

Abschlussbericht
OPG Innovative Hacktechnik

**Entwicklung eines Hackverfahrens zur Bekämpfung von Beikraut
und Beigras in landwirtschaftlichen Kulturen als leistungsfähige Al-
ternative zum Herbizid**

Februar 2023



Europäischer Landwirtschaftsfonds
für die Entwicklung des ländlichen Raums (ELER):
Hier investiert Europa in die ländlichen Gebiete



Baden-Württemberg
MINISTERIUM FÜR LÄNDLICHEN RAUM
UND VERBRAUCHERSCHUTZ



Inhaltsverzeichnis

1.	Einleitung.....	- 5 -
1.1	Ausgangssituation	- 5 -
1.2	Projektziel und konkrete Aufgabenstellung	- 5 -
1.3	Mitglieder der Operationellen Gruppe (OPG).....	- 6 -
1.3.1	Direkte Mitglieder der operationellen Gruppe.....	- 6 -
1.3.2	Projektbegleitende Studien	- 7 -
1.4	Projektgebiet.....	- 8 -
1.5	Projektlaufzeit und – Dauer.....	- 8 -
1.6	Budget	- 8 -
1.7	Ablauf des Vorhabens	- 9 -
1.8	Zusammenfassung der Ergebnisse	- 9 -
2	Eingehende Darstellung.....	- 10 -
2.1	Verwendung der Zuwendung.....	- 10 -
2.1.1	Laufende Kosten der Zusammenarbeit.....	- 10 -
2.1.2	Kosten für die Durchführung der Arbeitsschritte.....	- 10 -
2.1.3	Kosten für Investitionen (60% förderfähig).....	- 10 -
	• Kamerasystem.....	- 10 -
2.1.4	Kosten für projektbegleitende Studien	- 10 -
2.2	Übersicht - Verwendung der Zuwendung.....	- 11 -
2.3	Ergebnisse der Zusammenarbeit im Projekt	- 12 -
3	Ergebnisse.....	- 13 -
3.1	Die Neukonzipierte Lenkung der Hackmaschine.....	- 13 -
3.2	Die Steuerung der Hackmaschine mittels GPS System	- 15 -
3.2.1	Konzeption	- 15 -
3.2.2	Erprobung.....	- 17 -
3.2.3	Feldtest.....	- 19 -
3.2.4	Vergleichstest.....	- 19 -
3.3	Verbesserung der vorhandenen Komponenten.....	- 27 -

3.4	Konzeption einer Robotersteuerung	- 30 -
4	Zusammenfassung	- 32 -
5	Danksagung	- 33 -

Abbildung 1: Zusammensetzung der OPG.....	- 6 -
Abbildung 2: Betrachtung der Hackversuche in der Gruppe.....	- 12 -
Abbildung 3: Sechlenkungsprototyp.....	- 13 -
Abbildung 4: Feldtest der Sechlenkung.....	- 14 -
Abbildung 5: Auswertung Genauigkeit RTK-GPS Empfänger in Ruhe	- 15 -
Abbildung 6: Auswertung Genauigkeit GPS Empfänger auf einer festen Schiene.....	- 16 -
Abbildung 7: Versuchsträger mit aufgebautem GPS System	- 18 -
Abbildung 8: Feldversuchsaussaat mit GPS Empfänger auf der Sämaschine.....	- 19 -
Abbildung 9: GPS Datenaufzeichnung beim Säen	- 20 -
Abbildung 10: GPS Empfänger auf der Hackmaschine installieren	- 21 -
Abbildung 11: Hackmaschine beim ersten Hackdurchgang.....	- 22 -
Abbildung 12: Auswertung der verschiedenen Lenksysteme bei BBCH 12	- 23 -
Abbildung 13: Auswertung der verschiedenen Lenksysteme bei BBCH 16	- 24 -
Abbildung 14: Positionsfehler GPS Empfänger	- 25 -
Abbildung 15: Auswertung Nachtversuch.....	- 26 -
Abbildung 16: Ausgelenkte Oberfeder als Grundlage für die Computer Simulationen	- 27 -
Abbildung 17: Verformung des Vierkantrohrs mit Verformungsfaktor 10	- 28 -
Abbildung 18: Nutzensteinlösung zur Rohrverbindung.....	- 29 -
Abbildung 19: Farmdroidbesichtigung in Triesdorf	- 30 -
Abbildung 20: Roboter Kameratest	- 31 -

1. Einleitung

1.1 Ausgangssituation

Mit der mechanischen Beikrautbekämpfung erlebt die Hacktechnik eine Renaissance, die aufgrund der Wirksamkeit und preiswerten Verfügbarkeit von Herbiziden in den vergangenen Jahrzehnten in den Hintergrund gedrängt wurde. Allerdings fehlen vielen der traditionellen Verfahren der mechanischen Beikrautbekämpfung die Schlagkraft und Präzision, welche in einer effizienten und produktiven Landwirtschaft benötigt werden. Eine intelligente Kombination von traditioneller Mechanik sowie neuer Techniken der Präzisionslandwirtschaft könnte diese Beschränkung überwinden: Vernetzte GPS-Technologien wissen exakt, wo Samenkörner abgelegt wurden und können die Position der daraus entstandenen Pflanzen von der Bearbeitung ausnehmen. Intelligente Kameras sind in der Lage, Nutzpflanzen von Beikräutern zu unterscheiden und informieren die Steuerung der Mechanik, an welcher Stelle gehackt werden muss. Die Mechanik ihrerseits wird den gestiegenen Anforderungen an die Präzision sowie an neue pflanzenbauliche Erkenntnisse angepasst. Es soll vorerst die Vorentwicklung des Gerätes betrachtet werden.

1.2 Projektziel und konkrete Aufgabenstellung

Zielsetzung des Projektes ist es, die aktuell am Markt befindliche Technik gegenüberzustellen und herauszufinden wie gut sich die eigene Technik gegen die Marktbegleiter schlägt. Ebenso soll ein alternatives System zum Lenken der Hacke entwickelt werden, das per Kamera oder per GPS angesteuert werden kann. Es geht darum, auch bei Bedingungen arbeiten zu können, wenn die Kamera oder das GPS System allein nicht korrekt funktioniert. Das heißt man kann mit dem GPS Signal arbeiten, wenn für die Kamera keine Pflanzen erkennbar sind, sobald die Pflanzen erkennbar sind verwendet man die Kamera, da das GPS System nie genau sagen kann wo genau die Pflanze steht, da Pflanzen nicht genau dort stehen wo sie gesät wurden. Man verwendet die Signalquelle mit der besten Signalgüte.

1.3 Mitglieder der Operationellen Gruppe (OPG)

In der operationellen Gruppe (OPG) sind direkte Gruppenmitglieder und Unternehmen/ Organisationen, die projektbegleitenden Studien erstellen, vertreten. In der Ansicht sieht man alle beteiligten Mitglieder. Die Firma Garford wurde nicht separat berücksichtigt, da sie zur Firma Zürn gehört.

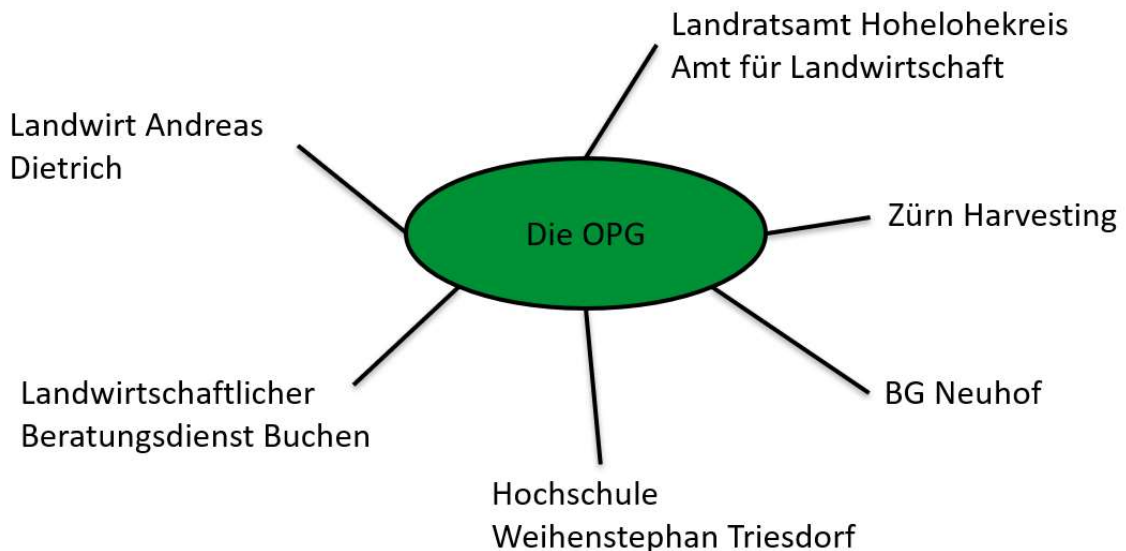


Abbildung 1: Zusammensetzung der OPG

1.3.1 Direkte Mitglieder der operationellen Gruppe

Zürn Harvesting GmbH & Co. KG (Leadpartner)

Kapellenstraße 1, 74214 Schöntal-Westernhausen

Ansprechpartner: Rolf Zürn, Stefan Köbler

- Projektkoordination: Projektmanagement, Projektabrechnung und die Betreuung der Gruppenmitglieder
- Erarbeitung der Konstruktiven Tätigkeiten (mechanisch/ elektronisch)
- Ausarbeitung der Testpläne

BG Neuhof GmbH & Co.KG landw. Betriebsgemeinschaft

Hofgut Neuhof, 74214 Schöntal

Ansprechpartner: Gerd Schonder

- Durchführung von Feldtests
- Input aus der Praxis

- Erfahrungen aus dem Bereich Pflanzenbau

Landwirtschaftlicher Beratungsdienst Buchen

Präsident-Wittemann-Str.9, 74722 Buchen

Ansprechpartner: Christian Stattelmann, Matthias Hermann

- Durchführung von Feldtests
- Input aus der Praxis, Zugang zu vielen Ackerbauern mit unterschiedlichen Bedingungen

Landratsamt Hohenlohekreis Amt für Landwirtschaft

Hindenburgstraße 58, 74613 Öhringen

Ansprechpartner: Bernhard Weiß

- Fachlicher Input
- Beste Kenntnis von Gesetzen und Verordnungen

Landwirt Andreas Dietrich

Dietwaltherhof, 97274 Leinach

- Durchführung von Feldtests
- Input aus der Praxis

1.3.2 Projektbegleitende Studien

Hochschule Weihenstephan Triesdorf

Markgrafenstraße 16 91746 Weidenbach

Ansprechpartner Prof. Dr. Hariolf Kurz

- Wissenschaftliche Betreuung des Projektes
- Durchführen von Studien/ Abschlussarbeiten
- Simulationen von Belastungen

Garford Farm Machinery Ltd

Frognall, Deeping St James, Peterborough, PE6 8RP

Ansprechpartner: Darren Mansfield

- Input zum Schwerpunkt Kameratechnik und Steuerungstechnik
- Bereitstellung der Hacktechnik und der Steuerungstechnik

1.4 Projektgebiet

Die meisten Gruppenmitglieder kommen aus dem nördlichen Baden-Württemberg und aus dem angrenzenden Bayern. Die Feldtests wurden bei den Partnern in Baden-Württemberg, Bayern wie auch bei einer Studienarbeit in Hessen durchgeführt. Ebenso wurden bei unserem Partner Garford Farm Machinery Ltd. in England Tests und Programmierungsarbeiten durchgeführt.

1.5 Projektlaufzeit und – Dauer

Die Projektlaufzeit startete am 01.03.2019. Planmäßiger Endtermin war der 30.06.2022, dieser wurde auf Antrag bis zum 30.11.2022 verlängert.

1.6 Budget

Die Zuwendungssumme des Projektes beläuft sich auf 242.497,93€. Im Vorfeld des Projektes wurde bestimmt, dass der größte Anteil der Kosten Personalkosten sind und die Investitionen meist vom Leadpartner getragen werden. Die genauere Zusammensetzung der Kosten kann der unten zu sehenden Tabelle entnommen werden.

Kostenposition	Zuwendungsfähige Ausgaben (Euro)	Fördersatz (v.H.)	Zuwendungsbetrag (Euro)
Laufende Kosten der Zusammenarbeit, Direktkosten der Projekte und Kosten für projektbegleitende Studien (außer Investitionen)	236.737,93	100	236.737,93
Investitionen	9.600,00	60	5.760,00
Summe Zuwendungsbetrag			242.497,93

Die detailliertere Darstellung der Zuwendungen sind unter 2.1 abgebildet.

1.7 Ablauf des Vorhabens

Konzeption eines alternativen Lenksystems

Es sollte ein alternatives Lenksystem für Hackmaschinen entwickelt werden. Ziel war es, bei gleicher Arbeitsqualität, Baulänge einzusparen und somit die Belastung auf den Traktor zu verringern.

Konzeption und Erprobung eines GPS Systems zum Steuern der Hackmaschine

Es sollte ein System entwickelt werden, mit dem beim Säen die Spurdaten/ Fahrspuren per RTK GPS aufgenommen werden können. Diese Spurdaten sollen später zur Steuerung der Hackmaschine verwendet werden. Die Genauigkeit der aufgezeichneten RTK-GPS Daten soll mit Hilfe von Kameradaten validiert werden. Weiter soll bei der Arbeit mit der Hackmaschine zwischen den Signalquellen GPS oder Kamera ausgewählt werden können, um immer das bestmögliche Arbeitsergebnis zu erreichen.

Verbesserung der vorhandenen Komponenten der Hackmaschine

In diesem Aufgabenbereich sollen die einzelnen Funktionsbaugruppen der Garford Hackmaschine untersucht und mögliches Verbesserungspotential erarbeitet werden.

Konzeption einer Robotersteuerung

Hierbei soll das von der Hackmaschinen bekannte Kamerasystem genutzt werden, um einen Roboter gemäß der Kameradaten an den Pflanzreihen entlang steuern zu können. Alternativ zur Kamera, soll auch hier die Möglichkeit bestehen, den Roboter mit eingespielten GPS Daten zu steuern.

1.8 Zusammenfassung der Ergebnisse

Die zuvor genannten vier Arbeitspakete wurden alle abgearbeitet und meist konnten auch gute Ergebnisse erzielt werden. Die entwickelte Scheibensechlenkung funktioniert sehr gut, das Kamera- wie auch das GPS-Signal kann problemlos eingelesen und abgefahren werden. Die Seche konnten die Hacke gut an den Reihen entlangführen. Einziger Nachteil, der entsteht ist, dass die Lenkung der Hackmaschine erst funktioniert, wenn die Maschine gesenkt ist. Weshalb es während der Arbeit zu Pflanzenverlusten kommen kann, da die Hacke möglicherweise erst nach ein paar Metern in der korrekten Position zwischen den Kulturreihen läuft. Dies kann nur durch einen separaten Verschiebezylinder an den Unterlenkerseitenstreben verbessert werden. Bisher war es nicht möglich den zusätzlichen Zylinder mit in die Steuerung zu implementieren.

Hinsichtlich der Verknüpfung der Säspurdaten mit der Hackarbeit konnten auch gute Ergebnisse erzielt werden. Es konnte unabhängig von den Umgebungseinflüssen (Lichtverhältnisse,

Wind...), der Wachstumsstadien und des Verunkrautungsgrads eine gleichbleibend gute Arbeit erzielt werden. Das wichtigste ist allerdings, dass bei der Saat gewissenhaft gearbeitet wird und die Daten sorgfältig aufgezeichnet werden. Weiterhin wichtig ist, dass in allen Positionen der Felder ausreichenden Mobilfunk- und GPS-Empfang verfügbar ist, bzw. während der kompletten Arbeit kein Systemausfall eintritt. Ebenso konnten Details der Scharträger an der aktuellen Hackmaschine verbessert werden. Ein weiterer Erfolg war es, als der Roboter mit der aufgebauten Kamera autonom, entlang der Pflanzenreihen über ein Testfeld fuhr.

2 Eingehende DarstellungVerwendung der Zuwendung

Im Folgenden wird aufgezeigt auf welche Kostenpositionen die Zuwendungen verteilt werden

2.1.1 Laufende Kosten der Zusammenarbeit

- Personalausgaben für die Projektkoordination
- Reisekosten der an der OPG beteiligten Akteure
- Allgemeine Betriebskosten der OPG (pauschal 15% der Koordinationskosten)

2.1.2 Kosten für die Durchführung der Arbeitsschritte

- Personalausgaben Zürn Harvesting GmbH & Co. KG
- Personalausgaben der beratenden landwirtschaftlichen Unternehmen
- Kleinere Investitionen
- Sachleistungen für diverse Arbeiten und Kosten

2.1.3 Kosten für Investitionen (60% förderfähig)

- Kamerasystem

2.1.4 Kosten für projektbegleitende Studien

- Kosten für die wissenschaftliche Unterstützung durch die Hochschule Weihenstephan Triesdorf
- Kosten für die systemtechnische Unterstützung durch die Garford Farm Machinery Ltd

2.2 Übersicht - Verwendung der Zuwendung

Die folgende Tabelle zeigt die für das Projekt entstandenen Kosten aufgeteilt in Kalenderjahre.

Nr.	Zuwendungsfähige Ausgaben	Betrag in Euro				Gesamt
		2019	2020	2021	2022	
1	Laufende Kosten der Zusammenarbeit					
1.1	Personalausgaben für Projektkoordinator	6337,03	12247,18	17246,39	18161,83	53992,43
1.2	Reisekosten	497,25	108,00	321,00	316,80	1243,05
2	Allgemeine Betriebskosten					
2.1	Pauschale Betriebskosten 15%	950,55	1837,08	2586,96	2724,28	8098,86
	SUMME					0,00
3	Kosten für die Durchführung der Arbeitsschritte					
3.1	Personalkosten Stefan Köbler	6337,03	12247,18	17246,39	18161,83	53992,43
3.2	Personalkosten Hannes Pfisterer		3979,00	6385,83	4687,89	15052,72
3.3	Personalkosten für beratende Tätigkeiten				27850,00	27850,00
3.7	Hydraulikzylinder Dreipunkthubwerk		690			690,00
	Summe					0,00
4	Investitionskosten					
4.1	Investition in Geräte (Kamerasystem)					
5	Kosten von Studien					
5.1	Aufwendung für projektbezogene Aufträge an Dritte			3.840,00	40.359,15	44199,15
6	SUMME					205118,65

2.3 Ergebnisse der Zusammenarbeit im Projekt

Während der kompletten Projektlaufzeit fanden regelmäßige Gruppentreffen statt, falls es möglich war wurden diese in Präsenz abgehalten. Wenn es möglich war, wurden die Gruppentreffen mit Feldtests verbunden. Für Gruppenmitglieder, die nicht teilnehmen konnten, wurden Protokolle angefertigt und verteilt. Jeder Fortschritt wurde immer an alle Beteiligte per Email gesendet. In der Zeit, in der keine Präsenztermine möglich waren, wurde auf Videokonferenzen zurückgegriffen. Für die Gruppenmitglieder waren die Präsenztermine meist informativer als die Videokonferenzen, da hier der direkte Austausch einfacher möglich war. Bei der Gruppenzusammensetzung wurden ja bewusst Gruppenmitglieder ausgewählt, die aus unterschiedlichen Regionen kommen und somit mit verschiedenen ackerbaulichen Gegebenheiten zurechtkommen müssen.

Zukünftig will man die gewonnen Kontakte nutzen und auch nach der Projektlaufzeit im Kontakt bleiben. Wenn von unserer Seite beispielsweise Testbetriebe gesucht werden oder ein Landwirt eine neuartige Herausforderung hat, bei der er sich technische Unterstützung wünscht.



Abbildung 2: Betrachtung der Hackversuche in der Gruppe

3 Ergebnisse

3.1 Die neukonzipierte Lenkung der Hackmaschine

Ziel war es, den Verschieberahmen bei der Hackmaschine einzusparen und durch lenkbare Scheibenseche zu ersetzen. Die Seche wurden hinter den Traktorrädern angeordnet, damit fester Boden für die drehbaren Seche zur Verfügung steht und somit die Hacke gut an den Pflanzreihen entlanggeführt werden kann. Zum Test wurde ein 3 m Prototyp mit den Sechen ausgestattet.



Abbildung 3: Sechlenkungsprototyp

Damit die Lenkung die Daten von der Kamera verarbeiten kann, musste dies in der Software angepasst werden. Ziel war es hier, die Garford Kamera und die bestehende Software zu nutzen. Nachdem die Vorabtests erfolgreich waren, wurde ein erster Feldtest bei Andreas Dietrich in 97274 Leinach durchgeführt. Hierbei wurden die Versuche auf verschiedene Flächen mit unterschiedlicher Topografie durchgeführt. Bei ebenen Flächen funktionierte das System sehr gut, die Seche liefen verlässlich an den Kulturpflanzen entlang (siehe auch Abbildung 4). Der einzige Nachteil, der auftrat, war beim Einfahren in die Pflanzenreihe, hier kann die Maschine erst bei gesenktem Hubwerk gesteuert werden. Die Seche können systembedingt erst arbeiten,

wenn die Maschine gesenkt ist, die Seche den Boden berühren und sich die Maschine vorwärtsbewegt. Der Verschieberahmen kann die Hacke auch im ausgehobenen Zustand auf die korrekte Position zwischen die Pflanzenreihen verfahren, so dass beim Einsetzen der Maschine keine Pflanzenverluste hingenommen werden müssen. Als Verbesserung wurde der Seitenstabilisator der Dreipunkthydraulik durch einen zusätzlichen Aktor zu den Sechen (Hydraulikzylinder) ersetzt. Dieser ermöglichte, die Hacke im ausgehobenen Zustand manuell (durch den Fahrer und nicht durch das Kamerasystem) auf die korrekte Position zwischen die Pflanzreihen zu positionieren. Leider konnte der zusätzliche Zylinder nicht in die Software integriert werden und musste bis zum Ende der Tests manuell über ein Steuergerät des Schleppers bedient werden. Während der Fahrt muss der Zylinder auf Schwimmstellung gestellt werden, damit die Sechlenkung die Hackmaschine unabhängig zum Schlepper verschieben kann. Im weiteren Verlauf der Tests sollten auch breitere Hackmaschinen mittels Seche gelenkt werden. Hier funktionierte die Anordnung mit den 2 Sechen allerdings nicht so zuverlässig. Es gab Überlegungen, mit 4 Sechen zu arbeiten, aber auch dies brachte keine nennenswerte Verbesserung, deshalb wurde dieser Ansatz zunächst nicht weiterverfolgt.



Abbildung 4: Feldtest der Sechlenkung

3.2 Die Steuerung der Hackmaschine mittels GPS System

Im nächsten Schritt sollte die bestehende Software erweitert werden, um zwischen zwei unterschiedlichen Signalquellen auswählen zu können. Dazu wurde neben der etablierten Signalquelle „Kamera“ eine GPS-Signalquelle entwickelt. Der Ansatz hier soll sein, die GPS Positionen der Sämaschine beim Säen aufzeichnen und diese aufgezeichneten Positionsdaten dann für die spätere Hackarbeit nutzen zu können.

3.2.1 Konzeption

Im ersten Schritt musste die Möglichkeit geschaffen werden, um parallel zur Kamera eine weitere Quelle am bestehenden System anschließen zu können. Weiterhin war es wichtig, dass der GPS Empfänger dieselben Signale liefert wie die Kamera, damit die Software weiterverwendet werden kann. Da man so nur die Ist- Daten vom Empfänger verarbeiten könnte, muss zusätzlich zur Lenkungssoftware ebenso ein System geschaffen werden, das im Stande ist, die GPS Daten bei der Saat oder jeder beliebigen Fahrt aufzeichnen zu können. Soweit konnte die bisherige Software allerdings nicht erweitert werden, weshalb hier vorübergehend ein separates Display mit eigener Software geschaffen wurde. Ebenso war es auch wichtig, einen kleinen GPS Empfänger mit hoher Genauigkeit zu finden und zu testen. Um die erforderliche Genauigkeit zu erreichen wurde ein RTK-GPS Empfänger verwendet. Die Korrekturdaten für das RTK-Signal stammten vom landeseigenen Satellitenpositionierungsdienst (SAPOS) Baden-Württemberg.

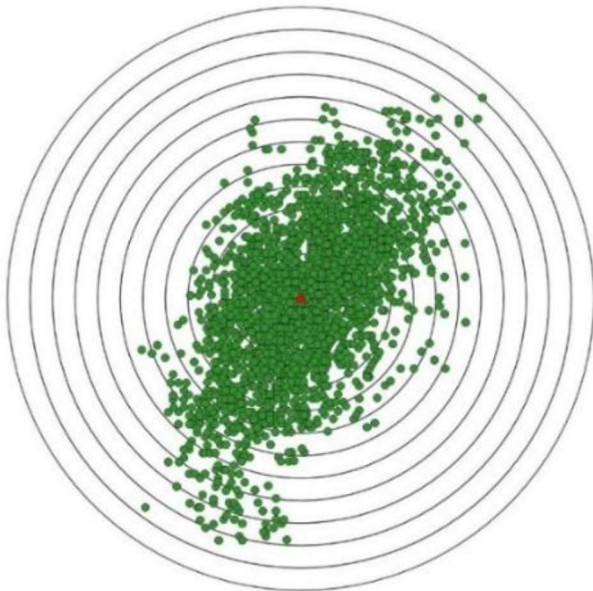


Abbildung 5: Auswertung Genauigkeit RTK-GPS Empfänger in Ruhe

Im ersten Schritt der Validierung des Systems wurde der Empfänger 6 Minuten in Ruhe auf einem Feld positioniert, um festzustellen, wie genau der Empfänger unter Feldbedingungen

ist. Zur Auswertung wurden die generierten Koordinaten als Vektor in eine GIS (Geoinformationssystem) Software importiert und ausgewertet. Im Durchschnitt haben die Koordinaten eine Abweichung von 0,41 cm (Mittelwert) vom angenommenen Mittelpunkt. Die Standardabweichung beträgt 0,22 cm und die Maximale Abweichung liegt bei 1,3 cm. Diese Abweichung war im ersten Schritt schon mal sehr zufriedenstellend und ausreichend für die weiteren Tests. Beim zweiten Test wurde die Genauigkeit während der Fahrt auf einer definierten Geraden bestimmt. Die Antenne wurde auf einer festen Schiene montiert und auf der Schiene mehrmals hin und her gefahren, während die zurückgelegte Strecke aufgezeichnet wurde. Die Messstrecke betrug 1,25 m und wurde innerhalb von zwei Minuten sechs Mal zurückgelegt. Zur Auswertung wurden die Daten wieder im GIS importiert und die Abweichungen bestimmt. Hierbei wurde eine Ideal- Gerade im Programm bestimmt und die aufgezeichneten Werte verglichen. Bei diesem Test ergab sich eine mittlere Abweichung von 0,97 cm bei einer Standardabweichung von 0,62 cm und einer maximalen Abweichung von 3,9 cm. Auf der folgenden Grafik werden die einzelnen Messpunkte, die die Gerade ergeben, aufgezeigt.

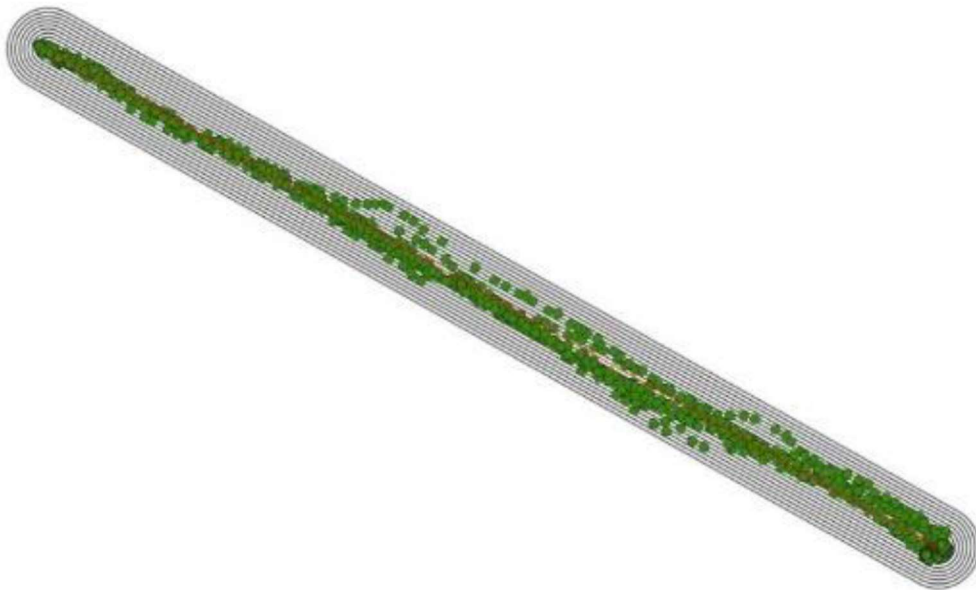


Abbildung 6: Auswertung Genauigkeit GPS Empfänger auf einer festen Schiene

Für die von uns angedachte Anwendung auf dem Feld sind die hier gemessene mittlere Abweichung von unter einem Zentimeter und die maximale Abweichung von unter vier Zentimetern durchaus zufriedenstellend. Daher war das System nach diesen Vorabtests soweit, um in die Erprobung überzugehen

3.2.2 Erprobung

Bei der ersten Installation des Systems auf einem Garford Verschieberahmen wurde ein Test auf einer Wiese durchgeführt, um nicht gleich Pflanzen auf einem Feld zu schädigen. Bei diesem Test wurde eine beliebige Spur in einer Wiese abgefahren und mittel des Systems aufgezeichnet. Die zurückgelegte Spur wurde mittels einer Farblinie gekennzeichnet. Bei der 2. Überfahrt wusste der Fahrer so ungefähr, wo er gefahren war und wieder fahren soll. Der Verschieberahmen wurde mit einem Schar direkt unter dem Empfänger ausgerüstet. So konnte man optisch genau sehen wie sich die Wiederholgenauigkeit bei solch einem Test auswirkt. Bei diesem Test wurde erstmals auch die Dynamik des Systems getestet. Hier musste darauf geachtet werden, dass es nicht zu langsam reagiert, also nicht zu lange braucht, um den Sollwert zu erreichen. Weiterhin darf das Ansprechverhalten auch nicht zu schnell sein, da es sonst zum Übersteuern oder Pulsieren neigt. Nach mehreren Überfahrten wurden die Regelparameter vordefiniert und nur noch eine gewisse Spanne zur späteren Feinkorrektur am Display freigegeben. Bei diesem Test wurden die Arbeitsergebnisse lediglich optisch überprüft, da man so genau den Soll- und Ist- Wert mittels Meterstab vergleichen konnte. Mit dem Meterstab konnten hier auch passende Abweichungen von 0 bis maximal 5cm gemessen werden. Ein weiterer Test, der in diesem Zuge erfolgte, ist der Einfluss der Anbauhöhe des Empfängers auf das Arbeitsergebnis. Hierbei wurde der Empfänger einerseits direkt auf dem Rahmen des Versuchsträgers und auch in verschiedenen Höhen verbaut. Hierbei wurde festgestellt, dass der Empfänger direkt auf dem Rahmen die besten Ergebnisse liefert. Anfangs gab es Bedenken, den Empfänger direkt auf den Rahmen zu positionieren, da hier mit Abschattung durch das Zugfahrzeug zu rechnen ist. Dies stellte sich allerdings als problemlos da. Bei einer höheren Anbringung des Empfängers würde sich bei der Arbeit am Seitenhang ein Winkelfehler ergeben, dem wir so entgegenwirken können.



Abbildung 7: Versuchsträger mit aufgebautem GPS System

Nachdem bei dieser Testreihe die optimale Position des GPS Empfänger und die Dynamik des Systems zufriedenstellend erprobt werden konnte, stand nichts mehr im Weg, um das System unter realen Bedingungen zu testen und bei der Aussaat Daten aufzuzeichnen.

3.2.3 Feldtest

Da das System verlässlich Spuren aufzeichnen kann und diese wieder abgefahren werden können, stand der erste größere Feldtest an. Hierbei wurde das System erstmals bei der Aussaat auf einer Sämaschine installiert, um komplette Feldspuren aufzuzeichnen und unter realen Praxisbedingungen zu arbeiten. Sehr wichtig ist hierbei, dass der Empfänger genau mittig zwischen den Säaggregaten installiert wird. Jede Abweichung, die auftritt, wirkt sich später negativ auf das Hackergebnis aus. Daher wurde die Mitte der Maschine sorgfältig bestimmt und der Empfänger dort installiert.



Abbildung 8: Feldversuchsaussaat mit GPS Empfänger auf der Sämaschine

3.2.4 Vergleichstest

Für den Feldtest sollen 2 verschiedene Kamerasysteme und das neu entwickelte GPS System getestet und verglichen werden. Im Versuch wurden Zuckerrüben gedreht, diese sollen in verschiedenen Wachstumsstadien, mit verschiedenen Geschwindigkeiten und unter verschiedenen Lichtverhältnissen gehackt werden.

Zur Auswertung sollte der tatsächliche Abstand des Hackschar zur Kulturreihe bestimmt werden und so die Qualität der Hackarbeit bewertet werden. Anfangs dachte man, es wäre möglich, nach einem Hackdurchgang das Hackband durch zufällige Messungen mit dem Meterstab im Bestand zu kontrollieren. Dieser Ansatz stellte sich allerdings als nicht repräsentativ dar, weil man durch die fließende Erde nicht genau erkennen kann, wo das Hackschar gelaufen ist. Eine weitere Möglichkeit wäre, während der Fahrt anzuhalten und dann als Momentaufnahme zu messen, wo sich das Hackschar gerade befindet. Dies kann allerdings nur als Kontrolle

genutzt werden, da man pro Bahn dann nur wenige Messpunkte hätte. Als beste Messmethode stellte sich die Möglichkeit heraus, die GPS Daten bei jeder Überfahrt aufzuzeichnen (auch wenn die Hackmaschine per Kamera gesteuert wird) und diese dann miteinander zu vergleichen. In der folgenden Abbildung sieht man die Punktwolke, die die Fahrspuren der Aussaat auf dem Feld ergeben. Hier wurde bewusst inklusive Wendevorgang aufgezeichnet, um Fehlerquellen beim ein- und aussetzen zu vermeiden. Für die Auswertung werden die Vor- und Rückwege - Daten dann herausgefiltert und nicht weiter berücksichtigt.



Abbildung 9: GPS Datenaufzeichnung beim Säen

Nachdem die Aussaat vollzogen war, wurde das GPS System auf die Hackmaschine gebaut. Hier galt es zu beachten, dass die Hackmaschine asymmetrisch aufgebaut ist und der GPS Empfänger deshalb nicht mittig auf der Hackmaschine, sondern genau mittig über dem mittleren Parallelogramm angeordnet wird. Hierfür wurde ein spezieller Halter angefertigt, damit der Abstand zum vorderen Schar möglichst genau den Abstand zwischen Empfänger und Säagregat beim Aufbau auf der Sämaschine entspricht.



Abbildung 10: GPS Empfänger auf der Hackmaschine installieren

Für die Arbeit mit der Garford Kamera und der Arbeit mit dem GPS System wurde ein Garford Verschieberahmen vor die Hacke gehängt. Um die Arbeitsqualität vergleichen zu können, wurde er zeitweise gegen den Einböckverschieberahmen mit eigener Kamera getauscht. Die Kameras wurden jeweils rechts und links fest am Hackrahmen verbaut, so dass relativ einfach und schnell zwischen den jeweiligen Systemen getauscht werden konnte. Es musste lediglich der zwischen Traktor und Hackmaschine eingebaute Verschieberahmen getauscht werden.



Abbildung 11: Hackmaschine beim ersten Hackdurchgang

Nachdem die Zuckerrüben aufgelaufen sind und das Wachstumsstadium BBCH 12 erreicht hatten, konnte der erste Versuch gefahren werden. Hierbei wurden auf einem größeren Feld mit jedem System 2 Spuren in beiden Fahrtrichtungen gefahren, sodass genug Daten für eine repräsentative Bewertung der Systeme erfasst werden können und Umwelteinflüssen wie Schattenwurf, Wind oder Topografie entgegengewirkt werden kann. Diese Versuche wurden mit einer Geschwindigkeit von 3 km/h und 6 km/h durchgeführt. Die aufgezeichneten Daten wurden nach der Überfahrt ausgelesen und im GIS System übereinandergelegt. Hierbei gelten die bei der Aussaat aufgezeichneten Daten als Nullwert und die beim Hacken aufgezeichneten Daten sollen mit diesen verglichen werden.

In der folgenden Darstellung wurden die aufgezeichneten Daten übereinandergelegt, hierbei ergaben sich drei nahezu normalverteilte Kurven. Auffällig ist, dass die grüne Kurve leicht nach rechts verschoben ist. Grund hierfür könnte sein, dass der Empfänger nicht komplett in der Mitte zwischen Pflanzenreihen angebracht war. Da es sich hier nur um eine minimale Abweichung handelt, blieben die Werte unbereinigt. Allgemein kann man mit allen drei Systemen sehr zufrieden sein. Beim Einböck System liegen 21,76% in der engsten Toleranzklasse mit 1cm Toleranz. Der Mittelwert beträgt 1,27 cm bei einer Standardabweichung von 1,71 cm. Die maximale Abweichung liegt bei 6,65 cm. Die Kamerasteuerung von Garford kann in der Klasse mit der geringsten Abweichung einen Anteil von 23,84 % erzielen. Dabei wird ein Mittelwert von 0,79 cm und eine Standardabweichung von 1,33 cm erzielt. Die maximale Abweichung beträgt 4,47 cm. Beim GPS System kann in der Klasse mit der geringsten Abweichung ein Anteil von 30,02 % erzielt werden. Es ergibt sich ein Mittelwert von 0,06 cm bei einer Standardabweichung von 1,33 cm. Darüber hinaus liegt die maximale Abweichung bei 4,57 cm.

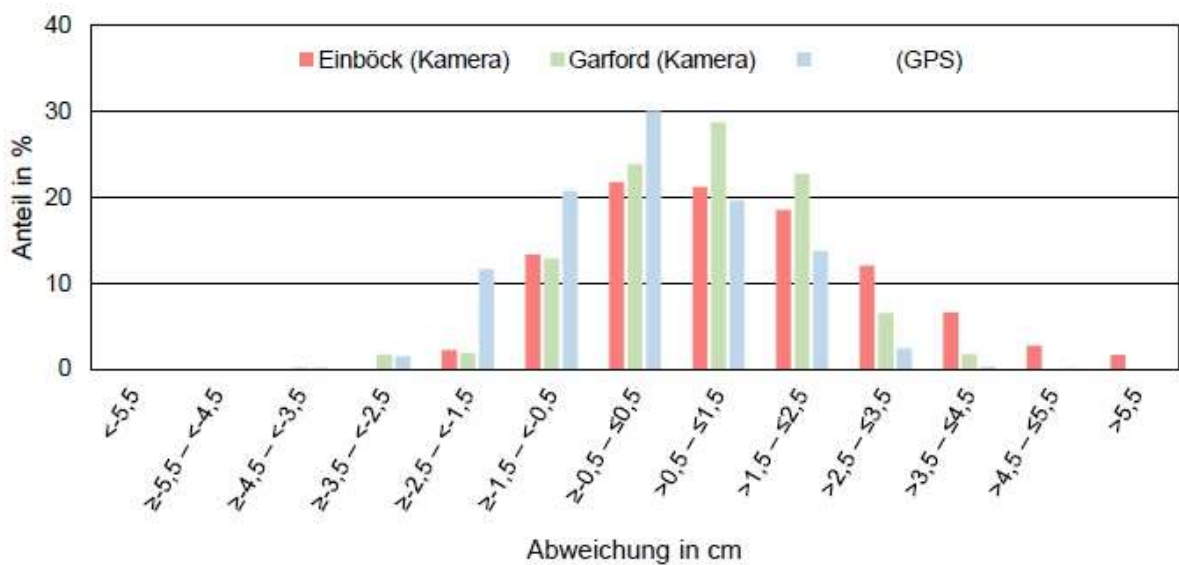


Abbildung 12: Auswertung der verschiedenen Lenksysteme bei BBCH 12

Der Versuch mit 6 km/h brachte ein ähnliches Ergebnis, weshalb auf die detaillierte Auswertung hier verzichtet wird. Nachdem die Zuckerrüben weitergewachsen waren und BBCH 16 erreicht hatten, wurde ein weiterer Hackdurchgang gefahren. Die Herangehensweise war identisch wie zuvor.

Die Versuchsdaten aus BBCH 16 wurden ebenso übereinandergelegt, hierbei fällt auf, dass diesmal bei Einböck und Garford die Werte weiter nach rechts abgedriftet sind. Wenn wir die Daten so auswerten erreicht, Einböck einen Anteil von 12,46 % in der Klasse mit der geringsten Abweichung. Dabei beträgt der Mittelwert 1,81 cm und die Standardabweichung 1,38 cm. Die maximale Abweichung liegt bei 7,22 cm. Bei der Kamerasteuerung von Garford können 2,46 % der aufgezeichneten Werte in die Klasse mit der geringsten Abweichung zugeordnet werden. Der Mittelwert beträgt 2,89 cm bei einer Standardabweichung von 1,35 cm. Die maximale Abweichung liegt bei 6,54 cm. Im Vergleich dazu kann das GPS System in der Klasse mit der geringsten Abweichung einen Anteil von 28,19% erzielen. Der Mittelwert beläuft sich auf 0,10 cm bei einer Standardabweichung von 1,40 cm. Es wurde eine maximale Abweichung von 4,75 cm erfasst.

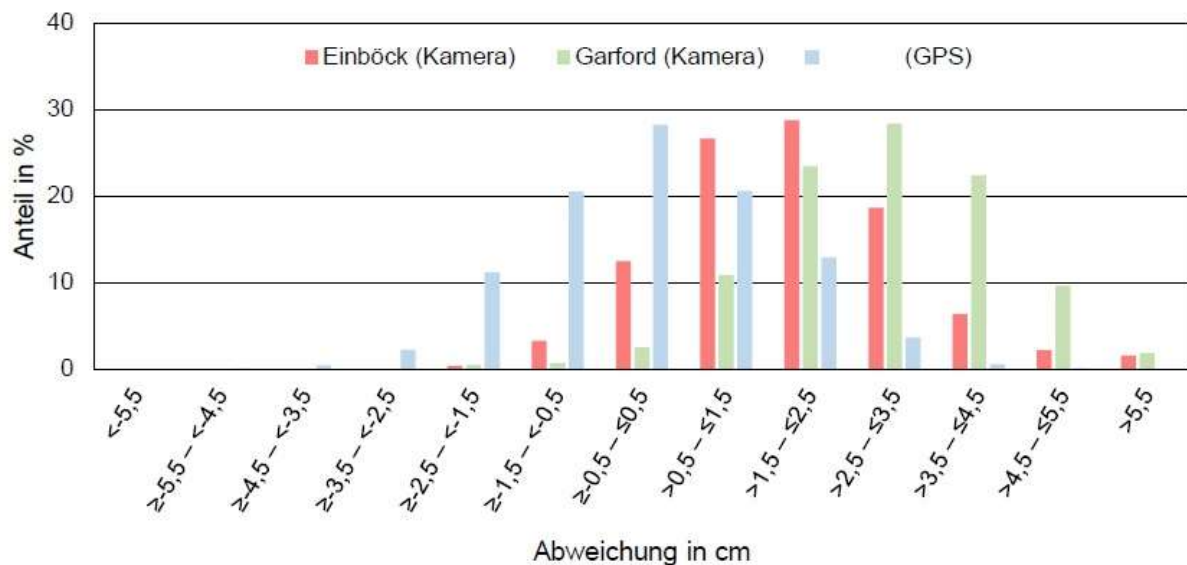


Abbildung 13: Auswertung der verschiedenen Lenksysteme bei BBCH 16

Die oben beschriebene Auffälligkeit, dass beide Kamerasysteme einen Rechtstrend aufweisen, ließ darauf schließen, dass die Werte des GPS System eine andere Systematik haben als die Kameradaten. Ebenso ist bei Garford die Klasse mit den meisten Werten wieder etwas weiter rechts als bei Einböck. Da man von einem systematischen Fehler ausgeht, wurden die Daten, die, während die Kamerasteuerung aktiv war, aufgenommen wurden, nochmal genauer betrachtet und erneut ausgewertet. Hierbei wurden die einzelnen Spuren in gegenläufiger Fahrt betrachtet, da man so am besten sieht, ob die Werte voneinander weg oder aufeinander zu laufen (überlagern). In der folgenden Abbildung ist deutlich zu sehen, dass die Werte von ei-

nender weglaufen, was beutet, dass die Antenne gegen die Richtung der Wenderichtung Versatz aufweist. Wenn man die mittlere Abweichung der Kameradaten betrachtet, erhält man in der einen Richtung 2,8 cm (rechts) und bei der gegenläufigen Fahrt 2,7 cm (links) was bedeutet, dass der Empfänger 2,7cm rechts außer Mitte angebracht war.

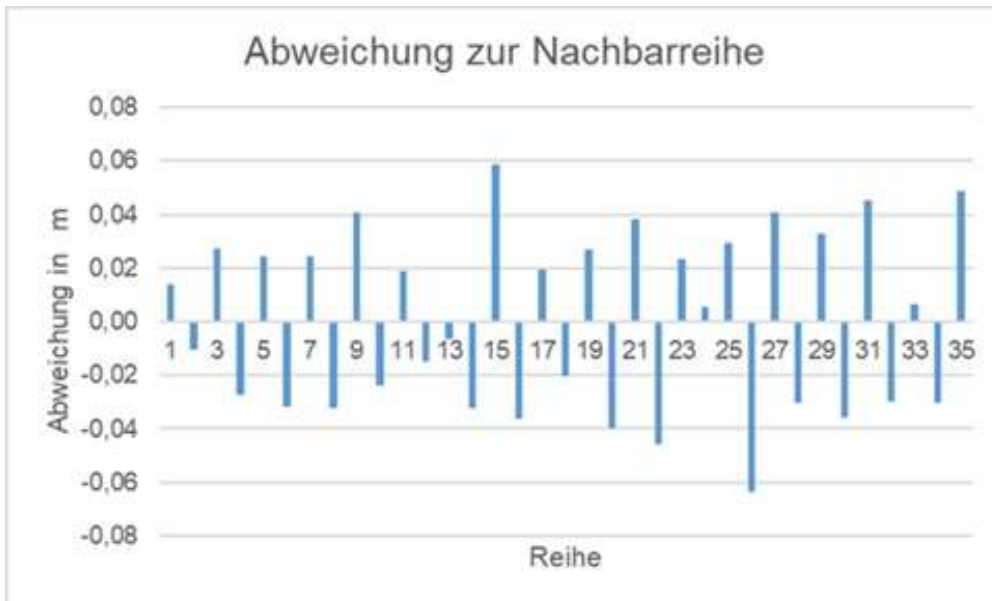


Abbildung 14: Positionsfehler GPS Empfänger

Wenn man sich mit dieser Erkenntnis Abbildung 13 betrachtet, würde sich die Verteilung der Messwerte der Kamerasysteme um 2 bis 3 Klassen weiter nach links verschieben. Somit sind die Kamerawerte mit den Werten des GPS System vergleichbar, was bedeutet, dass kein System nennenswerte Vor- oder Nachteile erzielt. Da die Testfahrten mit verschiedenen Geschwindigkeiten direkt hintereinander durchgeführt wurden, erhielt man bei beiden Auswertungen ähnliche Ergebnisse.

Anschließend wurde der Nachtversuch ebenso in BBCH 16 durchgeführt. Durch die Kamerasteuerung von Einböck kann die Hacke in der Klasse mit der geringsten Abweichung einen Anteil von 3,67 % erzielen. Dabei liegt der Mittelwert bei 3,02 cm mit einer Standardabweichung von 1,47 cm. Die maximale Abweichung beträgt 7,16 cm. Die Kamerasteuerung von Garford erzielt in der Klasse mit der geringsten Abweichung einen Anteil von 16,63 %. Der Mittelwert beläuft sich auf 1,14 cm bei einer Standardabweichung von 1,67 cm. Die maximale Abweichung beträgt 7,15 cm. Mit dem GPS System kann in der Klasse mit der geringsten Abweichung ein Anteil von 23,44% erzielt werden. Gleichzeitig wird ein Mittelwert von 0,09 cm erreicht. Aus den Werten ergibt sich eine Standardabweichung von 1,47 cm und eine maximale Abweichung von 6,84 cm. Eine Verdopplung der Fahrgeschwindigkeit während des Nachtversuches führt bei den drei Varianten zu einer größeren Abweichung von der Idealspur. Die Häufung der Messwerte aller Verfahren ist nach rechts verschoben. Dabei zeigt die Einböck-Variante die größte Abweichung nach rechts auf, darauf folgen die Garford-Variante und die GPS-Variante.

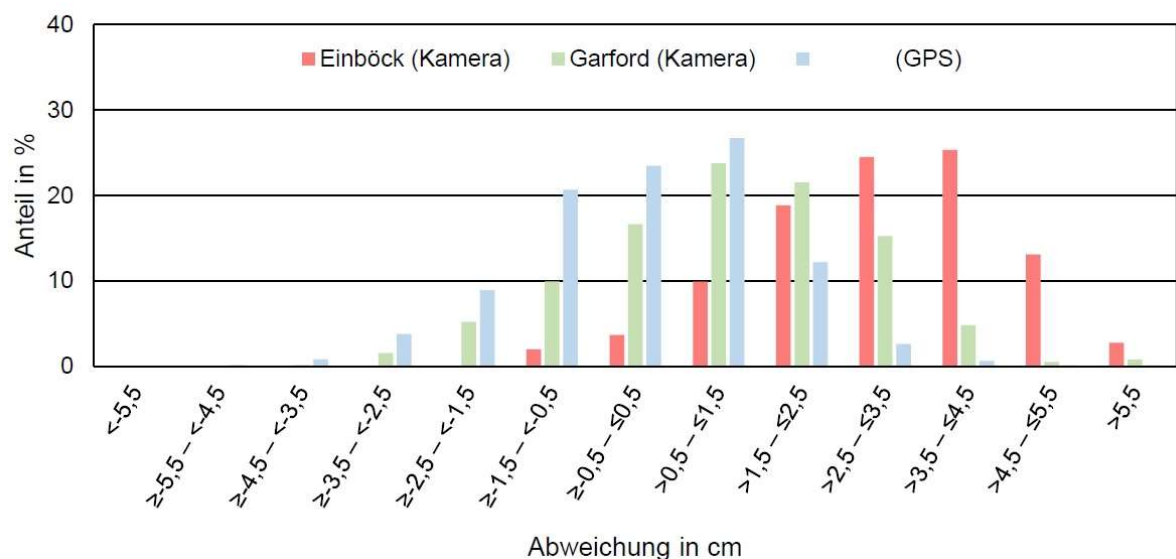


Abbildung 15: Auswertung Nachtversuch

Abschließend lässt sich sagen, dass kein System deutliche Vorteile hat und alle drei Systeme ziemlich genau arbeiten. Es gab keinen kompletten Systemausfall während der Versuche, weshalb alle Systeme als zuverlässig bezeichnet werden können. Dieser Test mit dem GPS System wurde in der weiteren Saison wie auch in der Saison 2022 wiederholt bzw. weitergeführt. Da die Daten nichts Außergewöhnliches erbracht haben, wird auf diese Auswertungen im Folgenden verzichtet.

3.3 Verbesserung der vorhandenen Komponenten

Im Rahmen der Verbesserung der vorhandenen Komponenten geht es darum, die Belastungen am Schar zu definieren und somit die entstehenden Belastungen auf die Parallelogramm Bauteile zu erhalten. Die in diesem Absatz dargestellten Untersuchungen wurden in Zusammenarbeit zwischen Zürn und der Hochschule Weihenstephan Triesdorf erarbeitet. Hierbei wurden im ersten Schritt die Belastung der Oberfedern, mittels Federwaage, experimentell ermittelt. Dabei wurde die Oberfeder ausgelenkt und die dafür benötigte Kraft bestimmt. Die Auslenkung wurde bis auf Block gefahren und alle weiteren Zustände schrittweise bestimmt. Diese Erkenntnisse wurden dann in die Computer Simulation übertragen und als Grundlage für weitere Berechnungen genutzt.

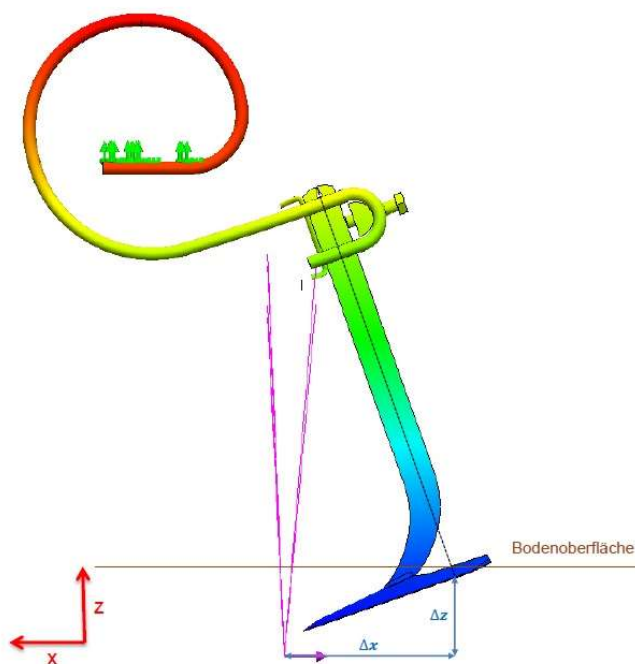


Abbildung 16: Ausgelenkte Oberfeder als Grundlage für die Computer Simulationen

Im ersten Schritt wurden das Bauteil, das direkt mit der Oberfeder verbunden ist überarbeitet, hier wurde die bisherige Schweißkonstruktion fertigungstechnisch überarbeitet. Hierfür wurde eine Vorrichtung konstruiert und alternative Lösungen erarbeitet, allerdings brachten diese kaum Verbesserungspotential, weshalb hier das aktuelle Design beibehalten wird.

Im nächsten Schritt wurde der Scharträger betrachtet. Der Scharträger ist ein Vierkantrohr, auf das Hülsen geschweißt werden. Durch den Wärmeeintrag beim Schweißen verzieht sich das Rohr in nahezu alle Richtungen. Bisher war die einzige Lösung, diesen Verzug zu verringern, die Rohre nach dem Schweißen auf der Presse zu richten. Da solch ein Prozess nicht erstre-

benswert und nicht prozesssicher ist, wurde der Prozess genauer betrachtet. Durch die Simulation kann getestet werden, wie sich das Teil bei unterschiedlicher Schweißfolge und verschiedenen Nahtlängen und Stärken verhält. Hierbei wurde zuerst versucht, die Schweißfolge anzupassen und so den Verzug zu minimieren. Die Simulation kam allerdings zum Ergebnis, dass die Schweißfolge hierauf keinen Einfluss hat. Egal wie die Schweißnähte ausgeführt werden, das Rohr verzieht sich immer wie in der unteren Abbildung.

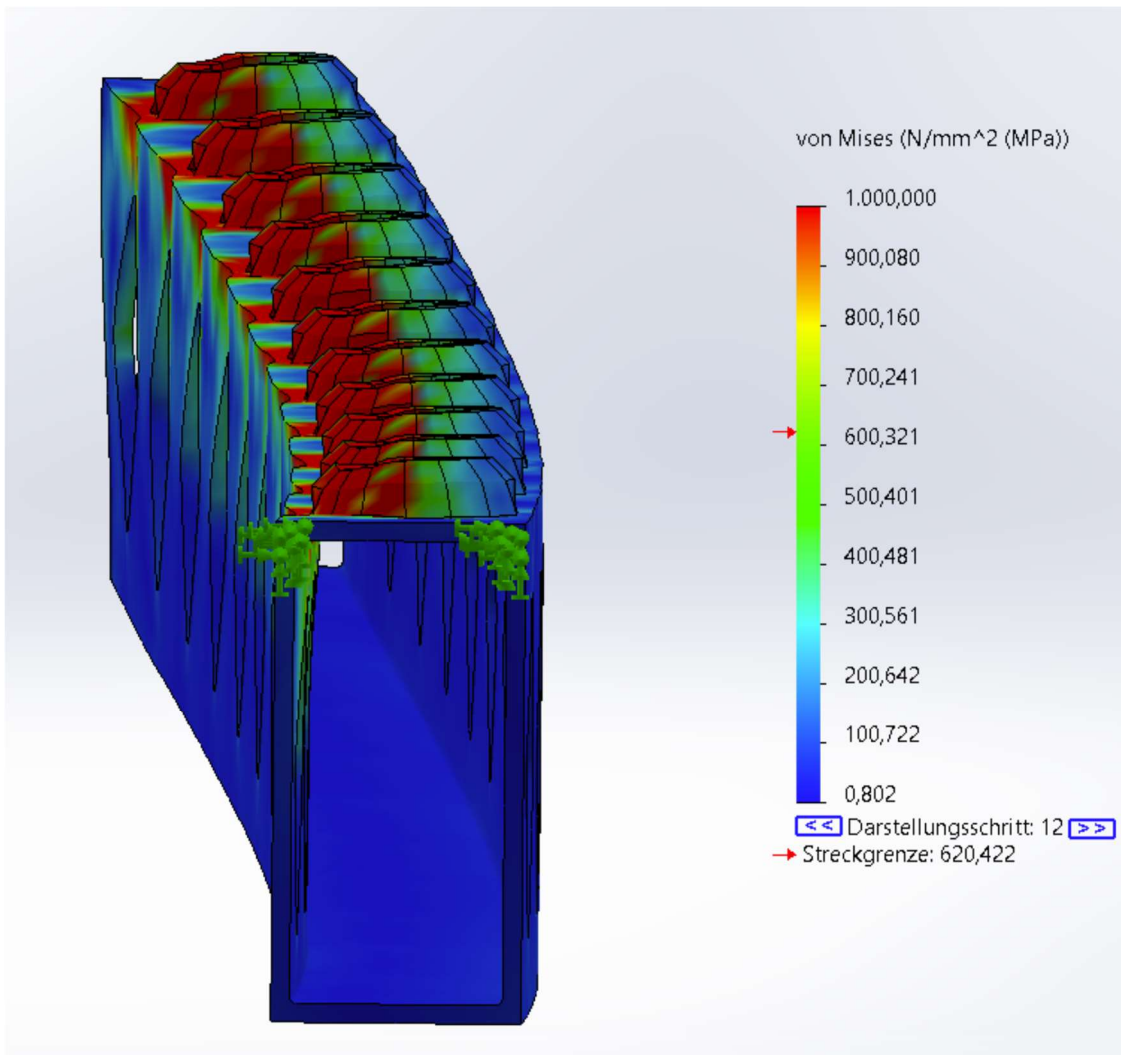


Abbildung 17: Verformung des Vierkantrohrs mit Verformungsfaktor 10

Da wir so keine zufriedenstellende Lösung erzielen konnten, leiteten wir eine konstruktive Änderung ein, um die Wirkweise des Bauteils beizubehalten, die Ausführung aber fertigungstechnisch zu optimieren. Hierbei soll, wenn möglich, gänzlich auf den Wärmeeintrag verzichtet werden. Die erste Überlegung war, Gewinde, mittels Nietmutter oder Fließgewinde, direkt am Rohr anzubringen. Dies bringt allerdings zwei Nachteile mit sich, zum einen kann die Mutter so nicht mehr so einfach ersetzt werden, wenn das Gewinde verschlissen sein sollte. Zum anderen möchten wir an diesen Stellen der Hackmaschine nur selbstsichernde Gewinde einsetzen, da sich durch die vielen Vibrationen bei der Arbeit die normalen Muttern schnell selbst

lösen. Ein zielführender Ansatz wäre, die Muttern durch Nutensteine mit selbstsichernden Gewinden zu ersetzen. Diese Teile gibt es nicht als Standard - Produkte allerdings bräuchte man eine höhere Anzahl dieser Nutensteine, weshalb es interessant wäre, diesen Weg zu gehen. Der große Vorteil bei dieser Lösung ist, dass im kritischen Bereich komplett auf den Wärmeintrag verzichtet werden kann und das Rohr nur etwas andere Aussparungen auf der Oberseite benötigt. Wenn das Gewinde verschlissen ist, wäre ein Austausch der Nutensteine problemlos möglich. In der folgenden Abbildung ist die angedachte Lösung dargestellt.

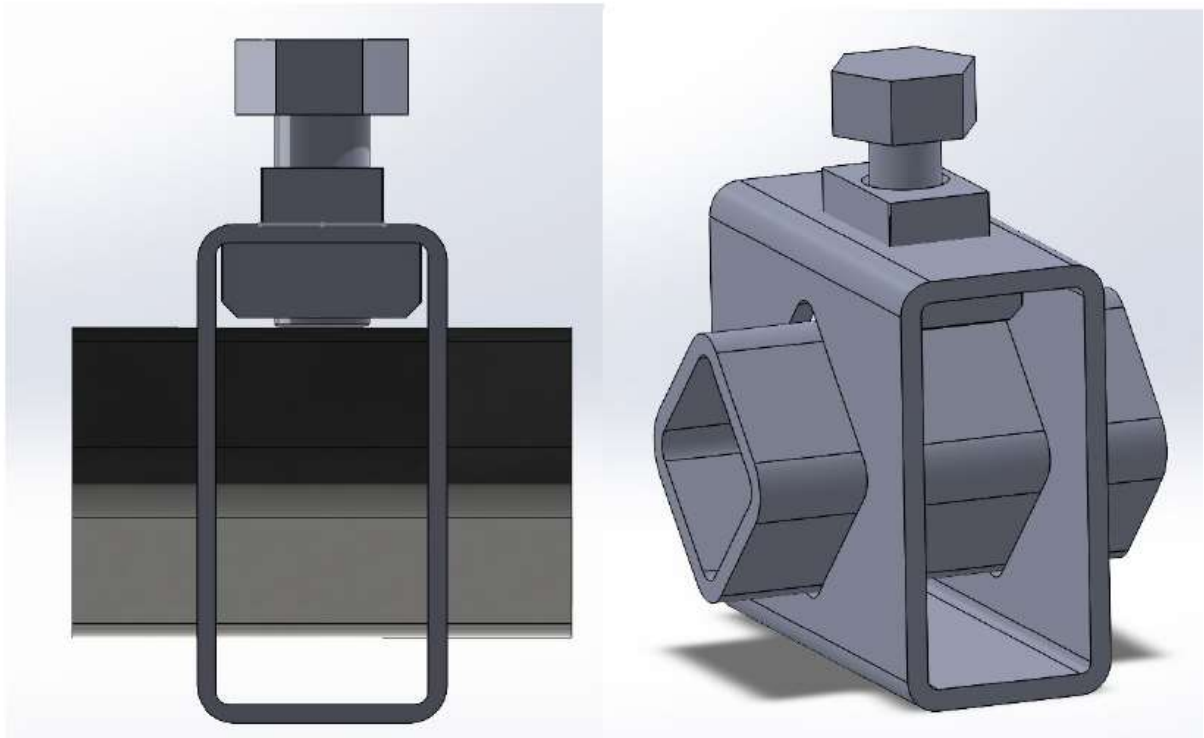


Abbildung 18: Nutensteinlösung zur Rohrverbindung

Die Tests ergaben für diese Lösung gute Ergebnisse. Aktuell laufen noch die Feldtests/ Dauertest. Falls hier auch keine gravierenden Nachteile auftreten, kann diese Lösung zukünftig in die Serie einfließen.

3.4 Konzeption einer Robotersteuerung

In unserer ursprünglichen Projektbeschreibung wurde damals ausdrücklich die Robotik ausgeklammert. Während des Besuchs der Fachmessen und der Verfolgung der Fachpresse wurde allerdings immer mehr klar, dass man am Thema Robotik bei Beikrautregulierung kaum vorbeikommt. Begonnen wurde hier mit einer Ist-Analyse. Hierfür wurde während eines Gruppentreffens in Triesdorf der dort eingesetzte „Farmdroid“ betrachtet. Da der Farmdroid der erste in Serie gebaute und endverkaufte Roboter zur Beikrautregulierung ist, ist das ein guter Benchmark.



Abbildung 19: Farmdroidbesichtigung in Triesdorf

Bei der Besichtigung wurde klar, dass der Farmdroid am besten auf rechteckigen Flächen ohne Spitzen zurechtkommt, da er immer nur die kompletten Arbeitsgeräte ein oder ausheben kann. In der Praxis wurde das unförmige Feld außenherum mit einer herkömmlichen Sämaschine so gesät, dass im inneren eine rechteckige Testfläche entsteht. Beim Säen erfasst der Roboter jeweils die GPS Position wo er die Säaggregate einsetzt. Das System ist so ausgelegt, dass die Pflanzen in Fahrtrichtung, wie auch 90 Grad zur Fahrtrichtung, in einer Reihe stehen. Ein weiterer Vergleich zwischen der Soll- und Ist- Position der Saat und der späteren Position der Pflanze erfolgt nicht. Dem zur Folge kann es auch vorkommen, dass die Saat nicht aufgegangen ist und der Roboter dann immer um die nicht vorhandene Pflanze herum arbeitet, somit können an dieser Stelle auch ungewollte Pflanzen wie Melden unbewusst gefördert werden.

Daher kam man auf die Idee, einen solchen Roboter mit der Garford Kamera auszustatten und somit genau zu wissen wo die Pflanzen stehen und wo somit gehackt werden kann. Da die Kompetenz der Kameratechnik und Steuerung bei Garford in England ansässig ist, wurden die meisten Versuche und Entwicklungen dort durchgeführt. Dafür wurde ein lokaler Roboter ausgewählt und eine Kamera darauf installiert, Ziel war es, den Roboter mittels der durch die Kamera ermittelten Daten durch den Bestand zu lenken. Auf der folgenden Darstellung sieht man, wie der Roboter erste Tests auf dem Hof absolviert.



Abbildung 20: Roboter Kamerateest

Hier war es möglich, dass die Kamera die einzelnen Spots erkennen konnte und aus diesen Daten ableiten konnte, wo sich die Pflanzreihen befinden. Damit weiß das System wo gefahren werden kann und wo nicht. Die ersten Tests waren insofern erfolgreich, als dass der Roboter durch die Reihen gefahren ist. Weitere Ergebnisse konnten im Rahmen des Projektes noch nicht erzielt werden.

4 Zusammenfassung

Zum Abschluss des Projektes kann man auf 3,5 Jahre zurückblicken, in denen viele Entwicklungen getätigt wurden, die ohne das Projektteam so wahrscheinlich nicht möglich gewesen wären. Zu Beginn wurde betrachtet, was aktuell am Hackenmarkt verfügbar ist, es wurden die Gruppenmitglieder wie auch weitere Landwirte befragt, wo aktuell Probleme oder interessante Anwendungen im Hackbereich existieren die noch nicht oder nicht richtig abgedeckt werden. Dabei kam man auf eine Alternative zum Verschieberahmen. Diese Alternative wurde in Form einer Sechlenkung aufgebaut und getestet. Für kleinere Hackmaschinen wäre das eine gute Alternative. Es konnte Baulänge gespart werden und die Lenkung funktionierte sehr gut. Nachteilig ist, dass diese Lenkung erst arbeitet, sobald die Seche die Erde berühren und so die Hackmaschine teilweise auch nicht in der optimalen Position in den Bestand einsetzt und mit Kulturpflanzenverlusten zu rechnen ist. Bei größeren Maschinen war es mit den Sechen nicht möglich, die Maschine sauber zu führen. Da Baulängeneinsparung gerade bei größeren Maschinen interessant wäre, wurde das System nicht weiterverfolgt.

Im nächsten Schritt wurde ein System entwickelt, das im Stande ist, GPS - Positionen bei der Aussaat aufzuzeichnen und diese zur späteren Hackarbeit zu nutzen. Somit kann auf eine Kamera zur Pflanzenerkennung verzichtet werden. Das System wurde mit verschiedenen Kamerasystemen verglichen und ausgewertet. Solange überall GPS- und Mobilfunkempfang vorhanden ist und das System beim Aufzeichnen wie beim Wiederabfahren problemlos funktioniert, konnten hiermit sehr gute Ergebnisse erzielt werden. Auch wenn die Kamera auf Grund der Bildqualität an ihre Grenzen kommt, liefert das GPS- System gute Ergebnisse. Einziger, aber nicht unbedeutender Nachteil ist, wenn die Aufzeichnung bei der Saat nicht funktioniert oder der GPS- Empfänger während der Fahrt seine Position verändert (zwischen Sämaschine und Hackmaschine), hilft lediglich eine Kamera zur Pflanzenerkennung.

Im weiteren Verlauf des Projektes traten auch fertigungstechnische Probleme bei der laufenden Produktion der Hackmaschinen auf. Hier wurde mit Hilfe von Simulation der Hochschule Weihenstephan - Triesdorf alternative Halterungen für die Schare entwickelt, um so die Prozesssicherheit der Scharträger gewährleisten zu können.

Im letzten Abschnitt des Projektes wurde ein Roboter mit einem Kamerasystem ausgestattet, um einen Hackroboter nicht ausschließlich, wie aktuell meist angewandt, mittels GPS- Signal zu steuern, sondern auch kombiniert mit Kamera und GPS Daten. Der größte Vorteil ist hier, dass die Kamera die tatsächliche Position und das Vorhandensein einzelner Kulturpflanzen bewerten kann und nicht nach theoretischen GPS Werten arbeitet.

5 Danksagung

3

Im Namen aller Projektpartner bedanken wir uns herzlich:

- beim Ministerium für Ernährung, Ländlichen Raum und Verbraucherschutz
- beim Regierungspräsidium Stuttgart
- bei den Gruppenmitglieder der OPG
- bei den externen Projektpartnern

Alle Bildrechte der zusehenden Abbildungen liegen bei der Firma Zürn Harvesting GmbH & Co. KG.

Zürn Harvesting GmbH & Co. KG

Kapellenstraße 1 74214 Schöntal-Westernhausen

Ansprechpartner: Rolf Zürn, Stefan Köbler