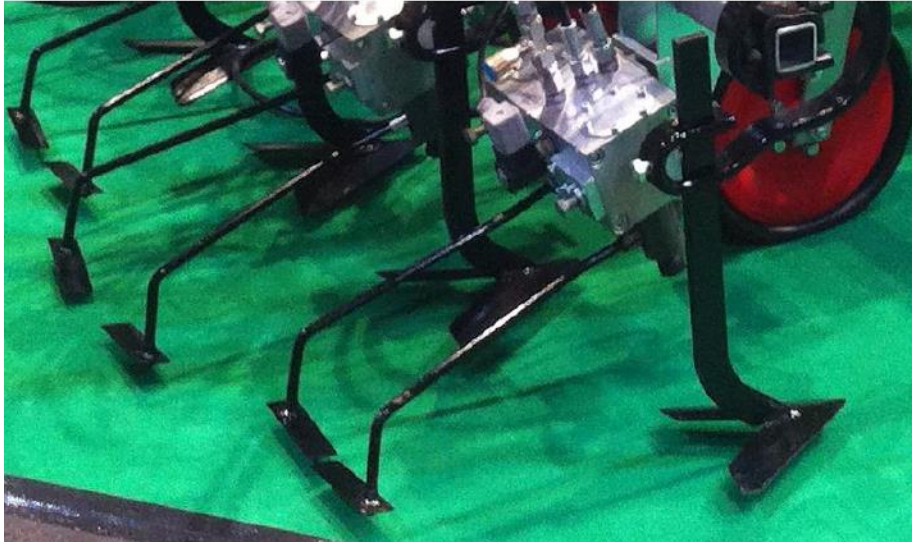


Abbildung 20: In-Row-Werkzeug des Robovators der Firma F. Poulsen Engineering (Müter)



Abbildung 21: Skizzierte Einschwenkkurve des in Abbildung 20 gezeigten Werkzeuges: Pflanzenbereich grün, Bahnkurve Aktor rot, unbearbeitete Fläche orange.

Einen anderen Ansatz verfolgt die Firma Garford (Abbildung 22). Bei ihrem Modell dreht sich die rotierende Scheibe immer genauso, dass sich die Öffnung bei jeder Umdrehung genau um die Kulturpflanze dreht. Der Vorteil hierbei ist die geringe Relativgeschwindigkeit aufgrund der Drehbewegung. Der Anspruch an die Regelungstechnik ist wesentlich größer als bei den zuvor erwähnten Aktoren, da bei diesem Konzept zum Ausführen der Rotationsbewegung entweder elektrisch angesteuerte Servomotoren oder mit Proportionalventilen angesteuerte Hydromotoren benötigt werden. Der Rotor sollte immer mit dem Ausschnitt um die Kulturpflanze drehen. Dadurch bleibt nur der Nahbereich der Kulturpflanze unbearbeitet. Die Arbeitstiefe des Rotors wird durch ein Parallelogramm geführt. Das Werkzeug kann somit immer frei nach oben ausweichen. Die untere Begrenzung wird durch eine Spindel eingestellt, welche über das Tastrad des Parallelogramms abgestützt wird.

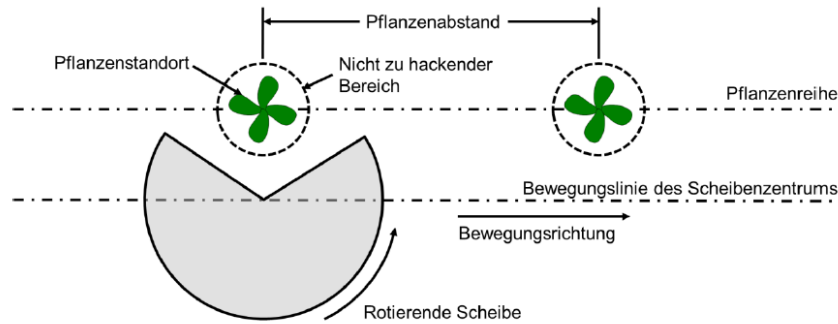


Abbildung 22: Skizze des Hackwerkzeugs der Firma Garford

Als Alternative zur rotierenden Scheibe werden auch schnell drehende Rotoren eingesetzt. Diese folgen keiner expliziten Kurvenbahn wie bei Garford, sondern versuchen eine größtmögliche Fläche zu bearbeiten (Farming Revolution GmbH 2021).

10.2.9 Regelungstechnik

Zur Übertragung der mithilfe der Kamera ermittelten Abstandparameter auf das Werkzeug wird ein leistungsstarkes Regelsystem benötigt. Das Ziel hierbei ist es immer einen Sollwert (z. B. Geschwindigkeit, Drehzahl oder Winkelposition) mittels einer Ausgangsvariablen (z. B. Tastverhältnis, Ventilöffnung, Stromaufnahme) mit möglichst geringer Abweichung zu erreichen. Der Regelkreis wird durch eine Störgröße beeinflusst und würde ohne ein ständiges Nachregeln den Sollwert nie erreichen (Paz 2001). Im einfachsten Aufbau besitzt ein Regler als Eingangsgröße den aktuellen Istwert (Y) und den Sollwert (R) (Abbildung 23). Die Differenz aus den beiden Werten ergibt die Regeldifferenz (E). Eine der in der Industrie am weitesten verbreiteten Regelungsarten ist der PID-Controller. Der Regler ist in drei Glieder aufgeteilt. Der P-Anteil ist die Verstärkung (K_p) multipliziert mit der Regeldifferenz (E). Wird der Regler als reiner P-Regler ausgeführt, kann sich der Istwert nie an den Sollwert annähern, da immer eine Regeldifferenz benötigt wird, um eine Veränderung der Stellgröße zu bewirken. Den Ausgleich der ständigen Regeldifferenz übernimmt der I-Anteil, dieser wird gebildet aus dem Integral über die ständige Regelabweichung und der Nachstellzeit (T_n). Der am schwierigsten parametrisierbare D-Anteil errechnet sich aus der Ableitung der aktuellen Regelabweichung und der Vorhaltezeit (T_v). Dieser Anteil versucht anhand der Ableitung die Entwicklung der Regelungsabweichung vorzubestimmen und durch ein aktives Gegensteuern zu minimieren. Die meisten Regler verwenden für die Integral- oder Differenzialrechnung überwiegend die verstrichene Zeit als Integrationsbereich bzw. den Differenzialbereich. Es können aber auch andere Messgrößen, wie beispielsweise die zurückgelegte Strecke zwischen zwei Regleraufrufen, genutzt werden.

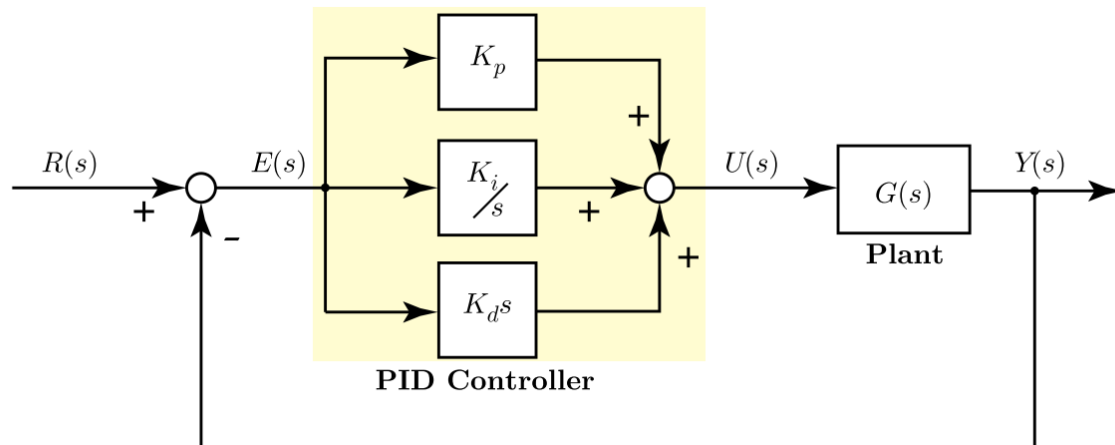


Abbildung 23: Schematischer Aufbau eines PID-Reglers in der Parameterform
 $R(s)$ Sollwert, $E(s)$ Regelabweichung, $U(s)$ Stellgröße, $G(s)$ Übertragungsfunktion Strecke, $Y(s)$ Ausgangssignal, K_p Proportionalbeiwert, K_i Integralbeiwert, K_d Differenzialbeiwert (Paz 2001)

Für die Ermittlung der zuvor genannten Regelparameter gibt es unterschiedliche Ansätze. Der präziseste Ansatz ist die Berechnung der Übertragungsfunktion. Dies stellt unter Realbedingungen eine große Herausforderung dar, da diese sich durch viele unterschiedliche Faktoren nicht immer exakt beschreiben lässt. Eine weit verbreitete alternative Herangehensweise ist die Verwendung von Faustformeln zur Ermittlung der optimalen Parameter. Dabei finden häufig die Einstellregeln nach Ziegler und Nichols Anwendung: Nach dem Wendetangentenverfahren müssen lediglich die Verstärkung (K), die Verzugszeit (T_u) und die Ausgleichszeit (T_a) ermittelt werden (Abbildung 24, Abbildung 25). Die Parameter werden mithilfe einer Sprungantwort zwischen zwei repräsentativen Ansteuerpunkten ermittelt (Ziegler und Nichols 1942).

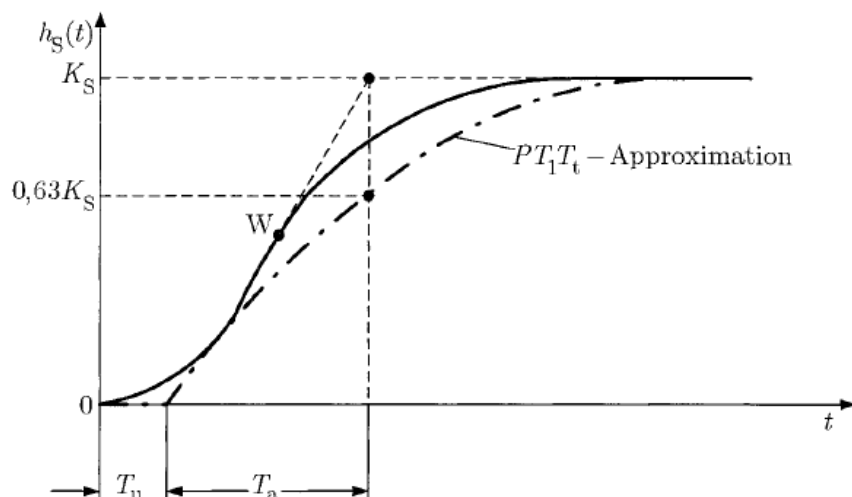


Abbildung 24: schematische Darstellung des Wendetangentenverfahrens nach Ziegler und Nichols
 K_S =stationäre Verstärkung, T_u = Verzugszeit, T_a = Ausgleichszeit (Unbehauen 2008)

Regler- typ	Reglereinstellwerte		
	K_p	K_I	K_D
P	$1/K_s \times T_n/T_u$	–	–
PI	$0,9/K_s \times T_n/T_u$	$3,33 T_u$	–
PID	$1,2/K_s \times T_n/T_u$	$2 T_u$	$0,5 T_u$

Abbildung 25: Ermittlung der Reglerparameter anhand der in Abbildung 24 gemessenen Werte. (Ziegler und Nichols 1942)

10.2.10 Hydraulik

Zur Übertragung der Reglerstellgrößen (Abbildung 25) in eine rotierende oder lineare Bewegung wird im Mobilbereich häufig ein hydraulisches Antriebssystem verwendet. Dieses besteht im einfachsten Fall aus einer Pumpe und einem Motor. Zur Beeinflussung der Drehzahl und des Drehmoments können Pumpen oder Motore mit Verstellung eingesetzt werden. Alternativ zur Hubverstellung können auch mithilfe von Proportionalventilen die Ölmengen geregelt werden. Dies bedeutet aber immer einen Druckverlust am Ventil und somit einen Energieverlust, der überwiegend in Form von Wärme an das Fluid abgegeben wird. Mithilfe eines Load-Sensing-Systems lassen sich die anfallenden Differenzdrücke am Proportionalventil reduzieren, da immer nur der maximal benötigte Systemdruck zum Antreiben des Aktors bereitgestellt wird. Für schnelle Regelungssysteme stößt die lastfühlende Hydraulik an seine Grenzen, da das Ausschwenken der Pumpe zu viel Zeit in Anspruch nimmt. Das Konstantdrucksystem bietet hierbei die Alternative, immer einen gleich hohes Druckniveau zur Verfügung zu stellen. Somit besteht nicht die Gefahr, dass bei Minderdruck die Verstellpumpe nachregeln muss. Der größte Nachteil ist, dass sich dieses System nach dem höchsten Betriebsdruck im System orientiert. Liegt dieser Druck weit über dem benötigten Druck, wird ein großer Anteil der Energie ungenutzt als Wärme abgeführt.

Zur Regelung der Ölmenge am Aktor werden überwiegend Proportionalschieberventile eingesetzt. In der einfachsten Ausführung besteht das Ventil aus einem Proportionalmagneten, welcher je nach Stärke des Magnetfeldes den Kolben im Gehäuse auslenkt. Die Induktivität der Spulen wird ausgenutzt, um mittels Pulsweitenmodulation einen zum Tastverhältnis proportionalen Ölfluss zu generieren. Für unterschiedliche Anwendungen werden die Kolben mit verschiedenen Kennlinien gefertigt. Häufig werden lineare, progressive oder differential-progressive Kennlinien verwendet (Abbildung 26).

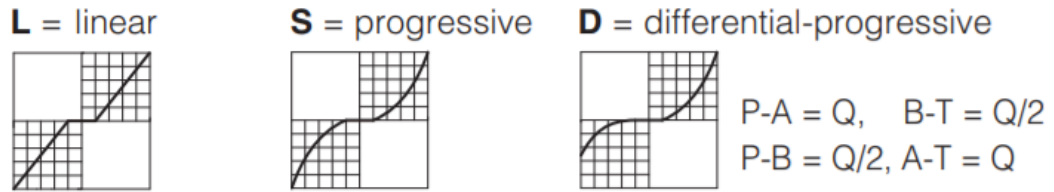


Abbildung 26: Ventilkennlinien (Bauer 1992a)

Im primitivsten Fall bestehen diese Ventile aus Magnet, Kolben und Gehäuse. Für Closed-Loop-Anwendungen kann noch eine zusätzliche Kolbenpositionsmessung integriert werden, diese ist aber nicht zwingend erforderlich. Aufgrund der unkomplizierten Konstruktion sind proportionale Schieberventile sehr kostengünstig zu produzieren und durch größere Toleranzen im Vergleich zu Servoventilen wenig anfällig gegenüber Verschmutzungen. Durch die hohe Induktivität der Magnete ist die Ansprechzeit eines Schieberventils mit ca. 30 ms wesentlich höher als ein vergleichbares Servoventil mit 5 ms und der gleichen Ölleistung (Atos spa 2021; Moog GmbH 2021).

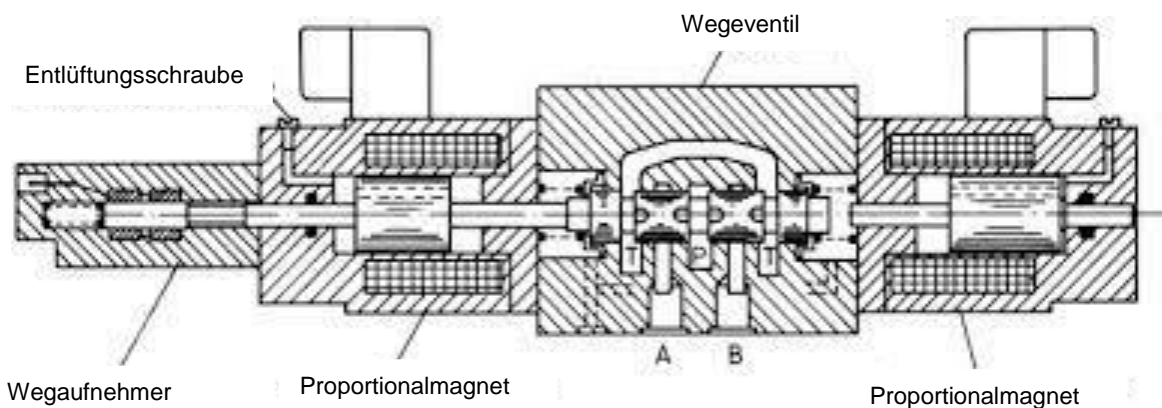


Abbildung 27: Schematischer Aufbau Proportionalventil mit Kolbenpositionsmessung (Bauer 1992b)

Zur Umwandlung der hydraulischen Leistung in eine rotierende Bewegung werden Gerollermotoren verwendet. Diese zeichnen sich durch ein hohes Drehmoment auch bei niedrigen Drehzahlen aus und halten dank integrierter Leckölleitungen große Drücke abtriebsseitig stand. Somit kann der Motor über beide Ventilsteuerkanten geregelt werden und auch tankseitig am Motor sowohl gebremst als auch beschleunigt werden. Dies führt zu einer kürzeren Regelstrecke, als wenn nur vorlaufseitig gedrosselt würde. Ein Nachteil der Gerollermotoren

ist, dass sie konstruktionsbedingt durch die einzelnen Orbitrole einen leicht pulsierenden Ölfluss besitzen. Daher ist für eine gleichmäßige Drehbewegung im niedrigen Drehzahlbereich eine präzise und schnelle Regelung erforderlich (Abbildung 28).

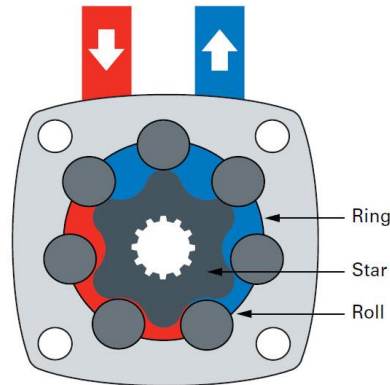


Abbildung 28: Schematischer Aufbau Gerollermotor (Eaton 2021)

10.2.11 Grundlagen der klassischen Bildverarbeitung

Der grundlegende Aufbau eines Bildverarbeitungssystems ist immer sehr ähnlich. Zunächst wird der Sensor der Kamera für eine bestimmte Zeit belichtet. Die durch den fotoelektrischen Effekt entstandenen Spannungsniveaus werden im Anschluss durch einen Analog/Digital-Wandler ausgelesen und in digitale Helligkeitswerte übersetzt. Üblicherweise werden die Helligkeitswerte in 8-, 10- oder 12-Bit dargestellt. Diese Informationen können nun unterschiedlich als Graubild oder als Farbbild interpretiert werden. Um ein Farbbild interpretieren zu können, muss auf dem Chip ein Farbfilter montiert sein und die ausgelesenen Helligkeitswerte müssen mithilfe eines Debayering-Verfahrens in Farbinformationen übersetzt werden. In der Bildvorverarbeitung kann mittels verschiedener Filter das Rauschen unterdrückt werden. Auch geometrische Entzerrungen können vorgenommen werden. Im nächsten Schritt wird nun versucht, anhand verschiedener Schwellenwerte oder dynamischer Operatoren das Bild in unterschiedliche Segmente aufzuteilen. Der bekannteste Fall ist die Vordergrund-Hintergrund-Trennung. Die entstandenen Binärobjekte können nun auf ihre geometrischen Eigenschaften untersucht werden. Die gewonnenen Informationen dienen im Anschluss dazu, Entscheidungen für die weiterführenden Prozesse zu treffen. Im industriellen Umfeld werden diese Systeme häufig zur Qualitätskontrolle und Dokumentation eingesetzt. Durch die Entwicklung schnellerer Algorithmen und den Einsatz effizienter Hardware lassen sich mittlerweile auch Regelsysteme wie beispielsweise Spurhalteassistenten realisieren. Hierfür ist eine Implementierung unter Echtzeitanforderungen notwendig, da sonst fest definierte Zykluszeiten nicht eingehalten werden können.

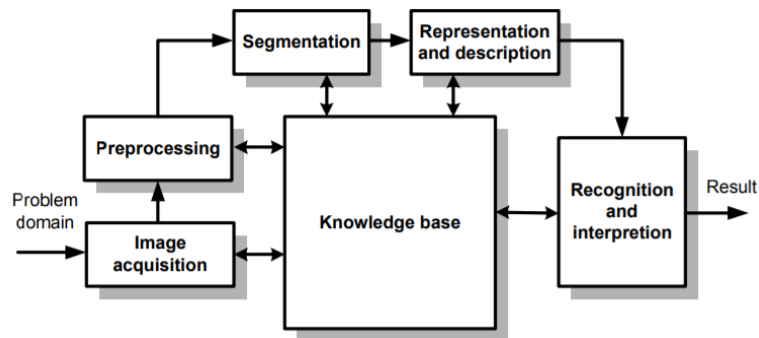


Abbildung 29: Grundkomponenten der Bildverarbeitung (Department of Electronic and Information Engineering 2021)

10.2.12 Einzelpflanzendetektion mittels klassischer Bildverarbeitung

10.2.12.1 Vordergrund-Hintergrund-Trennung

Eine weit verbreitete Methode zur Trennung der Pflanzen vom Hintergrund ist der Farbraumtransfer eines RGB-Bildes mit den drei Farbkanälen (rot, grün, blau) in den HSL-Farbraum (Abbildung 30). Dort werden die Farben nicht als Mischung aus den einzelnen Primärfarben dargestellt. Die einzelnen Kanäle beschreiben den Farbton, die Sättigung und die Helligkeit. Dieser Farbraum ist deutlich besser für Farbtrennungsaufgaben geeignet, weil der Farbton im Idealfall unabhängig von der Helligkeit dargestellt wird.

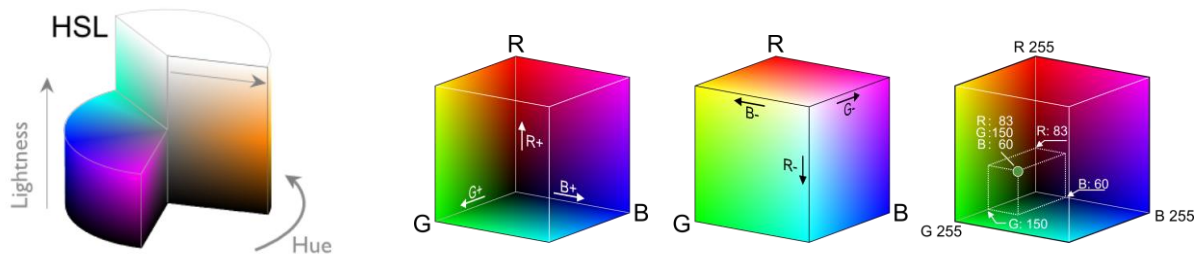


Abbildung 30: Darstellung der verwendeten Farbräume: zylindrisches HSL-Farbraummodell (links) und RGB-Farbraum (rechts) R = rot, G = grün, B = blau (Wisotop 2017)

Die zunächst versuchten Ansätze, die Trennung über einzelne Farbkanäle durchzuführen, erzielten keine brauchbaren Ergebnisse. Der Differenzbildansatz erwies sich deutlich robuster im Gegensatz zu rein auf sichtbarem Licht basierenden Versuchen (Oebel 2006). Die in den Versuchen eingesetzten Bi-Spektralkameras zeigen sehr gute Erkennungsraten bei der Unterscheidung von toter und lebender Biomasse (Abbildung 31).

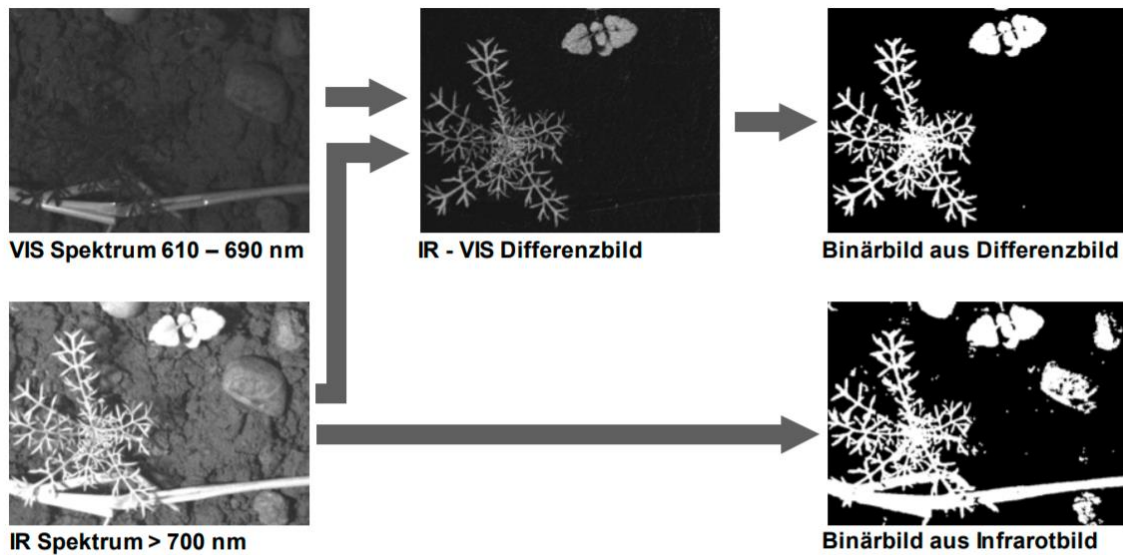


Abbildung 31: Pflanzenidentifikation anhand eines Differenzbildes: VIS-Spektrum = roter Farbkanal des Farbbildes, IR Spektrum = Nahinfrarotkanal der Kamera (Oebel 2006)

10.2.12.2 Reflexionsverhalten unterschiedlicher Pflanzenarten

Einzelne Unkräuter lassen sich sogar anhand unterschiedlicher Reflexionseigenschaften in bestimmten Wellenlängenbereichen differenzieren. Der Ansatz funktioniert jedoch nur unter konstantem Umgebungslicht. Eine Anwendung unter Praxisbedingungen ist somit nur sehr schwer möglich, da Sonnenlicht und Schatten die Messung zu sehr verfälschen würden (Biller 2008). Eine deutliche Verbesserung könnte die Messung der aktuellen Beleuchtungsstärke im Erfassungsbereich beitragen.

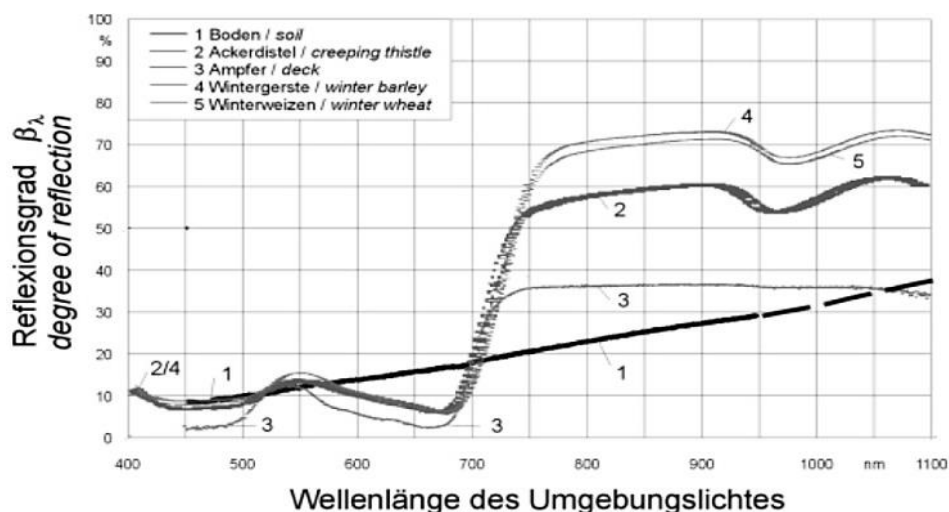


Abbildung 32: Reflexionsverhalten unterschiedlicher Unkräuter in Abhängigkeit von der Wellenlänge des Umgebungslichtes (Biller 2008)

10.2.12.3 Detektion des Pflanzenmittelpunkts mithilfe der Blattachse

Mit dem Skelettierungsverfahren gibt es eine Möglichkeit, die Blattachse und die Struktur des Blattes aus der Außenkontur herauszufiltern (Abbildung 33). Hier wird zuerst das Originalbild mittels eines Schwellenwertverfahrens in ein Binärbild umgewandelt. Die Außenkontur des Binärobjektes dient als Grundlage für das nachfolgende Skelettierungsverfahren. Die dabei entstandenen Linien werden nun solange angenähert, bis die Kontur nur noch 1 Pixel breit ist. Die entstandene Struktur beschreibt nun den berechneten Verlauf der Blattachsen und nicht den tatsächlichen, da die Mittelrippe unbeachtet bleibt (Hall 2018). Bei gedrehten oder sich überlappenden Blättern stößt das System an seine Grenzen, hierfür müsste die Analyse im dreidimensionalen Raum durchgeführt werden.

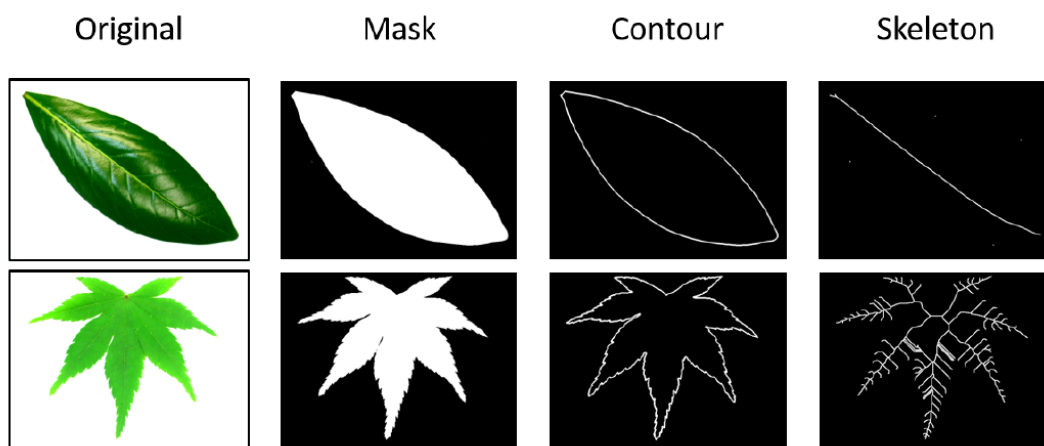


Abbildung 33: Skelettierungsverfahren zur Detektion der Blattachsen (Hall 2018)

Langer et al. versuchten durch Zerlegung der Pflanze in die einzelnen Blätter mithilfe der Blattachse den Mittelpunkt zu detektieren. Zusätzlich wurde noch zur Verbesserung der Ergebnisse der Verknüpfungspunkt zwischen den einzelnen Binärflächen (Blätter) detektiert. Mithilfe der Kombination der beiden Verfahren, konnte eine wesentliche Verbesserung im Vergleich zu klassischen Schwerpunktbestimmungsverfahren erzielt werden. Die Grenzen des Systems werden auch hier bei sich gegenseitig berührenden Blättern erreicht (Langer et al. 2018).

Meil und Glasbrenner beschreiben genau wie Heinrich, dass für eine erfolgreiche Unkrautbekämpfung nicht die Detektion der Nutzpflanze entscheidend ist, sondern die Ermittlung des Wurzelraumes. Meil und Glasbrenner nutzen für die Detektion des Wurzelraumes die Schnittpunkte der Blattstiele einer Pflanze, wohingegen Heinrich und Köller die Detektion der Blattspreite nutzen. (Meil und Glasbrenner 2019; Heinrich 2018)

10.2.13 Neuronale Netze zur Pflanzenklassifizierung

Die Pflanzendetektion mit neuronalen Netzen zeigt einen neuen Trend beim maschinellen Sehen auf. Versuche an der Universität Bonn erreichen Erkennungsraten von über 90 % (Lottes et al. 2018b). Ergebnisse zu sich gegenseitig überlappenden Pflanzen liegen nicht vor. Ein

Nachteil neuronaler Netze ist die schlechte Nachvollziehbarkeit und Parametrierbarkeit. Somit kann der Anwender nur sehr wenig Einfluss auf das Erkennungssystem nehmen. Der große Vorteil dieser Netze ist, dass Daten mit vielen Dimensionen sehr gut kategorisiert werden können. Aus diesem Grund werden diese Systeme sehr häufig auch für Klassifizierungsaufgaben eingesetzt (Oebel 2006, S. 40). Beim Wechsel auf unterschiedliche Kamerasysteme oder andere Kulturpflanzen müssen die Systeme neu trainiert werden, welches einen Großteil der Hauptentwicklungsaufgabe einnimmt.

Lottes et al. nutzen für ihre Mittelpunkt- und Pflanzenbestimmungen faltende neuronale Netze. Zunächst werden die Bilder in die einzelnen Farbkanäle Rot, Grün, Blau und Nahinfrarot aufgetrennt und mit einem Gauß-Filter geglättet. Über anschließende Faltungsoperationen werden die Daten reduziert. Die verarbeiteten Daten werden im Anschluss wieder dekodiert und auf das Pixelformat des Ausgangsformates ausgedehnt. Das entstandene „Stem-Layer“ gibt die Mittelpunkte aller detektierten Pflanzen zurück, wohingegen das „Plant-Layer“ die einzelnen Blattoberflächen in Kultur, Monokotyledonen und Dikotyledonen unterscheidet und einfärbt.

10.2.14 Statistische Klassifikatoren zur Kulturpflanzenunterscheidung

Statistische Verfahren bieten eine weitere Möglichkeit zur Differenzierung zwischen Kulturpflanze und Unkraut. Der grundlegende Ansatz ist, morphologische Eigenschaften mit einer Wissensdatenbank abzugleichen und den zu detektierenden Objekten zuzuordnen. Fuzzy-Klassifikatoren versuchen für jedes morphologische Merkmal separat eine prozentuale Zugehörigkeit zu einer Unkrautklasse zu ermitteln. Der Anwender kann jeweils die Gewichtungen der einzelnen Formfaktoren beeinflussen. Nach dem Prinzip der minimalen Distanz werden die morphologischen Eigenschaften der Binärobjekte mit einer Wissensbasis abgeglichen und die Quadrate der Abweichungen berechnet und addiert. Je geringer die Distanz zwischen den einzelnen Pflanzengruppen aus der Wissensbasis und dem detektierten Binärobjekt ist, desto größer ist die Wahrscheinlichkeit, dass es sich um die gleiche Pflanzenart handelt (Oebel 2006).

10.2.15 Vergleich unterschiedlicher Hardwarearchitekturen

Zur effizienten Verarbeitung von Bilddaten gibt es unterschiedliche Ansätze. Bei der einfachsten und flexibelsten Methode laufen die Algorithmen auf einer CPU ab. Für große Bildarrays, bei denen für jedes Element immer die gleichen Rechenschritte verwendet werden, ist eine sequenzielle Verarbeitung auf der CPU sehr energie- und zeitaufwendig. Ein besserer Ansatz ist es, die rechenintensive Verarbeitung auf spezialisierte Prozessoren wie z.B. die Grafikkarte auszulagern. Diese ist aufgrund ihrer parallelierten Struktur in der Lage große Arrays zeitgleich zu verarbeiten. Eine weitere Spezialisierung ist der Einsatz von Field Programmable

Gate Arrays (FPGAs). Diese arbeiten im Vergleich zu den beiden zuvor genannten Systemen nicht als Prozessor, sondern wie ein integrierter Schaltkreis. Das Programm muss in einer Hardwarebeschreibungssprache wie beispielsweise HDL geschrieben werden. Die HDL-Programmierung ist aufgrund der höheren Komplexität wesentlich aufwendiger als die Implementierung desselben Algorithmus auf einer CPU oder GPU. Das Programm des FPGAs muss geladen werden, das bedeutet, dass die Struktur während des Betriebes nicht geändert werden kann. Der große Vorteil dieser Systeme ist, dass sie sehr energieeffizient und schnell arbeiten, auch sind sie als Serienkomponenten deutlich günstiger als die Prozessoren. Für den serienmäßigen Einsatz von Bildverarbeitungssystemen ist eine effiziente und hardware-nahe Programmierung unabdingbar.

11 Aufgabenstellung

Das Ziel der vorliegenden Arbeit ist es, ein voll praxistaugliches Selektivhacksystem zu entwickeln, das in der Lage ist, die Zuckerrüben vom Keimblattstadium (EC 11) bis zum beginnendem Reihenschluss (EC 31) in der Pflanzenreihe zu hacken.

Hierzu werden nachfolgende Forschungsfragen bearbeitet:

- Mit welcher Aussaattechnik kann die Pflanzenerkennung so verbessert werden, dass unter schwierigsten Umweltbedingungen noch eine Identifikation als Nutzpflanze möglich ist?
- Wie kann der Mittelpunkt der Einzelpflanze auch bei sich gegenseitig berührenden Blättern noch exakt bestimmt werden?
- Welcher mechanische Aufbau ist nötig, um einen bestmöglichen Unkrautregulierungseffekt zu erzielen?
- Mit welchen Methoden kann die Flächenleistung erhöht werden, ohne die Pflanzen zu verschütten oder zu beschädigen?

Die Methoden zur Lösung der Problemstellung lassen sich in folgende drei Hauptgebiete unterteilen: statistische Detektion des Aussaatrasters, Detektion der Blattader und Entwicklung eines schräg zur Fahrtrichtung arbeitenden Rotors (Abbildung 34). Gleichzeitig mussten zur Bearbeitung der einzelnen Fragestellungen immer wieder neue Maschinenträger und Prüfstände entwickelt werden.



Abbildung 34: Unterteilung der Entwicklungsarbeit in die drei Kernbereiche

Durch die Entwicklung eines Anbaugerätes für einen Traktor entsteht der Vorteil, dass die bereits vorhandene Peripherie, wie z. B. Hydraulikversorgung, Isobus und Fahrtrieb, des Traktors genutzt werden kann. Für die Entwicklung einer autonomen Plattform wäre hingegen eine komplette Neuentwicklung eines Chassis notwendig gewesen. Zur praxistauglichen Nutzung ist es unverzichtbar, eine selbstfahrende Hackmaschine mit einer Kabine zu entwickeln. Der Bediener sollte immer die Möglichkeit besitzen, die Maschine komfortabel beobachten und bedienen zu können. Eine autonome Plattform, wie z. B. Dino von NAIO Technologies, ohne Kabine stellt in diesem Fall keine praxistaugliche Lösung dar. Auch sind bei den zuvor genannten Maschinen die Antriebsleistungen von wenigen Kilowatt für eine 6–9 m breite Hackmaschine viel zu gering. Der Fokus der Arbeit sollte auf der Entwicklung der Bildverarbeitung und der Steuerungstechnik liegen.

Die Bildverarbeitung sollte mit einer hohen Präzision die Standorte der einzelnen Kulturpflanzen unter unterschiedlichsten Beleuchtungs- und Wachstumsszenarien zuverlässig erkennen. Mithilfe eines Algorithmus wird anhand der gefundenen Pflanzenpositionen die optimale Bahnkurve für das Werkzeug berechnet. Diese sollte im Anschluss mit größtmöglicher Genauigkeit von den Aktoren umgesetzt werden, um eine höchstmögliche Flächeneffizienz zu erreichen.

Projektverlauf

Zeitplan

Der untenstehende Zeitplan zeigt die ursprüngliche Vorgehensweise. Aufgrund der verzögerten Genehmigung des Antrages durch die Bewilligungsstelle verschob sich der Projektbeginn um fast 6 Monate nach hinten.

		2018				2019												2020												2021			
AP	AP-Beschreibung	8	9	10	11	12	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	1	2	
1	Vorbereitungsphase	■	■	■	■	■	■																										
	Anlegen von Testdatensets	■	■					■		■		■		■							■		■		■		■						
	Erstellen von Testdatensätzen			■	■																												
	Test der Hardwarekomponenten				■	■	■																										
2	Aufbau 1. Versuchsträger							■	■	■	■																						
	Entwickeln eines Versuchsträger							■																									
	Entwickeln der Kameraansteuerung								■																								
	Entwickeln manuelle Steuerung für Werkzeug									■	■	■																					
3	Entwickeln der Pflanzenerkennung												■	■	■	■	■	■															
	Vordergrund Hintergrund Trennung												■																				
	Belichtungssteuerung Kamera													■																			
	Erkennung des Aussaatverbandes														■																		
	Analysieren der Blatteigenschaften															■																	
	Machine Learning zur Kulturpflanzenerkennung																■																
	Einzelpflanzenbewertung																	■															
4	Aufbau praxisreifer Prototyp																					■	■	■									
	Hydraulikkonzept																					■											
	Werkzeugansteuerung																						■										
	Werkzeugträger																						■										
	Software in embedded Software umwandeln																							■									
5	Testen des Prototyps unter Praxisbedingungen																							■	■	■	■	■	■				
	Überprüfung der Erkennungsrate																							■									
	Testen des Einsparpotential																								■								
	Testen der Wirksamkeit																									■							
	Prüfen der Arbeitsleistung																										■	■	■				
6	Abschlussphase																																
	Auswertung der Versuchsergebnisse																													■	■	■	
	Entwickeln eines Praxisleitfadens																														■	■	
	Verfassen der Dissertation																														■	■	

12 Projektergebnisse

12.1 Darstellung der Ergebnisse

12.1.1 Ablagegenauigkeit der Sämaschine

Wichtig für eine genaue Lokalisation der Zuckerrüben in der Reihe ist, dass die Drillmaschine die Rübenpillen genau auf den vorgesehenen Rasterpositionen ablegt. Die Überprüfung der Standraumverteilung ergab, dass alle abgelegten Pillen sich bis auf $\pm 1,5$ cm genau auf den Rasterpositionen befinden (Abbildung 35, Abbildung 36). Dies bedeutet für das Werkzeug, dass dieses nur so breit sein kann wie der minimale Abstand zwischen zwei Pflanzen. Dieser beträgt, abzüglich des Schutzbereiches vor und hinter dem Messer, bei einem Abstand in der Reihe von 20 cm somit theoretisch 17 cm.



Abbildung 35: Ermittlung der Standraumverteilung in Fahrtrichtung: Zahnstocher markieren die Pillenpositionen, weißer Bindfaden markiert die Sollposition

Bei lockeren und tief vorbereiteten Böden besteht die Gefahr bei Sägeräten mit Nullablage, dass der Säkeil einfällt, bevor die Rübenpille in den Schlitz fällt. Die Ursache dafür ist bauartbedingt, denn die Pille kann aufgrund der Flugbahn nicht unmittelbar hinter dem Säschar in den Schlitz fallen, sondern trifft je nach Fahrgeschwindigkeit und Fallhöhe erst 3–10 cm hinter dem Schar in den Schlitz. Dieses Risiko besteht auch bei Mulchsaatsystemen, wenn die Schneidscheibe tiefer als das Säschar läuft und somit keinen standfesten Säkeil mehr ausformen kann, denn die tiefer laufende Sechscheibe schneidet den festen Unterboden auf. Da das Säschar im ungünstigsten Fall etwas höher als die Schneidscheibe läuft, kann lockerer Oberboden von oben nachrieseln und unter das Schar fließen. Die Pille wird dann nicht im Schlitz abgelegt, sondern einige cm höher. Liegt die Pille im Trockenen, kann dies zu ungleichmäßigen Feldaufgängen führen.

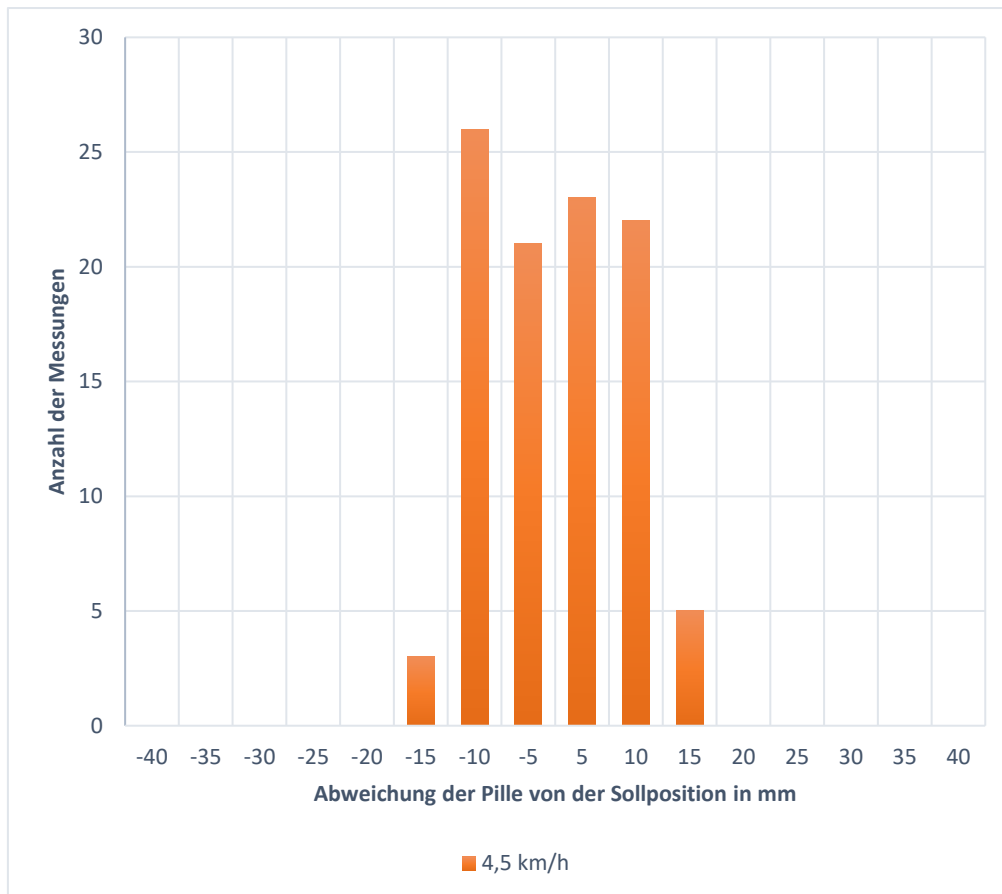


Abbildung 36: Standardraumverteilung der Zuckerrüben (5 Loch-Vereinzelungsscheibe, Fahrgeschwindigkeit 4,5 km/h, n=100)

12.1.2 Analyse der Handhacke

Beim Hacken von Hand werden je nach Unkrautbesatz und Pflanzengröße unterschiedliche Methoden angewendet. Im ersten Durchgang wird der Nahbereich um die Rübe komplett in zwei Zügen bearbeitet. Durch Schrägstellen des Hackmessers wird die Arbeitsbreite des Messers genau dem Abstand zwischen den zwei Pflanzen angepasst, um einen maximalen Regulierungseffekt zu erreichen. Eine geschärfte Klinge sorgt für einen geringen Eindringwiderstand und ermöglicht somit ein ermüdungsarmes Arbeiten. Unter feuchten Bedingungen verklebt das Werkzeug und muss regelmäßig gereinigt werden. Werden die Pflanzen in zwei Zügen bearbeitet, benötigt ein erfahrener Arbeiter nach eigenen Ermittlungen im Schnitt 2,3 Sekunden pro Pflanze (n=200). Beim zweiten Durchgang wird keine vollflächige Bearbeitung um die Kulturpflanze mehr durchgeführt. Dieser findet in der Regel bei EC 22 statt. Bei diesem und den nachfolgenden Durchgängen werden nur noch gezielt die Beikrautpflanzen entfernt. Beim ersten Hackdurchgang bearbeitet jeder Mitarbeiter eine Reihe pro Durchgang; bei den nachfolgenden je nach Unkrautbesatz zwei bis vier Reihen. Beim letzten Durchgang wird das Unkraut

überwiegend von Hand ausgezogen, da sich dieses meistens im Nahbereich der Zuckerrübe befindet und daher nicht mit der Hacke entfernt werden kann.



Abbildung 37: Einsatzszenarium bei der Handhacke: Hoher Unkrautdruck direkt an der Kulturpflanze (links), Arbeitsposition des Werkzeuges beim ganzflächigen Einsatz (rechts)

12.1.3 Beurteilung der einzelnen Versuchsträger

Für die Entwicklung eines geeigneten Systemträgers wurden die einzelnen Aufbausysteme getestet und Rückschlüsse für die weitere Entwicklung gezogen. Bewertet werden insbesondere das Arbeitsergebnis des Werkzeuges, das Lenkverhalten und der Unkrautregulierungseffekt.

12.1.4 Anbau des Rotors an die Verschieberahmenhacke

Bei den Versuchen wurde festgestellt, dass bei eingeschaltetem Verschieberahmen das Tastrad sich während des Verschiebevorgangs langsamer dreht, als wenn der Verschieberahmen im Stillstand ist (Abbildung 38). Durch die laufende Veränderung des Schlupfs, kann somit

die exakte Pflanzenposition nicht mehr bestimmt werden. Dies ist für eine präzise Rotorregelung aber zwingend erforderlich. Aus diesem Grund müssen andere Möglichkeiten zur exakten Erfassung der Position und der Geschwindigkeit untersucht werden. Zur Lösung dieses Problems, wird im Anschluss die Geschwindigkeitserfassung an die Kardanwelle für den Allradantrieb des Traktors gekuppelt. Dadurch wird die Fahrgeschwindigkeit bei eingeschalteter Kuppelung über alle vier Antriebsräder des Traktors mechanisch gemittelt. Lenkbewegungen haben nur noch einen geringen Einfluss, da diese über die Differenziale ausgeglichen werden. Bei Arbeiten am Hang muss der Schlupf manuell nachkorrigiert werden.

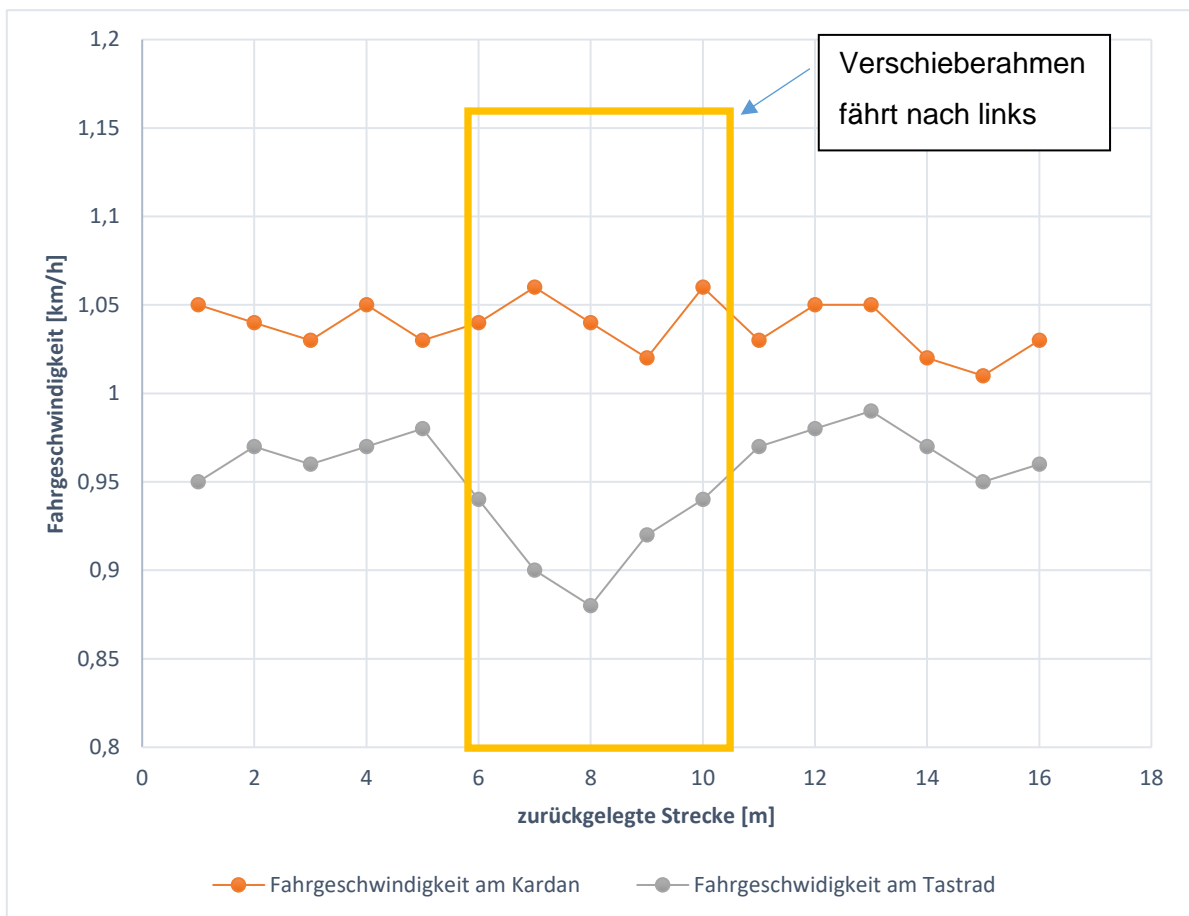


Abbildung 38: Vergleich unterschiedlicher Messmethoden zur Aufzeichnung der Fahrgeschwindigkeit (Fahrgeschwindigkeit Tacho 1,0 km/h)

Korrelierend mit der Fahrgeschwindigkeit ist auch die Messung der zurückgelegten Strecke auf unebenen Untergründen in der Landwirtschaft ein bekanntes Problem. Radar, Tastrad und GPS sind nur begrenzt für Anwendungen mit Zykluszeiten unter 2 ms und niedrigen Fahrgeschwindigkeiten geeignet. Messungenauigkeiten von $\pm 3\%$ sind üblich. Für die exakte Führung des Rotors zwischen den Pflanzen ist es unerlässlich, die Position bzw. die exakte Fahrgeschwindigkeit der Maschine messen zu können. Ein Abstand zwischen Kamera und Werkzeug von 1 m würde bei einem Schlupf von nur 1 % einen Positionierungsfehler von 5 % zwischen

zwei einzelnen Pflanzen verursachen. 5 % entsprechen einer absoluten Genauigkeit von ± 1 cm.

12.1.5 Fronthackenkonzept

Der zweite Systemträger wird an eine modifizierte Fronthacke montiert. Dieser Anbauraum weist folgende Vorteile gegenüber dem Heckaufbau auf:

- An der Fronthackmaschine ist es möglich, alle Kameras über die komplette Maschinenbreite zu montieren, da auf den Verschieberahmen verzichtet werden kann.
- Der Fahrer besitzt optimale Übersicht über das Anbaugerät, das Arbeitsergebnis kann von der Kabine aus beobachtet werden.
- Der Verschieberahmen kann eingespart werden, somit kann das Einsatzgewicht um bis zu 1000 kg reduziert werden.

Nachteile:

- Der Traktor muss für ein Lenksystem vorbereitet sein oder werden, da entweder über eine hydraulische oder eine elektrische Schnittstelle (bspw. ISOBUS TIM) in die Traktorlenkung eingegriffen werden muss.
- Bei großen Arbeitsbreiten über 9 m wird die Vorderachse des Traktors stark belastet, da Standard-Traktoren bis 140 kW nicht für solch große Gewichte an der Fronthydraulik konzipiert sind.
- Die für den Straßentransport nötige Übersicht ist bei Arbeitsbreiten über 6 m nicht mehr gewährleistet.
- Zur Erzielung einer exakten Reihenführung ist eine direkte Lenkung mit einer hohen Reaktionsgeschwindigkeit erforderlich. Diese Lenkpräzision ist nur mittels einer aktiven Tastradlenkung erreichbar.

12.1.6 Fronthackenkonzept mit aktiver Anbaugerätelenkung

Die Erfahrungen aus den vorangegangenen Versuchen haben gezeigt, dass eine präzise Führung passiv gelenkter Fronthacke an der Pflanzenreihe nur sehr schwer möglich ist. Dies äußerte sich durch ein starkes überschwingen beim Einregeln auf die Sollspur. Das hohe Gewicht auf den Rädern der Fronthacke sorgt für ein einsinken der Räder. Um nun einen Richtungswechsel in eine andere Richtung zu ermöglichen müssen hierfür zunächst hohe Querkräfte durch den Traktor aufgebaut werden. Dieser Prozess ist aufgrund seiner langen Regelstrecke und seines unvorhersehbaren Regelverhalten nur sehr schwer zu automatisieren, da das Verhalten je nach Bodenzustand und Position des Dreipunkthubwerks variiert. Durch Ersetzen der passiv gelenkten Tasträder in der Maschine durch aktiv gesteuerte Räder, konnte

eine präzisere Führung der Maschine an der Pflanzenreihe erreicht werden, da nun die Querkräfte zum Verschieben der Maschine zur Pflanzenreihe sowohl über die Tasträder als auch über die Traktorvorderräder gleichzeitig aufgebaut und dosiert werden können.

12.1.7 Beurteilung des In-Row-Werkzeuges

Das starr montierte Werkzeug (**Fehler! Verweisquelle konnte nicht gefunden werden.**) bleibt bei zu hohem Widerstand stehen und dreht nicht mehr weiter, da das Drehmoment des Motors nicht ausreicht, um den Rotor aus dem Boden zu heben. Durch die freischwimmende Aufhängung des Rotors wird dies verhindert, denn mit der Feder lässt sich ein fest definierter Auflagedruck einstellen. Somit entlastet sich der Rotor bei zu hohem Drehmoment selbst. Durch die Drehbewegung wird der Rotor automatisch nach oben gedrückt.

Durch die schräge Anordnung (Abbildung 42) des Rotors beträgt die Relativgeschwindigkeit des Rotors zum Boden nahezu null. Der Rotor schneidet immer senkrecht Reihe zur Pflanzenreihe zwischen zwei Einzelpflanzen durch (Abbildung 39). Eine Verschüttung der Kulturpflanze, wie bei anderen Werkzeugen üblich (Fischer 2012, S. 122), konnte nicht beobachtet werden. Auch bei höheren Fahrgeschwindigkeiten bis 3 km/h findet kein Verletzen der Pflanze durch den Erdstrom statt. Das Beikraut wird durch den Rotor in den Reihenzwischenraum geschoben, und kann somit nicht mehr in der Reihe anwurzeln. Die nachfolgenden Werkzeuge können das entfernte Beikraut nochmals entwurzeln und verschütten. Der Winkel des Rotors gegenüber der Reihe ist immer abhängig vom Pflanzenabstand in der Reihe und von der Anzahl der Hackorgane am Rotor. Der Winkel muss so eingestellt werden, dass die Vorfahrtsgeschwindigkeit und die Umfangsgeschwindigkeit des Rotors in Fahrtrichtung gleich Null ist. Die Theorie nach Müter, dass durch die Schrägstellung des Rotors der Erdwurf in Fahrtrichtung reduziert werden kann, konnte bestätigt werden.



Abbildung 39: Senkrechter Schnitt durch die Pflanzenreihe verursacht durch schräg gestellten Rotor

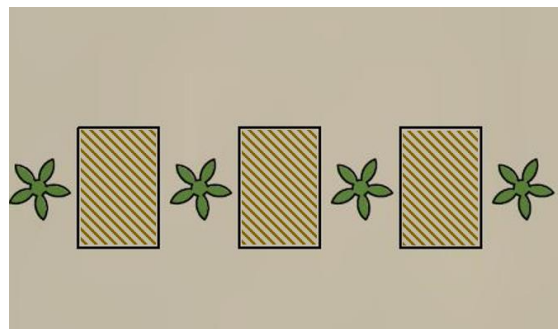


Abbildung 40: Schnittbild des Rotors (schematische Darstellung: schraffierte Rechteck verdeutlicht die bearbeitete Fläche)

Die Grundvoraussetzung für den Ausgleich der Fahrgeschwindigkeit ist, dass das Produkt aus dem Winkel zur Pflanzenreihe und dem Sinus des Schnittwinkels genau so groß ist wie die zurückzulegende Strecke in Fahrtrichtung (Abbildung 41). Stimmen diese Längen überein, ist das Schnittbild exakt senkrecht zur Pflanzenreihe. Der Kehrwert des $\sin(\beta)$ multipliziert mit der Fahrgeschwindigkeit ergibt somit die Bahngeschwindigkeit des Werkzeugs (1). Bei vier Werkzeugen, einem Rotordurchmesser von 450 mm und einem Pflanzenabstand in der Reihe von 200 mm würde der optimale Schnittwinkel $34,4^\circ$ betragen. Die Bahngeschwindigkeit der Werkzeuge ist um den Faktor 1,77 höher als die Fahrgeschwindigkeit.

$$\beta = \sin^{-1} \left(\frac{\text{Anzahl der Werkzeugarme am Rotor} \times \text{Pflanzenabstand}}{\text{Durchmesser des Rotors} \times \pi} \right) \quad (1)$$

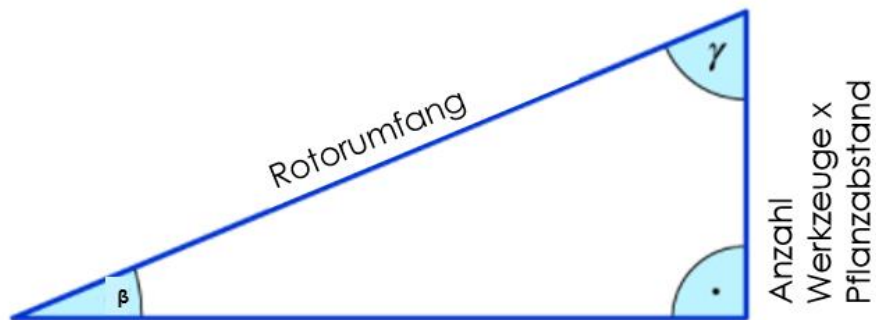


Abbildung 41: Geometrische Zusammenhänge des Nullpunkteingriffs

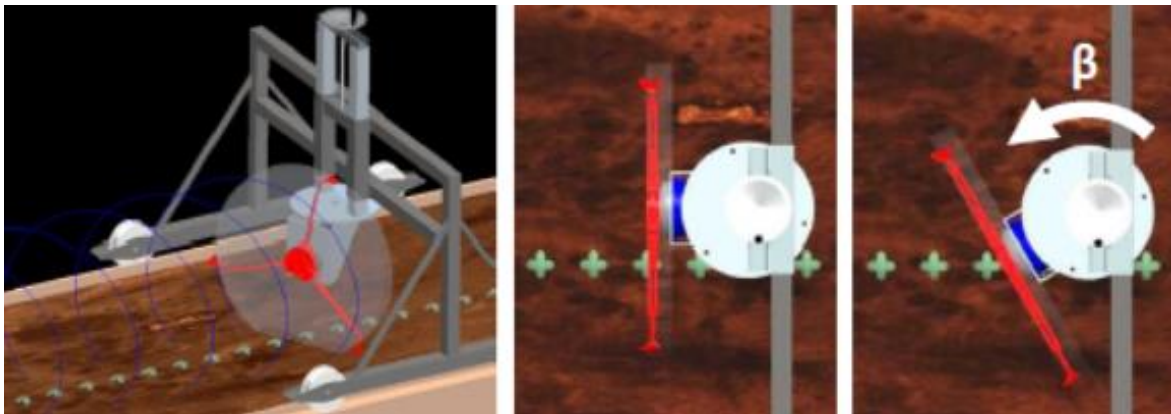


Abbildung 42: Gedrehte Werkzeuganordnung für Nulleingriff nach Mütter. Die zurückgelegte Bahnkurve der Werkzeuge im Boden beschreibt bei korrekt gewählten β eine Senkrechte zur Pflanzenreihe.

12.1.8 Pflanzenerkennung

Das Detektionssystem zur Pflanzenerkennung ist in mehrere Module gegliedert (Abbildung 43). Diese werden je nach Pflanzengröße angepasst. Zunächst wird das aufgezeichnete Rohbild mithilfe eines Debayer-Interpolationsverfahrens in ein Farbbild umgewandelt. Nachfolgend wird der Datensatz in seine einzelnen Farbkanäle zerlegt und gleichzeitig vom RGB-Farbraum in den HSL-Farbraum umgewandelt. Die einzelnen Farbkanäle bilden die Grundlage für die nun nachfolgenden weiteren Analyseschritte. Der Luminance-Kanal wird weiterhin für die Berechnung des Helligkeitswertes im Bild genutzt, um die passende Belichtungszeit zu berechnen.

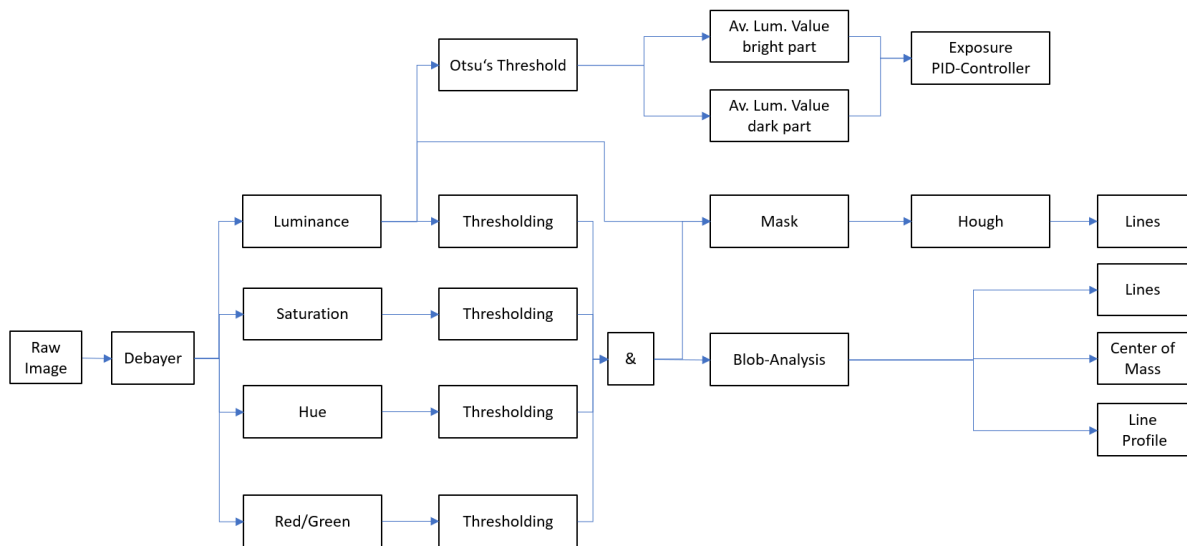


Abbildung 43: Übersicht über die Bildverarbeitung für die Pflanzenerkennung

12.1.9 Vordergrund-Hintergrund-Trennung

Für die Trennung der Pflanzen vom Hintergrund wurden die nachfolgenden beiden Verfahren getestet.

Zuerst wurde eine Trennung im HSL-Farbraum versucht. Hierzu wurde das RGB-Bild in den HSL-Farbraum umgewandelt. Nach dem Transfer wird ein dreidimensionales Schwellenwertverfahren angewendet. In gleichmäßig ausgeleuchteten Bildern wurde eine sehr präzise Trennung zwischen Pflanzen und Hintergrund erreicht (siehe Abbildung 49), wohingegen bei unregelmäßig ausgeleuchteten Bildern eine exakte Trennung nicht mehr gewährleistet werden konnte (siehe Abbildung 46).

Um eine bessere Unterscheidung zu erreichen, wurde das Differenzbildkonzept (siehe 10.2.12.1) aufgegriffen. Diese Ergebnisse brachten zwar eine deutliche Verbesserung der Trennung, waren aber trotzdem noch zu anfällig für unregelmäßigen Lichteinfall. Somit wurde noch ein weiterer Ansatz getestet.

Hier wurde ähnlich dem Prinzip des NDVI (Normalized Difference Vegetation Index (2)) gearbeitet.

$$NDVI = \frac{NIR - Red}{NIR + Red} \quad (2)$$

Für die eigenen Versuche wurde nachfolgende Formel (3) verwendet. Es wird der rote durch den grünen Farbkanal geteilt:

$$Div Image = \frac{Green}{Red} \quad (3)$$

Die nachfolgenden Beispiele zeigen, dass mithilfe eines Divisionsbildes eine deutlich bessere Pflanzen-Hintergrund-Trennung möglich ist als mit dem Hue-Kanal. Nachteilig ist, dass überbelichtete Stellen in Abbildung 44 im Differenzbild auch in dem gleichen Grauwert dargestellt werden wie die Pflanze selbst. Somit muss sichergestellt werden, dass der Belichtungsregler dies verhindert.

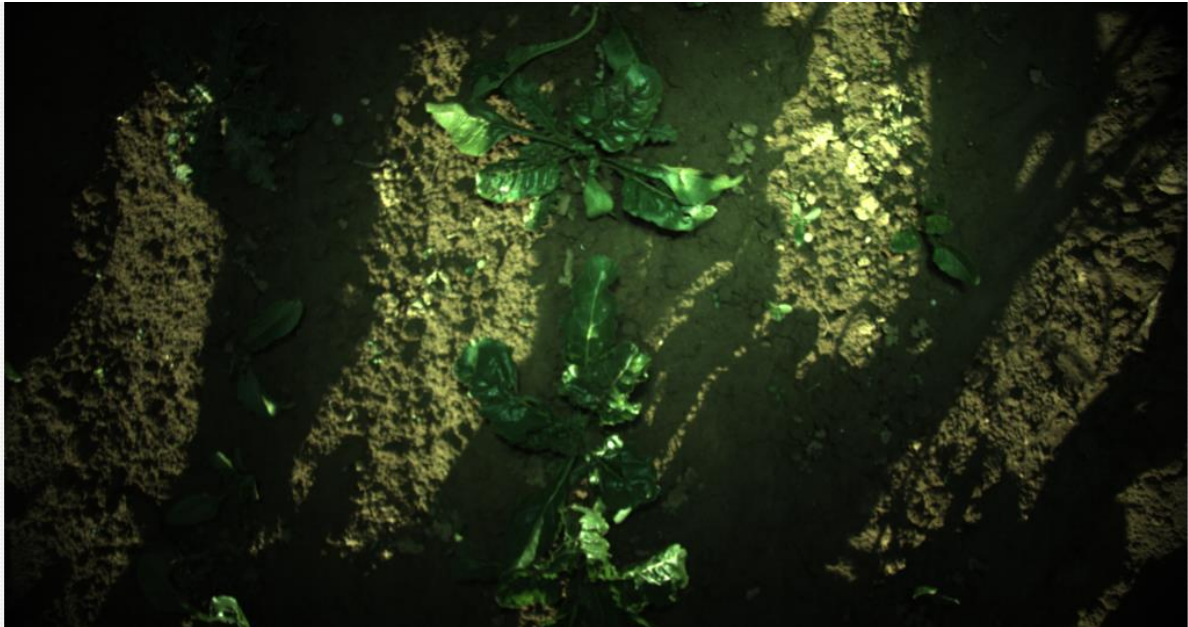


Abbildung 44: Ungleichmäßig ausgeleuchtetes Bild: Originalfarben



Abbildung 45: Ungleichmäßig ausgeleuchtetes Bild: Div-Kanal

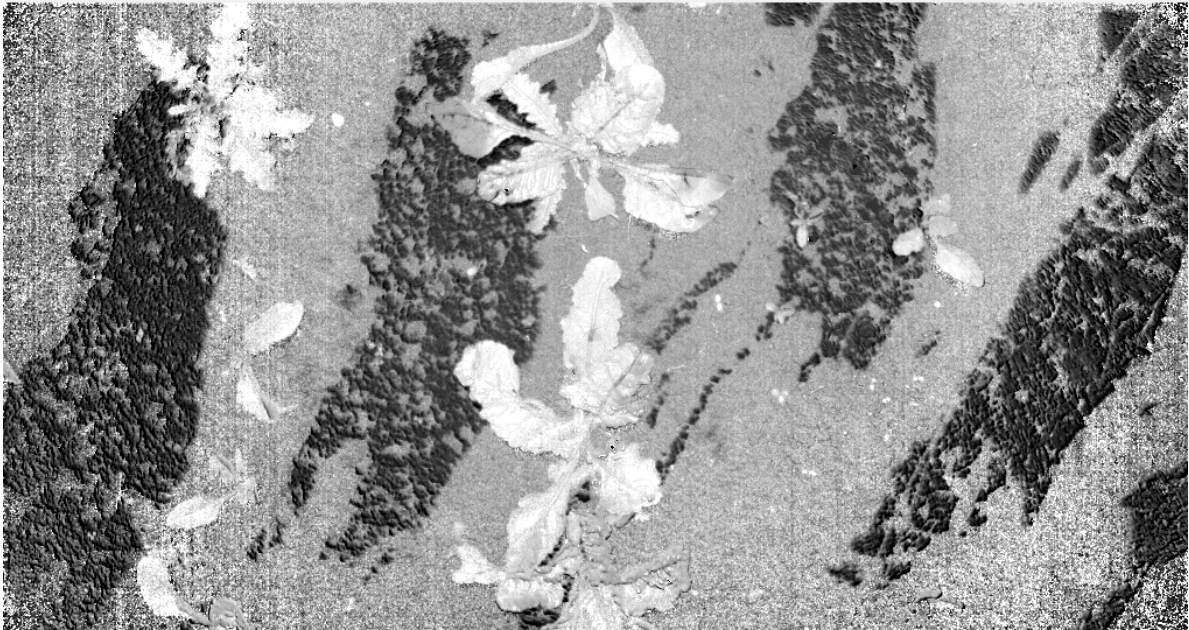


Abbildung 46: Ungleichmäßig ausgeleuchtetes Bild: Hue-Kanal

Wird der Erfassungsbereich hingegen gleichmäßig ausgeleuchtet, wie in Abbildung 47 zu sehen, dann lassen sich Vorder- und Hintergrund besser voneinander separieren. Trotz der gleichmäßigen Ausleuchtung nimmt die Helligkeit vom Zentrum bis in die Ränder des Bildes ab. Die Darstellung im Hue-Kanal zeigt, dass sich der Farbton somit in den Außenbereichen verändert und sich immer mehr dem Pflanzenfarbton annähert. Eine gesicherte Unterscheidung zwischen Kulturpflanze und Boden ist somit nicht mehr gegeben. Im Divisionsbild bleibt der Grauton bis in den Randbereich identisch (vgl. Abbildung 48 und Abbildung 49).



Abbildung 47: Gleichmäßig ausgeleuchtetes Bild: Originalfarben

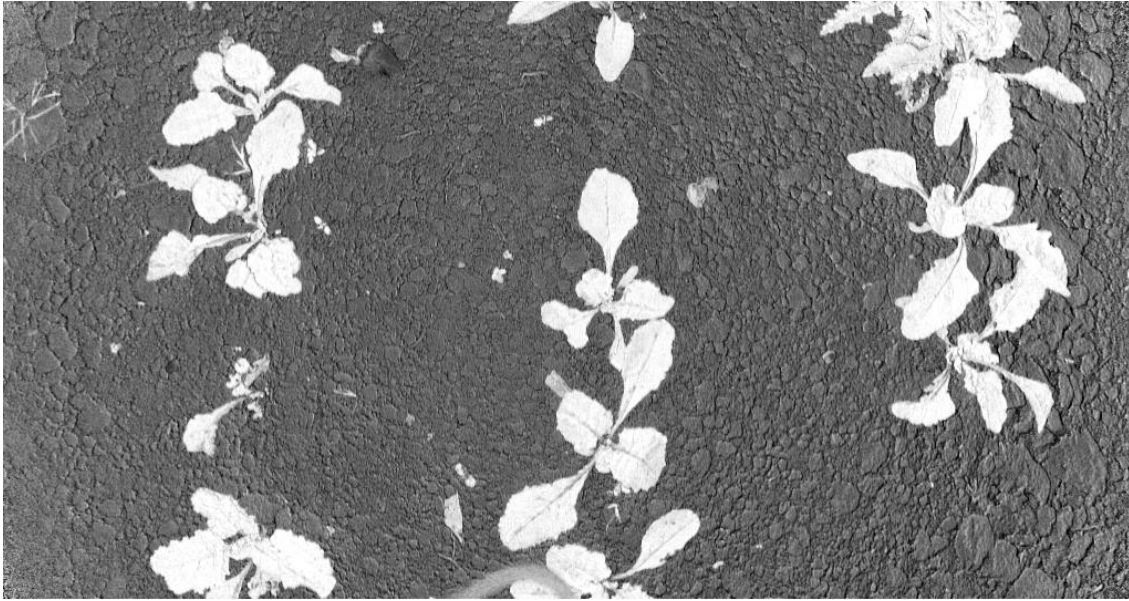


Abbildung 48: Gleichmäßig ausgeleuchtetes Bild: Div-Kanal

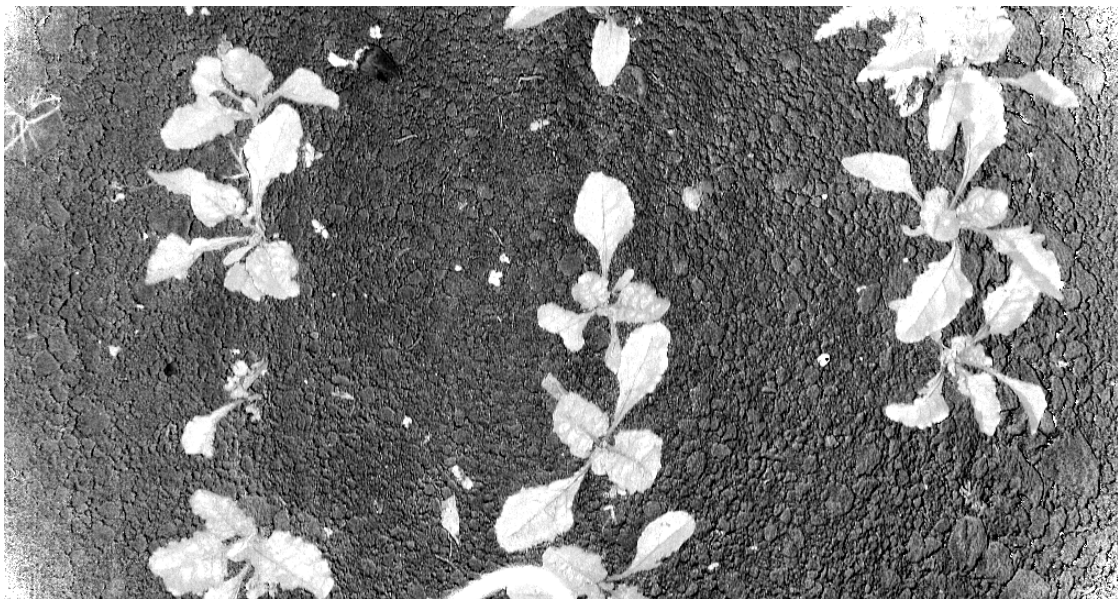


Abbildung 49: Gleichmäßig ausgeleuchtetes Bild: Hue-Kanal

12.1.10 Schwellwertverfahren

Im Anschluss werden die entstandenen Grauwert-Bilder einem globalen Schwellwertverfahren unterzogen. Die Grenzwerte für jeden Farbkanal werden im Bildschirm manuell eingestellt. Als Grauwertbilder werden die Luminanz-, Farbton-, Stättigungs- und Differenzkanäle verwendet. Die so entstandenen Binärbilder werden über eine UND-Operator miteinander verknüpft. Nur Binärobjekte, die alle Filterkriterien erfüllen, werden weiter untersucht. Um das Hintergrundrauschen aus dem entstandenen Binärbild zu entfernen, wird dieses zunächst einem Opening-Verfahren unterzogen. Anschließend werden die übriggebliebenen Binärobjekte wieder auf die

ursprüngliche Größe ausgedehnt. Die Anzahl der Iterationen für das Opening und das Dilationsverfahren ist durch den Benutzer frei einstellbar.

12.1.11 Pflanzendetektion mittels Schwerpunktbestimmung

Um nun im nächsten Schritt die gewonnenen Pflanzenoberflächen in einzelne Pflanzen aufzuteilen, werden die einzelnen Binärobjekte analysiert. Das Ziel der Methode ist es, jede Pflanze als einzelnes Binärobjekt zu detektieren. Hierfür können Binäroperatoren wie die Dilatation dazu beitragen, die einzelnen Blätter miteinander zu verschmelzen, um ein einzelnes zusammenhängendes Objekt zu erhalten. Diese werden zunächst nach maximalem Durchmesser und Schwerpunkt klassifiziert. Stimmen die gemessenen Werte mit den eingestellten Filterkriterien überein, werden die Objekte als Pflanze deklariert. Diese Methode kann bis EC 14 angewendet werden, da sich ab diesem Stadium die Nutzpflanzen teilweise gegenseitig berühren und dann eine Unterscheidung der einzelnen Pflanzen erschwert wird.

12.1.12 Lokalisierung Blattachse

Sobald sich die Blätter, wie in Abbildung 15 gezeigt, gegenseitig überlappen, ist eine gesicherte Trennung der Einzelpflanzen über eine klassische Schwerpunkt-Bestimmung nicht mehr möglich (Müter). Zur Erzielung von besseren Ergebnissen wird nun versucht die Blattrippe zu detektieren. Diese ist im Vergleich zum übrigen Blatt deutlich heller und weist in den meisten Fällen ins Zentrum der jeweiligen Pflanze. Wird nun zwischen Start und Endpunkt der Mittelrippe eine Gerade optimiert, dann ist der Schnittpunkt aus zwei Blattrippen im Idealfall der Mittelpunkt der zugehörigen Pflanze.

Die erste Möglichkeit zur Detektion der Blattrippen ist die Local-Threshold-Methode (Abbildung 50). Im Gegensatz zum normalen Schwellwertverfahren ist hier die Grenze nicht global, sondern wird meistens lokal mittels Otsu's Methode für jedes einzelne Pixel aus der Verteilung der benachbarten Pixel berechnet (Open CV Library 2021). Die daraus entstandenen Binärflächen werden im Anschluss nach Längeneigenschaften selektiert. Aus der Position des maximalen Durchmessers der Binärobjekte wird dann die Geradengleichung berechnet.

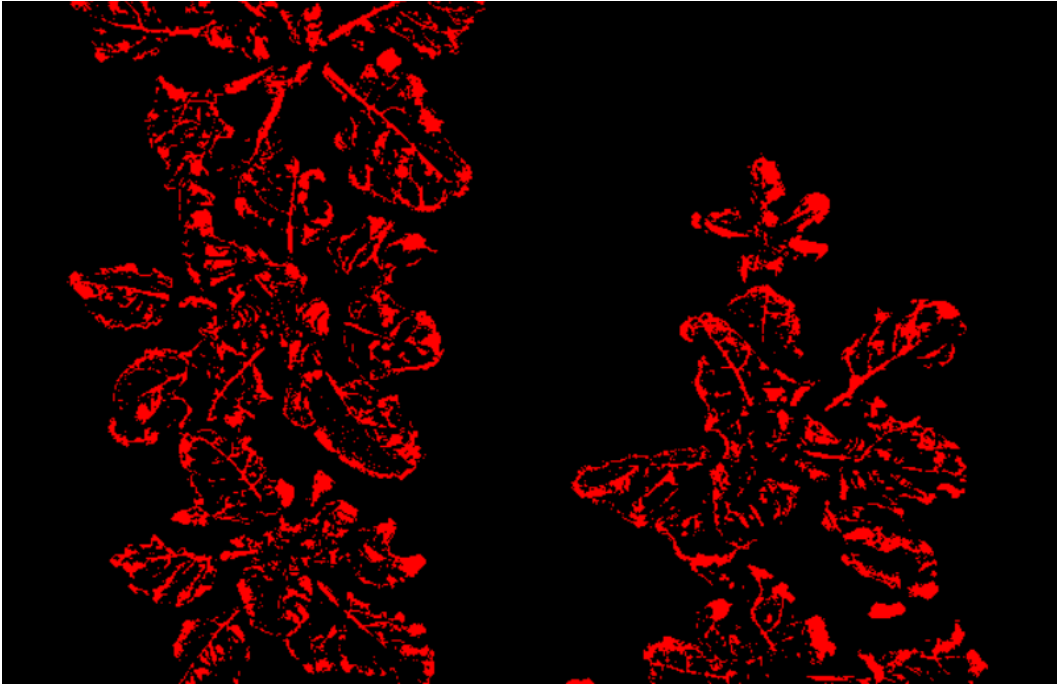


Abbildung 50: Ergebnis nach Local Threshold Filterung

Die Binärbildfilterung nach der lokalen Schwellwertmethode ergibt viele zusammenhängende Flächen, welche nur schwer voneinander zu trennen sind. Zusammenhängende Flächen können nur schwer für die Aderndetektion genutzt werden, da sie zu unförmig für eine präzise Mittelpunktbestimmung sind (Abbildung 51). Werden die Filterkriterien stark auf längliche Objekte ausgelegt, können ein Großteil der Blattadern nicht zur Mittelpunktsdetektion genutzt werden, da diese nicht als separates Binärobjekt herausgefiltert werden können.

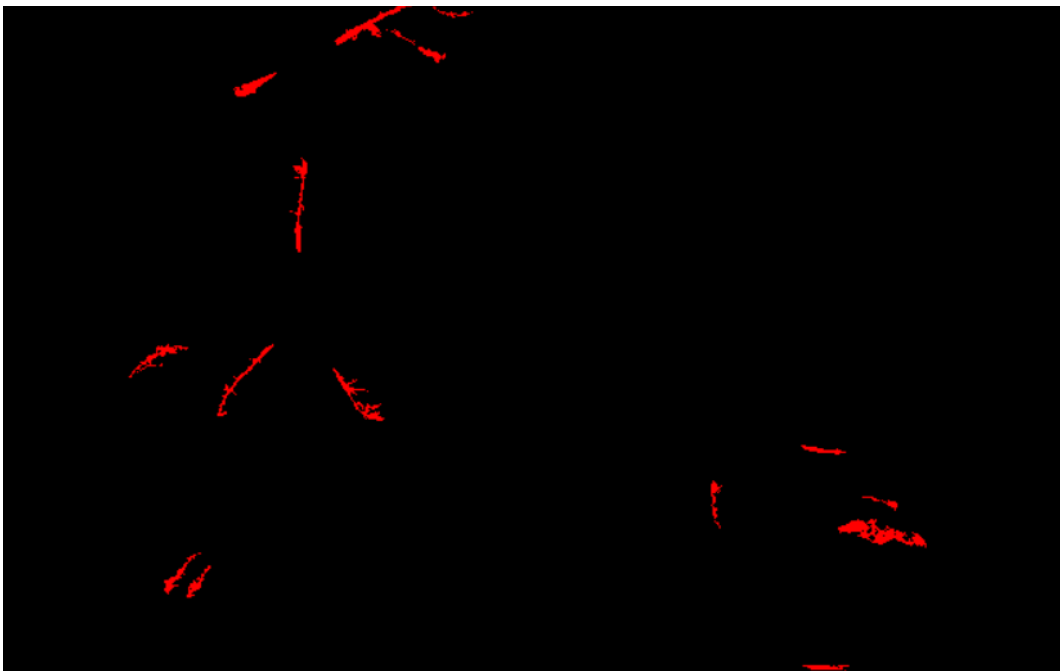


Abbildung 51: Ergebnis nach Binärobjektselektierung der Abbildung 50 (max. Feret Diameter 50 pix)
Einzelne Blattadern lassen sich nur sehr schwer als separate Objekte darstellen

Als Alternative zur lokalen Schwellwertmethode werden zunächst aus dem maskierten Helligkeitsbild die Kanten mittels Canny Edge Detection extrahiert. Die weiße Blattrippe in der Mitte des Zuckerrübenblattes ist eine sehr gut detektierbare Kante. Auf dem erhaltenen Kantenbild wird im Anschluss eine probabilistische Hough-Transformation durchgeführt (Abbildung 52), die jeweils die Start- und Endpunkte der jeweiligen Blattachsen zurück gibt.

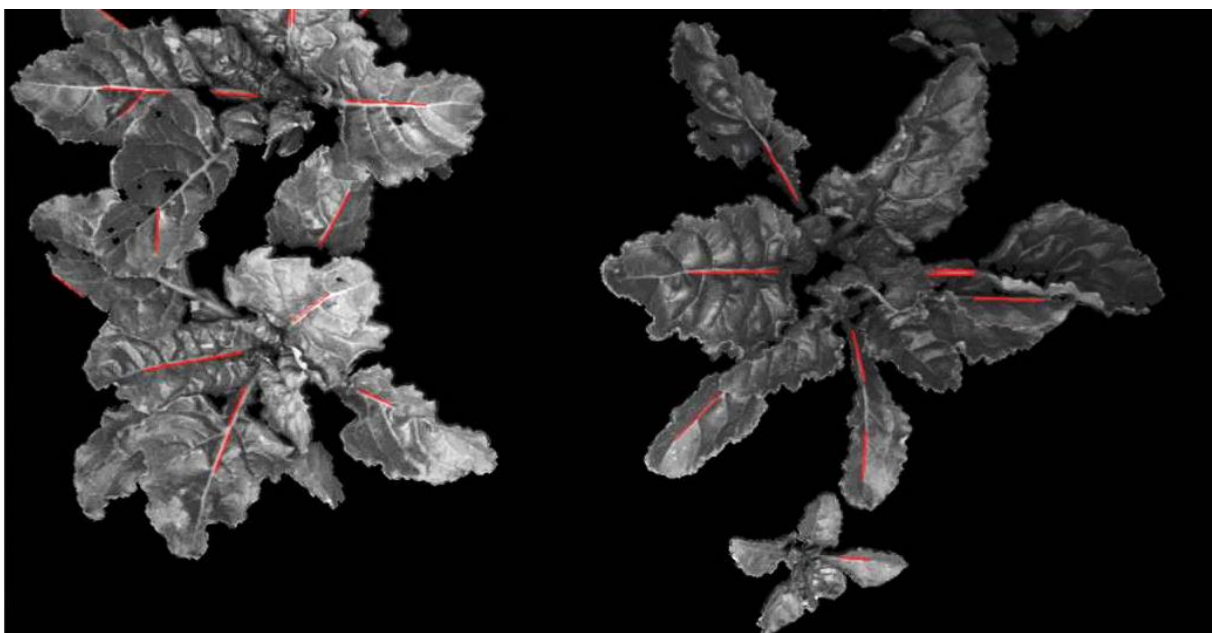
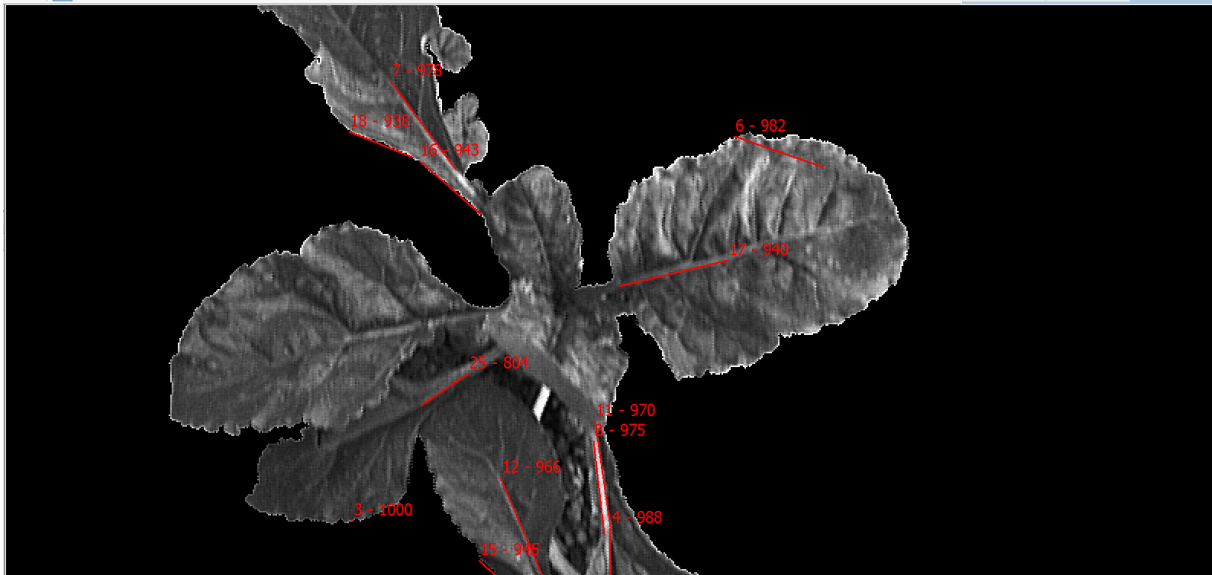


Abbildung 52: Hough-Transformation zur Detektion der Mittelrippe (detektierte Mittelrippen rot)

Als letzte Möglichkeit wurde auch versucht, über die Außenkontur der einzelnen Blätter die Blattachse zu detektieren. Sobald sich die Blätter gegenseitig überlagerten, konnten keine brauchbaren Ergebnisse mehr erzielt werden.

Aus den detektierten Linien in Abbildung 52 werden im Anschluss die dazugehörigen Vektoren ermittelt, hieraus werden alle gegenseitigen Schnittpunkte bestimmt. Zu spitze Winkel zueinander werden ausgeschlossen, da diese aufgrund der Detektionstoleranzen der Hough-Transformation zu unpräzisen Schnittpunkten führen. Die ermittelten Schnittpunkte werden in einem weiteren Koordinatensystem dargestellt (Abbildung 53). Der Schnittpunkt ist nur gültig, wenn der Mittelpunkt der detektierten Linie eine gewisse Distanz zum Schnittpunkt der beiden Vektoren nicht überschreitet. Dies verhindert, dass Blätter unterschiedlicher Pflanzen nicht gemeinsame Schnittpunkte ausbilden können. Der maximale Abstand zweier Vektoren entspricht ungefähr dem Pflanzenabstand in der Reihe.

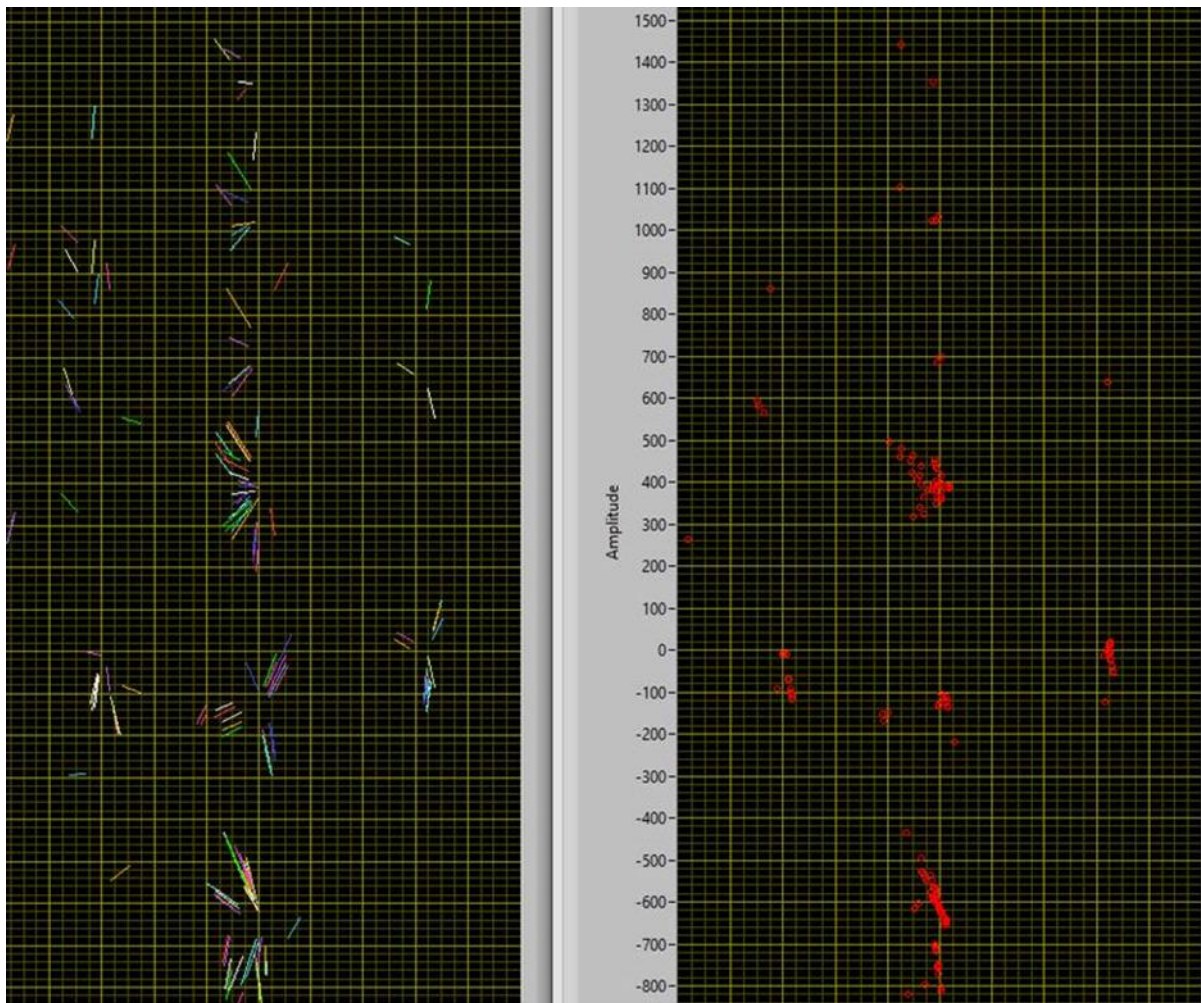


Abbildung 53: Ermittelte Linien aus den einzelnen Hough Transformationen (links), daraus berechnete Schnittpunkte (rechts). Die Linien wurden zunächst in das Maschinenkoordinatensystem transformiert um die Daten der einzelnen Aufnahmen vernetzen zu können.

12.1.13 Rasterdetektion

12.1.14 Datenreduktion mittels Nearest-Neighbour-Methode

Zur Reduktion der Verarbeitungszeit für die Rasterdetektion wurden die berechneten Schnittpunkte mittels der Nearest-Neighbour-Methode (Nächster-Nachbar-Methode) geclustert und zu einem Punkt mit einzelner Gewichtung zusammengefasst. Das Verfahren erwies sich aufgrund der vielen Rechenschritte als deutlich zeitaufwendiger als die direkte Berechnung der Rasterpunkte ohne Vorab-Clustering. Aufgrund des sogenannten „Post Office Problem“ nimmt die Anzahl der Rechenschritte und somit auch die Rechenzeit mit jedem zusätzlichen Punkt exponentiell zu (Kamoussi et al. 2014). Darum konnten die Einsparungen der Rechenzeit bei der Rastersuche nicht die zusätzlich benötigte Rechenzeit für die Klassifizierung ausgleichen. Das Verfahren wurde deswegen nicht weiterverfolgt.

12.1.15 Rastererkennung mittels Sinusfunktion

Da die einzelnen Pflanzen in einem fest definierten Raster (bspw. 45×20 cm) abgelegt werden, lässt sich dieses Ablagemuster innerhalb einer Maschinenbreite mittels einer mehrdimensionalen Sinusfunktionen beschreiben. Die jeweiligen Extrema der Zielfunktion beschreiben die Ablagepunkte der einzelnen Zuckerrüben (Abbildung 54). Als Ausgangsparameter werden in der Zielfunktion zwei Parameter festgelegt. Hierbei beschreibt a den Abstand zwischen den Reihen und b die Distanz in der Reihe. a beträgt im Versuchsaufbau 450 mm und b 200 mm. Die Zielfunktion kann in x - und in y -Richtung mit jeweils einer Sinusfunktion beschrieben werden. x und y beschreiben die Koordinaten der einzelnen Schnittpunkte.

Sinusfunktion für eine Spalte:

$$f(y|b, dy) = \sin\left(\frac{2\pi(y - dy)}{b}\right) \quad (4)$$

Sinusfunktion für eine Zeile:

$$f(x|a, dx) = \sin\left(\frac{2\pi(x - dx)}{a}\right) \quad (5)$$

Zielfunktion für Quadratverband:

$$f(x, y|a, b, dx, dy) = \sin\left(\frac{2\pi(x - dx)}{a}\right) + \sin\left(\frac{2\pi(y - dy)}{b}\right) \quad (6)$$

Zielfunktion für Dreiecksverband:

$$f(x, y|a, b, dx, dy) = \sin\left(\frac{2\pi(x - dx)}{a}\right) + \sin\left(\frac{2\pi(y - dy)}{b} + \frac{x - dx}{a} * \pi\right) \quad (7)$$

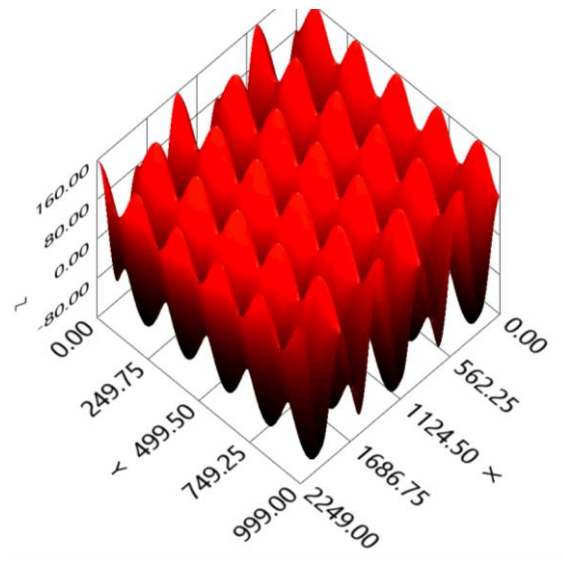


Abbildung 54: Dreidimensionale Projektion einer Zielfunktion für den Dreiecksverband ($a=450$; $b=200$, $dx=0$, $dy=0$)

Zur Ermittlung der optimalen Rasterpunkte wird im Folgenden die Summe aller einzelnen Zielfunktionen ermittelt und nach dx und dy optimiert.

$$F(dx, dy) = \sum_{i=1}^n f(x_i, y_i | dx, dy, a, b) \quad (8)$$

Die Zielfunktion wird mit einem evolutionären Algorithmus optimiert, der iterativ das Maximum bzw. das Minimum der Zielfunktion bestimmt. Für eine Optimierung mit vier Variablen werden insgesamt 100 Startpunkte und 60 Iterationen benutzt, um ausreichend genaue Ergebnisse zu erzielen. Der Rechenaufwand auf der CPU bei 100 Punkten liegt bei ca. 15 ms.

Der Vorteil dieses Detektionssystems ist, dass nur als Parameter nur jeweils die Abstände zwischen den Reihen und in der Reihe gegeben sein müssen. Somit ist die Gefahr von Fehlparametrierungen sehr gering. Ein großer Nachteil ist, dass alle Punkte für die Bildung der Sinuskurve eingesetzt werden. Somit besteht die Gefahr bei stärkerer gebündelter Verunkrautung durch die Verlagerung des Schwerpunkts, dass die errechnete Reihenmitte von der tatsächlichen abweicht.

12.1.16 Rastererkennung mittels Histogramm-Maximierung

Um unter den zuvor genannten Bedingungen trotzdem präzise Ergebnisse zu erzielen, wurde zusätzlich eine Histogramm-Maximierung entwickelt. Hierzu wird das Bild in die einzelnen Raster aufgeteilt. Beträgt der Reihenabstand bspw. 450 mm und der Abstand in der Reihe 200 mm, wird das komplette Sichtfenster in die einzelnen Segmente eingeteilt. Die Klassenbreite in x- und in y-Richtung beträgt jeweils 1 mm.

Je nach Breite der Pflanzenreihe wird nun ein Average-Shifted-Histogramm genutzt, um das Maximum zu detektieren. Der Vorteil dieses Verfahrens ist, dass immer das Maximum detektiert wird und nicht über alle detektierten Punkte optimiert wird. Ein Nachteil der Methode ist, dass der Parameter „Breite der Pflanzenreihe“ weitere Einstellarbeit erfordert. Das System benötigt bei 100 Datenpunkten nur 0,005 ms Sekunden und ist somit um den Faktor 3000 schneller als die Sinus-Variante. Das ermittelte Histogramm (Abbildung 55) über die gesamte Maschinenbreite zeigt mit den senkrechten blauen Balken die Klassenbreite an. Diese werden immer über das Maximum gelegt und periodisch je nach Anzahl der Reihen wiederholt angezeigt. Diese Maske in Abbildung 55 unterstützt den Bediener, um eine schnelle Einstellung der Klassenbreite zu ermöglichen.

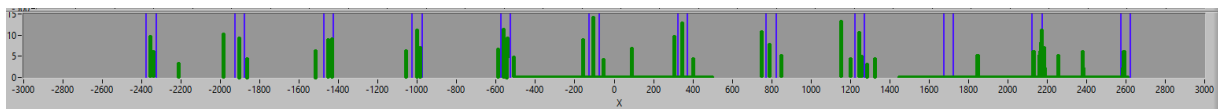


Abbildung 55: Histogramm über 12 Pflanzenreihen (blau: rechte und linke Kante der Detektierten Pflanzenreihe, grün: Detektierte Werte des Average-Shifted-Histogramm)

12.1.17 Betrachtung der Laufzeiten

Für die Bewertung der Leistungsfähigkeit der Bildverarbeitung wurden die Signallaufzeiten der einzelnen Verarbeitungsschritte ermittelt. Die Laufzeiten von vier Bildern à 2,3 Megapixel setzen sich aus den nachfolgenden Messungen zusammen:

- Kameraakquise über GigE: 20 ms
- Bildvorverarbeitung inkl. Kantendetektion: 50 ms
- Berechnung der aktuellen Rasterpunkte: 15 ms

Vom gesendeten Triggersignal bis zu den fertig berechneten Rasterpunkten benötigt das System ca. 85 ms. Durch die Auslagerung der Bildverarbeitung auf die Grafikkarte konnte die Dauer der Bildvorverarbeitung von 400 ms auf 50 ms reduziert werden. Der gleiche Effekt konnte bei der Rasterpunktberechnung festgestellt werden. Die Laufzeit reduzierte sich hier um 485 ms von 500 ms auf 15 ms. In Summe entspricht das einem Datendurchsatz von 276 MB/s. Die zuvor genannten Latenzen sind einer der maßgebenden Faktoren für die Effektivität der Lenkung des Traktors. Sie haben einen direkten Einfluss auf die Totzeit der Regelstrecke. Je länger diese Zeitspanne wird, desto unpräziser bzw. träger wird die Lenkung. Die Antwort des Reglers auf die Abweichung vom Sollwert wird durch die Latenz verzögert. Dieses Phänomen tritt nur bei einer direkten Traktorlenkung auf. Bei einer Ansteuerung eines Verschieberahmens ist das Problem vernachlässigbar, denn dieser verändert aufgrund des fehlenden integrativen Bausteins seine Position nicht in Abhängigkeit von der Fahrgeschwindigkeit (siehe **Fehler! Verweisquelle konnte nicht gefunden werden.**).

12.1.18 Performance der Rastererkennung

Der Mittelwert der Abweichung der bearbeiteten Fläche von der Soll-Fläche betrug im 2-Blatt-Stadium (EC 12) 12,6 mm (Abbildung 56). Der 60-mm-Ausreißer lässt sich durch eine nicht korrekt abgelegte Rübenpille erklären. Die maximale Abweichung unter Ausschluss der Ausreißer betrug 30 mm im 2-Blatt- und 40 mm im 4-Blatt- und 8-Blatt-Stadium (EC 14 und 18). Für die Detektion der Nutzpflanzen im EC 12 wurde die Schwerpunktmethode angewandt. Zur Detektion der Pflanzen im EC 14 wurde sowohl die Blattachsendetektion als auch die Schwerpunktbestimmung verwendet. Die Detektion mithilfe der Mittelrippendetektion erreichte im EC 14 eine mittlere Abweichung von 18 mm, wohingegen die Detektion mithilfe der Kantenerkennung eine Genauigkeit von 12,8 mm im Mittel erreichte. Im EC 18 wurde die Detektion mittels Hough-Transformation angewendet. Die Detektionsergebnisse verschlechterten sich dabei minimal um durchschnittlich 1,6 mm von 12,8 mm auf 14,4 mm.

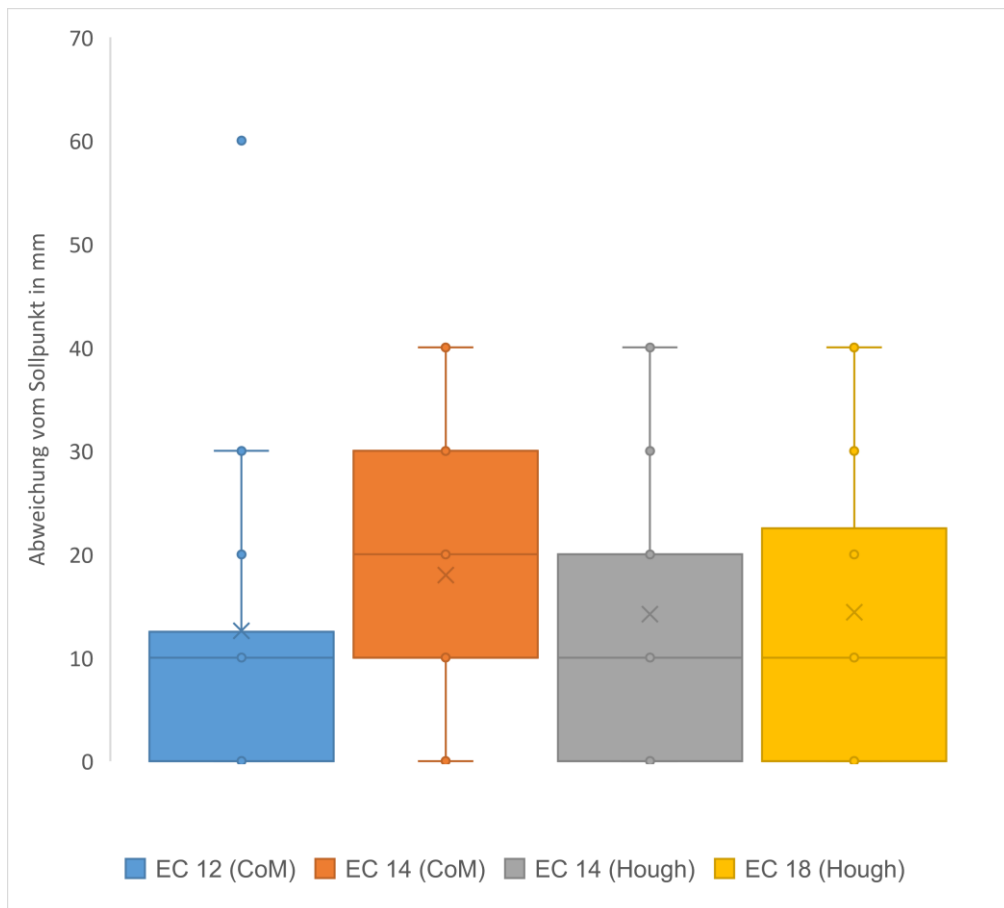


Abbildung 56: Darstellung der mittleren Rotorabweichung vom Sollpunkt ($n=200$). Die Detektionsgenauigkeit des Center of Mass Algorithmus (CoM) nimmt von EC 12 auf EC 14 ab. Ab EC 14 ist die Detektion über die Houghtransformation genauer

12.1.19 Reihenführung

Das Histogramm in Abbildung 57 zeigt die Präzision der Werkzeugführung bei unterschiedlichen Fahrgeschwindigkeiten. Bei einer Fahrgeschwindigkeit von 2 km/h befinden sich in 97 %

der Messpunkte die Werkzeuge ± 10 mm genau auf der Pflanzenreihe. Steigt nun die Fahrgeschwindigkeit auf 5 km/h an, sind nur noch 88 % der Messpunkte in dem 10 mm Bereich. Wird nun die Fahrgeschwindigkeit weiter erhöht, befinden sich nur noch 59 % im Bereich von ± 10 mm, aber 98 % der Punkte im Bereich ± 25 mm.

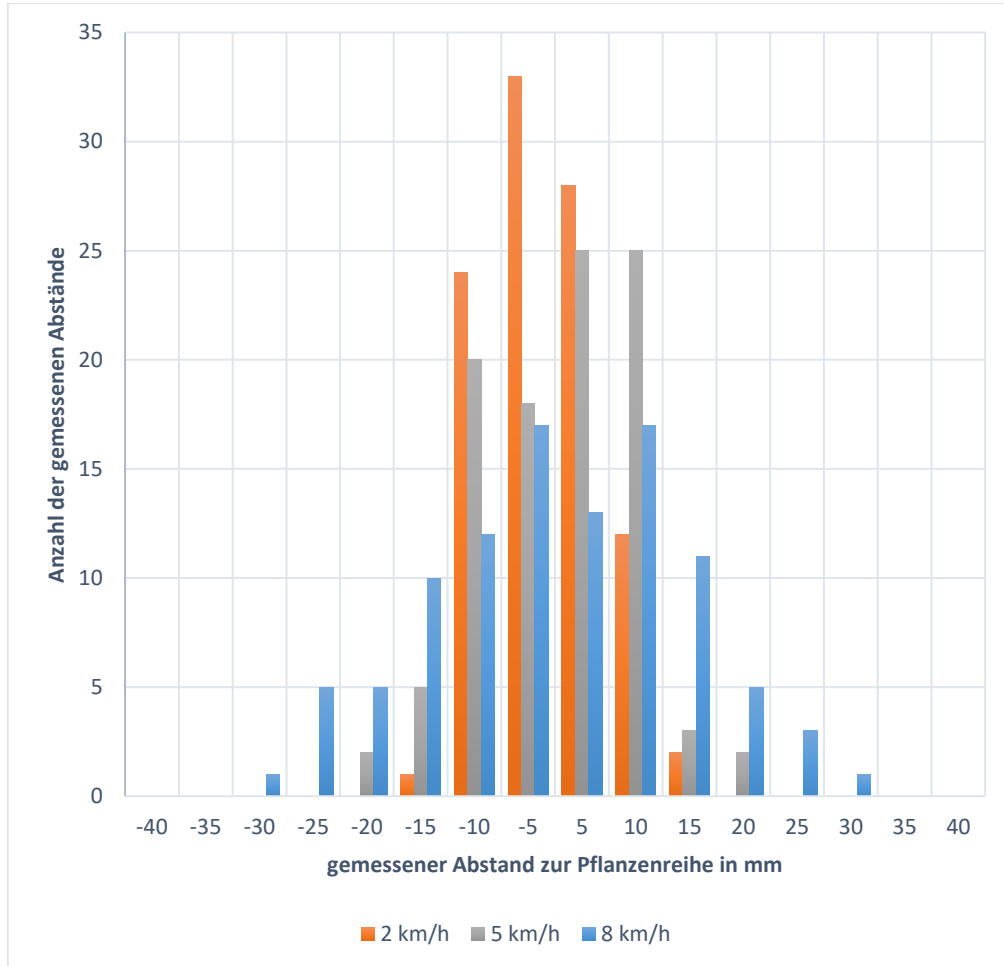


Abbildung 57: Histogramm über die Positionsgenauigkeit des Hackrahmens auf der Pflanzenreihe: X-Achse: gemessenen Abstand zwischen Scharmitte und Pflanzenreihe bei unterschiedlichen Fahrgeschwindigkeiten (n=100). Mit zunehmender Fahrgeschwindigkeit ist eine zunehmende Streuung der Werte zu beobachten.

12.1.20 Rübenverluste

Die Pflanzenverluste bei der ersten Überfahrt im EC 12 betragen 1,5 %, im EC 14 und EC 18 jeweils 0,5 %. Die höheren Pflanzenverluste bei der ersten Überfahrt werden hauptsächlich durch die Ablageungenauigkeit der Sämaschine verursacht. Da die Ausreißer beim ersten Hackdurchgang entfernt werden, nehmen die Pflanzenverluste bei den nachfolgenden Hackdurchgängen ab.

12.1.21 Einzelpflanzenerkennung

Zur Berechnung der Positionen der Einzelpflanzen werden die im Anschluss ermittelten Rasterpunkte auf die detektierten Schnittpunkte projiziert. Die Rasterpunkte, an denen sich eine gewisse Mindestanzahl an Attributen in einem fest definierten Umkreis um den Sollstandort finden lässt, werden als detektierte Pflanzen klassifiziert. Diese Strategie ergab im EC 12 eine Erkennungsrate von bis zu 80 %, im EC 12 eine Erkennungsrate von 90 % und im EC 17 von 70 %.

12.1.22 Bewertung der tatsächlich bearbeiteten Fläche

Für die Versuche wurden Messer mit einer Breite von 10 cm und 15 cm angefertigt. Die tatsächliche Arbeitsbreite der Messer lag bei einem schräggestellten Rotor mit einem Schnittwinkel zur Reihe von 65° bei 8 bzw. 12 cm tatsächlicher Schnittbreite. Die unbearbeitete Fläche liegt bei einem Pflanzenabstand in der Reihe von 19,5 cm und einem Hackband von 6 cm bei 7,6 % (45er Reihe) bzw. 5,33 % (50er Reihe) unbearbeitete Fläche. Bei einer Standardhacke ohne Selektivsystem mit 6 cm breitem Hackspalt beträgt der unbearbeitete Bereich 13,3 %. Die zuvor genannten Werte beziehen sich nur auf die tatsächlich unterschrittene Fläche. Unter verkrusteten Bedingungen kann der Effekt deutlich höher sein, da die Kruste bis an die Kulturpflanze heran bricht (Abbildung 58, Abbildung 59).



Abbildung 58: Vorher-Nachher-Vergleich: Rechts unbearbeitete Fläche mit starkem Unkrautbesatz, links bearbeitete Fläche mit Rotorhacke

12.1.23 Ergebnisse aus den Praxiseinsätzen

Das Aussaatraster kann von EC 11 – 31 mit einer Fehlerquote unter 1 % sicher detektiert werden. Die Behauptung, dass ein Wachstumsunterschied zwischen Kultur- und Unkrautpflanze nötig sei (Fischer 2012), um Selektivhacksysteme effektiv einsetzen zu können, konnte hiermit eindeutig widerlegt werden. Die Einzelpflanzenerkennung konnte aufgrund der zu niedrigen Erkennungsrate zwischen 75–95 % nicht eingesetzt werden, da Kulturpflanzenverluste über 2 % nicht toleriert werden. Bis einschließlich EC 21 wird in der Bildvorverarbeitung eine Vordergrund-Hintergrund-Trennung eingesetzt. Im Anschluss wird ausschließlich die Kantendetektion zur Bestimmung des Pflanzenmittelpunktes bis EC 31 verwendet.

Eine große Herausforderung stellt der sich laufend ändernde Reifenschlupf dar, denn hierdurch kann dann die Pflanzenposition nicht mehr richtig vom Rotor eingeregelt werden. Durch schräg einfallendes Sonnenlicht und hohe Pflanzen kann die Pflanzenmitte aufgrund der unregelmäßig ausgeleuchteten Szene nur noch sehr schwer bestimmt werden.

Die Winkelmesser links und rechts der Pflanzenreihe neigen dazu, unter feuchten Bedingungen zu verkleben. Somit werden die Messer mehr in Richtung Reihenmitte gedrückt. Infolgedessen wird der Hackspalt zusätzlich verengt. Nicht bei allen Pflanzen können genügend Strukturmerkmale zur Detektion der Pflanzenmitte gefunden werden. Daher müssen zwischen diesen Pflanzenpositionen künstliche Stützpflanzen gesetzt und interpoliert werden.

Die besten Unkrautbekämpfungsergebnisse wurden unter verkrusteten Bedingungen erzielt. Durch das Brechen der verschlammten Oberfläche bricht der Boden bis an die Zuckerrübe. Kleine, frisch aufgelaufene Unkräuter auf den Bruchstücken trocknen durch die Unterbrechung der Kapillarität ab (Abbildung 59).



Abbildung 59: Gebrochene Kruste im direkten Nahbereich der Zuckerrübe. Die unbearbeitete Fläche ist deutlich geringer als die in 12.1.22 theoretisch berechnete Fläche

12.2 Diskussion der Ergebnisse

Die vorangegangenen Ergebnisse zeigen auf, dass durch die rasterbasierte Aussaat die Performance der Pflanzenerkennung stark verbessert wird. Ein praxistauglicher Einsatz des Maschinenkonzepts ist somit gegeben.

12.2.1 Systemvergleich

Der Einsatz leistungsschwacher autonomer Plattformen für die Aussaat birgt das Risiko, nicht immer zum idealen Zeitpunkt säen zu können. Durch die langsame Aussaat über mehrere Tage vergrößert sich der Zeitraum zwischen der letzten Bodenbearbeitung und dem Keimungsbeginn der Kulturpflanze zusätzlich. Somit wird dem Beikraut ein unerwünschter Vorsprung verschafft. Werden die Flächen mit leistungsfähiger Einzelkorntechnik bestellt, beträgt der Zeitraum zwischen Aussaat und Saatbettbereitung im Idealfall nur wenige Stunden. Ein ähnliches Problem lässt sich beim Hackvorgang beobachten. Autonome Systeme benötigen für die gleiche Fläche vier- bis sechsmal solange wie ein vergleichbares Rotorsystem. Dies bedeutet für den Einsatz dieser Systeme, dass sie auch öfter unter nicht optimalen Bedingungen arbeiten müssen. Ein erneutes Anwurzeln der Unkräuter lässt sich nämlich nur durch trockene Bedingungen im Anschluss an den Hackvorgang verhindern.

Betriebswirtschaftlich gesehen ist die Einstiegsschwelle für ein Rotorhacksystem wesentlich höher, da hierfür sowohl eine Einzelkornsämaschine mit Dreiecksverbandsablage und ein Hackgerät angeschafft werden müssen. Die Investitionskosten belaufen sich bei der Rotorhacke gegenwärtig auf 160.000 EUR, die eines vergleichbaren Robotersystems auf ca. 70.000 EUR (Heinrich 14.04.20). Betrachtet man hingegen die Leistungsfähigkeit und die Vielseitigkeit der Systeme, werden die Kosten schnell relativiert.

12.2.2 Aussaat

Das Säaggregat trägt maßgeblich zum Gesamterfolg des Anbausystems bei. Der wichtigste Faktor ist die präzise Ablage der Saatgutkörner in und quer zur Fahrtrichtung. Eine genaue Ablage mit geringen Fallstufen ist am einfachsten mit pilliertem Saatgut möglich, da hierfür ein mechanisches Vereinzlungssystem ausreicht (siehe Kapitel **Fehler! Verweisquelle konnte nicht gefunden werden.**). Um natürliches Saatgut vereinzeln zu können, benötigt man ein pneumatisches Saug- oder Druckluftsystem. Diese Systeme sind sehr universell einsetzbar, benötigen aber aufgrund der Pneumatikeinheit niedrigere Drehzahlen und einen größeren Abstand zum Boden. Somit ist eine Nullablage mit herkömmlichen pneumatischen Einzelkornsystemen nicht möglich. Durch die höhere Fallstufe wird ein Verrollen im Säschlitz noch zusätzlich gefördert. Bei manchen Modellen der Firmen John Deere und Precision Planting werden die Fallkanäle der pneumatischen Einzelkornsämaschinen durch ein Gurtsystem ersetzt.

Hierdurch kann die Vereinzelungsscheibe eine andere Umfangsgeschwindigkeit als die Fahrgeschwindigkeit besitzen, denn der Transportgurt (siehe Abbildung 60) beschleunigt das einzelne Saatkorn auf Fahrgeschwindigkeit und entlässt es direkt über dem Säschlitz aus dem Gurtförderer. Mithilfe dieser Technik lassen sich auch bei hohen Fahrgeschwindigkeiten sehr gute Ablageergebnisse erzielen. Die Übergabe zwischen Gurtförderer und Vereinzelungsscheibe stellt aber bei natürlichem Saatgut trotzdem eine Herausforderung dar, da durch die unterschiedliche Form des Saatgutes, der Übergabezeitpunkt von der Scheibe auf das Band variieren kann. Im Idealfall müsste jedes einzelne Saatkorn im Förderer noch einmal korrigiert werden. Dies stellt eine große Herausforderung dar.



Abbildung 60: Nullablagensystem mit pneumatischer Vereinzelung und Speedtube (Precision Planting 2021)

12.2.3 Verschieberahmen vs. automatischen Lenkung

Beim Vergleich des Verschieberahmens mit der automatischen Lenkung lässt sich feststellen, dass bei einem Ausfall des Kamerasystems immer die Problematik besteht, dass der Fahrer sowohl manuell mit dem Traktor zwischen den Pflanzenreihen fahren als auch gleichzeitig den Verschieberahmen bedienen muss. Der Verschieberahmen ist im Vergleich zu einer direkten Traktorlenkung wesentlich einfacher zu entwickeln, da hierfür keine hohen Bildraten oder Echtzeiterkennung benötigt werden. Hierbei kann die Kamera den aktuellen Versatz zwischen der Pflanzenreihe und der Sollposition ermitteln. Der Rahmen kann dann über die interne Positionsregelung die richtige Position ansteuern, da er eine separate Positionsrückmeldung über ein Potentiometer besitzt. Bei einer aktiv gelenkten Fronthacke bzw. einer selbstfahrenden Hackmaschine ist dies wesentlich komplexer, da hierbei nur ein Lenkwinkel als Regelgröße

vorgegeben werden kann. Die Änderung des Abstands zur Pflanzenreihe kann nur mittels Kamera wieder kontrolliert werden. Parameter wie Fahrgeschwindigkeit und Signallaufzeit beeinflussen das Regelverhalten sehr stark.

Arbeitsbreiten über 6 m bei Fronthacken sind aufgrund des Straßentransportes nur sehr schwer realisierbar. Als Alternative zum Frontanbau könnte die Maschine auch im Heck über eine Rückfahreinrichtung gefahren werden. Durch den Heckanbau wäre die Sicht nach vorn für den Straßentransport frei. Außerdem liegt im ausgehobenen Zustand der Schwerpunkt des Gesamtfahrzeugs auf der Hinterachse und somit auf der Achse mit den größten Reifen. Die Bodenschonung am Vorgewende könnte so deutlich reduziert werden. Der Verzicht auf den Verschieberahmen im Heck verringert den Abstand zwischen dem Schwerpunkt des Anbaugerätes und dem Traktor um mind. 20 cm. Des Weiteren könnten ca. 500–1000 kg Gewicht für den Verschieberahmen eingespart werden. Das Lenkkonzept könnte auch auf Reihenhacken ohne In-Row-Werkzeuge übertragen werden.

12.2.4 Vernetzen der Kameradaten mit georeferenzierten Informationen

Ein weiterer Ansatz zur Mittelpunktfindung ist die Abspeicherung des exakten Ablagepunktes der Saatkörner. Hiermit könnte eine Aussaat mit einer Standard-Einzelkornsämaschine durchgeführt werden. Die Erfassung der einzelnen Körner erfolgt über einen Optosensor am Säaggregat. Passiert das Saatkorn den Sensor, dann lässt sich über die Fahrgeschwindigkeit und die relative Geschwindigkeit des Kornes zum Boden der Ablagepunkt auf ± 20 mm genau bestimmen (Nørremark et al. 2008). Einen zusätzlichen Vorteil könnte die Abspeicherung der Fahrtrichtung bei der Aussaat bringen. Sind bei der Aussaat nicht alle Aggregate auf den richtigen Hackspalt eingestellt, dann können diese Fehler reduziert werden, wenn immer in Aussaatrichtung gehackt wird. Das Hackaggregat kann somit präzise auf jede einzelne Reihe eingestellt werden. Um dieses System herstellerübergreifend einsetzen zu können, müssen diese Informationen über standardisierte Schnittstellen zwischen der Sämaschine und dem Traktor ausgetauscht werden können. Hierfür könnte das bestehende IsoXML-Format genutzt und für solche Anwendungszwecke ausgebaut werden.

Dieser Ansatz kann auch auf die Saatbettbereitung ausgeweitet werden. Bearbeitet die Saatbettkombination genau die gleiche Fahrspur wie bei der Aussaat, werden genau die Arbeitsbreiten, in denen auch gesät wird, besser ausnivelliert. Auch lässt sich die Sämaschine präziser justieren, da die Säaggregate hinter der Spur immer gleich eingestellt werden können, da in der Fläche keine zusätzlichen Fahrspuren vorhanden sind. Folglich ist durch das homogenere Saatbett weniger Höhenjustage bei den Rotoren nötig. Zur erfolgreichen Umsetzung dieses Systems muss die vorauslaufende Saatbettkombination die gleiche Arbeitsbreite wie die Sämaschine aufweisen. Auch sollten die Spuren und die Reifenbreiten der einzelnen Traktoren übereinstimmen.

12.2.5 Alternative Kamerasysteme

Eine zusätzliche Detektion mittels Nahinfrarotkameras ist unter den o. g. Fällen nicht zwingend erforderlich, da eine ausreichende Erkennung allein über die Differenzbilder schon sehr gute Ergebnisse liefert ist. Eine NIR/RGB-Kamera würde den Anschaffungspreis für die Kameras verdreifachen (Heinrich 25.05.2018). Alternativ könnte zur Reduzierung der Helligkeitsdynamik im Bild eine zusätzliche Kamera das Ergebnis maßgeblich verbessern. Wenn auf den Einsatz einer weiteren Kamera verzichtet werden sollte, können mithilfe einer Kamera zwei unterschiedliche Aufnahmen mit unterschiedlichen Belichtungszeiten getätigt werden. Das entstandene HDR-Bild weist dann einen wesentlich höheren Dynamikumfang auf. Um diesen Ansatz verfolgen zu können, wird eine sehr kurze Bildbearbeitungszeit vorausgesetzt, da sonst die Regelgüte des Spurführungssystems aufgrund der verlängerten Totzeit an Performance verliert.

12.2.6 Detektion des Wurzelraumes

Die vorhergehenden Ergebnisse zeigen, dass bei Zuckerrüben aufgrund des unsymmetrischen Wachstums eine explizite Detektion des Wurzelraumes ab EC 24 deutlich bessere Ergebnisse liefert als die Methoden mit Schwerpunktbestimmung über die Blattoberfläche. Entscheidende Verbesserungen können hierbei über eine explizite Zuordnung der Blätter zu den einzelnen Pflanzen erreicht werden. Die in den Versuchen hauptsächlich verwendete Methode zur Detektion der Blattspreite über die Hough-Transformation kann nur Geraden oder Geradensegmente detektieren. Da aber die Nutzpflanzen aufgrund verschiedenster Umwelteinflüsse nicht immer sternförmig vom Zentrum weg wachsen, ist eine Detektion über die Hough-Transformation nicht immer ausreichend. Fraglich ist, ob eine Verwendung von Contour-Tracking-Algorithmen Verbesserungen in der Mittelpunkt-detektion bewirken können. Einerseits könnten bogenförmige Blattspreiten besser verfolgt werden, andererseits wird durch die Verwendung dieser Methode auch die Fehleranfälligkeit gegenüber Rauschen wesentlich erhöht.

12.2.7 Unterscheidung zwischen Kultur- und Beikrautpflanzen

Sind die Rasterpositionen sicher detektiert, ist es möglich die Einzelpflanze zu untersuchen. Hierbei besteht die Herausforderung darin, die Pflanzenattribute zu erkennen und zu klassifizieren. Einige Attribute können hierbei Länge, Form und Farbe der Kulturpflanze sein. Bei der Farbe besteht die Herausforderung darin, dass sich diese unter wechselnden Lichtbedingungen verändert. Somit müssten die Farben immer statistisch mit den anderen Pflanzen an den anderen Rasterpositionen abgeglichen werden. Eine Unterscheidung nach fest definierten Farben oder Mustern ist nicht machbar, da jedes Blatt individuelle Strukturen aufweist. Blätter, die sich gegenseitig überlappen, können mittels einer zweidimensionalen Aufnahme nur sehr

schwer voneinander getrennt werden. Nur eine dreidimensionale Erfassung der Pflanzenoberfläche könnte eine Verbesserung bewirken. Hierbei muss jedes einzelne Blatt separat auf die Pfeilung und Form untersucht werden und im Anschluss den einzelnen Pflanzen zugeordnet werden. Präzise Berechnungen im dreidimensionalen Raum sind sehr rechenintensiv und benötigen Aufnahmen aus mehreren Perspektiven. SFM-Algorithmen (Structure from Motion) sind in der Lage eine Auflösung im Millimeterbereich zu realisieren (Paulus 2019). Ansätze für die Trennung der einzelnen Pflanzen über 3D-Punktwolken müssten entwickelt werden.

12.2.8 Schlupfkorrektur

Der Schlupf des Tastrades verändert sich auf unterschiedlichen Untergründen, somit ist immer eine manuelle Korrektur des Schlupfes nötig. Ein weiterer Ansatz ist es, den Schlupf des Tastrades mittels eines GPS-Signals zu korrigieren. Zur Korrektur wird das Verhältnis zwischen gemessener Geschwindigkeit am Tastrad und der über GPS ermittelten Geschwindigkeit berechnet. Dieser kann dann als Schlupffaktor mit dem Umfang des Messrades multipliziert werden. Der Prozess würde kontinuierlich während der Fahrt stattfinden. Der technisch beste, aber auch anspruchsvollste Ansatz ist die Korrektur des Schlupfs mithilfe der Bildanalyse. Algorithmen wie optischer Fluss oder Hintergrundsubtraktion sind in der Lage, die Veränderung zwischen zwei aufeinanderfolgenden Bildsequenzen zu vergleichen. Somit könnte ständig ein Abgleich zwischen Kamera und Tastrad stattfinden.

12.2.9 Latenzen der Bildverarbeitung

In Versuchen von Fischer wurden Latenzen in der Bildverarbeitung von 30 ms erreicht, dies lässt sich durch den Einsatz von Kameras mit wesentlich geringerer Auflösung und somit deutlich reduzierter Datenmenge erklären. Des Weiteren musste das Erfassungssystem lediglich Daten von einer einzigen Pflanzenreihe interpretieren und nicht von 12 (Fischer 2012). Mittels hardwarebeschleunigter Algorithmen ist das aktuelle Bildverarbeitungssystem auch in der Lage, eine ähnliche Performance bei gleichzeitig leistungsfähigeren Algorithmen zu liefern. Die Verarbeitungsgeschwindigkeit lässt sich noch weiter durch eine direkte Vorverarbeitung der Bilder auf der Kamera beschleunigen. Somit müssten nur noch Pixelkoordinaten der einzelnen Objekte zum Host übertragen werden. Die zu übermittelnde Datenmenge würde sich auf einen Bruchteil des Originalbildes reduzieren. Fraglich ist, ob eine Reduzierung der Laufzeit noch große Performancevorteile bringt. Da die hydraulische Steuerung schon eine Ansprechzeit von 40 ms aufweist, müsste zuerst die Ansprechzeit der hydraulischen Regelung verbessert werden, um einen Effekt erzielen zu können.

12.2.10 Systemgrenzen

Durch Betrachtung der einzelnen Komponenten kann eine Abschätzung für die Systemgrenzen getroffen werden. Die Bildverarbeitung ist in der Lage bis zu einer Fahrgeschwindigkeit von 4 km/h die Pflanzenmittelpunkte zu lokalisieren. Der Rotor erreicht bei dieser Fahrgeschwindigkeit sehr hohe Umfangsgeschwindigkeiten. Dies verursacht einen Erdwurf auf die benachbarte Pflanzenreihe. Auch nimmt die Genauigkeit der hydraulischen Regelung ab und es müsste das hydraulische System durch Servomotoren ersetzt werden. Diese Änderung würde die Systemkosten verdoppeln (Heinrich 01.07.2018). Eine Flächenleistung von 1,5 ha/h und die damit verbundene Fahrgeschwindigkeit von 2,5 km/h ist mit einer Arbeitsbreite von 6 m nur schwer zu übertreffen. Im Jugendstadium ist die Fahrgeschwindigkeit allein schon durch die Schare im Reihenzwischenraum begrenzt, da diese bei engem Hackspalt und zu hoher Fahrgeschwindigkeit sonst die Pflanzen verschütten.

12.2.11 Übertragung des Systems auf andere Kulturen

Ein Einsatz der Hackmaschine in anderen Kulturen, wie Mais und Sonnenblumen, ist denkbar. Eine Aussaat nicht pillierter Saatgüter ist mit mechanischer Einzelkorntechnik nur sehr schwer zu umzusetzen. Beim Einsatz eines pneumatischen Vereinzlungssystems müsste zuerst geprüft werden, ob damit eine ähnliche Ablageperformance wie mit der Kverneland Unicorn erzielt werden kann (siehe 12.2.2). Ein weiterer denkbarer Einsatzbereich sind gepflanzte Kulturen wie Kohl oder andere Gemüsearten. Diese können nämlich ähnlich synchronisiert gepflanzt werden (Ferrari Costruzioni Meccaniche 2020). Bei diesen Kulturen ist nicht unbedingt eine Ablage im Dreiecks- oder Quadratverband nötig, da bei gepflanzten Kulturen ein Größenunterschied zwischen Beikraut und Kulturpflanze existiert. Eine Unterscheidung ist wesentlich einfacher möglich und es ist nicht zwingend erforderlich, mit Vernetzung der Reihenpositionen untereinander zu arbeiten. Am rentabelsten ist der Einsatz in konkurrenzschwachen Kulturen (bspw. Kohl, Sellerie, Kopfsalat), welche einen großen Abstand in der Reihe besitzen. Je größer die Distanz der Pflanzen in der Reihe, desto größer ist die Ersparnis der Handarbeit, da die Schutzbereiche um die Kulturpflanze einen immer kleineren Gesamtanteil besitzen. Die unbearbeitete Fläche pro ha kann somit deutlich reduziert werden.

12.2.12 Beeinflussung des Ablagepunkts durch die Parallelogramm-Aufhängung

Durch die Aufhängung des Säorgans an einem Parallelogramm verändert sich die Distanz zwischen Maschinenhauptrahmen und Säschare durch die Veränderung der relativen Höhe des Pillenablagepunktes zum Maschinenhauptrahmen (Abbildung 61). Dieser Messfehler tritt so-

wohl bei der Hackmaschine als auch bei der Sämaschine auf. Dieser Fehler kann nur berechnet werden, wenn die Winkel des Parallelogramms zum Hauptrahmen ständig gemessen und der Abwurfpunkt des Saatkorns laufend korrigiert wird.



Abbildung 61: Standard-Einzelkorn-Säaggregat mit Parallelogramm-Aufhängung (Amazonen-Werke H. Dreyer SE & Co. KG 2021)

Anstatt der Messeinrichtung könnte auch eine Linearführung eingesetzt werden, durch Unebenheiten könnte somit kein Positionierungsfehler entstehen (Abbildung 62). Die Linearführung ist aber gegenüber den Parallelogrammführungen wesentlich störungsanfälliger. Starke Stoßbelastungen sorgen für eine schnelle Vergrößerung des Führungsspiels. Schmutz und andere Anhaftungen an den Linearführungen können für ein Verklemmen der Führungen sorgen.



Abbildung 62: Linearführung der Firma HAK (K.A. Havelaar & Zn bv 2021)

12.2.13 Energieverbrauch

Zur Sicherstellung eines kurzen Ansprechverhaltens und eines hohen Drehmomentes im Bedarfsfall ist das hydraulische System als Konstantdrucksystem ausgeführt. Aus diesem Grund fällt ein Großteil der hydraulischen Leistung am Proportionalventil ungenutzt in Form von

Wärme als Verlustleistung an. Würde die Kraft elektrisch übertragen, könnte das Drehmoment der Rotoren bedarfsgerecht geregelt werden und der Gesamtenergiebedarf könnte um 70–80 % reduziert werden. Aufgrund der kurzen Einsatzzeiten des Gesamtsystems spielt der Energieverbrauch eine untergeordnete Rolle. Der Gesamtenergieverbrauch für einen Hackdurchgang mit einer Rotorhacke beträgt ca. 4 l/ha. Durch den hohen Druckabfall an den Steuerkanten des Ventils werden die Einsatztemperaturen des Ventils überschritten. Beim Betrieb außerhalb des eingesetzten zugelassenen Spektrums neigt der Kolben zum Klemmen. Eine präzise Positionsregelung des Systems ist somit nicht mehr möglich. Abhilfe könnte hier durch einen zusätzlichen Wärmeüberträger geschaffen werden. Alternativ könnte auch das Schluckvolumen der Hydraulikmotoren erhöht und der Betriebsdruck im Konstantdrucksystem reduziert werden. Hierdurch würde sich zwar nicht die anfallende Wärmemenge am Ventil reduzieren, aber durch den höheren Öldurchsatz würden sich das Ventil und das Öl nicht mehr so stark erhitzen.

12.2.14 Rolle des Bedieners

Der Benutzer des Hacksystems trägt einen Großteil zum Erreichen einer hohen Arbeitsqualität bei. Die Aufgabe liegt nicht mehr in der präzisen Steuerung des Traktors, sondern in der genauen Parametrierung des Erfassungsprogramms. Komplexe Algorithmen müssen verständlich dargestellt und beeinflussbar sein. Noch viel wichtiger ist aber, dass die Programme nur so viele Schnittstellen wie nötig zum Bediener haben, um eine einfache Handhabung zu garantieren. Durch das Vorgewendemanagement könnte der Hackprozess weiter automatisiert werden. Hierfür müsste ein nahtloser Übergang zwischen der GPS-Spurführung und der Kameralenkung implementiert werden. Das GPS-System könnte nicht nur am Vorgewende für die Wendeautomatisierung genutzt werden, sondern auch eine zusätzliche Backuplösung darstellen, wenn die Signalqualität der Kamera schlecht ist. Somit könnte eine weitere Stabilisierung des Systems erreicht werden. Ein komplett autonomes System, ohne direkte Betreuung durch entsprechend geschultes Personal, stellt eine große Herausforderung dar. Hierbei ist immer die Störanfälligkeit dem kalkulatorischen Schaden der Zeit bzw. der Personalkostensparnis gegenüberzusetzen. Um eine maximale Ausfallsicherheit zu erreichen, müssten die Arbeitsqualität der Werkzeuge in Bezug auf Arbeitstiefe, Hackspaltbreite und Verstopfungen automatisch überprüft und geeignete Gegenmaßnahmen eingeleitet werden. Dieses Überwachungssystem kann nur mithilfe einer komplexen Kamera- oder aufwendigen Sensortechnik realisiert werden. Eine wesentlich sinnvollere Maßnahme wäre hierbei die Entlastung des Fahrers durch eine noch intuitivere Gestaltung der Bedienoberfläche zur einfacheren Parametrierung der Bildverarbeitungsschritte. Wünschenswert wäre hierbei eine Beschränkung auf die Parameter Pflanzhöhe, Durchmesser und Abstand in der Reihe.

12.3 Zusammenfassung der Ergebnisse

Die Erkenntnisse aus den vorangegangenen Versuchen haben gezeigt, dass es möglich ist, mithilfe von industriellen Standardkomponenten ein leistungsfähiges Hacksystem für Zuckerrüben zu entwickeln. Das Vernetzen der Pflanzenstandorte über die komplette Maschinenbreite erwies sich als sehr robuste Erkennungsmethode. Durch den zusätzlichen Einsatz von bekannten Kantendetektionsverfahren konnte bis zum beginnenden Reihenschluss (EC 31) das Verbandsmuster zuverlässig erkannt werden, obwohl unter schwierigen Bedingungen oft nur 50–75 % der Einzelpflanzen lokalisiert wurden. Die neu implementierten Divisionsbilder erwiesen sich unter wechselnden Lichtverhältnissen als äußerst robust, obgleich noch keine Lösung zur automatischen Anpassung an unterschiedliche Umweltbedingungen gefunden wurde.

Durch die konsequente Weiterentwicklung des Rotorkonzeptes nach Müter konnte ein hochpräzises und drehmomentstarkes Werkzeug entwickelt werden, welches auch unter harten Bedingungen sehr gute Unkrautregulierungseffekte zeigt. Die freischwimmende Parallelogrammaufhängung mit hydraulischer Auflagedruckregelung leistet hierfür einen großen Beitrag. Das Schrägstellen des Rotors zeigte eindrucksvoll, dass Erdbewegungen in Fahrtrichtung durch den Nullpunkteingriff des Rotors bis auf ein Minimum reduziert werden können. Fahrgeschwindigkeiten bis 3 km/h und folglich auch Flächenleistungen von über einem Hektar pro Stunde stellen kein Problem dar.

Um den Abstand zwischen Kamera und Rotor so gering wie möglich zu halten, wurde das aktiv gelenkte Frontanbaukonzept entwickelt. Hierbei lenken die Vorderräder des Traktors und die Tasträder der Hacke synchron. Dies ermöglicht auch unter schwierigsten Bedingungen ein direktes Lenkverhalten. Das Konzept weist bei gleicher Genauigkeit ein wesentlich einfacheres Handling als eine vergleichbare Hacke mit Verschieberahmen im Heckanbau auf.

In Zukunft ist es auch denkbar, dass In-Row-Systeme vermehrt im konventionellen Landbau eingesetzt werden. Mittels Spot-Spraying-Applikationen kann der Nahbereich der Kulturpflanze mit Herbizid behandelt werden, der Rest wird gehackt. Somit lassen sich Herbizid-Aufwandmengen um bis zu 90 % reduzieren und der Trend zur Reduktion der Pflanzenschutzmittel kann unterstützt werden. Zur Verbesserung und Adaptierbarkeit solcher Hacksysteme an unterschiedliche Traktoren ist es zwingend erforderlich, dass Standards wie beispielsweise „Isobus Tractor Implement Management (TIM)“ auf den Traktoren vorhanden sind.

Um zukünftig noch näher an die Kulturpflanze heranhacken zu können, benötigen die Werkzeuge eine noch präzisere Höhenführung. Nur so kann ein maximaler Bekämpfungserfolg bei minimaler Beeinträchtigung der Kulturpflanze erfolgen. Als Lösungsansätze können hierfür die berührungslose Abstandsmessung oder der Einsatz von Kraftmessbolzen in den Parallelogrammen in Betracht gezogen werden.

Der Nahbereich direkt um die Kulturpflanze herum wird auch mit einer Verbesserung der Werkzeugführung nicht komplett zu bearbeiten sein. Hierfür müssten noch andere Lösungsansätze, wie Greifsysteme oder berührungslose Systeme wie z.B. Laser, als zusätzliches Bekämpfungssystem eingesetzt werden. Für die dafür benötigte Verbesserung der Einzelpflanzenerkennung müssen weitere Detektionsverfahren genutzt werden. Eine Idee wäre der Einsatz neuronaler Netze zur Optimierung der Klassifikation der Einzelpflanzen.

Mit der Entwicklung des Hacksystems wurde ein weiterer Beitrag zur Verbesserung des ökologischen Zuckerrübenanbaus geleistet. Es sind aber noch viele weitere Schritte in der dreidimensionalen Bildverarbeitung und Werkzeugentwicklung zu leisten, um einen Bio-Rübenanbau ohne den Einsatz von Handarbeitskräften zu ermöglichen.

13 Verwertung der Ergebnisse

13.1 Zielerreichung

Die Ziele der Entwicklung eines vollautomatischen Hacksystems wurden erreicht. Es konnte ein vorführfähiger Prototyp entwickelt werden.

13.2 Nutzen für die Praxis und geplante Verwendung

Für die Praxis ist durch das Projekt ein nutzfähiger Prototyp entstanden. Dieser kann über mittelfristig in den seriellen und somit standartmäßigen Einsatz übernommen werden.

13.3 Beitrag zu förderpolitischen EIP-Zielen

Durch das Forschungsprojekt konnte ein großer Beitrag zur nachhaltigen Produktion von Biozuckerrüben geleistet werden. Durch die enge Vernetzung konnten innerhalb der Umsetzdauer ein sehr effektiver Wissenstransfer in die landwirtschaftliche Praxis stattfinden.

14 Wirtschaftliche und Wissenschaftliche Anschlussfähigkeit und weiterführende Fragestellungen

14.1 Weiterentwicklung der Hardwarekomponenten für industrielle Anforderungen

Für einen serienmäßigen Einsatz des Hacksystems müssen die Einzelkomponenten für den landwirtschaftlichen Einsatz entwickelt werden. Optimierungsbedarf besteht bei der Bildverarbeitungseinheit, bei den Kameras und bei der dezentralen Peripherie. Die zuvor genannten Komponenten sollten auf die nötige IP-Schutzklasse (ISO 20653) geprüft werden. Eine der größten Herausforderungen stellt die zentrale Recheneinheit dar. Hierfür wird bis jetzt ein Consumer PC mit 140 W TDP (Verlustleistung) bei der CPU und 120 W TDP bei der GPU genutzt. Diese Zusammensetzung sorgt für eine sehr hohe Wärmeentwicklung im Gerät. Hierfür muss ein geeignetes Kühlkonzept entwickelt werden, da eine passive Kühlung, wie bei anderen Mobilrechnern üblich, keine ausreichende Wärmeabfuhr bringt. Ein Alternativansatz zur Reduzierung der Abwärme könnte auch der Einsatz von „embedded“ Hardwarekomponenten, wie beispielweise Nvidia Jetson Xavier (NVIDIA Corporation 2021), sein. Diese spezialisierten Rechner können durch den Einsatz von spezialisierten Vision-Prozessoren die Leistungsaufnahme auf bis zu 30 W bei gleicher Performance reduzieren.

14.2 Weiterentwicklung des Rotors

Eine weitere Herausforderung ist die Regelung der Arbeitstiefe. Der Rotor wird einerseits durch den Auflagedruck in der Feder gestützt, andererseits durch einen Anschlag nach unten begrenzt. Bei leichten Unebenheiten, nicht richtig eingeebnetem Saatbett oder wechselnden Bodenverhältnissen ändert sich die Arbeitshöhe des Rotors zwischen den Pflanzen. Schneidet der Rotor zu tief, neigt er dazu die Pflanzen zu verschütten, arbeitet er zu flach, werden einige Beikräuter nicht abgeschnitten. Abhilfe für dieses Problem könnte eine vollautomatische Rotorhöhenregelung schaffen. Als Stellgröße könnte hierfür der Differenzdruck zwischen Vor- und Rücklauf des Hydraulikmotors genutzt werden. Der Differenzdruck am Motor ist proportional zum abgerufenen Drehmoment. Mit dem Ziel, das abgerufene Drehmoment des Rotors konstant zu halten, könnte über die Spindel die Arbeitshöhe kontinuierlich an die Bodenbedingungen angepasst werden.

Eine Alternative zur Differenzdruckregelung ist die aktive Regelung der Rotorhöhe über einen Abstandssensor. Über einen Ultraschallsensor kann berührungslos die Distanz zwischen dem Boden in der Pflanzenreihe und dem Rotorparallelogramm gemessen werden. Sind die Pflanzen größer als EC 14 ist eine Führung des Werkzeuges mittels Ultraschall nicht mehr möglich, da die Messergebnisse des Sensors durch die Pflanzenhöhe zu stark beeinträchtigt wären.

Als mechanische Verbesserung könnte auch vom Keimblatt- bis zum 4-Blattstadium der Einsatz von anderen Parallelogrammen einen Vorteil bringen. Hierbei könnten die Tasträder näher an der Reihe geführt werden, um somit eine exaktere Höhenabtastung zu erreichen (siehe Abbildung 63). Um die Höhe in der Pflanzenreihe noch besser abtasten zu können, würde eine Pendelachse anstatt zwei fest montierter Tasträder einen zusätzlichen Vorteil bringen, da die Höhe dazwischen genau gemittelt wird.

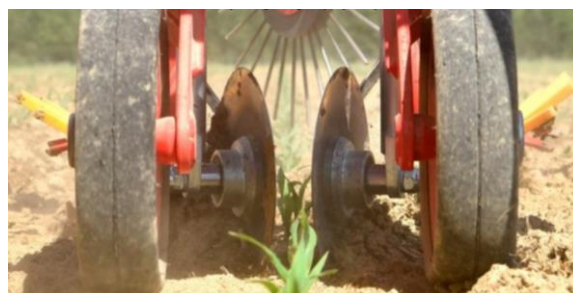


Abbildung 63: Führung der Tasträder direkt an der Pflanzenreihe (Einböck GmbH 2020)

14.3 Weiterentwicklung des Werkzeuges

Hersteller wie die Firmen Einböck GmbH oder K.U.L.T. Kress Umweltschonende Landtechnik GmbH verwenden an den Parallelogrammen mit Tastrad links und rechts der Pflanzenreihe starre Sechsscheiben, um sehr nah an der Pflanzenreihe das Beikraut zu bekämpfen. Dieses System weist den Vorteil auf, dass sich durch die starre Befestigung der Abstand zwischen

Pflanzenreihe und Schneidscheibe unter unterschiedlichen Bodenbeschaffenheiten nicht ändert. Unter steinigem oder sehr harten Bedingungen kann das Werkzeug nicht nach oben ausweichen, was zu Verstopfungen oder Beschädigungen des Aggregates führen kann. Eine Weiterentwicklung dieser starren Bauweise stellt die in Abbildung 64 gezeigte Konstruktion dar. Hierbei wurden das Scheibensech und das Winkelmesser an einen gemeinsamen Werkzeugträger verbaut. Somit muss beim Ändern des Hackspaltes oder der Arbeitstiefe nur noch ein einzelnes Aggregat verstellt werden. Die Gleitlagerung sorgt für eine spurstabile Führung des Aggregates, erlaubt aber ein Ausweichen nach oben bei Überlastung des Elements. Die Unanfälligkeit der Einheit gegenüber Mulch und nassen Bedingungen sind ein weiterer Vorteil dieser Kombination. Da die vollflächige Bearbeitung des Oberbodens sehr große Risiken für Erosion bei Starkregenereignissen birgt, könnte mithilfe dieser Technik der Mulchanteil auf der Fläche erhöht werden.

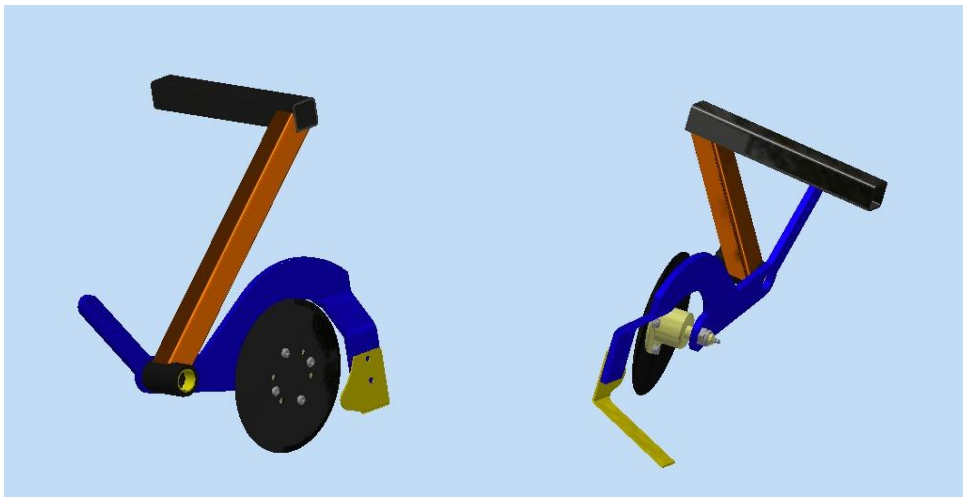


Abbildung 64: Integration des Winkelmessers an die Schutzscheibe. Der Werkzeugträger kann somit komplett als komplette Einheit im Zinkenkopf ersetzt werden. (Sechscheibe (schwarz), Schwinge (blau), Winkelmesser (gelb))

14.4 Vereinzlung der Zuckerrübe

Da die optimale Bestandsdichte schon bei 80.000 Pflanzen pro ha erreicht ist, wäre es für den Bioanbau eine Möglichkeit, die Rüben an den Sollpositionen doppelt abzulegen. Nach dem Auflaufen der Rüben könnten die Doppelstellen mittels der optischen Erkennung entfernt und die nicht entfernte Pflanze mit Koordinaten für die nachfolgenden Hackdurchgänge abgespeichert werden. Bei einem 45er Reihenabstand würde der Abstand in der Reihe auf 27 cm ansteigen, die maschinell mit dem Rotor hackbare Fläche könnte deutlich erhöht und somit die Handarbeit weiter reduziert werden.

14.5 Unkrautbekämpfung im Nahbereich

Durch die eingesetzte Technik kann die unbearbeitete Fläche stark reduziert werden. Es bleibt aber immer noch eine Fläche von 5x5 cm pro Kulturpflanze übrig. Bei einem durchschnittlichen

Unkrautdruck von ca. 200 Pfl./m² würde nur noch bei jeder zweiten Rübenpflanze eine Beikrautpflanze stehen. Um nun in diesem Nahbereich mechanisch wirken zu können, ist eine hochpräzise dreidimensionale Pflanzenerfassung nötig. Als Aktor müsste ein mehrachsgeführtes Werkzeug eingesetzt werden. Anhand der ermittelten Pflanzenpositionen ist es nötig, eine Bahnkurve für die Werkzeugführung zu berechnen. Aufgrund der sich über den Boden bewegendes Maschine ist es zwingend erforderlich, dass der Werkzeugkopf über die Kamera ständig nachkorrigiert wird. Die Flächenleistung einer solchen Maschine wird schätzungsweise bei ca. 0,25–0,5 ha/h bei 6 m Arbeitsbreite liegen. Die Kosten für die Kameratechnik werden sich aufgrund der 3D-Technik verdoppeln, die Kosten für 3achsige Aktoren wird im Bereich der vier- bis fünffachen einer Rotoreinheit liegen.

Als Alternative zum Rotor könnte im Keimblattstadium der Rübe mithilfe von Lasern der Nahbereich der Rübe sehr präzise bis auf wenige Millimeter an die Kulturpflanze heran bearbeitet werden. Da der Laserstrahl keine Erdbewegung in der Pflanzenreihe verursacht, arbeitet er völlig verschüttungsfrei. Die konventionelle Hacktechnik bearbeitet die komplette Fläche bis auf das 6 cm breite Hackband. Im Selbigen sorgen mehrere einzeln geschaltete Laserpakete für eine vollflächige Erhitzung der Oberfläche. Somit könnte man den 6 cm breiten Hackspalt in 12 einzelne 5-mm-Raster unterteilen, welche automatisch ein- und ausgeschaltet werden können. Die Behandlung kann direkt im Sichtfenster der Kamera stattfinden, da keine Werkzeuge das Sichtfeld der Kamera blockieren können. Auch der Schlupf als zusätzliche Störgröße ist bei diesem Konzept vernachlässigbar.

Vergleicht man das vollflächige Abtöten im Hackspalt mit einem Abflamngerät, lassen sich nachfolgende Überschlagsrechnungen anstellen. Für eine vollflächiges Abflammen werden ca. 75 kg Flüssiggas pro ha benötigt. Der Brennwert der eingesetzten Menge beträgt 1050 kWh/ha (Bertram 1996). Wird nun nicht vollflächig gearbeitet, sondern nur der Hackspalt bearbeitet, werden bei einem Reihenabstand von 45 cm nur 6 cm nur ca. 13 % der eingesetzten Energie benötigt. Dies würde einem thermischen Energieeintrag von 136 kWh/ha entsprechen. Selbst wenn der Wirkungsgrad bei einem laserbasierenden System deutlich höher ist, werden trotzdem sehr starke Laserquellen mit dementsprechender Leistungselektronik benötigt. Berührungslose Systeme wie Laser können nur dann eingesetzt werden, wenn die Pflanzen nicht zu groß sind, denn bei größeren Pflanzen nimmt die Komplexität zur Pflanzenlokalisierung deutlich zu. Ein Arbeiten unter den Blättern der Kulturpflanze ist konstruktionsbedingt mit Lasern nicht möglich.

15 Kommunikations- und Disseminationskonzept

Zur Betrachtung der Wirtschaftlichkeit des Rotorsystems werden mehrere Annahmen getroffen. Falls die Hackmaschine auch ohne Rotor als Standardhacke eingesetzt wird, dann muss für die Betrachtung der Wirtschaftlichkeit nur der Aufpreis für das In-Row-System betrachtet werden. Es gilt die Annahme, dass die Kosten für den Standardhackvorgang identisch sind. Die unterschiedlichen Fahrgeschwindigkeiten können aufgrund des geringen Kostenanteils vernachlässigt werden. Auch in einem konservativen Szenario mit einer Einsparung der Handarbeit von nur 50 h/ha amortisiert sich eine Anschaffung nach 82,75 ha ohne Förderung und mit 40 %iger Förderung bereits nach 49,7 ha (Abbildung 65). Diese Voraussetzungen gelten nur, wenn ein passendes Einzelkornsägerät auf dem Betrieb vorhanden ist, oder sowieso eine Ersatzinvestition in ein neues Gerät getätigt werden müsste.

	Reihenhacke	Rotorhacke
Anschaffungspreis Reihenhacke (12-reihig)	60 000 EUR	60 000 EUR
+ Aufpreis für Rotor	--	+ 60 000 EUR
- Zuschuss durch Landwirtschaftliche Rentenbank (BMEL) 40 %	-24 000 EUR	- 48 000 EUR
Investitionskosten	= 36 000 EUR	= 72 000 EUR
Handhacke		
Arbeitsstunden Handhacken	150 h/ha	100 h/ha
x Arbeitsstundenkosten	× 14,50 EUR/h	× 14,50 EUR/h
	= 2 175 EUR/ha	= 1 450 EUR/ha
Amortisationsdauer des Rotors		
Aufpreis für Rotor mit Förderung	--	36 000 EUR
36 000 EUR / (2 175 EUR/ha - 1 450 EUR/ha)		49,7 Hektar

Abbildung 65: Amortisationsrechnung der Rotorhacke

16 Literaturverzeichnis

Altman, N. S. (1992): An Introduction to Kernel and Nearest-Neighbor Nonparametric Regression. In: *The American Statistician* 46 (3), S. 175–185. DOI: 10.1080/00031305.1992.10475879.

Amazonen-Werke H. Dreyer SE & Co. KG (Hg.) (2021): Einzelkornsätechnik ED. Online verfügbar unter <https://amazone.de/de-de/produkte-digitale-loesungen/landtechnik/saetechnik/einzelkorn-saetechnik/anbau-einzelkorn-saemaschine-ed-79762>, zuletzt geprüft am 11.11.2021.

Asatsuma, T.; Sakano, Y.; Iida, S.; Takami, M.; Yoshida, I.; Ohba, N. et al. (2019): Sub-pixel Architecture of CMOS Image Sensor Achieving over 120 dB Dynamic Range with less Motion Artifact Characteristics. Online verfügbar unter <http://www.image-sensors.org/past%20workshops/2019%20workshop/2019%20papers/r31.pdf>.

Atos spa (2021): Proportional directional valves F150-4/E. Online verfügbar unter <https://www.atos.com/tables/english/F150.pdf>, zuletzt geprüft am 11.11.2021.

BAES (2017): Österreichische Beschreibende Sortenliste 2017. Hg. v. Österreichisches Bundesamt für Ernährungssicherheit. Online verfügbar unter https://www.baes.gv.at/fileadmin/user_upload/35_S%C3%A4verfahren_Einleitung_BSL17.pdf, zuletzt geprüft am 11.11.2021.

Bauer, G. (Hg.) (1992a): Ölhydraulik. Wiesbaden: Vieweg+Teubner Verlag.

Bauer, G. (1992b): Stetig verstellbare Ventile. In: G. Bauer (Hg.): Ölhydraulik. Wiesbaden: Vieweg+Teubner Verlag, S. 183–208.

BB Umwelttechnik (2019): BB - Umwelttechnik Frontschmetterling 9 Meter Unkrautbekämpfung Zuckerrübe. Online verfügbar unter <https://www.youtube.com/watch?v=jbqf5Y9bWpc>, zuletzt geprüft am 11.11.2021.

Bertram, A. (1996): Geräte- und Verfahrenstechnische Optimierung der thermischen Unkrautbekämpfung. Online verfügbar unter <https://mediatum.ub.tum.de/820132>, zuletzt geprüft am 11.11.2021.

Biller, R. (2008): Grundlagen für eine innovative Regulierung von Problemunkräutern im Ökologischen Landbau. In: *Landbauforschung. VTI Agriculture and forestry research*. Braunschweig: VTI, S. 35–40.

Böhler, D.; Dierauer, H.; Krauss, M.; Schmid, N. (2018): Entwicklung von Alternativen zum Pflug. Zwischenbericht 2018. Online verfügbar unter [boehler-etal-2018-Zwischenbericht_Sur-la-Croix2018_Boden_def.pdf](#), zuletzt geprüft am 11.11.2021.

Brinkmann, W. (1964): Möglichkeiten zum mechanischen Vereinzeln von Zuckerrüben. Bonn (Grundlagen der Landtechnik, 21).

Bucher, U. P. (2018): Entwicklung einer selektiv arbeitenden Reihenhackmaschine mit elektrisch angetriebenem Werkzeug zur Unkrautregulierung im ökologischen Zuckerrübenanbau. Hohenheim: Kommunikations-, Informations- und Medienzentrum der Universität Hohenheim. Online verfügbar unter <http://opus.uni-hohenheim.de/volltexte/2018/1461/>.

Canny, J. (1986): A Computational Approach to Edge Detection (IEEE transactions on pattern analysis and machine intelligence).

Department of Electronic and Information Engineering (Hg.) (2021): Fundamentals in Image processing. The Hong Kong Polytechnic University. Online verfügbar unter <http://www.eie.polyu.edu.hk/~enyhchan/imagef.pdf>, zuletzt geprüft am 11.11.2021.

Deveikytė, I.; Seibutis, V. (2006): Broadleaf weeds and sugar beet response to phenmedipham, desmedipham, ethofumesate and triflurosulfuron-methyl.

Diprose, M. F.; Fletcher, R.; Longden, P. C.; Champion, M. J. (1985): Use of electricity to control bolters in sugar beet (*Beta vulgaris* L.): a comparison of the electrothermal with chemical and mechanical cutting methods. In: *Weed Res* 25 (1), S. 53–60. DOI: 10.1111/j.1365-3180.1985.tb00617.x.

Eaton (2021): Aufbau Gerollermotor. Online verfügbar unter <https://www.eaton.com/de/de-de/products/motors-generators/high-torque/five-considerations-when-choosing-geroller-motors.html>, zuletzt geprüft am 11.11.2021.

Einböck GmbH (2020): Chopstar Twin. Online verfügbar unter <https://www.einboeck.at/produkte/ackerkulturpflege/hackgeraet/chopstar-twin>, zuletzt geprüft am 11.11.2021.

FARMDROID ApS (2020): Produktvorstellung Farmdroid FD 20. Online verfügbar unter <https://farmdroid.dk/de/produkt-2/>, zuletzt aktualisiert am 11.11.2021.

Farming Revolution GmbH (2021): Autonomous Weeding Robot. Online verfügbar unter <https://www.farming-revolution.com/>, zuletzt geprüft am 11.11.2021.

Ferrari Costruzioni Meccaniche (2020): synchronized planting machines. Online verfügbar unter <https://ferraricostruzioni.com/de/>, zuletzt geprüft am 11.11.2021.

FIBL (Hg.) (2017): Merkblatt Biozuckerrüben. Online verfügbar unter <https://org-prints.org/id/eprint/9252/7/Biozuckerr%C3%BCben.pdf>, zuletzt geprüft am 11.11.2021.

- Fischer, D. (2012): Mechanische Unkrautkontrolle im biologischen Zuckerrübenanbau. Hamburg: Kovač (Schriftenreihe Agrarwissenschaftliche Forschungsergebnisse, Bd. 43).
- Fösten KG: Rüben hacken quer zur Reihe !!! Kverneland/Kubota. Online verfügbar unter <https://www.facebook.com/watch/?v=538097363522273>, zuletzt geprüft am 11.11.2021.
- Garford Farm Machinery Ltd (Hg.) (2021): Garford Robocrop. Online verfügbar unter <https://garford.com/de/robocrop-inrow-weeder/>, zuletzt geprüft am 11.11.2021.
- Gerd, K. (2012): Die Geschichte der Industriellen Bildverarbeitung. Online verfügbar unter <https://www.elektronikpraxis.vogel.de/die-geschichte-der-industriellen-bildverarbeitung-a-381077/>, zuletzt geprüft am 11.11.2021.
- Guerrero, J. M.; Guijarro, M.; Montalvo, M.; Romeo, J.; Emmi, L.; Ribeiro, A.; Pajares, G. (2013): Automatic expert system based on images for accuracy crop row detection in maize fields. In: *Expert Systems with Applications* 40 (2), S. 656–664. DOI: 10.1016/j.eswa.2012.07.073.
- Hall, D. R. (2018): A Rapidly Deployable Approach for Automated Visual Weed Classification without Prior Species Knowledge.
- Heinrich, S. (20.08.20): Beikrautregulierung im ökologischen Biozuckerrübenanbau. Interview mit Benjamin Kirchberger und Südzucker AG.
- Heinrich, S. (14.04.20): Farmdroid FD 20 im Praxiseinsatz. Interview mit M. Lenk.
- Heinrich, S. (16.07.21): Interview zu Versuchen Kverneland Geoseed Lv.2. Interview mit M. Allmannsbeck.
- Heinrich, S. (10.03.21): regenerativer Zuckerrübenanbau. Interview mit W. Mohr.
- Heinrich, S. (2018): Maschinenvergleich unterschiedlicher Selektivhacksysteme im biologischen Zuckerrübenanbau.
- Heinrich, S. (25.05.2018): Preisauskunft Multispektralkameras. Interview mit Jörg Schmitz und Stemmer Imaging AG.
- Heinrich, S. (01.07.2018): technische Auskunft Servomotor. Interview mit V. Löffler und Actronic-Solutions GmbH.
- Heinrich, S. (04.05.2019): Garford Robocrop. Interview mit P. Volmer und H. Pfisterer.
- Hough, P. V. C. (1962): Method and means for recognizing complex patterns. Veröffentlichungsnr: 3,069,654.
- K.A. Havelaar & Zn bv (Hg.) (2021): HAK SH Serie. Online verfügbar unter <https://haknl.com/hackmaschinen/hak-sh-serie/?lang=de>, zuletzt geprüft am 11.11.2021.

K.U.L.T. Kress Umweltschonende Landtechnik GmbH.

Kamoussi, P.; Chan, T. M.; Suri, S. (2014): Closest pair and the post office problem for stochastic points. In: *Computational Geometry* 47 (2), S. 214–223. DOI: 10.1016/j.comgeo.2012.10.010.

Köller, K.; Vinzent, B.; Demmel, M. (2019): Mechanische Unkrautregulierung – Technik für die Praxis. Hg. v. DLG e.V. (DLG Merkblatt, 449). Online verfügbar unter https://www.dlg.org/fileadmin/downloads/landwirtschaft/themen/publikationen/merkblaetter/dlg-merkblatt_449.pdf, zuletzt geprüft am 15.11.2021.

König, H. P.; Meyerkordt, A.; Koch, H. J. (2005): ZUCKERRÜBEN ÖKOLOGISCH ANBAUEN. Ein Leitfaden für die Praxis.

Kttn News (2020): University of Missouri Research looks at technology to kill weeds. Online verfügbar unter <https://www.kttn.com/university-of-missouri-research-looks-at-technology-to-kill-weeds/>, zuletzt geprüft am 11.11.2021.

Kverneland (2020): Aufbau Säherz. Online verfügbar unter <https://www.kverneland.de/Kverneland-brand-Germany/Saetechnik/Mechanische-Einzelkornsaemaschinen/Kverneland-UNICORN-R>, zuletzt geprüft am 11.11.2021.

KWS SAAT SE & Co. KGaA (Hg.): Hilfreiche Tipps zur optimalen Aussaat von Zuckerrüben. Online verfügbar unter <https://www.kws.com/de/de/beratung/aussaat/zuckerruebe/>, zuletzt geprüft am 11.11.2021.

Langer, F.; Mandtler, L.; Milioto, A.; Palazzolo, E.; Stachniss, C. (2018): Geometrical Stem Detection from Image Data for Precision Agriculture. Online verfügbar unter <https://arxiv.org/pdf/1812.05415>.

Leivermann, S. (2015): Entwicklungsstadien der Zuckerrüben. Hg. v. Landwirtschaftskammer Nordrhein-Westfalen. PSD Münster. Online verfügbar unter <https://www.landwirtschaftskammer.de/landwirtschaft/ackerbau.../zuckerrueben/zuckerrueben-ec-pdf.pdf>, zuletzt geprüft am 13.11.2021.

Liang, J. Y.; Qin, Y.; Hong, Z. L. (2007): An Auto-exposure algorithm for detecting high contrast lighting conditions. In: 2007 7th International Conference on ASIC. 2007 7th International Conference on ASIC. Guilin, China, 22.10.2007: IEEE, S. 725–728.

Lottes, P.; Behley, J.; Chebrolu, N.; Milioto, A.; Stachniss, C. (2018a): Joint Stem Detection and Crop-Weed Classification for Plant-specific Treatment in Precision Farming.

Lottes, P.; Behley, J.; Milioto, A.; Stachniss, C. (2018b): Fully Convolutional Networks With Sequential Information for Robust Crop and Weed Detection in Precision Farming. In: *IEEE Robot. Autom. Lett.* 3 (4), S. 2870–2877. DOI: 10.1109/LRA.2018.2846289.

- Machinefabriek Steketee B.V. (2021): Ec Weeder Light. Online verfügbar unter <https://www.steketee.com/>, zuletzt geprüft am 11.11.2021.
- MacKay, D. J. C. (2011): Information theory, inference, and learning algorithms. [Nachdr.]. Cambridge: Cambridge Univ. Press.
- Maschinenring Hannover (2020): Heckhacke ohne Verschieberahmen. Online verfügbar unter <https://mrmrmarkt.de/maschinendetails/maishacken-maschine-41>, zuletzt geprüft am 11.11.2021.
- Mayböck, K.: GEOseed. Vertriebsschulungsunterlagen, zuletzt geprüft am 11.11.2021.
- Meil, O.; Glasbrenner, J. (2019): Verfahren und Vorrichtung sowie Auswerteeinrichtung zur Erkennung und Lokalisation einer Pflanze sowie Verwendung des Verfahrens. Veröffentlichungsnr: WO2020/114728 A1.
- Moog GmbH (2021): Moog-ServoValves-G761_761Series-Catalog-en. Online verfügbar unter [Moog-ServoValves-G761_761Series-Catalog-en.pdf](#), zuletzt geprüft am 11.11.2021.
- Murphy, S. D.; Clements, D. R.; Belaoussoff, S.; Kevan, P. G.; Swanton, C. J. (2006): Promotion of weed species diversity and reduction of weed seedbanks with conservation tillage and crop rotation. In: *Weed sci.* 54 (1), S. 69–77. DOI: 10.1614/WS-04-125R1.1.
- Müter, M.: Kameragesteuerte mechanische Unkrautbekämpfung in Reihenkulturen. Dissertation. Rheinische Friedrich-Wilhelms-Universität Bonn, Bonn. Online verfügbar unter <http://nbn-resolving.de/urn:nbn:de:hbz:5n-48366>, zuletzt geprüft am 14.11.2021.
- Nalatec GmbH (2019): Presseberichte 2019. Online verfügbar unter [Nalatec GmbH 2019 - Presseberichte 2019.pdf](#), zuletzt geprüft am 11.11.2021.
- Namee, B. M.: Digital Image Processing: Introduction. Online verfügbar unter <http://www.comp.dit.ie/bmacnamee>, zuletzt geprüft am 11.11.2021.
- National Instruments (2020): LabVIEW.
- Nørremark, M.; Griepentrog, H. W.; Nielsen, J.; Søgaard, H. T. (2008): The development and assessment of the accuracy of an autonomous GPS-based system for intra-row mechanical weed control in row crops. In: *Biosystems Engineering* 101 (4), S. 396–410. DOI: 10.1016/j.biosystemseng.2008.09.007.
- NVIDIA Corporation (2021): NVIDIA Jetson AGX Xavier. Online verfügbar unter <https://www.nvidia.com/de-de/autonomous-machines/embedded-systems/jetson-agx-xavier/>, zuletzt geprüft am 14.11.2021.
- Oebel, H. (2006): Teilschlagspezifische Unkrautbekämpfung durch raumbezogene Bildverarbeitung im Offline- und (Online-) Verfahren (TURBO).

- OmniSci Inc. (Hg.) (2021): How CPU and GPU Work Together. Online verfügbar unter <https://www.omnisci.com/technical-glossary/cpu-vs-gpu>, zuletzt geprüft am 11.11.2021.
- Open CV Library (2021): Image Thresholding. Online verfügbar unter https://docs.opencv.org/4.5.2/d7/d4d/tutorial_py_thresholding.html, zuletzt geprüft am 11.11.2021.
- Otsu, N. (1979): A Threshold Selection Method from Gray-Level Histograms. In: *IEEE Trans. Syst., Man, Cybern.* 9 (1), S. 62–66. DOI: 10.1109/TSMC.1979.4310076.
- Paulus, S. (2019): Measuring crops in 3D: using geometry for plant phenotyping. In: *Plant methods* 15, S. 103. DOI: 10.1186/s13007-019-0490-0.
- Paz, R. A. (2001): The Design of the PID Controller.
- Precision Planting (2021): SpeedTube. Online verfügbar unter <https://www.precisionplanting.com/products/product/speedtube>, zuletzt geprüft am 11.11.2021.
- Raven Industries, Inc. (2021): Implement Steering. Online verfügbar unter <https://ravenprecision.com/products/guidance-steering/implement-steering>, zuletzt geprüft am 11.11.2021.
- Rovira-Más, F.; Zhang, Q.; Reid, J. F.; Will, J. D. (2005): Hough-transform-based vision algorithm for crop row detection of an automated agricultural vehicle. In: *Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part D: Journal of Automobile Engineering* 219 (8), S. 999–1010. DOI: 10.1243/095440705X34667.
- Ruckelshausen, A. (Hg.) (2018): Informatik in der Land-, Forst- und Ernährungswirtschaft. Fokus: Digitale Marktplätze und Plattformen : Referate der 38. GIL-Jahrestagung 26.-27. Februar 2018, Kiel, Germany. Bonn: Gesellschaft für Informatik e.V. (GI); Köllen Druck+Verlag GmbH (GI-Edition, volume P-278).
- Schmotzer, H. (2021): Zwischenachshacke. Hg. v. SCHMOTZER Hacktechnik GmbH & Co. KG. Online verfügbar unter <https://www.schmotzer-ht.de/portfolio/anbauvarianten/>, zuletzt geprüft am 11.11.2021.
- Simard, M. J.; Page, E. R.; Nurse, R. E. (2019): Can Weeds Overtopping Soybean or Adzuki Bean Be Mechanically Pulled to Reduce Their Seed Input? In: *Weed Technol* 33 (1), S. 159–165. DOI: 10.1017/wet.2018.104.
- Stangl, T. (2021): Ansteuern eines Werkzeuges zur mechanischen Unkrautbekämpfung, 2021.
- Stemmer Imaging AG (2020): Grundlagen der Bildverarbeitung. Online verfügbar unter <https://www.stemmer-imaging.com/de-de/grundlagen/>, zuletzt geprüft am 11.11.2021.
- ISO 20653: Straßenfahrzeuge - Schutzarten (IP-Code) - Schutz gegen fremde Objekte, Wasser und Kontakt - Elektrische Ausrüstungen, zuletzt geprüft am 15.11.2021.

- Strotmann, K. (2017): Rübensaat: Engere Saatzeilen bei Zuckerrüben. Hg. v. dlz agrarmagazin. Online verfügbar unter <https://www.agrarheute.com/pflanze/zuckerrueben/ruebensaat-engere-saatzeilen-zuckerrueben-533082>, zuletzt geprüft am 11.11.2021.
- Stumm, C.; Lukashyk, P.; Köpke, U. (2011): Direkte Maßnahmen zur Kontrolle von *Cirsium arvense* (Pflug/Grubber) und *Vicia hirsuta* (Striegel). In: B. Wilhelm und O. Hensel (Hg.): Landtechnische Lösungen zur Beikrautregulierung im ökologischen Landbau, S. 47–52.
- Thomas Hatzenbichler Agro-Technik GmbH: Fronthackmaschine. Online verfügbar unter <https://www.hatzenbichler.com/de/>, zuletzt geprüft am 11.11.2021.
- Tillett, N. D. (2015): Autonomous Crop Sprayer 1996. Online verfügbar unter <https://www.youtube.com/watch?v=fvD5klzdg4M>, zuletzt geprüft am 11.11.2021.
- ISO 11783: Tractors and machinery for agriculture and forestry — Serial control and communications data network.
- Unbehauen, H. (2008): Regelungstechnik I. Klassische Verfahren zur Analyse und Synthese linearer kontinuierlicher Regelsysteme, Fuzzy-Regelsysteme. 15., überarbeitete und erweiterte Auflage. Wiesbaden: Vieweg+Teubner (Springer eBook Collection Computer Science & Engineering). Online verfügbar unter <http://swbplus.bsz-bw.de/bsz286099292cov.htm>.
- Vidović, I.; Cupec, R.; Hocenski, Ž. (2016): Crop row detection by global energy minimization. In: *Pattern Recognition* 55, S. 68–86. DOI: 10.1016/j.patcog.2016.01.013.
- Vuong, Q. K.; Yun, S. H.; Kim, S. (2008): A new auto exposure and auto white-balance algorithm to detect high dynamic range conditions using CMOS technology. Online verfügbar unter http://www.iaeng.org/publication/wcecs2008/wcecs2008_pp1204-1208.pdf.
- Wisotop (2017): Farbmodelle. Online verfügbar unter www.wisotop.de/Farbmodelle-RGB-CMYK-HSS-HSL.php, zuletzt geprüft am 11.11.2021.
- Wodok, M.; Rothmund, M.: ISOAgLib Safety Edition: OSB AG. Online verfügbar unter <https://www.isobus-experts.com/isobus-software/isobus-stack.html>, zuletzt geprüft am 14.11.2021.
- Ziegler, J. G.; Nichols, N. B. (1942): Optimum Settings for Automatic Controller.