

Institut für
Erwerbs- und Freizeitgartenbau

Abschlussbericht

Forschungsprojekt
„Beikrautregulierung in Ökobetrieben mit Gemüsekulturen
unter besonderer Betrachtung von moderner
RTK-Steuerungs-, Ultraschall- und Kameratechnik
inkl. Arbeitswirtschaft und Kosten“



IMPRESSUM

Herausgeber

Bayerische Landesanstalt für Weinbau und Gartenbau (LWG)

An der Steige 15, 97209 Veitshöchheim

www.lwg.bayern.de, poststelle@lwg.bayern.de

Redaktion & Gestaltung

Institut für Erwerbs- und Freizeitgartenbau (IEF)

Sabine Staub und Simon Brell

Tel. 0931 9801-0, Fax 0931 9801-100

ief@lwg.bayern.de

Bildnachweis: LWG

1.Auflage

Januar 2019

Inhaltsverzeichnis

Inhaltsverzeichnis	II
ABBILDUNGSVERZEICHNIS	IV
TABELLENVERZEICHNIS	VI
1 Einführung	1
1.1 Unkrautregulierung	1
1.1.1 Indirekte Unkrautkontrolle	2
1.1.2 Direkte Unkrautkontrolle.....	2
2 Hacktechnik	4
2.1 Werkzeuge für den Zwischenbereich	5
2.2 Hackwerkzeuge zur Regulierung in der Reihe.....	8
3 Steuerungssysteme	10
3.1 Kamerasteuerung	10
3.1.1 CLAAS Kamerasystem	11
3.1.2 Schmotzer Okio Kamerasystem.....	13
3.1.3 Garford Kamerasystem	15
3.1.4 K.U.L.T. Vision Control.....	16
3.1.5 IC Light Kamera	17
3.2 Weitere Steuerungssysteme.....	18
3.2.1 Reichhardt Systeme.....	18
3.2.2 SBGUIDANCE TWIN DISC Steuerung	21
3.3 Selektive Hacktechnik	22
3.3.1 Robovator	22
3.3.2 Robocrop	23
3.3.3 Steketee IC InRow Weeder.....	24
3.3.4 Ferrari Remoweed	25
4 Versuche	26
4.1 Versuchsjahr 2016.....	26

4.1.1	Versuchsaufbau	26
4.1.2	Versuchsdurchführung.....	27
4.1.3	Ergebnisse	28
4.2	Versuchsjahr 2017.....	31
4.2.1	Technikversuche.....	31
4.2.2	Zeitversuche	36
4.3	Versuchsjahr 2018.....	42
4.3.1	Versuchsaufbau	42
4.3.2	Versuchsdurchführung.....	42
4.3.3	Ergebnisse	43
5	Ökonomische Berechnungen.....	47
5.1	Kosten der Unkrautkontrolle	49
5.1.1	Chemischer Pflanzenschutz.....	49
5.1.2	Mechanische Unkrautkontrolle.....	50
6	Auf einen Blick – Schlussfolgerungen für die Praxis.....	54
7	Literaturverzeichnis	59
8	Anhang	60

ABBILDUNGSVERZEICHNIS

Abbildung 1: SCHMOTZER Hacktechnik im Frontanbau beim Schmotzer Hacktag am 12.04.2018.....	4
Abbildung 2: Zahnschutzrollen der Firma SCHMOTZER.....	5
Abbildung 3: Gänsefußschare beim Einsatz in Roter Bete	6
Abbildung 4: Winkelmesser beim Einsatz in Roter Bete	6
Abbildung 5: Fingerhacken (K.U.L.T.) beim Einsatz in Roter Bete 2018	9
Abbildung 6: Fingerhacken (Schmotzer) beim Einsatz in Roter Bete 2018	9
Abbildung 7: Schmotzer Hacktechnik mit Kamerasteuerung über einen AVR5 Verschiebesystem	10
Abbildung 8: Claas Kamerasteuerung in Roter Bete (links), Bedienerterminal (rechts).....	12
Abbildung 9: Schmotzer Kamerasteuerung Okio	13
Abbildung 10: Bedienerterminal der Schmotzer Okio Kamerasteuerung, Startbildschirm (links oben), Kulturauswahl (rechts oben), Livebilder während der Fahrt (unten).....	14
Abbildung 11: K.U.L.T. Vision Control beim Einsatz in Karotten 2017.....	16
Abbildung 12: Größe der Karottenpflanzen beim ersten Einsatz des K.U.L.T. Vision Control	17
Abbildung 13: Reichhardt Verschieberahmen mit Ultraschallsensoren und GPS-RTK Empfänger.....	18
Abbildung 14: SBG Steuerung an Dammhacktechnik	21
Abbildung 15: Robovator	22
Abbildung 16: Selektives Hacksystem Robocrop	23
Abbildung 17: Steketee IC - Weeder	24
Abbildung 18: Selektives Hacksystem Remoweed der Firma Ferrari	25
Abbildung 19: Selbst gebauter Boniturrahmen zur Unterscheidung der Boniturflächen "in der Reihe" und "zwischen den Reihen"	28
Abbildung 20: Erster Hackdurchgang, Hausen, 07.06.2016.....	29
Abbildung 21: 2. Hackdurchgang, Hausen, 22.06.2016.....	29
Abbildung 22: Versuchsfläche in Bütthard nach der Aussaat der Roten Bete	31
Abbildung 23: Aussaat Rote Bete in Bütthard am 07.04.2017.....	33
Abbildung 24: Versuchsfläche am 17.05.2017 vor dem ersten Hackdurchgang.....	33
Abbildung 25: Fräsen der Dämme (links), Aussaat der Karotten (rechts).....	34
Abbildung 26: Einsatz der Duoparallelogramme an den Karottendämmen	35

Abbildung 27: Größe der Karottenpflanzen beim ersten Einsatz des Vision Control Systems	35
Abbildung 28: Rüstzeiten der vier Steuerungssysteme eingeteilt nach den benötigten Zeiten für die sechs unterschiedlichen Arbeitsvorgänge (siehe Tabelle).....	37
Abbildung 29: Ergebnisse der Datenaufnahme beim Vorgang "Einsetzen" auf der Rote Bete Fläche in Vilchband am 27.05.2017 (Frontanbau und Claaskamera) und 05.06.2017 (Schmotzer Okio und Reichhardt GPS-RTK & Sonic)	38
Abbildung 30: Ergebnisse der Datenaufnahme beim Vorgang "Wenden" auf der Rote Bete Fläche in Vilchband am 27.05.2017 (Frontanbau und Claaskamera) und 05.06.2017 (Schmotzer Okio und Reichhardt GPS-RTK & Sonic)	38
Abbildung 31: Ergebnisse der Datenaufnahme bei den Vorgängen „Einsetzen“ (links) und "Wenden"(rechts) auf der Rote Bete Fläche in Oesfeld am 18.05.2017 (Reichhardt GPS-RTK) und 07.06.2017 (Schmotzer Okio- und Claaskamera)	39
Abbildung 32: Ergebnisse der Datenaufnahme beim Vorgang "Einsetzen" auf der Ackerbohnen Fläche beim ersten Hackdurchgang (links, 23.05.2017) und beim zweiten Durchgang (rechts, 01.-06.06.2017).....	40
Abbildung 33: Ergebnisse der Datenaufnahme beim Vorgang "Wenden" auf der Ackerbohnen Fläche beim ersten Hackdurchgang (links, 23.05.2017) und beim zweiten Durchgang (rechts, 01.-06.06.2017)	40
Abbildung 34: Entwicklungsstadium der Roten Bete und Zuckerrübe 19 Tage nach der Aussaat am 8.5.2018.....	44
Abbildung 35: Winkelmesser beim Einsatz in der Roten Bete	45
Abbildung 36: Hackerergebnis nach dem Einsatz der Winkelmesser (links) und der Gänsefußschare (rechts)	45
Abbildung 37: Simulation von erhöhter Unkrautdichte durch das Hineinlegen von Süßkartoffelblätter in den Rote Bete Bestand.....	46

TABELLENVERZEICHNIS

Tabelle 1: Einteilung der Arbeitsvorgänge beim Hacken mit Steuerungssystemen.....	36
Tabelle 2: Einteilung der Rüstzeiten in sechs Arbeitsvorgänge	36
Tabelle 3: Anschaffungspreise für Systeme verschiedener Hacktechnikhersteller, nicht vollständig, aus dem Jahr 2017	48
Tabelle 4: Kosten des Pflanzenschutzmitteleinsatzes nach Werten der LfL, Kosten für Pflanzenschutzmittel für das Frühjahr 2018.....	49
Tabelle 5: Maschinenkosten berechnet mit dem KTBL Maschinenkostenrechner.....	50
Tabelle 6: Gesamtkosten der mechanischen Bearbeitung durch die Hackmaschine	51
Tabelle 7: Gesamtkosten der Unkrautkontrolle mit Handjätestunden von 120 Akh	52
Tabelle 8: Gesamtkosten der Unkrautkontrolle mit Handjätestunden von 80 Akh.....	53
Tabelle 9: Übersicht Steuerungssysteme (Kameragestützt).....	60
Tabelle 10: Übersicht Steuerungssysteme (GPS-RTK gestützt)	61

1 Einführung

Der Anteil an biologisch bewirtschafteter Ackerfläche in Bayern ist in den letzten Jahren stark gestiegen. Vermehrte Nachfrage nach Bioprodukten unterstützt diesen Anstieg. Im Jahr 2012 wurde die Initiative „BioRegio Bayern 2020“ vom bayerischen Landwirtschaftsministerium ins Leben gerufen. Dieses Landesprogramm soll die Bildung, Beratung, Förderung, Vermarktung und Forschung im Ökoanbau gezielt unterstützen. Bis zum Jahr 2020 soll eine Verdoppelung der biologisch produzierten Produkte in Bayern erreicht werden.

Große Entwicklungsmöglichkeiten gibt es bei der mechanischen Unkrautregulierung. Eine effiziente Unkrautkontrolle ist eine der wichtigsten Grundlagen der Produktion im Ökoanbau. Aus diesem Grund wurde das Forschungsprojekt an der Bayerischen Landesanstalt für Weinbau und Gartenbau „Beikrautregulierung in Ökobetrieben mit Gemüsekulturen unter besonderer Betrachtung von moderner RTK-Steuerungs-, Ultraschall- und Kameratechnik inkl. Arbeitswirtschaft und Kosten“ (A/15/08) durch das Staatsministerium für Ernährung, Landwirtschaft und Forsten im Rahmen der Initiative BioRegio Bayern 2020 gefördert.

1.1 Unkrautregulierung

„Unkräuter sind Pflanzen, die an ihrem Standort mehr Schaden als Nutzen verursachen“ (Hock 1995)

„Unkräuter kommen in der Regel nur auf Standorten vor, die vom Menschen in irgendeiner Weise verändert wurden und/oder werden, wobei Art und Intensität des Eingriffs sehr unterschiedlich sein können.“ (Zwenger 1995)

Kulturpflanzen konkurrieren auf Ackerflächen mit Wildkräutern um Licht, Nährstoffe und Wasser. In unterschiedlichen Bereichen werden die Wildkräuter auf Ackerflächen deshalb als Unkräuter, Beikräuter oder Segetalpflanzen bezeichnet.

Erfolgt in angelegten Kulturen keine Unkrautregulierung, können große Ertragsverluste entstehen. Zudem werden durch Unkräuter die Qualität des Erntegutes und der Erntevorgang negativ beeinflusst. Bis zu einer gewissen Toleranzschwelle können Unkräuter auf Ackerflächen toleriert werden. Vor allem

während der Jugendentwicklung sollten die meisten Kulturpflanzen ohne Konkurrenz frei von Unkraut sein. Nach dieser Phase können manche Unkräuter auf der Fläche akzeptiert werden. Jedoch sollten diese nicht bis zur Samenreife kommen. Keine Unkräuter können im Bestand toleriert werden, wenn die gesamte Blattmasse geerntet wird, wie bspw. bei Spinat.

Eine der größten Herausforderungen im biologischen, mit der Einschränkung von Herbiziden aber auch im konventionellen Anbau von Feldgemüse, ist die Unkrautkontrolle. Bei der Unkrautregulierung unterscheidet man in die direkte und indirekte Regulierung der Unkräuter.

1.1.1 Indirekte Unkrautkontrolle

Indirekte Unkrautkontrollmaßnahmen bezeichnet man Bearbeitungsvorgänge auf dem Acker, die vor der Aussaat oder nach der Ernte der Kulturen unternommen werden. Ziel der indirekten Unkrautregulierung ist es die Unkrautdichte und den Samenvorrat auf der Fläche möglichst gering zu halten. Hierdurch kann die direkte Unkrautkontrolle innerhalb der Kulturzeit stark erleichtert werden. Landwirte können den Unkrautbesatz durch eine geschickte Fruchtfolgegestaltung, passende Bodenbearbeitungsmaßnahmen, Saatgut- und Pflanzguthygiene und einer Erhöhung der Konkurrenzkraft durch bspw. geeignete Sortenwahl oder Untersaat möglichst gering halten.

1.1.2 Direkte Unkrautkontrolle

Zur direkten Unkrautkontrolle zählen die mechanischen Verfahren wie Striegeln, Hacken oder Bürsten. Aber auch thermische Verfahren wie der Einsatz von Abflammentechnik oder die Dämpfung gehören dazu. In manchen Kulturen spielen auch Mulchmaterialien eine große Rolle als Mittel zur Unkrautkontrolle.

In tief gesäten Kulturen wie Getreidearten findet das Blindstriegeln eine große Anwendung. Hierunter wird der Striegeldurchgang zwischen Aussaat und Auflaufen der Kultur verstanden. Den größten Erfolg erzielt man bei keimendem bis maximal zum Keimblattstadium entwickeltem Unkraut. Aber auch vor der Aussaat können nach der Vorbereitung eines falschen Saatbettes Unkräuter mit Hilfe eines Striegels reguliert werden.

In konkurrenzschwachen flachgesäten Kulturen mit einer langen Keimdauer, wie Karotten oder Zwiebeln, kann im Voraufbau schnell keimendes Unkraut abgeflammt werden.

Mulchmaterialien wie Mulchfolie werden vor der Aussaat bzw. Pflanzung ausgebracht und unterdrücken die Keimung der Unkräuter durch Lichtabschluss. Im Handel gibt es verschiedene Materialien, die in der Praxis am häufigsten bei Einlegegurken, Zucchini oder Salaten eingesetzt werden.

Alle Kulturmaßnahmen müssen so kombiniert sein, dass zu keinem Zeitpunkt das Unkraut die Kulturpflanze überwächst. Den größten Bekämpfungserfolg erzielt man bei Unkräutern in kleinem Entwicklungsstadium. Vor allem beim Einsatz von Fingerhacken oder Striegeln muss das Unkraut deutlich kleiner und dementsprechend weniger verwurzelt, als die Kulturpflanze sein. Jedoch sollten die Unkräuter auch eine gewisse Größe erreicht haben, wodurch eine gute Bekämpfung mit möglichst wenigen Bearbeitungsdurchgängen erfolgen kann. Neben der Größe der Unkrautpflanzen spielen die Bodenart, die Bodenfeuchte und die Witterung auch eine große Rolle beim Bekämpfungserfolg.

2 Hacktechnik

Durch die mechanische Bearbeitung der obersten Bodenschicht werden Unkräuter insbesondere in der Reihe durch Verschütten oder Entwurzeln reduziert. Hackwerkzeuge sollten nicht tiefer als die obersten 2 cm des Bodens bearbeiten. Hierbei sind verschiedene Werkzeuge an einem Hackrahmen befestigt, der entlang der Reihen gezogen wird. Man unterscheidet zwischen Hackgeräten die zwischen den Reihen und in der Reihe arbeiten.

Der Hackrahmen kann in der Front, im Zwischenachsbereich oder im Heckanbau am Schlepper angebaut sein.



Abbildung 1: SCHMOTZER Hacktechnik im Frontanbau beim Schmotzer Hacktag am 12.04.2018

Zum Schutz der Kulturpflanzen in einem frühen Entwicklungsstadium werden meist Scheiben oder Bleche auf beiden Seiten der Pflanze verwendet. Haben die Pflanzen ein größeres Entwicklungsstadium erreicht, kann die Schutzvorrichtung angehoben werden. Hierdurch kann Erde in die Reihe geschüttet, bzw. angehäufelt, werden und somit einen Verschüttungseffekt von kleineren Unkräutern in der Reihe erzielt werden.



Abbildung 2: Zahnschutzrollen der Firma SCHMOTZER

2.1 Werkzeuge für den Zwischenbereich

Für die Bearbeitung der Fläche zwischen den Kulturreihen steht eine Vielzahl von Arbeitswerkzeugen zur Verfügung. Für jedes Werkzeug gilt der Grundsatz: Je höher die Arbeitsgeschwindigkeit, desto aggressiver arbeiten die Werkzeuge gegen das Unkraut, aber auch gegen die Kulturpflanze.

Gänsefußschar

Gänsefußschare werden am häufigsten als Werkzeuge an Hacktechnik verwendet. Die gänsefußartigen Werkzeuge werden durch die oberste Bodenschicht gezogen. Die unterschiedlichen Hacktechnikhersteller bevorzugen verschiedene Techniken zur Aufhängung und Führung der Schare am Hackrahmen. Die Firma Schmotzer bietet die Gänsefußschare als Vibromesser, also halbgedederte Werkzeuge, an. Die Wirkung der Gänsefußschare entsteht durch das Aushacken oder Verschütten der Unkräuter. Je nach Bodenzustand, Arbeitstiefe und Geschwindigkeit kann der Verschüttungseffekt verstärkt werden. Bei Kulturpflanzen mit einem weiteren Entwicklungsstadium können die Hackwerkzeuge auch mit dem Ziel Unkräuter in der Reihe zu verschütten eingestellt werden.



Abbildung 3: Gänsefußschare beim Einsatz in Roter Bete

Winkelmesser

Winkelförmig gebogene Messer können für die Unkrautregulierung in der Reihe eingesetzt werden. Die relativ langen, dicht unter dem Boden laufenden Messer schneiden die Unkräuter ab. Vor allem Unkräuter wie Disteln, die mit Gänsefußscharen schlechter getroffen werden, können mit Hilfe der Messer gut abgeschnitten werden.



Abbildung 4: Winkelmesser beim Einsatz in Roter Bete

Rollhacke

In robusten Reihenkulturen wie Kohllarten, Sellerie oder Lauch sowie zur Bearbeitung von Dämmen eignet sich die Sternhacke. Durch die rotierenden Werkzeuge werden Unkräuter entwurzelt und verschüttet. Durch unterschiedliche Ausrichtungen der Werkzeuge kann Erde angehäufelt, bzw. abgehäufelt werden und somit ein Verschüttungseffekt in der Reihe erzielt werden. Sehr viel Erde wird mit diesen Werkzeugen bewegt und somit mehr Unkrautsamen an die Oberfläche gefördert, wodurch der Unkrautdruck erhöht werden kann.

Hackbürste

Bürsten werden zusätzlich mechanisch angetrieben und entwurzeln die Unkräuter. Vor allem auf Flächen mit einem sehr ebenen Pflanzbett und geringem Steinanteil sind die Hackbürsten gut anwendbar. Hackbürsten können walzenähnlich oder auf Tellern angebracht gebaut werden.

Häufelkörper

Mithilfe von Häufelkörpern wird Erde in die Reihe hineingeworfen. Vor allem in etablierten Kulturen können durch Verschüttung gegen kleinere Unkräuter gute unkrautregulierende Effekte erzielt werden. Häufelkörper sind Werkzeuge von der Dammhacktechnik.

2.2 Hackwerkzeuge zur Regulierung in der Reihe

Die Unkrautkontrolle in der Reihe ist eine größere Herausforderung. Nicht selektive Werkzeuge stehen hier zur Verfügung. Beim Einsatz der Werkzeuge, die nicht selektiv in der Reihe arbeiten, muss auf den Entwicklungsstand der Kulturpflanze geachtet werden. Leichte Verletzungen und Verschüttungen müssen toleriert werden.

Fingerhacken

Fingerhacken bestehen aus sternförmigen Kunststoffgliedern. Angetrieben werden sie durch einen im Boden laufenden Metallstern an der Unterseite der Finger. Je nach Reihenabstand und Bodenzustand stehen große, kleine, harte und weiche Fingersterne zur Verfügung. Angeboten werden die Fingerhacken von Anbietern wie K.U.L.T. Kress umweltschonende Landtechnik und Schmotzer:

K.U.L.T.	Schmotzer
<p>In mehreren Größen verfügbar:</p> <ul style="list-style-type: none"> - <i>Die Große:</i> Ø 370 mm, ab einem Reihenabstand von 50 cm - <i>Die Mittlere:</i> Ø 290 mm, für einen Reihenabstand von 40 – 55 cm - <i>Die Kleine:</i> Ø 250 mm, für einen Reihenabstand von 25 – 35 mm 	<p>Eine Größe mit Ø 290 mm</p>
	<p>Einstellung der Neigung möglich:</p> <p>40° Neigung: ab dem Zweiblattstadium der Kultur möglich, die Finger arbeiten tiefer im Boden</p> <p>20° Neigung: wenn die Kultur fest steht, also die Pflanze etwas größer ist</p>
<p>Alle Größen in drei Härtegraden für unterschiedlichen Bodenarten verfügbar</p>	<p>Nur ein Härtegrad verfügbar, aber kantig geschnittene Finger</p>



Abbildung 5: Fingerhacken (K.U.L.T.) beim Einsatz in Roter Bete 2018



Abbildung 6: Fingerhacken (Schmotzer) beim Einsatz in Roter Bete 2018

Arbeitsweise: Frisch gekeimte und im Keimblattstadium befindliche Unkräuter werden durch die zwei gegenüber angebauten Finger aus der Reihe entfernt. Die Kulturpflanze muss stark verwurzelt sein, um eine Schädigung dieser zu vermeiden.

Rollstriegel

Im Kreis angeordnete Striegelelemente arbeiten in der Kulturreihe. Angetrieben werden sie über den Kontakt mit dem Boden. Meist sind die Striegelelemente im 30° Winkel zur Kulturreihe angebaut. In etablierten Kulturen können hiermit Unkräuter aus der Reihe „herauskämmt“ werden. Durch die relativ aggressive Arbeitsweise können auch leicht Schäden an der Kultur entstehen.

3 Steuerungssysteme

Um exaktere Ergebnisse auf dem Acker zu erzielen, werden in der mechanischen Unkrautregulierung immer häufiger automatische Steuerungssysteme eingesetzt. Hierbei wird meistens zwischen dem Schlepper und dem Anbaugerät ein Verschiebesystem eingebaut. Der Impuls für die Feinsteuerung wird von einem optischen bzw. Ultraschallsensor oder über ein GPS-RTK System gegeben.

3.1 Kamerasteuerung

Kamerasteuerungen sind von unterschiedlichen Herstellern verfügbar. Die Funktionsweise ist leicht vergleichbar. Die Pflanzenreihe wird durch das Kamerasystem erkannt und ein Lenkimpuls an ein Verschiebesystem zwischen Traktor und Hacktechnik gegeben. Somit wird die Hacktechnik entlang der aufgenommenen Pflanzenreihe geführt.



Abbildung 7: Schmotzer Hacktechnik mit Kamerasteuerung über einen AVR5 Verschiebesystem

3.1.1 CLAAS Kamerasystem

Schon lange auf dem Markt verfügbar ist das Kamerasystem der Firma Claas. Der Ursprung dieses Kamerasystems liegt bei der Steuerung von selbstfahrenden Erntemaschinen und Traktoren entlang von bspw. Schwaden. Für diesen Zweck wird die Kamera als CAM Pilot vertrieben. In Kombination mit deren eigenem Verschiebesystem setzen viele Firmen, wie Einböck, Schmotzer oder Hatzenbichler auf die daraus entstandene Claas Optitronic Kamera für ihr Steuerungskonzept.

Funktionsweise

Die Kamera blickt auf bis zu drei Kulturreihen. 25 Bilder pro Sekunde werden von dem System aufgenommen und verwertet. Hierbei werden die Anteile der grünen Pixel auf den Bildern analysiert, wobei die höchste Dichte an grünen Pixeln als Kulturpflanze angenommen wird. Die Kulturpflanzenreihe wird aus den ermittelten Daten errechnet.

Einsatzfenster, Genauigkeit und Praxiserfahrung

Ein sicherer Einsatz ist in den Kulturen Rote Bete und Zuckerrübe ab dem Entwicklungsstadium BBCH 14 möglich. In den enger gesäten Roten Beten war teilweise der erste Einsatz schon im BBCH 12 möglich.

Die Claas Optitronic Kamerasteuerung ist für den Nutzer ein sehr leicht verständliches und damit benutzerfreundliches System. Zu Beginn der Arbeit auf dem Acker müssen einige Parameter in das Terminal eingegeben werden. So wird die Wuchshöhe und die durchschnittliche Wuchsbreite der Kulturpflanze benötigt. Außerdem muss der Abstand der Kamera zum Boden und die Neigung der Kamera im Vergleich zum Hackrahmen angegeben werden. Bei der Fahrt im Bestand kann, vorausgesetzt alle Angaben wurden passend gemacht, die Signalstärke anhand eines Balkens überprüft werden. Diese wird auf einer Skala von 0 – 100 % angegeben. Zum Arbeiten wird eine Signalstärke von 50 % benötigt. Fällt die Signalstärke unter diesen Wert, verharrt der Verschieberahmen in seiner aktuellen Position und ein akustisches Signal ertönt solange bis wieder ein ausreichendes Signal vorhanden ist. Beim Ausheben am Ende einer Bearbeitungsspur verharrt der Verschieberahmen in seiner aktuellen Position. Somit muss vor dem Einsetzen in eine neue Spur der Verschieberahmen mittels Knopfdruck in die Mittelposition

gefahren werden. Eine Ausbesserung der Position der Hacktechnik kann über das Terminal manuell erfolgen.

Bei der Arbeit mit der Optitronic Kamera wurden auch Erfahrungen bei der Fahrt bei schrägem Sonnenstand gemacht. So kann die Signalstärke bei Dämmerung oder wenn man direkt auf die Sonne zufährt, stark vermindert sein oder zu einem Ausfalls des Systems führen.

An Hanglagen hatten wir bezüglich der Steuerungstechnik keine Probleme, die Technik erkennt die mögliche Abdrift und versucht diese auszugleichen. Ein Ausgleich ist allerdings nur bis zu dem maximalen Verschiebeweg von 25 – 30 cm möglich. Fehler treten nur auf, wenn der Fahrer es nicht schafft den Traktor am Hang zu halten. Versucht der Fahrer die Hangabdrift auszugleichen und lenkt den Traktor hangaufwärts entsteht ein spitzer Winkel. Da der Verschieberahmen starr mit dem Traktor verbunden ist, überträgt sich der Winkel auf die Hacke. Bei schmalen Hackbändern kann die schräge Anordnung der Hackschar zu Verlusten in den Kulturpflanzenreihen führen.



Abbildung 8: Claas Kamerasteuerung in Roter Bete (links), Bedienerterminal (rechts)

3.1.2 Schmotzer Okio Kamerasystem



Abbildung 9: Schmotzer Kamerasteuerung Okio

Im Jahr 2017 entwickelte die Firma Schmotzer zusammen mit der österreichischen Firma Ensio ein eigenes Kamerasystem.

Funktionsweise

Mit dem Kamerasystem werden 20 Bilder pro Sekunde aufgenommen. Es wird nur eine Kulturpflanzenreihe aufgenommen. Die Bilder werden nach unterschiedlichen Farbtönen (hell/dunkel) verarbeitet. Aber auch die Blattform der aufgenommenen Pflanzen wird analysiert. Im System hinterlegt sind die Blattstrukturen von unterschiedlichen Kulturpflanzen, diese werden mit den aufgenommenen Bildern verglichen und dienen zur Erkennung der Kulturpflanzen. Das System kann ständig über eine WLAN Verbindung erneuert werden. Auch die Aufnahme von nicht hinterlegten Kulturen ist immer möglich, hierbei werden vom Anwender Bilder aufgenommen und an den Entwickler gesendet. Dieser bereitet die Daten auf und stellt sie für alle Anwender zur Verfügung.

Für Flächen mit starkem Seitenhang hat die Firma einen Neigungssensor mit im System verbaut.

Einsatzfenster, Genauigkeit und Praxiserfahrung

Zur Nutzung des Schmotzer Okio Kamerasystems steht dem Fahrer ein großes übersichtliches Terminal zur Verfügung. Über den Touchscreen müssen vor dem

Einsatz zunächst die kulturspezifischen Daten ausgewählt werden. Zu jeder Kultur sind drei Wachstumsstadien angegeben, die man auswählen muss. Auf dem Bildschirm wird das aufgenommene Bild der Kamera in Echtzeit angezeigt. In der Mitte des Bildes sind eine gestrichelte Linie und rechts und links davon zwei durchgezogene Linien zu sehen. Auf der gestrichelten Linie soll optimaler Weise die Kulturpflanzenreihe liegen, die durchgezogenen Linien ergeben die Grenzen. Während der Durchfahrten kann durch das Livebild auf dem Bildschirm die Arbeit der Kamerasteuerung verfolgt werden. Kommt es zu Störungen und Abweichungen bei der Kamera kann der Nutzer direkt eingreifen, noch bevor Schaden auf dem Acker entsteht.

Bei größeren Fehlstellen oder anderen Störungen bleibt der Verschieberahmen in seiner aktuellen Position stehen. Eine Steuerung des Rahmens erfolgt erst nach dem Empfang eines neuen Steuerungsimpulses wieder. Um Störungen aufgrund von starker Sonneneinstrahlung zu vermeiden, ist an der Kamera eine verstellbare Haube angebracht.



Abbildung 10: Bedienerterminal der Schmotzer Okio Kamerasteuerung, Startbildschirm (links oben), Kulturauswahl (rechts oben), Livebilder während der Fahrt (unten)

3.1.3 Garford Kamerasystem

Garford entwickelte ihr Kamerasystem Robocrop zur Steuerung von Hacktechnik. Verschiebebefehle werden mit einem Verschieberahmen über eine hydraulische Seitenverschiebung ausgeführt.

Funktionsweise

Bis zu drei Reihen werden von der Kamera mit 30 Bildern pro Sekunde aufgenommen. Die höchste Konzentration von Pixel im Verhältnis zu den Anbaureihen wird herausgefiltert und zur Führungslinie verrechnet. Laut Hersteller ist eine genaue Führung bis zu dem Zeitpunkt möglich, wenn die Blätter der Kulturpflanze den Großteil der grünen Objekte im Kamerablickfeld darstellen. Alleinstellungsmerkmal des Systems ist die hohe Farbintelligenz. Auch Kulturen mit einer Rotfärbung können gut erkannt werden, sowie Schatten und hohe Sonneneinstrahlung können ausgeglichen werden.

Einsatzfenster, Genauigkeit und Praxiserfahrungen

Die Hersteller versprechen eine Genauigkeit von 1 – 1,5 cm bei der Führung der Hacktechnik. Eine Pflanzenmindestgröße von 1 cm soll zur Erkennung der Pflanzen ausreichen.

3.1.4 K.U.L.T. Vision Control

Eine eigene Weiterentwicklung bringt die Firma K.U.L.T. mit dem Vision Control System auf den Markt.



Abbildung 11: K.U.L.T. Vision Control beim Einsatz in Karotten 2017

Funktionsweise

Oberhalb der Pflanzenreihe sind Kameras installiert. Bis zu vier Kameras pro Beet werden zusammen mit einem starken Scheinwerfer zur Reihenerkennung verwendet. Neben optischen Kameras, die auf die Erkennung der Pflanzenfarbe setzen, werden auch Infrarotsysteme verwendet. Hiermit können lebende Pflanzenteile gut erkannt werden. Das Erkennen von Pflanzen in einem sehr kleinen Entwicklungsstadium sind somit möglich.

Einsatzfenster, Genauigkeit und Praxiserfahrung

Schon kleine, frisch aufgelaufene Kulturen können einwandfrei erkannt werden. Die Reaktion des Steuerungssystems ist sehr schnell und präzise.



Abbildung 12: Größe der Karottenpflanzen beim ersten Einsatz des K.U.L.T. Vision Control

Die Einstellungen der Kameras laufen über ein relativ unpraktisches Steuerungsmodul. Eine Verbindung über WLAN mit einem Smartphone oder Tablet ist allerdings möglich. Hier können dann auch alle aufgenommenen Bilder der Kamera abgerufen werden.

3.1.5 IC Light Kamera

Funktionsweise

Auch die IC Light Kamera der Firma Steketee arbeitet Grundlegend mit einer Farberkennung im grünen Bereich. Zusätzlich wird aber auch auf Farberkennungen im RGB-Bereich gesetzt. So wird beim Einsatz im Getreide die Kamera auf die Farbe Gelb in der Mitte der Getreidepflanze gelenkt, womit zur Errechnung der Kulturreihe immer das Zentrum der Pflanze verwendet wird. Für das menschliche Auge ist die Farbe Gelb in der Pflanze nicht zu erkennen und erscheint komplett grün. Außerdem ist eine Höhenerkennung möglich. Mit der Kamera können 1 – 3 Kulturreihen aufgenommen werden. Eine Arbeitsgeschwindigkeit von 3 – 10 km/h ist möglich.

3.2 Weitere Steuerungssysteme

Neben Kamerasteuerungen sind weitere Steuerungssysteme auf dem Markt verfügbar. So können auch GPS-RTK- oder Ultraschallsysteme zur exakten Steuerung von Hacktechnik verwendet werden.

3.2.1 Reichardt Systeme



Abbildung 13: Reichardt Verschieberahmen mit Ultraschallsensoren und GPS-RTK Empfänger

Die Firma Reichardt bietet mit ihrem PSR Slide Anbaugerätelenkung ein System an, das Lenkbefehle von sowohl GPS-RTK als auch Ultraschall ausüben kann. Den Verschieberahmen gibt es als PSR SLIDE L für eine Tragkraft von 1,5 t oder in einer größeren Ausführung, dem PSR SLIDE XL mit einer Tragkraft von 4 t. Quer zur Pflanzenreihe arbeitet die Verschiebetechnik über einen Verschieberahmen. Der Lenkimpuls entsteht über das GPS-RTK System oder das Ultraschallsystem.

Funktionsweise GPS-RTK

Grundlage der GPS-RTK Steuerung ist der Empfang eines GPS-Signales sowie ein Referenzsignal (RTK), um die Ungenauigkeit des GPS-Signals auszugleichen. Den Zugriff auf Referenzstationen bieten vielerorts Maschinenringe oder Lohnunternehmer an. Auch mobile Geräte als Korrektursignal können verwendet werden. Bei der Aussaat oder Pflanzung wird die Kulturpflanzenreihe aufgenommen, auf die dann bei den späteren Hackdurchgängen zurückgegriffen wird. Ausschlaggebend für eine sichere Nutzung des GPS-RTK Systems ist der Empfang von am besten vier Satelliten.

Einsatzfenster, Genauigkeit und Praxiserfahrung GPS-RTK

Beim Einsatz des GPS-RTK Systems kann unabhängig vom Entwicklungsstadium der Kulturpflanze gehackt werden. Voraussetzung hierbei ist ein guter Empfang von GPS und RTK Daten. Werden alle Daten sicher empfangen, kann mit dem GPS-RTK System bis auf 2,5 cm genau gearbeitet werden.

Probleme traten im Versuch aufgrund der Bauform des Verschieberahmens auf. In der Zusammenarbeit mit der 12-reihigen Hacktechnik wurde das Verschiebesystem mit relativ hohem Gewicht stark beansprucht. Ein Ausgleich, vor allem an Hanglagen, hat zwar funktioniert, allerdings ist das System an seine Grenzen gekommen. Empfehlenswert ist daher eher ein Einsatz bei Hacksystemen mit kleineren Arbeitsbreiten.

Funktionsweise **Ultraschall**

Ultraschallsensoren am Verschieberahmen können entlang von Kanten auf dem Acker nachsteuern. Geeignet hierzu sind Fahrspuren, Pflanzenreihen, Spuranreißerspuren, Dämme, Schwaden oder Bestandskanten. An jeder Seite des Verschieberahmens sind zwei Ultraschallsensoren befestigt. Abhängig vom Einsatzort müssen die Sensoren entsprechend ausgerichtet werden:



Die Laufzeit der zurückgeworfenen Daten von der Pflanze/Kante wird vom Ultraschallsystem analysiert. Die Entfernung von der Pflanze zum Sensor wird somit ermittelt. Messen alle Sensoren die gleiche Entfernung zur Kulturpflanze und zum Boden fährt das System exakt entlang der Reihe. Ein präzises Anbringen der Sensoren ist allerdings Voraussetzung für eine genaue Arbeit. Bei der Arbeit in Reihenkulturen wird ein Sensor auf die Kulturpflanze und ein Sensor auf den Boden eingestellt. Vergleichbar dazu werden auch die Sensoren in Dammkulturen eingestellt, ein Sensor auf die Dammkuppe und ein Sensor auf die Dammflanke.

Voraussetzung einer genauen Abtastung der Kulturreihe oder des Dammes ist ein Höhenunterschied der zwei vom Sensor ermittelten Punkte von 7 cm.

Einsatzfenster, Genauigkeit und Praxiserfahrung Ultraschall

Solange die gesäte Kultur noch nicht die entsprechende Wuchshöhe erreicht hat, kann das System noch nicht eingesetzt werden. Bessere Einsatzmöglichkeiten sind deshalb in gepflanzten Kulturen, die schon früh die Höhendifferenz zum Boden erreicht haben. Auch der Einsatz zur Saat auf Dämmen ist gut vorstellbar. Sind alle Voraussetzungen gegeben, verspricht der Hersteller eine Genauigkeit von ca. 3 cm.

Die Einstellungen der Sensoren erfolgen am Feld über der Kulturreihe oder dem Damm stehend. Die Parameter müssen also stets vor Ort angeglichen werden. Wenn die Einstellungen abgeschlossen sind, arbeitet das System unter der Voraussetzung, dass eine scharfe Abgrenzung möglich ist, extrem präzise und zuverlässig.

Bei Wendevorgängen muss das System per Knopfdruck pausiert werden. Eine Abschaltung der Steuerung über den Geschwindigkeitsimpuls wie bei anderen Verschiebesystemen gibt es hier nicht.

3.2.2 SBGUIDANCE TWIN DISC Steuerung



Abbildung 14: SBG Steuerung an Dammhacktechnik

Die niederländische Firma RAVEN vertreibt neben ihren Lenksystemen und Precision Farming Produkten für Traktoren, auch ihr Steuerungssystem, die SBG Steuerung. Die Steuerung kann über einen Verschieberahmen oder über eine Gelenklenkung gestützt durch Lenkscheiben erfolgen.

Funktionsweise

Bei der SBGUIDANCE TWIN DISC Steuerung werden sowohl der Traktor, als auch das Gerät gesteuert. Die Position des Traktors und der Maschine wird jeweils mit einer eigenen GPS-Antenne gemessen und über einen Monitor gesteuert. Die Steuerung der Maschine erfolgt über robuste Lenkscheiben, die hinter der Maschine angebaut werden. Besonders auf Flächen am Hang verhindern die Lenkscheiben das Abdriften der Maschine. Maschine und Traktor arbeiten somit immer in einer exakten Linie.

Einsatzfenster, Genauigkeit und Praxiserfahrungen

Schon beim Anlegen von Dämmen für den Anbau von Karotten kann das System genutzt werden. So erfolgt eine sehr präzise Aussaat und erleichtert die nachfolgenden Hackvorgänge. Die Umbauarbeiten von einem auf das nächste Gerät dauern etwas länger.

3.3 Selektive Hacktechnik

Schon länger im Gemüsebau vertreten sind die selektiven Hacksysteme. Neben den starren Werkzeugen, die zwischen den Reihen arbeiten, werden auch direkt angetriebene Werkzeuge für die Unkrautkontrolle innerhalb der Pflanzenreihe verwendet. Mittels Kamerasystemen können somit zum einen die Pflanzenreihe zur optimalen Spurführung, als auch eine direkte Pflanzenerkennung erfolgen. Durch die Erkennung der Pflanzenposition kann direkt um die Kulturpflanze gearbeitet werden.

3.3.1 Robovator



Abbildung 15: Robovator

Funktionsweise

Über jeder Pflanzenreihe sind Kameras installiert. Diese schauen von oben auf die Kulturpflanze. Aufgenommen werden grüne Pixel und über Infrarotstrahlung kann zwischen dem Boden und lebender Masse unterschieden werden. Die Erkennung der Kulturpflanze erfolgt über den eingegebenen Pflanzabstand und die aufgenommenen Bilder. Für eine erfolgreiche Erkennung muss das Unkraut kleiner als die Kulturpflanze sein, zudem darf die Kulturpflanze nicht die Nachbarpflanze berühren.

Einsatzfenster, Genauigkeit und Praxiserfahrungen

Voraussetzung für eine sehr genaue Erkennung ist die gleichmäßige Größe der Kulturpflanzen. Gepflanzte Kulturen erfüllen diese Voraussetzung meist besser, als gesäte Kulturen.

Zur Nutzung der Maschine muss der Anwender gut auf die Technik geschult sein. In Betrieben, die den Robovator nutzen, kam es schon häufiger zu Mitarbeiterwechseln, wodurch immer wieder eine neue Schulung erforderlich war. Zum Einstellen der Maschine sind in neuen Beständen oder beim Wechseln auf eine andere Kultur immer zwei Personen notwendig.

3.3.2 Robocrop

Die Firma Garford entwickelte neben ihrem Steuerungssystem in Reihenkulturen auch ein selektives Hackgerät.



Abbildung 16: Selektives Hacksystem Robocrop

Funktionsweise

Sichelscheiben bearbeiten die Fläche innerhalb der Reihe, hierbei arbeiten sie mit kreisenden Bewegungen um die Pflanze herum. Zur Reihenführung wird eine Kamerasteuerung die vor den Hackrahmen „schaut“ verwendet. Die Erkennung der Einzelpflanzen in der Reihe geschieht über Kameras direkt oberhalb der Reihen und durch Angabe von Pflanzabstand und Pflanzengröße im System.

Einsatzfenster, Genauigkeit und Praxiserfahrungen

Für die genaue Arbeit auf dem Acker müssen die Unkräuter kleiner als die Kulturpflanze sein. Außerdem wird ein gutes Arbeitsergebnis am besten bei gleichmäßig großen Kulturpflanzen erreicht.

3.3.3 Steketee IC InRow Weeder

Auch die holländische Firma Steketee vertreibt mit ihrem IC-Weeder ein selektives Hacksystem.



Abbildung 17: Steketee IC - Weeder

Funktionsweise

Um unabhängig von der Sonneneinstrahlung arbeiten zu können, sind die Kameramodule mit LED Beleuchtung in einem lichtgeschützten Kasten verbaut. Oberhalb jeder Pflanzenreihe sind Kameras installiert, die die Kulturpflanze anhand ihrer Farbe Grün (Rot wäre mit anderen Kameras auch möglich) erkennen können. Zusammen mit den Kameradaten, dem angegebenen Pflanzabstand und der Pflanzengröße, können die Kulturpflanzen genau erkannt werden.

Die Unkräuter in der Reihe werden über Sichelmesser reguliert. Ausgelöst wird die Bewegung durch Luftdruck.

Einsatzfenster, Genauigkeit und Praxiserfahrungen

In Zuckerrüben ist das perfekte Einsatzfenster bei einem Entwicklungsstadium der Rübe im Zwei- bis Vierblattstadium gegeben. Das System arbeitet mit einer Vorfahrtgeschwindigkeit von 3 km/h, bei besten Verhältnissen ist eine Geschwindigkeit von 5 km/h möglich.

3.3.4 Ferrari Remoweed

Der italienische Hersteller Ferrari Costruzioni Meccaniche S.r.l. verkauft das automatische Hackgerät REMOWEED auf dem europäischen Markt.



Abbildung 18: Selektives Hacksystem Remoweed der Firma Ferrari

Funktionsweise

Der Bereich zwischen den Reihen sowie der Bereich innerhalb der Reihen wird bearbeitet. Zur Steuerung müssen Reihenbreite, Abstand der Pflanzen in der Reihe sowie die Pflanzengröße angegeben werden. Mithilfe von Infrarotlichtschranken kann in jedem Element während der Fahrt gemessen werden, ob eine Pflanze am berechneten Punkt vorhanden ist oder nicht. Als Werkzeuge in der Reihe arbeiten hydraulisch bewegte Zinken.

4 Versuche

Von 2015 – 2018 wurden Versuche in den Kulturen Rote Bete und Karotten, sowie Zuckerrüben durchgeführt. Alle Versuche fanden auf Praxisbetrieben im Umkreis von Würzburg statt.

4.1 Versuchsjahr 2016

Im Jahr 2016 wurden Versuche auf sechs Projektbetrieben angelegt. Alle Betriebe lagen im Umland von Würzburg und produzierten nach Bio-Richtlinien. Die drei Standorte im Norden lagen in den Gemeinden Waigolshausen, Arnstein-Gänheim und Hausen bei Würzburg. Auf diesen Standorten wurden ausschließlich Versuche in Roter Bete durchgeführt. Im Süden von Würzburg wurden in Remlingen, Bütthard und Oesfeld Versuche in Karotten und Roter Bete angelegt.

Betriebsüblich arbeiten zwei der Betriebe mit Hacktechnik auf 6 m Arbeitsbreite im Frontanbau, zwei Betriebe mit Hacktechnik angebaut im Zwischenachsbereich. Hier werden Maschinen auf 3 und 6 m Arbeitsbreite eingesetzt. Zwei Betriebe arbeiten mit Lenksystemen und dem Anbau von Hacktechnik im Heck.

4.1.1 Versuchsaufbau

Auf den Versuchsflächen im Norden wurden auf jedem Versuchsstandort Versuche in Roter Bete angelegt. Gehackt wurde hier mit einer 12-reihigen Zuckerrübenhacke (50 cm Reihenabstand), die durch die unterschiedlichen Steuerungssysteme gesteuert wurde.

Im Süden wurden auf zwei Standorten Rote Bete Versuche angelegt. Diese wurden auch mit der 12-reihigen Rübenhacke gehackt. Zusätzlich kam hier noch der Verschieberahmen mit der Trimble RTK-Steuerung hinzu. Auf allen drei Standorten im Süden wurden Versuche in Karotten als Dammkultur angelegt. Alle in diesem Jahr verwendeten Steuerungssysteme kamen zusammen mit einer Dammhacktechnik zum Einsatz.

Nord	Süd
Claas Kamerasystem	Claas Kamerasystem
Reichhardt GPS-RTK	Reichhardt GPS-RTK
Reichhardt Ultraschall	Reichhardt Ultraschall
	Trimble/Geo-konzept RTK-Steuerung

Um unterschiedliche Gegebenheiten auf den Versuchsfeldern zu erreichen wurden unterschiedliche Standorte gewählt. Folgende Eigenschaften der Versuchsfelder waren gegeben:

Standort	Eigenschaften
Nord:	
Gänheim	Fläche mit Seitenhang, hoher Steinanteil, hoher Unkrautdruck Bodenart: schluffiger Lehm
Waigolshausen	Fläche mit Seitenhang Bodenart: schluffig toniger Lehm
Hausen bei Würzburg	Ebene Fläche Bodenart: schluffiger Lehm
Süd:	
Remlingen	Zwei Versuchsfelder: eine mit starkem Seitenhang, eine ebene Fläche; Versuchsfeld wurde beregnet Bodenart: schluffig toniger Lehm
Bütthard	Ebene Versuchsfeld, geringer Unkrautdruck, Umstellungsfläche Bodenart: schluffig toniger Lehm
Oesfeld	Ebene Fläche, starker Distelbesatz Bodenart: lehmiger Schluff

4.1.2 Versuchsdurchführung

Unmittelbar vor der mechanischen Bearbeitung und 3 – 4 Tage nach der Bearbeitung wurden die Anzahl der Roten Bete und der Unkräuter gezählt. Hierzu wurden Boniturraster auf der Versuchsfeld festgelegt und bei jeder Auszählung genutzt. Bei der Bonitur wurde zwischen Unkräutern in der Reihe und Unkräutern zwischen den Reihen unterschieden. Aus diesem Grund wurde ein eigener Boniturraster für eine Boniturfeld von 0,5 m² gebaut. Hierdurch fielen immer zwei Kulturreihen in die Feld des Rasters und konnten zusammen bonitiert werden.

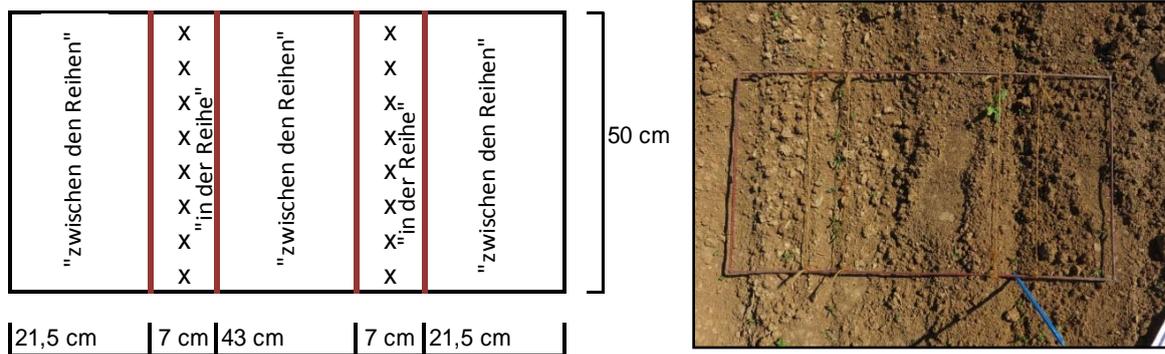


Abbildung 19: Selbst gebauter Boniturrahmen zur Unterscheidung der Boniturflächen "in der Reihe" und "zwischen den Reihen"

4.1.3 Ergebnisse

Rote Bete

Die Aussaat der Roten Bete Flächen fand am 20./21. April statt. Im Folgenden konnte auf fast allen Flächen ein guter Feldaufgang beobachtet werden. Nur die Rote Bete am Standort Waigolshausen lief sowohl im Versuch, als auch in der betriebsüblichen Variante auf derselben Fläche nicht auf. Eine Ursache konnte nicht festgestellt werden. Der Standort Waigolshausen stand somit nicht mehr für den Versuch zu Verfügung.

Der erste Hackdurchgang fand bei der Fläche in Bütthard am 3. Juni, 6 Wochen nach der Aussaat, statt. Alle anderen Flächen wurden am 6./7. Juni das erste Mal gehackt. Aufgrund der geringen Unkrautdichte war ein früheres Hacken auf den Flächen in Hausen und Bütthard nicht notwendig. Die Versuchsflächen in Gänheim und Oesfeld wurden in den betriebsüblichen Varianten schon rund drei Wochen früher das erste Mal gehackt. Der starke Disteldruck in Oesfeld war zu diesem Zeitpunkt nicht mehr in den Griff zu bekommen. Allgemein befand sich die Rote Bete im 4-Blattstadium (BBCH 14) beim ersten Hackdurchgang (Abb.).



Abbildung 20: Erster Hackdurchgang, Hausen, 07.06.2016

Die Claas Kamerasteuerung erkannte zu diesem Zeitpunkt alle Reihen und konnte gut eingesetzt werden. An der hängigen Fläche in Gänheim konnte der Querverschieberahmen der Kamerasteuerung den Hang nicht ausgleichen. Einige Meter im Bestand wurden herausgehackt. Die Ultraschallsteuerung konnte auf keiner der Flächen eingesetzt werden, da die Pflanzen zu diesem Zeitpunkt noch zu klein waren. Mit dem Reichardt GPS-RTK und dem Geo-konzept GPS-RTK konnte an fast allen Standorten gut gearbeitet werden. Nur am Standort Gänheim, der ein Grenzstandort für ein gut erreichbares RTK Signal ist, konnte der Verschieberahmen nicht eingesetzt werden.

Der zweite Hackdurchgang fand auf allen Flächen am 22./23. Juni statt. Die Rote Bete erreichte das 8-12-Blattstadium (Abb.).



Abbildung 21: 2. Hackdurchgang, Hausen, 22.06.2016

Die dritte maschinelle Durchfahrt fand am 4. Juli auf allen Standorten statt. Das GPS-RTK und Ultraschallsystem konnte in Gänheim wieder nicht eingesetzt werden. Grund hierfür waren Schwierigkeiten beim Empfang des Korrektursignales beim GPS-RTK. An den anderen Standorten konnte mit allen Systemen gearbeitet werden. Nur in Hausen gab es bei der letzten Durchfahrt vereinzelt Aussetzer, die die Arbeit etwas verzögert hat. Aufgrund des hohen Unkrautdrucks musste eine 4. Durchfahrt am 11. Juli auf der Fläche in Oesfeld durchgeführt werden.

4.2 Versuchsjahr 2017

Um alle Versuche zentraler im Blick zu haben und die weiten Fahrstrecken einzuschränken, wurden ausschließlich Versuchsstandorte in die Region im Süden von Würzburg gesucht. Auf Flächen in Bütthard und Oesfeld entstanden Versuche in Roter Bete und Karotten. Zusätzlich zu den Exaktversuchen zur Überprüfung der Technik in unterschiedlichen Gegebenheiten, wurden größere Flächen zur Aufnahme der exakten Arbeitszeit angelegt. Für Arbeitszeitstudien wurden zudem noch die Kulturen Zuckerrübe und Ackerbohne auf größeren Schlägen ausgesät.

4.2.1 Technikversuche

Versuchsaufbau

Eine Versuchsfläche in Bütthard mit einem Anteil an Hangfläche, sowie einem Anteil an ebener Fläche, wurde für den exakten Vergleich der unterschiedlichen Steuerungssysteme geplant. Hierbei wurden zwei Versuchsblöcke mit kleineren vollständig randomisierten Blockanlagen, einmal am Hang und einmal auf der Ebene angelegt. Flächen für die Tastversuche in der Dammkultur Karotten befanden sich auf derselben Fläche.



Abbildung 22: Versuchsfläche in Bütthard nach der Aussaat der Roten Bete

Folgende Steuerungssysteme kamen bei den Versuchen 2017 zum Einsatz:

Rote Bete	Karotten
Claas Kamerasteuerung	K.U.L.T. Vision Control
Reichhardt GPS-RTK	
Reichhardt Ultraschall	Bei der Aussaat: GPS-RTK und Sonic
Schmotzer Kamerasteuerung	
Handlenkung	
Frontanbau	

Rote Bete

Zehn unterschiedliche Varianten wurden für die zwei Exaktversuche (Hangfläche und ebene Fläche) aufgestellt.

Variante	vor dem Auflaufen	1. Durchfahrt nach dem Auflaufen	2. Durchfahrt nach dem Auflaufen	3. Durchfahrt nach dem Auflaufen
1	unbehandelte Kontrolle			
2		GPS-RTK	GPS-RTK	GPS-RTK
3	GPS-RTK	GPS-RTK	GPS-RTK	GPS-RTK
4		Furche + Ultraschall	Ultraschall	Ultraschall
5	Furche + Ultraschall	Furche + Ultraschall	Ultraschall	Ultraschall
6		Claas-Kamera	Claas-Kamera	Claas-Kamera
7		Schmotzer-Kamera	Schmotzer-Kamera	Schmotzer-Kamera
8		Kamera	Kamera + Fingerhacke	Kamera + Fingerhacke
9		Frontanbau	Frontanbau	Frontanbau

Neu hinzugekommen im Vergleich zum Vorjahr ist die Kamerasteuerung der Firma Schmotzer. Der Einsatz von Hacktechnik im Frontanbau wurde nicht nur in der betriebsüblichen Variante beobachtet, dieses System kam auch auf der Versuchsfläche zum Einsatz. Zusätzlich wurden in einer kameragesteuerten Variante Fingerhacken bei den späteren Durchgängen verwendet. Um den möglichen Einsatz von GPS-RTK Technik im Voraufbau zu testen, wurden Varianten mit Durchfahrten im Voraufbau angelegt. Da im Vorjahr das Ultraschallsystem in den ersten Durchfahrten nicht funktioniert hat, wurde bei der Aussaat eine Furche gezogen, entlang derer das Ultraschallsystem eine Orientierungsspur finden sollte.

Eine weitere Fläche zur Untersuchung der Nutzung der unterschiedlichen Systeme zu bekommen, wurde eine weitere Fläche im Gemeindegebiet Oesfeld in der Kultur Rote Bete angelegt.

Die Steuerung der Kamerasysteme erfolgte an der 12-reihigen Hacktechnik über das Verschiebesystem AV 5 der Firma Schmotzer.

Durchführung

Die Aussaat der Roten Bete Flächen erfolgte am 07.04.2017. Um die Nutzung des Reichardt Sonic Systems beim ersten Hackdurchgang auszuprobieren, wurden kleine Schare an die Sämaschine angebracht, die Rillen in den Boden ziehen sollten.

Entlang dieser Rille sollte dann das Ultraschallsystem steuern. Aufgrund der Bodenstruktur und Arbeitsqualität konnte jedoch keine ausreichende Rille im Boden gezogen werden, sodass diese vom Ultraschallsystem nicht als Orientierung genutzt werden konnte.



Abbildung 23: Aussaat Rote Bete in Bütthard am 07.04.2017

Ein weiterer Versuch, in zwei Reihen schnell wachsende Radies einzusäen, zeigte sich auch nicht erfolgsversprechend. Das Ultraschallsystem konnte somit wieder nur beim zweiten Hackdurchgang verwendet werden.

Der erste Hackdurchgang aller Systeme erfolgte am 17./18.05.2018. Die Rote Bete hatte zu diesem Zeitpunkt das Vierblattstadium erreicht. Beim ersten Einsatz der Systeme konnte neben dem Ultraschallsystem auch das Schmotzer Kamerasystem Okio nicht verwendet werden. Im Mittelwert über die gesamte Versuchsfläche wurde eine Unkrautdichte von 8-10 Unkräutern pro m² ausgezählt. Grund hierfür war vor allem die frisch auf biologische Arbeitsweise umgestellte Fläche.



Abbildung 24: Versuchsfläche am 17.05.2017 vor dem ersten Hackdurchgang

Vor dem zweiten Hackdurchgang am 01.06.2017 wurde eine höhere Unkrautdichte bonitiert. Vor allem der höhere Besatz von Schwarzem Nachtschatten (*Solanum nigrum*) und Franzosenkraut (*Galinsoga parviflora*) führten zu einer durchschnittlichen Unkrautdichte von 36 Pflanzen pro m². Alle aufgelaufenen Unkräuter zwischen den Reihen konnten mit den Gänsefußscharen gut kontrolliert werden. Auch in der Reihe wurden die Unkräuter reduziert. Jedoch blieb eine Restverunkrautung in der Reihe übrig, wodurch ein Handjätedurchgang in allen Varianten erforderlich war. Aufgrund der unterschiedlichen Breite des Hackbandes von 7 cm in automatisch gesteuerten Varianten und 12 cm mit der Fronthacke, war ein erhöhter Arbeitseinsatz in den Varianten, die mit der Fronthacke gehackt wurden, notwendig.

Karotten

Im Jahr 2017 wurden auch Karotten als Dammkulturen angelegt. Hierbei wurden eine Fläche am Hang und eine Fläche auf der Ebene ausgesucht. Die Dämme wurden am 26.04.2017 mithilfe des Reichardt GPS-RTK gefräst. Um die genaue Mitte der Dämme exakt zu erfassen, wurde die Empfängerhülle des GPS-RTK Verschieberahmen auf die Dammfräse umgebaut. Am 17.05.2017 wurden die Karotten, dann mit Hilfe des Steuerungssystems auf die Dämme gesät. Durch das Umsetzen der Empfängerhülle beim Fräsen konnten nun exakt auf der Dammmitte die Karotten ausgesät werden.

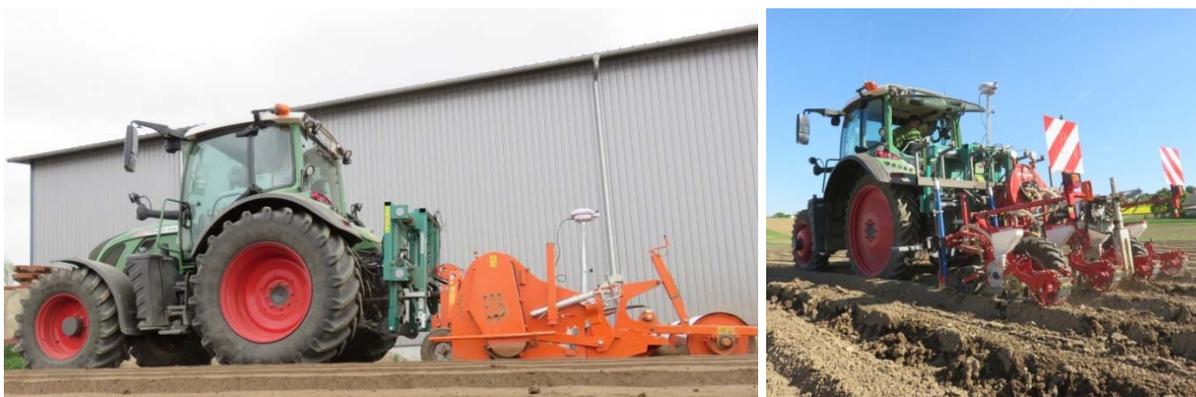


Abbildung 25: Fräsen der Dämme (links), Aussaat der Karotten (rechts)

Vermutlich durch die schlechte Wasserversorgung liefen die Karotten auf der Fläche am Hang nicht auf. Für die Versuche waren somit nur die Flächen auf der Ebene verfügbar. Die Versuchsfläche wurde am 08.06.2017 gehackt.

Beim ersten Durchgang wurden mit Hilfe der Duoparallelogramme die Dämme teilweise abgetragen und somit die Unkräuter reguliert.



Abbildung 26: Einsatz der Duoparallelogramme an den Karottendämmen

Die Erkennung und Steuerung entlang der Kulturpflanzen erfolgte mit Hilfe des Vision Control Systems der Firma K.U.L.T. Die relativ feinen Karottenpflanzen konnten nach genauer Einstellung des Systems sehr gut erkannt werden. Auch die Feinsteuerung des Systems reagierte sehr schnell und präzise.



Abbildung 27: Größe der Karottenpflanzen beim ersten Einsatz des Vision Control Systems

Nach dem Abtragen der Dammflanken wurden die Dämme nach ein paar Tagen wieder angehäufelt.

4.2.2 Zeitversuche

Zur genauen Beobachtung des Einsatzes der Hacktechnik in der Praxis, wurden exakte Arbeitszeiten aufgenommen. Für alle zusammen mit der Rübenhacke verwendeten Systeme wurden in Roter Bete, Zuckerrüben und Ackerbohnen Fahrspuren angelegt. Hierbei waren es immer mindestens drei Spuren pro Gerät und Technik, um mindestens zwei Wendevorgänge mit aufzunehmen. Folgende Parameter wurden gemessen:

Tabelle 1: Einteilung der Arbeitsvorgänge beim Hacken mit Steuerungssystemen

Parameter	Definition
Rüstzeit	Anhängen der Hacktechnik zusammen mit den Steuerungssystemen (in Tabelle 2 genauer definiert)
Einsetzen in den Bestand	Zeitraum, wenn der Fahrer mit dem Schlepper in der neuen Spur steht und sich um das Einsetzen der Maschine kümmert
Fahrzeit	Zeitraum vom Losfahren bis zum Stehenbleiben oder Ausheben am anderen Ende
Fahrgeschwindigkeit	Geschwindigkeit während der Fahrzeit
Wendezeit	Zeitraum des Herausfahrens aus der Spur bis wieder in die Spur reingefahren wurde

Tabelle 2: Einteilung der Rüstzeiten in sechs Arbeitsvorgänge

Nr.	Arbeitsschritt
1	Rückwärts 10 m an den Verschieberahmen heranfahren und die mechanischen, elektrischen Kabel- und Ölverbindung herstellen
2	Elektrische Verbindung mit dem Verschieberahmen herstellen, Display aufbauen und anstöpseln
3	Rückwärts 10 m an das Arbeitsgerät (12-reihiges Hackgerät) heranfahren und die mechanische, elektrische Kabel- und Ölverbindungen herstellen.
4	Am Feld Arbeitsgerät ausklappen und Steuerungssystem hochfahren
5	Abgefragte Parameter (z.B. Pflanzengröße) auf dem Feld aufnehmen
6	Systemspezifische Einstellungen (z.B. RTK-Kuppelhöhe anpassen, Kameraneigung, Ultraschallsensoren ausrichten)

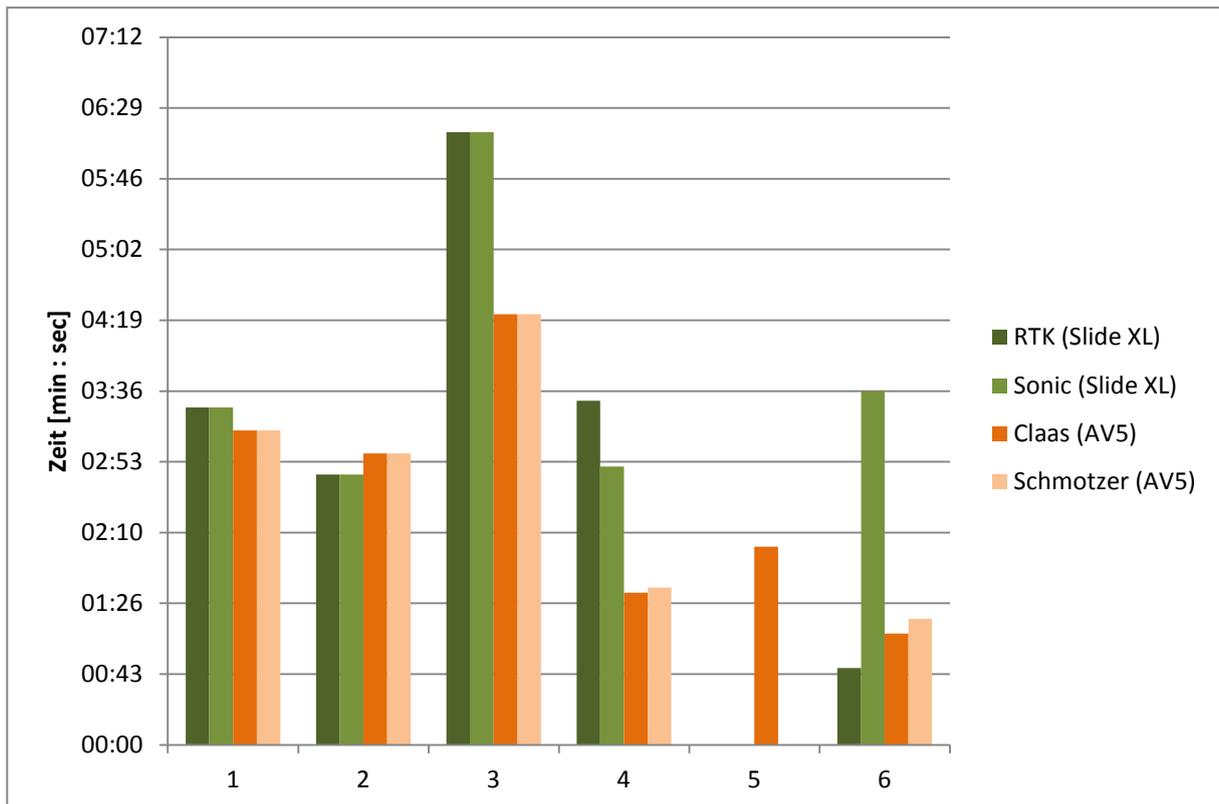


Abbildung 28: Rüstzeiten der vier Steuerungssysteme eingeteilt nach den benötigten Zeiten für die sechs unterschiedlichen Arbeitsvorgänge (siehe Tabelle)

Auf zwei unterschiedlichen Flächen wurde Rote Bete angebaut. Auf der ersten Fläche in der Gemarkung Vilchband wurden folgende Systeme eingesetzt: Fronthacke, Claas- und Schmotzerkamera, Reichardt GPS-RTK und Sonic. Gefahren wurde bei jedem System mit einer Geschwindigkeit von 5 km/h bei einem Entwicklungsstadium von BBCH 16 in der Roten Bete. Die Ergebnisse der Durchfahrten vom 27.05.2017 und 05.06.2017 sind in den folgenden Abbildungen zusammengefasst.

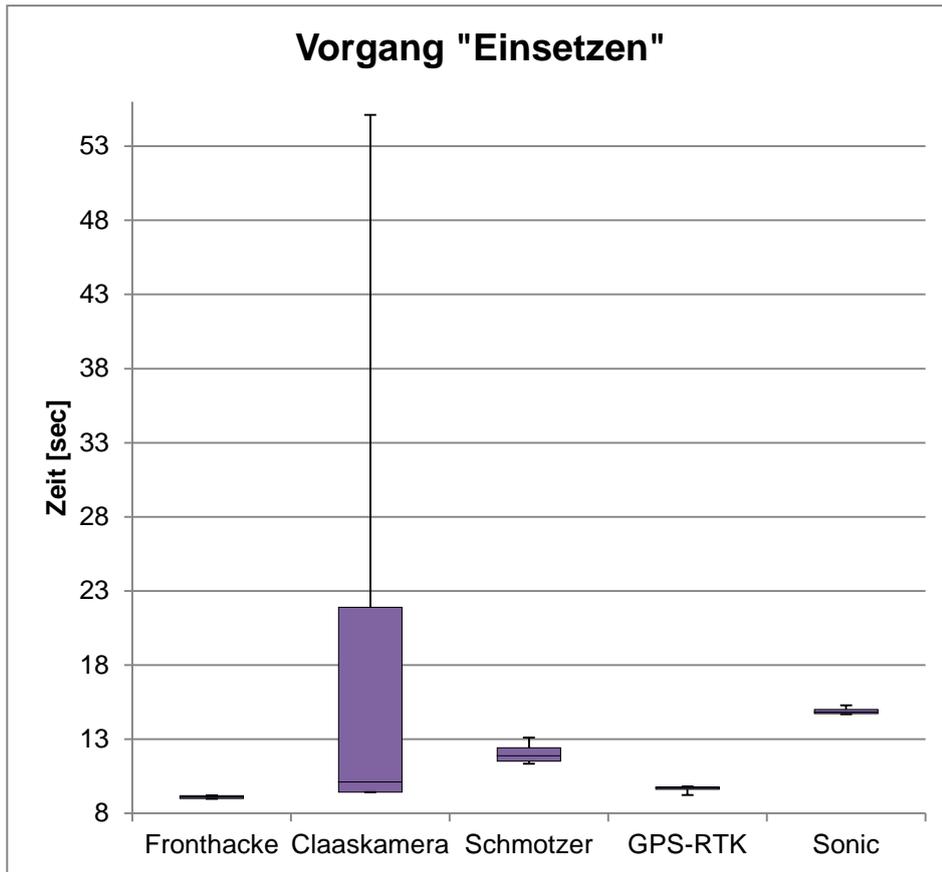


Abbildung 29: Ergebnisse der Datenaufnahme beim Vorgang "Einsetzen" auf der Rote Bete Fläche in Vilchband am 27.05.2017 (Frontanbau und Claaskamera) und 05.06.2017 (Schmotzer Okio und Reichhardt GPS-RTK & Sonic)

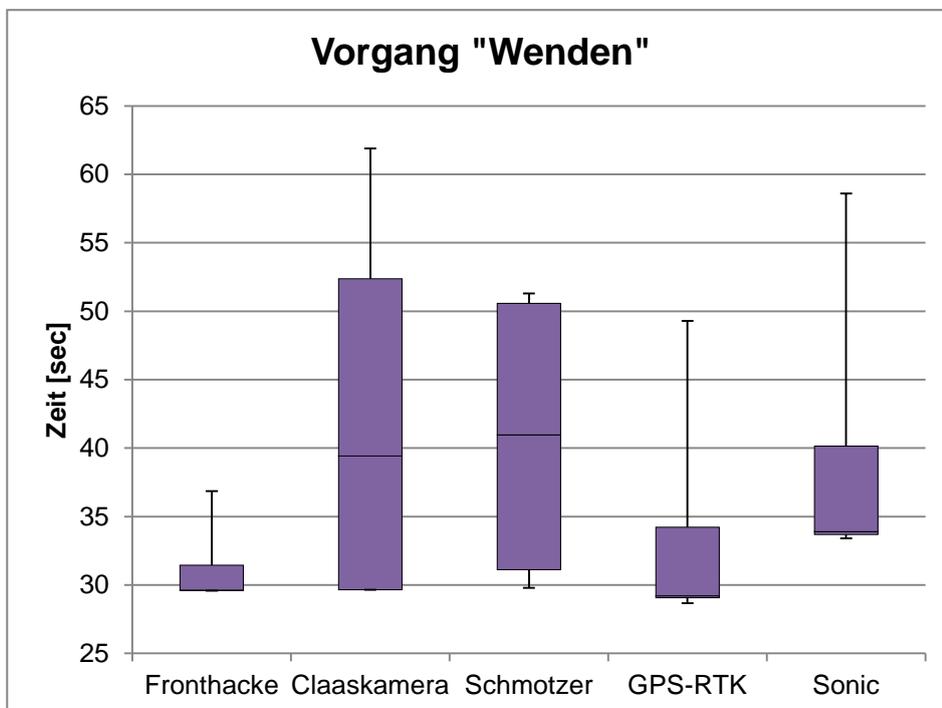


Abbildung 30: Ergebnisse der Datenaufnahme beim Vorgang "Wenden" auf der Rote Bete Fläche in Vilchband am 27.05.2017 (Frontanbau und Claaskamera) und 05.06.2017 (Schmotzer Okio und Reichhardt GPS-RTK & Sonic)

Für den Vorgang „Einsetzen“ wurde bei dem Ultraschallsystem im Durchschnitt am meisten Zeit benötigt. Durch eine Störung beim Einsetzen der Claaskamera kam es zu einem großen Ausreißer, was durch die anderen Messwerte nicht bestätigt werden konnte. Beim Wenden benötigte der Fahrer im Durchschnitt 10 Sekunden länger mit den Kamerasystem im Vergleich zu den anderen Systemen.

Die zweite Rote Bete Fläche war in Oesfeld. Hier wurden nur die Systeme Reichhardt GPS-RTK, Claas- und Schmotzerkamera am 07.06.2017 eingesetzt.

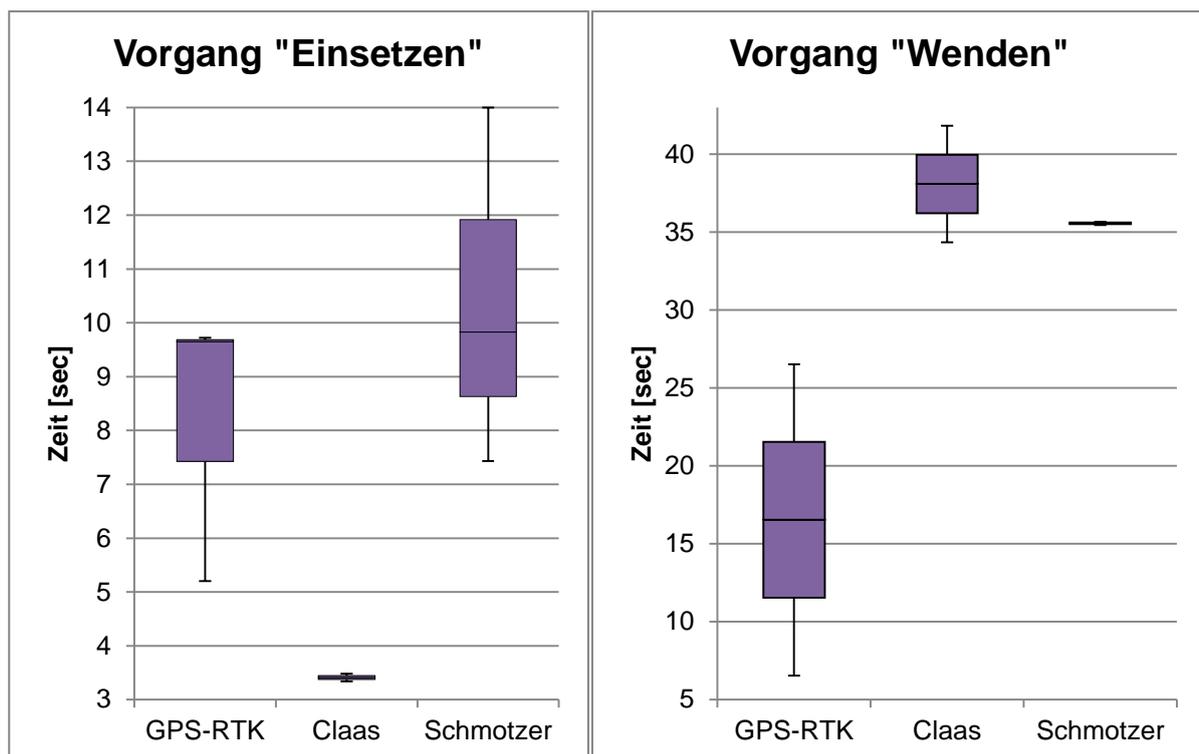


Abbildung 31: Ergebnisse der Datenaufnahme bei den Vorgängen „Einsetzen“ (links) und "Wenden"(rechts) auf der Rote Bete Fläche in Oesfeld am 18.05.2017 (Reichhardt GPS-RTK) und 07.06.2017 (Schmotzer Okio- und Claaskamera)

Auch auf der zweiten Roten Bete Fläche wurden beim Wenden eine längere Zeit im Vergleich zum GPS-RTK System benötigt. Das Einsetzen war mit der Claaskamera sehr schnell möglich.

Um eine größere Variationsbreite der Kulturen zu bekommen, wurden auch Versuche in Ackerbohnen angelegt. Zu zwei Zeitpunkten (1. und 2. Hackdurchgang) wurden hier alle Systeme getestet.

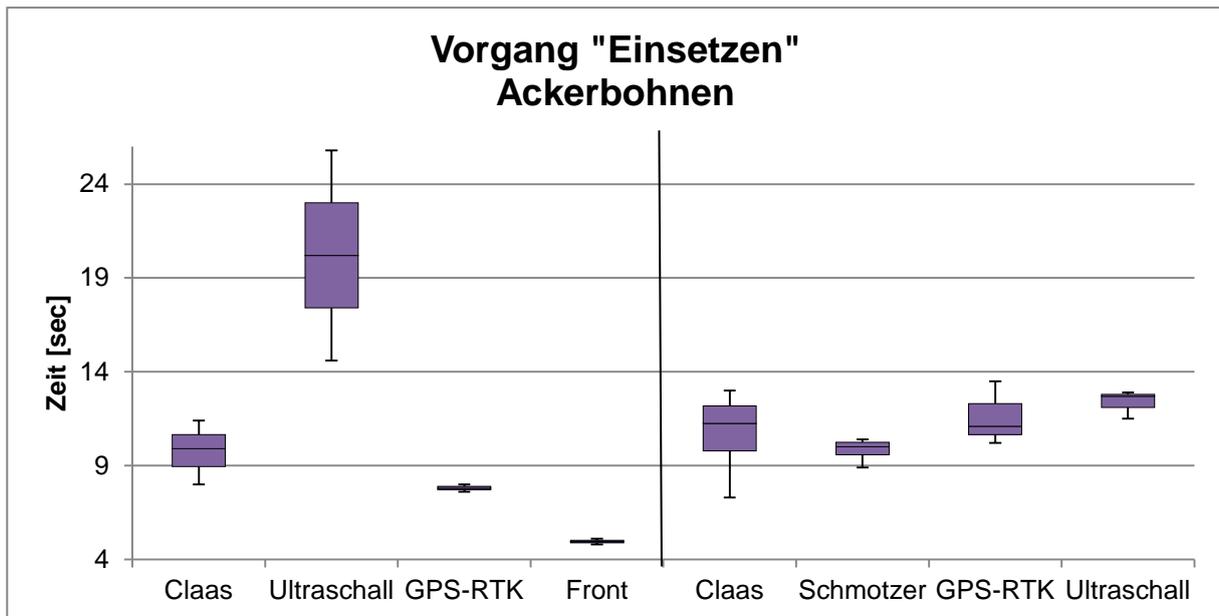


Abbildung 32: Ergebnisse der Datenaufnahme beim Vorgang "Einsetzen" auf der Ackerbohnen Fläche beim ersten Hackdurchgang (links, 23.05.2017) und beim zweiten Durchgang (rechts, 01.-06.06.2017)

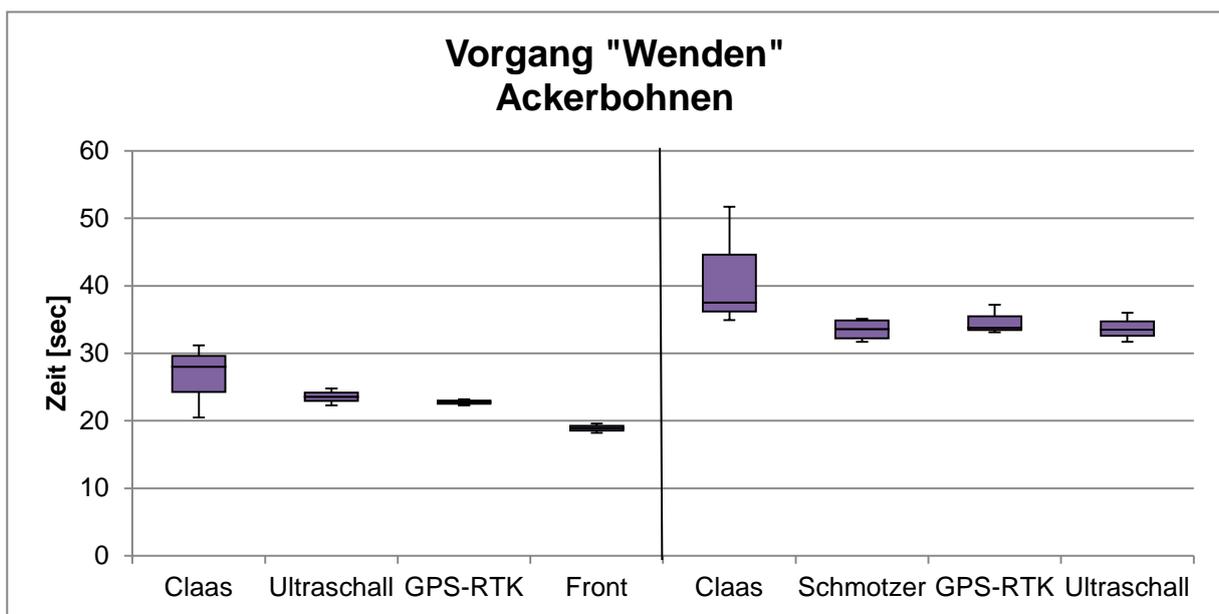


Abbildung 33: Ergebnisse der Datenaufnahme beim Vorgang "Wenden" auf der Ackerbohnen Fläche beim ersten Hackdurchgang (links, 23.05.2017) und beim zweiten Durchgang (rechts, 01.-06.06.2017)

Lange Zeiten zum Einstellen beim Ultraschallsystem waren beim ersten Einsatz der Systeme auffällig. Die Wendevorgänge benötigten beim zweiten Durchgang mehr Zeit als beim ersten Durchgang.

Zusammenfassend ist zu sagen, dass die Kamerasysteme im Allgemeinen mehr Zeit beim Einsetzen der Systeme benötigen. Der Fahrer muss immer noch kontrollieren, ob die Kamera die Reihe erkannt hat und eventuell nachjustieren. Mit dem GPS-RTK konnten die schnellsten Wendevorgänge erreicht werden. Fährt der Fahrer jedoch

mit GPS-RTK auf dem Schlepper und überlässt die Feinsteuerung der Kamertechnik, können auch sehr gut Wendevorgänge, durch die Unterstützung des GPS-RTK auf dem Schlepper, erreicht werden. Schwierigkeiten entstanden immer beim Einsatz des Ultraschallsystemes. Die Einstellungen des Sonics auf immer unterschiedlich große Säkulturen nahm relativ viel Zeit in Anspruch.

4.3 Versuchsjahr 2018

Im Versuchsjahr 2018 wurden ausschließlich Versuche in Roter Bete und in Zuckerrüben gemacht.

4.3.1 Versuchsaufbau

An zwei Standorten in Euerhausen und Messelhausen wurden Versuche angelegt.

Standort	Eigenschaften
Euerhausen	Ebene Fläche Sehr geringer Unkrautdruck Vorfrüchte: Winterroggen (2013), Zuckerrübe (2014), Winterweizen (2015), Ackerbohne (2016), Triticale (2017), Rote Bete/ Zuckerrübe (2018) Umstellungsfläche: seit 2015 Bodenart: toniger Lehm
Messelhausen	Fläche mit Seitenhang Leicht erhöhter Unkrautdruck

In Euerhausen fanden Versuche in Roter Bete und Zuckerrüben, in Messelhausen nur in Roter Bete statt. Die unterschiedlichen Systeme sollten unter Extrembedingungen getestet werden. Hierzu wurden in Euerhausen zu unterschiedlichen Zeitpunkten durch Einsaaten von Senf und Wicke die Unkrautdichte erhöht. Zudem wurde auf die Reaktion der Systeme auf größere Lücken im Bestand geachtet. Um den ersten Einsatzzeitpunkt zu ermitteln, wurde zu einem möglichst frühen Zeitpunkt mit dem ersten Durchgang gestartet. Auf der Versuchsfläche in Messelhausen kamen auch wieder alle Systeme zum Einsatz. Der Versuch wurde auf einer Fläche mit Hangneigung angelegt.

4.3.2 Versuchsdurchführung

Euerhausen:

Die Aussaat der Roten Bete in Euerhausen erfolgte am 19.04.2018. Um die Unkrautdichte für den ersten Hackdurchgang zu erhöhen, wurden am 26.04.2018 Einsaaten mit Ackersenf und Wicke durchgeführt. Durch die geringen Niederschläge liefen kaum Samen der Einsaaten auf, wodurch zu dem eh schon geringen Unkrautbesatz die Unkrautdichte nicht erhöht werden konnte. Der erste Hackdurchgang erfolgte am 08./09.05.2018, 19 Tage nach der Aussaat. Auf der Versuchsfläche wurden noch zwei weite Durchgänge am 23./24.05.2018 und am

29.05.2018 gehackt. Ein Handjätedurchgang wurde am 07.06.2018 auf der Fläche gemacht.

Messelhausen:

Auf der Fläche in Messelhausen wurde am 19.04.2018 die Rote Bete gesät. Hier wurden keine Einsaaten auf der Versuchsfläche durchgeführt. Auch auf dieser Fläche wurde analog zur Fläche in Euerhausen drei Mal zu folgenden Terminen gehackt: 08./09.05.2018, 23./24.05.2018, 29.05.2018. Um die Wirkung von Winkelmessern auszuprobieren, wurde hier eine Variante mit Winkelmessern im Vergleich zu den sonst im Versuch üblichen Gänsefußscharen ausprobiert.

Das Jahr 2018 war ein sehr trockenes Jahr, was sich deutlich auf die Unkrautdichte auf den Äckern auswirkte. Bis Ende September 2018 wurde an der Wetterstation der LfL in Euerhausen ein Gesamtniederschlag von 362,3 mm gemessen. Im Vorjahr wurden 625,5 mm (541,4 mm in 2016) Niederschlag bis Ende September an dieser Wetterstation erreicht.

4.3.3 Ergebnisse

Die Unkrautdichte war auf der Versuchsfläche insgesamt sehr niedrig. Vor dem ersten Hackdurchgang wurde im Mittelwert auf der Fläche in Euerhausen eine Unkrautdichte von 4,6 Unkräutern pro m² ausgezählt. Ausschlaggebend hierfür sind die geringen Niederschläge im Versuchsjahr und die erst kürzlich auf biologische Anbauweise umgestellte Fläche. Im Jahr 2018 wurden auf der Fläche in Euerhausen das erste Mal biologisch produzierte Waren geerntet.

Nach dem dritten Hackdurchgang konnten die Unkräuter auf 5-6 % der Unkrautdichte vor der ersten mechanischen Bearbeitung zwischen den Reihen reguliert werden. Im Bereich in der Reihe konnte kaum eine Verminderung der Unkrautdichte festgestellt werden. Über den Behandlungszeitraum hinweg stieg die Anzahl der Unkräuter in der Reihe an. Im Vergleich der gesteuerten Varianten zur Fronthacke konnten keine erhöhten Unkrautdichten bei der Fronthacke im Vergleich zu den anderen Varianten festgestellt werden, obwohl bei der Fronthacke mit einem deutlich weiteren Sicherheitsabstand zur Kulturpflanze gefahren wurde.

Der erste Einsatz in der Roten Bete und der Zuckerrübe war abhängig vom Entwicklungsstadium der Kulturpflanzen. Beide eingesetzten Kameras (Claas

Optitronic und Schmotzer Okio) konnten die Rote Bete zu einem ausreichenden Grad für eine exakte Steuerung 19 Tage nach der Saat erkennen. Die Rote Bete befand sich zu diesem Zeitpunkt im Zweiblattstadium. Der Versuch mit beiden Kamerasystemen zu diesem Zeitpunkt in der Zuckerrübe zu fahren scheiterte. Für den ersten Einsatz in der Zuckerrübe musste das Vierblattstadium abgewartet werden.



Abbildung 34: Entwicklungsstadium der Roten Bete und Zuckerrübe 19 Tage nach der Aussaat am 8.5.2018

Für das menschliche Auge ist die Steuerung entlang der Zuckerüben im Zweiblattstadium schon möglich. Jedoch ist das mit großer Anstrengung für die Steuerperson auf der Hacke verbunden.

Auf beiden Versuchsflächen konnte bei der Nutzung eines Steuerungssystems mit einem Abstand von 3,5 – 4 cm links und rechts von der Kulturpflanze gefahren werden.

In Messelhausen wurden beim dritten Hackdurchgang die Gänsefußschare mit Winkelmessern ausgetauscht. Das Ergebnis war ein noch exakterer Einsatz entlang der Kulturreihe.



Abbildung 35: Winkelmesser beim Einsatz in der Roten Bete

Oberirdisch konnte hier direkt die exakte Arbeit gesehen werden. In den folgenden Abbildungen werden links das Arbeitsergebnis mit den Winkelscharen und rechts das Arbeitsergebnis mit den Gänsefußscharen dargestellt. Auffällig ist der große obere unbearbeitete Bereich nach dem Einsatz der Gänsefußscharen (Abb. 31).



Abbildung 36: Hackerergebnis nach dem Einsatz der Winkelmesser (links) und der Gänsefußschare (rechts)

Auch Disteln konnten den Winkelmessern schlechter ausweichen. Wodurch der Bekämpfungserfolg derer im Vergleich zu den Gänsefußscharen besser war.

Um trotz der nicht gelungenen Einsaaten nochmal eine hohen Unkrautdichte zu simulieren, wurde auf einem Teilstück im „Blickfeld“ der Schmotzer Okio Kamera der komplette Boden mit Blättern der Süßkartoffel bedeckt.



Abbildung 37: Simulation von erhöhter Unkrautdichte durch das Hineinlegen von Süßkartoffelblätter in den Rote Bete Bestand

Für das menschliche Auge war die Unterscheidung der Roten Bete Reihe von den Blättern der Süßkartoffel nur schwer möglich. Die Kamera konnte ohne deutlichen Signalabfall sehr gut über diesen Teilbereich steuern.

5 Ökonomische Berechnungen

Mit dem Verzicht auf Herbizide macht die nicht-chemische Unkrautregulierung einen großen Anteil an den Produktionskosten von Gemüsekulturen aus. Neben der mehrmaligen mechanischen Bearbeitung der Fläche werden noch zusätzlich Handjätetestunden benötigt, um alle Unkräuter in der Kultur bekämpfen zu können. Mit Einführung des Mindestlohnes stiegen die Kosten für die Handjäte extrem an (Garming 2016). In Dammkulturen wie Karotten werden mit Handjätetestunden von 200 - 400 Akh/ha gerechnet (Fittje et al. 2015). Diesen Kostendruck gilt es mittels der mechanischen Bearbeitung zu minimieren. Hierbei muss vor allem Wert auf die Präzision gelegt werden. Bauermeister (2005) rät in dem Praxishandbuch Unkrautpraxis folgendes:

„Langsames Fahren für ein präzises Resultat macht sich schnell bezahlbar.“

Durch erhöhte Präzision kann ca. 1 cm näher an der Reihe gehackt werden woraus pro Hektar 5 Ar mehr bearbeitet werden. Daraus ergibt sich laut Bauermeister eine Einsparung von 10 - 30 Handjätetestunden pro Hektar. Auch Hege (2017) rechnet, bei einer Verkleinerung des Hackbandes um 1 cm, mit einer Einsparung von 10 Handjätetestunden pro Hektar.

Die Präzision spielt somit eine entscheidende Rolle bei der ökonomischen Betrachtung von Steuerungssystemen an Hacktechnik, da hiermit Einsparungen von Handjätetestunden erzielt werden können. Zur präzisen Arbeit ist mit dem Einsatz von Steuerungssystemen nicht mehr unbedingt eine geringe Arbeitsgeschwindigkeit (3 - 4 km/h) notwendig. Auch mit hohen Arbeitsgeschwindigkeiten, wie mit 8 – 12 km/h, können sehr exakte Arbeitsergebnisse erzielt werden. Die mögliche Erweiterung der Arbeitsbreite spielt zudem auch eine entscheidende Rolle.

Im Jahr 2017 wurden Angebote für Hacktechnik und Steuerungssystemen bei verschiedenen Hacktechnikherstellern angefordert. Folgende Investitionskosten kommen auf einen Betrieb zu:

Tabelle 3: Anschaffungspreise für Systeme verschiedener Hacktechnikhersteller, nicht vollständig, aus dem Jahr 2017

Hacksystem	Anschaffungspreis (brutto)
Schmotzersysteme	
Schmotzer Hacke 4 x 75 cm HAIII OE AV5 (Hackgerät mit 3 m Arbeitsbreite und Kamerasteuerung über 3D-Kamera und Parallelverschieberahmen AV5)	24.223 €
Schmotzer Hacke 12 x 50 cm HAII (Rübenhackgerät mit 6 m Arbeitsbreite ohne Kamerasteuerung)	17.978 €
Schmotzer Hacke 12 x 50 cm HAII OE AV5 (Rübenhackgerät mit 6 m Arbeitsbreite und Kamerasteuerung über 3D-Kamera und Parallelverschieberahmen AV5)	36.476 €
Schmotzer Hacke 4 x 75 cm HAIII (Hackgerät mit 3 m Arbeitsbreite ohne Kamerasteuerung)	8.016 €
Garfordsysteme	
Rübenhacke, 6-reihig, 50 cm Reihenabstand	11.968 €
Rübenhacke, 12-reihig, 50 cm Reihenabstand	25.452 €
Rübenhacke, 12-reihig, 50 cm Reihenabstand, Steuerungssystem über einen Mitfahrersitz	28.500 €
Rübenhacke, 12-reihig, 50 cm Reihenabstand, Steuerungssystem über Kamera (Robocrop)	48.250 €
Reichhardt Systeme	
PSR SLIDE RTK (Größe L, Anbaugerätelenkung über GPS-RTK System)	~ 22.000
PSR SLIDE SONIC (Größe L, Anbaugerätelenkung über Ultraschall)	

In vielen Bundesländern gibt es eine Förderung für die Anschaffung von Hacktechnik mit Steuerungssystemen. Hierbei werden, abhängig vom jeweiligen Land, ausschließlich einen Anteil am Steuerungssystem oder an der kompletten Hacktechnik gefördert. In Hessen beispielsweise werden Maschinen und Geräte zur Beikrautregulierung in Reihenkulturen, die eine exakte Geräteführung über Kamerasteuerung, GPS oder Ultraschall verfügen, als Ganzes gefördert. Voraussetzung ist allerdings, dass eine jährliche Mindestauslastung von 0,6 ha je 1000 € Anschaffungspreis im eigenen Betrieb oder zusammen mit einer Verpflichtungserklärung nachgewiesen werden kann. Die Maschinen werden mit einem Fördersatz von 20 % des Netto-Anschaffungspreises gefördert. Auch in Bayern ist eine Förderung im Rahmen des Bayerischen Sonderprogramms Landwirtschaft Digital (BaySL digital) für Digitale Hack- und Pflanzenschutztechnik zur Reduzierung des Pflanzenschutzmitteleinsatzes („1.000-Feldroboter-Programm“) ab dem 1. Oktober 2018 möglich.

Der Netto-Anschaffungspreis einer 12-reihigen Hackmaschine mit Kamerasteuerung und Verschiebesystem liegt bei der Firma Schmotzer bei ca. 31.000 €. Dementsprechend wird vom Land Hessen ein Zuschuss von 6 255 € gezahlt. Ein

interessierter Landwirt, der sich eine neue Hackmaschine kaufen will muss, mit der Förderung eingerechnet, noch 12 242 € dazu zahlen, um eine Kamerasteuerung zu bekommen.

5.1 Kosten der Unkrautkontrolle

Im Folgenden werden drei Arbeitsverfahren durchgerechnet. Zum einen der chemische Pflanzenschutz, dann die mechanische Unkrautregulierung mit einem Hackgerät im Frontanbau und mit der Nutzung von Hacktechnik mit Steuerungssystem im Heckenbau.

Für alle ökonomischen Berechnungen werden von einer Fläche von 5 ha, einer Entfernung vom Hof zum Feld von 1 km und einem Dieselpreis von 1 € ausgegangen. Die Maschinen- und Arbeitskosten werden über den KTBL Feldkostenrechner berechnet (KTBL).

5.1.1 Chemischer Pflanzenschutz

Beim chemischen Pflanzenschutz wird von vier Maßnahmen ausgegangen. Eine davon findet im Voraufbau statt, die anderen im Nachaufbau. Bei der Nutzung folgender Mittel wird von der Liste „Preise und Kosten für Betriebsmittel“ LfL (IBA) ausgegangen:

Tabelle 4: Kosten des Pflanzenschutzmitteleinsatzes nach Werten der LfL, Kosten für Pflanzenschutzmittel für das Frühjahr 2018

		Mittelkosten		Aufwandmenge		Gesamtkosten [€/ha]
		[€/l]	[€/kg]	[l/ha]	[kg/ha]	
Voraufbau	Goltix Gold	41,5		2		83
Nachaufbau	Betanal Maxx Pro	30,9		1,5		46,35
	Fusilade Max	24,5		1		24,50
Nachaufbau	Betanal Maxx Pro	30,9		1,5		46,35
	Debut		1215,33		0,03	36,46
Nachaufbau	Betanal Maxx Pro	30,9		1,5		46,35

Gesamtkosten des Pflanzenschutzmitteleinsatzes: 283,01

Mit den Gesamtkosten von 283,01 €/ha für den Pflanzenschutzmitteleinsatz liegt die Beispielrechnung noch an der untersten Intensitätsstufe für Zuckerrüben. In Bayern rechnet man beim Anbau von Zuckerrüben, je nach Intensitätsniveau, mit Kosten von 271 €/ha bis 334 €/ha.

Die Maschinenkosten wurden mithilfe des Maschinenkostenrechners des KTBL mit einer Pflanzenschutzspritze mit 18 m Arbeitsbreite und einer Wasseraufwandmenge von 400 l/ha berechnet.

MaKo	Dieselaufwand		Arbeitsaufwand	
	[€/ha]	[l/ha]	[€/ha]	[Akh/ha]
4,65	0,85	0,85	0,15	3

Feldarbeitskosten pro Durchfahrt: 8,50 €/ha

Bei vier Durchfahrten werden Feldarbeitskosten (Maschinenkosten und Arbeitszeiten) von 34 €/ha anfallen. Zusammen mit den Kosten für die Pflanzenschutzmittel entstehen Kosten zur Unkrautkontrolle von 317,01 €/ha.

5.1.2 Mechanische Unkrautkontrolle

Bei der mechanischen Unkrautkontrolle muss die mechanische Bearbeitung mit der Maschine, als auch die spätere Handjäte in die Kosten der Unkrautkontrolle eingerechnet werden.

Beim Anschaffungspreis der Hacktechnik mit Steuerungssystem liegt ein Preisunterschied von ungefähr 20 000 € zur Hacktechnik ohne Steuerungssystem. Die reinen Maschinenkosten pro bearbeiteten Hektar bei einer maximalen Auslastung von 150 ha/Jahr werden in der Tabelle 3 dargestellt.

Tabelle 5: Maschinenkosten berechnet mit dem KTBL Maschinenkostenrechner

Maschine	Garford mit Kamerasteuerung, Gänsefußschar, 12-reihig	Schmotzer mit Kamerasteuerung, Gänsefußschar, 12-reihig	Schmotzer ohne Kamerasteuerung, Gänsefußschar, 12-reihig
Anschaffungspreis	48.200 €	36.400 €	17.900 €
Nutzungspotential nach Leistung	3.000 ha	3.000 ha	3.000 ha
Nutzungspotential nach Zeit	12 a	12 a	12 a
Auslastungsschwelle Geplanter	250 ha/a	250 ha/a	250 ha/a
Einsatzumfang Geplante	150 ha/a	150 ha/a	150 ha/a
Nutzungsdauer	12 a	12 a	12 a
Restwert	14.781 €	11.163 €	5.489 €

Maschine	Garford mit Kamerasteuerung, Gänsefußschar, 12-reihig	Schmotzer mit Kamerasteuerung, Gänsefußschar, 12-reihig	Schmotzer ohne Kamerasteuerung, Gänsefußschar, 12-reihig
Kosten	€/ha	€/ha	€/ha
Abschreibung	18,57	14,02	6,89
Zinskosten	6,30	4,76	2,34
Unterbringung	0,40	0,40	0,40
Abgaben			
Summe fixe Kosten	25,27	19,18	9,63
Betriebsstoffe/ Betriebsmittel/ Reparaturkosten	3,00	3,00	3,00
Summe variable Kosten	3,00	3,00	3,00
Gesamtkosten	28,27	22,18	12,63

Laut dem Kostenrechner des KTBL zum Arbeitsverfahren für die mechanische Unkrautregulierung kommen mit einem Arbeitszeitbedarf von 0,59 Akh/ha und einer Flächenleistung von 2,04 ha/h Arbeitskosten (Stundenlohn 20 €) von 11,80 €/ha zusammen. Als weiterer Kostenfaktor werden Dieseldkosten von 3,92 €/ha bei einem Dieseldbedarf von 3,92 l/ha angerechnet. Hiermit kommen wir auf folgende Gesamtkosten der mechanischen Bearbeitung durch Hackmaschinen mit unterschiedlichen Investitionssummen. Die Kosten für die Nutzung eines Schleppers wurden nicht berücksichtigt.

Tabelle 6: Gesamtkosten der mechanischen Bearbeitung durch die Hackmaschine

Maschine	Garford mit Kamerasteuerung, Gänsefußschar, 12-reihig	Schmotzer mit Kamerasteuerung, Gänsefußschar, 12-reihig	Schmotzer ohne Kamerasteuerung, Gänsefußschar, 12-reihig
	€/ha	€/ha	€/ha
Maschinenkosten	28,27	22,18	12,63
Lohnkosten	11,80	11,80	11,80
Dieseldkosten	3,92	3,92	3,92
Kosten pro Durchfahrt	43,99	37,90	28,35
Gesamte Unkrautkontrolle (drei Durchfahrten)	131,97	113,70	85,05

Durch die Investition in ein Steuerungssystem müssen 35 % höhere Kosten für die Unkrautkontrolle in einer Saison (drei Durchfahrten) im Vergleich zur Nutzung eines

Hackgerätes ohne Steuerungssystem gerechnet werden. Folgende Faktoren können diesen erhöhten Kostenaufwand jedoch noch etwas minimieren:

- Erhöhte Fahrgeschwindigkeiten
- Geringerer Aufwand zur Handjäte
- Exakteres und präziseres Arbeiten an der Kulturreihe

Nach jeder mechanischen Bearbeitung müssen die Bestände manuell durchgegangen werden. Der Handjäteaufwand liegt bei Roter Bete, bzw. Zuckerrüben, zwischen 80 und 200 Akh/ha im Jahr. Ausschlaggebend für den Handjäteaufwand sind das restliche Unkrautmanagement oder die Witterung im Anbaujahr. Rechnet man mit einem Stundenlohn von 8,84 € für die Saisonarbeitskräfte, entstehen nochmal zusätzlich Kosten von 800 – 2000 €/ha für die Unkrautregulierung.

Tabelle 7: Gesamtkosten der Unkrautkontrolle mit Handjätestunden von 120 Akh

Maschine	Garford mit Kamerasteuerung, Gänsefußschar, 12-reihig	Schmotzer mit Kamerasteuerung, Gänsefußschar, 12-reihig	Schmotzer ohne Kamerasteuerung, Gänsefußschar, 12-reihig
	€/ha	€/ha	€/ha
Mechanische Bearbeitung	131,97	113,70	85,05
Handjätekosten bei 120 Akh	1060,80	1060,80	1060,80
Gesamtkosten Unkrautkontrolle	1192,77	1174,50	1145,85

Durch sehr präzise Arbeitsweisen, die leicht mit Steuerungssystemen zu erreichen sind, können nochmal Handjätestunden eingespart werden. Die folgende Tabelle zeigt die Kosten der Unkrautkontrolle bei 80 Handjäte-Arbeitskraftstunden.

Tabelle 8: Gesamtkosten der Unkrautkontrolle mit Handjätetestunden von 80 Akh

Maschine	Garford mit Kamerasteuerung, Gänsefußschar, 12-reihig €/ha	Schmotzer mit Kamerasteuerung, Gänsefußschar, 12-reihig €/ha	Schmotzer ohne Kamerasteuerung, Gänsefußschar, 12-reihig €/ha
Mechanische Bearbeitung	131,97	113,70	85,05
Handjätetekosten bei 80 Akh	707,20	707,20	707,20
Gesamtkosten Unkrautkontrolle	839,17	820,90	792,25

So ergeben sich reduzierte Kosten zur Handjäte und somit geringere Gesamtkosten zur Unkrautkontrolle bei der Nutzung von Steuerungssystemen, trotz der erhöhten Investitionskosten. Bei der Mitbetrachtung der gesamten Kosten zur Unkrautkontrolle inklusive 120 Akh für die Handjäte entstehen nur Mehrkosten von 2,5 % bei der Nutzung einer Schmotzer Hacktechnik mit Kamerasteuerung im Vergleich zur Schmotzer Hacktechnik ohne Kamerasteuerung

Als Alternative zur chemischen Unkrautkontrolle, die mit Kosten von 317,01 €/ha erfolgen kann, fielen durch die mechanische Bearbeitung, bei einem 12 reihigen Anbaugerät, Kosten von 85,05 bis 131,97 €/ha an. Bei zusätzlich notwendigen 120 Handjätetestunden/ha und einem Mindestlohn von 8,84 €/h im Jahr 2018, müssen 1060,80 € hinzugerechnet werden; bei 80 Handjätetestunden/ha sind dies 707,20 €. Somit ist man beim Schmotzergerät mit Gänsefußscharen inklusiv Kamerasteuerung und zusätzlicher Handhacke von 120 Akh/ha beim Faktor 3,7 gegenüber der rein chemischen Unkrautbekämpfung, bei geringerer Verunkrautung und 80 Akh/ha Handarbeit liegt der Faktor bei 2,6.

6 Auf einen Blick – Schlussfolgerungen für die Praxis

Große Entwicklungsmöglichkeiten gibt es bei der mechanischen Unkrautregulierung. Eine effiziente Unkrautkontrolle ist eine der wichtigsten Grundlagen der Produktion im Ökoanbau. Unterstützen können hierbei automatische Steuerungssysteme, die für eine Feinsteuerung von herkömmlicher Hacktechnik verantwortlich sind. Der Impuls für die Feinsteuerung wird von einem optischen bzw. Ultraschallsensor oder über ein GPS-RTK System gegeben.

Die unterschiedlichen auf dem Markt verfügbaren Systeme wurden im Rahmen des Forschungsprojektes ausgeliehen und in ökologisch bewirtschaftenden Betrieben getestet.

Steuerungssysteme

Kamerasysteme

Im Allgemeinen funktionieren alle Kamerasysteme nach einem Grundprinzip: Während der Fahrt über den Pflanzenbestand werden, abhängig vom Typ, 20 bis 30 Bilder pro Sekunde aufgenommen und direkt vom System verarbeitet. In der Verarbeitung wird eine Unterscheidung zwischen grünen und braunen Pixeln getroffen. Eine hohe Konzentration an grünen Pixeln wird dementsprechend als Kulturpflanzenreihe angesehen und als Richtlinie für die Feinsteuerung verwendet. Diese Grundfunktionen wurden allerdings von den unterschiedlichen Anbietern der Steuerungssysteme noch verfeinert.

So kann die neue **Kamera Okio** der Firma Schmotzer, im Vergleich zur **Claaskamera**, anhand von hinterlegten Strukturen der Kulturpflanzen die Kulturreihe noch zusätzlich an deren Kulturpflanzenumrisse erkennen. Das **Vision Control System** der Firma K.U.L.T. kann zusätzlich durch den Einsatz von Infrarotsystemen Kulturen in einem sehr frühen Entwicklungsstadium vom Boden unterscheiden. Auch mit den Verbesserungen der Arbeitsweise der Kamerasysteme haben alle Systeme noch ihre Einsatzgrenzen. Beim ersten Einsatz müssen die Kulturpflanzen groß genug sein, um von der Kamera erkannt zu werden. Auch zum Bestandsschluss muss für eine gute Funktion des Steuerungssystems meist noch ein Anteil an braunen „Bodenpixeln“ auf den aufgenommenen Bildern vorhanden sein. Auch ein unregelmäßiges Auflaufen der Kulturpflanzen mit Fehlstellen kann dazu führen, dass

die Reihe nicht sicher erkannt wird. Rote Bete mit einem kleineren Saatabstand ist leichter zu erkennen als Zuckerrübe.

Staubbildung und ungünstiger Lichteinfall können störend wirken. Deshalb ist das Kamerasystem beim IC Weeder der Firma Steketee komplett mit einem Kasten überbaut.

GPS-RTK

Unabhängig vom Entwicklungsstadium der Kulturpflanzen arbeiten die GPS-RTK Systeme, bei denen entlang einer bei der Saat aufgenommenen Spur gehackt wird. Die genaue Feinjustierung der Hacktechnik erfolgt über ein Verschiebesystem, welches zwischen Traktor und Hacktechnik verbaut ist oder beispielsweise über Lenkscheiben hinter der Maschine, die die Hacktechnik über ein Gelenk in der richtigen Spur halten. Andere Einsatzgrenzen wie Empfangsprobleme von GPS und Korrektursignal spielen eine Rolle. So muss sich der Anwender sicher sein, dass in seiner Einsatzregion ein ausreichender Empfang des Korrektursignales möglich ist. Sind diese Faktoren sicher gestellt, kann mit einem GPS-RTK System über einen Verschieberahmen auf 2,5 cm Genauigkeit, was vergleichbar zu den Kamerasystemen ist, gehackt werden. Das unbearbeitete Hackband war bei allen Verfahren etwa 7 cm breit.

Ultraschall

Bis zu vier Ultraschallsensoren nehmen entweder Damm-, Fahrgassen- oder Kulturpflanzenumrisse auf. Kulturpflanzen brauchen einen Wachstumsvorsprung von 7 cm (schwierig bei Säkulturen). Auf Dämmen kann das Sonic System auch zur Saat genutzt werden. Das System arbeitet licht- und staubunempfindlich.

Projektarbeit – Exaktversuche und Feldtage

Von 2015 bis 2018 wurden Versuche in den Kulturen Rote Bete und Karotten, sowie teilweise in Zuckerrüben durchgeführt. 2016 fanden alle Versuche auf Projektbetrieben im Norden und Süden von Würzburg statt. Um größere Fahrwege zu vermeiden, konzentrierte sich die Versuchsarbeit 2017 und 2018 nur noch auf Betriebe im Süden von Würzburg.

Neben allgemeinen Versuchen zur Funktionssicherheit und zur Prüfung der Einsatzgrenzen der Systeme kamen im Versuchsjahr 2017 auch Aufnahmen zu Arbeitszeiten (Wendezeiten, Zeiten zum Einsetzen und Rüstzeiten) der Systeme hinzu.

In allen vier Jahren wurden Feldtage mit Maschinenvorfürungen organisiert, auch mit Systemen, die nicht in dem Projekt dabei waren. Neben der neuesten Technik konnten auch Erfahrungen aus den praktischen Einsätzen weitergegeben werden. Die Landwirte tauschten sich intensiv mit den Vertretern der Herstellerfirmen aus und verfolgten die Stärken und Schwächen der einzelnen Systeme bei den Vorfürungen.

Schlussfolgerung für die Praxis

Durch die Einschränkung von Herbiziden und die vermehrte Produktion nach ökologischen Richtlinien, entsteht eine stark gestiegene Nachfrage nach schlagkräftiger Hacktechnik. Zusammen mit Steuerungssystemen etablieren sich Hackgeräte wieder in landwirtschaftlichen und gärtnerischen Betrieben. Die Versuche im Rahmen des Forschungsprojektes und Praxisberichte haben gezeigt, dass automatische Steuerungssysteme eine sinnvolle Ergänzung in der mechanischen Unkrautkontrolle sind. **Folgende Vorteile haben sich im Projekt bestätigt:**

- deutlich exaktere Ergebnisse auf dem Acker
- die Entlastung des Fahrers spielt eine wichtige Rolle
- die Ausweitung der Arbeitszeiten bis in die Dunkelheit
- Erhöhung der Arbeitsgeschwindigkeit ab der zweiten Durchfahrt (wenn die Pflanzen schon größer sind)
- zusätzliches Bedienpersonal entfällt (für die Lenkung des Hackrahmens im Heckanbau)

Bei größeren Arbeitsbreiten (12-reihig; 6m) bietet die Steuerungstechnik (v.a. Kamera; mit den beschriebenen Einschränkungen auch GPS-RTK Technik) größere Vorteile, weil auf Grund der schwereren Geräte ohnehin mit größeren Traktoren gearbeitet wird.

Dem Vorteil der Einsparung von Arbeitszeit ist wegen der schwierigen Verfügbarkeit von Hackkräften, v.a. im Zuckerrübenanbau, wo sie nur kurzfristig benötigt werden, und auch der deutlich steigenden Kosten (Mindestlohn und zusätzliche Nebenkosten) eine sehr große Bedeutung beizumessen.

Im Gemüsebau, insbesondere bei weniger großen Betrieben, stellt der Wechsel der Gerätetechnik von der bisherigen häufig verbreiteten Hacktechnik im Zwischenachsanaubau mit relativ leichten Traktoren bei Aussaat und Pflege hin zu wesentlich aufwändiger Technik mit höheren Abhängigkeiten (GPS Signal), hohen Anschaffungs- und laufenden Kosten eine gewisse Hürde dar.

Die erforderlichen schwereren Traktoren haben auch Einfluss auf das Thema Bodendruck/-verdichtung.

Der Einsatz von Steuerungssystemen ist abhängig von den jeweiligen Gegebenheiten in den Betrieben. So machen die Anschaffung von GPS-RTK basierten Systemen in Regionen mit unsicherem Signalempfang eher Probleme als dass sie eine große Unterstützung sind. Eine Verbesserung von Empfangsqualitäten in unsicheren Gebieten wird von den Herstellern verfolgt. Beim Einsatz der Kamertechnik muss auf eine gute Erkennbarkeit der Kulturpflanze geachtet werden. Ein extrem früher Einsatz auf Flächen mit beispielsweise hohem Unkrautdruck ist dementsprechend nicht möglich. Allerdings gibt das Kamerasystem eine gewisse Unabhängigkeit von externen Signalen. Zudem ist man auch bei der Aussaat nicht auf ein Steuerungssystem angewiesen.

Vertrautheit mit der Technik ist wichtig

Bei der Entscheidung für ein Steuerungssystem muss eine gewisse Affinität des Fahrers zur Technik vorhanden sein. Im Gegensatz zu herkömmlicher Hacktechnik kann bei einer Störung oder dem Bruch eines Teiles nicht schnell selbst eine Reparatur durchgeführt werden. Meist muss der Service des Herstellers zur Behebung von Fehlern bei Steuerungssystemen in Anspruch genommen werden.

Im Gemüseanbauggebiet Pfalz wurde der Robovator (Vertrieb in Deutschland durch Firma K.U.L.T.) mit einem festen Fahrer bestückt und von den einzelnen Betrieben angefordert. Somit ist keine Einarbeitungszeit erforderlich und Bedienfehler und Störungen werden auf ein Minimum reduziert.

Abstimmung der pflanzenbaulichen Verfahren und vorhandene Infrastruktur

Verfolgt man das Ziel, mit einer sehr hohen Präzision die mechanische Unkrautkontrolle durchführen zu wollen, müssen auch andere pflanzenbauliche Verfahren optimiert werden. So ist beispielsweise das exakte Säen eine der Voraussetzungen für exaktes Hacken.

Generell muss für Steuerungssysteme in der Zukunft die Infrastruktur in der Landwirtschaft verbessert werden. Zudem geben neue Entwicklungen in der Datenverarbeitung und leistungsfähigere Rechner dem Einsatz von Feldrobotik zur mechanischen Unkrautregulierung nochmals neuen Rückenwind.

Überbetrieblicher Einsatz sinnvoll?

Von einzelnen Betrieben wurde angefragt, ob ein überbetrieblicher Einsatz von Hacktechnik durch einen Lohnunternehmer realistisch ist. Dies dürfte nicht ganz einfach sein, da die günstige Zeitspanne für den Geräteeinsatz teilweise knapp ist (z.B. Regenpause, Boden gut befahrbar, Unkraut in einer günstigen Bekämpfungsgroße). Erfolgversprechender ist wahrscheinlich eine Zusammenarbeit mit einem oder zwei weiteren Betrieben in der Nähe. Ökonomisch betrachtet müsste für bayerische Verhältnisse eine überbetriebliche Nutzung von benachbarten Betrieben angestrebt werden.

Fazit eines am Projekt teilnehmenden Betriebes

Laut Aussage des Betriebsleiters hat das Forschungsprojekt einen Schub für den Ökoanbau gegeben. Es hat auch umstellungsinteressierten Landwirten gezeigt, dass mechanische Verfahren effektiv und schlagkräftig gegen Beikräuter wirksam sind.

7 Literaturverzeichnis

Bauermeister, Regula (2005): Unkrautpraxis. Mechanische Unkrautregulierung im Gemüsebau. Unter Mitarbeit von René Total, Daniel T. Baumann, Martin Koller und Martin Lichtenhahn.

Fittje, Susanne; Hänsel, Martin; Langsenkamp, Frederik; Kielhorn, Arnd; Kohlbrecher, Maik; Vergara, Maria; Trautz, Dieter (2015): Praxiserhebung zu Aufwand und Erfolg der Handjäte in Möhren unter ökologischer Bewirtschaftung. In: A. M. Häring (Hg.): Am Mut hängt der Erfolg - Rückblicke und Ausblicke auf die ökologische Landbewirtschaftung. 13. Wissenschaftstagung Ökologischer Landbau. 13. Wissenschaftstagung Ökologischer Landbau. Eberswalde, 17.-20.03.2015. Berlin: Verlag Dr. Köster (2015), S. 240–244.

Garming, Hildegard (2016): Auswirkung des Mindestlohns in Landwirtschaft und Gartenbau: Erfahrungen aus dem ersten Jahr und Ausblick. Hg. v. Thünen-Institut für Betriebswirtschaft. Thünen-Institut. Braunschweig (Thünen Working Paper, 53), zuletzt geprüft am 03.05.2016.

Hege, Daniel (2017): Landtechnische Lösungskonzepte zur Optimierung des Segetalpflanzen- und Krankheitsmanagements im ökologischen Freilandgemüsebau. Dissertation. Justus-Liebig-Universität Gießen, Gießen. Institut für Pflanzenbau und Pflanzenzüchtung I. Online verfügbar unter <http://geb.uni-giessen.de/geb/volltexte/2017/13348/>, zuletzt geprüft am 08.08.2018.

Hock, Bertold (Hg.) (1995): Herbizide. Entwicklung, Anwendung, Wirkungen, Nebenwirkungen; 101 Tabellen. Unter Mitarbeit von Carl Fedtke und Robert R. Schmidt. Stuttgart: Thieme.

KTBL: Feldarbeitsrechner. Hg. v. Kuratorium für Technik und Bauwesen in der Landwirtschaft e. V. Online verfügbar unter <https://daten.ktbl.de/feldarbeit/home.html;jsessionid=4B699EC5012ADDDFFF41D999204C0CAA0>, zuletzt geprüft am 31.08.2018.

Zwenger, Peter (1995): Unkraut oder Wildkraut - Ein Diskussionsbeitrag zum Begriff und Wesen des Unkrauts. 47. Aufl. Hg. v. Eugen Ulmer GmbH & Co. Biologische Bundesanstalt für Land- und Forstwirtschaft, Institut für Unkrautforschung, Braunschweig (Nachrichtenblatt deutscher Pflanzenschutzdienst).

8 Anhang

Table 9: Übersicht Steuerungssysteme (Kameragestützt)

	Claas Kamera Optitronic	Schmotzer Kamera Okio	K.U.L.T. Vision Control Kamerasystem	Garford Robocrop	Reichardt Sonic Ultraschallsteuerung
					
Arbeitsweise (laut Hersteller)	<p>3D Kamera analysiert 25 Bildern pro Sekunde</p> <p>nimmt bis zu drei Reihen auf</p>	<p>nimmt 20 Bilder pro Sekunde auf</p> <p>nimmt eine Kulturpflanzenreihe auf</p> <p>Erkennt die Nutzpflanze an deren Blattform</p> <p>Reihenerkennung kann unterschiedliche Farbtöne (hell/dunkel) erkennen, wodurch eine zuverlässige Unterscheidung zwischen Nutzpflanze und Unkraut möglich ist</p> <p>intelligenter Neigungssensor gewährleistet eine sichere Hackmaschinenführung am Seitenhang.</p> <p>Bedienung und Updates der Kamera erfolgen über WLAN.</p> <p>Aufnahmen von neuen Kulturen immer möglich</p>	<p>mehrere Kameras werden oberhalb der Kultur angebaut</p> <p>Nimmt drei Reihen auf</p> <p>Kann schon in frühem Entwicklungsstadium die Kulturpflanze von Boden unterscheiden</p>	<p>30 Bilder pro Sekunde werden analysiert</p> <p>nimmt bis zu drei Reihen auf</p> <p>Höchste Konzentration von Pixel im Verhältnis zu Anbaureihen werden herausgefiltert</p> <p>Solange die Blätter der Kulturpflanzen den Großteil der grünen Objekte im Kamerablickfeld darstellen, ist eine genau Führung möglich</p> <p>Betrieb im „Rotmodus“ möglich (620nm)</p> <p>Grüne Pflanzen sollten am besten im Bereich 520 nm sein</p> <p>Sehr farbintelligent, wodurch Schatten und starke Sonneneinstrahlung keine Probleme bereiten</p>	<p>Bis zu 4 Ultraschallsensoren nehmen entweder Damm-, Fahrgassen- oder Kulturpflanzen-Umrisse auf.</p> <p>Kulturpflanze braucht einen Wachstumsvorsprung von 7cm (schwierig in Säukulturen).</p> <p>Auf Dämmen kann das Sonic System auch zur Saat genutzt werden.</p> <p>Zwei Reihen /Dämme können gleichzeitig betrachtet werden.</p> <p>Licht-, Staubunempfindlich</p>
Erkennbare Kulturgröße	BBCH 14 bei Zuckerrübe/ Rote Bete	<i>konnte nicht getestet werden</i>			Kulturpflanze muss eine Wuchshöhe von 7 cm haben
Arbeitsgenauigkeit	2,5 cm	2,5 cm		1 - 1,5 cm	1-1,5 cm

	Claas Kamera Optitronic	Schmotzer Kamera Okio	K.U.L.T. Vision Control Kamerasystem	Garford Robocrop	Reichhardt Sonic Ultraschallsteuerung
Handling für Fahrer	5- einfache Parameter zum Eingeben	3-Wachstumsstadien pro Kultur über hinterlegte Bilder leicht auswählbar	Display war schwierig zu bedienen Bedienung über Display oder WLAN Verbindung mit Smartphone möglich	<i>Nicht selbst getestet</i>	Einstellen dauert am längsten
Bewertungen und Empfehlungen für die Praxis	Sehr schnell verständlich	Intuitives Display. Man sieht was die Kamera „sieht“ dadurch gute Kontrolle.	Je Reihe eine Kamera + Lichtquelle sorgt für gute Sicht auch bei schwierigen Lichtverhältnissen. Erkennung von feinen Säkulturen in frühen Wachstumsstadien (bei engem Saatabstand z.B. Möhren)	<i>Nicht selbst getestet</i>	Langes Einstellen, aber dann sehr präzises Arbeiten. Wachstumsvorsprung in Säkulturen schwierig, daher eher für Pflanzkulturen geeignet.
In den Versuchen aufgetretene Probleme	Seitenhang Spiegelung nicht möglich	Reihenmitte nicht immer klar erkannt. Kamerahalterung war noch nicht ausgereift (soll jetzt besser sein).	Aktivierung über Magnetsensor und nicht über Geschwindigkeitssensor	<i>Nicht selbst getestet</i>	1. Hackgang musste mit einem anderen System gefahren werden.

Tabelle 10: Übersicht Steuerungssysteme (GPS-RTK gestützt)

	RTK Reichhardt	Trimble/ geo-konzept	SBG
GPS Empfang nur Mobilfunk getestet	Mobilfunk / Stationär / Mobil	Mobilfunk / Stationär / Mobil	Mobilfunk / Stationär / Mobil
Antenne (Position)	Mittig über dem Rahmen	Leicht nach hinten versetzt	Auf dem Anbaugerät
Display	Von Müller Elektronik oder andere	FmX Display	Viper 4 TWIN Display
Handling für Fahrer	Je nach Display ist eine Kontrolle über die Speicherung der gerade gezogenen Spur nicht möglich	Implementation von Schlepper und Verschieberahmen ist über das große Display gut zu erkennen.	Hier kann man auf dem Feld sehr schnell gut und einfach Vorgewende und Bewässerungsstreifen vorplanen.
Arbeitsgenauigkeit	2,5 cm	2,5 cm	2,5 cm
Bewertung/ Empfehlung für Betrieb	Technik stammt aus dem Beetanbau und hat dort seine Stärken	Stabiler, kurzbauender Rahmen, welchen man leicht anhängen kann.	Vorgewende oder Bewässerungsstreifen sind sehr gut von der Kabine aus planbar. An Hanglagen kann eine Abdrift gut verhindert werden
In den Versuchen aufgetretene Probleme	Starke Hangneigung + hohe Arbeitsbreiten führen zu erhöhten Verlusten	Fangschellen bauen sehr nah am Rahmen, daher ist nicht jedes Arbeitsgerät kompatibel. Zapfwellen können aufgrund der Rahmenbauweise leicht verdrückt werden. (erhöhte Vorsicht nötig).	Die Hangscheiben müssen von Gerät zu Gerät mitgetauscht werden. Es ist immer eine zweite Arbeitskraft + Stapler zum Maschinenwechsel nötig.