



Aus dem Institut für Pflanzenbau und Pflanzenzüchtung I  
Professur für Pflanzenbau  
der Justus-Liebig-Universität Gießen

# **Landtechnische Lösungskonzepte zur Optimierung des Segetalpflanzen- und Krankheitsmanagements im ökologischen Freilandgemüsebau**

INAUGURAL-DISSERTATION

zur Erlangung des akademischen Grades

Doctor agriculturæ (Dr. agr.)

im Fachbereich Agrarwissenschaften, Ökotropologie und Umweltmanagement der  
Justus-Liebig-Universität Gießen

vorgelegt von

Daniel Hege M. Sc. Gartenbauwissenschaften

Geboren am 05.04.1988 in Speyer

Gießen, 2017

Mit Genehmigung des Fachbereichs Agrarwissenschaften,  
Ökotoxikologie und Umweltmanagement  
der Justus-Liebig-Universität Gießen

Prüfungskommission:

1. Gutachter: Herr Prof. Dr. habil. Hans-Peter Schwarz
2. Gutachter: Herr Prof. Dr. habil. Bernd Honermeier

---

## Inhaltsverzeichnis

Abbildungsverzeichnis .....	IV
Formelverzeichnis .....	XI
Tabellenverzeichnis .....	XII
Abkürzungsverzeichnis .....	XIV
1 Einleitung .....	1
1.1 Problemstellung .....	2
1.2 Ziele der Arbeit .....	4
2 Stand des Wissens .....	6
2.1.1 Optische Anbaugerätesteuerung .....	7
2.1.2 Berührungslose Anbaugerätesteuerung .....	12
2.1.3 GPS-gestützte Anbaugerätesteuerung .....	13
2.2 Überblick über die am Markt befindlichen Technik .....	16
2.2.1 Kamerasteuerung mit Parallelogrammverschiebung .....	16
2.2.2 Kamerasteuerung mit Parallelverschiebung .....	17
2.2.3 Maschinenfabrik SCHMOTZER GmbH .....	18
2.2.4 Firma WAGNER Pflanzen-Technik GmbH .....	19
2.2.5 Firma TRIMBLE, GEO-KONZEPT GmbH .....	20
2.2.6 Firma REICHHARDT .....	22
2.2.7 Firma SBG .....	23
2.2.8 Firma Sunco <sup>TM</sup> Marketing Farm Equipment .....	24
2.3 Mechanische Segetalpflanzenregulierung .....	26
2.4 Bisherige Untersuchungen und Ergebnisse zur Beikrautregulation mit Anbaugerätesteuerungen .....	30
2.5 Neueste Entwicklungen im Bereich der Segetalpflanzenregulierung .....	33
2.5.1 KUBOTA GEOseed <sup>®</sup> : Aussaat im Verbund .....	33
2.5.2 POULSEN: Abflammen in der Reihe .....	35
2.5.3 Lasertechnik zur Beikrautregulierung .....	36
2.5.4 Bosch Deepfield Robotics: Hackroboter mit Stempelaktor .....	37
2.5.5 CARRÉ SAS: Hackroboter ANATIS .....	39
2.5.6 K.U.L.T. autonomer Geräteträger UWE .....	41

---

2.6	Einführung in die UV-C Technik .....	42
2.6.1	Technik zur Erzeugung der UV-C Strahlung .....	43
2.6.2	Sicherheitsmaßnahmen bei der Anwendung von UV-C Strahlen .....	46
2.6.3	Anwendungsbereiche der UV-C Strahlung .....	47
2.6.4	Bisherige Ergebnisse der UV-C Anwendung im Pflanzenbau.....	48
3	Untersuchungen zur innovativen Anbaugerätsteuerung .....	52
3.1	Material und Methoden .....	52
3.1.1	Beschaffung der Technik und Herstellerauswahl.....	52
3.1.2	Verwendete GPS Technik .....	53
3.1.3	Entwicklung und Aufbau der innovativen Anbaugerätsteuerung.....	56
3.1.4	Verwendete Hackgeräte.....	62
3.1.5	Messung des Bekämpfungserfolgs .....	63
3.1.6	Messung der Kulturschäden .....	66
3.1.7	Messung der Bodenfeuchte .....	68
3.2	Voruntersuchung .....	70
3.3	Versuchsaufbau und Durchführung 2014.....	72
3.4	Beobachtungen und weiterführende Versuche 2014.....	75
3.5	Vortest der innovativen Anbaugerätsteuerung .....	79
3.6	Versuchsaufbau und Durchführung 2015.....	82
3.7	Beobachtungen und weiterführende Versuche 2015.....	86
3.8	Versuchsaufbau und Durchführung 2016.....	89
3.9	Beobachtungen und weiterführende Versuche 2016.....	92
3.10	Witterung während der Hackarbeiten.....	93
3.11	Ergebnisse der Hackuntersuchungen.....	99
3.11.1	Bodenfeuchte .....	99
3.11.2	Bekämpfungserfolg .....	101
3.11.3	Kulturschäden.....	110
4	Ökonomischer Vergleich der Beikrautregulation in ausgewählten Kulturen.....	121
4.1	Ökologischer Speisezwiebelanbau .....	122
4.2	Ökologischer Speisekürbisanbau.....	126
5	Untersuchungen und Ergebnisse zur UV-C Behandlung von ausgewählten Kulturen .....	133

5.1	Material und Methoden: Verwendetes UV-C Gerät.....	133
5.1.1	Material und Methoden: Labortest zum Nachweis des OYDV.....	134
5.2	Versuchsaufbau .....	136
5.3	Durchführung der Untersuchungen .....	137
5.4	Beobachtungen während der Untersuchungen .....	138
5.5	Untersuchung zu <i>Peronospora destructor</i> an Speisezwiebeln.....	138
5.6	Ergebnisse der UV-C Untersuchungen.....	140
6	Diskussion .....	143
7	Empfehlungen für weitere Versuche .....	150
7.1	Empfehlungen für den Anwender.....	150
8	Zusammenfassung .....	152
9	Abstract.....	153
	Literaturverzeichnis.....	154
	Anhang .....	166
	Danksagung .....	167
	Eidesstattliche Erklärung.....	168

## Abbildungsverzeichnis

<b>Abb. 1:</b> Anbaugerätesteuerungen während des Hackeinsatzes auf dem Betrieb Hege im Wandel der Zeit: links ca. 1949 mit Pferd, rechts 2005 mit Traktor; Quelle: Archiv Hege .....	6
<b>Abb. 2:</b> Schema der Bestands-(links) und Furchenabtastung (rechts) mit einer Kamera der Firma ECO-DAN; Quelle: ECO-DAN (2013) .....	8
<b>Abb. 3:</b> Ausschnitt des Arbeitsrechners der ROBOCROP Steuerung beim Hacken von Salat; Quelle: GARFORD (2016).....	8
<b>Abb. 4:</b> CAM Pilot zur Steuerung eines selbstfahrenden Feldhäckslers, hier entlang eines Heuschwades; Quelle: CLAAS (2016).....	10
<b>Abb. 5:</b> Abtastung einer Kulturreihenattrappe auf einer Wiese mit einer Kamera der Firma SCHMOTZER; Quelle: SCHMOTZER (2015b).....	11
<b>Abb. 6:</b> IC Light Kamera der Firma STEKETEE angebaut an eine Hacke (links) und Ausschnitt der Bedienoberfläche (rechts); Quelle: STEKETEE (2015).....	12
<b>Abb. 7:</b> Funktionsweise der SONIC Einheit von REICHHARDT schematisch dargestellt auf einem Zwiebelfeld.....	13
<b>Abb. 8:</b> Darstellung der Parallelogrammverschiebung (rote Kennzeichnung) der Firma BEDNAR fest mit einer Hacke verbunden; modifiziert nach BEDNAR (2016) ....	16
<b>Abb. 9:</b> GARFORD ROBOCROP an eine Hacke angebaut (links) und abgebaut (rechts); Quelle: BEESTEN (2014) und ALDENHOFF (2015) .....	17
<b>Abb. 10:</b> Parallelogramm- (Typ AV5; rote Kennzeichnung links) und Parallelverschiebung (Typ PVR; rote Kennzeichnung rechts) von Schmotzer, jeweils angebaut an einer Hacke; Quelle: SCHMOTZER (2015) .....	18
<b>Abb. 11:</b> Verschieberahmen G 4000 H von WAGNER, angebaut an einen Traktor; Quelle: WAGNER (2014).....	19
<b>Abb. 12:</b> Kartoffellegegerät mit GPS-Ausrüstung der Firma TRIMBLE® (rote Kennzeichnung links), sowie Detailaufnahme der Antenne und des Navigationsrechners (rechts); modifiziert nach SCHULZ (2015).....	20
<b>Abb. 13:</b> Heckansicht des GPS- gestützten Verschieberahmen der Firma GEO-KONZEPT, angebaut an einen Traktor; wichtige Baugruppen rot gekennzeichnet .....	21

---

<b>Abb. 14:</b> Frontansicht des Verschieberahmen PSR Slide L der Firma REICHHARDT, wichtige Baugruppen rot gekennzeichnet .....	22
<b>Abb. 15:</b> Side-Shift-Anhängebock fest an einem Gerät verbaut (links) bzw. als Verschieberahmen an einen Traktor angebaut (rechts); Quelle: SBG (2015) .....	23
<b>Abb. 16:</b> TWIN-Disc Scheibenlenkung Makroansicht (links) und im Gerät verbaut (grüne Kennzeichnung rechts); modifiziert nach SBG (2015) .....	24
<b>Abb. 17:</b> ACURA TRAK (rote Kennzeichnung) Funktionsweise schematisch dargestellt, während der Traktor mittig zwischen den Kulturreihen (links) bzw. nach links fährt (rechts, Auswirkungen auf die Länge der Unterlenker orange und blau gekennzeichnet); modifiziert nach SUNCO (2015) .....	25
<b>Abb. 18:</b> Abhängigkeit des Bekämpfungserfolg [%] bei der mechanischen Segetalpflanzenregulierung von der Blätteranzahl je Segetalpflanze [n]; Quelle: LABER (1999) .....	29
<b>Abb. 19:</b> Pflanzen im Dreiecks- und Vierecksverband gesät; Quelle: KVERNELAND GROUP (2014) .....	34
<b>Abb. 20:</b> Das mechanische Jätewerkzeug (links) und die thermische Abflammschiene (rechts) des ROBOVATORS während der Segetalpflanzenregulation auf einem Salatfeld; Quelle: POULSEN (2016) .....	35
<b>Abb. 21:</b> Deepfield Weeding-Roboter ausgerüstet mit Stempelaktor (weiße Kennzeichnung); Quelle: DEEPFIELD ROBOTICS (2015c) .....	39
<b>Abb. 22:</b> Hackroboter CARRÉ ANATIS in beim Einsatz in einer Reihenkultur; Quelle: EDER (2015) .....	39
<b>Abb. 23:</b> Frontansicht des autonomen Geräteträger UWE; Quelle: KIRCHHOFF und DÜLKS (2015) .....	41
<b>Abb. 24:</b> Spektrum der Sonnenstrahlung von 0 bis 1000 nm; Quelle: UV-TECHNIK MEYER GMBH (2016) .....	42
<b>Abb. 25:</b> Funktionsprinzip einer Quecksilberdampfampe schematisch dargestellt und beschriftet; Quelle: UV-TECHNIK MEYER GMBH (2016) .....	44
<b>Abb. 26:</b> Detailansichten und Lokalisation wichtiger Komponenten einer GPS Lenkautomatik eingebaut in einen Traktor .....	54
<b>Abb. 27:</b> Manuelle (links) und automatische (rechts) Seitenstrebe eingebaut in einen Traktor .....	58

---

<b>Abb. 28:</b> Detailansicht und Lokalisation (Bildmitte) der traktorseitigen Komponenten der innovativen Anbaugerätesteuerung.....	60
<b>Abb. 29:</b> Detailansicht und Lokalisation der geräteseitigen Komponenten der innovativen Anbaugerätesteuerung.....	61
<b>Abb. 30:</b> Heckansicht der RUSTICA Hacke ausgerüstet mit Flachhackschar (rote Kennzeichnung links) und Gänsefußschar (rote Kennzeichnung rechts) .....	62
<b>Abb. 31:</b> Heckansicht einer 6 m breiten Schmotzer Hacke in Arbeitsstellung auf einem Zwiebfeld .....	63
<b>Abb. 32:</b> Weißer (links) und grauer (rechts) Stativtrichter zur Fotografie der Referenzparzellen auf den Untersuchungsfeldern .....	65
<b>Abb. 33:</b> Momentaufnahmen der Bildanalyse von links: Original; Rotfärbung der grünen Pixel; Transformation der Aufnahme in schwarz-weiß .....	66
<b>Abb. 34:</b> Kleinere Kurven bei der Vorbereitung von Dämmen mit GPS-Lenkautomatik.....	70
<b>Abb. 35:</b> Lokalisation des Versuchsfelds (links) und Versuchsdesign (rechts) der Untersuchung 2014 in Kürbis, Betrieb Hege, Limburgerhof.....	73
<b>Abb. 36:</b> Fehlstellen in einem Spinatfeld, induziert durch Erdraupenfraß; dargestellt während dem Auflaufen (links) und während der späteren Vegetationsperiode (rechts) .....	76
<b>Abb. 37:</b> Impressionen des Felddtags auf dem Queckbrunnerhof 2014; Quelle: WEINHEIMER, S. (2014) .....	76
<b>Abb. 38:</b> Auswirkungen von Schadverdichtungen, durch zusätzliches Gewicht des Verschieberahmens auf die Bestandsdichte in Winterzwiebeln (unten), im Vergleich zu einer optimalen Bestanddichte (oben).....	77
<b>Abb. 39:</b> Spuraufteilung auf dem Knoblauchfeld durch variable Pflanzspurengestaltung mittels GPS (weiße Kennzeichnung der Radspuren und chronologische Nummerierung der Beete, Pfeile geben die Fahrtrichtung an) .....	78
<b>Abb. 40:</b> Erste Testfahrt der innovativen Anbaugerätesteuerung beim Beetfräsen.....	80
<b>Abb. 41:</b> Detailansicht des Touchterminals mit split screen Darstellung (links), zur Bedienung des neuen Zylinders (Detailansicht rechts).....	82
<b>Abb. 42:</b> Aufschieben des Erde-Beikraut-Gemisches durch die Hackschare und die so induzierte Verschüttung der Kürbispflanzen .....	84

---

<b>Abb. 43:</b> Lokalisation des Versuchsfelds (links) und Versuchsdesign (rechts) der Untersuchung 2015 in Kürbis, Betrieb Hege, Limburgerhof.....	85
<b>Abb. 44:</b> Abweichung des Verschieberahmens um 7 cm (rote Pfeile) zur Kulturreihe (rote Linien) .....	87
<b>Abb. 45:</b> Durch Signalaussetzer induzierte Spurabweichung während dem Beetfräsen mittels GPS (links) und bei Zwiebelaussaat 2015 (rote Kennzeichnung gibt die Solllinie an).....	88
<b>Abb. 46:</b> Lokalisation des Versuchsfelds (links) und Versuchsdesign (rechts) der Untersuchung 2016 in Kürbis, Betrieb Hege, Limburgerhof.....	91
<b>Abb. 47:</b> Bekämpfungserfolg der Segetalpflanzen [%] in Abhängigkeit von der Variante; Hackdurchgang am 14.06.2014 in Kürbis (a, b: Varianten mit unterschiedlichen Buchstaben sind statistisch unterscheidbar, Mittelwertvergleich nach Tukey, Irrtumswahrscheinlichkeit 5%; Fehlerindikatoren geben die Standardabweichung an) .....	101
<b>Abb. 48:</b> Bekämpfungserfolg der Segetalpflanzen [%] in Abhängigkeit von der Variante; Hackdurchgang am 18.06.2014 in Kürbis (a, b: Varianten mit unterschiedlichen Buchstaben sind statistisch unterscheidbar, Mittelwertvergleich nach Tukey, Irrtumswahrscheinlichkeit 5%; Fehlerindikatoren geben die Standardabweichung an) .....	102
<b>Abb. 49:</b> Bekämpfungserfolg der Segetalpflanzen [%] in Abhängigkeit von der Variante; gemessen am 14.06.2014 und 22.06.2014 in Kürbis (a, b: Varianten mit unterschiedlichen Buchstaben sind statistisch unterscheidbar, Mittelwertvergleich nach Kruskal Wallis, Irrtumswahrscheinlichkeit 5%; Fehlerindikatoren geben die Standardabweichung an) .....	103
<b>Abb. 50:</b> Bekämpfungserfolg der Segetalpflanzen [%] in Abhängigkeit von der Fahrweise; Hackdurchgang am 31.05.2015 in Kürbis (a, b: Varianten mit unterschiedlichen Buchstaben sind statistisch unterscheidbar, Mittelwertvergleich nach Wilcoxon, Irrtumswahrscheinlichkeit 5%; Fehlerindikatoren geben die Standardabweichung an) .....	104

- 
- Abb. 51:** Bekämpfungserfolg der Segetalpflanzen [%] in Abhängigkeit von der Fahrweise; Hackdurchgang am 11.06.2015 in Kürbis (a, b: Varianten mit unterschiedlichen Buchstaben sind statistisch unterscheidbar, Mittelwertvergleich nach Kruskal Wallis, Irrtumswahrscheinlichkeit 5%; Fehlerindikatoren geben die Standardabweichung an) ..... 105
- Abb. 52:** Bekämpfungserfolg der Segetalpflanzen [%] in Abhängigkeit von der Fahrweise; gemessen am 31.05.2015 und 21.06.2015 in Kürbis (a, b: Varianten mit unterschiedlichen Buchstaben sind statistisch unterscheidbar, Mittelwertvergleich nach Kruskal Wallis, Irrtumswahrscheinlichkeit 5%; Fehlerindikatoren geben die Standardabweichung an) ..... 106
- Abb. 53:** Bekämpfungserfolg der Segetalpflanzen [%] in Abhängigkeit von der Variante; Hackdurchgang am 21.05.2016 in Kürbis (a, b: Varianten mit unterschiedlichen Buchstaben sind statistisch unterscheidbar, Mittelwertvergleich nach Kruskal Wallis, Irrtumswahrscheinlichkeit 5%; Fehlerindikatoren geben die Standardabweichung an) ..... 107
- Abb. 54:** Bekämpfungserfolg der Segetalpflanzen [%] in Abhängigkeit von der Variante; Hackdurchgang am 26.05.2016 in Kürbis (a, b: Varianten mit unterschiedlichen Buchstaben sind statistisch unterscheidbar, Mittelwertvergleich nach Kruskal Wallis, Irrtumswahrscheinlichkeit 5%; Fehlerindikatoren geben die Standardabweichung an) ..... 108
- Abb. 55:** Bekämpfungserfolg der Segetalpflanzen [%] in Abhängigkeit von der Variante; gemessen am 21.05.2016 und 13.06.2016 in Kürbis (a, b: Varianten mit unterschiedlichen Buchstaben sind statistisch unterscheidbar, Mittelwertvergleich nach Kruskal Wallis, Irrtumswahrscheinlichkeit 5%; Fehlerindikatoren geben die Standardabweichung an) ..... 109
- Abb. 56:** Kulturschäden [%] in Abhängigkeit von der Fahrweise; Hackdurchgang am 14.06.2014 in Kürbis (a, b: Varianten mit unterschiedlichen Buchstaben sind statistisch unterscheidbar, Mittelwertvergleich nach Wilcoxon, Irrtumswahrscheinlichkeit 5%; Fehlerindikatoren geben die Standardabweichung an) ..... 111
-

- 
- Abb. 57:** Kulturschäden [%] in Abhängigkeit von der Fahrweise; Hackdurchgang am 18.06.2014 in Kürbis (a, b: Varianten mit unterschiedlichen Buchstaben sind statistisch unterscheidbar, Mittelwertvergleich nach Kruskal Wallis, Irrtumswahrscheinlichkeit 5%; Fehlerindikatoren geben die Standardabweichung an) ..... 112
- Abb. 58:** Kumulierte Kulturschäden [%] in Abhängigkeit von der Fahrweise; gemessen am 14.06.2014 und 18.06.2014 in Kürbis (a, b: Varianten mit unterschiedlichen Buchstaben sind statistisch unterscheidbar, Mittelwertvergleich nach Wilcoxon, Irrtumswahrscheinlichkeit 5%; Fehlerindikatoren geben die Standardabweichung an) ..... 113
- Abb. 59:** Kulturschäden [%] in Abhängigkeit von der Fahrweise; Hackdurchgang am 31.05.2015 in Kürbis (a, b: Varianten mit unterschiedlichen Buchstaben sind statistisch unterscheidbar, Mittelwertvergleich nach Wilcoxon, Irrtumswahrscheinlichkeit 5%; Fehlerindikatoren geben die Standardabweichung an) ..... 114
- Abb. 60:** Kulturschäden [%] in Abhängigkeit von der Fahrweise; Hackdurchgang am 11.06.2015 in Kürbis (a, b: Varianten mit unterschiedlichen Buchstaben sind statistisch unterscheidbar, Mittelwertvergleich nach Wilcoxon, Irrtumswahrscheinlichkeit 5%; Fehlerindikatoren geben die Standardabweichung an) ..... 115
- Abb. 61:** Kumulierte Kulturschäden [%] in Abhängigkeit von der Fahrweise; gemessen am 31.05.2015 und 11.06.2015 in Kürbis (a, b: Varianten mit unterschiedlichen Buchstaben sind statistisch unterscheidbar, Mittelwertvergleich nach Wilcoxon, Irrtumswahrscheinlichkeit 5%; Fehlerindikatoren geben die Standardabweichung an) ..... 116
- Abb. 62:** Kulturschäden [%] in Abhängigkeit von der Fahrweise; Hackdurchgang am 21.05.2016 in Kürbis (a, b: Varianten mit unterschiedlichen Buchstaben sind statistisch unterscheidbar, Mittelwertvergleich nach Wilcoxon, Irrtumswahrscheinlichkeit 5%; Fehlerindikatoren geben die Standardabweichung an) ..... 117

---

<b>Abb. 63:</b> Kulturschäden [%] in Abhängigkeit von der Fahrweise; Hackdurchgang am 26.05.2016 in Kürbis (a, b: Varianten mit unterschiedlichen Buchstaben sind statistisch unterscheidbar, Mittelwertvergleich nach Wilcoxon, Irrtumswahrscheinlichkeit 5%; Fehlerindikatoren geben die Standardabweichung an) .....	118
<b>Abb. 64:</b> Kumulierte Kulturschäden [%] in Abhängigkeit von der Fahrweise; gemessen am 21.05.2016 und 26.05.2016 in Kürbis (a, b: Varianten mit unterschiedlichen Buchstaben sind statistisch unterscheidbar, Mittelwertvergleich nach Wilcoxon, Irrtumswahrscheinlichkeit 5%; Fehlerindikatoren geben die Standardabweichung an) .....	119
<b>Abb. 65:</b> Draufsicht des UV-C Geräts für Golfrasen; stationär aufgestellt zur Behandlung von Kürbis .....	134
<b>Abb. 66:</b> Großer Abstand zur Zieloberfläche bei Hokkaido, verursacht durch den Strunk .....	137
<b>Abb. 67:</b> UV-C Gewächshausmodul zur Bestrahlung von Topfreben; Quelle: HAMM et al. (2016).....	139
<b>Abb. 68:</b> Allium cepa nach UV-C Bestrahlung mit $80 \text{ mWs}\cdot\text{cm}^{-2}$ (links) und $320 \text{ mWs}\cdot\text{cm}^{-2}$ (rechts); Quelle: KLÄRNER (2016) .....	139
<b>Abb. 69:</b> Durchschnittliche Haltbarkeit [Wochen] in Abhängigkeit von der Bestrahlungszeit [sec]; Untersuchung an Speisekürbis 2015, Betrieb Hege, Limburgerhof (a, b: Varianten mit unterschiedlichen Buchstaben sind statistisch unterscheidbar, Mittelwertvergleich nach Kruskal Wallis, Irrtumswahrscheinlichkeit 5%, Fehlerindikatoren geben die Standardabweichung an) .....	141
<b>Abb. 70:</b> Durchschnittliche Haltbarkeit [Wochen] in Abhängigkeit von der Bestrahlungszeit [sec]; Untersuchung an Speisezwiebeln 2015, Betrieb Hege, Limburgerhof (a, b: Varianten mit unterschiedlichen Buchstaben sind statistisch unterscheidbar, Mittelwertvergleich nach Kruskal Wallis, Irrtumswahrscheinlichkeit 5%, Fehlerindikatoren geben die Standardabweichung an) .....	142

## Formelverzeichnis

<b>Formel 1:</b> Definition der Leistung .....	45
<b>Formel 2:</b> Definition der Bestrahlungsstärke .....	45
<b>Formel 3:</b> Berechnung der UV-Dosis .....	45
<b>Formel 4:</b> Berechnung des Bekämpfungserfolges.....	64
<b>Formel 5:</b> Berechnung der Kulturschäden bei geringen Pflanzdichten.....	67
<b>Formel 6:</b> Berechnung der Kulturschäden bei hohen Pflanzdichten .....	67
<b>Formel 7:</b> Herleitung und Berechnung des Wasservolumens im Boden.....	69
<b>Formel 8:</b> Berechnung Volumenprozent des Wassers in Boden .....	69

---

## Tabellenverzeichnis

<b>Tab. 1:</b> Vorfahrtsgeschwindigkeiten der praxisüblichen Beikrautregulierungsgeräte im Gemüsebau; Quelle: WEBER (1997) .....	27
<b>Tab. 2:</b> Praxisübliche Einteilung der Bodentypen; modifiziert nach SCHMIDT (2010).....	28
<b>Tab. 3:</b> Optimaler Feuchtegehalt zur mechanischen Beikrautregulierung, nach Bodentyp gegliedert; modifiziert nach WEBER (1997) .....	28
<b>Tab. 4:</b> Variantendefinition der Untersuchung 2014 in Kürbis, Betrieb Hege, Limburgerhof .....	73
<b>Tab. 5:</b> Variantendefinition der Untersuchung 2015 in Kürbis, Betrieb Hege, Limburgerhof .....	83
<b>Tab. 6:</b> Neue Variantendefinition der Untersuchung 2015 in Kürbis, Betrieb Hege, Limburgerhof .....	84
<b>Tab. 7:</b> Variantendefinition der Untersuchung 2016 in Kürbis, Betrieb Hege, Limburgerhof .....	90
<b>Tab. 8:</b> Ausgewählte Klimadaten der Wetterstation in Schifferstadt während des Untersuchungszeitraums vom 11.06.2014 bis 22.06.2014, für die Untersuchung 2014 in Kürbis, Betrieb Hege, Limburgerhof .....	94
<b>Tab. 9:</b> Ausgewählte Klimadaten der Wetterstation in Schifferstadt während des Untersuchungszeitraums vom 28.05.2015 bis 21.06.2015, für die Untersuchung 2015 in Kürbis, Betrieb Hege, Limburgerhof .....	95
<b>Tab. 10:</b> Ausgewählte Klimadaten der Wetterstation in Schifferstadt während des Untersuchungszeitraums vom 18.05.2016 bis 13.06.2016, für die Untersuchung 2016 in Kürbis, Betrieb Hege, Limburgerhof .....	97
<b>Tab. 11:</b> Bodenfeuchtegehalte der Untersuchung in Kürbis 2015, Betrieb Hege, Limburgerhof .....	100
<b>Tab. 12:</b> Bodenfeuchtegehalte der Untersuchung in Kürbis 2016, Betrieb Hege, Limburgerhof .....	100
<b>Tab. 13:</b> Anpassung der Maschinenkosten des Arbeitsgangs „Hacken“ im Speisezwiebelanbau; modifiziert nach KTBL (2013).....	123

---

<b>Tab. 14:</b> Kosten, Zeitbedarf, Dieserverbrauch und Anzahl der Arbeitsgänge des Segetalpflanzenmanagement im Speisezwiebelanbau; modifiziert nach KTBL (2013) .....	123
<b>Tab. 15:</b> Kosten des praxisüblichen Hackverfahrens, verglichen mit den Kosten des Verfahrens mit Anbaugerätsteuerung im Speisezwiebelanbau .....	124
<b>Tab. 16:</b> Kosten, Zeitbedarf, Dieserverbrauch und Anzahl der Arbeitsgänge des optimierten Segetalpflanzenmanagement im Speisezwiebelanbau.....	125
<b>Tab. 17:</b> Anpassung der Maschinenkosten des Arbeitsgangs „Hacken“ in Speisekürbis; modifiziert nach KTBL (2013) .....	128
<b>Tab. 18:</b> Kosten, Zeitbedarf, Dieserverbrauch und Anzahl der Arbeitsgänge des Segetalpflanzenmanagement im Speisekürbisanbau (auf Mulchfolie); modifiziert nach KTBL (2013) .....	128
<b>Tab. 19:</b> Kosten des praxisüblichen Hackverfahrens, verglichen mit den Kosten des Verfahrens mit Anbaugerätsteuerung im Speisekürbisanbau .....	129
<b>Tab. 20:</b> Kosten, Zeitbedarf, Dieserverbrauch und Anzahl der Arbeitsgänge des optimierten Segetalpflanzenmanagement im Speisekürbisanbau (auf Mulchfolie) .....	130
<b>Tab. 21:</b> Kosten, Zeitbedarf, Dieserverbrauch und Anzahl der Arbeitsgänge des Segetalpflanzenmanagement im Speisekürbisanbau (Direktsaat); modifiziert nach KTBL (2013) .....	131
<b>Tab. 22:</b> Kosten, Zeitbedarf, Dieserverbrauch und Anzahl der Arbeitsgänge des optimierten Segetalpflanzenmanagement im Speisekürbisanbau (Direktsaat).....	131
<b>Tab. 23:</b> Zeitdauer [sec] und Dosis [ $\text{mWs}\cdot\text{cm}^{-2}$ ] der UV-C Bestrahlungsvarianten 2015 an Knoblauchpflanzgut zur Minderung von OYDV, Betrieb Hege, Limburgerhof .....	136
<b>Tab. 24:</b> Ergebnisse des DAS-ELISA-Verfahrens zur Testung von OYDV an Knoblauchpflanzgut 2015, Betrieb Hege, Limburgerhof; Messwerte und Bewertung im OD 405 nm Wellenbereich .....	140

## Abkürzungsverzeichnis

Akh·ha <sup>-1</sup> :	Arbeitskraftstunden je Hektar
CCLS:	Closed Center Load Sensing
DAS-ELISA:	Double Antibody Sandwich Enzyme Linked Immunosorbent Assay
DGPS:	Differential Global Positioning System
ED <sub>50</sub> :	Effektivdosis 50 %
ED <sub>95</sub> :	Effektivdosis 95 %
ELISA:	Enzyme Linked Immunosorbent Assay
GNSS:	Global Navigation Satellite Systems
GPS:	Global Positioning System
HD:	High Definition
K·ms <sup>-1</sup> :	Kelvin je Millisekunde
MAC:	Master Auxiliary Concept
mJ·cm <sup>-2</sup> :	Millijoule pro Quadratcentimeter
mWs·cm <sup>-2</sup> :	Milliwattsekunde pro Quadratcentimeter
OYDV:	Onion yellow dwarf virus
ppm:	parts per million
RTK:	Real Time Kinematic
UV-C:	der Bereich C der Ultraviolettstrahlung
Vol.-%:	Volumenprozent
VRS:	Virtual Reference Station

# 1 Einleitung

Der Fortschritt unserer Gesellschaft wurde in den letzten Jahren vor allem durch die Elektronikbranche vorangetrieben. Immer größere Rechnerleistungen können riesige Datenmengen in kürzester Zeit verarbeiten. Neben Smartphones, Tablets und Cloudservice hat vor allem der Austausch über soziale Netzwerke zugenommen. Ein Großteil der Menschen ist heute „online“ und die Digitalisierung hat längst Einzug in unseren Alltag gehalten. Nicht ohne Grund wird der Beginn des 21. Jahrhunderts als Beginn des digitalen Zeitalters bezeichnet (HILBERT und LÓPEZ 2011). Mit der Breitbandtechnologie ist der digitale Datenaustausch weltweit nicht nur beschleunigt worden, auch die interne Vernetzung moderner Unternehmen konnte verbessert werden. Moderne Maschinen können nicht nur programmiert werden, sie können sich auch an die aktuellen Gegebenheiten anpassen und untereinander kommunizieren. Die Produktionsabläufe werden so zunehmend effizienter und ressourcenschonender. Dieser Entwicklungsschritt wird auch als Industrie 4.0 bezeichnet. Leitgedanke ist nicht nur der größer werdende Fachkräftemangel, vielmehr wird der Mensch von Routineaufgaben entbunden und kann sich so auf kreative Prozesse konzentrieren (Forschungsunion Wirtschaft – Wissenschaft 2013), wodurch neue Ideen generiert werden können.

Abgeleitet von der Industrie findet sich zunehmend auch der Begriff Landwirtschaft 4.0. Auch die Digitalisierung der Landwirtschaft entwickelte sich in den letzten Jahren stetig und schnell und hat das Niveau der Industrie teilweise schon übertroffen. Zunehmend werden die Landmaschinen elektronisch „intelligent“ (SENTKER 2014). Angefangen bei der Steuerung von Arbeitsmaschinen über Bedienterminals führte die zusätzliche Einführung von GPS basierten Lenkautomaten zu einer Entbindung des Fahrers von seinen Routineaufgaben und steigerte so die Arbeitsqualität. Durch die Vernetzung mit dem Internet ist es dem Betriebsleiter möglich, die Arbeit direkt am Hof PC zu verfolgen und zu dokumentieren. Und die Vernetzung greift zunehmend noch tiefer. So kommunizieren Traktoren und Geräte via ISOBUS miteinander und können die Arbeitsparameter via Tractor Implement Management (kurz: TIM) den aktuellen Umweltbedingungen anpassen. Die Dokumentation dieser großen Datenströme läuft im Hintergrund autonom ab. Ziel ist die Einsparung von Betriebsmittelressourcen, um so die Umwelt zu schonen und Kosten zu sparen. Gleichzeitig

verhilft die Dokumentation in Echtzeit zu mehr Transparenz. Dies wird im Kontext der umweltpolitischen Entwicklungen zunehmend wichtiger. Die Bestrebungen gehen hier vor allem hin zum Gedanken der Nachhaltigkeit. Gemeint ist dabei vor allem der schonende Umgang mit endlichen Ressourcen, der Minimierung von Emissionen und den Stoffeinträgen in die Umwelt im Hinblick auf die nachfolgende Generationen (BMELV 2008). Vor allem die Landwirtschaft leistet hierzu einen wertvollen Beitrag. Dies führt zwangsläufig zu einer Veränderung der aktuellen Landbewirtschaftungsmethoden. Neben dem Umweltaspekt führt auch der demographische Wandel zu einer Veränderung der Methoden in der Landwirtschaft. Immer weniger Betriebe bewirtschaften die gleiche landwirtschaftliche Nutzfläche, wodurch die Arbeit je Betrieb zunimmt. Gleichzeitig arbeiten weniger Arbeitnehmer in der Landwirtschaft und Fachkräfte sind schwieriger zu bekommen.

## **1.1 Problemstellung**

Auch der moderne Gemüsebau wird durch diese Entwicklung geprägt. Der Zertifizierungsaufwand und die Dokumentation nehmen zu. Arbeitskräfte sind zunehmend schwieriger zu akquirieren und die Vorgaben zu Arbeitszeit und Gehalt werden weniger flexibel. Gleichzeitig steigen die gesetzlichen Vorgaben zum Pflanzenschutz- und Düngemittleinsatz. Vor allem durch die Veränderungen des Pflanzenschutzgesetzes (Deutscher Bundestag 2012) müssen vorhandene Landbaumethoden angepasst werden. Segetalpflanzen stellen speziell im Gemüsebau ein Problem dar, da die sensiblen Kulturen oft nicht den kompletten Boden abdecken können und teilweise sehr konkurrenzschwach sind. Dominiert der Wildkrautbesatz, so ist mit Ertragseinbußen von bis zu 60 % zu rechnen (BECK 2009). Um dieses Szenario zu umgehen kann im konventionellen Anbau nicht auf den Einsatz von Herbiziden verzichtet werden. Im ökologischen Anbau stehen den Produzenten ausschließlich mechanische und physikalische Maßnahmen zur Verfügung. Mit steigender Tendenz finden diese Verfahren jedoch auch ihren Einsatz im konventionellen Anbau. Die Gründe hierfür sind vielschichtig. Teilweise fehlen Herbizide für bestimmte Kulturen, wodurch Wirkungslücken entstehen. Ein Beispiel hierfür ist der Wegfall des Wirkstoffs Linuron in Petersilie (LANDES und KRUSCHE 2014). Weiterhin wird auf Herbizide verzichtet, um Abdriftschäden (SETZEPFAND 2016) oder Rückstände im Produkt zu

vermeiden (BVL 2013). Neben diesen Anforderungen an den modernen Herbizideinsatz bestehen zudem die Anforderungen der Qualitätssiegel. Mit der Novellierung des Pflanzenschutzgesetzes (Deutscher Bundestag 2012) wurde gleichzeitig die Umsetzung des Anhangs III der Richtlinie 2009/128/EG Absatz 4 (Europäisches Parlament 23.11.2009) beschlossen. Mittels dieser Richtlinie wird der nachhaltige Pflanzenschutzmitteleinsatz geregelt. Dabei gilt: „Nachhaltigen biologischen, physikalischen und anderen nichtchemischen Methoden ist der Vorzug vor chemischen Methoden zu geben, wenn sich mit ihnen ein zufriedenstellendes Ergebnis bei der Bekämpfung von Schädlingen erzielen lässt.“ (Europäisches Parlament 23.11.2009). Die Umsetzung dieser Richtlinie ist durch den Nationalen Aktionsplan zur nachhaltigen Anwendung von Pflanzenschutzmitteln (kurz: NAP) geregelt (PflSchG Abschnitt 2 §4). Die Ziele des Nationalen Aktionsplans bestehen unter anderem darin, alternative Methoden zu fördern und weiterzuentwickeln (BMEL 2013). Gerade bei den mechanischen Beikrautregulationsverfahren besteht hier Nachholbedarf, da diese in der Praxis oft eine sehr geringe Vorfahrtsgeschwindigkeit und somit eine geringe Flächenleistung aufweisen. Zudem wird oft mit einem großen Sicherheitsabstand zur Kulturreihe gefahren, wodurch ein breites Band mit hohem Einsatz an Arbeitskräften gejätet werden muss (WEBER 1992). Um die manuelle Arbeitskraft zu reduzieren wurden unterschiedliche Steuerungsverfahren entwickelt. Werden viele verschiedene Kulturen von einem Betrieb angebaut, so bieten sich GPS-gestützte Anbaugerätesteuern an (HEGE 2013). Die Probleme der am Markt befindlichen Technik liegen jedoch im Handling und dem Knowhow, was die Durchsetzung des Verfahrens auf der Mehrzahl der Betriebe bisher verhindert hat.

Neben der Segetalpflanzenregulation stellt die Bekämpfung von Pilzkrankheiten eine weitere Herausforderung des ökologischen Gemüseanbaus dar. Die eingesetzten Mittel beschränken sich im Wesentlichen auf Kupfer- und Schwefelpräparate oder Pflanzenstärkungsmittel, wie unterschiedliche Tees und Pflanzenextrakte (BECK 2009). Der häufige Einsatz von Kupfer führt in der Regel jedoch zu einer Anreicherung des Gehaltes im Boden. Hohe Bodengehalte haben dabei einen negativen Einfluss auf das Bodenleben. Die Aufnahme von Kupfer in die Pflanzenschutzmittelliste gilt daher als umstritten (BÖLW e.V. 2010). Durch Änderung der EU Richtlinie 91/141/EWG ist eine Neuaufnahme oder Verlängerung von kupferhaltigen Präparaten nur noch bis 30. November 2016 möglich (Europäisches Parlament 23.04.2009).

Aus diesem Grund sind weitere Forschungen zur Reduktion bzw. zum Ersatz von kupferhaltigen Pflanzenschutzmitteln notwendig. Neben Forschungen zu weiteren spritzfähigen Präparaten zielen neueste Forschungsbestreben auf physikalische Maßnahmen ab. Die Bestrahlung mit UV-C Licht hinterlässt keine Stoffeinträge in der Umwelt und zeigt im Weinbau schon erste Erfolge (BERKELMANN-LÖHNERTZ 2016). Im Bereich des Gemüsebaus konnten bisher nur wenige Ergebnisse bereitgestellt werden, die sich vor allem auf den geschützten Anbau beziehen. Erfahrungen im deutschen Freilandgemüsebau konnten bisher noch nicht gesammelt werden, weshalb hier die Datengrundlage fehlt.

## 1.2 Ziele der Arbeit

Ziel der vorliegenden Arbeit ist die Verbesserung des Segetalpflanzen- und des Krankheitsmanagements im ökologischen Freilandgemüsebau. Im ersten Teil dieser Dissertation soll eine neuartige Anbaugerätsteuerung auf Basis der hochgenauen RTK-Technik entwickelt werden. Der Prototyp soll in unterschiedlichen Kulturen mit der am Markt befindlichen Technik in praktischen Hackversuchen verglichen werden. Gegenüber der praxisüblichen Technik werden vor allem das Handling und die Genauigkeit überprüft. Dabei sollen folgende Hypothesen geklärt werden:

1. Die Handhabung der neuartigen Anbaugerätsteuerung ist besser als bei der am Markt befindlichen Technik.
2. Die neuartige Anbaugerätsteuerung weist die gleiche Genauigkeit auf wie am Markt befindliche Technik.

Anschließend soll eine ökonomische Analyse zu ausgewählten Kulturen durchgeführt werden. Am Ende der Projektlaufzeit soll den Gemüsebauern eine neue, praktikable Anbaugerätsteuerung offeriert werden können.

Im zweiten Teil dieser Dissertation sollen erste Erfahrungen mit der UV-C Technik im Freilandgemüsebau gesammelt werden. Als Beispiel wird der phytopathogene Pilz *Peronospora destructor* an Speisezwiebeln (*Allium cepa*) herangezogen. Bevor eine Überprüfung der Technik in der Praxis stattfinden kann, soll in Laborversuchen zunächst die letale Strahlungs-dosis bestimmt werden. In einem weiteren Schritt sollen Lagerversuche mit Kürbissen (*Cucurbita maxima*) und Speisezwiebeln (*Allium cepa*) durchgeführt werden.

Weiterhin sollen Versuche mit Knoblauch (*Allium sativum*) die Auswirkungen der Strahlung auf Pflanzguterreger zeigen. Die zugrunde liegenden Hypothesen werden wie folgt definiert:

1. *Peronospora destructor* lässt sich durch die UV-C Bestrahlung minimieren.
2. Der UV-C Licht Einsatz verlängert die Haltbarkeit der Lagerware.
3. Das UV-C Licht eliminiert Phytopathogene bei Pflanzgut.

Somit sollen erste Erfahrung im Bereich des UV-C Licht als Pflanzenschutzmittel gesammelt werden, die der Forschung zur Verfügung gestellt werden können.

## 2 Stand des Wissens

Der moderne Gemüsebau stellt hohe Ansprüche an die Qualität der durchgeführten Bewirtschaftungsmaßnahmen. Ein besonderes Augenmerk wird auf die Aussaat und Pflege der empfindlichen Kulturen gelegt, um Kulturschäden vorzubeugen und optimale Wachstumsbedingungen zu schaffen. Oft entscheiden wenige Millimeter über ein optimales Arbeitsergebnis. Um das Arbeitsbild der Anbaugeräte zu verbessern, werden diese teilweise aktiv angesteuert. Die Idee der aktiven Anbaugerätsteuerung wurde schon zu Zeiten der Pferdegespanne umgesetzt. Damals war neben dem Pferdelenker auch ein Maschinenlenker mit auf dem Feld. Seine Aufgabe war es das Anbaugerät zu lenken und die Fahrfehler des Zugtieres auszugleichen. Somit konnte eine exakte Reihenführung sichergestellt werden. Weiterhin konnte der „Fahrer“ sich auf das Gespann und das „Fahren“ konzentrieren und wurde so entlastet. Auch als die Zeit der Pferdegespanne vorüber war, blieb der zweite Lenker vor allem während Hackarbeiten erhalten, um eine höhere Präzision gewährleisten zu können und Kulturschäden zu verhindern (Abb. 1).



**Abb. 1:** Anbaugerätsteuerungen während des Hackeinsatzes auf dem Betrieb Hege im Wandel der Zeit: links ca. 1949 mit Pferd, rechts 2005 mit Traktor;

Quelle: Archiv Hege

Im Zuge der zunehmenden Rationalisierung und Digitalisierung der Landwirtschaft hat sich auch die aktive Anbaugerätsteuerung verändert. Den Platz des Maschinenlenkers nehmen heute Sensoren ein. Die Verarbeitung der Daten übernimmt der Arbeitsrechner. Um große

Anbaugeräte durch Reihenbestände zu führen, wurden in den letzten 20 Jahren unterschiedliche Methoden entwickelt. Die Erntemaschinen für den Gemüsebau arbeiten meist mit mechanischen Tastern, die mit einem Berührungssensor verbunden sind. Da die feinen Kulturen während der Pflegemaßnahmen noch nicht genügend Widerstand gegenüber mechanischen Tastern bieten können, müssen andere Sensoren für Hackarbeiten genutzt werden. Diese lassen sich in drei Kernbereiche untergliedern: die der optischen, der berührungslosen und die der GPS-gestützten Sensoren. Alle Verfahren bieten die Möglichkeit Anbaugeräte zentimetergenau durch Reihenbestände zu navigieren.

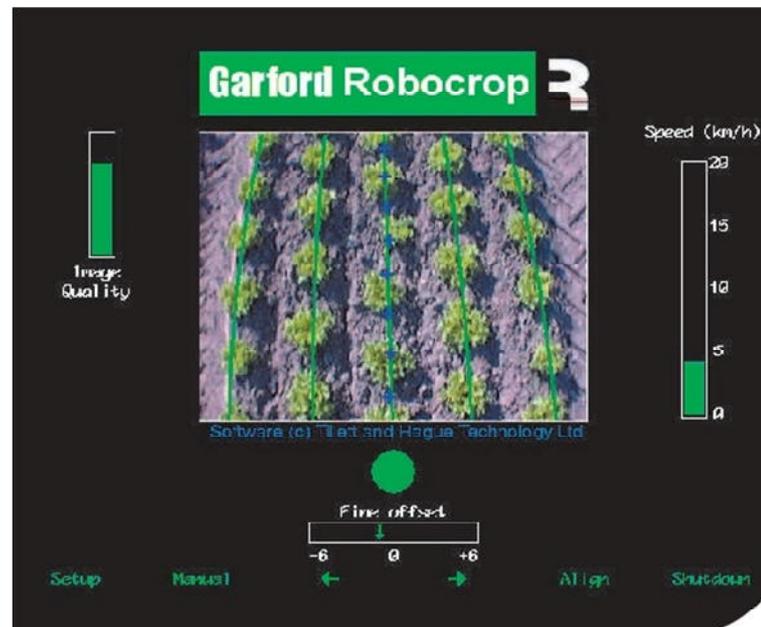
### **2.1.1 Optische Anbaugerätesteuerung**

Die erste Kamerasteuerung für den landwirtschaftlichen Einsatz wurde auf der Agritechnica 1993 vom Ingenieurbüro Manfred Bareiss, Winzheim, Deutschland, zur Steuerung von Hackgeräten präsentiert (KEICHER 2002). Bis diese kommerziell erworben werden konnten, dauerte es bis 1999. Die Firma ECO-DAN A/S, Kvistgaard, Dänemark, stellte mit dem ATC-System (Advanced Tool Control System) eines der ersten Systeme zur Steuerung von Hackmaschinen vor. Das Kernstück der Steuerung bildet eine 2D Kamera, die etwa 25 Bilder pro Sekunde aufnehmen kann (MÖLLER 2010). Die gewonnenen Aufnahmen werden mittels Bildanalyse in einem Arbeitsrechner ausgewertet, um so die grünen Bildpixel herauszufiltern. Eine gleichmäßige Verteilung der grünen Bildpixel nimmt der Rechner als Linienstruktur bzw. Kulturreihe an. Dies erfordert einen Mindestabstand der Kulturpflanzen. Sollte der Abstand größer sein, oder sollten häufig Lücken im Bestand auftreten, so wird der Einbau einer zweiten Kamera empfohlen. Ebenfalls muss eine Mindestkulturgröße von ca. 5 cm bei Zwiebeln oder ein Mindestdurchmesser von ca. 3 cm bei Salat für eine sichere Erkennung gegeben sein (BÖHRNSEN 2001). Die Genauigkeit der Abtastung wird mit +/- 3 cm angegeben. Um auch im Voraufbau arbeiten zu können, wird bei der Saat eine Furche gezogen und die Kamera mit einem zusätzlichen Laserlicht ausgerüstet. Durch die Brechung des Laserlichts wird die Furche abgetastet (Abb. 2).



**Abb. 2:** Schema der Bestands-(links) und Furchenabastung (rechts) mit einer Kamera der Firma ECO-DAN; Quelle: ECO-DAN (2013)

Neben ECO-DAN entwickelten zwei weitere Hersteller eine Kamera zur Steuerung von Hackgeräten. Die Firma GARFORD Farm Machinery Ltd. aus Peterborough, England setzt bei ihrer ROBOCROP Steuerung auf eine 2D Kamera, die etwa 30 Bilder pro Sekunde aufnimmt. Durch den hinterlegten Algorithmus können auch mehrere Reihen gleichzeitig abgetastet werden. Das System sucht dann nach Gitternetzstrukturen (Abb. 3).



**Abb. 3:** Ausschnitt des Arbeitsrechners der ROBOCROP Steuerung beim Hacken von Salat; Quelle: GARFORD (2016)

Somit können die Einsatzsicherheit erhöht und kleinere Pflanzen abgetastet werden. Der Hersteller gibt eine Mindestpflanzengröße von 1 cm an. Zudem kann das System mit einer optimalen Erkennung im Wellenlängenbereich von 620 nm bestellt werden und ist somit auch für Kulturpflanzen mit roten Blättern geeignet. Dies bietet Vorteile bei Salaten, wie etwa Lollo Bionda oder Eichblatt rot (GARFORD 2016).

Die Firma F. POULSEN ENGINEERING APS. aus Hvalsoe, Dänemark setzt ebenfalls auf eine 2D Kamera. Auch dieser Hersteller gibt eine Mindesterkennungsgröße von 1 cm vor. Die Genauigkeiten der beiden Systeme werden mit ca. 1 cm angegeben. Die Einsatzgrenzen der Kamerasysteme liegen in stark verunkrauteten Beständen, da diese keine Gruppierung der Grünpixel zulassen. Gleiches gilt für stark geschlossene Bestände (MÜCKE 2012). Ebenso können die Kameras entweder im Rotbereich oder im Grünbereich gefahren werden (EICHBERG und MÜLLER 2001). Dies führt zu Erkennungsschwierigkeiten bei Kulturen, die einen Farbwechsel im Laufe der Kulturperiode vollziehen, wie beispielsweise Radicchio. Weiterhin können Schattenwurf oder Reflexionen zu einer Irritation der Kamerasysteme führen. Unter schlechten Lichtbedingungen, wie etwa bei Arbeiten in der Dämmerung oder an bewölkten Tagen, muss für eine gute Ausleuchtung mittels Zusatzscheinwerfern gesorgt werden.

Im Jahr 2005 entwickelte die Firma ECO-DAN A/S eine Stereokamera, die auch als 3D Kamera bezeichnet wird. Diese nimmt von ihrer Umwelt gleichzeitig zwei Bilder aus unterschiedlichen Perspektiven auf. Der Abstand der beiden Linsen zueinander ist festgelegt und wird als Baseline bezeichnet. Während der Bildanalyse werden die Bilder auf gleiche Merkmale abgetastet. Durch festgelegte Parameter, wie etwa Linsenabstand, Anbauhöhe und Winkel der Kamera ist es möglich den Abstand zum Boden bzw. zur Groundline zu berechnen und somit Strukturen zu erkennen (MÖLLER 2010). Somit können auch Feldstrukturen, wie Furchen oder Dämme erkannt werden. Ein zusätzlicher Laserstrahl zur Abtastung ist somit nicht mehr notwendig. Seit der Übernahme von ECO-DAN A/S im Jahr 2006 vertreibt die Firma CLAAS E-Systems KGaA mbH & Co KG, Gütersloh, Deutschland, ehemals AGCROCOM das Kamerasystem (ROLF 2010). Gleichzeitig wurde auch das Einsatzspektrum der Technik erweitert. In Verbindung mit einer direkten Integration in die Lenkhydraulik ist es möglich Traktoren und andere selbstfahrende Arbeitsmaschinen an

Schwaden oder Weinreben zu navigieren. Die integrierte Lösung wird unter der Bezeichnung CAM Pilot vertrieben (Abb. 4).



**Abb. 4:** CAM Pilot zur Steuerung eines selbstfahrenden Feldhäckslers, hier entlang eines Heuschwades; Quelle: CLAAS (2016)

Für die Kamerasteuerung ist eine Genauigkeit von 2 bis 3 cm bei unter 10 km/h Vorfahrtsgeschwindigkeit angegeben, die jedoch mit zunehmender Geschwindigkeit abnimmt. Die CULTI CAM wird von vielen Hacktechnikherstellern als Grundlage für das Steuerungskonzept genutzt:

- BEDNAR FMT s.r.o., Rychnov nad Kněžnou, Tschechische Republik
- CARRÉ SAS, Saint Martin des Noyères, Frankreich
- EINBÖCK GmbH & Co.KG, Dorf an der Pram, Österreich
- Thomas HATZENBICHLER Agro-Technik GmbH, St. Andrä, Österreich
- Machinefabriek STEKETEE BV, Stad ann 't Haringvliet, Niederlande

Die Firma Maschinenfabrik SCHMOTZER GmbH, Bad Windsheim, Deutschland, entwickelte im Jahr 2015 eine eigene Kamerasteuerung. Diese basiert auf einer hochauflösenden HD-Kamera mit einer Bildrate von 30 Bildern pro Sekunde. Der hinterlegte Algorithmus erlaubt zusätzlich die Unterscheidung von hell- und dunkelgrün Tönen. Somit kann auch bei schwierigen Lichtverhältnissen oder starker Verunkrautung exakt gesteuert werden. So ist es dem System auch möglich, Kulturpflanzen auf einer Wiese zu erkennen (Abb. 5).



**Abb. 5:** Abtastung einer Kulturreihenattrappe auf einer Wiese mit einer Kamera der Firma SCHMOTZER; Quelle: SCHMOTZER (2015b)

Zum einen ist diese genaue Erkennung durch einen sehr leistungsstarken Arbeitsrechner möglich. Dieser ist platzsparend in das Bedienterminal integriert. Zum anderen erlaubt der hinterlegte Algorithmus eine Einzelpflanzerkennung. Je Kulturart sind drei unterschiedliche Kulturgrößen hinterlegt. Der Fahrer muss zum Start die gewünschte Kultur und der Größenstadium am Touchterminal eingeben (SCHMOTZER 2015b).

Die Firma STEKETEE BV aus den Niederlanden entwickelte in Zusammenarbeit mit der WAGENINGEN UNIVERSITY RESEARCH, Niederlande, eine eigene Kamerasteuerung für das automatische Hackgerät IC Weeder (STEKETEE 2013). Der IC Weeder hackt sowohl Beikräuter im Zwischenreihenbereich, als auch in der Kulturreihe. Hierzu wird eine hochauflösende Industriekamera verwendet. Der hinterlegte Bildverarbeitungsalgorithmus wurde selbst entwickelt. Die Kamera erlaubt eine Einzelpflanzerkennung anhand der Farbe und des Formats. Die Farbeerkennung der Kulturpflanzen erfolgt bei STEKETEE automatisch, wodurch auch die Erkennung von Mischfarben möglich ist. Um Reflexionen und Schattenwurf zu vermeiden, sitzen die Kameras beim IC Weeder hinter einem Gehäuse und werden durch LED Strahler ausgeleuchtet. Der Mindestreihenabstand beträgt 25 cm. Der

Abstand in der Reihe wird mit 10 cm angegeben. Die Bedienung des Weeders erfolgt über ein Touchterminal und lässt sich auf jedem handelsüblichen Tablet installieren. Weiterhin kann das Modul durch weitere Funktionen individuell ergänzt werden (STEKETEE 2013). So kann der IC Weeder als IC Scout (ohne Hackwerkzeuge) zur Bestandssichtung in der Züchtung verwendet werden. Durch einen neu entwickelten Algorithmus ist es mit der Kamera möglich praxisübliche Hackgeräte zu steuern. STEKETEE vertreibt diese Variante unter dem Namen IC Light (Abb. 6) neben der von CLAAS gelieferten CULTI CAM.



**Abb. 6:** IC Light Kamera der Firma STEKETEE angebaut an eine Hacke (links) und Ausschnitt der Bedienoberfläche (rechts); Quelle: STEKETEE (2015)

Die Bedienung des IC Light erfolgt dabei in Anlehnung zum IC Weeder. Ebenfalls ist bei gegebener Internetverbindung ein Fernwartungsmodul integriert (STEKETEE 2015).

### 2.1.2 Berührungslose Anbaugerätesteuerung

Der Markt für berührungslose Anbaugerätesteuerungen lässt sich im Wesentlichen auf die Ultraschalltechnik zurückführen. Ultraschall liegt oberhalb des hörbaren Bereichs mit einer Frequenz ab etwa 16 kHz (DUBBEL et al. 2007). Der PSR SONIC der Firma REICHHARDT GmbH Steuerungstechnik arbeitet mit mehreren Ultraschallsensoren. Dabei sendet die SONIC-Einheit Ultraschallwellen aus, die von einem Damm, einer Furche oder der Kulturreihe reflektiert werden (Abb. 7).



**Abb. 7:** Funktionsweise der SONIC Einheit von REICHHARDT schematisch dargestellt auf einem Zwiebelfeld

Die Sensoren analysieren die zurück geworfenen Wellen und führen eine Laufzeitmessung durch. Somit kann die Entfernung zum Hindernis bzw. der Kulturreihe gemessen werden. Wichtig ist die Symmetrie der Sensoren, da die Einheit dann mittig zur Reihe fährt, wenn alle Sensoren die gleiche Entfernung messen. Um die Einsatzsicherheit zu verbessern empfiehlt sich bei präzisen Hackarbeiten die Anbringung von vier Sensoren über zwei Kulturreihen. Die Mindestkulturgröße liegt bei ca. 5 cm Wuchshöhe. Der Hersteller gibt dann eine Genauigkeit von  $< 3$  cm an.

### 2.1.3 GPS-gestützte Anbaugerätsteuerung

Anders als die optischen und berührungslosen Steuerungen orientieren sich die Global Positioning System (kurz: GPS)-basierten Steuerungen nicht an ihrer Umgebung. Die Grundlage zur Positionsbestimmung bilden geostationäre Satelliten in einer durchschnittlichen Höhe von 20.200 km. Das ursprünglich für militärische Zwecke entwickelte GPS System der amerikanischen Firma NAVSTAR ist das älteste System. Es besteht aus insgesamt 24 aktiven und 8 Ersatzsatelliten, die zweimal täglich die Erde umkreisen. So ergibt sich eine ständige Sichtbarkeit von 4 bis 10 Satelliten (PEREZ-RUIZ und UPADHYAYA 2012). Zu reinen Positionsbestimmung werden vier Satelliten benötigt:

drei zur Berechnung über Trilateration und ein Satellit zum Abgleich der Borduhren (TREIBER-NIEMANN et al. 2013). Mit wenigen Metern ist die Genauigkeit eines unkorrigierten GPS-Signals für den modernen Ackerbau nicht zu verwenden. Um die hohe Genauigkeit der Aussaat- und Hackarbeiten zu garantieren, wird bei den GPS-gestützten Verfahren Real Time Kinematic (kurz: RTK) als Korrekturdienst verwendet. Dieses ermöglicht eine Genauigkeit von  $\pm 2,5$  cm. Dabei handelt es sich um eine spezielle Form des Differential Global Positioning System (DGPS), bei der ein zweiter Receiver (Antenne) als Basisstation dient (TREIBER-NIEMANN et al. 2013). Die Basisstation kann auf Grundlage ihrer Position die Rohdaten der Satelliten korrigieren und an den Rover (Anwenderantenne) senden. Für die Berechnungen dieses hochgenauen Korrekturdienstes werden mindestens fünf, in der Praxis besser sechs bis acht Satelliten benötigt (LIENHART 2007). Bei ausschließlicher Nutzung des NAVSTAR-GPS waren somit zeitweise zu wenige Satelliten verfügbar. Aus diesem Grund unterstützen die heutigen Receiver zusätzlich das russische GLONASS System. Dieses Global Navigation Satellite System (GNSS) besteht ebenfalls aus 24 aktiven Satelliten und 3 weiteren Ersatzsatelliten (LEMMENS 2012). Durch den Empfang beider Signale steigt die Anzahl der verfügbaren Satelliten an. Die durchgeführte Positionsbestimmung wird somit genauer. Der nächste Schritt wird der zusätzliche Signalempfang der BeiDou bzw. COMPASS Satelliten sein. Das chinesische System soll bis zum Jahr 2020 über 35 geostationäre Satelliten verfügen (PEREZ-RUIZ und UPADHYAYA 2012). Zusätzlich arbeitet die europäische Union an einem eigenen GNSS, dessen Fertigstellung bis zum Jahr 2020 geplant ist. Das System soll über 30 Satelliten verfügen, von denen 27 aktiv sind (PEREZ-RUIZ und UPADHYAYA 2012). Insgesamt würden somit vier GNSS Systeme zur Verfügung stehen, wodurch bis zum Jahr 2020 mehr als 100 Satelliten verfügbar sind und eine exaktere Positionsbestimmung durchgeführt werden kann (STEINBERGER et al. 2013). Ziel ist eine Genauigkeit von  $\pm 1$  cm (LIENHART 2007).

Hinzu kommen Entwicklungen im Bereich der Basisstationsverknüpfungen. So war die bisherige Entfernung zwischen Rover und Basisstation auf etwa 20 km begrenzt. War die Baseline länger, so war eine präzise Positionsberechnung nicht mehr gegeben (WANNINGER 2006). Um dennoch eine flächendeckende Verfügbarkeit von RTK-Korrektursignalen zu garantieren, werden vermehrt RTK Netzwerke eingesetzt.

Das RTK CLUE der Firma REICHHARDT Steuerungstechnik GmbH, Hungen, Deutschland, setzt sich zum Ziel ein flächendeckendes Netz von Basisstationen aufzubauen. Der Anwender fährt jeweils mit den Korrekturdaten der Basisstation, die ihm am nächsten gelegen ist. Die jeweilige Stationsauswahl erfolgt via App am Smartphone oder am Computer. Die Baseline sollte jedoch ebenfalls nicht länger als 20 km sein, um eine hohe Präzision zu gewährleisten (WANNINGER 2006). Für Standorte, die nicht im Umkreis einer Basisstation stehen, wurden VRS (Virtual Reference Station) Netzwerke entwickelt. Dabei sind mindestens drei (besser fünf) Referenzstationen mit einem Rechenzentrum verbunden, welches die Rohdaten modelliert und eine virtuelle Referenzstation in der Nähe des Rovers bzw. am Rover selbst erstellt. Durch die Datenzusammenfassung mehrerer Stationen kann eine möglichst genaue Fehlerkorrektur erfolgen (CINA et al. 2012). Der VRS Netzwerkservice wird beispielsweise von TRIMBLE<sup>®</sup>, Sunnyvale, USA, angeboten. Die neuste Entwicklung der RTK Netzwerke sind sogenannte MAC (Master Auxiliary Concept) Netzwerke. Mindestens fünf Referenzstationen werden benötigt, um ein MAC Netzwerk zu bilden. Diese sind ebenfalls über ein Rechenzentrum verbunden. Eine der Stationen bildet die Masterstation, welche ihre Korrekturdaten an den Rover sendet (CINA et al. 2012). Die vier weiteren Stationen (Auxiliaries) senden nur ihre zusätzlichen Abweichungen der Korrekturdaten. Somit wird die Korrektur auch bei großer Baseline genau. Im Gegensatz zu VRS werden bei MAC Rohdaten gesendet, welche international standardisiert und anerkannt sind. Im Gegensatz zu modellierten Daten ist die Genauigkeit im gesamten Netzwerk gleich (LIENHART 2007). MAC Netzwerke werden beispielsweise von LEICA, Wetzlar, Deutschland, angeboten.

## 2.2 Überblick über die am Markt befindlichen Technik

Unabhängig von der Wahl der Steuerungsmethode müssen zur Ansteuerung von Anbaugeräten die maschinenbautechnischen Voraussetzungen geschaffen werden. So setzen unterschiedliche Hersteller zwar auf die gleichen Sensoren, unterscheiden sich jedoch in ihrer mechanischen Umsetzung.

### 2.2.1 Kamerasteuerung mit Parallelogrammverschiebung

Die Firmen BEDNAR FMT s.r.o. und Machinefabriek STEKETEE BV setzen bei ihrer Steuerungssensorik auf die CULTI CAM der Firma CLAAS. Die mechanische Umsetzung der Steuersignale erfolgt mit einem vor der Hacke positionierten Parallelogramm. Dieses ist nicht wie bei Hackmaschinenelementen vertikal, sondern horizontal angeordnet, wodurch das Hackgerät nach links und rechts verschoben werden kann (Abb. 8).



**Abb. 8:** Darstellung der Parallelogrammverschiebung (rote Kennzeichnung) der Firma BEDNAR fest mit einer Hacke verbunden; modifiziert nach BEDNAR (2016)

Die Mechanik erlaubt eine sanfte Verschiebung des Gerätes, was vor allem bei Arbeiten am Hang mit großen Arbeitsbreiten von Vorteil ist. Die maximale Arbeitsbreite liegt bei 9 m. Das Parallelogramm ist fest mit der Hacke verbunden (BEDNAR 2016). Das Einsatzspektrum der Parallelogrammverschiebung ist somit begrenzt und alte Hackgeräte können nicht nachgerüstet werden.

### 2.2.2 Kamerasteuerung mit Parallelverschiebung

Die Firmen Carré SAS, Einböck GmbH & Co.KG, GARFORD Farm Machinery Ltd. und Thomas Hatzenbichler Agro-Technik GmbH setzen bei ihrer mechanischen Lösung eine Parallelverschiebung ein. Diese wird allerdings über einen vor der Hacke installierten Verschieberahmen realisiert (Abb. 9).



**Abb. 9:** GARFORD ROBOCROP an eine Hacke angebaut (links) und abgebaut (rechts);  
Quelle: BEESTEN (2014) und ALDENHOFF (2015)

Der Vorteil dieser separaten Bauweise ist, dass sich vorhandene Hackgeräte an den Rahmen anschließen lassen. Somit können nicht nur Hack-, sondern auch Sägeräte mit dem Verschieberahmen betrieben werden. Der Betrieb ist somit flexibler und kann die Technik effizienter nutzen. Für die unterschiedlichen Geräte sind je nach Hersteller zwei bis drei verschiedene Parallelverschieberahmen mit unterschiedlichen Traglasten verfügbar (K.U.L.T 2015). Je nach Hersteller variiert der Verschieberegion um +/- 250 mm.

### 2.2.3 Maschinenfabrik SCHMOTZER GmbH

Die Firma SCHMOTZER setzt seit 2015 auf seine eigenen Kamerakomponenten. Der hinterlegte Algorithmus erlaubt eine Einzelpflanzerkennung der Kulturreihen. Die Kamera kann somit zwischen Kulturpflanzen- und Wildkrautpflanzengrün unterscheiden. Zurzeit ist das System für Getreide, Mais und Zuckerrüben verfügbar. Weiterhin bietet der Hersteller zwei unterschiedliche mechanische Ansteuerungen an. Neben der Parallelogrammverschiebung AV5 wird die Parallelverschiebung PVR angeboten (Abb. 10).



**Abb. 10:** Parallelogramm- (Typ AV5; rote Kennzeichnung links) und Parallelverschiebung (Typ PVR; rote Kennzeichnung rechts) von Schmotzer, jeweils angebaut an einer Hacke; Quelle: SCHMOTZER (2015)

Die eigenentwickelte Parallelogrammverschiebung AV 5 wird bei Arbeitsbreiten bis 9 m empfohlen und ermöglicht einen Verschieberegion von +/- 320 mm. Zusätzlich kann der Rahmen nachträglich an vorhandene Hackgeräte der Firma Schmotzer nachgerüstet werden, bleibt jedoch auch dann fest mit der Hacke verbunden.

Die Parallelverschiebung PVR besteht aus einem vorgeschalteten Verschieberahmen, den die Firma Wagner Pflanzen-Technik GmbH zuliefert. Dieser ermöglicht den Anbau unterschiedlicher und vorhandener Geräte. Der Verschieberegion beträgt +/- 300 mm. Neben der Ausstattung mit Kamera besteht die Möglichkeit der Einbindung eines GPS gestützten Systems (SCHMOTZER 2015a).

#### 2.2.4 Firma WAGNER Pflanzen-Technik GmbH

Die Firma WAGNER Pflanzen-Technik GmbH ist spezialisiert auf die Entwicklung und Fertigung von Pflanzmaschinen für Reben. Beim Anlegen eines Weinbergs kommt es auf höchste Präzision an, da die Anlage über mehrere Jahre hinweg genutzt wird. Daher hat die Firma Wagner unterschiedliche Verschieberahmen im Programm. Die Traglasten der Rahmen variieren zwischen 800 kg und 4000 kg. Je nach Modell ist ein Verschiebebereich zwischen +/- 250 und +/- 400 mm möglich (WAGNER 2014). Die Rahmen sind sehr individuell gefertigt und lassen sich beispielsweise mit und ohne Zapfwellendurchtrieb, integriert oder segregiert bestellen (Abb. 11).



**Abb. 11:** Verschieberahmen G 4000 H von WAGNER, angebaut an einen Traktor;

Quelle: WAGNER (2014)

Wagner bietet zudem eine eigene GPS-Steuerung für die Verschieberahmen an. Diese ist jedoch sehr stark an die Bedürfnisse des Weinbaus bzw. der Rebepflanzung angepasst. Vorhandene Komponenten wie Navigationsrechner oder GPS Receiver anderer Hersteller lassen sich zusätzlich aufbauen. Die notwendige Hardwarekonfiguration wird von WAGNER durchgeführt.

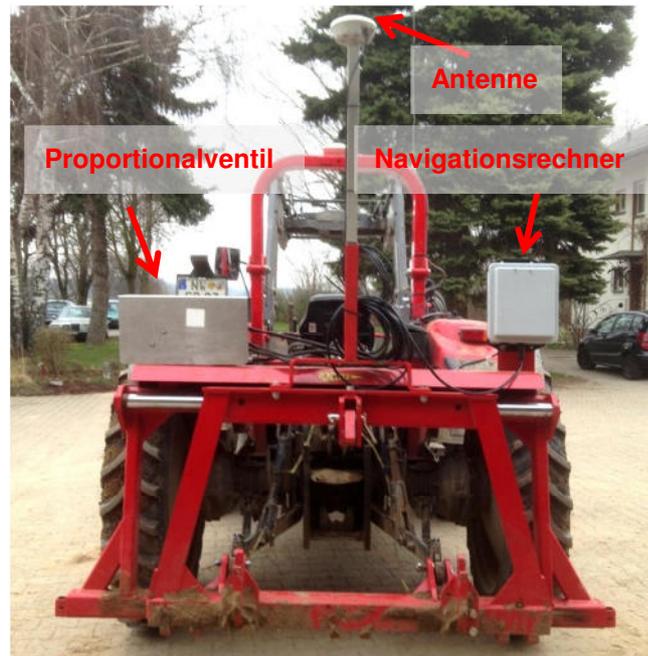
### 2.2.5 Firma TRIMBLE, GEO-KONZEPT GmbH

Die Firma GEO-KONZEPT - Gesellschaft für Umweltplanungssysteme mbH, Adelschlag, Deutschland, vertreibt GPS-Systeme der Firma TRIMBLE. Die aktive Gerätesteuerung wird unter dem Namen TRIMBLE® AgGPS® TrueTracker™ vertrieben. Um die Anbaugeräte auf der Spur zu halten, werden zwei Varianten angeboten. Verfügt das Gerät bereits über eine lenkbare Achse oder Deichsel, so lässt sich dieses durch Aufbau einer Antenne und eines Navigationsrechners GPS-fähig machen. Diese Variante bietet sich vor allem bei modernen Kartoffellegegeräten an (Abb. 12).



**Abb. 12:** Kartoffellegegerät mit GPS-Ausrüstung der Firma TRIMBLE® (rote Kennzeichnung links), sowie Detailaufnahme der Antenne und des Navigationsrechners (rechts); modifiziert nach SCHULZ (2015)

Für angebaute Geräte, die über keine Achse verfügen, bietet geo-konzept zwei unterschiedliche Verschieberahmen an. Diese werden als separate Einheit zwischen Traktor und Anbaugerät angehängt. Die Rahmen werden von der Firma WIFO-Anema BV, GP FERWERT, Niederlande, gebaut und durch die Firma GEO-KONZEPT um GPS-Antenne, Lenkwinkelsensor, Navigationsrechner und Proportionalventil ergänzt (Abb. 13).

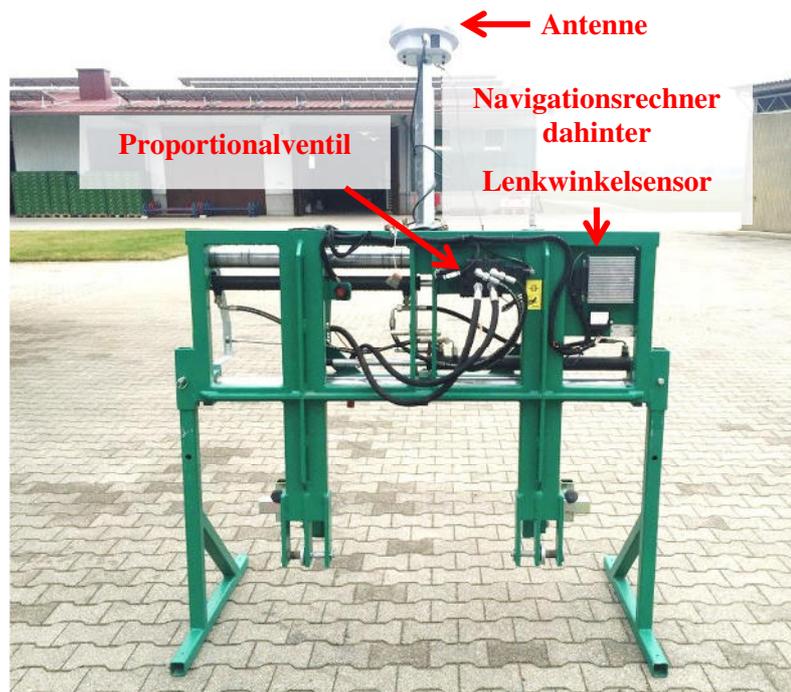


**Abb. 13:** Heckansicht des GPS- gestützten Verschieberahmens der Firma GEO-KONZEPT, angebaut an einen Traktor; wichtige Baugruppen rot gekennzeichnet

Besitz der Betrieb bereits Lenksysteme der Firma TRIMBLE mit FmX™ oder TMX-2050™ Display, kann dieses auch für die Bedienung des Verschieberahmens genutzt werden. Die Darstellung erfolgt im Split Screen, um die notwendigen Arbeitsparameter zu justieren. Für kleinere Geräte ist eine Variante mit 1,5 Tonnen Tragkraft und +/- 250 mm Verschiebebereich verfügbar. Dieser Rahmen reicht für die im Gemüsebau verwendeten Geräte meist aus. Allerdings kann ein 6 m breites Hackgerät die Traglast überschreiten. Für größere Geräte ist deshalb eine Variante bis 4 Tonnen Tragkraft und +/- 300 mm Verschiebebereich verfügbar (GEO-KONZEPT 2015).

## 2.2.6 Firma REICHHARDT

Die Firma REICHHARDT GmbH Steuerungstechnik bietet zwei eigenentwickelte Verschieberahmen an. Der PSR Slide ist mit Traglasten von 1,5 (Variante L) und 4 t (Variante XL) verfügbar. Der Verschieberegion beträgt bei beiden Rahmen +/- 300 mm. Die Rahmen sind mit einem Lenkwinkelsensor, einem Proportionalventil und einem Navigationsrechner ausgestattet (Abb. 14).



**Abb. 14:** Frontansicht des Verschieberahmen PSR Slide L der Firma REICHHARDT, wichtige Baugruppen rot gekennzeichnet

Neben der GPS-gestützten Variante PSR Sky bietet REICHHARDT die ultraschallbasierte Steuerungsvariante PSR Sonic an. Beide Varianten können im SR Slide kombiniert werden. Die Systeme lassen sich in der Reihe allerdings nur abwechselnd nutzen. Die gewünschte Steuerungsart stellt der Bediener im Terminal ein. Insgesamt wird zwischen sechs verschiedenen Terminals unterschieden, die von der einfach ausgestatteten PSR Box bis hin zum bereits vorhandenen ISOBUS fähigen Terminal reichen (REICHHARDT 2014). In der Sonic Variante werden vier Ultraschallsensoren geliefert. In der Sky Variante, ist der GPS-Receiver RGS 326 bereits für den Empfang des COMPASS und des GALILEO Signals vorbereitet (REICHHARDT 2015b).

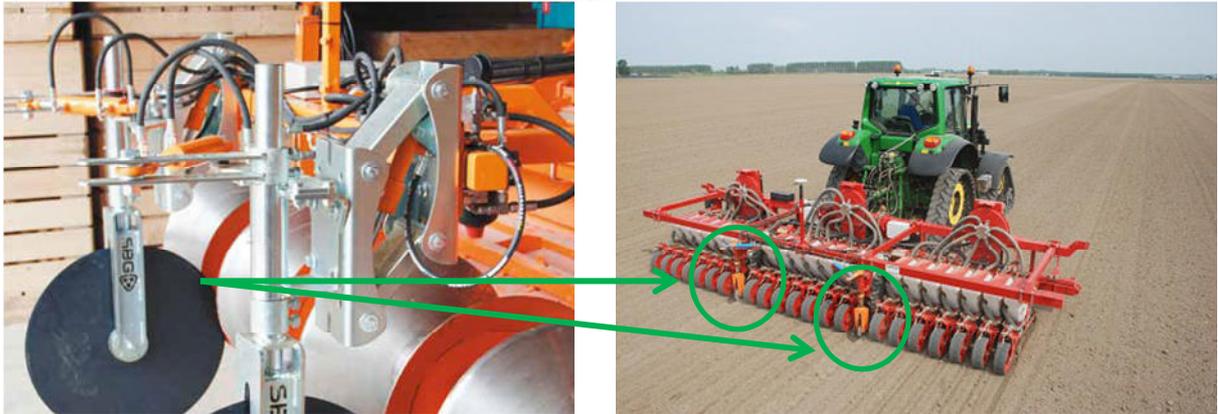
### 2.2.7 Firma SBG

Die Firma SBG Precision Farming aus Middenmeer, Niederlande gehört seit Mai 2014 zur Firma Raven Industries, Inc. mit Hauptsitz in den USA. SBG produziert GPS-gestützte Anbaugerätesteuerungen. Für Geräte, die eine lenkbare Achse oder Deichsel besitzen, wird beim SBGuidance TWIN ein Navigationsrechner, Proportionalventil und GPS-Receiver auf dem Gerät aufgebaut. Verfügt das Gerät über keine derartige Ansteuerungsmethode, stehen bei der Firma SBG zwei weitere Varianten zur Verfügung. Der TWIN-Side Shift besteht aus einem liegenden Hydraulikzylinder, der zwischen den Fanghacken der Unterlenker angebracht wird (SBG 2015). Der Verschiebezylinder ist entweder am Anbaugerät verbaut oder als kompakter Verschieberahmen zwischen Traktor und Anbaugerät geschaltet (Abb. 15).



**Abb. 15:** Side-Shift-Anhängebock fest an einem Gerät verbaut (links) bzw. als Verschieberahmen an einen Traktor angebaut (rechts); Quelle: SBG (2015)

Es stehen drei unterschiedliche Zylinder zur Auswahl, die in einem Druckbereich von 2 bis 8 t arbeiten. Der Verschiebebereich wird mit +/- 150 mm angegeben. Der Preis des TWIN Side Shift liegt bei 26.310 € (Stand Februar 2016). Neben der Ansteuerung der Koppelpunkte bietet die Firma SBG das System SBGuidance TWIN-DISC an. Hierbei werden am Anbaugerät ein bzw. zwei Scheibenseche angebracht, die über ein Proportionalventil angesteuert und gelenkt werden können. Je nach Gerät sind die Scheiben in einer Größe von 45 bzw. 60 cm verfügbar. Auf dem Gerät müssen ebenfalls ein Navigationsrechner, ein Receiver und ein Proportionalventil verbaut werden. Durch den Einschlagwinkel der Scheibenseche wird das Gerät zurück in die Spur gelenkt (Abb. 16).

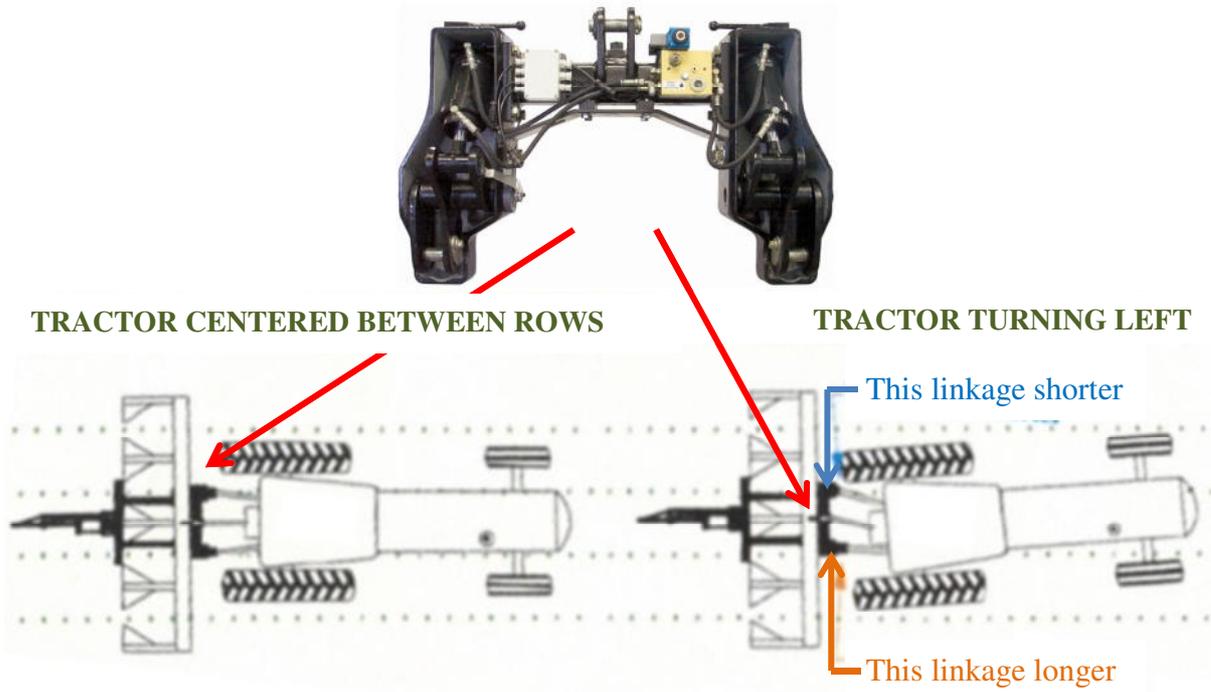


**Abb. 16:** TWIN-Disc Scheibenlenkung Makroansicht (links) und im Gerät verbaut (grüne Kennzeichnung rechts); modifiziert nach SBG (2015)

Nach Angaben des Herstellers genügt für kleinere Geräte, wie sie im Gemüsebau verwendet werden, eine Scheibe pro Gerät.

### 2.2.8 Firma Sunco™ Marketing Farm Equipment

Die Firma Sunco™ Marketing aus North Platte, USA, entwickelte im Jahr 1987 eine Anbaugerätesteuerung unter dem Namen ACURA TRAK. Das System besteht aus zwei stehenden Hydraulikzylindern, die in einen Anbaurahmen integriert sind. Weicht der Traktor von seiner Sollspur ab, verlängert der Zylinder auf einer Seite den Weg zwischen Traktor und Anbaugerät. Somit wird verhindert, dass der Traktor einseitig am Gerät zieht und dieses ebenfalls auf die falsche Spur lenkt (Abb. 17).



**Abb. 17:** ACURA TRAK (rote Kennzeichnung) Funktionsweise schematisch dargestellt, während der Traktor mittig zwischen den Kulturreihen (links) bzw. nach links fährt (rechts, Auswirkungen auf die Länge der Unterlenker orange und blau gekennzeichnet); modifiziert nach SUNCO (2015)

Der ACURA TRAK wird serienmäßig mit einem Proportionalventil ausgerüstet. Vom Hersteller können ebenfalls mechanische Reihentaster für Dämme mitgeliefert werden. Die Aufrüstung zur GPS-gestützten Steuerung kann mit Komponenten unterschiedlicher Hersteller geschehen (SUNCO 2015).

### 2.3 Mechanische Segetalpflanzenregulierung

Der Erfolg einer mechanischen Segetalpflanzenkontrolle hängt von einer komplexen Wechselwirkung mehrerer, unterschiedlicher Faktoren ab. Der Regulierungserfolg der Maßnahme hängt primär nicht von der Art der Ansteuerung ab. Vielmehr müssen die Wechselwirkungen von Bodentyp, Feuchtezustand, Kulturpflanzen- und Beikrautgröße, sowie die Auswahl des Werkzeugs beachtet werden.

Abhängig vom Stadium der Kulturpflanze und deren Reihenabstand ist die Auswahl des geeigneten Hackwerkzeugs begrenzt. Abrollende Werkzeuge, wie etwa eine Sternrollhacke, erfordern eine Reihenweite von mindestens 25 cm, sowie Kulturpflanzen mit ausreichender Blattmasse, um der Verschüttung dieser vorzubeugen. Aus diesem Grund eignen sich abrollende Werkzeuge hauptsächlich zur Pflege von Damm- oder Baumschulkulturen an. Die zu den gezogenen Geräten zählende Scharhacke gibt es in unterschiedlichen Ausführungen. Die Hacke kann sowohl in der Breite als auch im Schartyp variieren. Neben dem klassischen Gänsefußschar gibt es Flachhackschare und Winkelmesser. Die Wirkung der Schartypen unterscheidet sich stark. Gänsefußschare vermischen den Boden, wodurch Segetalpflanzen herausgerissen und verschüttet werden. Vor allem bei größeren Wildkräutern ist der Verschüttungsgrad jedoch gering, wodurch ein Weiterwachsen der Segetalpflanzen impliziert wird (NAWROTH 2002). Flachhackschare und Winkelmesser bearbeiten den Boden nicht so stark. Sie unterschneiden die Wurzeln der Segetalpflanzen, wodurch diese absterben. Sind die Segetalpflanzen jedoch zu klein und wird gleichzeitig mit zu großer Arbeitstiefe gefahren, wachsen die Beikräuter weiter. Bei allen Schartypen verursachen zu große Beikräuter ein Aufschieben des Boden-Kraut-Gemisches, wodurch die Geräte verstopfen. Angetriebene Geräte, wie die Reihenfräse oder Reihenhackbürste, können größere Segetalpflanzen zielsicher regulieren. Auf Grund des aktiven Antriebs sind sie in ihrer Vorfahrtsgeschwindigkeit begrenzt (WEBER 1992). Um die Arbeitstiefe und damit einen ausreichenden Regulierungs-, bzw. Bekämpfungserfolg (kurz: BKE) gewährleisten zu können, liegt die maximale Vorfahrtsgeschwindigkeit der Reihenhackbürste bei  $2,5 \text{ km}\cdot\text{h}^{-1}$  (WEBER 1992). Mit der Reihenhackfräse kann zwar schneller gefahren werden, jedoch steigert sich bei schnellerer Fahrt in gleicher Weise die Bisslänge, wodurch der Boden nicht mehr ausreichend durchmischt wird. Daher ist eine maximale Vorfahrtsgeschwindigkeit von  $6 \text{ km}\cdot\text{h}^{-1}$  einzuhalten (WEBER 1992). Bei abrollenden Geräten muss schneller gefahren

werden, um einen ausreichenden Verschüttungseffekt zu erzielen. Die Werkzeuge arbeiten ab einer Vorfahrtsgeschwindigkeit von  $12 \text{ km}\cdot\text{h}^{-1}$  effizient. Zu bedenken ist jedoch, dass dann auch ein größerer Abstand zur Kulturreihe eingehalten werden muss, da die Pflanzreihen sonst zu stark verschüttet werden (WILDFELLNER 1990). Die Scharhacken arbeiten nach einem ähnlichen Prinzip. Je schneller die Vorfahrtsgeschwindigkeit, umso größer auch die Verschüttung der Beikräuter. Um ein optimales Ergebnis zu erzielen, wird eine Geschwindigkeit von ca.  $6 \text{ km}\cdot\text{h}^{-1}$  benötigt (NAWROTH 2002). Meist liegen die Vorfahrtsgeschwindigkeiten im Gemüsebau jedoch weit darunter (Tab. 1).

**Tab. 1:** Vorfahrtsgeschwindigkeiten der praxisüblichen Beikrautregulierungsgeräte im Gemüsebau; Quelle: WEBER (1997)

Gerät	Fahrgeschwindigkeit [ $\text{km}\cdot\text{h}^{-1}$ ]
Reihenhacke	2,25 – 3,8
Reihenhackbürste	1,5 -1,8
Reihenhackfräse	1,6 – 2,25

Um bei geringeren Geschwindigkeiten ein besseres Regulierungsergebnis zu erzielen, wird häufig die Arbeitstiefe der Werkzeuge variiert. Optimal ist eine Bearbeitungstiefe von zwei bis vier Zentimetern, da in diesem Bereich die Wurzeln der Kulturpflanzen nicht zu stark geschädigt werden (LABER 1999). Bei Flachhackscharen und angetriebenen Fräsen kann noch flacher, knapp unter der Bodenoberfläche gearbeitet werden. Für die Reihenhackbürsten wird eine Bearbeitungstiefe von ca. 5 cm empfohlen (HARDER 2003). Um die Verschüttungswirkung der Gänsefußscharhacke bei langsamen Geschwindigkeiten zu steigern, wird eine Bearbeitungstiefe von fünf Zentimetern und mehr eingestellt (LABER 1999). Je nach Kulturpflanzenstadium kann dies jedoch zu starken Verletzungen der Pflanze führen. Weiterhin steigert sich bei tieferer Bearbeitung der Zugkraftbedarf.

Unter ungünstigen Bodenfeuchtbedingungen sind je nach Bodenart zudem Schmierschichten zu befürchten. Vor allem in Verbindung mit höheren Fahrgeschwindigkeiten beim Einsatz der Scharhacke oder bei geringen Vorfahrtsgeschwindigkeiten und hohen Rotordrehzahlen der Reihenfräse vermindert diese verdichtete Zone den optimalen Gasaustausch der Kulturpflanzen. Vor allem Böden mit höherem Schluff und Tongehalt sind für diese Art von Bearbeitungsfehlern empfänglich. Die Bodenart wird in der Praxis in drei Typen unterteilt (Tab. 2).

**Tab. 2:** Praxisübliche Einteilung der Bodentypen; modifiziert nach SCHMIDT (2010)

Typ	Abkürzung	Bezeichnung
Leichter Boden	Ss	Sand
	Sl2	schwach lehmiger Sand
Mittlerer Boden	Ls	sandiger Lehm
	Lu	schluffiger Lehm
	Uu	Schluff
	Ut2	schwach toniger Schluff
Schwerer Boden	Lt	toniger Lehm
	Tl	lehmiger Ton
	Tt	Ton

Sandböden lassen eine leichtzügigere Bearbeitung zu und neigen zudem nicht so stark zu Verkrustungen. Je mehr Schluff- und Tonanteile im Boden enthalten sind, desto stärker steigt der Bearbeitungswiderstand. Gleichzeitig neigen diese Böden zu Verkrustungen und Schmierschichten (NAWROTH 2002). Für ein optimales Regulierungsergebnis ist daher auf den Bodenfeuchtezustand zu achten.

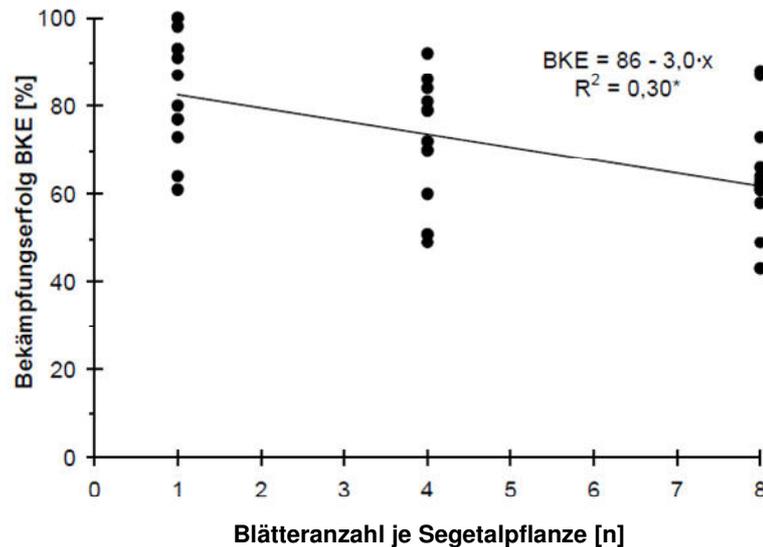
Das Maß des Wassergehaltes eines Ackerbodens lässt sich über die Feldkapazität in Vol.-% ausdrücken. Entscheidend bei der mechanischen Segetalpflanzenregulierung ist der Wassergehalt im Bearbeitungshorizont der Werkzeuge (WEBER 1997). Der optimale Feuchtegehalt zum Zeitpunkt der Regulierungsmaßnahme ist dabei abhängig vom Bodentyp (Tab. 3).

**Tab. 3:** Optimaler Feuchtegehalt zur mechanischen Beikrautregulierung, nach Bodentyp gegliedert; modifiziert nach WEBER (1997)

Bodentyp	Obergrenze [Vol.-%]	Untergrenze [Vol.-%]
Leicht	10	0
Mittel	17	5
Schwer	16	8

Um nach der Regulierungsmaßnahme kein Wiederauwachsen der Beikräuter zu implizieren, ist auch die Dauer des Feuchtegehaltes entscheidend (LABER 1999). Sonniges Wetter zum Zeitpunkt der Maßnahme und mindestens ein Tag danach fördern ein optimales Ergebnis (WILDFELLNER 1990).

Entscheidend für die Dauer des Austrocknungsprozesses ist auch die Größe der Segetalpflanzen. Im Idealfall ist eine Regulierungsmaßnahme umso erfolgreicher, je kleiner die Beikräuter sind (Abb. 18).



**Abb. 18:** Abhängigkeit des Bekämpfungserfolg [%] bei der mechanischen Segetalpflanzenregulierung von der Blätteranzahl je Segetalpflanze [n];  
Quelle: LABER (1999)

Ein effizientes Segetalpflanzenmanagement wägt zwischen einem optimalen Bekämpfungserfolg und der notwendigen Anzahl an Regulierungsmaßnahmen ab (HARDER 2003). Um mit möglichst wenigen Überfahrten auszukommen, muss eine Schadschwelle an Beikräutern aufgelaufen sein. Haben die Beikräuter auf Grund von langen Regenperioden einen großen Wuchsfortschritt gemacht, so empfiehlt sich bei Scharhacken eine tiefere Einstellung der Arbeitswerkzeuge in einen Arbeitshorizont zwischen 5 und 10 cm (LABER 1999). Um ein Verschütten der Kulturpflanzen zu vermeiden, sollte in diesem Fall mit Schutzscheiben und -blechen gearbeitet, oder der Sicherheitsabstand zur Reihe vergrößert werden.

Im Gemüsebau wird versucht, mit kleinem Sicherheitsabstand zur Reihe zu fahren, um die notwendigen Arbeitskraftstunden für die nachfolgende Handjäte zu reduzieren. Dies kann oft nur durch eine möglichst geringe Fahrgeschwindigkeit erzielt werden. In der Praxis werden somit kaum mehr als  $3 \text{ km} \cdot \text{h}^{-1}$  Vorfahrtsgeschwindigkeit realisiert (WEBER 1997). Zu bedenken ist auch, dass der Sicherheitsabstand zur Reihe oft zwischen 5 und 10 cm liegt,

wodurch im Schnitt weiterhin noch 150 Arbeitskraftstunden je Hektar zur Handjäte notwendig sind (BECK 2009).

## **2.4 Bisherige Untersuchungen und Ergebnisse zur Beikrautregulation mit Anbaugerätesteuerungen**

Die Anforderungen des praktischen Gemüseanbaus an die mechanische Segetalpflanzenregulierung nehmen in den letzten Jahren stetig zu. Die Ausweitung des ökologischen Anbaus und fehlende Alternativen im integrierten Anbau machen den Einsatz mechanischer Verfahren häufig zum Mittel der Wahl. Lange wurden diese Verfahren auf Grundlage ihrer geringen Effizienz gemieden. Auf Grund der geringen Vorfahrtsgeschwindigkeiten von ca.  $3 \text{ km}\cdot\text{h}^{-1}$  und den damit verbundenen geringen Flächenleistungen von  $0,3$  bis  $0,5 \text{ ha}\cdot\text{h}^{-1}$  (WEBER 1997), ist die geforderte Schlagkraft nicht gegeben. Das Ziel der bisher durchgeführten Untersuchungen lag deshalb in der Steigerung der Vorfahrtsgeschwindigkeit und des Bekämpfungserfolgs. Die Steigerung des Bekämpfungserfolgs soll mittels zweier Optimierungen erfolgen. Zum einen soll der Sicherheitsabstand zur Reihe reduziert werden, womit Arbeitskraftstunden zur Handjäte eingespart werden können. Zum anderen können die Hackwerkzeuge bei einer gesteigerten Vorfahrtsgeschwindigkeit unter idealen Bedingungen arbeiten, wodurch Beikräuter besser herausgerissen oder verschüttet werden. Auf Grundlage dieser Anforderungen wären viele Untersuchungsszenarien denkbar. Seit dem Jahr 2013 sind jedoch nur wenige neue Untersuchungen hinzugekommen. Die Mehrheit der Untersuchungen setzt dabei auf die Ansteuerung des Hackgeräts mittelsameratechnik.

Im Jahr 2001 wurden unterschiedliche Hackgeräte in Salat (*Lactuca sativa*) getestet (EICHBERG und MÜLLER 2001). Die DLG setzte dabei eine Kamerasteuerung der Firma ECO-DAN ein. Es zeigte sich, dass die Vorfahrtsgeschwindigkeit mittels Steuerung auf bis zu  $12 \text{ km}\cdot\text{h}^{-1}$  angehoben werden konnte. Als Vorteile wurden die weitgehende Entlastung des Fahrers und der Wegfall einer zusätzlichen Bedienperson beschrieben. Nachteilig war die Erkennung von rotgefärbten Salaten, da die damaligen Kameras noch keine Wellenlängen im Bereich um  $620 \text{ nm}$  verarbeiten konnten.

In Österreich wurden im Jahr 2005 ebenfalls Untersuchungen mit einer ECO-DAN Kamerasteuerung durchgeführt (HANDLER und NADLINGER 2005). Auch hier konnte die Fahrgeschwindigkeit auf 5 bis 10 km·h<sup>-1</sup> angehoben und die Flächenleistung um 25 % gesteigert werden konnte. Gleichzeitig konnten durch den Wegfall der Bedienperson bis zu 60 % der Lohnkosten eingespart werden. Der Sicherheitsabstand zur Reihe in Kohl (*Brassica*) war mit 7 cm jedoch relativ groß. Problematisch waren die Lenkbewegungen des Traktors, welche das System nicht so schnell ausgleichen konnte. Weiterhin wurde das System von Reflexionen des Sonnenlichts und von zu starkem Beikrautbesatz irritiert. Ebenso wird die exakte Erkennung der Pflanzenreihe bei ungleichmäßigem Feldaufgang, fast geschlossene Reihen oder Windbewegungen der Pflanzenreihe gestört (MÜCKE 2013).

Die Universität Hohenheim führte 2015 Untersuchungen mit dem ROW-GUARD der Firma EINBÖCK in Zuckerrüben (*Beta vulgaris* ssp. *vulgaris*) durch (STAUB 2016). Dabei wurden unterschiedlichste Hackwerkzeuge zur Bearbeitung zwischen und in der Kulturreihe untersucht. Die unterschiedlichsten Werkzeuge, wie Finger- oder Torsionshacke führten jedoch zu keinem statistisch abzusichernden Unterschied des Bekämpfungserfolgs. Die Ansteuerung mittels Kamera konnte den Bekämpfungserfolg von 52 % auf 74 % anheben. Die mit Herbiziden behandelte Variante wies einen Bekämpfungserfolg von 81 % auf. Zusätzlich wurden zwei Fahrgeschwindigkeiten mit 3 und 6 km·h<sup>-1</sup> untersucht. Hinsichtlich des Bekämpfungserfolgs konnten keine Unterschiede festgestellt werden. Die Variante mit einer Vorfahrtsgeschwindigkeit von 6 km·h<sup>-1</sup> erwies sich als die Rentabelste und lag 11 % unter den Kosten der Herbizidvariante.

Eine weitere Untersuchung an der Universität Hohenheim beschäftigte sich mit dem Vergleich von Herbizidapplikationen und gesteuerten Hackmaschinen in Sojabohnen (*Glycine max*) und Zuckerrüben (KUNZ et al. 2015a und KUNZ et al. 2015b). Zum Einsatz kamen sowohl die Kamerasteuerung von GARFORD als auch eine RTK gesteuerte Hacke. Als Vergleich diente eine Kontrollvariante ohne Beikrautregulierung. Ebenso wurden unterschiedliche Fahrgeschwindigkeiten sowie Hacktiefen und Hackwerkzeuge untersucht. Es konnte festgestellt werden, dass die Fahrgeschwindigkeit durch die autonome Steuerung des Hackgeräts von durchschnittlich 4 km·h<sup>-1</sup> auf bis zu 10 km·h<sup>-1</sup> angehoben werden konnte, ohne die Arbeitsqualität signifikant zu beeinflussen. In Zuckerrüben konnte ein Bekämpfungserfolg von 72 % in der Herbizidvariante gemessen werden. Die

Kamerasteuerung wies einen BKE von 78 % auf und die RTK gesteuerte Hacke konnte einen Regulierungserfolg von 84 % erzielen. In Verbindung mit einer Bandapplikation der Herbizide konnte der BKE auf 87 % gesteigert werden. In dieser Variante konnte der Herbizidaufwand um 50 bis 75 % reduziert werden (KUNZ et al. 2015a). In Sojabohnen lag der Bekämpfungserfolg der gesteuerten Hackmaschinenvarianten bei 89 %. Die Biomasse der Sojabohnen in der RTK Variante war am Größten. Gleichzeitig war die Biomasse der Beikräuter am Geringsten. Die Erträge konnten gegenüber herkömmlicher Regulierungsstrategien um 23 % gesteigert werden (KUNZ et al. 2015b). Der Abstand zur Reihe konnte von 5 bis 7 cm auf 3 bis 5 cm reduziert werden.

An der Hochschule Geisenheim wurde 2013 eine Untersuchung zur GPS gesteuerten Hacktechnik in Gemüsekulturen durchgeführt (HEGE 2013). In Zusammenarbeit mit der Außenstelle des DLR Neustadt, dem Queckbrunnerhof in Schifferstadt, wurden Felder mit Speisezwiebeln (*Allium cepa*) und Spinat (*Spinacia oleracea*) angesät. Der praxisüblichen, manuellen Steuerung des Anbaugerätes wurden zwei Varianten gegenüber gestellt. Zunächst wurde nur der Traktor mittels RTK Lenkautomatik der Firma Trimble geo-konzept gesteuert. In der dritten Variante folgte dann die Steuerung des Traktors und des Anbaugerätes mit RTK. Hierzu wurde ein Verschieberahmen zwischen Traktor und Arbeitsgerät angebaut. Untersucht wurden neben dem Bekämpfungserfolg und den Kulturschäden drei unterschiedliche Fahrgeschwindigkeit, sowie zwei unterschiedliche Werkzeuge der Hacke. In Spinat wurde mit einer Gänsefußhacke gearbeitet, wohingegen in Speisezwiebeln Winkelmesser montiert waren. Es konnte gezeigt werden, dass die Fahrgeschwindigkeit keinen Einfluss auf den Bekämpfungserfolg hat. Dieser war auf Grund der schlechten Witterung im Mittel nicht größer als 50 %. Weiterhin konnte in Speisezwiebeln nachgewiesen werden, dass eine Steuerung des Traktors alleine nicht ausreicht. Hier lagen die Kulturschäden bei über 20 %. Mit der zusätzlichen Steuerung des Anbaugerätes konnten die Kulturschäden in beiden Kulturen auf unter 2 % gesenkt werden. In der praxisüblichen Variante wurden im Schnitt fast 30 % Kulturschäden gemessen. Als Fazit konnte die Fahrgeschwindigkeit mit gesteuertem Traktor und Anbaugerät auf  $9 \text{ km}\cdot\text{h}^{-1}$  und somit dem Dreifachen der praxisüblichen Geschwindigkeit gesteigert werden. Die Flächenleistung konnte bei dieser Geschwindigkeit um 245 % gesteigert werden. Eine ökonomische Analyse legte ein Einsparpotenzial der Verfahrenskosten von 60 % offen. Als weiteres Potenzial der

Technik wurde die Möglichkeit des Blindhackens dargestellt. Da das Verfahren ohne optische Leitlinien auskommt, besteht die Möglichkeit, das Abflammen im Voraufbau zu ersetzen.

## **2.5 Neueste Entwicklungen im Bereich der Segetalpflanzenregulierung**

Die Entwicklung der Sensorik zur Pflanzenerkennung hat die mechanische Segetalpflanzenregulierung einfacher und effizienter gemacht. Neben der Ansteuerung von praxisüblichen Hackgeräten bieten Positions- und Pflanzenerkennungssysteme auch neue Möglichkeiten der Beikrautregulation. Die Kombination der Sensorik und der Weiterentwicklungen im Bereich der Aktorik eröffnen zudem die Plattform für zukünftige Entwicklungen kleiner Feldroboter, die eine autonome Beikrautregulierung vornehmen könnten (RUCKELSHAUSEN und RAHE 2010). Im Jahr 2015 wurden die ersten autonomen Roboter zur Unkrautbekämpfung auf den Markt gebracht. Dies ist ein weiterer Schritt zur Effizienzsteigerung in der Landwirtschaft.

### **2.5.1 KUBOTA GEOseed®: Aussaat im Verbund**

Gemüsekulturen werden in vorher definierten Reihenweiten meist mit pneumatischen Einzelkornsäegeräten gesät oder mit Pflanzmaschinen gepflanzt. Die Reihenweiten können dabei von mehreren Faktoren beeinflusst werden. So wird diese durch die vorhandene Sätechnik und deren Einsatzspektrum in anderen Kulturen beeinflusst. Weiterhin kann der Abstand durch die nachfolgende Pflege- und Erntetechnik vorgeben werden. Um die gewünschte Aussaatstärke zu erzielen, werden die Abstände in Reihe variiert. Die Verteilung der Pflanzen auf dem Feld ist somit nicht homogen, was den Konkurrenzkampf um die Wachstumsfaktoren steigert. Eine Pflanzung im Verbund bringt aus Sicht der Pflanzenökologie zwei Vorteile. Zum einen stehen jeder Pflanze die gleiche Menge Licht, Nährstoffe und Wasser zur Verfügung, wodurch ein gleichmäßigerer Wuchs erzielt werden kann. Zum anderen können gleichverteilte Kulturpflanzen die Segetalpflanzen leichter unterdrücken (ROLLER 2015). Neben der Unterdrückung von Segetalpflanzen besteht bei Kulturen im Vierecksverband zudem die Möglichkeit quer zur Reihe zu Hacken und somit die unbearbeitete Fläche zu reduzieren. Hier setzt das GEOseed® Konzept der Firma KUBOTA,

Osaka, Japan, an (KUBOTA 2015). Im Jahr 2009 wurde es erstmals von der KVERNELAND GROUP (heute KUBOTA) für die mechanischen Einzelkornsäegeräte vorgestellt. Kernkomponente ist ein eigener 12 V Elektromotor für jedes Säeelement. Damit kann das bisherige Getriebe, die Ketten und die Antriebswelle eingespart werden. Die Ansteuerung des Elektromotors erfolgt über eine ISOBUS Schnittstelle. Die Drehzahl kann somit stufenlos während der Fahrt variiert und der Pflanzabstand angepasst werden. Zur Pflanzung im Verbund sind zwei Varianten verfügbar, von denen beide über einen Induktivsensor verfügen, der die Position der Säescheibe misst. In der ersten Ausbaustufe ist eine Synchronisation der Pflanzabstände pro Maschinenbreite möglich. So lassen sich die Pflanzen im Dreiecks- oder Vierecksverband platzieren. Da jeweils nur eine Arbeitsbreite synchronisiert wird, empfiehlt sich der Dreiecksverband zur besseren Standraumverteilung der Pflanzen (SCHULZ 2015b). Quer zur Reihe zu hacken ist durch die höhere Ausbaustufe möglich, da diese eine Ablage im Vierecksverband mittels RTK beinhaltet (Abb. 19).



**Abb. 19:** Pflanzen im Dreiecks- und Vierecksverband gesät; Quelle: KVERNELAND GROUP (2014)

Dazu werden die Abstände maschinenbreitenübergreifend synchronisiert. Die Sämaschine wird zusätzlich mit einem GEOSync Modul der Firma SBG ausgerüstet, um den Neigungswinkel der Sämaschine mittels Gyroskop zu ermitteln und die Daten des GPS zu verarbeiten. Hierzu sollte der Traktor über ein GPS-gestütztes Lenksystem verfügen, da das System eine gerade A-B Linie als Referenz benötigt. Konturen können nicht besät werden. Weiterhin ist das System nicht mit jedem Lenksystem kompatibel. Die Ablagegenauigkeit zwischen den einzelnen Maschinenbreiten wird mit 5 cm angegeben (SCHULZ 2015b). Der Preis für die erste Ausbaustufe beträgt 300 € je Reihe. Für die höhere Ausbaustufe beträgt der Preis 4.200 € je Reihe. Das System ist für Mais und Rübensämaschinen verfügbar. Die

Auswahl an Gemüsekulturen beschränkt sich somit auf größeres Saatgut, wie beispielsweise Chicorée, Kürbis, Rote Beete oder Zuckermais. Eine Implementierung in Pflanzmaschinen würde Vorteile für weitere Gemüsekulturen bringen, da hier auch in der Reihe ausreichend weite Pflanzabstände realisiert werden.

### 2.5.2 POULSEN: Abflammen in der Reihe

Eine weitere Entwicklung zur Segetalpflanzenregulierung in der Reihe ist der ROBOVATOR mit thermischem Werkzeug der Firma F. POULSEN ENGINEERING APS. aus Dänemark. Zur Erkennung der Kulturpflanzen wird die entwickelte 2D Kamera zur Steuerung von Hackmaschinen genutzt (s. Kapitel 2.1.1). Statt der Hackwerkzeuge des ROBOVATORS mit mechanischen Werkzeugen, ist eine Abflammschiene angebracht (Abb. 20).



**Abb. 20:** Das mechanische Jätewerkzeug (links) und die thermische Abflammschiene (rechts) des ROBOVATORS während der Segetalpflanzenregulation auf einem Salatfeld;  
Quelle: POULSEN (2016)

Die Düsen öffnen und schließen autonom vor und hinter der Kulturpflanze. Somit ist es möglich, gezielt Segetalpflanzen in der Reihe zu regulieren. Das System befindet sich zurzeit noch in der Erprobungsphase. Dabei wird vor allem die thermische Empfindlichkeit der Kulturpflanzen von Bedeutung sein (MARX et al. 2012). Je nach Gemüsekultur dürfte die Beschädigung der Kulturpflanze mitunter sehr hoch sein. In ausgewählten Kulturen, die eine entsprechende Wachsschicht ausbilden, wie beispielsweise Zwiebeln, dürfte das Verfahren durchaus Erfolge erzielen.

### 2.5.3 Lasertechnik zur Beikrautregulierung

Die Problemstellung einer gezielten, thermischen Segetalpflanzenregulierung, liegt in der Fokussierung der Energie. Ziel ist eine schnelle und starke Erhitzung des Segetalpflanzenblattes (DIERAUER 2000). Eine schnelle Erhitzung des Blattes auf über 110 °C in weniger als einer Zehntelsekunde führt zum Platzen der Zellwände, wodurch die Pflanzen vertrocknen. Praxisübliche Abflamngeräte arbeiten mit Propangasbrennern. Diese können Temperaturen von 1800 °C erreichen, wovon in Bodennähe 300 bis 400 °C gemessen werden können (DIERAUER 2000). Auf Grundlage der enormen Hitzentwicklung ist eine Abschattung im Millimeterbereich jedoch nicht möglich. Aus diesem Grund hat das Laser Zentrum Hannover (LZH), in Zusammenarbeit mit der Leibniz Universität Hannover, die Wirkung von Laserstrahlen zur Segetalpflanzenregulierung untersucht (MARX et al. 2012). Weitere Untersuchungen wurden an der Rheinischen Friedrich Wilhelms Universität Bonn durchgeführt (GUDE 2012). Im Fokus der Projekte stand die gezielte Regulierung von Segetalpflanzen, ohne angrenzende Kulturpflanzen zu beschädigen. Die Energie eines Lasers lässt sich auf weniger als fünf Millimeter fokussieren (GUDE 2012). Aus diesem Grund haben sich Laser bei medizinischen Eingriffen und der Materialbearbeitung in der Industrie bewährt. Angepasst an die unterschiedlichsten Anwendungen sind die Laser in unterschiedlichen Wellenlängenbereichen und Leistungen erhältlich. Wichtig für die Regulierung von Segetalpflanzen ist ein hoher Energieeintrag in das Pflanzengewebe innerhalb kürzester Zeit. Dies wird mit Wellenlängen im mittleren Infrarotbereich, eine geringe Leistung und lange Bestrahlungszeit, den Einsatz von gepulsten oder pendelgeführten Lasern und durch eine hohe Zielgenauigkeit erreicht (MARX et al. 2012). Um die Segetalpflanzen nachhaltig zu regulieren, ist eine Zerstörung des apikalen Meristems notwendig. Diese wird mittels einer Temperaturerhöhung um  $1 \text{ K}\cdot\text{ms}^{-1}$  in 1 mm Radialabstand zum Ziel bei Wildkräutern im 2-Blattstadium erreicht. Im 4-Blattstadium ist eine Temperaturerhöhung um  $2,5 \text{ K}\cdot\text{ms}^{-1}$  in 2 mm Radialabstand nötig (MARX et al. 2012). Um das apikale Meristem zu finden und anzuvisieren werden Kameras mit nachfolgender Bildanalyse, sowie schwenkbar befestigte Laser verwendet. Dikotyle Pflanzen lassen sich dabei leichter anvisieren als monokotyle Pflanzen. Um die Pflanzen letal zu schädigen wurde je nach Laser eine Bestrahlungszeit von 75 bzw. 100 ms empfohlen. Der Wirkungsgrad lag bei 100 %. Da sich die Bestrahlungszeit nicht beschleunigen lässt und eine Zielgenauigkeit

von unter einem Millimeter eingehalten werden sollte, erfordert der Aufbau einer Maschine zur Applikationen von Laserstrahlen im Acker- oder Freilandgemüsebau neue technische Lösungen. Im Gewächshaus können die Laser auf Schienenbahnen positioniert werden. Ein Prototyp wurde bei der Durchführung des Versuchs verwendet (MARX et al. 2012). Um eine möglichst hohe Zielgenauigkeit zu erreichen, muss der Applikator frei von Vibrationen sein. Bisherige Landtechnik kann diese Anforderungen auf Grund ihrer Größe nicht erfüllen. Am realistischsten erscheint daher eine Integration des Laserverfahrens in kleine autonome Feldroboter (MARX et al. 2012). Weiterhin gibt es zurzeit noch Probleme mit sehr starkem Wildkrautbesatz, da hier eine genaue Zielfindung schwierig ist. Ebenso sollte die zu bearbeitende Fläche möglichst klein gehalten werden, um die Leistung des Systems zu erhöhen (MARX et al. 2012). Die Lasertechnik wäre somit in Kombination mit bisherigen Hackverfahren denkbar.

#### **2.5.4 Bosc Deepfield Robotics: Hackroboter mit Stempelaktor**

Die Firma Deepfield Robotics, Ludwigsburg, Deutschland, ist ein Bosch Start-up Unternehmen, das sich mit der Entwicklung von Feldrobotern beschäftigt. Grundlage für neuere Entwicklungen ist das autonome Fahrzeug BoniRob, das innerhalb einer Kooperation zwischen der Hochschule Osnabrück, der Robert Bosch GmbH und den Amazone Werken entwickelt wurde. Der Aufgabenbereich des BoniRob liegt in der Phänotypisierung von Einzelpflanzen. Ziel ist eine Erleichterung und Beschleunigung der Arbeit von Pflanzenzüchtern. Gleichzeitig ermöglicht die Technik eine exaktere Beurteilung dieser Einzelpflanzen. Um die Pflanzenbestände mit hoher Präzision bonitieren zu können, ist der BoniRob mit unterschiedlichster Technik ausgestattet. Neben unterschiedlichen GPS-Komponenten sind vor allem optische Sensoren in das Fahrzeug integriert. 3D Time-of-Flight Kameras sind in der Lage eine Laufzeitmessung durchzuführen und somit den Abstand zum Zielobjekt zu ermitteln. Weiterhin sind Laser Abstandssensoren, Lichtgitter sowie 2D Farbkameras verbaut (RUCKELSHAUSEN 2010). Durch den eingebauten Navigationsrechner ist es möglich die Signale der unterschiedlichen Sensoren zu verarbeiten und so die Fahrroute zu verfolgen und auszuwerten. Weiterhin können einzelne Pflanzen direkt wieder erkannt werden. Somit ist unter Berücksichtigung der Zeitkomponente eine 4 D

Messung möglich (DEEPFIELD ROBOTICS 2015b). Angetrieben wird der BoniRob über einen 2,6 kW Generator, der von einer 24 V / 230 Ah Batterie gespeist wird. Die vier Radnabenmotoren erlauben einen engen Wendekreis und eine stufenlose Verstellung der Spur von 1,0 bis 1,9 m. Eine Aufladung der Batterie reicht für einen 24 stündigen Betrieb des BoniRob (DEEPFIELD ROBOTICS 2015a). Das Trägerfahrzeug ermöglicht den Anbau unterschiedlichster Werkzeuge und stellte somit auch das Versuchsfahrzeug zur Integration eines autonomen Jätwerkzeugs dar. Bei der Entwicklung des Jätwerkzeugs wurden die Anforderungen aus dem ökologischen Möhrenanbau abgefragt. So sollte der BoniRob auf 75 cm breiten Möhrendämmen jeweils 4 cm links und rechts der Kulturreihe jäten. Der Beikrautbesatz wurde mit durchschnittlich 20 Beikräutern/m angenommen, wobei ein Beikraut pro Sekunde reguliert werden sollte. Weiterhin sollte die Zielgenauigkeit bei < 2 mm liegen und die Beikräuter sollten ab dem ersten Laubblattstadium zu erkennen sein (MICHAELS et al. 2015). Während der Untersuchungen zeigte sich, dass der Aufwand Beikräuter zu jäten größer ist, als diese in den Boden zu drücken. Die technische Lösung ist der Stempelaktor, mit dem Beikräuter ca. 30 mm in den Boden gedrückt werden können. Zur Lokalisierung der Beikräuter dienen zwei Kameras, von denen eine direkt am Stempelaktor angebracht ist. Der Jätprozess selbst ist in drei Teile gegliedert. So erfolgt zunächst eine „grobe“ Verortung der Beikräuter, bevor eine präzise Verortung der Beikräuter durchgeführt werden kann. Abschließend erfolgt das Stempeln der Beikräuter. Durch die Weiterentwicklung der Technik konnte die Zeit pro Beikraut reduziert werden, sodass bei einer Fahrgeschwindigkeit von  $50 \text{ mm} \cdot \text{s}^{-1}$  24 Beikräuter reguliert werden können (MICHAELS et al. 2015). Da der BoniRob mit Stempelaktor jedoch nur eine Reihe aufnehmen konnte, entwickelt die Firma Deepfield Robotics zurzeit ein Gerät mit mehreren Stempelaktoren, wodurch ein komplettes Gemüsebeet bei einer Überfahrt reguliert werden kann (DEEPFIELD ROBOTICS 2015c). Die Maschine soll eine Leistung von 20 Segetalpflanzen pro Sekunde schaffen und einen Bekämpfungserfolg von über 90 % aufweisen.

Das mit einem Dieselmotor ausgerüstete Fahrzeug verfügt über ähnliche Komponenten wie der BoniRob. So sind optische als auch GPS-basierte Sensoren verbaut, die ein autonomes Navigieren erlauben (DEEPFIELD ROBOTICS 2015c). Das Gerät besitzt ein Leergewicht von 450 kg und eine Spurweite von 1,8 m (Abb. 21).



**Abb. 21:** Deepfield Weeding-Roboter ausgerüstet mit Stempelaktor (weiße Kennzeichnung);  
Quelle: DEEPFIELD ROBOTICS (2015c)

### 2.5.5 CARRÉ SAS: Hackroboter ANATIS

Die Firma CARRÉ SAS aus Frankreich hat in Zusammenarbeit mit der Softwareentwicklungsfirma Naïo Technologies, Ramonville-Saint-Agne, Frankreich, einen Agrarroboter zur mechanischen Beikrautregulierung entwickelt, für den die Firma 2015 bei den SIMA Innovation Awards ausgezeichnet worden ist. Der 800 kg schwere ANATIS dient als autonomes Trägerfahrzeug für handelsübliche Hackgeräte, wofür er mit einem Hubwerk ausgestattet ist (Abb. 22).



**Abb. 22:** Hackroboter CARRÉ ANATIS in beim Einsatz in einer Reihenkultur;  
Quelle: EDER (2015)

Wie der BoniRob ist auch der ANATIS mit unterschiedlichster Sensortechnik ausgestattet. Neben GPS-Komponenten verfügt das autonome Fahrzeug über Laser- und Kamertechnik, die ein autonomes Steuern und Wenden entlang der Kulturreihen ermöglichen. Der ANATIS wird über drei Batterien gespeist, die einen Betrieb von vier Stunden bei einer Fahrgeschwindigkeit von  $3 \text{ km}\cdot\text{h}^{-1}$  gewährleisten (EDER 2015). Nach dieser Zeit muss der ANATIS vier Stunden geladen werden. Sollten größere Flächen bearbeitet werden, steht auch eine Hybridversion mit Generator zur Verfügung (CARRÉ 2015). Angetrieben wird der ANATIS über vier Radnabenmotoren, die eine Verstellung der Spurweite von 1,45 bis 2,05 m erlauben. Neben der navigierenden Sensortechnik verfügt der ANATIS über Sensoren, die Pflanzenparameter im Bestand bonitieren. So werden bei der Überfahrt gleichzeitig die Bodentemperatur, Luftfeuchte- und Temperatur, Anzahl und Größe der Kulturpflanze sowie der Beikrautbesatz dokumentiert. Auf die Daten kann direkt via Smartphone oder Tablet zugegriffen werden. Gleichzeitig lässt sich so auch in die Bedienung des ANATIS eingreifen. In Notfällen erhält der Anwender zusätzlich eine Nachricht via SMS (CARRÉ 2015).

### 2.5.6 K.U.L.T. autonomer Geräteträger UWE

Die Firma K.U.L.T. Kress Umweltschonende Landtechnik GmbH entwickelt gegenwärtig einen Hackroboter, den sogenannten UWE (KIRCHHOFF und DÜLKS 2015). Das Gerät wurde auf der Agritechnica 2015 erstmalig vorgestellt und soll als Trägerfahrzeug für Sä- oder Hackgeräte dienen. Hierzu ist der autonome Geräteträger mit einem Hubwerk ausgerüstet (Abb. 23).



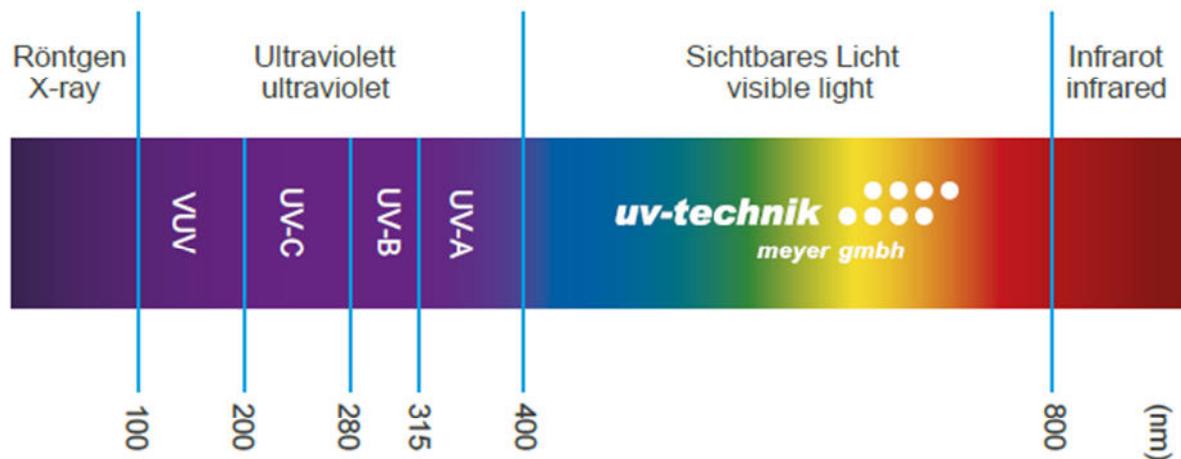
**Abb. 23:** Frontansicht des autonomen Geräteträger UWE;

Quelle: KIRCHHOFF und DÜLKS (2015)

Die Spurweite kann so gestaltet werden, dass je ein Gemüsebeet überfahren werden kann. Bis zu vier Kameras können den Bestand abtasten. Weiterhin ist das autonome Fahrzeug mit Laser- und GPS-Technik ausgerüstet (GAUL 2016). Nähere Informationen sind noch nicht bekannt, da sich das Fahrzeug nach Aussage des Herstellers noch in der Erprobungsphase befindet. Die Entwicklung erfolgt dabei in Zusammenarbeit mit einem dänischen Unternehmen, das sich aus der Kongskilde Industries A/S abgespalten hat (Aussage Hersteller).

## 2.6 Einführung in die UV-C Technik

Das Sonnenlicht emittiert elektromagnetische Strahlung in unterschiedlichen Wellenlängenbereichen. Die Strahlung, die uns auf der Erde erreicht, liegt in einem Wellenlängenbereich zwischen ca. 0,1 nm und etwa 10 m. Für den Mensch ist nur ein geringer Teil der emittierten Strahlung sichtbar. Dieser Bereich von ca. 380 nm bis 780 nm wird auch als sichtbarer Teil der elektromagnetischen Strahlung oder als Licht bezeichnet (Abb. 24).



**Abb. 24:** Spektrum der Sonnenstrahlung von 0 bis 1000 nm;

Quelle: UV-TECHNIK MEYER GMBH (2016)

Johann Wilhelm Ritter konnte 1801 nachweisen, dass es unterhalb des sichtbaren violetten Bereichs einen weiteren Wellenlängenbereich der Sonnenstrahlung gibt. Seine Untersuchungen mit einem Prisma basierten auf einem mit Silberchlorid getränkten Papier. Das Silberchlorid färbt sich unter Einfluss von Licht schwarz. Unterhalb des sichtbaren Bereichs verfärbte sich das Silberchlorid besonders schwarz, sodass der Nachweis eines weiteren Wellenlängenbereichs erbracht war (RITTER et al. 1986). Heute wird der ultraviolette Bereich der Strahlung nach DIN 5031-7 definiert. Der Bereich von 315 bis 380 nm ist als UV-A Strahlung festgelegt. Darunter gliedert sich von 280 bis 315 nm die UV-B Strahlung an. Die UV-C Strahlung findet sich im Wellenlängenbereich von 200 bis 280 nm (UV-TECHNIK MEYER GMBH 2016). Mit zunehmender Wellenlänge sinkt gleichzeitig der Energiegehalt der Strahlung. Die UV-C Strahlung ist somit in dieser Reihenfolge die energiereichste Strahlung. Im kürzesten Wellenlängenbereich erstreckt sich

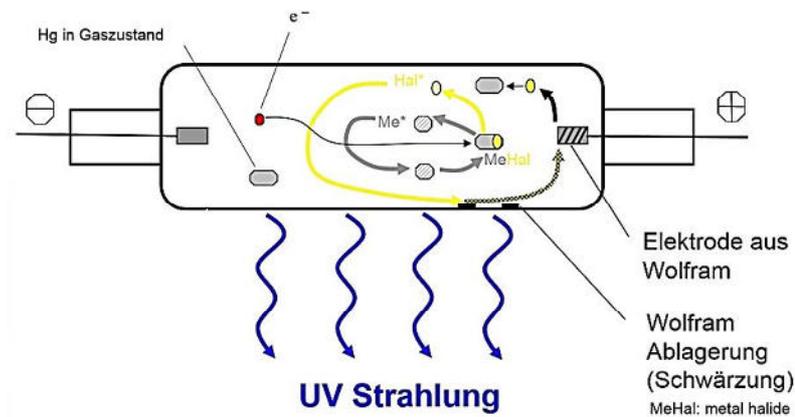
von 100 bis 200 nm das Vakuum-UV (kurz: V-UV). Diese wird vom Sauerstoff vollständig absorbiert und kann daher nur im Vakuum beobachtet werden.

Dass sich ultraviolettes Licht zum Abtöten von Organismen eignet entdeckten Ende des 19. Jahrhunderts die Forscher A. Downes und T.P. Blunt (DOWNES und BLUNT 1878). So konnte der Nachweis erbracht werden, dass sich Mikroorganismen unter dem Einfluss des Sonnenlichts nicht weiter vermehren. Zu diesem Zeitpunkt konnte jedoch noch nicht festgestellt werden, worin die Dezimierung der Bakterien begründet war. Nach fast einem Jahrhundert wurde dann der Aufbau der Desoxyribonukleinsäure (kurz: DNA) entschlüsselt (WATSON et al. 1953). So ist heute bekannt, dass die UV-C Strahlung einen photochemischen Effekt hauptsächlich bei der Base „Thymin“ der DNA auslöst. Durch Bildung von Thymin-Dimeren kommt es zu einer Verformung der DNA. Dieser Effekt behindert die Transkription und die Replikation. In letzter Konsequenz stirbt der Organismus ab (BERKELMANN-LÖHNERTZ et al. 2013). Für die Bestrahlung hat sich ein Wellenlängenbereich von 240 bis 270 nm als optimal herausgestellt. Um ein größtmögliches Schädigungspotenzial zu erzielen, wird meist bei einer Wellenlänge von 254 nm gearbeitet (UV-TECHNIK MEYER GMBH 2016).

### **2.6.1 Technik zur Erzeugung der UV-C Strahlung**

Da die UV Strahlung mit abnehmenden Wellenlängen in der Erdatmosphäre absorbiert wird, muss UV-C Strahlung künstlich hergestellt werden. Die Erzeugung dieser Strahlung geschieht in Entladungslampen. Je nach Betriebsweise wird zwischen zwei Typen unterschieden: den UV-Niederdruck und den UV-Mitteldruck Strahler. Vereinzelt sind auch UV-Licht Emittierende Dioden (LED) im Einsatz. Allerdings ist deren Effizienz zur Zeit noch nicht auf dem Stand der Nieder- und Mitteldruckstrahler (UV-TECHNIK MEYER GMBH 2016). Die beiden Strahlertypen unterscheiden sich ausschließlich hinsichtlich ihrer Betriebsweise. Die Funktionsweise ist jedoch identisch. Die Füllung der Lampen besteht aus dem Edelgas Argon und flüssigem Quecksilber. Das Schutzrohr besteht aus Quarzglas, da dieses die UV-C Strahlung am wenigsten absorbiert und somit nur zu einem geringen Wirkungsverlust führt. An den Enden der Strahler befinden sich Kathode und Anode. Diese erhitzen sich beim

Anlegen einer Spannung und geben so Elektronen frei. Diese stoßen die Elektronen der Quecksilberatome an ( Abb. 25).



**Abb. 25:** Funktionsprinzip einer Quecksilberdampfampe schematisch dargestellt und beschriftet; Quelle: UV-TECHNIK MEYER GMBH (2016)

Durch verlassen und wieder zurückkehren in die ursprüngliche Laufbahn wird Strahlung emittiert. Diese ist je nach Laufbahnunterschied einem bestimmten Wellenlängenbereich zuzuordnen (CARBONIT Filtertechnik GmbH und LAGOTEC GmbH 2007). Die Niederdruckstrahler arbeiten mit einem inneren Druck von 0,01 mbar und emittieren Wellenlängen von 185 und 254 nm. Je nach Leuchtrohrmaterial werden UV-Strahler als ozonbildende oder ozonfreie Lampen bezeichnet. Da Ozon schädigend wirkt, werden die Schutzrohre mit Titandioxid dotiert, welches Wellenlängen unter 240 nm absorbiert. Die Mitteldruckstrahler arbeiten in einem Druckbereich von 1 bar und emittieren einen Wellenlängenbereich von 200 bis 300 nm (CARBONIT Filtertechnik GmbH und LAGOTEC GmbH 2007). Je nach verwendeten Elektroden wird zwischen Kaltkathoden- und Heißkathodenstrahlern unterschieden. Die Kaltkathodenstrahler zeichnen sich durch eine höhere Lebensdauer aus. Heißkathodenstrahler besitzen eine höhere Strahlungsintensität. Daher eignen sich diese Strahlertypen besser zur Entkeimung (UV-TECHNIK MEYER GMBH 2016). Serienmäßig sind die UV-C Strahler mit einem Vorschaltgerät ausgerüstet. Dieses ist heute meist elektronisch ausgeführt und erlaubt die stufenlose Einstellung der Strahlerleistung. Somit kann auch der Strahleralterung entgegen gewirkt, oder unterschiedliche Geschwindigkeiten gefahren werden. Um der Überhitzung der Geräte entgegen zu wirken werden die Strahler mit einer gerätespezifischen Kühlung ausgerüstet. Da

sich eine zu starke Kühlung der UV-C Lampen negativ auf den Brennprozess auswirkt, ist hier ebenfalls auf eine Regelung zu achten (UV-TECHNIK MEYER GMBH 2016).

Entscheiden für den Erfolg einer Entkeimungsmaßnahme ist die erforderliche Strahlendosis, die je nach Mikroorganismus unterschiedlich hoch ist (CARBONIT Filtertechnik GmbH und LAGOTEC GmbH 2007). Die UV-Dosis setzt sich aus der jeweiligen Bestrahlungsstärke und der Bestrahlungsdauer zusammen. Die Bestrahlungsstärke beschreibt die eingehende Strahlungsleistung auf eine Fläche (ERBRECHT et al. 2003). Die Strahlungsleistung definiert sich aus dem Quotient der Arbeit pro Zeiteinheit:

**Formel 1:** Definition der Leistung

$$P = \frac{W}{t}$$

P: Leistung [W]

W: Arbeit [J]

t: Zeit [s]

Die Leistung ist je nach Strahlertyp und Konstruktion definiert. Geteilt durch die Fläche definiert sich die Einheit der Bestrahlungsstärke wie folgt:

**Formel 2:** Definition der Bestrahlungsstärke

$$S = \frac{P}{A}$$

S: Bestrahlungsstärke  $\left[\frac{W}{m^2}\right]$

P: Leistung [W]

A: Fläche [m<sup>2</sup>]

Multipliziert mit der Zeit ergibt sich die UV-Dosis:

**Formel 3:** Berechnung der UV-Dosis

$$UV - Dosis = S \cdot t$$

Die UV-Dosis im Bereich der UV-C Strahlung wird meist in der kleineren Einheit mWs·cm<sup>2</sup> angegeben. Die Wirkung einer Bestrahlung ist dabei unabhängig von deren Stärke, d.h. eine

kurz andauernde Strahlung von hoher Stärke hat den gleichen Erfolg, wie eine lang andauernde Strahlung mit niedriger Bestrahlungsstärke (BERKELMANN-LÖHNERTZ et al. 2013). Viel entscheidender für eine effiziente Anwendung der UV-C Technik in der Praxis ist die konstruktionstechnische Umsetzung der Geräte. So entscheidet die Öffnung der Strahlenquelle über die mögliche Zielflächengröße. Gleichzeitig entscheiden eine oder mehrere Lampen über die mögliche Bestrahlungsstärke. Die technisch komplexeste Umsetzung meist die Nähe zum Zielobjekt. Um eine optimale Ausbeute der UV-C Strahlung zu erzielen sollte die Zielfläche nur wenige Zentimeter von der Strahlenquelle entfernt sein (BUCHNER 2012). Je kleiner dieser Abstand ist, umso besser ist auch die Ausbeute. Vor allem bei speziell geformten Zielobjekten, wie Flaschen oder Becher, ist die technische Umsetzung schwierig (UV-TECHNIK MEYER GMBH 2016). Bei trüben Flüssigkeiten müssen die Anlagen zudem eine notwendige Durchdringungstiefe erreichen. Dies geschieht in flüssigem Material oft mit der Verwendung von Dünnschichtreaktoren oder durch Verwirbelung (GRÄF et al. 2014). Übertragen auf Pflanzenbestände bedeutet dies, dass die Blätter zur Behandlung von Zielorganismen auf der Blattunterseite mechanisch gedreht werden müssen.

### **2.6.2 Sicherheitsmaßnahmen bei der Anwendung von UV-C Strahlen**

Da die UV-C Strahlung sehr energiereich ist, kann es beim Kontakt mit dem menschlichen Organismus ebenfalls zu Schäden kommen. Daher gilt es beim Betrieb von UV-C Anlagen einige Sicherheitsregeln zu beachten. Insbesondere müssen Augen und Haut vor dem Kontakt mit der UV-C Strahlung geschützt werden. Da die Strahlung kurzweilig ist, wird diese bereits durch Fenster- oder Plexiglas abgeschirmt. Bei geschlossenen Anlagen sind diese Schutzmaßnahmen meist durch die technische Konstruktion gewährleistet. Bei ozonbildenden Anlagen darf eine maximale Konzentration von 0,1 ppm zudem nicht überschritten werden (UV-TECHNIK MEYER GMBH 2016; REIDENBACH 2013). Ebenso muss die Betriebstemperatur der Leuchtstoffröhren beachtet werden. UV-Niederdruckstrahler entwickeln während des Betriebs eine Temperatur von etwa 40 °C. Sind die Lampen mit Indium-Amalgam dotiert, können diese eine Temperatur von 90 °C bis 100 °C an der Oberfläche der Röhren erreichen. UV-Mitteldruckstrahler erreichen während des Betriebs eine Temperatur von 700 °C bis 950 °C (CARBONIT Filtertechnik GmbH und LAGOTEC

GmbH 2007). Die Anwendung von UV-C Strahlung am Arbeitsplatz wird zudem durch die Richtlinie 2006/25/EG des europäischen Parlaments geregelt (Europäisches Parlament 2006).

### **2.6.3 Anwendungsbereiche der UV-C Strahlung**

Die UV-C Technik findet mittlerweile eine weite Verbreitung innerhalb der unterschiedlichsten Industriezweige. Die Härtung von Farben, Klebstoffen und Vergussmassen ist ein wesentlicher Anwendungsbereich der UV-C Technik. Die Industriesparten erstrecken sich von der Möbelindustrie, über die CD und DVD Produktion bis hin zur Autoglasreparatur. Ein wichtiger Anwendungsbereich ist die präperative Photochemie. In dieser Sparte werden die Photobromierung, die Photochlorierung und die Photooxidation zusammengefasst. Ein weiterer wichtiger Absatzmarkt ist die Medizin. Dort werden UV-C Strahlen zur Lichttherapie eingesetzt, um beispielsweise Vitamin D Mangelerscheinungen zu heilen. Ebenso wird die UV-C Technik zur Entkeimung von Oberflächen, Luft und Wasser verwendet. So lässt sich durch organische Schadstoffe belastetes Wasser durch die UV unterstützte Oxidation reinigen. Neben der Förderung der Oxidation kann auch die Ozonbildung zur Reinigung von verschmutztem Wasser eingesetzt werden (CARBONIT Filtertechnik GmbH und LAGOTEC GmbH 2007).

In der Landwirtschaft werden UV-C Geräte bisher hauptsächlich in den vor- und nachgelagerten Bereichen eingesetzt. So wird UV-C Strahlung in der Biotechnologie zur Anregung der Lumineszenz verwendet. Die Simulation des Sonnenlichts findet in der Pflanzenschutzmittelforschung ihre Anwendung, um so den Abbau der Pflanzenschutzmittel zu erforschen (CARBONIT Filtertechnik GmbH und LAGOTEC GmbH 2007). Ein weiteres Einsatzgebiet ist die Desinfektion von Stallungen, um beispielsweise das PSSR Virus bei der Schweinehaltung zu bekämpfen (ZÄH 2015).

Die direkte Bestrahlung von Lebensmitteln wird durch die Richtlinien 1999/2/EG (Europäisches Parlament 1999a) und 1999/3/EG (Europäisches Parlament 1999b) geregelt. Danach dürfen ausschließlich getrocknete Gewürze und Kräuter direkt bestrahlt werden. Die länderspezifische Verordnung der europäischen Richtlinie wird in Deutschland durch die Lebensmittelbestrahlungsverordnung geregelt (Bundesministerium für Gesundheit 2000). Demnach dürfen Trinkwasser, Oberflächen von Obst und Gemüse sowie Hartkäse bei der

Lagerung bestrahlt werden. Nach der Einschätzung des Bundesinstituts für Risikobewertung aus dem Jahr 2012 ist die UV-C Technik zudem zur Keimreduzierung auf Schaleneiern geeignet (Bundesinstitut für Risikobewertung 2012). Die Entkeimung ist jedoch nicht generell für alle Lebensmittel erlaubt. Die Erweiterung der Positivliste befindet sich zurzeit im Antragsverfahren. Ein wesentlicher Vorteil des Verfahrens gegenüber der thermischen Sterilisation ist in der Schonung der Produktqualität begründet (GRÄF et al. 2014).

Auf internationaler Ebene wird die UV-C Technik zur Nacherntebehandlung bereits seit mehr als 30 Jahren erforscht und eingesetzt (CHARLES und ARUL 2007). Die UV-C Behandlung führt insbesondere bei einer korrekten Lagertemperatur zu einer verbesserten Lagerfähigkeit. Daneben konnten je nach Sorte und je nach Pflanzenart positive Veränderungen der Inhaltstoffkonzentrationen beobachtet werden. Die Bestrahlung verändere somit den Nährwert. Da die Sensitivität der Pflanzen stark schwankt, wäre zentrale Datensammlung der Bestrahlungswerte denkbar und wünschenswert (CHARLES und ARUL 2007).

#### **2.6.4 Bisherige Ergebnisse der UV-C Anwendung im Pflanzenbau**

Die Möglichkeit, pathogene Pilze, Bakterien und Viren ohne Rückstände zu bekämpfen, macht das UV-C Verfahren für die Agrarforschung interessant. Zu beachten ist jedoch, dass die Anwendung der UV-C Technik in Pflanzenbeständen patentrechtlich durch die Firma CLEANLIGHT, Wageningen, Niederlande, geschützt ist (AIKING und VERHEIJN 2007). Das Schutzrecht wurde in Deutschland nicht in den nationalen Schutz überführt. Somit finden sich bisher nur wenige Forschungsarbeiten zum Thema UV-C im Pflanzenbau, die vornehmlich aus den Niederlanden kommen. Ein weiterer Grund ist vor allem der komplexe Aufbau der Technik zur Bestrahlung aller Blattteile der Pflanzen. Diese mechanische Konstruktion macht die Forschungsgeräte hoch komplex. Daher wurden zunächst andere physikalische Methoden, wie etwa Infrarotstrahlen bevorzugt (BUDDE und DAMEROW 2013). Die letalen thermischen Dosen führten häufig zu Schädigungen des Pflanzengewebes, weshalb diese Verfahren ebenfalls keinen breiten Anklang fanden. Da es sich beim UV-C Einsatz im Pflanzenbau um eine neuere Entwicklung handelt, sind die durchgeführten Untersuchungen oft Tastversuche.

In Schleswig Holstein wurden erste Versuche mit dem UV-C Einsatz in Pflanzkartoffeln durchgeführt (GELDERMANN 2015). Dabei sollte der UV-C Einfluss auf das phytopathogene Bakterium *Dickeya spp.* untersucht werden. *Dickeya* verursacht Welkeerscheinungen an der Pflanze und lässt die Leitungsbahnen absterben. Bei einer Temperatur von 24 bis 27 °C verbreitet sich der Erreger sehr schnell, was ein hohes Schadpotenzial im Kartoffelbau mit sich bringt. Für die Untersuchungen wurden Pflanzknollen mit dem *Dickeya* Erreger infiziert. Anschließend erfolgten unterschiedliche Bestrahlungen mit UV-C. Die Bestrahlungszeiten wurden zwischen 30 Sekunden und 2 Minuten variiert. Neben einer Kontrollvariante ohne Bestrahlung, wurde eine weitere Variante ohne künstliche Infizierung mit *Dickeya spp.* getestet. Im Anschluss wurde das Auflaufverhalten der Pflanzknollen überprüft. Dabei zeigte die infizierte Variante ohne Bestrahlung mit knapp 50 % die meisten Fehlstellen. Die Kontrollvariante ohne Infizierung wies dagegen nur knapp 15 % Fehlstellen auf. Die Knollen mit einer zusätzlichen Bestrahlung von 30 Sekunden wiesen knapp 30 % Fehlstellen auf und die Variante mit einer Bestrahlungszeit von 2 Minuten wiesen knapp 35 % Fehlstellen auf. Um die Keimfähigkeit der Knollen zu überprüfen wurde in einer folgenden Untersuchung eine Bestrahlungszeit von 5 Minuten gewählt. Negative Auswirkungen konnten dabei nicht beobachtet werden. An Hand dieser Testversuche konnte zwar eine Wirkung der UV-C Bestrahlung festgestellt werden, für eine Empfehlung müssen jedoch weitere Versuche gefahren werden, um beispielweise die optimale UV-C Dosis zu ermitteln (GELDERMANN 2015).

Auch KESSEL und FÖRCH (2006) führten Untersuchungen mit UV-C in Kartoffeln durch. Ziel war die Untersuchung der Sporangienkeimung bei *Phytophthora infestans*. Hierzu wurde *Phytophthora* auf Agar gezogen und mit unterschiedlichen Bestrahlungsstärken behandelt. Hierzu wurde eine Spritzkabine mit UV-C Röhren der Firma Philips ausgestattet. Die Lampen des Typs TUV 64T5 4P SE besaßen eine Leistung von 75 Watt. Untersucht wurde die Effektivdosis (kurz: ED) 50 und 95, d. h. die Dosis bei der 50 bzw. 95 % des Schaderregers abgetötet werden können. Für den ED<sub>50</sub>-Wert ergab sich eine Strahlungsdosis von 4,8 bis 5 mJ·cm<sup>-2</sup>. Für den ED<sub>95</sub>-Wert ergab sich eine Dosis von 6,2 bis 8,3 mJ·cm<sup>-2</sup> (KESSEL und FÖRCH 2006).

Das PROEFCENTRUM FRUITTEELT, Sint-Truiden, Belgien, untersuchte 2009 in Zusammenarbeit mit der Firma CLEANLIGHT, Wagenigen, Niederlande, den Einfluss von

UV-C Strahlung auf echten Mehltau an Apfel und auf echten Mehltau an Erdbeeren (VAN HEMELRIJCK et al. 2010). Hierzu wurden Apfelsetzlinge künstlich mit *Podosphaera leucotricha* infiziert und im Gewächshaus unter kontrollierten Bedingungen kultiviert. Für die Untersuchungen an Erdbeeren wurden Frigopflanzen verwendet, die künstlich mit *Sphaerotheca macularis* infiziert wurden. Um die Bestrahlung mit UV-C durchführen zu können, wurde ein mobiler Tisch entwickelt, mit dem die Pflanzen einzeln unter den Lampen durchgefahren werden konnten. Die Pflanzen konnten so von oben und von den Seiten bestrahlt werden. Je nach Vorfahrtsgeschwindigkeit konnte die Bestrahlungsstärke angepasst werden. Diese variierte zwischen 5 und 60 mJ·cm<sup>-2</sup>. Die Bestrahlung erfolgte in unterschiedlichen Intervallen zwischen einmalig und täglich. Eine unbehandelte Variante diente als Kontrolle. In Erdbeeren wurde zudem eine praxisübliche Fungizidvariante mit den Wirkstoffen Quinoxifen, Pyraclostrobin und Boscalid durchgeführt. Der Echte Mehltau konnte durch die Bestrahlung in beiden Kulturen signifikant reduziert werden. Am besten erwies sich eine Bestrahlungsstärke von 30 und 60 mJ·cm<sup>-2</sup> und einem Bestrahlungsintervall von 24 Stunden. In der Kultur Apfel konnte der Befall so um knapp 99 % reduziert werden. In der Kultur Erdbeeren betrug die Reduktion 100 % und lag damit noch über der chemischen Variante mit knapp 77 %. Negative Auswirkungen auf die Früchte oder das Wuchsverhalten der Pflanzen konnten nicht festgestellt werden (VAN HEMELRIJCK et al. 2010).

An der Hochschule Geisenheim, Geisenheim, Deutschland, wurden zwischen 2013 und 2015 Untersuchungen in Zusammenarbeit mit der Firma UV-TECHNIK MEYER GMBH, Ortenberg, Deutschland, an Weinreben durchgeführt (BERKELMANN-LÖHNERTZ et al. 2015). Im Focus der Untersuchungen standen die wichtigsten funguralen Schaderreger des Weinbaus, wie falscher Mehltau der Rebe (*Plasmopora viticola*), Echter Mehltau (*Erysiphe necator*), Grauschimmel (*Botrytis cinerea*) und Schwarzfäule (*Guignardia bidwellii*). Zunächst wurden in einer Laborphase die letalen Bestrahlungsstärken ermittelt. Hierzu wurde ein spezieller Bestrahlungstisch entwickelt. Als optimale Mischung zwischen hoher biologischer Wirksamkeit und geringer Phytotoxizität haben sich Bestrahlungsdosen zwischen 80 und 160 mWs·cm<sup>-2</sup> herausgestellt (BERKELMANN-LÖHNERTZ et al. 2013). Im Gewächshaus konnten so Absterberaten von 50 bis 80 % bei *Plasmopora viticola*, von 50 bis 70 % bei *Botrytis cinerea* und von 60 bis 95 % bei *Guignardia bidwellii* ermittelt werden. In einer zweiten Versuchsphase wurden Untersuchungen im Freiland durchgeführt. Hierzu

wurde ein Prototyp mit einer elektrischen Leistung von 1,3 kW und Röhrenlängen 0,95 m entwickelt. Die UV-C Einheiten waren auf beiden Seiten der Laubwand angebracht und konnten der Laubwand angepasst werden. Hierzu waren die Platten höhenverstellbar. Um eine bessere Durchdringung des Bestandes zu gewährleisten war ein zusätzliches Gebläse angebracht, das die Blätter aufwirbelte. Neben einer unbehandelten Kontrollvariante wurde eine integrierte Pflanzenschutzvariante, eine reduzierte Pflanzenschutzvariante mit und ohne UV-C Einsatz und zwei Varianten mit ausschließlichem UV-C Einsatz untersucht. Die reduzierten Pflanzenschutzmaßnahmen wurden jeweils um Botrytisbehandlungen ergänzt. Ziel war es diesen Schaderreger zu dezimieren. Der Befall mit *Botrytis cinerea* in der Kontrollvariante betrug 2013 31 %. 2014 waren es 23 %. Der Befall konnte am besten mit einer reduzierten Variante des integrierten Pflanzenschutz und zusätzlicher *Botrytis* sowie UV-C Behandlung reduziert werden. Neben einer Reduktion des Schaderregers um 82 % konnte zudem die Hälfte der Fungizide eingespart werden (BERKELMANN-LÖHNERTZ et al. 2015).

Die Hochschule Geisenheim beschäftigt sich ebenfalls mit der phytopatogenen Pilzbekämpfung auf Golfrasen (KÖBER 2015). Die Untersuchungen halten zurzeit noch an. Die ersten Ergebnisse seien sehr vielversprechend. Weiterhin besteht die Möglichkeit die UV-C Bestrahlung mit dem Einsatz biologischer Pflanzenschutzmittel zu kombinieren. Die eingesetzten Antagonisten können so die sterile Oberfläche des Rasens schneller besiedeln, wodurch die Schadpilze effizient verdrängt werden könnten.

### **3 Untersuchungen zur innovativen Anbaugerätesteuerung**

Das folgende Kapitel beschreibt den Aufbau, die Durchführung und die Ergebnisse der Untersuchungen zur innovativen Anbaugerätesteuerung. Da die Software moderner GPS-basierter Lenksysteme sehr komplex ist und im Zuge neuester Entwicklungen weiter verfeinert wird, müssen die Softwareupdates ausgiebig getestet werden. Aus diesem Grund finden die Untersuchungen an drei verschiedenen Standorten statt. Die Entwicklung und Testung neuester Software findet auf dem Hofgut Ringelshausen in Hungen (50°27'13.09"N; 8°58'5.56"E) statt. Weitere Pretests werden auf dem landwirtschaftlichen Betrieb Schwarz in Hüttenberg (50°31'6.93"N; 8°37'8.58"E) durchgeführt. Die Untersuchungen in den Gemüsebaukulturen finden auf den Flächen des Betriebs Walter Hege Kartoffel- und Gemüsebau in Limburgerhof (49°24'13.28"N; 8°23'49.28"E) statt. Die ausgewählten Felder sind jeweils als Punktkoordinaten verortet. Die Untersuchungen wurden im Zeitraum von Frühjahr 2014 bis Frühjahr 2016 durchgeführt.

#### **3.1 Material und Methoden**

Für die durchgeführten Untersuchungen sind unterschiedliche technische und versuchstechnische Komponenten erforderlich. Da diese über den gesamten Untersuchungszeitraum angewendet werden können, beschreibt dieses Kapitel die notwendigen Voraussetzungen und methodischen Vorgehensweisen der praktischen Hackversuche. Beobachtungen die während der Projektlaufzeit zu einer Veränderung der technischen Bauteile geführt haben, werden in den entsprechenden Kapiteln behandelt.

##### **3.1.1 Beschaffung der Technik und Herstellerauswahl**

Hersteller von GPS Lenksystemen für Traktoren und Anbaugeräte gibt es viele, die sich vor allem im Ackerbau etabliert haben. Der Gemüsebau stellt auf Grundlage seiner Spezialtechnik jedoch zusätzliche Anforderungen, weshalb zunächst abgewogen werden muss, welcher Hersteller diese Anforderungen erfüllen kann. So muss das System auch bei Geschwindigkeiten von unter  $1 \text{ km}\cdot\text{h}^{-1}$  funktionieren, da in diesem Geschwindigkeitsbereich Pflanzarbeiten getätigt werden. Durch die Trilateration der Systeme sind langsame

Geschwindigkeiten schwieriger zu berechnen, weshalb einige Hersteller diese Anforderungen nicht erfüllen. Ebenso sollte das System auch in Rückwärtsfahrt funktionieren, da die Vorgewende oft sehr kurz sind. Während des Wendevorgangs kann der Traktor durch einmaliges Zurücksetzen so direkt in Arbeitsposition gebracht werden. Weiterhin muss das System Rohr- und Erntegassen einplanen können. Dies bedeutet nicht jede Spur ist gleich breit. Ebenso sollte eine Vorplanung der Fahrspuren am PC möglich sein. So können die Felder in den Wintermonaten geplant und während der Saison abgearbeitet werden. Um die innovative Anbaugerätesteuerung mit der bisherigen Verschieberahmentchnik zu vergleichen, soll der Hersteller diese ebenfalls anbieten.

Durch diese sehr vielschichtigen Anforderungen des Gemüsebaus beschränkt sich die Auswahl der Hersteller. Auf Grundlage der Erfahrungen aus der Masterthesis wurde eine Anfrage bei der Firma geo-konzept durchgeführt. Leider kam es zu Lieferschwierigkeiten einiger Komponenten, weshalb die Wahl zwischen Verlängerung der Projektlaufzeit oder Wechsel des Herstellers bestand. Es wurde der Wechsel des Herstellers beschlossen. Die Firma REICHHARDT Steuerungstechnik GmbH hat im Jahr 2014 ebenfalls einen Verschieberahmen entwickelt, zu dem bis zum damaligen Zeitpunkt noch nicht ausreichend Erfahrungen aus der Praxis verfügbar waren. So kam es zu einer Kooperation, um die beidseitige Entwicklung von Anbaugerätesteuerungen voranzutreiben.

### **3.1.2 Verwendete GPS Technik**

Um die Untersuchungen zur innovativen Anbaugerätesteuerung durchführen zu können, bedarf es einiger Umbauten. Zunächst wurde ein Traktor mit einer Lenkautomatik PSR ISO TOP der Firma REICHHARDT ausgerüstet. Für den Umbau stand ein Traktor des Betriebes Walter Hege Kartoffel- und Gemüsebau zur Verfügung. Der Massey Ferguson 6455 ist mit einer Pflegebereifung und 2 m Spurweite ausgerüstet, um die unterschiedlichsten Saat- und Pflegearbeiten in den Gemüsebeeten durchführen zu können. Ebenso verfügt dieser Traktor über einen geschlossenen Load-Sensing (CCLS) Hydraulikkreislauf. Durch die druck- und mengengesteuerte Hydraulikpumpe, mit einer Leistung von bis zu  $110 \text{ l} \cdot \text{min}^{-1}$ , ist es sowohl möglich, den Verschieberahmen, bzw. die innovative Anbaugerätesteuerung, als auch die weiteren Abnehmer wie etwa das Hubwerk des Traktor gleichzeitig zu bedienen. Werksseitig

war der Traktor, wie viele andere Traktoren im 100 PS Bereich, nicht mit einer Vorrüstung für GPS Lenksysteme lieferbar. Die Vorrüstung würde mehrere Komponenten, wie ein zusätzliches Proportionalventil, einen Lenkwinkelsensor, Kabelbäume und den Navigationsrechner beinhalten. Diese werden beim Zusammenbau des Traktors direkt integriert, so können Kosten gespart werden. Der nachträgliche Einbau einer Lenkautomatik erfordert vor allem einen erhöhten Aufwand an Zeit. Der Preis für eine Nachrüstung ist an den Einbauaufwand gekoppelt und beläuft sich im Schnitt auf 20.000 bis 25.000 €. Gleichzeitig erlaubt das System durch seine direkte Ansteuerung der Traktorlenkung die höchste Genauigkeit. Neben dem Bedienterminal besteht das System aus einem Receiver, einem Lenkwinkelsensor, einem vier Achsen Gyroskop, einem Navigationsrechner und einem proportionalen Hydraulikventil (Abb. 26).



**Abb. 26:** Detailansichten und Lokalisation wichtiger Komponenten einer GPS Lenkautomatik eingebaut in einen Traktor

Das Bedienterminal und der Receiver sind bei allen Herstellern so konzipiert, dass sie schnell von einem auf das nächste Fahrzeug umgesetzt werden können. REICHHARDT bietet dem Kunden vier unterschiedliche Varianten an Bedienterminals und zwei Varianten von Receivern. Auf dem Traktor wurden ein Basic-Terminal mit Tastenbedienung und ein RGS

320 Receiver verbaut. Der RGS 320 Receiver besitzt ein integriertes GSM Modem, das den Empfang der Korrekturdaten via Mobilfunk sicherstellt. Es können sowohl NAVSTAR als auch GLONASS Satelliten empfangen werden. Der RGS 320 Receiver wird allerdings nicht mehr vertrieben, sodass dem Kunden der RGS 325 mit externem GSM Modem oder der RGS 326 mit integriertem Modem, zusätzlichem Empfang von BeiDou und der Vorbereitung für den Empfang von GALILEO zur Verfügung stehen (REICHHARDT 2015b).

Des Weiteren wurde ein Verschieberahmen PSR Slide XL der Firma REICHHARDT zur Verfügung gestellt. Dieser besitzt eine Tragkraft von 4 t und einen Verschieberegion von +/- 300 mm. Das Leergewicht des Rahmens beträgt 580 kg. Neben einem Navigationsrechner und einem Proportionalventil war ein Neigungssensor montiert. Die Bedienung erfolgte über ein zweites Basic Bedienterminal. Zur Steuerung mittels GPS war der Rahmen mit einem RGS 320 Receiver ausgestattet. Zusätzlich wurden insgesamt vier SONIC Sensoren mitgeliefert, um den Rahmen im Bedarfsfall mittels Ultraschall navigieren zu können (s. Kapitel 2.1.2 und 2.2.6).

Um die notwendige Genauigkeit von +/- 2 cm zu erreichen wird zusätzlich das Korrektursignal einer RTK Basisstation benötigt. Die Firma REICHHARDT Steuerungstechnik GmbH bietet mit ihrem RTK CLUE ein Netzwerk aus mehreren Basisstationen. Diese werden von einem Betreiber aufgestellt und können dann zu einem Cluster zusammengefasst werden. Je nach Größe des Clusters erhält der Kunde somit Zugang zu mehreren Basisstationen. Mit der RTK CLUE App kann der Nutzer, die ihm nächstgelegene Basisstation über Smartphone oder PC auswählen. REICHHARDT gibt eine maximale Baseline von 30 km an (REICHHARDT 2015a). Für die Untersuchungen konnte auf eine RTK Basisstation in Bürstadt zurückgegriffen werden. Die Baseline zwischen Referenzstation und dem Betrieb Hege beträgt knapp 28 km. Um die notwendigen Daten via Mobilfunk abrufen zu können, muss im Receiver eine SIM Karte verbaut werden. Die Wahl des Funknetzbetreibers sollte dabei aus dem Mobiltelefonempfang abgeleitet werden, d.h. es sollte der Betreiber gewählt werden, bei dem am Standort auch der beste Funkempfang mit dem Mobiltelefon erzielt werden kann. Im Fall des Betriebs Hege wurde sich für einen Datentarif des Netzbetreibers T-Mobile entschieden. Die kleinstmöglichen Datentarife beginnen heute meist bei einem Gigabyte Datenvolumen je Monat, was auch für längere Arbeitstage und für den Dauereinsatz ausreichend ist. Neben den Standardtarifen werden

vereinzelt auch spezielle Tarife für den Navigationsbereich mit wenigen MB Datenvolumen angeboten. Als Minimum empfehlen die meisten GPS Hersteller ein Datenvolumen von 100 MB je Monat. In Gesprächen mit Praktikern zeigte sich jedoch, dass bei einem 10 stündigen Betrieb und 25 Einsatztagen mehr Datenvolumen benötigt wird. Hier liegt die Untergrenze bei etwa 500 MB Datenvolumen je Monat.

### **3.1.3 Entwicklung und Aufbau der innovativen Anbaugerätsteuerung**

Die Idee zur Entwicklung einer innovativen Anbaugerätsteuerung entstand bei der Durchführung eines Versuchs im Jahr 2013 (s. HEGE 2013). Die durchgeführten Untersuchungen brachten sowohl Erfahrungen zur GPS-gestützten Segetalpflanzenregulierung als auch Erkenntnisse zum Handling des eingesetzten Verschieberahmens der Firma geo-konzept. Die Ansteuerung mittels RTK hat dabei die gewünschte Genauigkeit erzielt, wodurch dieses Verfahren weiter verfolgt werden soll. Vor allem durch die kulturunabhängige Arbeitsweise ist es möglich blind zu hacken oder rankende Kulturen zu pflegen, wie beispielsweise Kürbis. Ebenso arbeitet das System unabhängig von der Stärke des Segetalpflanzenbesatzes. Bei der Arbeit mit dem Verschieberahmen konnten einige Schwachstellen aufgedeckt werden. Zum einen muss die Gelenkwelle bei zapfwellengetriebenen Geräten, wie einer Sämaschine, angepasst werden, da der Anbaupunkt um die Länge des Rahmens nach hinten wandert. Wird die Sämaschine gleichzeitig ohne Rahmen eingesetzt, muss die Gelenkwelle wieder getauscht werden. Weiterhin besteht bei nach unten geschlossenen Rahmen die Gefahr, die Gelenkwelle beim Aushub zu verbiegen. In der Regel wird die Sämaschine mit laufender Gelenkwelle angehoben, weshalb in diesem Fall schwere Schäden zu befürchten sind.

Durch die Bauform des Rahmens sitzt der Receiver als nächst möglicher Punkt zur Kabine. Beim Ausheben trennen den Antennenarm und die Kabine des Traktors nur wenige Zentimeter. Hierbei kann es bei versehentlich geöffneter Heckscheibe zu teurem Glasbruch kommen. Die Erfahrung zeigt, dass dies auch mindestens einmal je Saison passiert.

Durch die zusätzliche Anbaulänge des Rahmens verändern sich weiterhin der Hebel und die Achslastverteilung, was sich vor allem bei kleinen Traktoren negativ auswirkt. Diese werden auf Grund ihrer geringen Eigenmasse hauptsächlich für die Pflanz- und Pflegearbeiten

eingesetzt, da sie bodenschonend arbeiten (VALENTA 2016). Durch das Eigengewicht des Rahmens kann es zudem vorkommen, dass Geräte nun zusätzlich vom Hubwerk des Traktors getragen werden müssen. Praxisüblich werden Sä- oder Pflanzmaschinen auf ihren Rädern getragen, wodurch sie sich dem Boden anpassen und somit den Antrieb gewährleisten. Für eine zusätzliche Masse von 500 kg für den Verschieberahmen sind die Sägeräte nicht ausgelegt, da diese eine Leermasse von nur wenigen 100 kg mitbringen. Durch die zusätzliche Belastung der Hinterachse verschlechtern sich gleichfalls die Bodendruckverhältnisse. Zusätzlich verlängert sich die Rüstzeit bei der Ankopplung von Anbaugeräten, da inklusive Rahmen zwei Geräte gekoppelt werden müssen. Zunächst muss beim Anbau des Rahmens darauf geachtet werden, die Hubstreben des Traktors mittig zu versteifen. Ebenfalls ist darauf zu achten, dass der Rahmen in den Unterlenkern des Traktors kein Spiel aufweist. Für die Ankopplung des Anbaugerätes empfiehlt sich eine zweite Person, da der Rahmen auf Grund der Bauform wenig Übersicht verschafft. Es ist auf eine spielfreie Ankopplung zu achten.

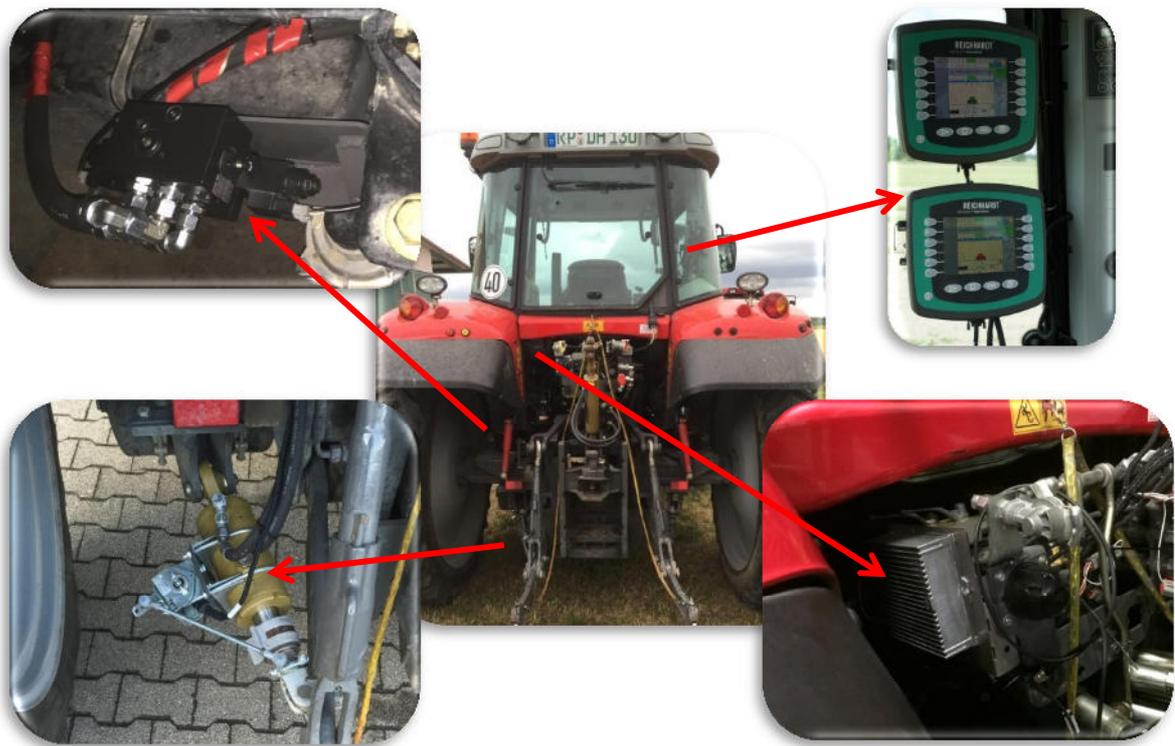
Auf Grundlage dieser Erfahrungswerte war das Ziel bei der Entwicklung der innovativen Anbaugerätesteuerung, das Handling in der Praxis zu vereinfachen. Der Anbauvorgang muss durch nicht geschulte Mitarbeiter fehlerfrei erfolgen können. Weiterhin soll das Gewicht und der zusätzliche Hebelweg eingespart werden. Da diese Punkte für einen normalen Koppelvorgang zwischen Traktor und Anbaugerät sprechen, sollte die Anbaugerätesteuerung am Traktor selbst installiert werden. An jedem Traktor ist ebenfalls serienmäßig eine Verschiebeeinrichtung quer zur Fahrtrichtung. Die Seitenstabilisatoren des Hubwerks ermöglichen eine manuelle Versteifung oder einen Freilauf der Anbaugeräte, indem ein Gewinde verdreht wird. Somit können die Unterlenker gleichzeitig an die verschiedenen Anbaukategorien der Anbaugeräte (Kat. 1, 2, 3) angepasst werden. Sind die Seitenstabilisatoren als automatische Variante ausgelegt (Abb. 27), ermöglichen diese eine Versteifung des Gerätes bei ausgehobenem Zustand und einen Freilauf in abgesenkter Position.



**Abb. 27:** Manuelle (links) und automatische (rechts) Seitenstrebe eingebaut in einen Traktor

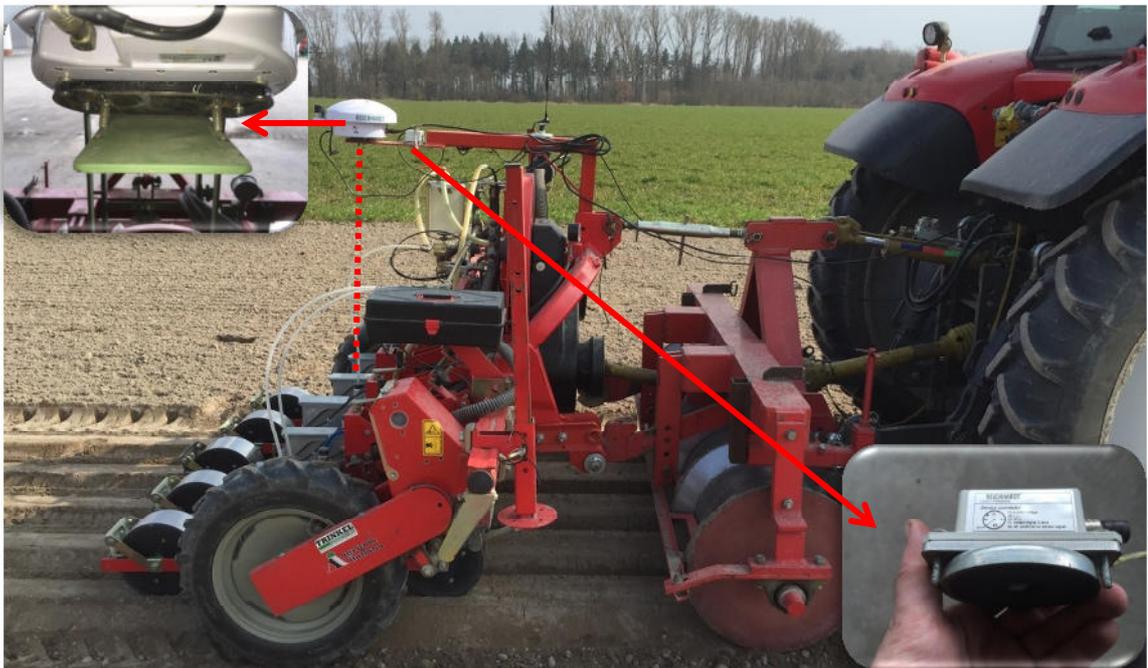
Bei der Straßenfahrt wird so ein aufschaukeln des Gespanns vermieden. Im Feld müssen sich schwere Bodenbearbeitungsgeräte, wie beispielsweise ein Pflug, den Widerständen des Bodens oder Hindernissen, wie einem Stein, ausweichen können, ohne Schaden am Traktor zu verursachen. Um die Anbaugeräte gezielt und teilautomatisiert ansteuern zu können, hat die Firma GKN Walterscheid GmbH zwei verschiedene Varianten entwickelt. Das HGST System besteht aus zwei einfachwirkenden Hydraulikzylindern, die anstelle der herkömmlichen Seitenstreben verbaut werden. Die Zylinder lassen sich elektronisch ansteuern und erlauben eine gezielte Versteifung des Gerätes in Mittelposition. Die Zielhöhe kann dabei frei gewählt werden. Dieses System ist vor allem bei Arbeiten am Hang von Vorteil, wenn sich die Geräte mittels normalen oder automatischen Seitenstreben nicht mehr sicher arretieren lassen. Die Ansteuerung des Anbaugerätes ist jedoch nur bedingt möglich, da das System lediglich drauf ausgelegt ist, die Anbaugeräte zu arretieren (GKN 2013). Sollen die Anbaugeräte gezielt gesteuert werden, wird das System HVST benötigt. Dieses besteht aus einem doppelwirkenden Hydraulikzylinder, der über ein Steuerventil des Traktors sowohl drückend als auch ziehend betätigt werden kann. Bei diesem System wird die Seitenstrebe nur auf einer Seite getauscht. Die andere Seitenstrebe wird meist durch eine Feder ersetzt bzw. in den Freilauf gebracht, um Verspannung zu vermeiden. Der HVST Zylinder ist dafür ausgelegt die Geräte gezielt zu verschieben, um diese beispielweise hangaufwärts zu drücken. Ein weiteres Einsatzgebiet ist das Grasmähen mit einer Front-Heck-Butterfly Kombination. Durch das Verschieben des Heckmähwerks können Seitendrift und die damit verbundenen Fehlstellen vermieden werden (GKN 2013). Das System ist somit für die Ansteuerung von Anbaugeräten

im Gemüsebau geeignet. Da eine Kopplung mittels GPS noch nicht untersucht wurde, liegen diesbezüglich keine Erfahrungswerte vor. Im Dezember 2014 wurde aus diesem Grund ein HVST Zylinder bestellt. Nach der Abfrage des Traktortyps kann zwischen einer kurzen und einer langen Einbauvariante gewählt werden. Beim Massey Ferguson 6455 musste die kurze Einbauvariante gewählt werden. Der Einbau der Anbaugerätsteuerung erfolgt in zwei Schritten. Zunächst muss der HVST Zylinder angepasst werden. Hierzu muss die Einbaulänge am Traktor exakt bestimmt und die mitgelieferte Gewindestange eingekürzt werden. Um die minimale und die maximale Länge zu ermitteln, wurde eine Ackerschiene in die Koppelpunkte der Unterlenker eingehängt und diese mit einer zweiten Person bis zur maximalen Auslenkung der Unterlenker nach links und rechts bewegt. Aus der maximalen Einbaulänge, der Länge des ausgefahrenen Zylinders und des Sicherheitszuschlags, der mit zwei Zentimetern angegeben war, ergibt sich die Länge der Gewindestange. Die Minimale Einbaulänge sollte im Idealfall durch den Hub des Zylinders abgedeckt sein. Im Fall des Massey Ferguson 6455 betrug die Differenz zwischen maximaler und minimaler Einbaulänge 42 mm. Der Hub des HVST Zylinders betrug jedoch 80 mm. Aus diesem Grund wurde ein mechanischer Hubbegrenzer für Hydraulikzylinder der Zuliefererfirma Kramp GmbH montiert. Diese sind für die verschiedensten Hydraulikzylinder in unterschiedlichen Stärken und Breiten verfügbar. Sie werden über das Zylinderrohr geklemmt und blockieren so den Hydraulikzylinder beim vollständigen Einfahren. Die fehlende Differenz wurde mit Unterlegscheiben hergestellt. Als Anschlag diente eine M 20 Mutter. Der Hubbereich von 42 mm ermöglicht eine Verschiebung des Anbaugerätes um +/- 80 mm. Im Normalfall erfolgt abschließend der Anschluss des HVST an ein Steuergerät des Traktors. Für die Ansteuerung des Hydraulikzylinders mittels GPS mussten jedoch weitere Umbauten durchgeführt werden. Um das Umsetzen des Systems, von einem auf ein anderes Gerät, so einfach wie möglich zu gestalten, sollten Navigationsrechner und das Proportionalsteuerventil fest am Traktor verbaut werden. Die Hydraulikanschlüsse werden dabei mit dem Steuerventil gekoppelt. Um den Ausschlag des Zylinders messbar zu machen, wurde ein Lenkwinkelsensor aus dem PSR Kit für Traktoren entnommen und direkt am Zylinder montiert (Abb. 28).



**Abb. 28:** Detailansicht und Lokalisation (Bildmitte) der traktorseitigen Komponenten der innovativen Anbaugerätsteuerung

Sowohl der verwendete RGS 320 Receiver als auch der Neigungssensor wurden auf dem Gerät verbaut. Hierfür wurde für jedes Anbaugerät eine eigene Halterung geschweißt. Um mögliche Genauigkeitsverluste zu vermeiden muss die Plattform des Receivers im rechten Winkel zum Arbeitsgerät stehen. Die Schweißarbeiten wurden daher auf einem ausgeloteten Schweißtisch durchgeführt. Weiterhin empfiehlt sich der Anbau des Receivers direkt über dem Arbeitswerkzeug. Um eine ständige Kalibrierung des Neigungssensors und des Receivers zu vermeiden, sollten beide Bauteile auf jedem Arbeitsgerät in der gleichen Anbauhöhe angebracht werden. In diesem Fall wurden die Halterungen so konzipiert, dass die Anbauhöhe bei 150 cm lag. Um Neigungssensor und Receiver mobil zu machen, wurden beide Bauteile mit je einer Magnetplatte verschraubt. Um Fehler bei der Installation beider Bauteile auszuschließen, wurden an den Unterseiten der beiden Magnetplatten zusätzlich je zwei Schrauben angeschweißt. An die Plattform der Halterung wurden im passenden Abstand je zwei Löcher gebohrt. Der Receiver und Neigungssensor sind genau platziert, wenn die Schrauben in die Löcher greifen (Abb. 29).



**Abb. 29:** Detailansicht und Lokalisation der geräteseitigen Komponenten der innovativen Anbaugerätsteuerung

So kann garantiert werden, dass der Receiver in Fahrtrichtung arbeitet. Gleiches gilt für den Neigungssensor, bei dem sich eine falsche Ausrichtung ebenfalls gravierend auf den Winkel auswirken würde. Aus diesem Grund war es von großer Wichtigkeit, die Plattformhalterungen sowohl vertikal als auch horizontal im rechten Winkel zum Anbaugerät anzubringen. Ein weiterer Vorteil des genauen Schweißens ist, dass es dann genügt den Neigungssensor einmal zu kalibrieren. Die Kopplung zwischen Traktor und Anbaugerätekomponenten erfolgt über Steckverbindungen.

### 3.1.4 Verwendete Hackgeräte

Auf dem Betrieb Hege standen für die Untersuchungen zwei Hackmaschinen des Typs Rustica (Abb. 30), der Heinrich Bleinroth Landmaschinenfabrik in Landringhausen, zur Verfügung.



**Abb. 30:** Heckansicht der RUSTICA Hacke ausgerüstet mit Flachhackschar (rote Kennzeichnung links) und Gänsefußschar (rote Kennzeichnung rechts)

Die Hackgeräte sind aus den 1960er Jahren und sind heute ebenso wie die Firma BLEINROTH nicht mehr verfügbar. Da sich das Funktionsprinzip moderner Hackgeräte nicht von dem früherer Jahrzehnte unterscheidet und die Scharstielmaße genormt sind, konnten ohne weitere Umbauten die unterschiedlichsten Hackschare montiert werden. Für Kürbis und Speisezwiebeln wurden die Hackgeräte mit Flachhackscharen bestückt. Diese waren an den Reihenabstand der jeweiligen Kultur angepasst, sodass je ein Hackschar zwischen zwei Reihen arbeitet. Flachhackschare unterschneiden die Wurzeln der Beikräuter und mischen den Boden nur wenig. Um ein optimales Ergebnis zu erzielen, sollten sie knapp unter der Bodenoberfläche arbeiten. Zur Arbeit in der Reihe war für die Kürbiskultur zusätzlich eine Fingerhacke montiert. Diese wurde bei größerem Kulturstadium demontiert, da die Ranken des Kürbisses sonst beschädigt werden. Zum Hacken des Knoblauchs wurde eine Hacke mit Gänsefußscharen bestückt. Bei 45 cm Reihenabstand arbeiten je drei 15 cm breite Gänsefußschare, um eine intensive Durchmischung des Bodens und Verschüttung der Beikräuter zu erzielen. Die optimale Arbeitstiefe beträgt bei diesem Hackschartyp zwischen 2 und 5 cm.

Speziell für die Untersuchungen wurde im August 2014 eine 6 m breite Hacke von der Firma Maschinenfabrik SCHMOTZER GmbH zur Verfügung gestellt. Durch die große Arbeitsbreite

ist es möglich drei Beete auf einmal zu hacken. Ziel war die Überprüfung der Annahme, dass sich bei gegebener Spur-zu-Spur Genauigkeit von 2,5 cm mehrere Beete in einer Überfahrt hacken lassen. Die Maschine war für den Einsatz in Speisezwiebeln mit 12 cm breiten Gänsefußscharen und Vibromesserhaltern ausgerüstet. Die Federung der Hackschare erlaubt ein verstopfungsfreies Arbeiten bei gleichzeitig sehr intensiver Krümmelung des Bodens. Weiterhin konnten die Kombi-PP Halter mittels Spindel in der Tiefe verstellbar werden. Um die Verschüttung der Kulturpflanzen zu vermeiden waren zusätzliche Hohlschutzscheiben angebracht (Abb. 31).



**Abb. 31:** Heckansicht einer 6 m breiten Schmotzer Hacke in Arbeitsstellung auf einem Zwiebelfeld

### 3.1.5 Messung des Bekämpfungserfolgs

Entscheidend für die Effizienz der mechanischen Regulierungsmaßnahme ist die Anzahl der Beikräuter, die nach dem Vorgang sicher ausgehackt wurden. Um die Anzahl der bekämpften Beikräuter und die der nicht bekämpften Segetalpflanzen ermitteln zu können, wird die Anzahl der Wildpflanzen vor und zwei bzw. drei Tage nach der Regulierungsmaßnahme ermittelt (LABER 1999). In der praxisüblichen Methode erfolgt die Ermittlung der Anzahl über auszählen. Der Quotient beider Stückzahlen drückt den Bekämpfungserfolg (kurz: BKE) der durchgeführten Maßnahme aus:

**Formel 4:** Berechnung des Bekämpfungserfolges

$$BKE = \frac{Seg_n}{Seg_v} \cdot 100$$

Seg<sub>n</sub>: Segetalpflanzenbesatz nach durchgeführter Maßnahme

Seg<sub>v</sub>: Segetalpflanzenbesatz vor durchgeführter Maßnahme

BKE: Bekämpfungserfolg [%]

Die Messung soll auf einer repräsentativen Fläche von 0,25 m<sup>2</sup> durchgeführt werden (WILBOIS et al. 2004). Um Randeffekte auszuschließen, wurde die Mitte jeder Versuchsvariante als repräsentative Fläche herangezogen. Das händische Verfahren, die Segetalpflanzen zu zählen, ist sehr einfach und ohne größere Hilfsmittel umzusetzen. Nachteilig ist jedoch zu bewerten, dass die Zunahme der Blattfläche und somit der Bedeckungsgrad nicht mit ermittelt wird. Aus diesem Grund wurde für die Untersuchungen eine neuere, digitalisierte Methode verwendet. Im ersten Schritt werden Bilder der Referenzfläche mit einer Digitalkamera aufgenommen. Die Zeitpunkte der Aufnahmen entsprechen denen der händischen Methode, vor und zwei bzw. drei Tage nach der Maßnahme. Für die Untersuchungen wurde eine SONY DSC-RX 100 M3 Kompaktkamera mit 20,1 Megapixel Auflösung verwendet. Um die Referenzfläche von 0,25 m<sup>2</sup> aufnehmen zu können, ohne weitere Feldausschnitte mit zu dokumentieren, wurde am Institut für Landtechnik der Justus Liebig Universität Gießen ein spezielles Stativ entwickelt und erprobt. Das Stativ stellt einen Trichter aus weißem Kunststoff dar, auf dem am oberen Ende die Kamera montiert wird. Am unteren Ende öffnet sich der Trichter zum Boden hin. Durch die definierten Kantenlängen des Trichters ist es möglich, einen Feldausschnitt von 400 x 550 mm zu dokumentieren. Dies entspricht einer Fläche von umgerechnet 0,22 m<sup>2</sup>. Um die Messungen zeitunabhängig durchführen zu können, wurde der Trichter für die Untersuchungen nachgebildet. Dabei wurde grauer Kunststoff verwendet, da dieser das Sonnenlicht noch besser abschirmt und der Kontrast somit auch an sehr sonnigen Tag gegeben ist (Abb. 32).



**Abb. 32:** Weißer (links) und grauer (rechts) Stativtrichter zur Fotografie der Referenzparzellen auf den Untersuchungsfeldern

An bedeckten Tagen kann der Trichter durch den Blitz der Kamera erhellt werden. Ein guter Kontrast der Farben ist für die nachfolgende Bildanalyse unabdingbar.

Ziel der Bildanalyse ist die computergestützte Filterung und Messung der Segetalpflanzen und deren Blattoberfläche. Möglich ist dies, da jedes digitale Bild aus den drei Grundfarben rot, gelb und blau zusammengesetzt wird. Dieses Verfahren wird auch als additive Farbmischung bezeichnet. Um nun den speziellen Grünton der Segetalpflanzenblätter herauszufiltern ist es nötig, das Bild in die Pixel bzw. Bildpunkte zu zerlegen. Gibt man dem Computer eine bestimmte Farbkombination des einzelnen Pixels als Zielwert vor, so wird das gesamte Bild nach dieser Farbkombination gefiltert (STEINMÜLLER 2008). Da ein Blatt selten aus einem Grünton besteht, ist es notwendig, mehrere Farben mit unterschiedlichen Sättigungen und Kontrasten zu definieren. Für die computergestützte Bildanalyse sind mehrere kostenfreie und kostenpflichtige Programme am Markt erhältlich. Zur Auswertung der Untersuchungen wurde das Open Source Programm ImageJ verwendet. Das in Java geschriebene Bildbearbeitungsprogramm wurde von Wayne Rasband am National Institutes of Health in Bethesda, USA programmiert (BURGER und BURGE 2005). Die Bildanalysesoftware wurde aus diesem Grund speziell auf die Anforderungen der medizinischen und biologischen Wissenschaft zugeschnitten (BURGER und BURGE 2005). Im Laufe der Jahre wurde das Programm um einige Funktionen ergänzt und ausgebaut. Wichtige Funktionen wurden in Apps zusammengefasst. Für die Auswertung biologischer

Untersuchungen bietet ImageJ die Fiji App an, die auch für die vorliegenden Untersuchungen verwendet wurde. Neben den verschiedenen Apps finden sich auch unterschiedlichste Tutorials zum Programm. Um die Blattfläche der Segetalpflanzen zu bestimmen, müssen die Bilder in das Programm eingelesen werden. Im nächsten Schritt wird die Größe des Ausschnitts definiert, bevor die Definition des Farbtons folgt. Abschließend können die markierten Farbpixel in der Summe gemessen werden. Werden viele Bilder nacheinander eingelesen, empfiehlt sich das Programmieren eines Makros. Zu diesem Zweck verfügt ImageJ über eine automatische Messfunktion. Um diese abrufen zu können, müssen die Bilder jedoch in den Schwarz-Weiß-Bereich transformiert werden. Hierzu bietet ImageJ eine Automation, indem alle markierten Farbpixel in schwarz überführt werden (Abb. 33).



**Abb. 33:** Momentaufnahmen der Bildanalyse von links: Original; Rotfärbung der grünen Pixel; Transformation der Aufnahme in schwarz-weiß

Abschließend lassen sich die gemessenen Blattflächen tabellarisch auflisten und in andere Formate überführen, wie beispielsweise Excel.

### 3.1.6 Messung der Kulturschäden

Ein entscheidender Verlustfaktor der mechanischen Verfahren sind die erzeugten Kulturschäden. Durch zu nahes Hacken an der Reihe oder durch Fahrfehler können die Wurzeln der Kulturpflanzen nachhaltig geschädigt werden. Somit ist ein Weiterwachsen nicht mehr möglich und die Pflanzen zeigen Welkeerscheinungen. Ebenso können Pflanzen auch gänzlich ausgehackt werden. Zur Ermittlung der Kulturschäden wird der Bestand gesichtet. Bei Gemüsekulturen mit weiten Reihenabständen und geringen Pflanzdichten, wie beispielsweise Kürbis, können die beschädigten Pflanzen ausgezählt werden. Die gewonnene Anzahl an beschädigten Pflanzen wird in Relation zur Gesamtzahl der Pflanzen je Parzelle gesetzt. Zu berücksichtigen ist hierbei jedoch, dass eine einhundert prozentige Keimfähigkeit

nicht möglich ist und diese deshalb ebenfalls berücksichtigt werden muss. Die Kulturschäden bei geringen Pflanzdichten wurden deshalb mit folgender Formel ermittelt:

**Formel 5:** Berechnung der Kulturschäden bei geringen Pflanzdichten

$$K_s = \frac{S}{\frac{PL}{PA} \cdot KF} \cdot 100$$

$K_s$ : Kulturschäden [%]

S: Anzahl beschädigte Pflanzen

PL: Länge der Parzelle [m]

PA: Pflanzabstand [m]

KF: Keimfähigkeit [%]

Bei Kulturen mit hohen Pflanzdichten von über einer Million Pflanzen je Hektar und engen Reihenabständen, werden oft mehrere Reihen pro Beet ausgesät. Wird dieses Beet mit der Hackmaschine bearbeitet, so wird durch die Werkzeuge gleichzeitig auch die Gesamtzahl der Reihen des Beetes beschädigt. Die Auszählung erfolgte hier mittels visueller Sichtung des Bestandes und Messung des beschädigten Areals mittels Messrad. Zur Berechnung der Kulturschäden werden die gemessenen Fehlstellen in Relation zur Gesamtlänge der Versuchsparzelle gesetzt. Durch Umformung des Terms entfallen alle weiteren Variablen, wie Pflanzabstand, Keimfähigkeit oder die daraus resultieren Pflanzdichte:

**Formel 6:** Berechnung der Kulturschäden bei hohen Pflanzdichten

$$K_s = \frac{SL \cdot PA \cdot KF}{PL \cdot PA \cdot KF} \cdot 100 = \frac{SL}{PL} \cdot 100$$

SL: Länge mit beschädigten Pflanzen [m]

Der Bezug zur Pflanzdichte je Hektar oder Quadratmeter entfällt somit.

### 3.1.7 Messung der Bodenfeuchte

Ein ausreichender Feuchtegehalt garantiert die Bearbeitbarkeit des Bodens. Gleichzeitig wachsen herausgerissene Beikräuter in feuchtem Boden leichter wieder an, wodurch der Bekämpfungserfolg geschmälert wird. Um die Hackmaßnahme möglichst effizient und mit hohem Bekämpfungserfolg durchführen zu können, sollten Grenzwerte für den Feuchtegehalt eingehalten werden (vgl. Kapitel 2.3). Diese sind je nach Bodentyp unterschiedlich. Um den Typ korrekt einordnen zu können, muss im Vorfeld eine vollständige Analyse durchgeführt werden, um die Trockenraumdichte des Bodens zu ermitteln. Während eines Projektes an der Hochschule Geisenheim im Jahr 2011 wurde diese Analyse für folgende drei Felder des Betriebs Hege durchgeführt (ARNEGGER et al. 2011):

- 49°24'7.70"N; 8°23'40.98"E
- 49°24'1.81"N; 8°23'46.65"E
- 49°23'32.54"N; 8°23'47.80"E

Die vorliegende Bodenart rund um den Kohlhof schwankt zwischen schwach schluffigem Sand (Su2) und mittellehmigem Sand (Sl3). Für die Böden wurde eine durchschnittliche Trockenraumdichte von  $1,41 \text{ g}\cdot\text{cm}^{-3}$  ermittelt. Durch Umrechnung ergibt sich eine durchschnittliche Volumendichte von  $0,71 \text{ ml}\cdot\text{g}^{-1}$ . Die vorliegenden Böden zählen somit zu den leichten (SCHMIDT 2010). An Hand von Bodenkarten des geologischen Landesamtes Rheinland-Pfalz (HARKE et al. 1991 und OTTENSTEIN et al. 1986) wurde der ermittelte Bodentyp mit weiteren Feldern des Betriebes Hege verglichen. Der vorliegende Bodentyp im Umkreis des Betriebs ist Sand mit 20 bis 25 Bodenpunkten. Der Grenzwert des Feuchtegehalts liegt bei diesen leichten Böden zwischen 0 und 10 Volumenprozent der Feldkapazität (WEBER 1997). Auch wenn in der Praxis die Hackmaßnahme entsprechend der Erfahrungswerte durchgeführt wird, soll der Bodenfeuchtegehalt zur Validierung der Ergebnisse gemessen werden. Zur Messung des Wassergehaltes wird die gravimetrische Methode verwendet. Die Messung des Wassergehaltes beruht bei dieser Methode auf einer gestörten Bodenprobe (HARTGE und HORN 1989). Da für die Hackmaßnahmen der Wassergehalt im Bearbeitungshorizont entscheidend ist, sollte eine gestörte Bodenprobe entsprechend der Bearbeitungstiefe gezogen. Hierfür bietet sich ein Blumenzwiebelpflanzer mit Skalierung an, um ein genaues Messergebnis zu erhalten. Die Beprobung von sechs unterschiedlichen Stellen des Feldes diene als Referenz für jede Untersuchung. Die

Bodenprobe wurde jeweils aus der Mitte des Beetes gezogen, um einen Randeffect zur Fahrspur hin zu vermeiden. Direkt nach der Entnahme wurden die Bodenproben in eine Aluschale eingewogen. Auf Grundlage der natürlichen Verdunstung muss die Einwägung zeitnah erfolgen. Nach dem die Aluschalen vorbereitet sind, werden die Proben im Trockenschrank bei 105 °C für 16 Stunden getrocknet. Zu beachten ist die Trocknung unter definierten Bedingungen, da unter Umständen nicht mineralische Bestandteile des Bodens beschädigt werden können oder der Wasseranteil nicht vollständig in die Dampfphase übergeht. Nachdem die Proben etwa 45 min abgekühlt sind, kann die Rückwägung erfolgen. Je nach Fragestellung lässt sich der Wasseranteil des Bodens in unterschiedlichen Verhältnissen darstellen. Für die Untersuchungen war der Wassergehalt in Bezug auf das Bodenvolumen entscheidend. Dieser wird in ml / Wasser je 100 ml Boden angegeben (HARTGE und HORN 1989). Die Berechnung erfolgt nach folgender Formel:

**Formel 7:** Herleitung und Berechnung des Wasservolumens im Boden

$$\frac{W_{Vol}}{d_B} = \frac{W_{gw}}{d_W}$$

$$W_{Vol} = \frac{W_{gw} \cdot d_B}{d_W} = \frac{Bd_n - Bd_{tr}}{Bd_{tr}} \cdot \frac{d_B}{d_W}$$

$Bd_n$ : Gewicht des feuchten Bodens [g]

$Bd_{tr}$ : Gewicht des trocknen Bodens [g]

$d_B$ : Dichte des Bodens [ml/g]

$d_W$ : Dichte des Wassers [ml/g] = 1

$W_{gw}$ : Gewicht des Wassers [g]

$W_{Vol}$ : Volumen des Wassers [ml]

Das Volumen des Wassers findet in der Praxis jedoch wenig Bedeutung. Durch Multiplikation des Ergebnisses mit dem Faktor 100, wird das Ergebnis in die praxisübliche Angabe in Volumenprozent transformiert:

**Formel 8:** Berechnung Volumenprozent des Wassers in Boden

$$W_{Vol.-\%} = \frac{Bd_n - Bd_{tr}}{Bd_{tr}} \cdot \frac{d_B}{d_W} \cdot 100$$

$W_{Vol.-\%}$ :Volumenprozent des Wassers

Die Angabe Volumenprozent des Wassers gibt somit an, wieviel ml Wasser sich in 100 g Boden befinden (HARTGE und HORN 1989).

### 3.2 Voruntersuchung

Um die technischen Einbauten auf ihre Funktionalität und die Komponenten der Traktorsteuerung zu testen, wurde im April 2014 ein Vorversuch durchgeführt. Grundlage der Untersuchung war ein zwei Hektar großes Feld ( $49^{\circ}23'49.70''\text{N}$ ;  $8^{\circ}24'6.92''\text{E}$ ), das zuvor gepflügt wurde und für die Aussaat von Rettichen vorbereitet werden sollte. Hierzu war an den Massey Ferguson 6455 eine Vollfeldfräse mit Dammformblech und hydraulischer Dammdruckrolle angehängt. Die GPS Steuerung erfolgte ausschließlich über die Lenkautomatik des Traktors. Die Arbeitsbreite wurde mit 2,03 m eingegeben, die Arbeitsgeschwindigkeit betrug ca.  $3,0 \text{ km}\cdot\text{h}^{-1}$ . Da die Grenzen des Feldes nicht parallel zueinander verlaufen, wurden zunächst zwei gerade AB Linien angelegt. Die Bearbeitung des Feldes erfolgte systematisch von einer zur anderen Seite, wobei die Linien in der Mitte als Stichreihen zusammenlaufen sollten. Nach den Justierungen der wichtigsten Parameter, wie etwa der Aggressivität der Lenkung, konnte die Arbeit ohne einen technischen Zwischenfall beendet werden. Es konnte beobachtet werden, dass die Dämme jedoch nicht exakt gerade gezogen wurden (Abb. 34), sondern von mehreren Kurven durchzogen waren, was bei einer geraden AB Linie nicht vorliegen sollte.



**Abb. 34:** Kleinere Kurven bei der Vorbereitung von Dämmen mit GPS-Lenkautomatik

Die Kurven traten vor allem bei der Arbeit leicht schräg zur Pflugfurche auf. Der Fehler ließ auf eine unzureichende Kompensation des Neigungswinkels schließen. Diese Schlussfolgerung bestätigte sich nach Rücksprache mit dem Hersteller. Grund des Fehlers ist, dass das verbaute vier Achsen Gyroskop zwar Bewegungen um die Längs- und Querachse des Traktors messen und kompensieren kann, jedoch keine Bewegungen um die Hinterachse des Traktors. Der Hersteller versprach deshalb ein neues sechs Achsen Gyroskop zu verbauen, um die fehlende Achse ebenfalls kompensieren zu können.

Da der Verschieberahmen noch nicht geliefert wurde, konnte noch ein zweiter Test des Systems im Mai auf einem 5,5 ha großen Schlag (49°23'40.77"N; 8°23'55.49"E) bei der Vorbereitung zur Auspflanzung von Kürbissen durchgeführt werden. Ausgangssituation war auch hier ein gepflügter Boden, der nun mit einer angebauten Beetfräse zerkleinert werden sollte. Bei der Bearbeitung des Bodens wurde gleichzeitig ein Tropfschlauch in der Mitte des Beetes zur späteren Bewässerung verlegt. Somit konnte auch eine grobe Messung des Spur-zu-Spur Abstandes durchgeführt werden. Die Arbeitsbreite wurde ebenfalls mit 2,03 m eingegeben. Nach 20 Messungen, an unterschiedlichen Stellen des Feldes, konnte eine Abweichung des Spur-zu-Spur Abstandes von +/- 5 cm ermittelt werden. Da das Anbaugerät zu diesem Zeitpunkt ohne weitere Steuerung auskommen musste, lag die Abweichung im Erwartungsbereich. Zu beobachten war ebenfalls, dass das System an einem der beiden Feldenden beim Einfahren in die Spur aussetzte. So konnte der Lenkautomat erst nach wenigen Metern Fahrt aktiviert werden. Im Verdacht stand hierbei die Funkverbindung des Mobilfunknetzes. Positiv zu erwähnen ist, dass die Fahrer der nachfolgenden Arbeiten (Mulchfolie auflegen, Pflanzlöcher stanzen, Spurenlockerung) von einer einfacheren Arbeit, sodass teilweise schneller gefahren werden konnte oder die Geräte näher zu Reihe verschoben werden konnten.

Nachdem der Verschieberahmen Anfang Mai geliefert wurde, konnten Fahrversuche auf der schon gefrästen Fläche durchgeführt werden, um die Funktion des Rahmes zu prüfen. Da keine weiteren Mängel auftraten, konnte mit den ersten Untersuchungen begonnen werden.

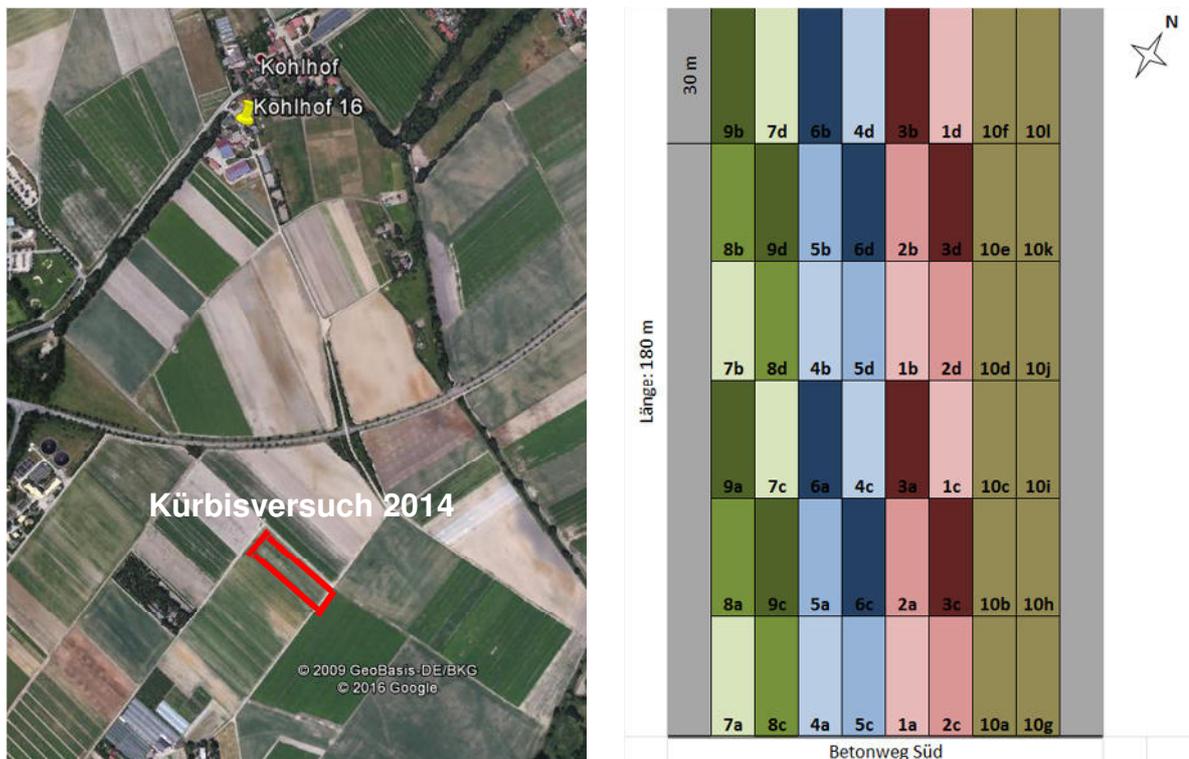
### 3.3 Versuchsaufbau und Durchführung 2014

Die ersten Untersuchungen starteten im Mai 2014 in der Kultur Kürbis. Da die Wahl mit der Firma REICHHARDT Steuerungstechnik GmbH auf einen neuen Hersteller der GPS-Technik fiel, lagen bisher noch keine Ergebnisse für diese Technik vor. Zur Sammlung weiterer Erkenntnisse mussten die Komponenten zunächst mit den bisher gewonnen Ergebnissen der Trimble Technik verglichen werden (s. Kapitel 2.4; vgl. HEGE (2013)). Um eine Vergleichbarkeit mit den bisher bekannten Ergebnissen gewährleisten zu können, erfolgte die Aufteilung der Varianten entsprechend den Untersuchungen aus dem Jahr 2013. In diesen Untersuchungen wurden zwei Faktoren mit je drei Faktorstufen untersucht. Der Faktor „Fahrgeschwindigkeit“ steht in direktem Zusammenhang mit der Flächenleistung und ist somit für die ökonomische Bewertung notwendig. Neben der praxisüblichen Geschwindigkeit von  $3 \text{ km}\cdot\text{h}^{-1}$  (LABER 1999), folgte die Überprüfung der für Hackgeräte empfohlenen Geschwindigkeit von  $6 \text{ km}\cdot\text{h}^{-1}$  (LABER 1999) und einer optimierten Variante mit einer Geschwindigkeit von  $9 \text{ km}\cdot\text{h}^{-1}$ . Der zweite Faktor „Fahrweise“ diente dem Genauigkeitsvergleich des praxis-üblichen Verfahrens mit der GPS-Technik. So wurden alle Arbeitsgänge, vom Fräsen der Beete, über die Aussaat bis zum anschließenden Hacken, zunächst händisch gesteuert (praxisüblich), und mit den GPS-Steuerungsarten Traktor solo, sowie Traktor und Anbaugerät verglichen. Insgesamt ergeben sich somit neun zu prüfende Varianten. Da der Hersteller REICHHARDT höchste Genauigkeit unter allen Bedingungen verspricht, sollte zudem eine höhere Geschwindigkeit überprüft werden. Die maximal zu fahrende Geschwindigkeit ist in der Software bei  $20 \text{ km}\cdot\text{h}^{-1}$  begrenzt. Liegt die Fahrgeschwindigkeit darüber, schaltet sich die automatische Lenkung aus. Um dies zu vermeiden, wurde eine Geschwindigkeit von  $18 \text{ km}\cdot\text{h}^{-1}$  knapp unter der Maximalgeschwindigkeit gewählt. Da sich bei diesen hohen Fahrgeschwindigkeiten kleinste Lenkbewegungen sehr deutlich äußern und die Kulturschäden in den vorangegangenen Untersuchungen aus dem Jahr 2013 in der manuell gesteuerten Variante mit  $9 \text{ km}\cdot\text{h}^{-1}$  Fahrgeschwindigkeit über 20 Prozent lagen, sollte diese Variante nur mit der GPS-Steuerung von Traktor und Anbaugerät überprüft werden. Weiterhin lag die Anzahl der Prüfparzellen innerhalb dieser Variante deutlich höher, um die Ergebnisse bei diesen hohen Fahrgeschwindigkeiten besser validieren zu können. Insgesamt ergeben sich mit der Maximalgeschwindigkeit 10 Varianten, die in Tab. 4 definiert werden.

**Tab. 4:** Variantendefinition der Untersuchung 2014 in Kürbis, Betrieb Hege, Limburgerhof

Variante	Geschwindigkeit [km·h <sup>-1</sup> ]	Steuerungsart
1	3	Manuell
2	6	Manuell
3	9	Manuell
4	3	GPS Traktor
5	6	GPS Traktor
6	9	GPS Traktor
7	3	GPS Traktor + Gerät
8	6	GPS Traktor + Gerät
9	9	GPS Traktor + Gerät
10	18	GPS Traktor + Gerät

Die Varianten eins bis neun wurden jeweils viermal, die Variante zehn wurde auf Grund der hohen Fahrgeschwindigkeit zwölfmal wiederholt. Insgesamt ergeben sich somit 48 Prüfparzellen. Der Betrieb Hege stellte ein im Vorfeld gepflühtes und gedüngtes Feld für die Untersuchungen bereit (49°23'44.40"N; 8°23'59.81"E). Bei einer Schlaglänge von 180 m, konnten je Beet sechs Prüfparzellen mit je 30 m Länge angelegt werden (Abb. 35).



**Abb. 35:** Lokalisation des Versuchsfelds (links) und Versuchsdesign (rechts) der Untersuchung 2014 in Kürbis, Betrieb Hege, Limburgerhof

Da der Beschleunigungsweg des Traktors in Variante 10 zu groß wäre, fiel die Wahl des Versuchsdesign dieser Variante auf eine Streifenanlage. Die Verteilung der Prüfparzellen dieser Variante fand auf zwei gesonderten Beeten mit je 2,03 m Arbeitsbreite statt. Die Aufteilung der Varianten eins bis neun erfolgte als Blockanlage. Die Verteilung der 36 Prüfparzellen entfiel auf sechs Beete mit je 2,03 m Arbeitsbreite. Die Gesamtgröße der Fläche betrug somit knapp 0,3 ha.

Die Aussaat des Kürbisses erfolgte am 15.05.2014, entsprechend der einzelnen Varianten mit und ohne Steuerung des Traktors bzw. des Anbaugerätes. Die Aussaat erfolgte je Beet in einer Reihe. Um das beim Beetfräsen verlegte Tropfrohr nicht zu beschädigen, fand die Ablage des Tropfrohrs asymmetrisch 5 cm neben der Mitte des Beetes statt. Die nachfolgende Sämaschine folgte zentriert der Beetmitte. Die Aussaatstärke betrug 12.500 Pflanzen je Hektar, bei 0,4 m Pflanzabstand in der Reihe. Die Keimfähigkeit des Kürbisses lag bei 90 %. Somit sollten sich nach Abzug der Keimfähigkeit 2,25 Pflanzen je laufenden Beetmeter etablieren. Das pneumatische Sägerät des Herstellers Agricola Italiana snc wurde vom Betrieb Hege zur Verfügung gestellt.

Nach dem Auflaufen der Kürbispflanzen starteten die Hackversuche. Insgesamt konnten zwei Hackdurchgänge am 14.06.2014 und am 18.06.2014 gefahren werden. Im kleinen Stadium der Kulturpflanze war an die mit Flachhackscharen ausgerüstete RUSTICA Hacke zusätzlich eine Fingerhacke zur Bearbeitung in der Reihe montiert. Als Leitkräuter konnten Amaranth-Arten (*Amaranthus* L.), Melde-Arten (*Atriplex* L.), Gemeines Kreuzkraut (*Senecio vulgaris* L.) sowie Hühnerhirse (*Echinochloa crus-galli*) identifiziert werden. Die Dokumentation des Bekämpfungserfolgs erfolgte am 14.06.2014, am 18.06.2014 und am 22.06.2014. Um jeweils die identische Stelle der Dokumentation wieder zu finden, wurden im Randbereich der Versuchsanlage Holzpfeile eingeschlagen. Später wurden quer zur Bearbeitungsrichtung Schnüre gespannt, um jeweils die Mitte jeder Parzelle dokumentieren zu können. Im Bereich der grafischen Dokumentation war die Entfernung der Kulturpflanzen wichtig, um bei der späteren Bildanalyse keine Verfälschung der Ergebnisse implizieren. Die Dokumentation der Kulturschäden erfolgte jeweils ein Tag nach dem Hackdurchgang, um Welkeerscheinungen erkennen zu können.

### 3.4 Beobachtungen und weiterführende Versuche 2014

Neben der Ermittlung von Ergebnissen stand auch die Sammlung von Erfahrungen bezüglich der Technik der Firma REICHHARDT im Vordergrund des ersten Versuchsjahres. So konnten mehrere Beobachtungen während der Bearbeitung des Kürbisfeldes gemacht werden.

Obwohl die Steuerung des Traktors mittels Lenkautomatik erfolgte, regelte der Verschieberahmen ständig im Bereich von +/- 5 cm nach. Deutlich wurde die „natürliche“ Abweichung des Anbaugerätes bei der Aussaat des Versuchs. Da die Tropfrohrverlegung im Vorfeld beim Beetfräsen ausschließlich der Steuerung des Traktors folgte, lief die Sämaschine in den Varianten sechs bis neun teilweise genau über dem Tropfrohr. Dieses sollte allerdings 5 cm neben der Beetmitte bzw. Saattrinne verlegt werden. Somit folgte auch die Beetfräse einer natürlichen Abweichung. Da das Tropfrohr bei direktem Maschinenkontakt Schäden davon trägt besteht auch bei der Verlegung des Rohrs die Notwendigkeit einer aktiven Anbaugerätesteuerung.

Um die neue Technik einer breiten Masse vorführen zu können, sollte für die Firma REICHHARDT ein Demonstrationsfeld auf dem Queckbrunnerhof in Schifferstadt angelegt werden. Der Queckbrunnerhof ist die Außenstelle des Dienstleistungszentrums Ländlicher Raum Rheinpfalz. Dort findet jährlich ein Feldtag mit Maschinendemonstrationen Ende September statt, zu dem in der Regel mehrere hundert Fachbesucher kommen. Zur Verfügung stand die Fläche Ge5 (49°24'6.41"N; 8°20'50.77"E) mit einer Größe von 0,4 ha. Bei einer Länge von 164 m konnten insgesamt 12 Beete mit 2 m Arbeitsbreite angelegt werden, von denen auf den jeweils äußersten Beeten keine Aussaat stattfand. Am 19.08.2014 wurde die Fläche mit der Beetfräse bearbeitet. Die Aussaat des Spinats erfolgte am 20.08.2014 mit je sechs Reihen pro Beet. Ziel war es den Spinat sowohl zur Demonstration als auch zur Datengewinnung zu nutzen. Beim Auflaufen des Spinats fehlten jedoch vereinzelt Pflanzen. Beim Ausgraben der Keimlinge wurden Erdräupen gefunden, die den Spinatkeimling unter der Erdoberfläche geschädigt haben. Nach der Behandlung mit einem Insektizid konnten die Erdräupen dezimiert werden. Während des Wuchsfortschritts zeigten sich dann die Ausmaße des Erdräupenfraßes (Abb. 36).



**Abb. 36:** Fehlstellen in einem Spinatfeld, induziert durch Erdräupenfraß; dargestellt während dem Auflaufen (links) und während der späteren Vegetationsperiode (rechts)

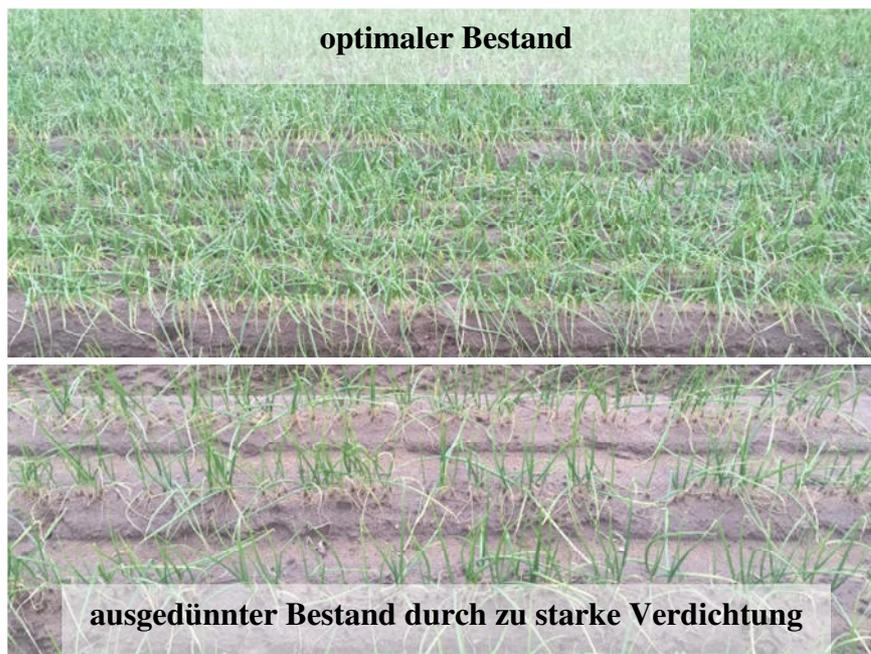
Durch die starke Schädigung des Spinats war die Auswertung der Untersuchung nicht möglich. Zur Demonstration der technischen Komponenten reichte der Bestand jedoch aus, so dass die Vorführung am 25.09.2014 durchgeführt werden konnte (Abb. 37).



**Abb. 37:** Impressionen des Feldtags auf dem Queckbrunnerhof 2014; Quelle:  
WEINHEIMER, S. (2014)

Die nächste Untersuchung sollte in der Kultur Winterzwiebeln auf dem Betrieb Hege durchgeführt werden. Ziel der Untersuchung war die Überprüfung der These, ein Beet zu besäen und drei Beete in einer Überfahrt zu hacken. Hierzu stand eine 1,5 ha große Fläche zur Verfügung (49°24'1.74"N; 8°23'34.10"E). Die gepflügte Fläche wurde am 27.08.2014 mit der Beetfräse zur Aussaat vorbereitet. Am 28.08.2014 erfolgte die Aussaat mittels pneumatischem Einzelkornsäegerät. Der Reihenabstand bei Zwiebeln beträgt 34,5 cm, sodass jeweils fünf

Reihen auf einem Beet platziert werden können. Gleich zu Anfang der Aussaat zeigte sich ein Problem der Verschieberahmentechnik. Da die Vorarbeit mit der Beetfräse einen lockeren Boden hinterlässt, waren bei nachfolgenden Arbeiten die Bodendruckverhältnisse zu beachten. Die Zwiebel bevorzugt zwar ein gesetztes Saatbeet, wie viele Gemüsekulturen reagiert die Pflanze auf Schadverdichtungen jedoch mit Wuchsdepressionen. Durch das zusätzliche Eigengewicht des Verschieberahmens von 580 kg drückte die vorauslaufende Packerwalze der Sämaschine derartig fest in den Boden, dass eine Schmier- bzw. Rissbildung des Bodens zu erkennen war. Die Packerwalze wird praxisüblich in der Schwimmstellung des Hubwerks gefahren, um sich so dem Boden besser anpassen zu können und eine gleichmäßige Verfestigung zu garantieren. Nach der Bearbeitung eines Beetes wurde jedoch entschieden, die Sämaschine mit dem Hubwerk des Traktors zu stützen. Im abgefahrenen Beet verdichtete die vorlaufende Packerwalze den Boden so stark, dass Wuchsdepressionen der Zwiebel die Folge waren (Abb. 38).



**Abb. 38:** Auswirkungen von Schadverdichtungen, durch zusätzliches Gewicht des Verschieberahmens auf die Bestandsdichte in Winterzwiebeln (unten), im Vergleich zu einer optimalen Bestandsdichte (oben)

Die weitere Arbeit wurde mit unterstützendem Hubwerk fortgeführt. Dabei konnten Spur-zu-Spur Abweichungen von bis zu 10 cm beobachtet und gemessen werden (s. Anhang). Die angelegten Beete waren somit für die nachfolgenden Hackarbeiten nicht zu nutzen. Der Fehler

ließ den Schluss einer zu großen Baseline zu. Da der Hersteller das Problem jedoch zunächst selbst prüfen wollte, wurde die Aussaat ohne Einsatz der GPS-Technik beendet. Nachdem auch der Hersteller eine zu große Baseline bestätigte, installierte die Firma REICHHARDT eine eigene Referenzstation auf dem Dach des Betriebs Hege am 02.09.2014. Da diese jedoch einen Defekt aufwies, baute der Hersteller diese nach einem Tag wieder ab.

Um die These der Baseline zu prüfen, folgten weitere Kontrollmessungen bei der Pflanzung von Knoblauch. Für die Messungen stand eine 0,5 ha große Fläche des Betriebs Hege zur Verfügung (49°24'3.49"N; 8°23'36.08"E). Die Fläche wurde im Vorfeld gepflügt und mit der Beetfräse vorbereitet. Das Fräsen der Beete erfolgte ausschließlich mit der Lenkautomatik des Traktors. Die Steuerung der nachfolgenden Pflanzmaschine folgte auf der kompletten Fläche zusätzlich dem Signal des Verschieberahmens. Bei 45 cm Reihenabstand fanden insgesamt vier Reihen Knoblauch je Beet Platz. Die Pflanzung startete am 21.10.2014. Da ein Regenereignis dazwischen kam, konnte die Arbeit erst am 23.10.2014 beendet werden. Insgesamt wurden zwei Sorten ausgepflanzt, die zu je gleichen Teilen links und rechts der Bewässerungsleitung ausgepflanzt werden sollten. Die Aufteilung der Sorten führte zu einer variablen Fahrspurreihenfolge, durch die ein Schema des Fehlers zu erkennen war (Abb. 39).



**Abb. 39:** Spuraufteilung auf dem Knoblauchfeld durch variable Pflanzspurengestaltung mittels GPS (weiße Kennzeichnung der Radspuren und chronologische Nummerierung der Beete, Pfeile geben die Fahrtrichtung an)

Da die Spuren in Fahrtrichtung und in entgegen gesetzter Fahrtrichtung nicht direkt nebeneinander lagen und wegen des GPS-Einsatzes auch nicht nebeneinander liegen mussten, zeigte sich beim Messen von Spur-zu-Spur ein Muster. Es konnte ermittelt werden, dass das Korrekturalter stetig anstieg. Dies führte zur stetigen Abnahme der Genauigkeit. Die These der zu großen Baseline konnte somit bestätigt werden. Daneben summierte eine Baumreihe in Stationsrichtung den Fehler der zu langen Baseline zusätzlich auf. Daher sollte eine neue Station aufgebaut werden. Die neue Basisstation wurde dann Ende März 2015 im nahe gelegenen Mutterstadt installiert. Die neue Baseline betrug somit nur noch 6,75 km.

### **3.5 Vortest der innovativen Anbaugerätesteuerung**

Nachdem die innovative Anbaugerätesteuerung (s. Kapitel 3.1.3) im Januar 2015 fertig gestellt wurde, sollten einige Vortests vor den Hackversuchen durchgeführt werden. Diese dienten den notwendigen Einstellungen von Reaktionsgeschwindigkeit, Öldurchfluss, Geradeauslauf und die Abweichungen der einzelnen Anbaugeräte. Weiterhin sollten Fehler gefunden und behoben werden. Die erste Arbeit, die im Betrieb Hege mit der neuen Anbaugerätesteuerung durchgeführt werden konnte, war das Fräsen der Beete für den Möhrenanbau im Februar 2015. Hierzu war eine Beetfräse Typ Forigo D45-185 an den Massey Ferguson Traktor angehängt. Bei Testfahrten auf dem Hofgelände erfolgte zunächst die Kalibrierung des Lenkwinkelsensors. Dieser gibt dem Zylinder den maximalen Hub bzw. Einzug vor. Ebenso musste die Stromstärke der Ansteuerung des proportionalen Lenkventils an den Kolbendurchmesser angepasst werden. Da die Halterungen der Receiver auf jedem Gerät vereinheitlicht wurde, konnte die Antennenhöhe fest mit 150 cm angegeben werden. Auf einer umgebrochenen Gründungsfläche (49°24'11.79"N; 8°23'45.30"E) konnten die ersten Beete am 13.02.2015 gezogen werden (Abb. 40).



**Abb. 40:** Erste Testfahrt der innovativen Anbaugerätesteuerung beim Beetfräsen

Dabei war die Arbeit der Strebe deutlich zu erkennen. Ebenso wie der Verschieberahmen, reguliert das System die Sollposition ständig nach. Als Ergebnis präsentierten sich schnurgerade Beete. Spur-zu-Spur Messungen mittels Zollstock zeigten eine Abweichung von der eingestellten Arbeitsbreite von +/- 2 cm. Da die wenigen Beete für eine umfangreiche Bewertung jedoch nicht ausreichen, wurde am 16. und 17.02.2015 eine fünf Hektar große Fläche bearbeitet (49°23'43.45"N; 8°24'48.81"E). Die gepflügte Fläche wurde systematisch zur Aussaat von frühen Möhren vorgefräst. Nach mehreren Messungen der Spur-zu-Spur Genauigkeit zeigte sich jedoch eine Abweichung von +/- 5 cm, ähnlich dem Abweichungsverhalten bei der Zwiebelaussaat 2014. Da die Abweichung des Traktors und die des Anbaugerätes jedoch nicht die gleiche Richtung zeigten, summierte sich der Fehler. So versuchte die Gerätesteuerung nach rechts zu verschieben, der Traktor fuhr jedoch zu weit links. Der Verschiebereich von +/- 80 mm reichte somit nicht mehr aus. Auf Grundlage dieser hohen Abweichungen und der geringen Abweichungen am 13.02.2015 wurden neben der zu großen Baseline die unterschiedlichen Signalstärken des Mobilfunknetzes als weiterer Störfaktor angenommen. Da die neue Referenzstation bis Mitte Februar fertig gestellt sein sollte, hätte die These spätestens zur Aussaat der Zwiebeln Mitte März überprüft werden können. Durch Einbauschwierigkeiten konnte auf die neue Referenzstation jedoch erst Ende März zugegriffen werden. Aus diesem Grund diente die Aussaat der Sommerzwiebeln auf

zwei Schlägen (49°23'42.87"N; 8°24'3.50"E und 49°24'24.50"N; 8°24'1.73"E) der weiteren Testung der Komponenten. Bei der Umstellung des Anbaugerätes von der Beetfräse auf die Sämaschine zeigten sich nach den ersten Fahrmetern kleine sinusförmige Wellen entlang des Beetes. Da die Sämaschine eine geringe Bearbeitungstiefe als die Beetfräse aufweist und somit einen geringen Widerstand im Boden besitzt, war das Ölvolumen des proportionalen Lenkventils zu groß eingestellt. Durch die Reduktion der Stromstärke konnte die Ölmenge reduziert werden, wodurch die Wellenlinien verschwanden. Da die Spur-zu-Spur Abweichung ebenfalls Probleme erzeugte, wurde die Solllinie des Traktors per Hand nachjustiert, sodass die Sämaschine immer mittig hinter dem Traktor arbeiten konnte und um in dieser Weise den Verschieberegion optimal auszunutzen.

Während der Aussaat zeigte sich auch, dass der Zylinder mit außenliegendem Lenkwinkelsensor sehr anfällig ist. Das Kabel des Sensors wurde durchtrennt und musste erst repariert werden. Neben diesem kleineren Schaden besteht die Möglichkeit, dass der Traktor beim Fräsen bzw. Mulchen Steine oder andere Fremdkörper aufwirft und den Sensor so beschädigt. Auch die Kraft des Zylinders war mehr als ausreichend. Ein leichterer Zylinder würde sogar Vorteile beim Handling bringen, da er weniger Kraftaufwand beim Umsetzen erfordert. Ebenfalls könnten im Boden liegende Steine zu einer punktuellen Lastspitze am Achstrichter des Traktors führen, weshalb der Zylinder bei Überdruck öffnen muss. Der neue Zylinder sollte neben einem geringeren Kolbendurchmesser, ein Wegmesssystem und ein Überdruckventil aufweisen. Leider zeigten sich die Hersteller von Hydraulikzylindern bei Anfrage eines Landwirts nicht interessiert. Aus diesem Grund wurde die Firma Metallbearbeitung SCHWARZ aus Hüttenberg, Deutschland mit der Anfertigung eines solchen Zylinders beauftragt. Auf Grundlage des geringen Hubwegs entfiel die Montage eines Überdruckventils. Der neue Zylinder wies deshalb nur ein integriertes Wegmesssystem und einen Kolbendurchmesser von 30 mm auf. Die Montage des Prototyp erfolgte am 16.04.2015 (Abb. 41). Um die Bedienung beider Systeme zu vereinfachen, wurde gleichzeitig ein neues Touchdisplay integriert. Das Touch 1200 ermöglicht eine Darstellung im split screen, wodurch Anbaugerät und Traktor gleichzeitig dargestellt werden können (Abb. 41).



**Abb. 41:** Detailansicht des Touchterminals mit split screen Darstellung (links), zur Bedienung des neuen Zylinders (Detailansicht rechts)

Da der neue Zylinder durch den geringeren Kolbendurchmesser weniger Öl je Hubweg benötigte, wurden die Stromstärken zur Ansteuerung des Ventils entsprechend angepasst.

Die erste Testung des neuen Zylinders erfolgte beim Beetfräsen für Kürbisse am 27. und 28.04.2015. Drei gepflügte Schläge des Betriebs Hege standen hierfür zur Verfügung:

- 49°24'9.03"N; 8°23'42.36"E
- 49°23'49.46"N; 8°24'6.82"E
- 49°24'13.43"N; 8°23'43.34"E

Gleichzeitig waren dies auch die ersten Testfelder, die mit dem Signal der neuen Referenzstation bearbeitet wurden. Da beim Beetfräsen der Tropfschlauch genau mittig im Beet verlegt wird, war dieser eine geeignete Messpunkt der Spur-zu-Spur Messung. Die Technik funktionierte nun einwandfrei, sodass die Abweichung im Bereich von +/- 2 cm lag.

### 3.6 Versuchsaufbau und Durchführung 2015

Ziel der Versuche im Jahr 2015 war die Testung der neuen Anbaugerätesteuerung. Um die Genauigkeit des Systems bewerten zu können, wurden Vergleichsversuche mit der bisherigen Verschieberahmenteknik durchgeführt. Für die Untersuchung stand eine gefräste Fläche des Betriebs Hege (49°23'49.46"N; 8°24'6.82"E) zur Kürbisaussaat bereit. In Anlehnung an die

vorausgegangenen Untersuchungen folgte die Planung eines Versuchs mit neun Varianten. Neben dem Faktor „Fahrgeschwindigkeit“ sollte der Faktor „Fahrweise“ um die Variante „Neue Steuerung“ ergänzt werden. Die Variante „GPS Traktor“ wurde auf Grundlage der bisherigen Ergebnisse nicht weiter verfolgt. Zur Kontrolle diente die praxisübliche Variante „Manuell.“ Die einzelnen Varianten definierten sich wie folgt:

**Tab. 5:** Variantendefinition der Untersuchung 2015 in Kürbis, Betrieb Hege, Limburgerhof

Variante	Geschwindigkeit [km·h <sup>-1</sup> ]	Steuerungsart
1	3	Manuell
2	6	Manuell
3	9	Manuell
4	3	Verschieberahmen
5	6	Verschieberahmen
6	9	Verschieberahmen
7	3	Neue Steuerung
8	6	Neue Steuerung
9	9	Neue Steuerung

Die Aussaat des Kürbisses erfolgte am 08.05.2015 entsprechend der einzelnen Varianten. Gleich der Untersuchungen aus dem Jahr 2014 wurde je Beet eine Reihe Kürbis ausgesät. Die Aussaatstärke betrug 12.500 Pflanzen je Hektar, bei 0,4 m Pflanzabstand in der Reihe. Die Keimfähigkeit des Kürbisses lag bei 90 %. Somit sollten sich nach Abzug der Keimfähigkeit 2,25 Pflanzen je laufenden Beetmeter etablieren. Für die Aussaat wurde wieder auf das pneumatische Sägerät des Herstellers Agricola Italiana snc vom Betrieb Hege zurückgegriffen. Die Aussaat erfolgte entsprechend der Varianten mit manueller Steuerung, Verschieberahmenteknik und der neu entwickelten Steuerung. Die Arbeitsgeschwindigkeit betrug ca. 3 km·h<sup>-1</sup>. Nachdem der Kürbis und die Beikräuter aufgelaufen waren, erfolgte zunächst ein Pretest, um die notwendigen Maschineneinstellungen vornehmen zu können. Es zeigte sich jedoch, dass die maximalen Geschwindigkeiten in diesem Jahr nicht erreicht werden konnten. Da die Witterung im Mai 2015 sehr trocken war und insgesamt nur ca. 33 mm Niederschlag fielen (AM RLP 2016), war der Boden sehr locker und gab den Geräten keinen großen Widerstand. Das Erde-Beikraut-Gemisch schob sich aus diesem Grund bei

Fahrgeschwindigkeiten ab  $5 \text{ km}\cdot\text{h}^{-1}$  auf, sodass die jungen Kürbispflanzen verschüttet wurden (Abb. 42).



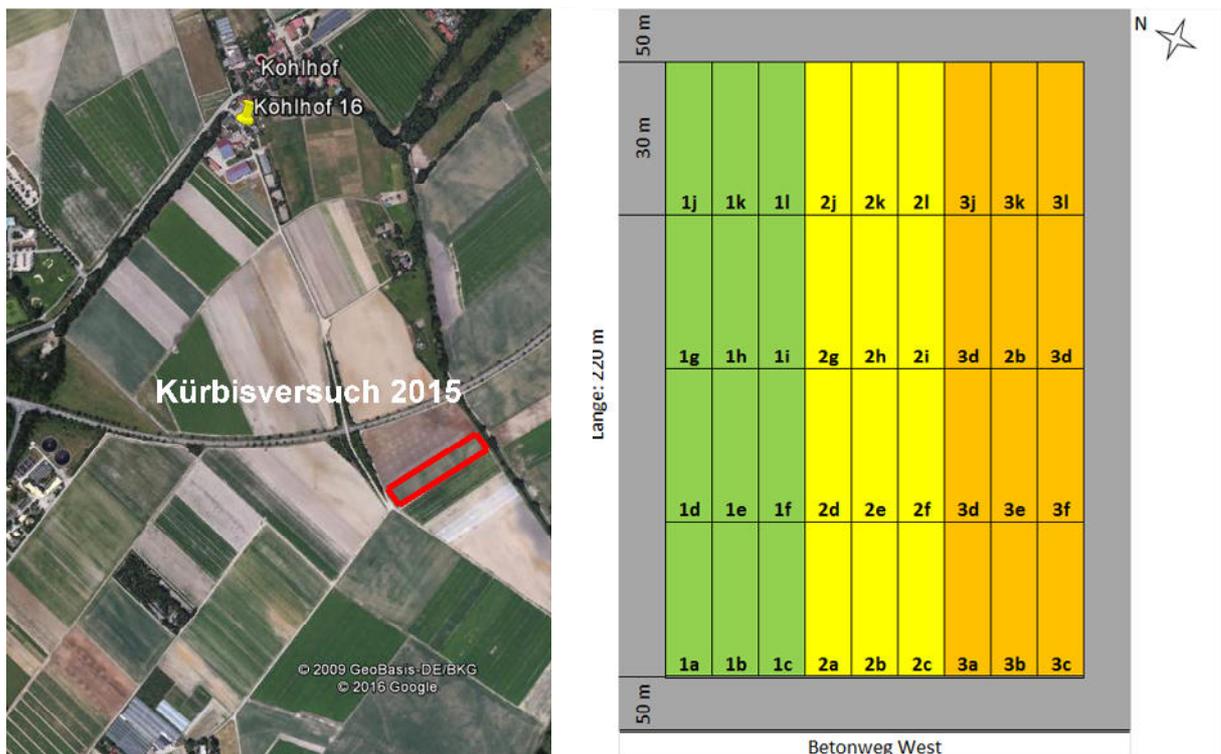
**Abb. 42:** Aufschieben des Erde-Beikraut-Gemisches durch die Hackschare und die so induzierte Verschüttung der Kürbispflanzen

Die Verstellung des Anstellwinkels der Schare brachte hier ebenso wenig Abhilfe, wie die Bewässerung über das verlegte Tropfrohr. Diese führte an dieser Stelle auch nur zu einer partiellen Bodenfeuchte, da die Bewässerungszwiebel in Sandboden schmaler ist als beispielsweise in Lehmboden (BELTZ et al. 2010). Da der trockene Boden keine schnellere Bearbeitung zu ließ und dennoch der Vergleich beider Steuerungsvarianten durchgeführt werden sollte, wurde der Variantenplan entsprechend abgeändert:

**Tab. 6:** Neue Variantendefinition der Untersuchung 2015 in Kürbis, Betrieb Hege, Limburgerhof

Variante	Geschwindigkeit [ $\text{km}\cdot\text{h}^{-1}$ ]	Steuerungsart
1	4,5	Manuell
2	4,5	Verschieberahmen
3	4,5	Neue Steuerung

Die gefahrene Geschwindigkeit aller Varianten wurde mit  $4,5 \text{ km}\cdot\text{h}^{-1}$  knapp unter der ermittelten Grenze des Pretests festgelegt. Die Anlage der einzelnen Parzellen erfolgte bereits bei der Saat, sodass jeweils drei Beete mit einer Breite von 2,0 m zur Verfügung standen. So war es möglich, die Anzahl der Wiederholungen je Variante zu erhöhen und jede Variante zwölfmal zu wiederholen. Am Ende des Feldes entstand ein auf jeweils 50 m vergrößerter Randbereich. Insgesamt stand eine Versuchsfläche von ca. 0,22 ha zur Verfügung. Der Versuch wurde als Streifenanlage mit 36 Prüfparzellen durchgeführt (Abb. 43).



**Abb. 43:** Lokalisation des Versuchsfeldes (links) und Versuchsdesign (rechts) der Untersuchung 2015 in Kürbis, Betrieb Hege, Limburgerhof

Mit den nachfolgenden Hackversuchen konnten am 31.05.2015 begonnen werden, da zu diesem Zeitpunkt die Beikräuter aufgelaufen waren. Auf die Fingerhacke wurde wegen des Erdaufschubs verzichtet. Die Dokumentation des ersten Hackdurchgangs erfolgte am 03.06.2015. Der zweite Hackdurchgang folgte am 11.06.2015. Da unbeständiges Wetter vorhergesagt war, erfolgte die abschließende Dokumentation erst am 21.06.2015. So konnte beurteilt werden, ob nach den Niederschlägen ein weiterer Hackdurchgang gefahren werden musste. Gleich dem Kürbisversuch 2014 fand die mit Flachhackscharen ausgerüstete RUSTICA Hacke, des Betriebs Hege Verwendung. Ebenso erfolgte die Gliederung der

Dokumentationspunkte durch Holzpfosten und Schnüren. In diesem Bereich wurden die Kulturpflanzen entfernt, um bei der späteren Bildanalyse keine Verfälschung der Ergebnisse erzielen. Die Dokumentation der Kulturschäden erfolgte jeweils ein Tag nach dem Hackdurchgang, um Welkeerscheinungen erkennen zu können.

### **3.7 Beobachtungen und weiterführende Versuche 2015**

Die ersten Beobachtungen konnten bei der Vorbereitung des Kürbisfeldes im Frühsommer 2015 gemacht werden. Nachdem der Verlegung des Tropfrohrs beim Fräsen mittels der neuen Steuerung, sollte mit dem Slide L eine 1 m breite Mulchfolie mittig auf dem Beet abgelegt werden. Da die Arbeiten auf der Bedienoberfläche der Firma REICHHARDT abliefen, mussten die Koordinaten der Strebe händisch auf den Slide übertragen werden. Die Verlegung funktionierte auf der ersten Spur ebenfalls mit einer Abweichung unter 2 cm. In der zweiten Spur ergab die Messung eine Abweichung von 7 cm. Die Mulchfolie lag somit nicht mehr mittig über dem Tropfrohr, was bei der späteren Pflanzung des Kürbisses zu Problemen führte. Mehrere Testfahrten bestätigten die große Abweichung jeweils nur in einer Fahrtrichtung. Da bestimmte Parameter, wie Antennenposition bzw. Fahrzeugmitte einen solchen Fehler verursachen können, begann die Fehleranalyse an dieser Stelle. Alle Daten waren jedoch korrekt programmiert. Da im April 2015 ein neuer Receiver RGS 325 auf dem Verschieberahmen montiert und ein Softwareupdate des Receiverherstellers durchgeführt wurde, musste nun beides überprüft werden. Der Receiver RGS 325 arbeitet zusätzlich mit einem externen Modem, was ebenfalls als Fehlerquelle in Frage kam. Nach einer Hardwareanalyse konnten der Receiver und das Modem als Fehlerquelle ausgeschlossen werden. Der Fehler musste daher im Softwareupdate liegen. Dieses Problem sollte durch das Aufspielen einer anderen Software behoben werden. Da das Softwareupdate ebenfalls auf dem Traktor und der neuen Anbaugerätsteuerung installiert war, sollten auch diese Receiver upgedatet werden. Dabei mussten die Referenzlinien gelöscht werden. Da eine direkte Kopplung mit dem PC in der REICHHARDT Bedienoberfläche nicht vorgesehen ist, müssen die Daten händisch übertragen werden. Hierzu sind jeweils der Längen- und Breitengrad für zwei Punkte mit jeweils acht Nachkommastellen zu übertragen. Bedingt können die Daten aus der RTK Clue App der Firma REICHHARDT im Notfall wiederhergestellt werden. Da die

Darstellung der Fahrspuren in Google Earth erfolgt, sind maximal sechs Nachkommastellen möglich. Dies führt zu einer ungenaueren Ortung. Wie beim Hacken festgestellt wurde, brachte das neue Softwareupdate jedoch nicht die gewünschte Abhilfe (Abb. 44), weshalb der Faktor 7 cm jeweils händisch im Bedienterminal abgeändert werden musste.



**Abb. 44:** Abweichung des Verschieberahmens um 7 cm (rote Pfeile) zur Kulturreihe  
(rote Linien)

Nachdem das Softwareupdate als Fehlerquelle ausgeschlossen werden konnte, sollte im August 2015 ein Feld mit Spinat am Queckbrunnerhof in Schifferstadt für den Feldtag besät werden. Die Aussaatarbeiten wurden dabei von der Firma REICHHARDT mit der Technik des Betriebs Hege durchgeführt, um eine umfangreichere Fehleranalyse garantieren zu können. Wie sich herausstellte, lag das Problem doch in einer temporär fehlerhaften Hardware des Receiverherstellers begründet. Daher folgten im Dezember 2015 die Lieferung und der Einbau eines neuen Receiver RGS 320.

Am 26.08.2015 sollte eine ein Hektar große Fläche des Betriebs Hege ( $49^{\circ}24'1.88''N$ ;  $8^{\circ}23'46.14''E$ ) zur Aussaat von Winterzwiebeln vorbereitet werden. Die Vorarbeit sollte dabei mit der Beetfräse erfolgen. Um die Beete exakt mittig für die spätere Sämaschine zu positionieren, wurde mit der neuen Anbaugerätesteuerung gearbeitet. Jedoch zeigte nun auch diese einige Aussetzer während der Arbeit. So lief das Anbaugerät abrupt von der Sollspur ab, bevor es nach kurzer Zeit wieder in diese wechselte. Gleiches war auch bei der Aussaat am 30.08.2015 zu erkennen, sodass die einzelnen Spuren immer wieder Abweichungen aufwiesen (Abb. 45).



**Abb. 45:** Durch Signalaussetzer induzierte Spurbabweichung während dem Beetfräsen mittels GPS (links) und bei Zwiebelaussaat 2015 (rote Kennzeichnung gibt die Solllinie an)

Um das Testfeld dennoch abschließen zu können, wurde das Anbaugerät manuell auf die Beetmitte verschoben. Für das hochgenaue Hacken war der Fehler jedoch zu groß, weshalb die Durchführung mit dem Verschieberahmen nur auf einzelnen Beeten möglich war. Das Fahren erforderte höchste Konzentration, da der Rahmen teilweise im Bereich von + 5 cm bis - 5 cm angepasst werden musste. Die nachfolgende Fehleranalyse stellte eine schlechte bzw. schwankende Mobilfunkverbindung fest. In der Überlegung stand zunächst der Aufbau einer eigenen Basisstation mit direkter Funkverbindung. Neben dieser Möglichkeit bestand eine weitere Lösung im Aufspielen einer Überbrückungssoftware. Diese Software erlaubt ein Weiterfahren der Fahrzeuge im Bereich von +/- 2,5 cm auch dann, wenn der Mobilfunkkontakt bzw. der Kontakt zur Referenzstation abbricht. Jedoch fährt das Fahrzeug nur für einen begrenzten Zeitraum mit hoher Genauigkeit weiter und die Software war erst im Frühjahr 2016 verfügbar.

Die Durchführung von weiteren Testungen mit dem Verschieberahmen PSR Slide L, sollte bei der Pflanzung von Knoblauch auf einem Feld des Betriebs Hege geschehen (49°24'0.17"N; 8°23'44.46"E). Hierzu war das Feld mit der Beetfräse und der neuen Anbaugerätsteuerung vorgefräst worden. Dabei fiel auf, dass die Fräse sehr oft an den Anschlag des Zylinders lief und die Spur-zu-Spur Abstände oft vom Sollwert 2,03 m abwichen. Der Fehler war zunächst nicht an der Software oder den Mobilfunkempfang festzumachen. Daher wurde der Neigungssensor als Ursache angenommen. Eine Überprüfung durch die Servicetechniker brachte jedoch keine Abhilfe. Während der Winterinspektion in der betriebseigenen Werkstatt des Betriebs Hege konnte der Fehler ermittelt werden: Am

Hauptkabel des Navigationsrechners hatte sich das Stromversorgungskabel des Neigungssensors gelöst. Nach einpressen eines neuen Pins funktionierte der Neigungssensors wieder einwandfrei. Die ersten Testfahrten starteten im Frühjahr 2016.

Beim Pflanzen des Knoblauchs zeigte sich ein weiteres Problem. So sollte der Knoblauch mittels einer Pflanzmaschine auf insgesamt vier Reihen je Beet gepflanzt werden. Die Pflanzmaschine war dabei mit zwei Reihen in einem Abstand von 90 cm ausgerüstet. Die Pflanzaggregate waren asymmetrisch angeordnet, sodass ein Beet jeweils durch Hin- und Rückfahrt bepflanzt werden konnte. Es zeigte sich allerdings, dass die Abweichung des Rahmens noch nicht behoben war. Somit stimmte der Abstand der Reihen zueinander nicht. Der Sollwert von 45 cm war teilweise um bis zu 7 cm unter- bzw. überschritten. Somit musste auch hier manuell gefahren werden. Teilweise änderte sich allerdings die Abweichung während der Arbeit auf einem Beet, sodass die Endabstände trotz manueller Regulation nicht eingehalten werden konnten. Dies führte zu größeren Problemen bei den nachfolgenden Hackdurchgängen. Diese mussten fast ausschließlich manuell korrigiert werden. Der Fehler sollte auch hier an einer unzureichenden Signalverbindung festgemacht werden.

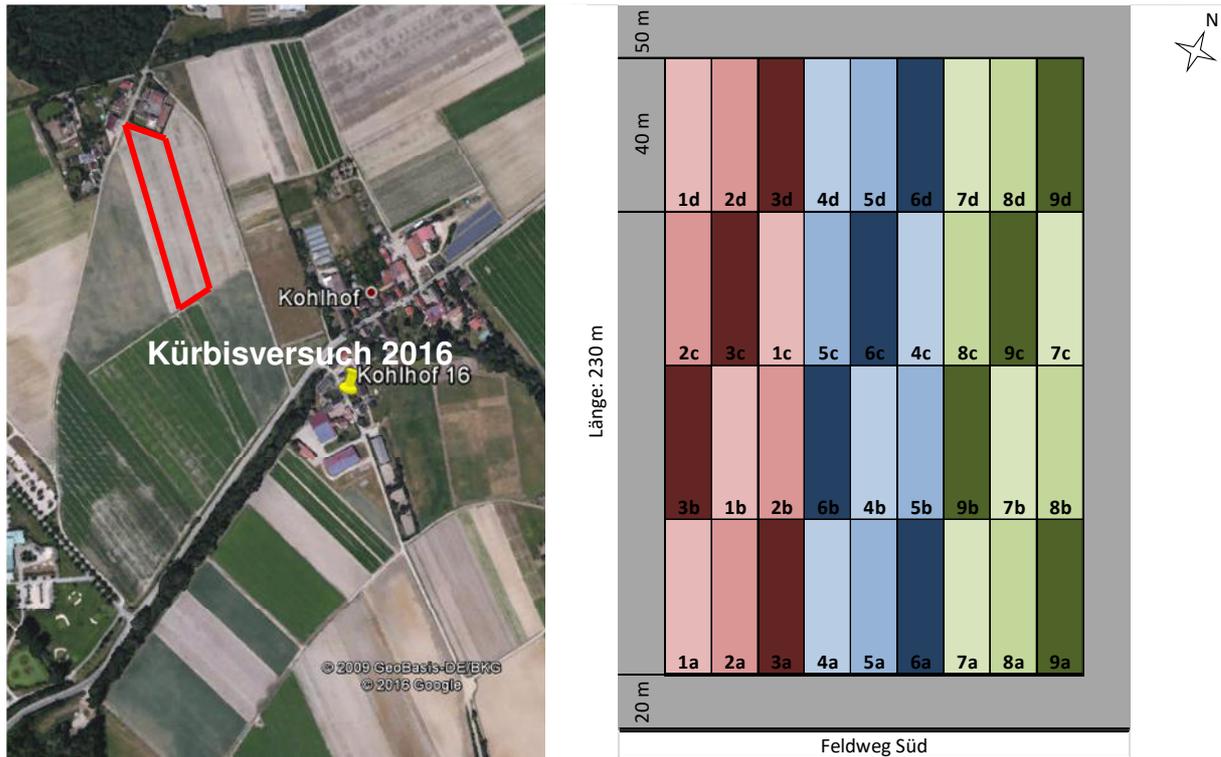
### **3.8 Versuchsaufbau und Durchführung 2016**

Ziel der Untersuchungen 2016 war die Validierung der bisher gewonnen Ergebnisse. Insbesondere sollte die Funktionsweise und die Genauigkeit der neuen Anbaugerätsteuerung überprüft und gefestigt werden. Aus diesem Grund fiel die Wahl der Kultur wiederum auf den Kürbis, da hierzu bisher zwei vollständige Untersuchungsjahre vorlagen. Für die Untersuchungen stand eine insgesamt 4,5 ha große Fläche des Betriebs Hege zur Verfügung (49°24'20.00"N; 8°23'39.04"E). Die im Vorfeld gepflügte Fläche wurde mit der Beetfräse bearbeitet und eine Tropfbewässerung in der Mitte der Beete eingezogen. Die untersuchten Varianten definieren sich wie folgt:

**Tab. 7:** Variantendefinition der Untersuchung 2016 in Kürbis, Betrieb Hege, Limburgerhof

Variante	Geschwindigkeit [km·h <sup>-1</sup> ]	Steuerungsart
1	3	Manuell
2	6	Manuell
3	9	Manuell
4	3	Verschieberahmen
5	6	Verschieberahmen
6	9	Verschieberahmen
7	3	Neue Steuerung
8	6	Neue Steuerung
9	9	Neue Steuerung

Die einzelnen Varianten sollten jeweils viermal wiederholt werden, so dass sich insgesamt 36 Prüfparzellen ergaben. Für die Untersuchung wurden neun Beete angelegt. Bei einer Feldlänge von 230 m betrug die Größe des Versuchsfeldes ca. 0,4 ha. Das Feld grenzte Richtung Norden an eine L-förmige Hecke an. Hier war ein größerer Randstreifen von 50 m eingeplant. Da die Maschinenzusammensetzung durch die Steuerungsart bedingt ist, sollten die Prüfparzellen entsprechend der Steuerungsarten auf dem Feld zusammengefasst werden. Für jede Steuerungsart standen somit drei Beete zur Verfügung. Innerhalb jedes Streifens erfolgte die Anlage der zugehörigen Prüfparzellen randomisiert (Abb. 46).



**Abb. 46:** Lokalisation des Versuchsfelds (links) und Versuchsdesign (rechts) der Untersuchung 2016 in Kürbis, Betrieb Hege, Limburgerhof

Die Aussaat der einzelnen Versuchsglieder fand entsprechend der Steuerungsart am 11.05.2016 statt. Hierfür stand die Einzelkornsämaschine des Betriebs Hege zur Verfügung. Die Aussaatstärke betrug  $12.500 \text{ Pflanzen} \cdot \text{ha}^{-1}$ , sodass bei einer Reihe pro 2 m Beet mit einem Pflanzenabstand von 40 cm gesät wurde.

Für die nachfolgenden Hackdurchgänge fand die mit Flachhackscharen ausgerüstete RUSTICA Hacke des Betriebs Hege Verwendung. Der erste Hackdurchgang startete am 21.05.2016, da zu diesem Zeitpunkt die Beikräuter aufgelaufen waren. Da der Kürbis im Keimblattstadium war, sollte auf die in den Boden eingreifende Fingerhacke verzichtet werden, um eine Beschädigung des sensiblen Keimlings zu vermeiden. Die Dokumentation des ersten Hackdurchgangs erfolgte am 26.05.2016. Die Planung zeigte den zweiten Hackdurchgang am 07.06.2016 an. Die Witterung im Jahr 2016 machte eine Planung jedoch schwierig, da die Befahrbarkeit auf Grund der Niederschläge nicht immer gegeben war (vgl. Kapitel 3.10). Der zweite Hackdurchgang erfolgte daher erst am 11.06.2016, die abschließende Dokumentation am 13.06.2016. Auf Grund der verdichteten Fahrspuren, sollte kein weiterer Bearbeitungsgang mit der Hacke durchgeführt werden. Hier kam eine

Kombination aus Tiefenmeißel und Reihenfräse zum Einsatz. Eine Kennzeichnung der Referenzflächen, zur Analyse des Bekämpfungserfolgs, fand direkt nach der Saat statt. Weiterhin mussten in diesem Bereich die Kulturpflanzen entfernt werden, um bei der späteren Bildanalyse keine Verfälschung der Ergebnisse erzielen. Die Dokumentation der Kulturschäden erfolgte jeweils ein Tag nach dem Hackdurchgang.

### **3.9 Beobachtungen und weiterführende Versuche 2016**

Nachdem im Winter 2015/2016 eine neue Software des Herstellers REICHHARDT zur Verfügung stand, wurde im Januar 2016 ein Update aller Receiver durchgeführt. Die Software des Systems auf dem Traktor sollte zudem auch in Rückwärtsfahrt navigieren. Um dieses Novum ausgiebig zu testen, sollte am 27. und 28.02.2016 eine 5,5 ha große Fläche des Betriebs Hege mit der Beetfräse bearbeitet werden. Es zeigte sich, dass die Navigation durchaus in Rückwärtsfahrt funktioniert. Jedoch reagiert das System viel sensibler auf Bodenunebenheiten, als dies bei Vorwärtsfahrt der Fall ist. Ein Fehler im noch nicht gewechselten Gyroskop ließ sich nicht ausschließen. Aus diesem Grund wurde im März 2016 ein neues Gyroskop verbaut, das die Neigung in sechs statt vier Achsen kompensieren kann.

Die ausgiebige Testung des neuen Navigationsrechners erfolgte bei der Zwiebelaussaat vom 18. bis 20.03.2016. Die Aussaat der Sommerzwiebeln fand auf zwei Flächen des Betriebs Hege (49°23'40.14"N; 8°23'54.76"E und 49°24'31.49"N; 8°24'7.87"E) statt. Dabei folgten sowohl der Traktor als auch die Sämaschine mit der neuen Steuerung einer RTK Korrektur. Beim Rückwärtsfahren fiel auf, dass der Traktor weniger anfällig auf Bodenunebenheiten reagiert. Auch die neue Anbaugerätesteuerung funktionierte tadellos. Die durchgeführten Messungen des Spur-zu-Spur Abstandes wiesen eine Genauigkeit von +/- 2 cm auf.

Der nächste Test erfolgte zur Vorbereitung der Kürbisfelder mittels der Beetfräse und Tropfrohrverlegeeinheit. Zwei gepflügte Felder des Betriebs Hege standen hierzu zur Verfügung (49°24'10.38"N; 8°23'43.95"E und 49°24'20.00"N; 8°23'39.04"E). Beim ersten Feld fiel auf, dass das System innerhalb einer Spur wiederum kurzzeitig abwich, bevor es wieder der Sollspur folgte. Aus diesem Grund wurde Anfang Mai 2015 ein weiteres Softwareupdate durchgeführt. Teil des Updates war eine Überbrückungssoftware, die zeitweise Aussetzer des Mobilfunkempfangs kompensieren kann. Nach dem Update konnte

die Arbeit auf dem zweiten Feld fortgesetzt werden. Es zeigte sich, dass die kurzzeitigen Abweichungen nun nicht mehr auftraten. Die Spur-zu-Spur Abweichung stimmte ebenfalls mit den vorher eingestellten 2,0 m überein.

Bei der nachfolgenden Arbeit mit dem Slide sollte eine Mulchfolie mittig über dem Tropfrohr positioniert werden. Es zeigte sich jedoch, dass hier ebenfalls der Versatz von 7 cm zu verzeichnen war. Da der Versatz jeweils nur in einer Fahrtrichtung zu verzeichnen war, und der Fehler trotz unterschiedlicher Hardwarekomponenten weiterhin auftrat, blieb die Software als letzte Fehlerquelle. Die Ursache konnte durch den Hersteller bis dato nicht ermittelt werden.

Nachdem das Update am Anfang tadellos funktionierte, fiel das System Mitte Juni durch eine niedrige Anzahl an verfügbaren Satelliten auf. So lagen oft nur Signale von 8 bis 11 Satelliten vor. Dies führt zu einer größeren Ungenauigkeit des Systems, da bei kurzzeitigem Signalwegfall zweier Satelliten die Mindestanzahl von sieben Satelliten zur hochpräzisen Steuerung nicht mehr erreicht werden kann. Der Fehler äußerte sich durch eine kurzzeitige Abweichung des Traktors von bis zu 8 cm. Teilweise führte dies zum Aufschaukeln des Traktors.

Während der Hackdurchgänge der Untersuchung 2016 kam es zu einem weiteren Problem. Am 11.06.2016 fiel das D1 Mobilfunknetz auf Grund eines Datenbankfehlers aus. Da die SIM Karten der GPS Receiver ebenfalls im D1 Netz arbeiten, lag bis ca. 10 Uhr keine Verbindung zur Basisstation vor (FOCUS Online 2016). Auf Grund der schwierigen Witterungsbedingungen in diesem Jahr wurde so ein wertvolles Zeitfenster von 4 Stunden verschenkt. Der Hersteller bietet hier allerdings die Möglichkeit eines Multi SIM Moduls an, sodass der Receiver mit zwei unterschiedlichen SIM Karten ausgestattet ist. Fällt ein Netz überraschend aus, dient das andere Netz als Backup.

### **3.10 Witterung während der Hackarbeiten**

Um die gewonnen Ergebnisse korrekt beurteilen zu können, ist die Witterung während der Hackarbeiten zu berücksichtigen. Durch unmittelbare Niederschlagsereignisse kann der Bekämpfungserfolg direkt beeinflusst werden. Für einen optimalen Bekämpfungserfolg sind nach dem Hackvorgang ein bis zwei Tage Sonnenschein notwendig (LABER 1999). Für eine

aussagekräftige Beurteilung ist neben der Niederschlagsmenge auch die Verdunstung relevant. Da die Sonne die Wurzeln der Beikräuter aktiv austrocknen muss, dient die Anzahl der Sonnenstunden als Absicherung der beiden anderen Daten. Die notwendigen Wetterdaten sind in Rheinland Pfalz über ein sehr enges Netz von Wetterstationen zu beziehen, die vom Dienstleistungszentrum Ländlicher Raum (kurz: DLR) zur Verfügung gestellt werden. Der Infodienst Agrarmeteorologie Rheinland-Pfalz (kurz: AM RLP) steht kostenfrei zur Verfügung. Die nächstgelegene Station zum Betrieb Hege ist ca. 3,5 km entfernt auf dem Queckbrunnerhof in Schifferstadt stationiert. Für die Untersuchungen 2014 wurden folgende Daten aufgezeichnet:

**Tab. 8:** Ausgewählte Klimadaten der Wetterstation in Schifferstadt während des Untersuchungszeitraums vom 11.06.2014 bis 22.06.2014, für die Untersuchung 2014 in Kürbis, Betrieb Hege, Limburgerhof

Tag	Niederschlag $\Sigma$ [mm]	Verdunstung nach FAO 56 $\Sigma$ [mm]	Sonnenstunden $\Sigma$ [h]
11.06.2014	0,0	5,7	12
12.06.2014	0,0	5,8	13
13.06.2014	0,0	5,8	13
14.06.2014	0,0	3,8	6
15.06.2014	0,0	4,8	10
16.06.2014	0,0	4,8	9
17.06.2014	0,0	4,3	8
18.06.2014	0,0	5,7	13
19.06.2014	0,0	5,4	12
20.06.2014	0,3	3,7	6
21.06.2014	0,0	4,3	11
22.06.2014	0,0	4,9	12

Zwischen dem 11.06. und 22.06.2014 waren keine größeren Niederschläge zu verzeichnen. Die Hackdurchgänge am 14.06. und 18.06.2014 konnten somit planmäßig durchgeführt werden. Durch die Verdunstung von ca. 5 mm und einer Sonnenstundenzahl von ca. 10 Stunden pro Tag sollte ein Vertrocknen der ausgehackten Beikräuter einsetzen. Die Niederschlagsmenge von 0,3 mm am 20.06.2014 reichte für ein Wiederanwachsen nicht aus, da das Ereignis zu spät und zu gering war.

Im Jahr 2015 wurden ebenfalls zwei Hackdurchgänge gefahren. Das Wetter war zum Zeitpunkt der Untersuchungen jedoch unbeständiger als in 2014. Die Witterung wurde wie folgt aufgezeichnet:

**Tab. 9:** Ausgewählte Klimadaten der Wetterstation in Schifferstadt während des Untersuchungszeitraums vom 28.05.2015 bis 21.06.2015, für die Untersuchung 2015 in Kürbis, Betrieb Hege, Limburgerhof

Tag	Niederschlag $\Sigma$ [mm]	Verdunstung nach FAO 56 $\Sigma$ [mm]	Sonnenstunden $\Sigma$ [h]
28.05.2015	0,1	4,5	9
29.05.2015	0,7	2,5	2
30.05.2015	2,1	4,3	8
31.05.2015	0,0	4,3	8
01.06.2015	10,2	2,5	1
02.06.2015	0,0	5,3	9
03.06.2015	0,0	5,7	12
04.06.2015	0,0	5,7	14
05.06.2015	0,0	5,7	13
06.06.2015	0,4	6,1	10
07.06.2015	0,0	7,1	13
08.06.2015	0,0	4,5	1
09.06.2015	0,0	3,3	1
10.06.2015	0,0	3,0	2
11.06.2015	0,0	4,8	11
12.06.2015	0,9	5,0	9
13.06.2015	0,8	3,9	6
14.06.2015	0,0	5,8	13
15.06.2015	0,0	5,9	10
16.06.2015	0,0	5,7	9
17.06.2015	0,0	5,2	13
18.06.2015	14,7	2,6	0
19.06.2015	0,2	2,2	0
20.06.2015	0,0	2,7	3
21.06.2015	0,1	2,9	2

Der erste Hackdurchgang erfolgte am 31.05.2015. Am nächsten Tag ereignete sich ein Gewitterschauer mit einer Niederschlagsmenge von 10 mm. Unter derartigen Bedingungen ist ein Wiederanwachsen der Segetalpflanzen unabdingbar. Da die nächsten Tage ebenfalls unbeständiges Wetter gemeldet war, wurde erst am 11.06.2015 ein zweiter Hackdurchgang

gefahren. An beiden darauf folgenden Tagen fiel jeweils 1 mm Regen. Da das Wetter weiterhin unbeständig vorhergesagt war, erfolgte die abschließende Dokumentation am 21.06.2015, um die Durchführung eines dritten Hackdurchganges abschätzen zu können. Binnen dieses Zeitraums fielen zusätzlich 15 mm Niederschlag.

Die Witterung während des Versuchsjahres 2016 war durch vermehrte Niederschläge geprägt. Ausreichend Trockenperioden waren kaum vorhanden, sodass oft auch kurz vor prognostizierten Niederschlägen gearbeitet werden musste (Tab. 10).

**Tab. 10:** Ausgewählte Klimadaten der Wetterstation in Schifferstadt während des Untersuchungszeitraums vom 18.05.2016 bis 13.06.2016, für die Untersuchung 2016 in Kürbis, Betrieb Hege, Limburgerhof

Tag	Niederschlag $\Sigma$ [mm]	Verdunstung nach FAO 56 $\Sigma$ [mm]	Sonnenstunden $\Sigma$ [h]
18.05.2016	0,1	4,0	9
19.05.2016	0,9	3,2	6
20.05.2016	0,0	3,9	9
21.05.2016	0,0	4,5	12
22.05.2016	6,5	5,1	9
23.05.2016	3,6	1,8	0
24.05.2016	1,6	1,3	0
25.05.2016	0,0	2,0	2
26.05.2016	0,0	4,4	13
27.05.2016	5,2	3,7	8
28.05.2016	0,7	3,8	7
29.05.2016	24,9	3,2	5
30.05.2016	23,6	2,0	2
31.05.2016	0,0	3,2	5
01.06.2016	2,4	2,5	2
02.06.2016	2,6	2,9	3
03.06.2016	2,5	2,9	5
04.06.2016	13,7	3,2	5
05.06.2016	3,9	3,4	6
06.06.2016	0,0	5,1	13
07.06.2016	9,5	5,2	12
08.06.2016	14,6	2,1	0
09.06.2016	0,1	4,9	13
10.06.2016	0,0	4,7	13
11.06.2016	2,4	2,4	1
12.06.2016	5,9	2,3	1
13.06.2016	8,5	2,9	3

Der erste Hackdurchgang im Jahr 2016 wurde am 21. Mai durchgeführt. Zuvor fielen kaum Niederschläge und am Tag der Bearbeitung konnten 12 Sonnenstunden verzeichnet werden. An den nächsten drei Tagen fielen jedoch ca. 12 mm Niederschlag. Somit blieb offen, ob die Sonnenscheindauer am 21. Mai für eine ausreichende Vertrocknung der Segetalpflanzen genügte. Die nachfolgende Dokumentation erfolgte daher erst am 26.05.2016. Da in der

darauf folgenden Woche insgesamt knapp 80 mm Niederschlag fielen, ließ die Bodenfeuchte zunächst keine weiteren Bearbeitungsgänge zu. Da die Segetalpflanzen auf Grund dieser hohen Niederschläge optimale Wachstumsbedingungen fanden, musste nun ein weiterer Hackdurchgang gefahren werden, sobald der Boden einigermaßen befahrbar war. Der zweite Hackdurchgang war am 07. Juni geplant. Allerdings kamen am 07. und 08. Juni weitere 25 mm Niederschlag, sodass die Bearbeitung zu einem späteren Zeitpunkt stattfinden musste. Am 09. und 10. Juni trocknete der Oberboden bei jeweils 13 Sonnenstunden ein wenig ab. Da am Wochenende weitere Niederschläge prognostiziert wurden, sollte der zweite Hackdurchgang am 11.06.2016 erfolgen. Auf Grund des Netzfehlers im D1 Netz (FOCUS Online 2016) konnte am Morgen allerdings keine Verbindung zur Basisstation aufgebaut werden. Der Durchgang erfolgte daher am Mittag. Weitere Niederschläge folgten am Abend des 11. Juni, sowie am 12. und 13. Juni. Da ein weiterer Hackdurchgang auf Grund der verdichteten Fahrspuren nicht mehr geplant war, wurde die abschließende Dokumentation am 13.06.2016 durchgeführt.

### 3.11 Ergebnisse der Hackuntersuchungen

Die ermittelten Ergebnisse aus dem Untersuchungszeitraum von 2014 bis 2016 durchliefen zunächst der Sichtung und Digitalisierung. Die statistische Auswertung erfolgte im Nachgang mit der Open-Source-Software „R.“ Weiterhin wurde die Software „Excel“ der Firma Microsoft, Redmond, USA, zur grafischen Darstellung verwendet. Die Bildanalyse zur Ermittlung des Bekämpfungserfolgs erfolgte mit der Open-Source-Software „ImageJ.“

#### 3.11.1 Bodenfeuchte

Die vorliegenden Felder des Betriebes Hege zählten zu den leichten Böden (vgl. Kapitel 3.1.7). Die optimale Bodenfeuchte sollte zum Zeitpunkt des Hackdurchgangs einen Wert zwischen 0 und 10 Vol.-% aufweisen (WEBER 1997). Um die Bodenfeuchte zu ermitteln, wurden vor jedem Hackdurchgang Bodenproben entnommen und 50 g des feuchten Bodens abgewogen. Nach der Trocknung folgte eine erneute Wägung. Die Rückwägung der Probe vom 14.06.2014 ermittelte ein Trockengewicht des Bodens von 47,8 g. Zur Ermittlung der Bodenfeuchte wurde Formel 8 verwendet:

$$W_{Vol.-%} = \frac{50g - 47,8g}{47,8g} \cdot \frac{0,71 \frac{ml}{g}}{1 \frac{ml}{g}} \cdot 100 = 3,2678 Vol. - \%$$

Die Bodenfeuchte zum Zeitpunkt des ersten Hackdurchgangs 2014 betrug 3,3 Vol.-%. Die Bedingungen waren somit für den nachfolgenden Hackdurchgang geeignet. Beim zweiten Hackdurchgang am 18.06.2014 ergab die Rückwägung der Bodenprobe einen Wert von 48,1 g. Die ermittelte Bodenfeuchte von 2,8 Vol.-% war ebenfalls trocken genug, um ein optimales Hackergebnis erzielen zu können. Die Messungen der Proben aus dem Jahr 2015 ergaben folgende Bodenfeuchtegehalte:

**Tab. 11:** Bodenfeuchtegehalte der Untersuchung in Kürbis 2015, Betrieb Hege, Limburgerhof

Datum	Gewicht feuchter Boden [g]	Gewicht trockener Boden [g]	Volumen Wasser [ml]	Bodenfeuchte [Vol.-%]
31.05.2015	50	46,5	0,0534	5,3
11.06.2015	50	47,5	0,0374	3,7

Durch den Niederschlag am Tag vor dem Hackdurchgang konnte am 31.05.2015 eine Bodenfeuchte von 5,3 Vol.-% im Bearbeitungshorizont gemessen werden. Dieser Wert lag ebenso unter der Grenzfeuchte, wie die Messungen von 3,7 Vol.-% am 11.06.2015. Zur Beurteilung des Hackergebnisses zählt jedoch die ganzheitliche Sichtung der Parameter. So konnte am 31.05.2015 zwar keine kritische Bodenfeuchte gemessen werden, das nachfolgende Niederschlagsereignis am 01.06.2015 (s. Kapitel 3.10) zeigte seine Wirkung auf die nicht ausreichende Welke der Segetalpflanzen.

Für die Untersuchung im Jahr 2016 wurden folgende Feuchtegehalte ermittelt:

**Tab. 12:** Bodenfeuchtegehalte der Untersuchung in Kürbis 2016, Betrieb Hege, Limburgerhof

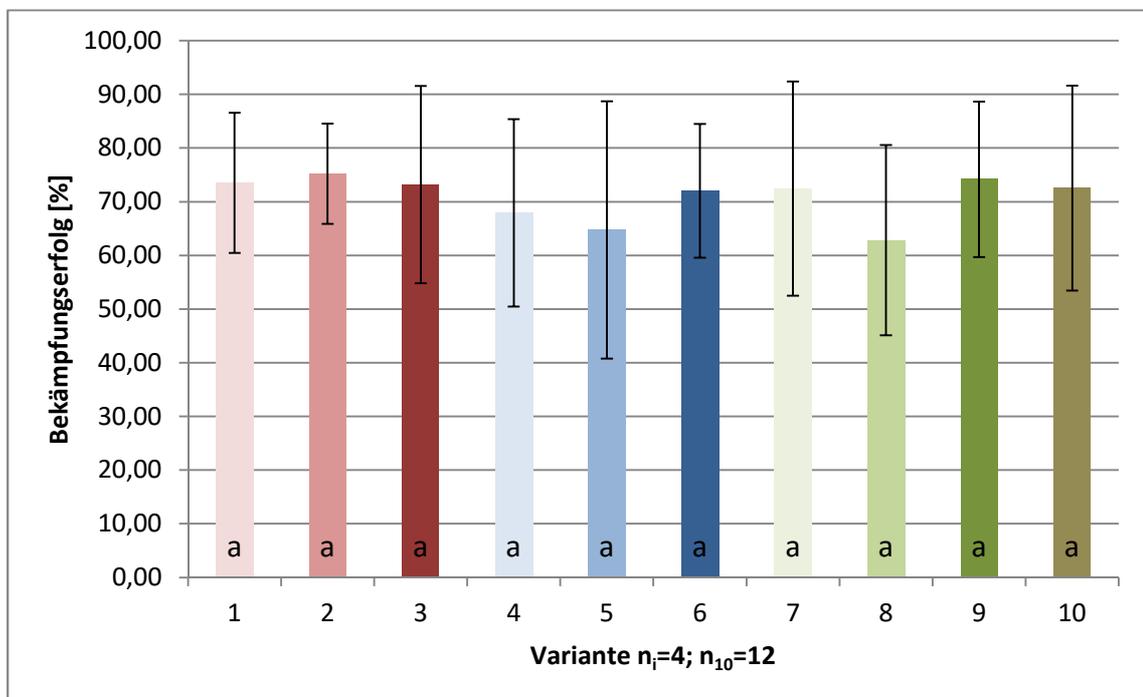
Datum	Gewicht feuchter Boden [g]	Gewicht trockener Boden [g]	Volumen Wasser [ml]	Bodenfeuchte [Vol.-%]
21.05.2016	50	47,9	0,0311	3,1
11.06.2016	50	45,7	0,0668	6,7

Trotz der schwierigen Witterung im Jahr 2016 zeigte die erste Messung am 21.05.2016 mit einer Bodenfeuchte von 3,1 Vol.-% einen Wert unter der Grenzfeuchte von 10 Vol.-%. Auch die zweite Messung am 11.06.2016 zeigte mit 6,7 Vol.-% eine optimale Bodenfeuchte. Jedoch waren an beiden Terminen nachfolgende Niederschläge zu verzeichnen, die ein potenzielles Wiederanwachsen der Segetalpflanzen induzieren können.

### 3.11.2 Bekämpfungserfolg

Der Bekämpfungserfolg wurde durch das Fotografieren der Referenzparzellen und anschließender Bildanalyse am Computer ermittelt. Die Angabe in Prozent bezieht sich auf die Blattfläche der Segetalpflanzen nach dem Hackdurchgang in Relation zur Blattfläche vor dem Hacken. Je nach Witterung können die Ergebnisse sehr unterschiedlich ausfallen. Daher werden die ermittelten Bekämpfungserfolge an dieser Stelle je Durchgang separat dargestellt und erläutert. Die Arbeitshypothese  $H_A$  lautet, dass sich die einzelnen Varianten der Untersuchungen in ihrem Bekämpfungserfolg nicht unterscheiden. Die zu überprüfende Nullhypothese  $H_0$ , unterstellt einen Einfluss der Varianten auf den BKE.

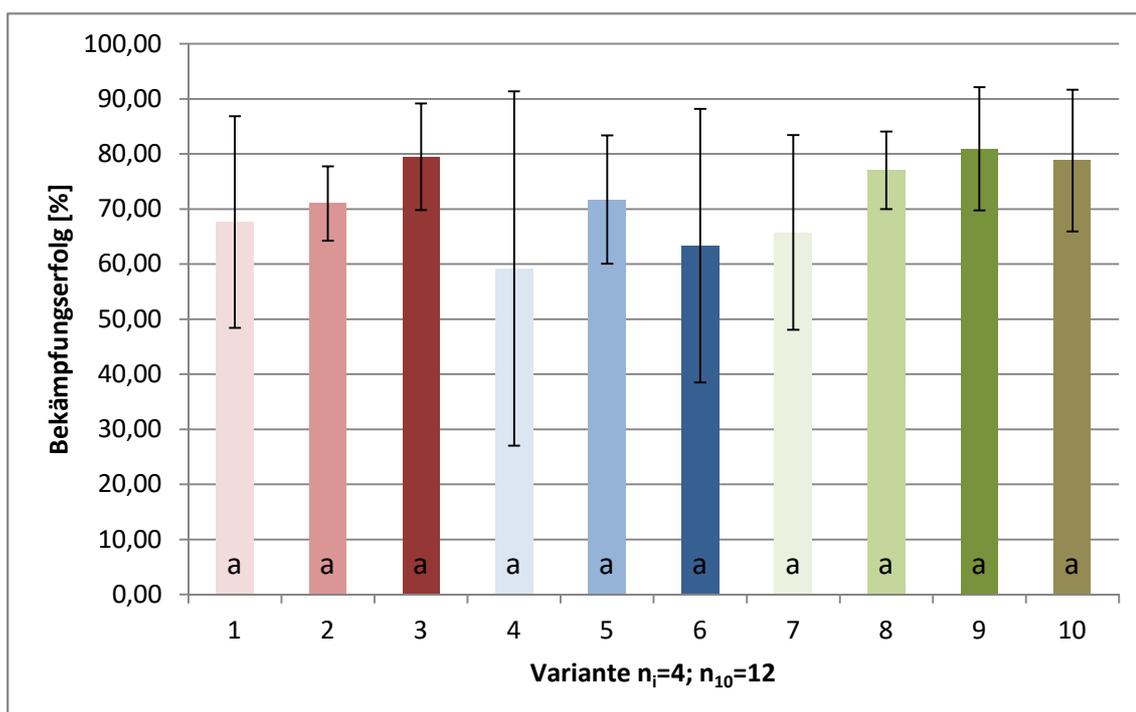
Die Daten des ersten Hackdurchgangs am 14. Juni 2014 wurden zunächst auf Normalverteilung und Varianzhomogenität überprüft. Der durchgeführte Shapiro Wilk Test bestätigte eine Normalverteilung der Daten (Datensammlung siehe Anhang). Der Levene Test bestätigte die Varianzhomogenität. Nachfolgend konnte somit eine einfaktorielle Varianzanalyse durchgeführt werden. Diese wies auf dem Signifikanzniveau von  $\alpha = 5\%$  keine signifikanten Unterschiede zwischen den einzelnen Varianten aus, weshalb die Nullhypothese abgelehnt wird (Abb. 47).



**Abb. 47:** Bekämpfungserfolg der Segetalpflanzen [%] in Abhängigkeit von der Variante; Hackdurchgang am 14.06.2014 in Kürbis (a, b: Varianten mit unterschiedlichen Buchstaben sind statistisch unterscheidbar, Mittelwertvergleich nach Tukey, Irrtumswahrscheinlichkeit 5%; Fehlerindikatoren geben die Standardabweichung an)

Der Bekämpfungserfolg lag im Schnitt aller Varianten bei 71 %, nach dem ersten Hackdurchgang. Im Gegensatz zur üblichen Darstellung der Standardabweichung beschreiben die Fehlerindikatoren die tatsächlich gemessenen Extrempunkte. Dies erlaubt eine realistische Beurteilung der einzelnen Steuerungsarten.

Die Daten des zweiten Hackdurchgangs waren ebenfalls normalverteilt und varianzhomogen. Die nachfolgende einfaktorielle Varianzanalyse ermittelte keine signifikanten Mittelwertunterschiede auf  $\alpha = 5 \%$  (Abb. 48).

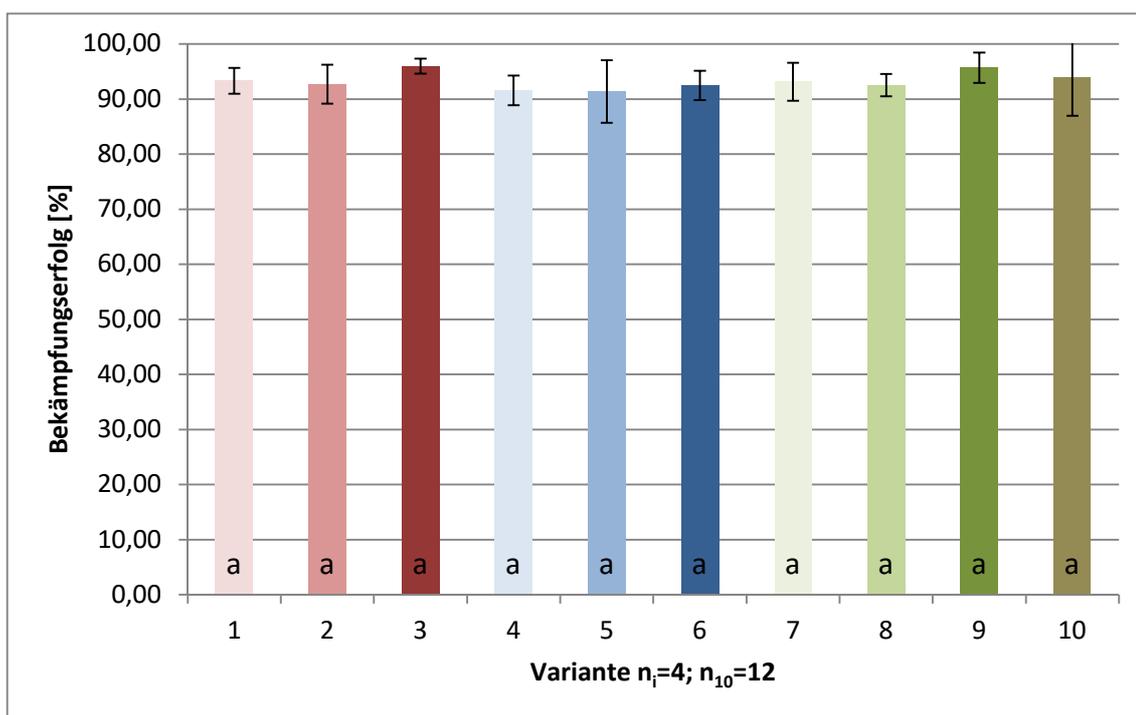


**Abb. 48:** Bekämpfungserfolg der Segetalpflanzen [%] in Abhängigkeit von der Variante; Hackdurchgang am 18.06.2014 in Kürbis (a, b: Varianten mit unterschiedlichen Buchstaben sind statistisch unterscheidbar, Mittelwertvergleich nach Tukey, Irrtumswahrscheinlichkeit 5%; Fehlerindikatoren geben die Standardabweichung an)

Der durchschnittliche Bekämpfungserfolg lag bei 72 %, im Schnitt aller Varianten. Die Nullhypothese ist somit zu verwerfen.

Für die Beurteilung des Bekämpfungserfolgs ist es notwendig die einzelnen Hackdurchgänge separat zu betrachten. Aus praktischer Sicht ist jedoch von Interesse, wie groß der Segetalpflanzenbesatz noch ist und wie stark dieser ausgehend von der Grundsituation

reduziert werden konnte. Um eine ganzheitliche Beurteilung zu ermöglichen, wurden die Daten vor dem ersten Hackdurchgang mit den Daten nach dem zweiten Hackdurchgang verglichen. Somit konnte der gesamte Bekämpfungserfolg dargestellt werden. Der durchgeführte Shapiro Wilk Test zeigte keine Normalverteilung der Daten. Aus diesem Grund musste von der mehrfaktoriellen Varianzanalyse Abstand genommen und ein parameterfreier Test durchgeführt werden. Der durchgeführte Kruskal Wallis Test konnte keine signifikanten Mittelwertunterschiede auf  $\alpha = 5 \%$  offen legen (Abb. 49).

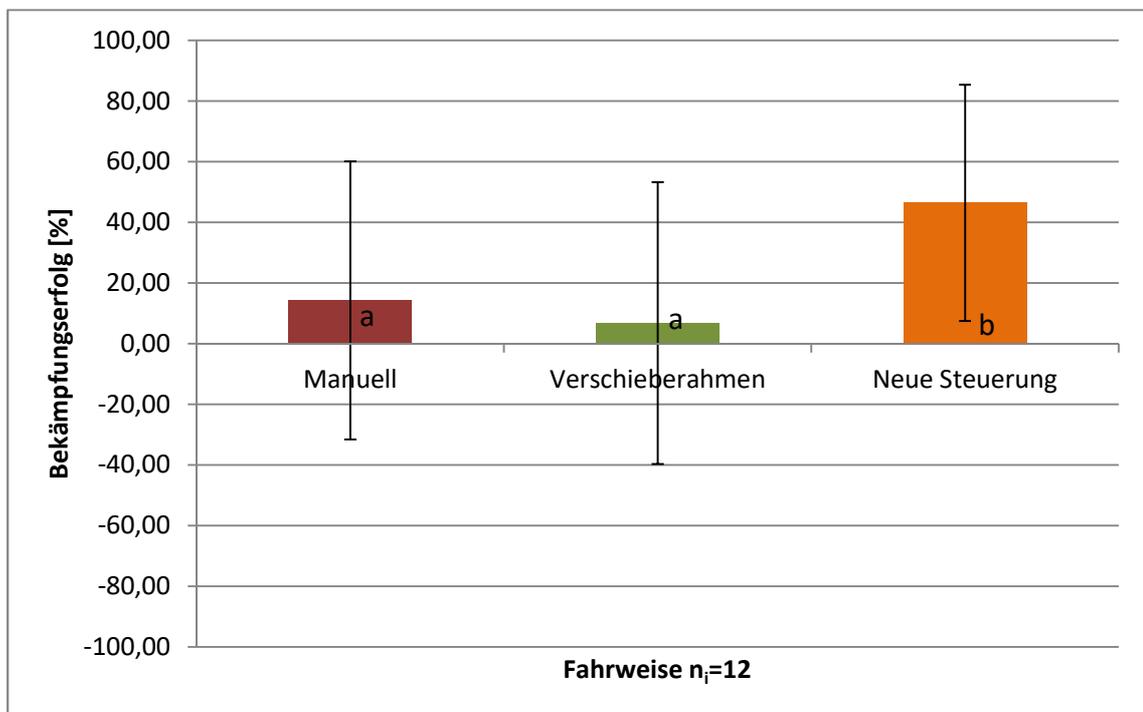


**Abb. 49:** Bekämpfungserfolg der Segetalpflanzen [%] in Abhängigkeit von der Variante; gemessen am 14.06.2014 und 22.06.2014 in Kürbis (a, b: Varianten mit unterschiedlichen Buchstaben sind statistisch unterscheidbar, Mittelwertvergleich nach Kruskal Wallis, Irrtumswahrscheinlichkeit 5%; Fehlerindikatoren geben die Standardabweichung an)

Der durchschnittliche Bekämpfungserfolg lag im Schnitt aller Varianten bei 93 %. Dieser Wert sagt somit aus, dass vom bestehenden Segetalpflanzenbesatz fast alle Pflanzen reguliert werden konnten.

Die Daten aus dem Jahr 2015 wiesen auf Grund der Änderung des Untersuchungsplans nur drei Varianten auf (s. Kapitel 3.6). Diese unterschieden sich lediglich in der Fahrweise. Der Datensatz des ersten Hackdurchgangs am 31.05.2015 war nach dem Shapiro Wilk Test nicht

normal verteilt. Aus diesem Grund musste ein Kruskal Wallis Test durchgeführt werden. Dieser brachte zum Vorschein, dass sich mindestens zwei der drei Varianten unterscheiden. Um herauszufinden, welche Varianten dies sind, wurde ein parameterfreier Wilcoxon Test für gepaarte Mittelwertvergleiche durchgeführt. Da maximal die Hälfte der Variantenzahl an gepaarten Tests durchgeführt werden darf (in diesem Fall 1,5) wurde nach Sichtung der Mittelwerte die Variante „Manuell“ mit der Variante „Verschieberahmen“ verglichen, da diese beiden Mittelwerte die optisch kleinste Differenz aufwiesen. Der Wilcoxon Test brachte zum Vorschein, dass unter dem Signifikanzniveau  $\alpha = 5\%$  kein Mittelwertunterschied zwischen diesen beiden Varianten vorliegt. Auf Grundlage dieses Ergebnisses muss im Umkehrschluss davon ausgegangen werden, dass sich der Mittelwert der Variante „Neue Steuerung“ von den anderen beiden unterscheidet (Abb. 50).

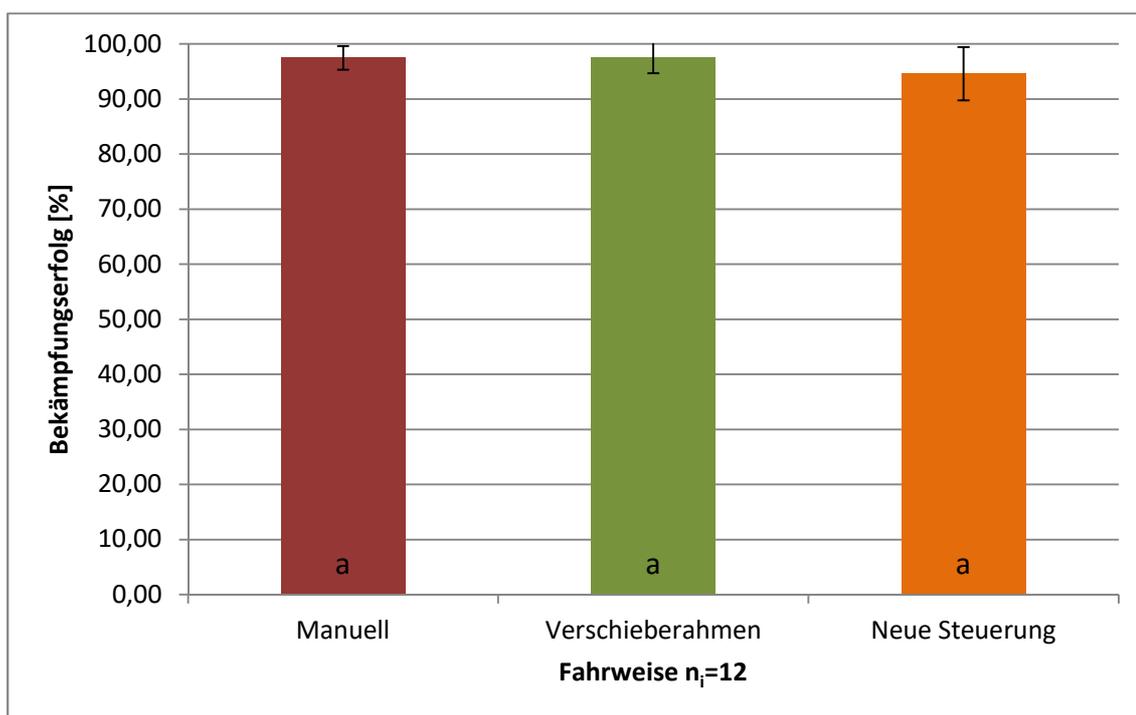


**Abb. 50:** Bekämpfungserfolg der Segetalpflanzen [%] in Abhängigkeit von der Fahrweise; Hackdurchgang am 31.05.2015 in Kürbis (a, b: Varianten mit unterschiedlichen Buchstaben sind statistisch unterscheidbar, Mittelwertvergleich nach Wilcoxon, Irrtumswahrscheinlichkeit 5%; Fehlerindikatoren geben die Standardabweichung an)

Der durchschnittliche Bekämpfungserfolg der drei Varianten lag nach dem ersten Hackdurchgang bei ca. 23 %. Anhand der Extrempunkte wird deutlich, dass teilweise ein

negativer Bekämpfungserfolg ermittelt wurde. Dies bedeutet die Blattoberfläche der Segetalpflanzen hat teilweise um mehr als 100 % zugenommen bzw. die Pflanzen sind weitergewachsen. Auf Grundlage des nachfolgenden Niederschlags kann das Ergebnis nicht korrekt gedeutet werden. Der Datensatz ist deshalb zunächst als Ausreißer zu werten.

Die Daten des zweiten Hackdurchgangs waren nicht normalverteilt, weshalb ein Kruskal Wallis Test durchgeführt wurde. Dieser zeigte auf dem Signifikanzniveau  $\alpha$  keine Mittelwertunterschiede zwischen den Varianten (Abb. 51).

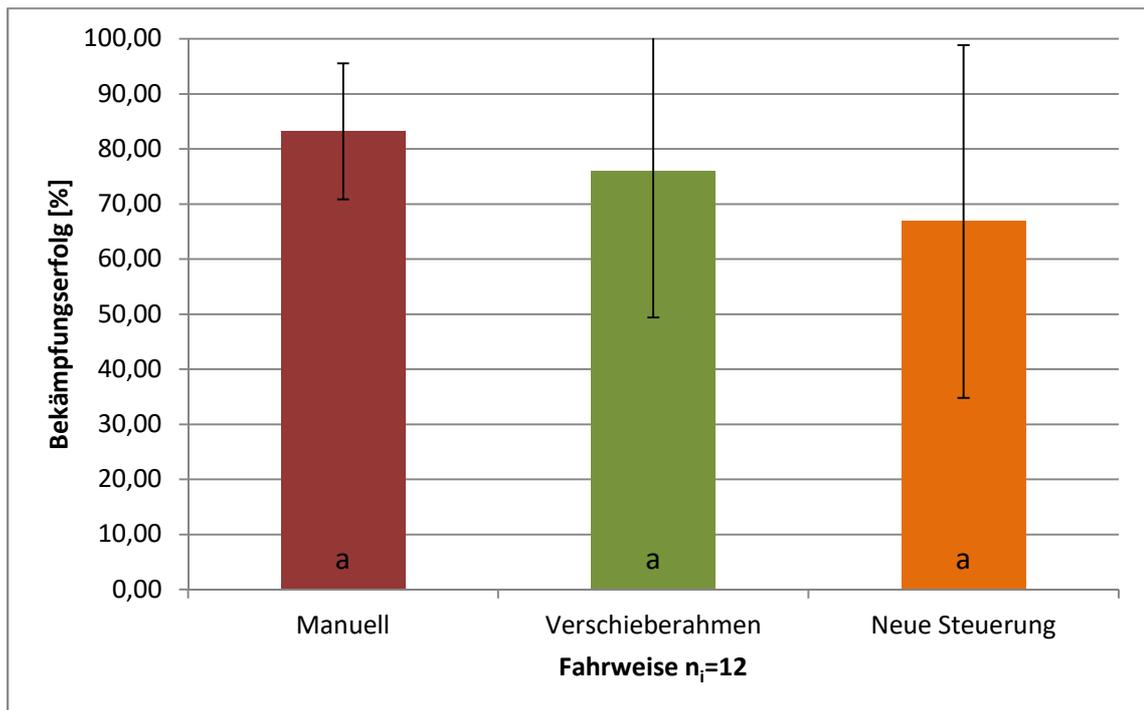


**Abb. 51:** Bekämpfungserfolg der Segetalpflanzen [%] in Abhängigkeit von der Fahrweise; Hackdurchgang am 11.06.2015 in Kürbis (a, b: Varianten mit unterschiedlichen Buchstaben sind statistisch unterscheidbar, Mittelwertvergleich nach Kruskal Wallis, Irrtumswahrscheinlichkeit 5%; Fehlerindikatoren geben die Standardabweichung an)

Der zweite Durchgang konnte das Ergebnis der ersten Hackarbeit verbessern. So wurden durchschnittlich 97 % der Segetalpflanzen reguliert. Ebenso war die Streuung der Daten mit ca. 10 % sehr gering.

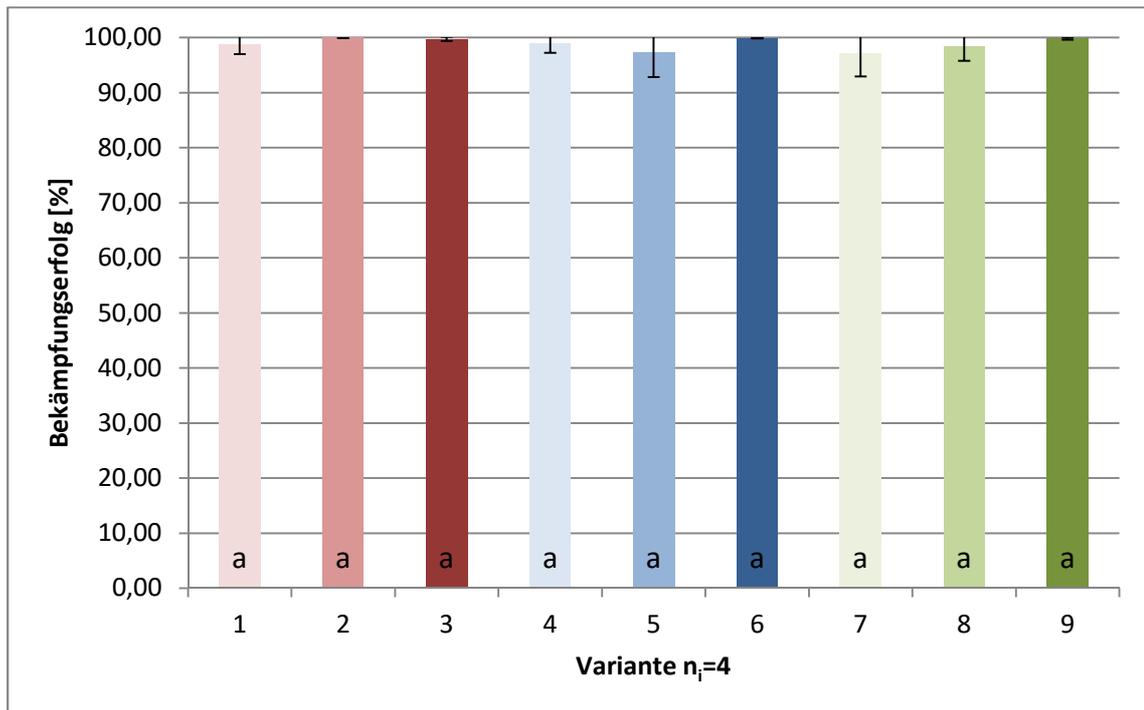
Die kumulierten Daten zeigten ebenfalls keine Normalverteilung. Auch konnten keine Mittelwertunterschiede nach Kruskal Wallis festgestellt werden (Abb. 52).

Der Bekämpfungserfolg lag im Durchschnitt bei 75 %.



**Abb. 52:** Bekämpfungserfolg der Segetalpflanzen [%] in Abhängigkeit von der Fahrweise; gemessen am 31.05.2015 und 21.06.2015 in Kürbis (a, b: Varianten mit unterschiedlichen Buchstaben sind statistisch unterscheidbar, Mittelwertvergleich nach Kruskal Wallis, Irrtumswahrscheinlichkeit 5%; Fehlerindikatoren geben die Standardabweichung an)

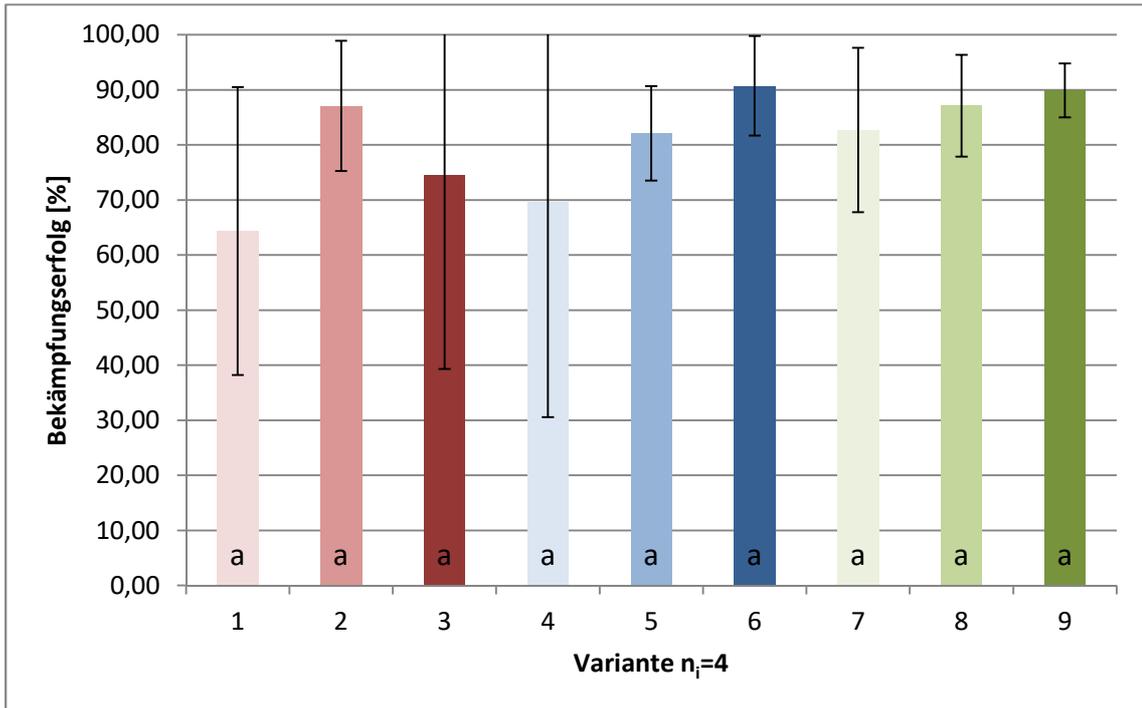
Gleich dem Versuchsjahr 2014 wurden auch bei der Untersuchung 2016 zwei Faktoren berücksichtigt. Neben der Fahrweise sollte auch hier der Einfluss der Fahrgeschwindigkeit überprüft werden. Die Daten des ersten Hackdurchgangs am 21.05.2016 wurden zunächst auf Normalverteilung und Varianzhomogenität geprüft. Nachdem die Daten keiner Normalverteilung unterlagen, musste mit nichtparametrischen Tests weitergearbeitet werden. Der durchgeführte Kruskal Wallis Test zeigte dabei keinen signifikanten Mittelwertunterschied zwischen den einzelnen Varianten auf dem Signifikanzniveau  $\alpha = 5 \%$  (Abb. 53).



**Abb. 53:** Bekämpfungserfolg der Segetalpflanzen [%] in Abhängigkeit von der Variante; Hackdurchgang am 21.05.2016 in Kürbis (a, b: Varianten mit unterschiedlichen Buchstaben sind statistisch unterscheidbar, Mittelwertvergleich nach Kruskal Wallis, Irrtumswahrscheinlichkeit 5%; Fehlerindikatoren geben die Standardabweichung an)

Der Bekämpfungserfolg des ersten Hackdurchgangs lag im Schnitt der einzelnen Varianten bei knapp 99 %. In der mechanischen Segetalpflanzenregulierung ist dies ein sehr gutes Ergebnis, da lediglich eine von einhundert Segetalpflanzen nicht erfolgreich reguliert wurde.

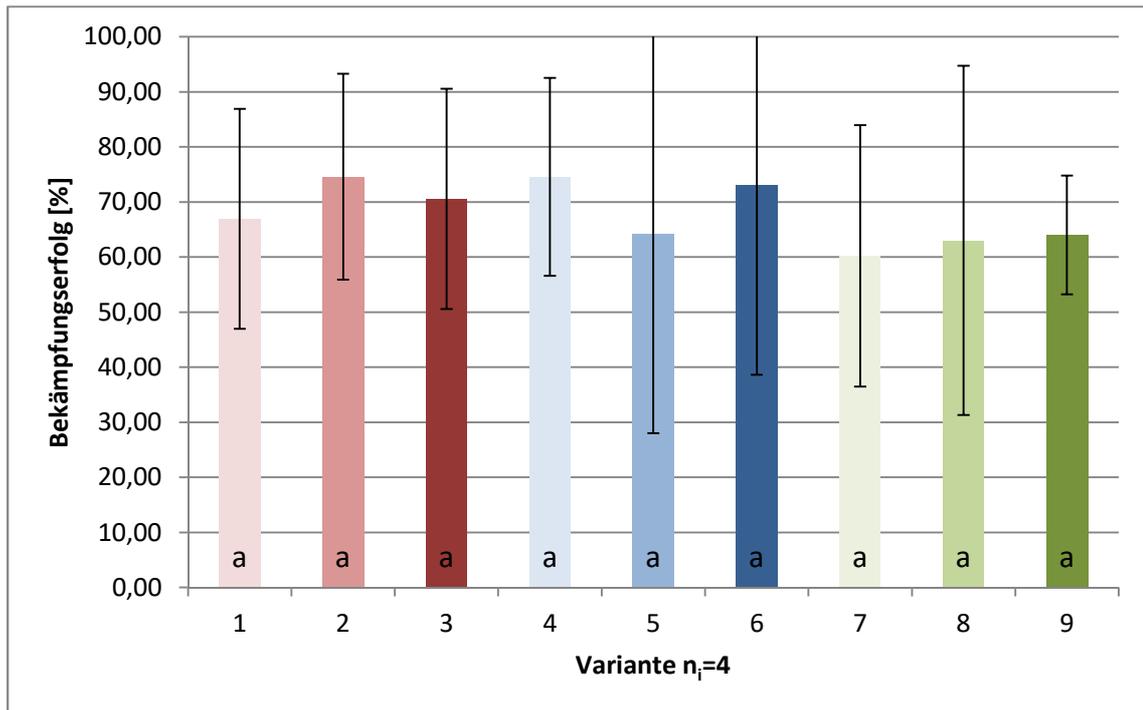
Der zweite Hackdurchgang erfolgte am 11.06.2016. Der durchgeführte Shapiro Wilk Test bestätigte keine Normalverteilung der Daten. Nachfolgend wurde deshalb ein Kruskal Wallis Test durchgeführt, der keinen signifikanten Mittelwertunterschied der einzelnen Varianten berechnete (Abb. 54).



**Abb. 54:** Bekämpfungserfolg der Segetalpflanzen [%] in Abhängigkeit von der Variante; Hackdurchgang am 26.05.2016 in Kürbis (a, b: Varianten mit unterschiedlichen Buchstaben sind statistisch unterscheidbar, Mittelwertvergleich nach Kruskal Wallis, Irrtumswahrscheinlichkeit 5%; Fehlerindikatoren geben die Standardabweichung an)

Der durchschnittliche Regulierungserfolg lag bei ca. 81 %.

Ausgehend vom Grundbesatz der Segetalpflanzen und dem finalen Bestand wurde der kumulierte BKE ermittelt. Die Prüfung auf Normalverteilung und auf Varianzhomogenität ergaben jeweils die Voraussetzungen für die durchgeführte einfaktorielle Varianzanalyse. Diese bestätigte auf dem Signifikanzniveau  $\alpha = 5 \%$  keinen signifikanten Mittelwertunterschied (Abb. 55).



**Abb. 55:** Bekämpfungserfolg der Segetalpflanzen [%] in Abhängigkeit von der Variante; gemessen am 21.05.2016 und 13.06.2016 in Kürbis (a, b: Varianten mit unterschiedlichen Buchstaben sind statistisch unterscheidbar, Mittelwertvergleich nach Kruskal Wallis, Irrtumswahrscheinlichkeit 5%; Fehlerindikatoren geben die Standardabweichung an)

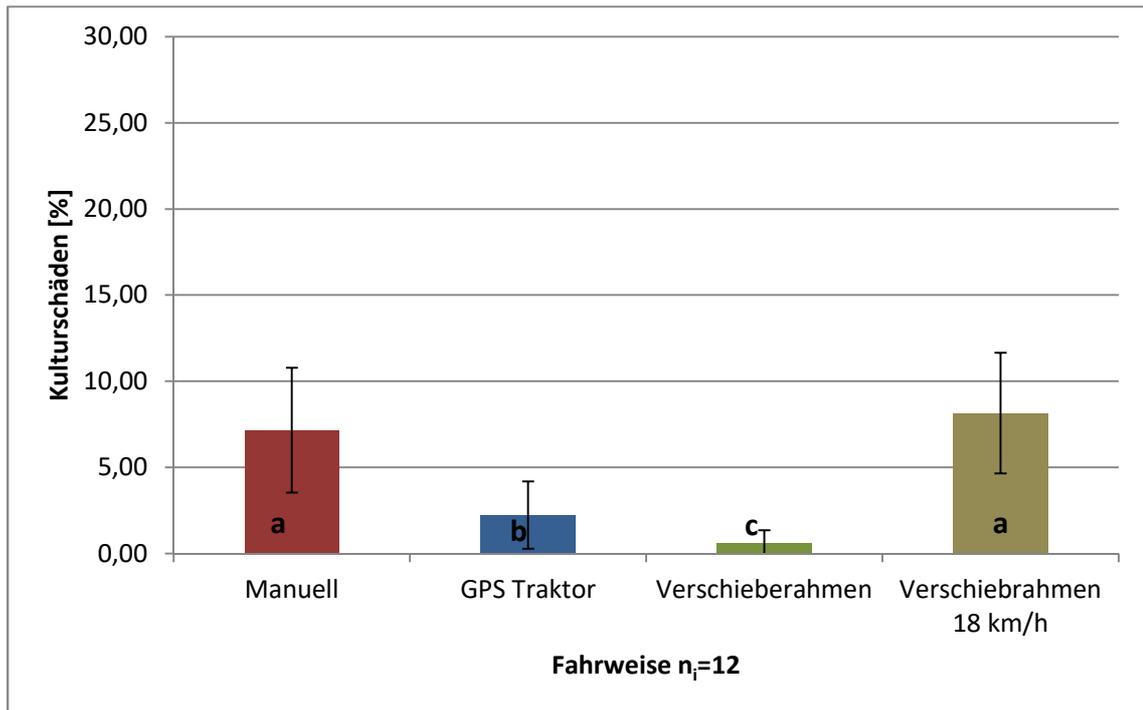
Der durchschnittliche Bekämpfungserfolg lag bei knapp 68 %. Teilweise streuten Werte sehr stark. Der Bedeckungsgrad der Segetalpflanzen war nach dem zweiten Hackdurchgang so groß wie vor den Behandlungen. Die Zunahme der Segetalpflanzen zwischen den Dokumentationsterminen am 26.05.2016 und am 07.06.2016 muss daher sehr groß gewesen sein, da der Regulierungserfolg nach der ersten Maßnahme bei nahezu 100 % lag.

Ziel der Datenanalyse war die Überprüfung der Nullhypothese  $H_0$ , die einen Einfluss der Varianten auf den BKE unterstellte. Die Daten der einzelnen Versuchsjahre unterscheiden sich hinsichtlich ihres Ergebnisses nicht voneinander. Einzig der erste Hackdurchgang im Jahr 2015 wird als Ausreißer identifiziert. So konnten keine signifikanten Mittelwertunterschiede der einzelnen Varianten festgestellt werden, weshalb die Nullhypothese anhand der vorliegenden Stichproben abgelehnt wird. Die Irrtumswahrscheinlichkeit entspricht dem Signifikanzniveau  $\alpha = 5 \%$ . Die Art der Ansteuerung hat somit keinen Einfluss auf den Bekämpfungserfolg.

### 3.11.3 Kulturschäden

Die Kulturschäden wurden durch die Zählung der verwelkten und damit beschädigten Kulturpflanzen nach dem Hackdurchgang ermittelt. Die ermittelten Werte wurden in Relation zu einem idealen Bestand gesetzt (s. Kapitel 3.1.6). Dieser berücksichtigt die Keimfähigkeit des Saatgutes. Je nach Jahr und Witterung liegt die Keimfähigkeit in Kürbis bei 95 bis 99 %. Da die neue Steuerung im ersten Untersuchungsjahr noch nicht zur Verfügung stand, war das Ziel die Genauigkeit des neuen Herstellers zu prüfen. Die Arbeitshypothese  $H_A$  lautet in Anlehnung an die Ergebnisse 2013 (HEGE 2013), dass der Verschieberahmen eine höhere Genauigkeit wie die ausschließliche Steuerung des Traktors bietet. Die Nullhypothese  $H_0$  unterstellt somit keinen Unterschied in der Genauigkeit beider Systeme, die sich in einem identischen Schädigungsgrad der Kulturpflanzen widerspiegelt. Zur Überprüfung dieser Hypothese wurden die Varianten nach dem Faktor „Fahrweise“ zusammengefasst. Sollte diese Zusammenfassung kein eindeutiges Ergebnis aufzeigen, sollte eine nachfolgende Einzelanalyse der Varianten erfolgen.

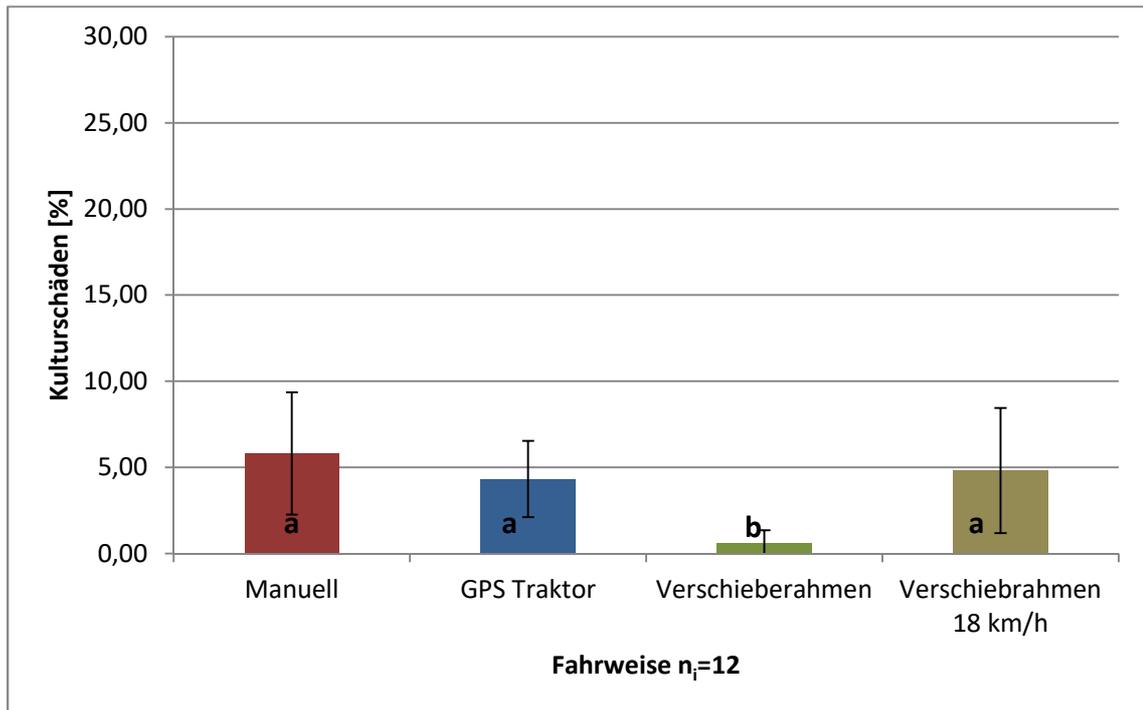
Die Daten des ersten Hackdurchgangs am 14.06.2014 zeigten keine Normalverteilung der Daten. Der nachfolgende parameterfreie Kruskal Wallis Test zeigte jedoch mindestens einen Mittelwertunterschied an. Um herauszufinden, welche Varianten sich unterschieden, wurden zwei Wilcoxon Test durchgeführt. Diese zeigten auf dem Signifikanzniveau  $\alpha = 5 \%$  zwei Mittelwertunterschiede an (Abb. 56).



**Abb. 56:** Kulturschäden [%] in Abhängigkeit von der Fahrweise; Hackdurchgang am 14.06.2014 in Kürbis (a, b: Varianten mit unterschiedlichen Buchstaben sind statistisch unterscheidbar, Mittelwertvergleich nach Wilcoxon, Irrtumswahrscheinlichkeit 5%; Fehlerindikatoren geben die Standardabweichung an)

So unterscheidet sich die „manuelle“ Fahrweise, mit durchschnittlich 7 % Kulturschäden, von der Fahrweise „GPS Traktor“, mit durchschnittlichen Kulturschäden von 2 %. Diese Fahrweise unterscheidet sich signifikant von der Fahrweise „Verschieberahmen“ mit unter 1 % Kulturschäden. Die Fahrweise „Verschieberahmen 18 km·h<sup>-1</sup>“ konnte mittels Wilcoxon Test nicht mehr überprüft werden. Da die durchschnittlichen Kulturschäden bei dieser Fahrweise mit 8 % ausgewiesen wurden, liegt sie im Bereich der manuellen Fahrweise. Die Fehlerindikatoren weisen die jeweils reell gemessenen Extremwerte aus, um die Kulturschäden aus praktischer Sichtweise besser bewerten zu können.

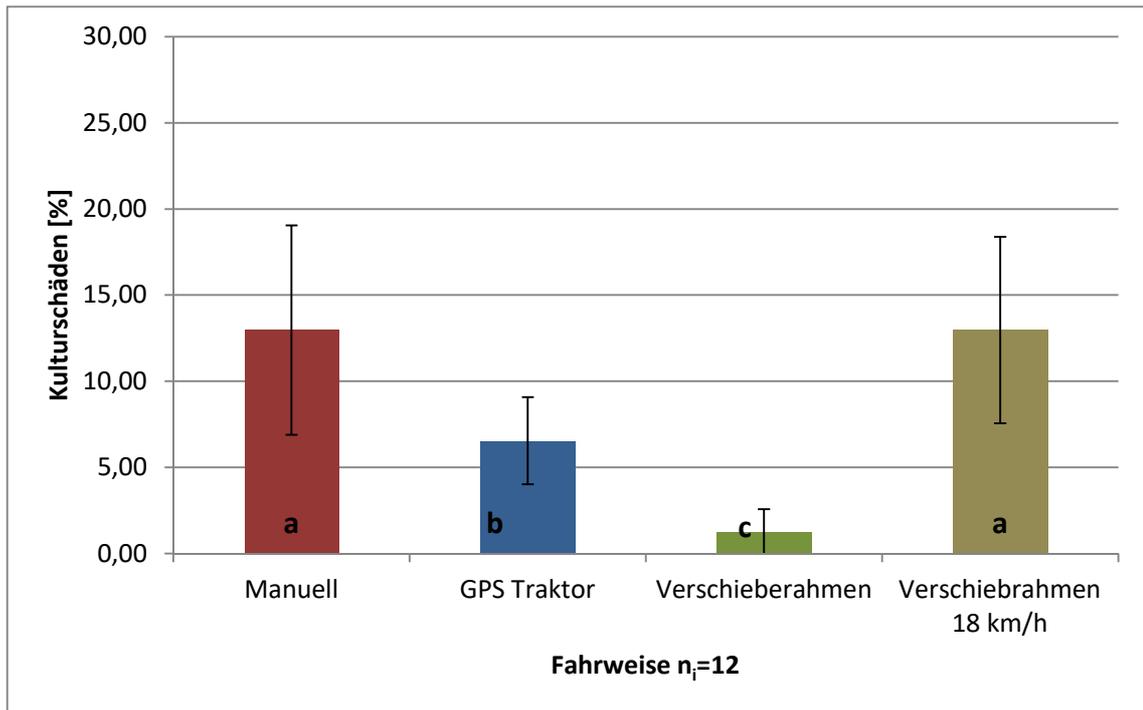
Die Daten des zweiten Hackdurchgangs am 18.06.2014 wiesen ebenfalls keine Normalverteilung aus. Nachfolgende wurden deshalb ein Kruskal Wallis und zwei Wilcoxon Tests durchgeführt. Diese wiesen einen signifikanten Mittelwertunterschied ( $\alpha = 5 \%$ ) zwischen der Fahrweise „GPS Traktor“ und der Fahrweise „Verschieberahmen“ aus (Abb. 57).



**Abb. 57:** Kulturschäden [%] in Abhängigkeit von der Fahrweise; Hackdurchgang am 18.06.2014 in Kürbis (a, b: Varianten mit unterschiedlichen Buchstaben sind statistisch unterscheidbar, Mittelwertvergleich nach Kruskal Wallis, Irrtumswahrscheinlichkeit 5%; Fehlerindikatoren geben die Standardabweichung an)

Die durchschnittlichen Kulturschäden lagen bei knapp 6 % für die „manuelle“ Fahrweise, bei 4 % für die Fahrweise „GPS Traktor“ und bei knapp 5 % für die Fahrweise „Verschieberahmen 18 km·h<sup>-1</sup>.“ Diese Mittelwerte unterschieden sich signifikant vom durchschnittlichen Kulturschaden der Fahrweise „Verschieberahmen“, der bei unter einem Prozent lag.

Um die Gesamtschäden der Hackdurchgänge beurteilen zu können, wurden die Schäden beider Durchgänge aufsummiert und ebenfalls analysiert. Da die Daten keiner Normalverteilung unterlagen, wurde eine Kruskal Wallis Test durchgeführt. Zwei nachfolgende Wilcoxon Tests bestätigten signifikante Mittelwertunterschiede (Abb. 58).



**Abb. 58:** Kumulierte Kulturschäden [%] in Abhängigkeit von der Fahrweise; gemessen am 14.06.2014 und 18.06.2014 in Kürbis (a, b: Varianten mit unterschiedlichen Buchstaben sind statistisch unterscheidbar, Mittelwertvergleich nach Wilcoxon, Irrtumswahrscheinlichkeit 5%; Fehlerindikatoren geben die Standardabweichung an)

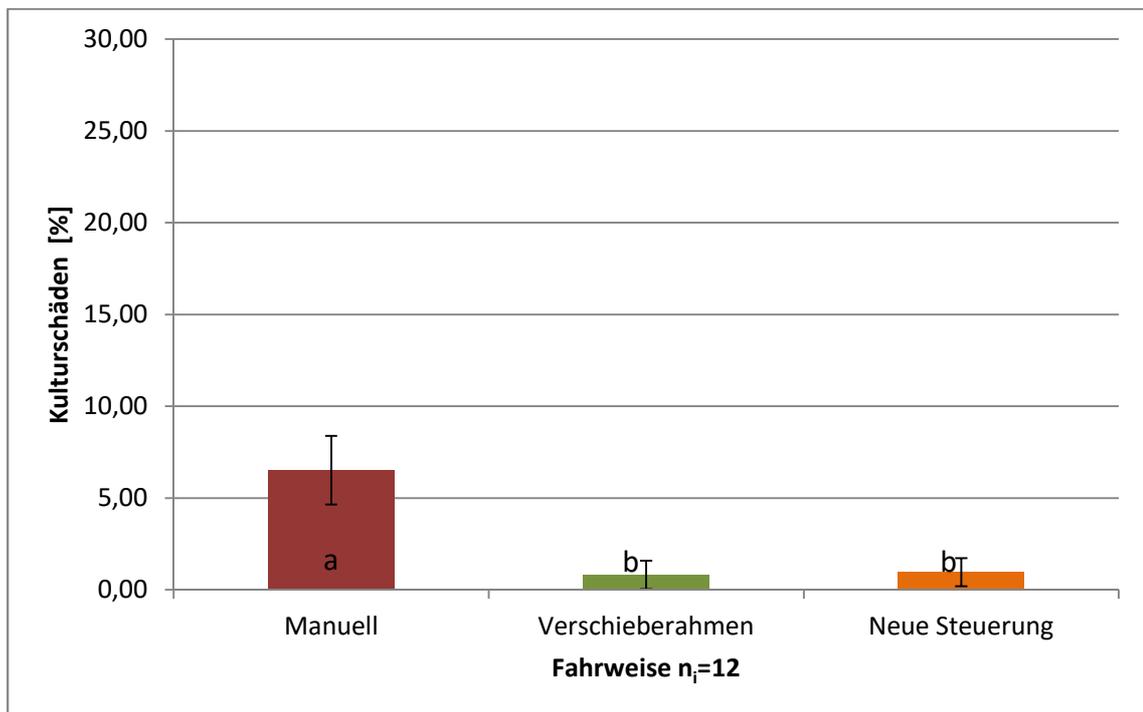
Bei der Betrachtung der kumulierten Kulturschäden unterschieden sich die Fahrweise „GPS Traktor“, mit durchschnittlichen Kulturschäden von 6,5 %, von der „manuellen“ Fahrweise mit knapp 13 % Kulturschäden. Die niedrigsten Kulturschäden mit durchschnittlich knapp über einem Prozent waren in der Fahrweise „Verschiebrahmen“ zu verzeichnen, die sich ebenfalls von den beiden anderen Fahrweisen signifikant unterschied. Die Fahrweise „Verschieberahmen 18 km·h<sup>-1</sup>“ wies mit durchschnittlich knapp 13 % Kulturschäden vergleichbare Werte zur manuellen Fahrweise auf.

Auf Grundlage der gewonnen Ergebnisse wird die Nullhypothese verworfen, da die Verschieberahmenteknik eine höhere Genauigkeit wie die ausschließliche Steuerung des Traktors bietet.

Im Versuchsjahr 2015 stand erstmals die neue Steuerung zur Verfügung. Ziel war der Vergleich der neuen Steuerung mit der bisherigen Verschieberahmenteknik. Auf Grundlage

der verwendeten Komponenten wird eine gleiche Genauigkeit beider Verfahren unterstellt. Die Arbeitshypothese  $H_A$  lautet somit, dass die neue Anbaugerätsteuerung eine gleichwertige Genauigkeit wie die bisherige Verschieberahmentechnik bietet. Die Nullhypothese  $H_0$  unterstellt somit einen Unterschied in der Genauigkeit beider Systeme, die sich in einem unterschiedlichen Schädigungsgrad der Kulturpflanzen widerspiegelt. Da im Versuchsjahr 2015 nur eine Fahrgeschwindigkeit gefahren wurde, sollten die Varianten nach dem Faktor „Fahrweise“ zusammengefasst werden.

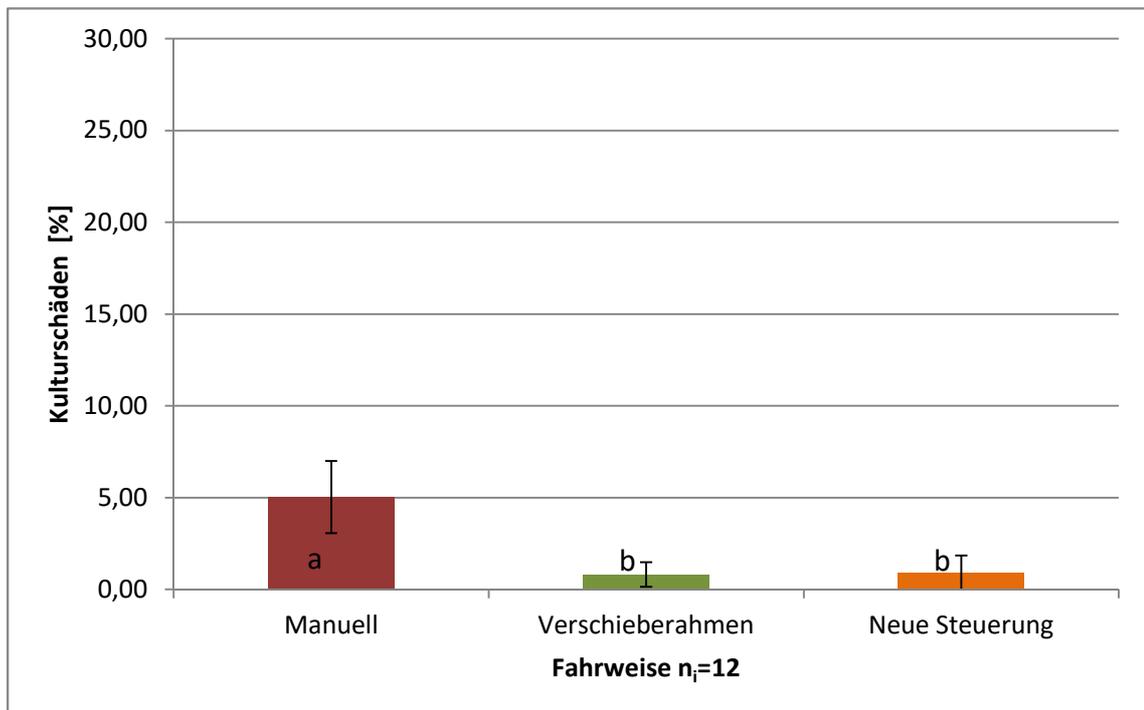
Der erste Hackdurchgang im Jahr 2015 wurde am 31. Mai durchgeführt. Da die Daten keine Normalverteilung aufwiesen, fanden parameterfreie Tests Verwendung. Der Kruskal Wallis Test bestätigte mindestens einen Mittelwertunterschied. Der durchgeführte Wilcoxon Test bestätigte keinen signifikanten Mittelwertunterschied ( $\alpha = 5\%$ ) zwischen der Fahrweise „Verschieberahmen“ und „Neue Steuerung“. Somit müssen sich diese beiden Varianten auf Grundlage des Kruskal Wallis Test von der manuellen Fahrweise signifikante unterscheiden (Abb. 59).



**Abb. 59:** Kulturschäden [%] in Abhängigkeit von der Fahrweise; Hackdurchgang am 31.05.2015 in Kürbis (a, b: Varianten mit unterschiedlichen Buchstaben sind statistisch unterscheidbar, Mittelwertvergleich nach Wilcoxon, Irrtumswahrscheinlichkeit 5%; Fehlerindikatoren geben die Standardabweichung an)

Die durchschnittlichen Kulturschäden lagen mit der „manuellen“ Fahrweise bei 6,5 %, mit der „Verschieberahmenteknik“ bei 0,8 % und mit der neuen Steuerung bei knapp einem Prozent.

Der 2. Hackdurchgang wurde am 03.06.2015 gefahren. Auch in diesem Fall wiesen die Daten keine Normalverteilung aus. Da laut Kruskal Wallis Test jedoch ein Mittelwertunterschied bestand, wurde ein Wilcoxon Test durchgeführt. Dieser wies, ähnlich dem ersten Hackdurchgang, keinen Mittelwertunterschied zwischen Verschieberahmen und neuer Steuerung aus. Aus diesem Grund müssen sich beide Fahrweise von der manuellen Fahrweise auf  $\alpha = 5\%$  signifikant unterscheiden (Abb. 60).

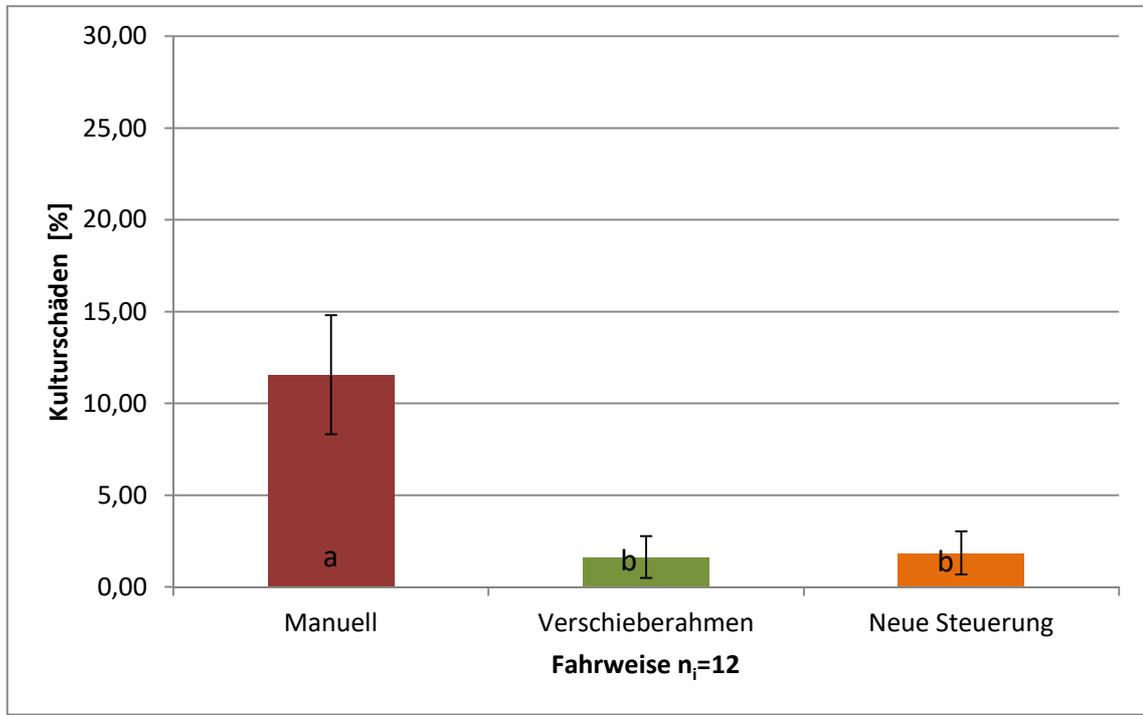


**Abb. 60:** Kulturschäden [%] in Abhängigkeit von der Fahrweise; Hackdurchgang am 11.06.2015 in Kürbis (a, b: Varianten mit unterschiedlichen Buchstaben sind statistisch unterscheidbar, Mittelwertvergleich nach Wilcoxon, Irrtumswahrscheinlichkeit 5%; Fehlerindikatoren geben die Standardabweichung an)

Die durchschnittlichen Kulturschäden lagen für die drei Fahrweisen bei 5 % für die manuelle Fahrweise, bei 0,8 % für den Verschieberahmen und 0,9 % für die neue Steuerung.

Die kumulierten Kulturschäden folgten keiner Normalverteilung. Somit folgten parameterfreie Tests. Der durchgeführte Wilcoxon Test bestätigte ebenfalls keinen

Unterschied zwischen dem Verschieberahmen und der neuen Steuerung. Dies führt zu einem signifikanten Mittelwertunterschied beider Fahrweise gegenüber der manuellen Fahrweise (Abb. 61).

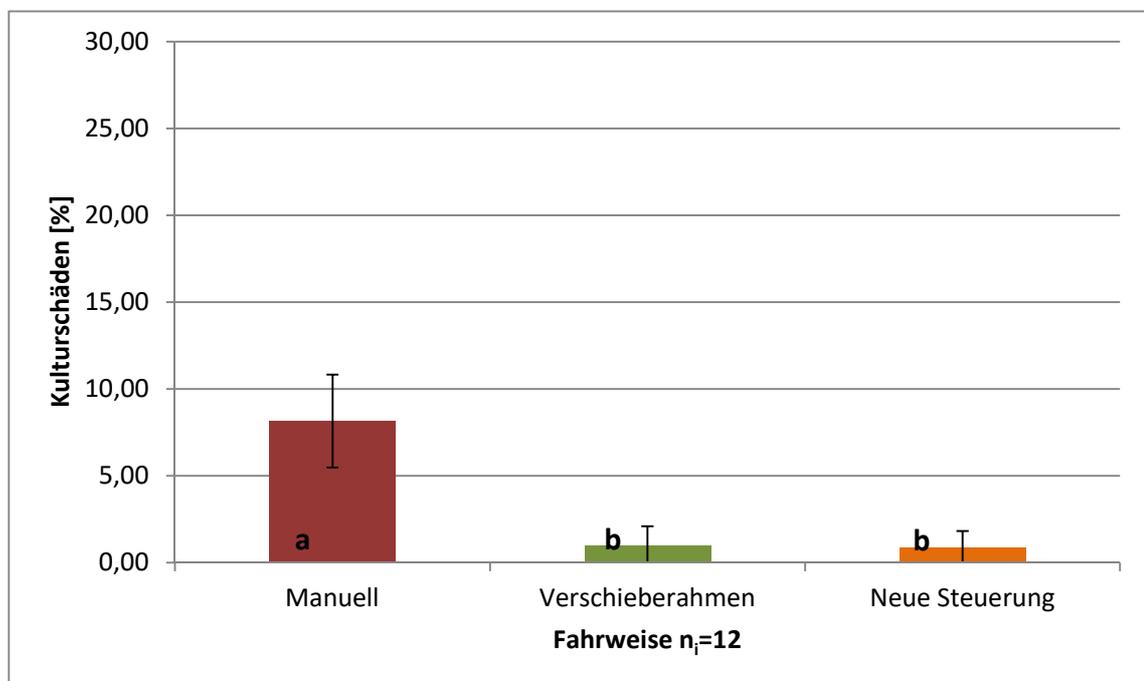


**Abb. 61:** Kumulierte Kulturschäden [%] in Abhängigkeit von der Fahrweise; gemessen am 31.05.2015 und 11.06.2015 in Kürbis (a, b: Varianten mit unterschiedlichen Buchstaben sind statistisch unterscheidbar, Mittelwertvergleich nach Wilcoxon, Irrtumswahrscheinlichkeit 5%; Fehlerindikatoren geben die Standardabweichung an)

Die durchschnittlichen Kulturschäden lagen mit manueller Fahrweise bei knapp 12 %. Der Verschieberahmen verursachte ebenso wie die neue Steuerung durchschnittliche Kulturschäden von knapp 2 %.

Die Nullhypothese  $H_0$ , die einen Unterschied im Schädigungsgrad der Kulturpflanzen zwischen der bisherigen und der neuen Steuerungstechnik unterstellt, kann mit einer Irrtumswahrscheinlichkeit von 5 % verworfen werden. Um diese Aussage jedoch weiter zu festigen, sollte die Hypothese im Untersuchungsjahr 2016 nochmals überprüft werden. Im Gegensatz zum Untersuchungsjahr 2015 konnten im Jahr 2016 unterschiedliche Geschwindigkeiten gefahren und die mehrfaktorielle Versuchsanstellung wie geplant durchgeführt werden. Zur Überprüfung der Nullhypothese wurden die Daten entsprechend des

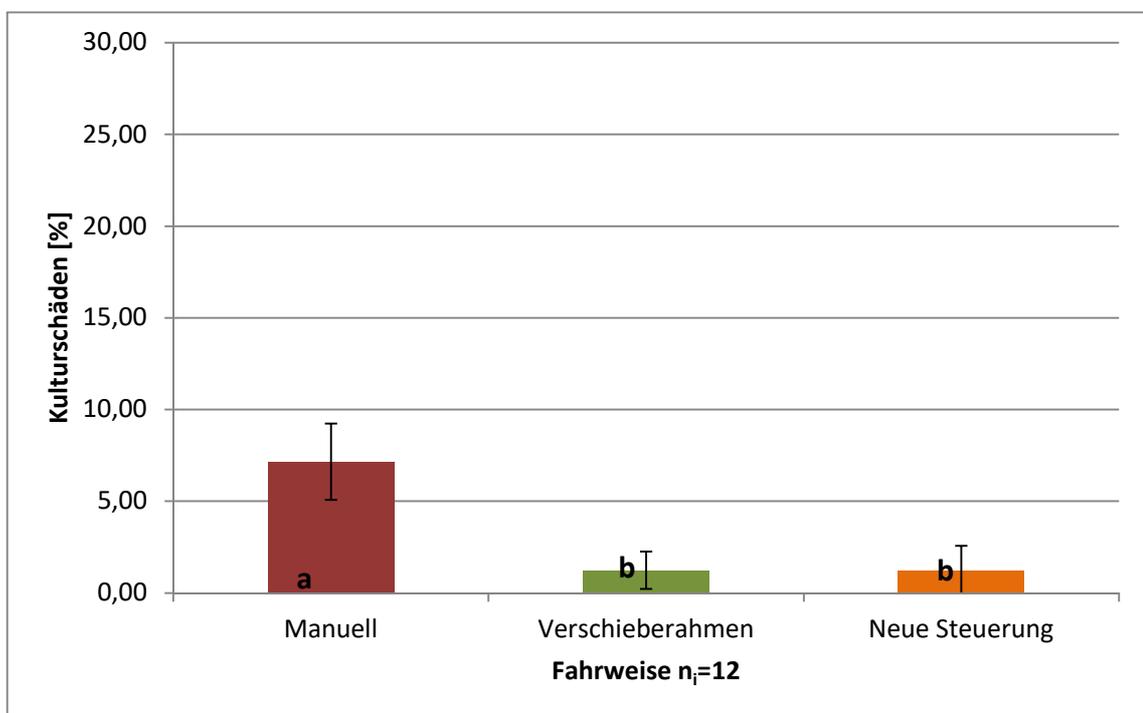
Faktors „Fahrweise“ zusammengefasst. Sollte sich an Hand dieses Faktors kein eindeutiges Ergebnis zeigen, soll die Überprüfung in den einzelnen Varianten fortgeführt werden. Der erste Hackdurchgang 2016 wurde am 21.05. durchgeführt. Die Überprüfung der Daten auf Normalverteilung und Varianzhomogenität erfolgte mittels Shapiro Wilk und Levene Test. Da die Annahme der Normalverteilung verworfen werden musste, wurde mit parameterfreien Tests weiter gearbeitet. Der durchgeführte Kruskal Wallis Test bestätigte einen signifikanten Mittelwertunterschied von mindestens zwei Varianten. Um die entsprechenden Varianten zu identifizieren, wurde ein Wilcoxon Test durchgeführt. Dieser bestätigte keinen signifikanten Mittelwertunterschied zwischen dem Verschieberahmen und der neuen Steuerung. Somit müssen sich diese beiden Varianten von der manuellen Fahrweise unterscheiden (Abb. 62).



**Abb. 62:** Kulturschäden [%] in Abhängigkeit von der Fahrweise; Hackdurchgang am 21.05.2016 in Kürbis (a, b: Varianten mit unterschiedlichen Buchstaben sind statistisch unterscheidbar, Mittelwertvergleich nach Wilcoxon, Irrtumswahrscheinlichkeit 5%; Fehlerindikatoren geben die Standardabweichung an)

Im Mittel lagen die Kulturschäden der „manuellen“ Fahrweise bei ca. 8 %. Deutlich darunter lagen die Schäden bei der Fahrweise mit „Verschieberahmen“. Hier beschädigte die Hacke knapp 1 % der Pflanzen. Die „neue Steuerung“ verursachte knapp 0,9 % Kulturschäden.

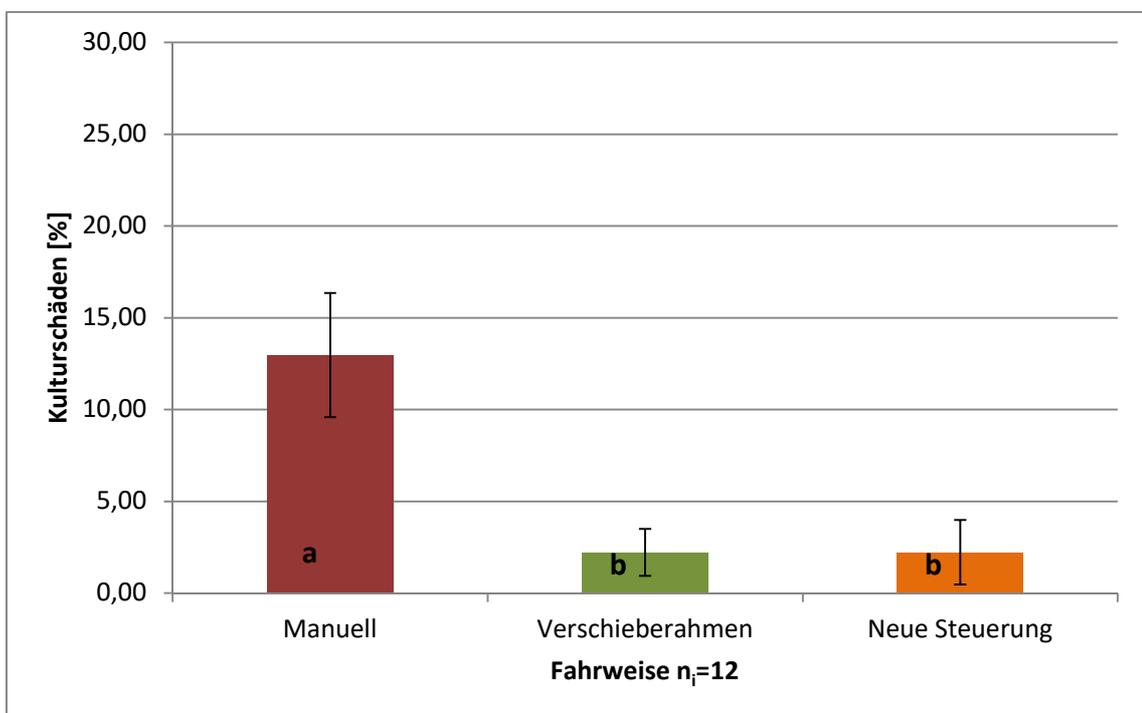
Der zweite Hackdurchgang im Jahr 2016 erfolgte am 11.06. Die Daten wurden auf Normalverteilung und Varianzhomogenität untersucht. Der Shapiro Wilk Test führte zur Verwerfung der Annahme einer Normalverteilung, weshalb mit parameterfreien Tests weiteranalysiert werden musste. Der durchgeführte Kruskal Wallis Test bestätigte einen signifikanten Mittelwertunterschied von mindestens zwei Varianten. Somit wurden die Fahrweise „Verschieberahmen“ und „Neue Steuerung“ mit einem Wilcoxon Test für gepaarte Mittelwertvergleiche überprüft. Dieser bestätigte keinen signifikanten Mittelwertunterschied zwischen beiden Fahrweisen. Beide Fahrweisen müssen sich also signifikant von der manuellen Fahrweise unterscheiden (Abb. 63).



**Abb. 63:** Kulturschäden [%] in Abhängigkeit von der Fahrweise; Hackdurchgang am 26.05.2016 in Kürbis (a, b: Varianten mit unterschiedlichen Buchstaben sind statistisch unterscheidbar, Mittelwertvergleich nach Wilcoxon, Irrtumswahrscheinlichkeit 5%; Fehlerindikatoren geben die Standardabweichung an)

Die durchschnittlichen Kulturschäden betragen bei der Fahrweise „Manuell“ ca. 7 %. Die Fahrweise „Verschieberahmen“ und „Neue Steuerung“ verursachten jeweils ca. 1 % Kulturschäden.

Entsprechend der beiden vorangegangenen Untersuchungsjahre wurden die Ergebnisse beider Hackdurchgänge aufsummiert und analysiert. Die Daten der kumulierten Kulturschäden waren nach durchgeführtem Shapiro Wilk Test jedoch nicht normal verteilt. Eine weitere Analyse der Daten fand daher mit dem Kruskal Wallis Test statt. Dieser bestätigte einen signifikanten Mittelwertunterschied von mindestens zwei Varianten. Die Fahrweise „Verschieberahmen“ wurden mit der Fahrweise „Neue Steuerung“ in einem gepaarten Mittelwertvergleich untersucht. Der durchgeführte Wilcoxon Test bestätigte keinen signifikanten Mittelwertunterschied zwischen beiden Stichproben. Der Mittelwertsunterschied muss daher zur Fahrweise „Manuell“ bestehen (Abb. 64).



**Abb. 64:** Kumulierte Kulturschäden [%] in Abhängigkeit von der Fahrweise; gemessen am 21.05.2016 und 26.05.2016 in Kürbis (a, b: Varianten mit unterschiedlichen Buchstaben sind statistisch unterscheidbar, Mittelwertvergleich nach Wilcoxon, Irrtumswahrscheinlichkeit 5%; Fehlerindikatoren geben die Standardabweichung an)

Insgesamt wurden bei der manuellen Fahrweise knapp 13 % der Kulturpflanzen beschädigt. Bei der Fahrweise „Verschieberahmen“ und „Neue Steuerung“ lagen die Kulturschäden bei knapp über 2 %.

Die Nullhypothese  $H_0$ , die einen Unterschied im Schädigungsgrad der Kulturpflanzen zwischen der bisherigen und der neuen Steuerungstechnik unterstellt, wird verworfen. Die Irrtumswahrscheinlichkeit entspricht dem Signifikanzniveau  $\alpha = 5 \%$ . Da die Untersuchungen des Versuchsjahres 2015 zum gleichen Ergebnis geführt haben, kann die Aussage getroffen werden, dass die innovative Steuerung die gleiche Genauigkeit aufweist wie die bisher am Markt verfügbare Verschieberahmenteknik.

## 4 Ökonomischer Vergleich der Beikrautregulation in ausgewählten Kulturen

Die gewonnenen Daten bieten dem Anwender die Möglichkeit die Genauigkeit des Systems mit der praxisüblichen Methode zu vergleichen. Ob und wann sich die Investition in eine Anbaugerätesteuerung für den eigenen Betrieb lohnt, lässt sich für den Betriebsleiter auf Grundlage der Daten jedoch nicht klären. Aus diesem Grund sollen die gewonnenen Ergebnisse im folgenden Kapitel in die betriebswirtschaftliche Ebene der Kulturführung eingebunden werden. Die ökonomischen Auswirkungen der neuen Anbaugerätesteuerung soll anhand der zwei Beispielkulturen Speisekürbis und Speisezwiebeln dargestellt werden. Im Vergleich hierzu sollen die praxisüblichen Verfahren des ökologischen Landbaus herangezogen werden. Neben den gewonnenen Daten werden für die Verfahrenskostenberechnungen verschiedene Datensammlungen verwendet. Die Standardverfahren können den Datensammlungen des KTBL für den Gartenbau (KTBL 2009) und für den ökologischen Feldgemüsebau (KTBL 2013) entnommen werden. Die Grundlagen der ökonomischen Vorteile von GPS Lenksystemen im Freilandgemüsebau wurden in einer Untersuchung im Jahr 2012 erforscht (HEGE 2012). Daneben bieten die Ergebnisse der Untersuchungen zum Segetalpflanzenmanagement mittels GPS gestütztem Verschieberahmen aus dem Jahr 2013 (HEGE 2013) eine weitere Datengrundlage. Die im Jahr 2013 durchgeführte Untersuchung haben bereits aufgezeigt, dass sich durch den Einsatz einer GPS-gestützten Hacke die Verfahrenskosten beim Segetalpflanzenmanagement im Speisezwiebelanbau um  $70 \text{ €} \cdot \text{ha}^{-1}$  bzw. 25 % verringern lassen. Wird das Abflammen durch einen zusätzlichen Hackdurchgang im Voraufbau ersetzt, so waren Einsparungen von  $170 \text{ €} \cdot \text{ha}^{-1}$  und 60 % möglich. Der Produktionsablauf wurde damals in Anlehnung an (BECK 2009) berechnet. Ebenso fand die nachfolgende Handjäte keine Berücksichtigung, da zu diesem Zeitpunkt das Lohnniveau sehr unterschiedlich war. Nach Einführung des Mindestlohns kann diese Größe als Standard herangezogen werden. Weiterhin wurden keine Aussagen bezüglich der Amortisationsdauer getroffen. Für den nachfolgenden Vergleich wird die Datensammlung des KTBL für den ökologischen Freilandgemüsebau (KTBL 2013) herangezogen.

#### 4.1 Ökologischer Speisezwiebelanbau

Die Daten des KTBL beziehen sich jeweils auf eine bestimmte Kombination aus Mechanisierungsgrad, Feldgröße und Feldentfernung. Für den ökologischen Speisezwiebelanbau wurde eine 67-kW Mechanisierung festgelegt. Die Feldgröße beträgt 2 ha, bei einer Hof-Feld-Entfernung von 2 km. Die Zwiebeln werden sechsreihig gesät, wobei die Spurweite des Traktors 1,8 m beträgt. Für das Beikrautmanagement wurden folgende Maßnahmen ausgewiesen:

- 1 × Abflammen im Vorauflauf
- 1 × Bürsten mit der Reihenhackbürste
- 4 × Hacken mit der Hackmaschine
- 3 × Jäten von Hand

Die Kosten für das jeweilige Arbeitsverfahren setzen sich aus Lohn-, Betriebsmittel- und Maschinenkosten zusammen. Die Variablen der Kostenpositionen müssen im Vorfeld definiert werden. So entsprechen die Kosten einer Arbeitskraftstunde bei Festangestellten 17,50 €·Akh<sup>-1</sup> und bei Saisonarbeitskräften 8,50 €·Akh<sup>-1</sup>. Es wird angenommen, dass Maschinenarbeiten bzw. Arbeiten mit dem Traktor durch festangestellte Mitarbeiter durchgeführt werden. Die Maschinenkosten werden in €·ha<sup>-1</sup> ausgegeben. In diesem Fall erfolgt die Berechnung in Abhängigkeit des Zeitaufwandes. Eine Untergliederung in fixe und variable Kosten findet nicht statt. Der Dieselpreis wird mit 0,80 €·l<sup>-1</sup> angenommen. Für das Abflammen wird der zusätzliche Propangasaufwand mit 0,75 €·kg<sup>-1</sup> Gas ausgewiesen.

Um eine spätere Vergleichbarkeit der praxisüblichen Variante mit der neuen Anbaugerätsteuerung zu gewährleisten, müssen zusätzlich die Parameter des Arbeitsgangs „Hacken 6-reihig, 1,8 m; 45 kW Traktor“ definiert werden. So wird die Feldlänge mit 200 m angenommen. Die Fahrgeschwindigkeit beträgt in der praxisüblichen Variante 3 km·h<sup>-1</sup> und in der optimierten Variante 9 km·h<sup>-1</sup>. Die Wendezeit wird jeweils mit 30 sec angenommen (HEGE 2012). Weiterhin wurden für Einstellungs-, Reinigungs- und Rüstarbeiten 20 min je Hektar berechnet. Die Daten des KTBL mussten hierzu neu berechnet werden:

**Tab. 13:** Anpassung der Maschinenkosten des Arbeitsgangs „Hacken“ im Speisezwiebelanbau; modifiziert nach KTBL (2013)

Arbeitsgang	Arbeitszeitbedarf	Dieselbedarf	Maschinenkosten				
			Ab-schrei-bung	Zins-kosten	Sonsti-ges	Repara-turen	Betriebs-stoffe
	h·ha <sup>-1</sup>	l·ha <sup>-1</sup>	€·ha <sup>-1</sup>				
Hacken	2,44	7,44	15,12	2,72	0,79	16,38	6,17
Hacken berechnet	2,42	7,38	15,00	2,70	0,78	16,25	6,12

Die Änderungen des Arbeitszeitbedarfs und des Dieserverbrauchs sind marginal, jedoch ist eine Vergleichbarkeit der Daten in den nachfolgenden Berechnungen gegeben. Da sich die fixen Maschinenkosten, wie etwa Zinskosten, beim KTBL nach der Auslastungsschwelle berechnen, reduzieren sich diese Kosten ebenfalls. Dabei wird angenommen, dass der Traktor bzw. die Maschine früher für andere Arbeiten genutzt werden kann. Die weiteren Maschinenkosten betragen ca. 40 €·ha<sup>-1</sup>.

Für den Anwender sind vor allem die Gesamtkosten des Segetalpflanzenmanagements einer Kultur von Interesse. Hierzu wurden die neu berechneten Kosten mit den Kosten der anderen Regulierungsmaßnahmen im ökologischen Speisezwiebelanbau verrechnet (Tab. 14):

**Tab. 14:** Kosten, Zeitbedarf, Dieserverbrauch und Anzahl der Arbeitsgänge des Segetalpflanzenmanagement im Speisezwiebelanbau; modifiziert nach KTBL (2013)

Arbeitsgang	Zeitbedarf [Akh·ha <sup>-1</sup> ]	Dieserverbrauch [l·ha <sup>-1</sup> ]	Kosten [€·ha <sup>-1</sup> ]	Anzahl [n·ha <sup>-1</sup> ]	Gesamtkosten [€·ha <sup>-1</sup> ]
Abflammen	2,48	6,85	181,68	1	181,68
Bürsten	3,14	8,55	116,19	1	116,19
Hacken	2,42	7,38	89,10	4	356,38
Jäten	450,1	1,88	3844,26	1	3844,26
Summe	15,3 Fest Ak 450,1 Saison Ak	46,80			4498,51

Insgesamt fallen für die Regulierungsmaßnahmen im Speisezwiebelanbau knapp 4500 €·ha<sup>-1</sup> an. Der größte Teil entfällt dabei auf das Jäten. Hier sind mit 450 Akh·ha<sup>-1</sup> auch die meisten

Arbeitskraftstunden zu verbuchen. Den zweitgrößten Kostenpunkt stellen die vier Hackdurchgänge mit ca. 350 €·ha<sup>-1</sup>. Durch den Einsatz einer Anbaugerätsteuerung kann die Fahrgeschwindigkeit bei gleichzeitiger Verbesserung der Genauigkeit auf 9 km·h<sup>-1</sup> gesteigert werden (s. Kapitel 3.11). Für die Anbaugerätsteuerung müssen allerdings zusätzliche Kosten berechnet werden. Die Investition in einen GPS-gestützten Verschieberahmen beträgt 19.425 € netto. Unter Berücksichtigung eines Einsatzumfangs von ca. 400 ha, entfallen so je Hektar 5,40 € Abschreibungskosten (HEGE 2013). Für die neue Anbaugerätsteuerung lassen sich geringere Investitionskosten annehmen. Da die Hardwarekomponenten jedoch nur einen Bruchteil zum Gesamtpreis beitragen und ein späterer Verkaufspreis noch nicht vorliegt, sollen die Investitionskosten in Äquivalenz zum am Markt befindlichen Verschieberahmen berechnet werden. Weiterhin wird durch die schnellere Vorfahrtgeschwindigkeit auch ein 10 % höherer Verschleiß der Hacke angenommen, da sich die Hackschare schneller abnutzen (HEGE 2013). Die Stückerledigungskosten des Arbeitsgangs „Hacken“ verändern sich nach Einberechnung der Kosten für die Anbaugerätsteuerung wie folgt:

**Tab. 15:** Kosten des praxisüblichen Hackverfahrens, verglichen mit den Kosten des Verfahrens mit Anbaugerätsteuerung im Speisezwiebelanbau

Kennzahl	Einheit	1,8 m Hacke; 45kW Schlepper	
		praxisüblich	Anbaugerätsteuerung
Fahrgeschwindigkeit	km·h <sup>-1</sup>	3	9
Arbeitszeitbedarf	Akh·ha <sup>-1</sup>	2,42	1,18
Flächenleistung	ha·h <sup>-1</sup>	0,41	0,85
Abschreibung	€·ha <sup>-1</sup>	15,00	7,31
Zinskosten	€·ha <sup>-1</sup>	2,70	1,32
Sonstiges	€·ha <sup>-1</sup>	0,78	0,38
Reparaturkosten Schlepper	€·ha <sup>-1</sup>	13,25	6,46
Reparaturkosten Hacke	€·ha <sup>-1</sup>	3,00	3,30
Dieselskosten	€·ha <sup>-1</sup>	5,90	2,88
Betriebsstoffe	€·ha <sup>-1</sup>	6,12	2,98
Verschieberahmen	€·ha <sup>-1</sup>	-	5,40
Maschinenkosten	€·ha <sup>-1</sup>	46,75	30,03
Lohnkosten	€·ha <sup>-1</sup>	42,35	20,65
Summe	€·ha <sup>-1</sup>	89,10	50,68

Die Summe der Arbeitserledigungskosten beträgt beim praxisüblichen Verfahren  $89,10 \text{ €}\cdot\text{ha}^{-1}$ . Nach Einberechnung der Kosten für die Anbaugerätesteuerung betragen die Arbeitserledigungskosten in dieser Variante  $50,68 \text{ €}\cdot\text{ha}^{-1}$ . Die Einsparung beträgt somit  $38,42 \text{ €}\cdot\text{ha}^{-1}$ . Gleichzeitig kann die Flächenleistung von  $0,41 \text{ ha}\cdot\text{h}^{-1}$  auf  $0,85 \text{ ha}\cdot\text{h}^{-1}$  gesteigert werden. Zudem halbieren sich die Kosten für Diesel von  $5,90 \text{ €}\cdot\text{ha}^{-1}$  auf  $2,88 \text{ €}\cdot\text{ha}^{-1}$ . Das bedeutet der Dieserverbrauch sinkt um ca.  $3,8 \text{ l}\cdot\text{ha}^{-1}$ . Werden die Einsparungen nun auf die Gesamtzahl der Hackdurchgänge umgelegt, so können die Kosten je Hektar um  $153,68 \text{ €}$  reduziert werden. Weiterhin kann der Arbeitsgang „Abflammen“ durch einen weiteren Hackdurchgang ersetzt werden (HEGE 2013). Somit können weitere  $122,28 \text{ €}\cdot\text{ha}^{-1}$  eingespart werden.

Neben den Einsparungen durch die gesteigerte Fahrgeschwindigkeit sind durch den Einsatz einer Anbaugerätesteuerung weitere Vorteile, wie eine höhere Genauigkeit, zu verzeichnen. In der Praxis haben sich Sicherheitsabstände von ca. 5 cm zur Kulturreihe bewährt (BECK 2009). Dies führt zu einem unbearbeiteten Band von 10 cm je Kulturreihe. Mit GPS-gestützten Anbauverfahren kann der Sicherheitsabstand zur Reihe auf 2,5 cm reduziert werden. Das Band beträgt somit nur noch 5 cm. Als Faustformel erspart 1 cm ca. 10 Akh je Hektar (BECK 2009). Je Kulturreihe können somit  $50 \text{ Akh}\cdot\text{ha}^{-1}$  eingespart werden. Bei einer sechsreihigen Aussaat können somit  $300 \text{ Akh}\cdot\text{ha}^{-1}$  bzw.  $2550 \text{ €}$  Lohnkosten je Hektar eingespart werden. Für die Gesamtkosten des Segetalpflanzenmanagements im Speisezwiebelanbau ergeben sich dadurch folgende Änderungen (Tab. 16):

**Tab. 16:** Kosten, Zeitbedarf, Dieserverbrauch und Anzahl der Arbeitsgänge des optimierten Segetalpflanzenmanagement im Speisezwiebelanbau

Arbeitsgang	Zeitbedarf [Akh·ha <sup>-1</sup> ]	Dieserverbrauch [l·ha <sup>-1</sup> ]	Kosten [€·ha <sup>-1</sup> ]	Anzahl [n·ha <sup>-1</sup> ]	Gesamtkosten [€·ha <sup>-1</sup> ]
Abflammen	2,48	6,85	181,68	0	0
Bürsten	3,14	8,55	116,19	1	116,19
Hacken	1,18	3,60	50,68	5	253,40
Jäten	150,1	1,88	1294,26	1	1294,26
Summe	9,04 Fest Ak 150,1 Saison Ak	28,43			1663,85
Veränderung zur praxisübl. Methode	- 40,92 % Fest Ak - 66,65 % Saison Ak	- 39,25 %			- 63,01 %

Durch den Einsatz der Anbaugerätesteuerung lassen sich insgesamt ca. 40 % der Arbeitskraftstunden für Festangestellte einsparen. Bei den Saisonarbeitskraftstunden sind Einsparungen von ca. 65 % möglich. Der Dieserverbrauch verringert sich um knapp 40 %. Die Gesamtkosten reduzieren sich um ca. 60 %.

Durch die höhere Genauigkeit können gleichzeitig die Kulturschäden reduziert werden. In den durchgeführten Untersuchungen betragen die durchschnittlichen Kulturschäden in der praxisüblichen, manuellen Variante bei  $3 \text{ km}\cdot\text{h}^{-1}$  Fahrgeschwindigkeit 6,64 %. Die Kulturschäden in den Varianten mit Anbaugerätesteuerungen und  $9 \text{ km}\cdot\text{h}^{-1}$  betragen die durchschnittlichen Kulturschäden 0,92 % (Tabelle s. Anhang). Mittels einer Anbaugerätesteuerung können die Kulturschäden somit um 5,72 % reduziert werden. Für den Anbauer bedeutet dies, dass er beim praxisüblichen Verfahren einen Minderertrag von 5,72 % erwarten muss. Das KTBL sieht für den ökologischen Speisezwiebelanbau eine Ertragsersparnis von  $30 \text{ t}\cdot\text{ha}^{-1}$  vor. Mittels einer GPS-gestützten Anbaugerätesteuerung ließe sich der Ertrag auf  $36,86 \text{ t}\cdot\text{ha}^{-1}$  steigern. Unter Berücksichtigung eines durchschnittlichen Zwiebelpreises von  $285 \text{ €}\cdot\text{t}^{-1}$ , kann somit eine Mehrleistung von  $1955,10 \text{ €}\cdot\text{ha}^{-1}$  generiert werden. In der Summe (Mehrleistung und Kosteneinsparung) bietet die Anbaugerätesteuerung somit einen Mehrwert von  $4746,16 \text{ €}\cdot\text{ha}^{-1}$ .

Demgegenüber stehen Investitionskosten von 19.425 € für die Anbaugerätesteuerung. Für den Anwender ist nun von Interesse, wann sich diese Investition amortisiert. Hierzu wurde eine Amortisationsrechnung in Abhängigkeit der angebauten Fläche an ökologischen Speisezwiebeln durchgeführt. Die Investition würde sich nach diesen Berechnungen bereits bei einer Fläche von 4,06 Hektar amortisieren.

### **4.2 Ökologischer Speisekürbisanbau**

Gleiche Berechnungen sollen nun auch für den ökologischen Speisekürbisanbau durchgeführt werden. Beim Kürbisanbau gilt es jedoch zwei Produktionsverfahren zu unterscheiden: die Direktsaat und die Aussaat auf Mulchfolie. Bei der Aussaat auf Mulchfolie gilt es zu beachten, dass die Kürbispflanzen durch das mechanische Segetalpflanzenmanagement nicht getroffen werden können, da nur bis zur Mulchfolie reguliert werden muss. Für den Einsatz einer Anbaugerätesteuerung gilt es also zu beachten, dass diese einmal bei der Aussaat selbst

(Direktsaat) und einmal beim Auslegen der Mulchfolie eingesetzt wird. Somit kann im Nachgang bis zur Bestands- bzw. Folienkante reguliert werden.

Das KTBL weist für beide Produktionsverfahren eine durchschnittliche Schlaggröße von 2 ha aus. Die durchschnittliche Hof-Feld-Entfernung beträgt 2 km. Der Mechanisierungsgrad wird mit einem 67 kW Traktor angesetzt. Der Anbau des Kürbis erfolgt praxisüblich auf Beete mit 1,5 m Spurweite. Je Beet wird eine Reihe gesät bzw. eine Mulchfolie ausgelegt (KTBL 2013). Für das Segetalpflanzenmanagement werden bei den zwei Produktionsverfahren unterschiedliche Arbeitsschritte definiert. Für den Anbau auf Mulchfolie sind folgende Arbeitsschritte zur Beikrautregulation vorgesehen:

- 1 × Mulchfolietransport + Mulchfolieablage
- 4 x Hacken mit der Hackmaschine

Zusätzlich müssen bei diesem Produktionsverfahren die Kosten für die Mulchfolie berücksichtigt werden. Das KTBL weist eine Mulchfoliefläche von  $7000 \text{ m}^2 \cdot \text{ha}^{-1}$  aus. Der Preis ist mit  $0,12 \text{ €} \cdot \text{m}^2$  festgelegt. Somit ergeben sich zusätzliche Kosten von  $840 \text{ €} \cdot \text{ha}^{-1}$ .

Für die Direktsaat werden folgende Arbeitsschritte festgelegt:

- 3 × Striegeln
- 3 × Hacken mit der Hackmaschine
- 1 x Hacken von Hand

Bei der Betrachtung des ganzheitlichen Segetalpflanzenmanagements fällt auf, dass keine Arbeitskraftstunden zur Handjäte im Anbau auf Mulchfolie berücksichtigt wurden. In der Praxis kann jedoch nie randscharf bis zur Folie gearbeitet werden, da diese sonst beschädigt wird. Weiterhin laufen auch einige Segetalpflanzen in den Saat- bzw. Pflanzlöchern auf, die auch entfernt werden müssen. Für den Anbau ohne Mulchfolie werden zur Handhacke  $18,68 \text{ Akh} \cdot \text{ha}^{-1}$  ausgewiesen. Auch dieser Wert erscheint in der Praxis sehr niedrig, da so laut der Faustformel (1 cm entspricht  $10 \text{ Akh} \cdot \text{ha}^{-1}$ ) ein Band von ca. 2 cm reguliert werden müsste. Da der Kürbis auf Grund seiner Standzeit von vier Monaten jedoch mehrere Durchgänge zur Handjäte benötigt und davon ausgegangen werden kann, dass die Hackmaschine mit einem 10 cm breiten Band gearbeitet hat, so sind  $100 \text{ Akh} \cdot \text{ha}^{-1}$  für die meisten Anwender praxisnäher. Um die Daten vergleichbar zu gestalten, wurde im Vorfeld der relevante Arbeitsgang „Hacken“ neu berechnet. Die erforderlichen Parameter, wie Feldlänge, Wende-

und Rüstzeit, wurden in Anlehnung zu den Umrechnungen in Kapitel 4.1 durchgeführt. Nach der Umrechnung ergeben sich folgende Änderungen:

**Tab. 17:** Anpassung der Maschinenkosten des Arbeitsgangs „Hacken“ in Speisekürbis; modifiziert nach KTBL (2013)

Arbeitsgang	Arbeitszeitbedarf	Dieselbedarf	Maschinenkosten				
			Abschreibung	Zinskosten	Sonstiges	Reparaturen	Betriebsstoffe
			€·ha <sup>-1</sup>				
	h·ha <sup>-1</sup>	l·ha <sup>-1</sup>					
Hacken	4,17	10,43	28,13	5,06	1,36	25,92	8,65
Hacken berechnet	2,83	7,08	19,09	3,43	0,92	17,59	5,87

Die Änderungen wirken sich vor allem auf den Arbeitszeitbedarf aus. So wurde dieser durch die Berechnungen um ca. 1,3 Akh·ha<sup>-1</sup> reduziert. Somit verändert sich auch der Dieselbedarf um 3,35 l·ha<sup>-1</sup>, die Abschreibungen um 9,04 €·ha<sup>-1</sup>, die Zinskosten um 1,63 €·ha<sup>-1</sup>, die sonstigen Kosten um 0,44 €·ha<sup>-1</sup> und die Reparaturkosten um 8,33 €·ha<sup>-1</sup>. Die Kosten für Betriebsstoffe sinken um 2,78 €·ha<sup>-1</sup>. Unter Berücksichtigung der zusätzlichen Arbeitskraftstunden für die Handhacke ergeben sich für das ganzheitliche Segetalpflanzenmanagement im Kürbisanbau auf Mulchfolie folgende Gesamtkosten:

**Tab. 18:** Kosten, Zeitbedarf, Dieserverbrauch und Anzahl der Arbeitsgänge des Segetalpflanzenmanagement im Speisekürbisanbau (auf Mulchfolie); modifiziert nach KTBL (2013)

Arbeitsgang	Zeitbedarf [Akh·ha <sup>-1</sup> ]	Dieserverbrauch [l·ha <sup>-1</sup> ]	Kosten [€·ha <sup>-1</sup> ]	Anzahl [n·ha <sup>-1</sup> ]	Gesamtkosten [€·ha <sup>-1</sup> ]
Mulchfolie	-	-	840,00	1	840,00
Mulchfolietransport	0,26	0,66	8,62	1	8,62
Mulchfolieablage	3,37	6,80	106,89	1	106,89
Hacken	2,83	7,08	102,10	4	408,40
Handhacke	100	0,23	852,22	1	852,22
Summe	14,95 Fest Ak 100 Saison Ak	36,01			2216,13

Insgesamt fallen für die Regulierungsmaßnahmen im Speisekürbisanbau auf Mulchfolie ca. 2.200 €·ha<sup>-1</sup> an. Der Kostentreiber ist zum einen die Mulchfolie, die bis zum Verlegen ca. 950 €·ha<sup>-1</sup> kostet. Zum anderen verursacht die Handhacke ca. 850 €·ha<sup>-1</sup> Kosten. Durch die Anbaugerätsteuerung wird die Fahrgeschwindigkeit von praxisüblichen 3 auf 9 km·h<sup>-1</sup> gesteigert. Es ergeben sich folgende Arbeitserledigungskosten für den Arbeitsgang „Hacken“:

**Tab. 19:** Kosten des praxisüblichen Hackverfahrens, verglichen mit den Kosten des Verfahrens mit Anbaugerätsteuerung im Speisekürbisanbau

Kennzahl	Einheit	1,5 m Hacke; 37 kW Schlepper	
		praxisüblich	Anbaugerätsteuerung
Fahrgeschwindigkeit	km·h <sup>-1</sup>	3	9
Arbeitszeitbedarf	Akh·ha <sup>-1</sup>	2,83	1,35
Flächenleistung	ha·h <sup>-1</sup>	0,35	0,74
Abschreibung	€·ha <sup>-1</sup>	19,09	9,11
Zinskosten	€·ha <sup>-1</sup>	3,43	1,64
Sonstiges	€·ha <sup>-1</sup>	0,92	0,44
Reparaturkosten Schlepper	€·ha <sup>-1</sup>	14,59	6,96
Reparaturkosten Hacke	€·ha <sup>-1</sup>	3,00	3,30
Dieselskosten	€·ha <sup>-1</sup>	5,66	2,70
Betriebsstoffe	€·ha <sup>-1</sup>	5,87	2,07
Verschieberahmen	€·ha <sup>-1</sup>	-	5,40
Maschinenkosten	€·ha <sup>-1</sup>	52,57	31,62
Lohnkosten	€·ha <sup>-1</sup>	49,53	23,63
Summe	€·ha <sup>-1</sup>	102,10	55,25

Die Summe der Arbeitserledigungskosten beim Arbeitsgang „Hacken“ beträgt im praxisüblichen Verfahren 102,10 €·ha<sup>-1</sup>. Mittels der Anbaugerätsteuerung lassen sich die Kosten auf 55,25 €·ha<sup>-1</sup> reduzieren. Somit können 46,85 €·ha<sup>-1</sup> eingespart werden. Daneben können knapp 3 €·ha<sup>-1</sup> Dieselskosten bzw. 3,7 l·ha<sup>-1</sup> Diesel eingespart werden. Die Flächenleistung steigt von 0,35 ha·h<sup>-1</sup> auf 0,74 ha·h<sup>-1</sup>. Insgesamt lassen sich bei vier Hackdurchgängen 187,40 €·ha<sup>-1</sup> durch den Einsatz der Anbaugerätsteuerung einsparen.

Da die Bearbeitungsgenauigkeit zunimmt, kann die Anzahl an Handarbeitskraftstunden reduziert werden. Wenn der praxisübliche Sicherheitsabstand zur Reihe 5 cm beträgt, kann das unbearbeitete Band von 10 auf 5 cm reduziert werden. Die Zahl der Arbeitskraftstunden

sinkt somit um  $50 \text{ Akh}\cdot\text{ha}^{-1}$ . Dies führt zu einer Lohnkostenreduktion von  $425 \text{ €}\cdot\text{ha}^{-1}$ . Insgesamt ergeben sich für den ökologischen Speisekürbisanbau somit folgende Kosten für die Segetalpflanzenreduktion:

**Tab. 20:** Kosten, Zeitbedarf, Dieserverbrauch und Anzahl der Arbeitsgänge des optimierten Segetalpflanzenmanagement im Speisekürbisanbau (auf Mulchfolie)

Arbeitsgang	Zeitbedarf [Akh·ha <sup>-1</sup> ]	Dieserverbrauch [l·ha <sup>-1</sup> ]	Kosten [€·ha <sup>-1</sup> ]	Anzahl [n·ha <sup>-1</sup> ]	Gesamtkosten [€·ha <sup>-1</sup> ]
Mulchfolie	-	-	840,00	1	840,00
Mulchfolietransport	0,26	0,66	8,62	1	8,62
Mulchfolieablage	3,37	6,80	106,89	1	106,89
Hacken	1,35	3,38	55,25	4	221,00
Handhacke	50	0,23	427,22	1	427,22
Summe	9,03 Fest Ak 50 Saison Ak	21,21			1603,73
Veränderung zur praxisüblichen Methode	- 39,60 % Fest Ak - 50 % Saison Ak	- 41,10 %			- 27,63 %

Die Anzahl der Arbeitskraftstunden für Festangestellte sinkt um knapp 40 %. Die Zahl der Arbeitskraftstunden für Saisonarbeitskräfte sinkt um 50 %. Der Dieserverbrauch lässt sich um ca. 40 % senken. Insgesamt können ca. 600 € bzw. knapp 28 % der Kosten eingespart werden. Da die Mulchfolie die Kulturpflanzen schützt bzw. eine Bearbeitung verhindert, ist von keinem Mehrertrag durch die Reduktion der Kulturschäden auszugehen.

Nach Durchführung einer Amortisationsrechnung kann festgehalten werden, dass sich die Anbaugerätesteuerung im Speisekürbisanbau auf Mulchfolie ab einer Fläche von 31,72 ha von selbst trägt.

Die Berechnungen sollen nun für den ökologischen Speisekürbisanbau in Direktsaat durchgeführt werden. Wesentliche Parameter des Segetalpflanzenmanagements wurden hierfür schon beim Anbau auf Mulchfolie definiert. Die Gesamtkosten des praxisüblichen Verfahrens werden folgend dargestellt:

**Tab. 21:** Kosten, Zeitbedarf, Dieserverbrauch und Anzahl der Arbeitsgänge des Segetalpflanzenmanagement im Speisekürbisanbau (Direktsaat); modifiziert nach KTBL (2013)

Arbeitsgang	Zeitbedarf [Akh·ha <sup>-1</sup> ]	Dieserverbrauch [l·ha <sup>-1</sup> ]	Kosten [€·ha <sup>-1</sup> ]	Anzahl [n·ha <sup>-1</sup> ]	Gesamtkosten [€·ha <sup>-1</sup> ]
Striegeln	0,42	2,55	19,95	3	59,85
Hacken	2,83	7,08	102,10	3	306,30
Handhacke	100	0,23	852,22	1	852,22
Summe	9,75 Fest Ak 100 Saison Ak	29,12			1218,37

Für den Speisekürbisanbau im Direktsaatverfahren fallen knapp 10 Akh·ha<sup>-1</sup> für Festangestellte Mitarbeiter an. Weiterhin kommen 100 Saisonarbeitskraftstunden hinzu. Es werden knapp 30 l Diesel je Hektar benötigt. Insgesamt belaufen sich die Kosten für das Segetalpflanzenmanagement auf ca. 1200 €·ha<sup>-1</sup>.

Unter Berücksichtigung der Anbaugerätsteuerung werden die Kosten wie folgt optimiert:

**Tab. 22:** Kosten, Zeitbedarf, Dieserverbrauch und Anzahl der Arbeitsgänge des optimierten Segetalpflanzenmanagement im Speisekürbisanbau (Direktsaat)

Arbeitsgang	Zeitbedarf [Akh·ha <sup>-1</sup> ]	Dieserverbrauch [l·ha <sup>-1</sup> ]	Kosten [€·ha <sup>-1</sup> ]	Anzahl [n·ha <sup>-1</sup> ]	Gesamtkosten [€·ha <sup>-1</sup> ]
Striegeln	0,42	2,55	19,95	3	59,85
Hacken	1,35	3,38	55,25	3	165,75
Handhacke	50	0,23	427,22	1	427,22
Summe	5,31 Fest Ak 50 Saison Ak	18,02			652,82
Veränderung zur praxisüblichen Methode	- 45,54 % Fest Ak - 50 % Saison Ak	- 38,12 %			- 46,42 %

Insgesamt lassen sich die Kosten von 1218,37 €·ha<sup>-1</sup> auf 652,82 €·ha<sup>-1</sup> reduzieren. Die Reduktion beträgt somit ca. 46 %. Daneben lassen sich ca. 11 Liter Diesel einsparen. Ebenso werden ca. 4 Akh·ha<sup>-1</sup> der Festangestellten und 50 Akh·ha<sup>-1</sup> der Saisonarbeitskräfte eingespart.

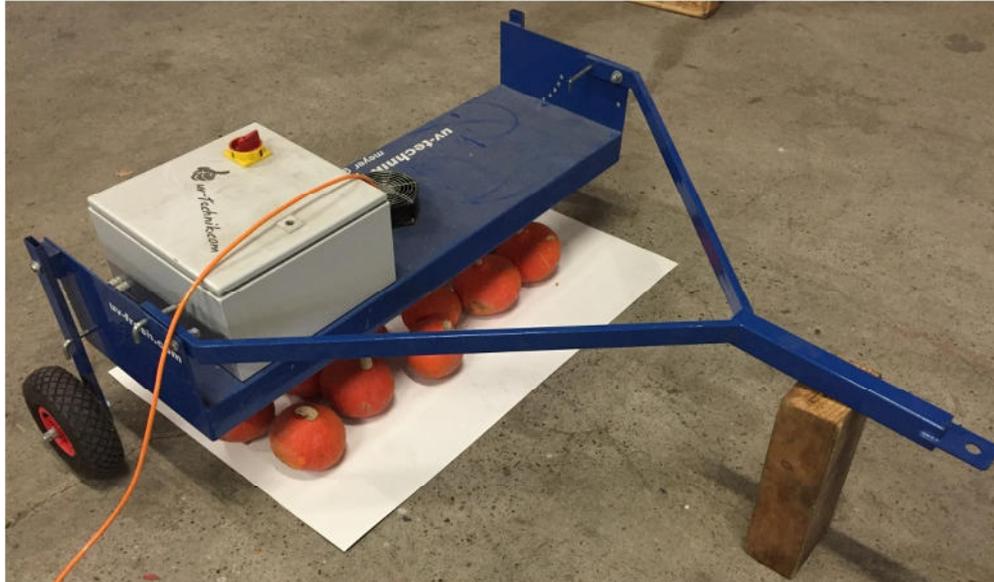
Da die Hackmaschine bei der Direktsaat bis zur Kulturreihe hin arbeitet, müssen Kulturschäden beim praxisüblichen Verfahren von 6,64 % berücksichtigt werden. Diese können durch die Anbaugerätsteuerung um 5,72 % reduziert werden, was dem Mehrertrag des Kürbis entspricht. Das KTBL legt den Ertrag für Speisekürbis im Direktsaatverfahren auf  $18 \text{ t} \cdot \text{ha}^{-1}$  fest. Durch die Anbaugerätsteuerung lässt sich der Ertrag um ca. 3 Tonnen auf  $21,09 \text{ t} \cdot \text{ha}^{-1}$  steigern. Bei einem durchschnittlichen Preisniveau von  $800 \text{ €} \cdot \text{t}^{-1}$  Speisekürbis ergibt sich so eine Mehrleistung von  $2471,04 \text{ €} \cdot \text{ha}^{-1}$ . Unter Berücksichtigung der zusätzlichen Einsparungen beim Segetalpflanzenmanagement von  $565,55 \text{ €} \cdot \text{ha}^{-1}$  ergibt sich ein Mehrwert von  $3036,59 \text{ €} \cdot \text{ha}^{-1}$ . Der Kaufpreis von 19.425 € amortisiert sich somit ab einer Fläche von 6,40 Hektar.

## 5 Untersuchungen und Ergebnisse zur UV-C Behandlung von ausgewählten Kulturen

Das folgende Kapitel beschreibt die durchgeführten Untersuchungen zum Einsatz der UV-C Technik in Lagergemüse und Knoblauchpflanzgut. Die Feldversuche zu Falschem Mehltau an Speisezwiebeln (*Peronospora destructor*) konnten auf Grund fehlender Materialien nicht vollständig abgeschlossen werden. Geplant war hier ein UV-C Strahlengerät mit einer Arbeitsbreite von 6 m, um mehrere Gemüsebeete gleichzeitig zu bestrahlen. Da der Hersteller den Prototyp jedoch nicht lieferte, musste der Versuchsplan 2015 geändert werden. Daher wurden nur Untersuchungen am Institut für Phytomedizin an der Hochschule Geisenheim durchgeführt. Die Bestrahlung der Kürbisse und Speisezwiebeln zur Untersuchung der Lagerfähigkeit von Gemüse erfolgte auf dem Betrieb Hege. Hier erfolgte ebenfalls die Bestrahlung des Knoblauchpflanzgutes. Die Auswertung des Virusbefalls wurde im Nachgang am Dienstleistungszentrum Ländlicher Raum Rheinpfalz in Neustadt durchgeführt und am JKI Braunschweig durchgeführt. Hintergrund war die Nutzung von Synergieeffekten.

### 5.1 Material und Methoden: Verwendetes UV-C Gerät

Für die Untersuchungen stand der Prototyp eines Bestrahlungsgerätes zur Golfrasenpflege zur Verfügung. Entwickelt und gebaut wurde das UV-C Bestrahlungsgerät von der Firma UV-TECHNIK MEYER GMBH. Kernstück der Konstruktion sind zwei UV-C Amalgamstrahler des Typs uv-fresh Amalgam 200 W 19/1120. Die Niederdruckstrahler hatten eine Leistung von 200 Watt, von der 60 Watt als UV-C Strahlung emittiert werden konnten. Das Bestrahlungsfenster betrug 200 x 1018 mm. Die maximale Bestrahlungsstärke bei 20 mm Abstand zur Zielfläche war mit  $200 \text{ mW}\cdot\text{cm}^{-2}$  angegeben. Mit zunehmendem Abstand zur Zielfläche konnten bei 60 mm Abstand zur Zielfläche noch  $145 \text{ mW}\cdot\text{cm}^{-2}$  realisiert werden. Der Abstand zur Zielfläche konnte über Bolzen variiert werden. Zur Strombegrenzung der Lampen waren zwei elektronische Vorschaltgeräte des Typs EBD 230 – 1,9 A verbaut. Ein indirekter Lüfter des Typs A 17 230 V diente zur Kühlung der Röhren. Speziell für die Anwendung hinter Golffahrzeugen war zusätzlich noch eine Anhängavorrichtung angebracht (Abb. 65).



**Abb. 65:** Draufsicht des UV-C Geräts für Golfrasen; stationär aufgestellt zur Behandlung von Kürbis

### 5.1.1 Material und Methoden: Labortest zum Nachweis des OYDV

Beim Pflanzgut des Knoblauchs wurden Laboruntersuchungen durchgeführt, da sich in dieser Kultur der Onion yellow dwarf virus (kurz: OYDV) zu einem Problempathogen entwickelt. Infizierte Bestände können mit Ertragseinbußen von bis zu 40 % reagieren. Der Virus wird durch infiziertes Pflanzgut mit eingekauft und kann zudem überwintern (BEDLAN 2016). In einer internen Untersuchung des JKI Braunschweig wurde festgestellt, dass nahezu kein Knoblauch virusfrei ist. Ziel der Untersuchung war eine Analyse des Status quo, um so eine Grundlage für die landwirtschaftliche Beratung zu liefern (KRAUTHAUSEN 2016). Zeitgleich fanden Untersuchungen am DLR Neustadt statt. Die einzige Möglichkeit OYDV zu vermeiden, war bisher die Anzucht von Pflanzgut aus einer Meristemkultur. Dieses Pflanzgut ist jedoch sehr teuer, weshalb es keine breite Anwendung in der Praxis fand. Da für die Laboruntersuchungen Knoblauch aus deutschen Praxisbetrieben gesucht wurde, bestand für die eigenen Untersuchungen die Möglichkeit, Synergieeffekte zu nutzen und ebenfalls mit UV-C bestrahltes Pflanzgut einzusenden. Die Laboruntersuchungen wurden mit Enzyme Linked Immunosorbent Assay (kurz: ELISA) Nachweisverfahren durchgeführt. Das ELISA Verfahren beruht dabei auf einer spezifischen Antigen-Antikörperreaktion. Die Antikörper sind zudem häufig mit einem Enzym markiert. Die durch das Reporterenzym katalysierte

Reaktion führt zum Nachweis des Antigens. Bei der Umsetzung des Substrates durch das Enzym entsteht meist ein Farbumschlag, der mittels Photometrie gemessen werden kann (SCHÜGERL 1997). Für die Untersuchungen am OYDV wurde die Sandwich ELISA oder DAS-ELISA (double antibody sandwich) Technik verwendet. Hierbei wird zunächst ein Antikörper (auch coat oder capture antibody) in die Vertiefungen der Mikrotiterplatten (wells) gegeben, bevor die Probe hinzugefügt wird. Die verwendete Coatingpufferlösung bestand aus Natriumcarbonat ( $\text{Na}_2\text{CO}_3$ ) und Natriumhydrogencarbonat ( $\text{NaHCO}_3$ ). Der optimale pH-Wert liegt im Bereich von 9,6. Während einer längeren Inkubationszeit bindet der in der Platte vorhandene Antikörper das Antigen. Nach der Inkubationsphase wird die Platte gewaschen. Für die Untersuchung an OYDV wurde eine Waschpufferlösung aus Natriumchlorid ( $\text{NaCl}$ ), Dinatriumhydrogenphosphat ( $\text{Na}_2\text{HPO}_4$ ), Kaliumdihydrogenphosphat ( $\text{KH}_2\text{PO}_4$ ), Kaliumchlorid ( $\text{KCl}$ ) und Tween 20 verwendet. Der pH-Wert der angesetzten Waschlösung sollte 7,2 bis 7,4 betragen. Nach der Waschung sind nur noch der Antikörper und das Antigen vorhanden. In einem nächsten Schritt wird ein weiterer Antikörper (detection antibody) inkubiert. Dieser ist an ein Rezeptorenzym gebunden und bindet ebenfalls an das Antigen. Wichtig ist jedoch die Bindung an einem anderen Epitop als der coat antibody. Deshalb entsteht eine Antikörper-Antigen-Antikörper Verbindung, was dieser Technik ihren Namen verleiht. Für jede Antigen-Antikörperreaktion gibt es spezifische Seren. Für den Nachweis von OYDV wird das Serum Nummer 0447 der Deutschen Sammlung von Mikroorganismen und Zellkulturen (kurz: DSMZ) empfohlen. Nach den Untersuchungen des JKI wurde jedoch festgestellt, dass der gefundene Stamm des OYDV besser auf das Serum mit der Nummer 0609 reagiert (MÜLLER 2015). Dieses wird üblicherweise zum Nachweis des Strawberry mild yellow edge (kurz: SMYEV) verwendet. Der Nachteil dieses Verfahrens liegt jedoch darin, dass keine quantitative Aussage über den Virusbefall getroffen werden kann.

## 5.2 Versuchsaufbau

Die Bestrahlung des Knoblauchpflanzgutes und des Lagergemüses erfolgte auf dem Hof Hege. Hierzu erfolgte der stationäre Aufbau des UV-C Geräts (s. Kapitel 5.1.1). Die eingestellte Höhe der Strahlereinheit zur Zielfläche betrug weniger als 100 mm. Der Durchmesser einer Knoblauchzehe lag durchschnittlich bei 10 mm. Insgesamt sollten drei Varianten untersucht werden. Eine nicht bestrahlte Variante diente als Kontrollvariante. Zwei weitere Varianten wurden unterschiedlich lange bestrahlt. Die Zeiten wurden einem Tastversuch in Kartoffelpflanzgut entnommen (GELDERMANN 2015) und mit 30 bzw. 120 Sekunden angesetzt. Die Bestrahlungsstärke ist nach dem Datenblatt des Herstellers mit  $145 \text{ mW}\cdot\text{cm}^{-2}$  angegeben. Mittels Umrechnung (s. Kapitel 2.6.1) ergeben sich für die drei Varianten folgende Bestrahlungsdosen:

**Tab. 23:** Zeitdauer [sec] und Dosis [ $\text{mWs}\cdot\text{cm}^{-2}$ ] der UV-C Bestrahlungsvarianten 2015 an Knoblauchpflanzgut zur Minderung von OYDV, Betrieb Hege, Limburgerhof

Variante	Bestrahlungszeit [sec]	UV-C Strahlungsdosis [ $\text{mWs}\cdot\text{cm}^{-2}$ ]
1	0	0
2	30	4350
3	120	17.400

Da die Bestrahlung nur bei direktem Kontakt funktionieren kann, mussten die einzelnen Zehen nach Ablauf der Zeit einmal umgedreht werden. So erfolgte die Behandlung der Ober- und Unterseite mit der gleichen Strahlendosis. Insgesamt standen für jede Variante 60 Zehen zur Verfügung. Jeweils 30 Zehen wurden zur Untersuchung in das DLR in Neustadt gebracht. Die 30 verbliebenen Zehen sollten in eine mit Anzuchterde gefüllte Saatkiste gepflanzt werden, um später eventuelle Wuchsdepressionen durch die Bestrahlung zu bonitieren. Die ELISA Testung wurde für jede Variante dreimal durchgeführt.

Die Speisewiebeln sind mit einem Durchmesser von ca. 30 mm die nächst größere Frucht. Die Versuchsanordnung entsprach der des Knoblauchs. Neben einer unbehandelten Kontrolle, folgte eine 30 bzw. 120 Sekunden lange Bestrahlung (Tab. 23). Jede Variante bestand aus 30 Stück. Nach Ablauf der Zeit erfolgte die Drehung der Zwiebeln. Abschließend folgte jede Woche die Auszählung und Bonitur der Kulturverluste.

Die Kürbisse waren mit einem Durchmesser von ca. 200 mm die größte untersuchte Frucht. Für die Untersuchungen standen je Variante 30 Hokkaido Kürbisse zur Verfügung. Die Bestrahlungszeiten waren 30 und 120 Sekunden lang. Da nicht alle Kürbisse auf einmal Platz gefunden hätten, wurden jeweils zwei Durchgänge gefahren. Die Kulturverluste wurden im Anschluss wöchentlich bonitiert. Da sowohl Kürbisse als auch Speisezwiebeln auf dem Betrieb Hege im Schnitt der Jahre nur bis Ende Januar gelagert werden, sollte dieser Termin als abschließende Bonitur gewählt werden.

### 5.3 Durchführung der Untersuchungen

Die Bestrahlung startete am 07.11.2015. Da die Knoblauchzehen mit einem Durchmesser von ca. 10 mm die kleinste Einheit des Versuchs darstellte, sollte mit diesen in niedrigster Position begonnen werden. Die Lochrasten des UV-C Gerätes waren so eingestellt, dass der Abstand zur Zielfläche weniger als 10 cm aufwies. Im Anschluss daran wurden die Zehen angezogen, um die spätere ELISA Testung am Blattgrün durchführen zu können. Der Nachweis erfolgte eine Stunde nach Eintrag des Substrates bei 405 nm. Jede Variante sollte dreimal beprobt werden.

Bei der Bestrahlung der Speisezwiebeln wies der Abstand zur Zielfläche ebenfalls 100 mm auf. Bei den Kürbissen erschwerte der Strunk, der bei Hokkaido Kürbissen als Qualitätsmerkmal dient, die Behandlung. Somit musste mit einer Entfernung von ca. 15 cm behandelt werden (Abb. 66).



**Abb. 66:** Großer Abstand zur Zieloberfläche bei Hokkaido, verursacht durch den Strunk

Die Bestrahlung der Unterseite erfolgte mit dem gleichen Abstand. Für die Untersuchungen stand leider kein UV-C Messgerät zur Verfügung, um die Bestrahlungsdosis genau ermitteln zu können. Nach Rücksprache mit dem Hersteller ist dieser Bereich jedoch noch abgedeckt.

Bei den wöchentlichen Bonituren wurden faule Zwiebeln aussortiert. Diese sind vor allem durch ihre weiche Konsistenz zu erkennen. Gleiches galt für mit Fäulnis befallene Kürbisse. Bonitiert wurden die Woche des Ausfalls und die Anzahl der aussortierten Früchte bzw. Zwiebeln. Mit der gesetzten Frist Ende Januar betrug die maximale Lagerfähigkeit in den durchgeführten Untersuchungen 13 Wochen. Die abschließende Bonitur erfolgte am 30.01.2016.

#### **5.4 Beobachtungen während der Untersuchungen**

Die Bedienung des Gerätes erfolgte äquivalent zu einer handelsüblichen Leuchtstoffröhre. Um die Sicherheit des Anwenders gewährleisten zu können, war das Gerät durch eine Wand abgeschirmt und die Betätigung fand von außen statt. Denkbar wäre an dieser Stelle eine Abschirmung des Warenstroms, wenn die Strahler in die Verarbeitungsanlage der jeweiligen Kultur integriert würden.

Von Interesse war vor allem die Auflauftrate der Knoblauchzehen. Die Bonitur erfolgte daher sowohl im DLR als auch im Betrieb Hege. So konnten bezüglich des Auflaufs keine Unterschiede festgestellt werden. Die Auflauftrate betrug in allen Stichproben >99 %.

#### **5.5 Untersuchung zu *Peronospora destructor* an Speisezwiebeln**

Geplant war die landtechnische Umsetzung eines UV-C Gerätes zur Bestrahlung mehrerer Gemüsebeete. Da der versprochene Prototyp jedoch nicht geliefert wurde, musste der Versuchsplan entsprechend angepasst werden. Somit sollten die Untersuchungen im Gewächshaus zur letalen Strahlendosis an *Peronospora destructor* durchgeführt werden. Da die Isolation des phytopathogenen Pilzstammes jedoch nicht gelang, sollte an dieser Stelle nur die Phytotoxizität der UV-C Strahlung auf *Allium cepa* untersucht werden. Hierzu wurden aus dem Feld des Betriebs Hege mehrere Speisezwiebelpflanzen ausgegraben und in Töpfe

gepflanzt. Die nachfolgende Bestrahlung erfolgte in einem eigens für Topfreben entwickelten UV-C Modul (Abb. 67).



**Abb. 67:** UV-C Gewächshausmodul zur Bestrahlung von Topfreben;

Quelle: HAMM et al. (2016)

Die Konstruktion mit zwei gegenüberliegenden UV-C Strahlereinheiten ermöglicht die Bestrahlung der gesamten Pflanze. Für die Untersuchungen wurde eine geringe Strahlendosis von  $80 \text{ mWs}\cdot\text{cm}^{-2}$  und eine hohe Dosis von  $320 \text{ mWs}\cdot\text{cm}^{-2}$  gewählt (KLÄRNER 2016). Die mit geringer Strahlendosis behandelten Pflanzen zeigten im Nachgang keine Wuchsdepressionen. Auch bei hoher Dosis konnten keine Verbrennungen festgestellt werden. Die Pflanzen zeigten jedoch eine deutliche Reaktion auf die Behandlung, indem die Blätter schlafften (Abb. 68).



**Abb. 68:** Allium cepa nach UV-C Bestrahlung mit  $80 \text{ mWs}\cdot\text{cm}^{-2}$  (links) und  $320 \text{ mWs}\cdot\text{cm}^{-2}$  (rechts); Quelle: KLÄRNER (2016)

Prinzipiell können somit auch höhere Strahlendosen im Bereich bis  $320 \text{ mWs}\cdot\text{cm}^{-2}$  zur Bekämpfung von Phytopathogenen eingesetzt werden. Die Anwendung sollte jedoch dann nur ein- oder zweimalig durchgeführt werden. Für einen periodischen Einsatz sind geringere Strahlendosen zu empfehlen.

## 5.6 Ergebnisse der UV-C Untersuchungen

Da die Ergebnisse des DAS-ELISA Tests in Knoblauchpflanzgut nur eine qualitative Auswertung zuließen, konnten diese Ergebnisse nicht statistisch ausgewertet werden. Ziel war die Überprüfung der Arbeitshypothese „UV-C Licht eliminiert Phytopathogene bei Pflanzgut“. Die Ergebnisse des ELISA wurden im 405 nm Wellenlängenbereich dreimal gemessen. Im Nachgang erfolgte die quantitative Bewertung (Tab. 24).

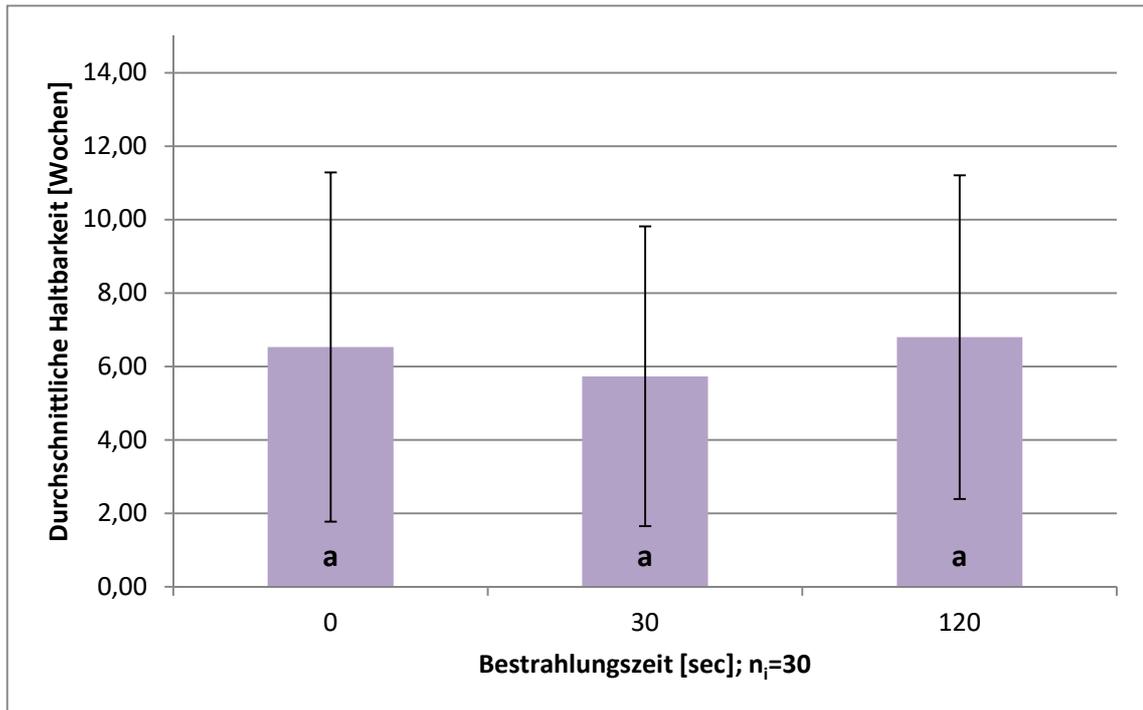
**Tab. 24:** Ergebnisse des DAS-ELISA-Verfahrens zur Testung von OYDV an Knoblauchpflanzgut 2015, Betrieb Hege, Limburgerhof; Messwerte und Bewertung im OD 405 nm Wellenbereich

Variante	Wiederholung	Bestrahlungszeit [sec]	Messwert	Bewertung
1	a	0	0,920	positiv
1	b	0	1,006	positiv
1	c	0	1,020	positiv
2	a	30	0,988	positiv
2	b	30	0,941	positiv
2	c	30	1,054	positiv
3	a	120	0,776	positiv
3	b	120	0,850	positiv
4	c	120	0,983	positiv
Positivkontrolle	-	-	3,476	positiv

OYDV konnte dabei in allen Proben festgestellt werden. Somit muss die Hypothese, dass sich Viren an Pflanzgut mit UV-C Licht eliminieren lassen, an dieser Stelle abgelehnt werden.

Die Boniturbögen der Kürbisse und Speisezwiebeln konnten statistisch ausgewertet werden. In der Arbeitshypothese  $H_A$  wird zunächst davon ausgegangen, dass die UV-C Strahlung keinen Einfluss auf die Lagerfähigkeit der ausgewählten Kulturen hat. Die Nullhypothese  $H_0$

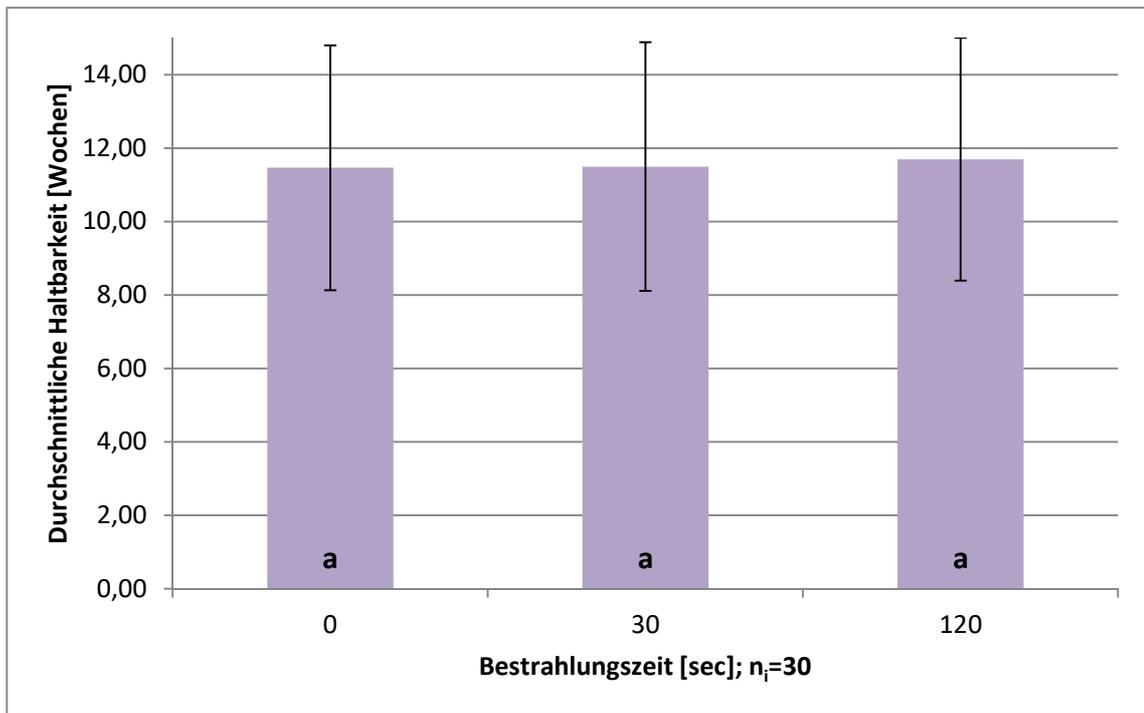
unterstellt somit einen Einfluss der UV-C Strahlung auf die Lagerfähigkeit. Mittels der statistischen Testverfahren gilt es, diese Hypothese zu überprüfen. Zunächst wurden die Daten der Bonitur in Kürbissen auf deren Normalverteilung getestet. Der durchgeführte Shapiro Wilk Test brachte zum Vorschein, dass die Daten nicht normal verteilt waren. Aus diesem Grund mussten parameterfreie Tests verwendet werden. Der Kruskal Wallis Test konnte keinen Mittelwertunterschied auf dem Signifikanzniveau  $\alpha = 5\%$  nachweisen (Abb. 69).



**Abb. 69:** Durchschnittliche Haltbarkeit [Wochen] in Abhängigkeit von der Bestrahlungszeit [sec]; Untersuchung an Speisekürbis 2015, Betrieb Hege, Limburgerhof (a, b: Varianten mit unterschiedlichen Buchstaben sind statistisch unterscheidbar, Mittelwertvergleich nach Kruskal Wallis, Irrtumswahrscheinlichkeit 5%, Fehlerindikatoren geben die Standardabweichung an)

Die durchschnittliche Haltbarkeit betrug bei der Kontrollvariante 6,5 Wochen. Wurden die Kürbisse 30 Sekunden bestrahlt, verkürzte sich die Haltbarkeit auf 5,7 Wochen. Bei einer Bestrahlungszeit von 120 Sekunden betrug die durchschnittliche Haltbarkeit 6,8 Wochen. Neben der durchschnittlichen Haltbarkeit in Wochen wurde die Standardabweichung jeder Variante abgetragen, da die Darstellung der tatsächlichen Streuung in diesem Fall im Vorfeld zu beantworten wäre: minimal 0 Wochen, maximal 13 Wochen.

Die Boniturdaten der Speisezwiebeln konnten ebenfalls statistisch überprüft werden. Auch hier wies der durchgeführte Shapiro Wilk Test keine Normalverteilung der Daten aus. Aus diesem Grund wurde mit parameterfreien Test weiter verfahren. Der durchgeführte Kruskal Wallis Test bestätigte keinen Mittelwertunterschied auf dem Signifikanzniveau  $\alpha = 5\%$  (Abb. 70).



**Abb. 70:** Durchschnittliche Haltbarkeit [Wochen] in Abhängigkeit von der Bestrahlungszeit [sec]; Untersuchung an Speisezwiebeln 2015, Betrieb Hege, Limburgerhof (a, b: Varianten mit unterschiedlichen Buchstaben sind statistisch unterscheidbar, Mittelwertvergleich nach Kruskal Wallis, Irrtumswahrscheinlichkeit 5%, Fehlerindikatoren geben die Standardabweichung an)

Die durchschnittliche Haltbarkeit lag in der Kontrollvariante bei knapp 11,5 Wochen. Auch nach 30 Sekunden Bestrahlung betrug die durchschnittliche Haltbarkeit 11,5 Wochen. Nach 120 Sekunden Behandlung verlängerte sich die durchschnittliche Haltbarkeit auf 11,7 Wochen. Auch bei Speisezwiebeln wurde die Standardabweichung als Konfidenzintervall herangezogen.

Da in beiden Kulturen keine signifikanten Mittelwertunterschiede zu verzeichnen waren, wird die Nullhypothese  $H_0$  an dieser Stelle verworfen. Die Arbeitshypothese  $H_A$ , die keinen Unterschied der Haltbarkeit unterstellte, wird angenommen.

## 6 Diskussion

Ziel der vorliegenden Dissertation war die Entwicklung und Testung einer neuen Anbaugerätesteuerung, basierend auf der GPS-Technik. Im Fokus der Entwicklung stand die Verbesserung des Handlings bei der täglichen Arbeit. Nachdem alle notwendigen Einstellungen vorgenommen wurden, konnte die Technik im Jahr 2015 zum ersten Mal erfolgreich getestet werden. Zudem konnten viele Erfahrungen zur GPS-Technik gesammelt werden, die an dieser Stelle diskutiert werden sollen.

Die anfänglichen Schwierigkeiten der kurvigen Beete im AB-Modus konnten letztlich durch den Einbau eines sechs-Achsen Gyroskops behoben werden. Allerdings zeigten sich bei schnellerer Fahrt immer noch kleinere Kurven, vor allem beim Arbeiten leicht schräg zur Pflugfurche. Da im Gemüsebau jedoch häufig geringe Fahrgeschwindigkeiten gefahren werden (WEBER 1992), äußert sich dieses Problem nur selten. Da der Computer allerdings immer noch langsamer ist, als das menschliche Auge (HANDLER und NADLINGER 2005), empfiehlt sich bei unebenen Flächen ohnehin die Vorarbeit mit der Kreiselegge. Nur so kann die spätere Hackarbeit optimal ausgeführt werden.

Die anfänglichen Spur-zu-Spur Abweichungen von mehr als 5 cm konnten nach Aufbau der neuen Basisstation behoben werden. Obwohl der Hersteller einen Aktionsradius von 30 km vorgibt, scheint das Problem in einer zu langen Baseline begründet zu sein. Untersuchungen aus dem Jahr 2015 bestätigten allerdings, dass selbst bei einem Aktionsradius von knapp 100 km, die gleiche Genauigkeit erzielt werden kann, wie im unmittelbaren Umfeld der Station (BECKER 2015). Innerhalb der Untersuchungen kam es unter ungünstigen Bedingungen allerdings ebenfalls zu Aussetzern. Daher wurde angenommen, dass Rover und Receiver unter ungünstigen Bedingungen nicht mit denselben Satelliten kommunizieren. Da die Fehler während den Untersuchungen im Jahr 2014 und 2015 auch nur auf bestimmten Feldern auftrat, kann die Lösung in dieser Vermutung gesehen werden.

Während der Projektlaufzeit waren zudem viele Aussetzer des Signals zu beobachten. Im Gegensatz zum falschen Spur-zu-Spur Abstand zeigten sich die Ausfälle durch deutliches Ablaufen des Traktors von der Sollspur, obwohl das Terminal noch von einer sehr geringen Abweichung ausging. Laut Hersteller waren diese Aussetzer auf den Abbruch des Mobilfunksignals zurückzuführen. Mit Aufspielen einer neuen Überbrückungssoftware sollte

dieses Problem behoben werden. So war nach Aufspielen der Software eine deutliche Verbesserung spürbar, der Fehler verschwand jedoch nicht ganz. Denkbar sind zwei Begründungen. Zum einen sind noch nicht alle Standorte mit LTE versorgt. Die Technik stellt die Telekommunikation und die mobile Datenübertragung gleich, wodurch ein Abbruch des mobilen Datennetzes bei starker Auslastung durch Telekommunikation nicht mehr vorkommen sollte. Zum anderen empfehlen einige Hersteller die Überbrückungssoftware nicht zum hochgenauen Hacken, da diese noch zu ungenau ist (SBG 2016). Bei unklarer Netzabdeckung kann der Empfang via eigener Funkfrequenz als Lösung dieses Problems dienen (TREIBER-NIEMANN et al. 2013). Somit könnte auch ein Komplettausfall des Mobilfunknetzes, wie am 11.06.2016 (Focus Online 2016), kompensiert werden. Um diesen Fall ausschließen zu können bietet sich ebenfalls eine MULTI-SIM Lösung an.

Die Abweichung des Verschieberahmens von 7 cm in einer Fahrtrichtung konnte bis zum Abschluss der Dissertation nicht erfolgreich gelöst werden. Da der Fehler jeweils nur in einer Fahrtrichtung auftrat und am Anfang der Projektlaufzeit nicht erschien, muss der Fehler in der Software begründet sein. Diese ist auf Grund der Anforderungen in der Landwirtschaft sehr komplex. Durch die Erneuerung der GNSS Systeme oder den Änderungen am Mobilfunknetz, muss die Software ständig angepasst werden. Ab und an verliert sich dadurch ein Fehler. Dieser war jedoch durch die manuelle Eingabe des Faktors zu beheben. Gravierender wäre die unvollständige Beendigung der Untersuchung gewesen, wie es durchaus vorkommen kann (STAUB 2016). Dennoch muss hier nachgebessert werden, um eine breite Akzeptanz innerhalb der Landwirtschaft zu erzielen. Da es sich bei dem Verschieberahmen noch um einen Prototypen gehandelt hat, soll an dieser Stelle erwähnt werden, dass ein guter Service von elementarer Wichtigkeit für die reibungslose Funktion der Technik ist. So bieten einige Hersteller, zu denen auch die Firma REICHHARDT zählt, Servicehotlines oder Fernwartungsmodule an.

Die Verbesserung des Handlings stand im Fokus der Entwicklung dieser Anbaugerätesteuerung. Als Mängelpunkte vorangegangener Untersuchungen wurden der doppelte Anbauaufwand und die zusätzliche Achsbelastung genannt (HEGE 2013; VALENTA 2016). Diese Mängelpunkte konnten ebenfalls bei den durchgeführten Untersuchungen festgestellt werden. Durch die neue Anbaugerätesteuerung konnten der Zeitaufwand und die Achsbelastung praxisüblich gehalten werden. Allerdings wurde während

der Arbeit mit dem Traktor festgestellt, dass eine andere Zusammenfassung der Komponenten sinnvoller gewesen wäre. So bietet es sich an, alle Komponenten der Steuerung auf einer Trägerplatte zu befestigen und diese von einem auf ein anderes Gerät umzusetzen. Einzig der Zylinder müsste dann per Steckkupplung gewechselt werden. Somit könnten unterschiedliche Traktoren verwendet werden. Ebenfalls konnte im Zuge des Projektes keine weitere am Markt befindliche Anbaugerätesteuerung, wie beispielsweise die Scheibensteuerung (SBG 2015), getestet werden. Der Vergleich dieser Steuerung mit der neuen Anbaugerätesteuerung könnte in einem weiteren Projekt nachgeholt werden.

Auch wenn einige Versuchspartzen auf Grund der oben beschriebenen Fehlerquellen nicht ausgewertet werden konnten, so konnte eine vollständige Versuchsreihe in der Kultur Kürbis gefahren werden. Die Ergebnisse bezüglich der Kulturschäden und des Bekämpfungserfolgs decken sich mit den Ergebnissen vorangegangener Untersuchungen (HEGE 2013). So beweisen Kulturschäden von unter einem Prozent durchaus die Genauigkeit des Systems. GRIEPENTROG et al. (2007) bestätigte ebenfalls, dass die Genauigkeit der GPS-Systeme für Arbeit mit der Hacke geeignet ist. HILDEBRANDT (2016) geht jedoch davon aus, dass GPS-basierte Systeme erst zum Hacken geeignet sind, wenn die Anzahl der Satelliten und damit die Genauigkeit zunimmt. Im Vergleich zu kamerabasierten Systemen weist die GPS-Technik allerdings schon heute eine gleichwertige Genauigkeit auf. In Untersuchungen an der Universität Hohenheim konnten teilweise sogar höhere Erträge als bei der Kameravariante generiert werden (KUNZ et al. 2015a).

In der praxisüblichen Variante mit  $3 \text{ km}\cdot\text{h}^{-1}$  Fahrgeschwindigkeit konnten durchschnittliche Kulturschäden mit knapp 7 % ermittelt werden. Werden die drei Fahrgeschwindigkeiten im Durchschnitt betrachtet, so waren ca. 13 % Kulturschäden zu verzeichnen. Dieser Wert liegt 15 % unter den durchschnittlich ermittelten Kulturschäden vorangegangener Untersuchungen (HEGE 2013). Damals wurde jedoch vom großen Spiel der Hacktechnik berichtet. Unter Berücksichtigung dieses Aspektes sind die ermittelten Kulturschäden realistisch, denn bei den sehr kleinen Sicherheitsabständen von unter 3 cm, muss die Hacktechnik absolut spielfrei sein (BOLTEN und WILHELM 2011). Weiterhin muss bei der Arbeit mit der Hacke berücksichtigt werden, dass Kürbis nur einreihig gesät wird. Dies bedeutet beim Fahren in der praxisüblichen Variante, dass diese Reihe exakt über den Mittelpunkt des Traktors anzuvisieren ist, was die Genauigkeit verbessert. Weiterhin muss der Bodentyp berücksichtigt

werden. Die vorliegende Bodenart während der Untersuchungen war Sand, wohingegen vorangegangene Untersuchungen auf Schluff durchgeführt wurden (HEGE 2013). Dieser Bodentyp bietet den Werkzeugen einen größeren Widerstand, weshalb sich Senken in den Fahrspuren oder Wellen im Beet schneller auf die natürliche Abdrift der Anbaugeräte auswirken.

Um die Berechnungen vergleichbar zu gestalten, wurden die Daten des KTBL (2013) angepasst. Dabei ergaben sich vor allem beim Kürbisanbau größere Abweichungen zu den Daten des KTBL. Allerdings unterscheiden sich die Daten des KTBL (2013) und die Erfahrungswerte von BECK (2009). Würde von einem Arbeitszeitbedarf von 4,17 Stunden je Hektar zum Hacken der Kürbisse ausgegangen werden, so ließe sich dieser Wert um knapp 310 % reduzieren, wenn mit der Anbaugerätesteuerung gefahren wird. Da die Fahrgeschwindigkeit jedoch nur um 300 % steigt, kann diese Steigerung nicht erzielt werden. Die Anpassung hat zudem den Vorteil, dass die Änderung in Relation auftritt. Besitzt der Praxisbetrieb beispielsweise eine andere Spurweite, so ändern sich die Kosten in nur in geringem Umfang und die Änderung bleibt fast identisch. Beim Anbau von Kürbissen im Direktsaatverfahren würde eine Steigerung auf 2 m Spurweite lediglich eine zusätzliche Kostensenkung von  $3 \text{ €} \cdot \text{ha}^{-1}$  bewirken. Dies erlaubt eine universelle Beurteilung. Noch mehr Flächenleistung wäre an dieser Stelle nur durch eine größere Arbeitsbreite möglich (HEGE 2013). Da die vorhandene Hacktechnik auf den Betrieben jedoch weiter genutzt werden soll, fand dieser Aspekt bei den Berechnungen keine Berücksichtigung. Sollte der Betrieb eine Grundausrüstung der GPS-Technik erwerben, wenn bisher noch keine Lenkautomaten im Betrieb installiert wurden, so sind hierfür bereits Amortisationsrechnungen durchgeführt worden (HEGE 2012).

Neben den Daten für den Arbeitsgang „Hacken“, wurden auch die Arbeitskraftstunden für die Handhacke angepasst. Das KTBL weist knapp  $20 \text{ Akh} \cdot \text{ha}^{-1}$  aus. Laut Beck (2009) sind je Zentimeter unbearbeiteter Fläche jedoch  $10 \text{ Akh} \cdot \text{ha}^{-1}$  nötig. Dies deckt sich mit den Erfahrungen des Betriebs Hege. BECK gibt weiterhin einen Sicherheitsabstand zur Reihe zwischen 5 cm und 10 cm an. Somit entsteht ein unbearbeitetes Band zwischen 10 cm und 20 cm je Kulturreihe. Daraus ergeben sich zwischen 100 und  $200 \text{ Akh} \cdot \text{ha}^{-1}$  je Kulturreihe. So liegen die Daten des KTBL (2013) für die Kultur Speisewiebeln mit  $450 \text{ Akh} \cdot \text{ha}^{-1}$  und sechs Reihen Zwiebeln auch näher an obiger Faustformel. Somit ist die Umrechnung auf ein 10 cm

breites Band mit  $100 \text{ Akh} \cdot \text{ha}^{-1}$  vertretbar. Weiterhin muss bei einem ganzheitlichen Segetalpflanzenmanagement eine sorgfältige Regulation der Restunkräuter erfolgen (SCHLAGHECKEN 2013). Dies führt bei langer, feuchter Witterung und ständigen Niederschlägen dazu, dass mehrere Durchgänge für die Handjäte benötigt werden. Dieser Aspekt wurde vor allem im Jahr 2016 deutlich. Andererseits versprechen Werkzeuge wie die Finger- oder Torsionshacke eine effiziente Regulation der Wildkräuter in der Reihe (BRAUN 2011). In den durchgeführten Untersuchungen führte die Fingerhacke durch das Aufschieben des Erde-Beikraut-Gemischs jedoch häufiger zu Schäden als zu Erfolgen (s. Kapitel 3.6).

Aus den Berechnungen geht ebenfalls hervor, dass das Jäten einer Kulturreihe weitaus weniger Handarbeitsstunden benötigt, als das Jäten mehrerer Reihen. Dies bedeutet, die unbearbeitete Fläche nimmt mit der Reihenanzahl zu. Aus diesem Grund amortisiert sich die Investition schneller, jedoch nicht proportional. Betrachtet man die Amortisationsflächen der Kulturen, so trägt sich die Investition beim ökologischen Speisezwiebelanbau nach ca. 4 ha und beim ökologischen Speisekürbisanbau nach ca. 6 ha. Einzig der ökologische Speisekürbisanbau auf Mulchfolie liegt bei ca. 30 ha. Zum einen liegt dies in den nicht vorhandenen Kulturschäden begründet. Zum anderen müssen die Foliekosten von ca.  $950 \text{ €} \cdot \text{ha}^{-1}$  berücksichtigt werden. Da der Kürbis auf Grund der Folieauflage teilweise jedoch auch ein besseres Wachstum erzielt, kann an dieser Stelle nicht pauschal die Aussage getroffen werden, den Mulchfolieanbau zu Gunsten der Direktsaat zu ersetzen.

Die Darstellung der Kulturschäden und des Bekämpfungserfolgs erfolgte nicht, wie in der Statistik üblich, im Konfidenzintervall der Standardabweichung (KÖHLER et al. 2007). Um die Ausreißer der Verfahren besser vergleichen zu können, wurden hier jeweils die Extrempunkte gewählt. So kann es bei der üblichen Darstellung der Standardabweichung dazu kommen, dass das Konfidenzintervall der Fehlerbalken beispielsweise 5 % beträgt. Ein Verfahren verursacht jedoch im Maximum 30 % Kulturschäden ein anderes System jedoch nur 20 % Schäden. Für den Anbauer ist dieser Unterschied von 10 % Kulturschäden ein entscheidender Kostenfaktor. Weiterhin von Interesse ist dann auch, wie oft dieses Maximum erreicht wird. Zu diesem Zweck müssten dynamische Tests durchgeführt werden. Dies ist jedoch nur unter kontrollierten Bedingungen, wie beispielsweise der Teststrecke der DLG möglich. Ein Beispiel der Darstellung ist der Bekämpfungserfolg des 1. Hackdurchgangs 2015. Hierbei nahm der Bedeckungsgrad der Segetalpflanzen teilweise um bis zu 100 % zu.

In der Statistik wäre ein Konfidenzintervall von knapp 50 % für die Standardabweichung der Varianten errechnet worden. Entscheidet der Anwender nun, dass er seine Fläche noch nicht bearbeitet, da die Zunahme der Wildkrautblattfläche somit nur knapp 40 % beträgt, so kann es an einigen Stellen im Feld schwierig werden die Segetalpflanzen zu bekämpfen, da diese dann zu groß geworden sind. So geben LABER (1999) und WEBER (1997) eine Segetalpflanzengröße von < 5 Blattstadium an, um die Pflanzen noch effizient regulieren zu können.

Bei den Untersuchungen zur UV-C Technik konnten sowohl beim Knoblauchpflanzgut als auch bei der Behandlung von Lagergemüse keine signifikanten Mittelwertunterschiede analysiert werden.

Der Onion Yellow Dwarf Virus konnte auch bei einer Bestrahlungsdosis von  $17.400 \text{ mWs} \cdot \text{cm}^{-2}$  nachgewiesen werden. Zwei Gründe für dieses Ergebnis sind denkbar. Zum einen konnte die kurzwellige Strahlung nicht tief genug eindringen, um den phytopathogenen Erreger zu eliminieren (TURTOI 2013; UV-TECHNIK MEYER GMBH 2016). Ebenso kann die Strahlendosis für den Erreger zu niedrig gewesen sein. Wichtig wären hierbei weiterführende Forschungen, um die notwendige Strahlendosis zu ermitteln. Zu beachten ist, dass die Testung für jeden Mikroorganismus separat durchgeführt werden muss (CHARLES und ARUL 2007).

Neben den zwei genannten Gründen könnte auch die Oberflächenbeschaffenheit der zu bestrahlenden Frucht für ein Minderergebnis von Bedeutung sein. So lassen sich Mikroorganismen auf einer weichen, glatten Oberfläche leichter behandeln als auf einer harten, rauen Oberfläche (BUCHNER 2012). Da die Schale des Knoblauchs jedoch glatt ist, sollte dieser als ideale Frucht angesehen werden. Da Kürbisse eine relativ raue Oberfläche aufweisen, könnte dies die Ergebnisse des Lagerversuchs erklären. Ebenso könnte der Abstand zur Zielfläche zu groß gewesen sein, sodass die Strahlendosis dort zu gering war (BUCHNER 2012). Weiterhin muss die trocken, warme Witterung des Jahres 2015 berücksichtigt werden. Da fast keine Niederschläge zu verzeichnen waren und die Kürbisse mittels Tröpfchenbewässerung beregnet wurden, waren die Früchte fast immer trocken. Die Entwicklungsbedingungen für Mikroorganismen waren somit ungünstig. Gleiches gilt für den Anbau der Zwiebeln. Diese wiesen eine höhere Haltbarkeit als im Durchschnitt der letzten 10

Jahre auf. Auch hier war die trockene Witterung zum Zeitpunkt der Abreife zum Vorteil für die lange Lagerung (BECK 2009).

Da die phytopathogen spezifische Strahlungs-dosis mitunter den größten Einfluss auf Erfolg und Misserfolg einer Behandlung besitzt, sollten weitere Forschungsarbeiten zur Bestrahlung von Lagergemüse durchgeführt werden.

## 7 Empfehlungen für weitere Versuche

Auf Grundlage des technischen Fortschritts ist davon auszugehen, dass sich das Segment der aktiven Anbaugerätesteuerung weiter entwickeln wird. Es wird davon ausgegangen, dass vor allem die Verfügbarkeit neuer globaler Positionsbestimmungssysteme zu einer weiteren Verbreitung GPS basierter Hackverfahren beitragen wird (HILDEBRANDT 2016). Getragen wird diese Entwicklung auch durch den vermehrten Einsatz von Hackgeräten und neuen Bearbeitungsverfahren, wie beispielsweise Strip Till. Die in dieser Dissertation ermittelten Ergebnisse beziehen sich auf Untersuchungen im Sonderkulturanbau. Da nur wenige Kulturen und Hackgeräte überprüft werden konnten, sind an dieser Stelle unzählige Kombinationen von Geräten und Kulturarten denkbar. Ebenso ist die Ausweitung auf den Ackerbau und die Implementierung neuer Bearbeitungsverfahren denkbar. Weiterhin beziehen sich die in dieser Dissertation ermittelten Ergebnisse ausschließlich auf den Einsatz von Hackgeräten. Denkbar wären auch Untersuchungen zum gezielteren Einsatz von Pflanzenschutzmitteln. Ebenso sind Varianten aus der Kombination beider Verfahren zur Reduktion des Pflanzenschutzmitteleinsatzes möglich.

Auch der Einsatz der UV-C Technik konnte bisher nur im kleinen Umfang überprüft werden. Daten liegen vor allem im Weinbau vor (BERKELMANN-LÖHNERTZ 2016). Für alle weiteren Kulturen fehlen derartige Erfahrungswerte. Die Vorgehensweise kann dabei frei gewählt und verknüpft werden. Technische Lösungen für den Einsatz in der Praxis müssen ebenso erforscht werden, wie die notwendigen Parameter der Bestrahlung einer Kulturpflanze. Ebenso müssen Langzeiterfahrungen gesammelt werden. Auch ist der Wirkungserfolg je Pathogen zu klären und entsprechend mit bisher durchgeführten Maßnahmen zur Reduktion des Pathogenes zu vergleichen.

### 7.1 Empfehlungen für den Anwender

Während der dreijährigen Laufzeit der Dissertation konnte vielen Praktikern beratend zur Seite gestanden werden. Auf Grundlage dieser Erfahrungswerte sollen in diesem Kapitel einige wichtige Erkenntnisse zusammenfassend dargestellt werden, die sich nicht nur explizit auf die Dissertation beziehen sondern auf den generellen Einsatz der Technik. Grundsätzlich bieten viele Hersteller GPS Hard- und Softwarekomponenten an. Bei der Investition sollte die

Nähe zum nächsten Servicepartner bedacht werden. Einige Hersteller bieten mittlerweile auch Fernwartungsmodule an, sodass der Service von einem weit entfernten Standort durchgeführt werden kann. Zu vergleichen ist die Situation vielmehr mit der Benutzung eines Computers als mit der Benutzung landwirtschaftlicher Geräte. Hier kann im Notfall immer noch geschweißt, gebohrt oder geklebt werden. Streikt jedoch die Software des Lenksystems, da sich ein Fehler aufsummiert hat, so hilft oft nur noch der Laptop eines Servicetechnikers. Wichtig beim Einsatz der GPS-Technik ist, dass die Investition in eine zusätzliche Anbaugerätesteuerung zwingend notwendig ist, wenn mittels GPS gehackt werden soll. Weiterhin empfiehlt sich die Technik auch beim Häufeln oder Pflanzen von Kartoffeln am Hang, da die schweren Dammformgeräte eine Seitendrift entwickeln. Bei neueren Bearbeitungsverfahren, wie Strip Till oder bei der Cultan Düngung findet die Technik ebenfalls ihre Anwendung. Ob in eine GPS- oder Kamerasteuerung investiert werden soll, ist betriebsindividuell zu klären. Ist bereits der Einsatz von GPS gestützten Lenksystemen auf dem Betrieb realisiert, so bietet sich die Investition in eine GPS-gestützte Anbaugerätesteuerung an. Die Vorteile des Systems liegen vor allem in der kulturunabhängigen Arbeitsweise und dem exakten Bearbeiten des Feldes ohne vorher angefertigte Beetstrukturen. Zu beachten ist, dass die Kompatibilität des Systems gewährleistet sein muss. Dies bedeutet, dass die Spuren eines Herstellers nicht mit dem System eines anderen Herstellers ohne weiteres abgefahren werden, da sich die hinterlegten Algorithmen unterscheiden. Für die speziellen Anforderungen im Sonderkulturbereich empfiehlt sich weiterhin die Spurplanung bzw. der Austausch mit dem Bürocomputer. So sind im Ernstfall alle Spuren gesichert und können von einem auf ein anderes Gerät übertragen werden. Auf Grundlage der Ergebnisse kann die neue Anbaugerätesteuerung mit der Genauigkeit der Verschieberahmentchnik mithalten. Zusätzlich bietet sie den Vorteil des verbesserten Handlings. Klar ist jedoch auch, dass die Technik ebenso wie der Verschieberahmen bei Bodenbearbeitungsgeräten mit einem hohen Bodenwiderstand an ihre Grenzen stößt. So sollte keine der beiden technischen Gerätschaften beispielsweise zum Pflügen oder Grubbern eingesetzt werden. Gerade für Pflüge sind spezielle Entwicklungen am Markt verfügbar. Die UV-C Technik befindet sich im landwirtschaftlichen Bereich noch in der Erprobungsphase. Vor allem auf dem Gebiet des Sonderkulturanbaus fehlen langjährige Erfahrungen. Dem Einsatz im eigenen Betrieb stehen jedoch keine Hürden im Weg. Viele Komponenten der Technik lassen sich über den Fachhandel bestellen.

## 8 Zusammenfassung

Das Ziel der vorliegenden Dissertation war die Entwicklung von landtechnischen Lösungskonzepten für ein verbessertes Segetalpflanzen- und Krankheitsmanagement im ökologischen Freilandgemüsebau. Eine neuartige Anbaugerätesteuerung wurde entwickelt und mit der am Markt befindlichen Verschiebrahmentechnik verglichen. Hierzu wurden zwischen 2013 und 2016 mehrere Versuche mit Hackmaschinen auf einem Praxisbetrieb in Rheinland-Pfalz durchgeführt. Dabei sollte die Genauigkeit und das Handling der neuen Steuerung überprüft werden. Nach drei Jahren Versuchszeitraum konnte nachgewiesen werden, dass die neue Steuerung die gleiche Genauigkeit aufwies wie die bisherige Verschieberahmentechnik. Durch die Integration der Steuerung in den Traktor selbst konnte das Handling stark vereinfacht werden. So müssen nicht mehr zwei Geräte gekoppelt werden und die Achsbelastung konnte durch die Verkürzung des Hebelwegs positiv beeinflusst werden. Die Technik eignet sich somit auch für kleinere Traktoren, die vornehmlich im Gemüsebau eingesetzt werden. Die formulierten Hypothesen konnten bestätigt werden.

In einem ökonomischen Vergleich wurde die neue Technik mit den praxisüblichen Verfahren des ökologischen Speisekürbis- und Speisezwiebelanbaus verglichen. Im Speisezwiebelanbau konnten ca. 40 % (Festangestellte) bzw. 65 % (Saisonarbeitskräfte) der Arbeitskraftstunden eingespart werden. Daneben reduzierten sich die Kosten um ca. 60 %, bei gleichzeitiger Steigerung des Ertrags um knapp 6 %. Insgesamt entsteht durch den Einsatz der Technik ein Mehrwert von knapp 4.750 €·ha<sup>-1</sup>, wodurch sich die Investition bei ca. 4 Hektar amortisiert.

Im Speisekürbisanbau muss zwischen dem Direktsaatverfahren und dem Anbau auf Mulchfolie unterschieden werden. Beim Anbau auf Mulchfolie lassen sich ca. 40 % (Festangestellte) bzw. ca. 50 % (Saisonarbeitskräfte) der Arbeitskraftstunden einsparen. Die Kosten konnten um knapp 600 €·ha<sup>-1</sup> reduziert werden. Die Investition rechnet sich somit nach knapp 32 Hektar. Beim Direktsaatverfahren konnte ein Mehrwert von ca. 3.000 €·ha<sup>-1</sup> erzielt werden, wodurch sich die Investition nach knapp 6,5 ha amortisiert.

Weiterhin wurden im Jahr 2015 Untersuchungen zur Behandlung von Lagergemüse und Pflanzgut mit UV-C Strahlung durchgeführt. Ziel war es Phytopathogene Mikroorganismen zu regulieren. Dabei handelte es sich um erste Tastversuche, die keinen signifikanten Einfluss der UV-C Strahlung auf den Virusbefall bzw. die Haltbarkeit der Produkte bestätigten. Die formulierten Hypothesen konnten nicht bestätigt werden.

## 9 Abstract

The aim of this thesis was the development of an agricultural engineering solution concept for an improved weed and disease management in organic field vegetable production. A novel implement steering system was developed and compared with the on the market available shifting frame. For this between 2013 and 2016 several experiments were carried out with hoeing-machines on a vegetable growing farm in Rhineland-Palatinate (Germany). The accuracy and the handling of the new implement steering system should be tested. After three years of trial period it could be proven that the new implement steering has the same accuracy as the previous shifting frame technology. Because of the integration of the implement steering into the tractor itself, the handling could be greatly simplified. So no longer two implements have to be paired and the axle load could be positively influenced by the reduction of the lever distance. The technique is therefore also suitable for smaller tractors, which are primarily used in vegetable production. The formulated hypotheses could be confirmed.

In an economic comparison, the new technology was compared with the practice methods of organic pumpkin and onion production. In the onion growing about 40 % (permanent employees) and 65 % (seasonal workers) of labor hours could be saved. In addition, the costs could be reduced by about 60 %, while the yield could be increased by almost 6 %. Through the use of technology to create a total value added of 4,750 €·ha<sup>-1</sup>. So the investment pays for itself in about 4 hectares.

The pumpkin production need to be distinguished between the direct sowing and the cultivation on mulch layer. When growing on mulch layer between 40 % (permanent employees) and 50 % (seasonal workers) of manual labour could be saved. The costs can be reduced up to 600 €·ha<sup>-1</sup>. The investment pays for itself in 32 hectares. When direct seeding, a value of 3.000 €·ha<sup>-1</sup> can be achieved, whereby the investment is amortized by 6.5 ha.

Further trials for the treatment with UV-C radiation of storage vegetables and seedlings were carried out in 2015. The aim was to regulate phytopathogene microorganisms. These first trials confirmed no significant influence of the UV C radiation to the virus microorganism or shelf life of the products. The formulated hypotheses could not be confirmed.

## Literaturverzeichnis

- AIKING, A.; VERHEIJN, F. (2007): Methods for treating live plants or live plant parts or mushrooms with UV-C light. Angemeldet durch CLEANLIGHT. Anmeldenr: PCT/NL2006/050188. Veröffentlichungsnr: WO 2007/049962 A1.
- ALDENHOFF, S. (2015): Maschinen- und Gerätevorführung für den Spargel- und Beerenanbau. In: Spargel & Erdbeer profi 17. Jahrgang, 2015 (5/2015), S. 54–61.
- AM RLP (2016): Wetterstation - Schifferstadt. Monatsstatistik - Rückblick. Mai 2015. Agrarmeteorologie Rheinland-Pfalz ein Service der Dienstleistungszentren Ländlicher Raum Rheinland-Pfalz. Online verfügbar unter <http://www.am.rlp.de/Internet/AM/NotesAM.nsf/amweb/aea26ec6eb6672cbc1257171002e8a2f?OpenDocument&TableRow=2.7>, zuletzt aktualisiert am 21.01.16 - 14:35 Uhr, zuletzt geprüft am 04.05.2016.
- ARNEGGER, T.; HEGE, D.; WÖBER, M. (2011): Vergleich von TERRA PRETA NOVA® und Kompost zur Aufwertung sandiger Böden. Projektarbeit im Modul Boden und Ernährung. Hochschule RheinMain University of Applied Sciences Fachbereich Geisenheim, Geisenheim. Bodenkunde.
- BECK, M. (2009): Ökologischer Gemüseanbau. Handbuch für Beratung und Praxis. 2. Aufl. Hg. v. Eckhard George. Mainz: Bioland-Verl (Praxis des Ökolandbaus).
- BECKER, M. (2015): Untersuchung der Genauigkeit von RTK-Systemen in Abhängigkeit des Abstandes zwischen Rover und Basisstation. Bachelorthesis. Hochschule Geisenheim, Geisenheim. Institut für Technik.
- BEDLAN, G. (2016): Knoblauch mit Virusbefall. In: Gemüsebaupraxis 23, 2016 (3), S. 14.
- BEDNAR (2016): Auflockern zwischen den Reihen ROW-MASTER RN. BEDNAR FMT s.r.o. Rychnov nad Kněžnou, Tschechische Republik.
- BEESTEN, F. v. (2014): Kameragesteuerte Hacktechnik. Taifun Sojainfo. Fachinformationen für Sojaerzeuger und -verarbeiter. Ausgabe Nr. 3. Unter Mitarbeit von Martin Miersch. Hg. v. Life Food GmbH, Taifun Tofuprodukte. Freiburg.
- BELTZ, H.; BRÜCKNER, U.; KRÜGER-STEDEN, E.; PFLEGER, I.; RÖBER, R.; SOURELL, H. (2010): Bewässerung im Gartenbau. Hg. v. Peter-Jürgen Paschold. Stuttgart (Hohenheim): Ulmer.

- BERKELMANN-LÖHNERTZ, B. (2016): UV C gegen Schwarzfäule: Versuche an Topfreben. In: Der deutsche Weinbau, 15.04.2016 (8), S. 12–15.
- BERKELMANN-LÖHNERTZ, B.; KLÄRNER, S.; FLEMMING, B.; KEICHER, R.; SCHWARZ, H.-P. (2013): UV C-Bestrahlung von Reben. In: Schweizer Zeitschrift für Obst- und Weinbau, 2013 (21), S. 4–6.
- BERKELMANN-LÖHNERTZ, B.; KLÄRNER, S.; FLEMMING, B.; SCHWARZ, H.-P.; KEICHER, R.; PFLIEHINGER, M. et al. (2015): Results of two consecutive years on mould prevention in viticulture by means of UV C application of vines (*Vitis vinifera* L.). In: BIO Web of Conferences 5.
- BMEL (2013): Nationaler Aktionsplan zur nachhaltigen Anwendung von Pflanzenschutzmitteln. Hg. v. Bundesministerium für Ernährung, Landwirtschaft und Verbraucherschutz. Bonn.
- BMELV (2008): Nachhaltigkeit konkret. Nachhaltigkeitskonzept des Bundesministeriums für Ernährung, Landwirtschaft und Verbraucherschutz. Hg. v. Bundesministerium für Ernährung, Landwirtschaft und Verbraucherschutz. Berlin.
- BÖHRNSEN, A. (2001): Automatisches Lenksystem von Eco-Dan: Kamera steuert Hackmaschine. In: profi, 2001 (8/01), S. 60–62.
- BOLTEN, W.; WILHELM, B. (2011): Auf dem Weg zur Präzisionshacke – Beikrautregulierung mit der Scharhacke in Gemüsekulturen. Landtechnische Lösungen zur Beikrautregulierung im Ökolandbau. Berichte aus Forschung und Praxis. Hg. v. K. Becker und B. Wilhelm. Witzenhausen: Univ. Kassel, Fachgebiet Agrartechnik.
- BÖLW e.V. (2010): Strategiepapier zu Kupfer als Pflanzenschutzmittel unter besonderer Berücksichtigung des Ökologischen Landbaus. Bund Ökologische Lebensmittelwirtschaft. Berlin.
- BRAUN, A. (2011): Die Torsionshacke - ein Gerät zur Beikrautregulierung in der Reihe. Landtechnische Lösungen zur Beikrautregulierung im Ökolandbau. Berichte aus Forschung und Praxis. Hg. v. K. Becker und B. Wilhelm. Witzenhausen: Univ. Kassel, Fachgebiet Agrartechnik.
- BUCHNER, N. S. (2012): Verpackung von Lebensmitteln/lebensmitteltechnologische, verpackungstechnologische und mikrobiologische Grundlagen. Berlin [u.a]: Springer.
- BUDDE, M.; DAMEROW, L. (2013): Der Einfluss thermischer Strahlung auf Blätter und pilzliche Schaderreger. In: Landtechnik 68, 2013 (6), S. 411–414.

- BUNDESINSTITUT FÜR RISIKOBEWERTUNG (2012): Lebensmittelhygiene: UV-C Behandlung ist zur Keimreduzierung auf Schaleiern geeignet. Stellungnahme Nr. 019/2014 des BfR vom 16.11.2012.
- BUNDESMINISTERIUM FÜR GESUNDHEIT (2000): Verordnung über die Behandlung Von Lebensmitteln mit Elektronen-, Gamma- und Röntgenstrahlen, Neutronen oder ultravioletten Strahlen (Lebensmittelbestrahlungsverordnung - LMBestrV). LMBestrV. In: Amtsblatt der Europäischen Gemeinschaften.
- BURGER, W.; BURGE, M. J. (2005): Digitale Bildverarbeitung: Eine Einführung mit Java und ImageJ. Berlin, Heidelberg: Springer.
- BVL (2013): Berichte zur Lebensmittelsicherheit 2011. Monitoring : Gemeinsamer Bericht des Bundes und der Länder. Hg. v. Bundesamt für Verbraucherschutz und Lebensmittelsicherheit. Basel (BVL-Reporte).
- CARBONIT Filtertechnik GmbH; LAGOTEC GmbH (Hg.) (2007): Ultraviolette Strahlung. Fakten und Hintergründe. 1. Auflage. Salzwedel.
- CARRÉ (2015): ANATIS. The robotic in support of the environmental friendly agriculture! The only robot for hoeing and aid with decision making. Online verfügbar unter <http://www.carre.fr/en/our-news/415-anatis-robot-for-hoeing-and-aid-with-decision-making.html>, zuletzt geprüft am 26.08.2016
- CHARLES, M. T.; ARUL, J. (2007): UV treatment of fresh fruits and vegetables for improved quality. A status report. In: Stewart Postharvest Review 3 (3), S. 1–8.
- CINA, A.; DABOVE, P.; MANZINO, A. M.; PIRAS, M. (2012): New Approach of Indoor and Outdoor Localization Systems. Network Real Time Kinematic (NRTK) Positioning-Description, Architectures und Performances. Chapter 2. Unter Mitarbeit von Fouzia Boukour Elbahhar und Atika Rivenq; Verlag: InTechOpen
- DEEPFIELD ROBOTICS (2015a): BoniRob. A Multi-Functional Agricultural Robot. Unter Mitarbeit von Rüdiger Kliefken. Hg. v. Robert Bosch Start-up GmbH. Renningen.
- DEEPFIELD ROBOTICS (2015b): Deepfield 4D-scan. A system for automated field testing. Unter Mitarbeit von Rüdiger Kliefken. Hg. v. Robert Bosch Start-up GmbH. Renningen.
- DEEPFIELD ROBOTICS (2015c): Deepfield Weeding. Selective Weed Control. Unter Mitarbeit von Rüdiger Kliefken. Hg. v. Robert Bosch Start-up GmbH. Renningen.

- DEUTSCHER BUNDESTAG (2012): Gesetz zum Schutz der Kulturpflanzen (Pflanzenschutzgesetz). PflSchG.
- DIERAUER, H. (2000): Merkblatt Abflammen. Hg. v. Forschungsinstitut für biologischen Landbau (FiBL). Frick, Schweiz.
- DOWNES, A.; BLUNT, T. P. (1878): On the Influence of Light upon Protoplasm. London, Vereinigtes Königreich (Proceedings of the Royal Society London, 28).
- DUBBEL, H.; FELDHUSEN, J.; GROTE, K.-H. (2007): Dubbel. Taschenbuch für den Maschinenbau. 22. neubearbeitete und erweiterte Auflage. Berlin, Heidelberg: Springer.
- ECO-DAN (2013): Automatic Precision Guidance. ECO-DAN A/S. Bøgeskovvej 6, Kvistgaard Denmark.
- EDER, J. (2015): Jäter und Sammler. In: traction, 2015 (Mai/Juni), S. 74–78.
- EICHBERG, T.; MÜLLER, S. (2001): Mit Feuer und Hacke gegen Melde & Hirse. In: dlG-test.de, 2001 (1/2001), S. 24–27.
- ERBRECHT, R.; FELSCH, M.; KÖNIG, H.; KRICKE, W.; MARTIN, K.; PFEIL, W. (2003): Das grosse Tafelwerk interaktiv. Ein Tabellen- und Formelwerk für den mathematisch-naturwissenschaftlichen Unterricht in den Sekundarstufen I und II ; [Mathematik, Informatik, Astronomie, Physik, Chemie, Biologie ; für das Abitur empfohlen]. Unter Mitarbeit von Jan-Holger Gründler, Lutz Kasper, Christina Schwalm, Claudia Seidel und Girit Weber. 1. Auflage. Berlin: Cornelsen; Volk-und-Wissen-Verlag.
- EUROPÄISCHES PARLAMENT (1999a): RICHTLINIE 1999/2/EG DES EUROPÄISCHEN PARLAMENTS UND DES RATES vom 22. Februar 1999 zur Angleichung der Rechtsvorschriften der Mitgliedstaaten über mit ionisierenden Strahlen behandelte Lebensmittel und Lebensmittelbestandteile. RICHTLINIE 1999/2/EG. In: Amtsblatt der Europäischen Gemeinschaften.
- EUROPÄISCHES PARLAMENT (1999b): RICHTLINIE 1999/3/EG DES EUROPÄISCHEN PARLAMENTS UND DES RATES vom 22. Februar 1999 über die Festlegung einer Gemeinschaftsliste von mit ionisierenden Strahlen behandelten Lebensmitteln und Lebensmittelbestandteilen. RICHTLINIE 1999/3/EG. In: Amtsblatt der Europäischen Gemeinschaften.

EUROPÄISCHES PARLAMENT (2006): RICHTLINIE 2006/25/EG DES

EUROPÄISCHEN PARLAMENTS UND DES RATES vom 5. April 2006 über Mindestvorschriften zum Schutz von Sicherheit und Gesundheit der Arbeitnehmer vor der Gefährdung durch physikalische Einwirkungen (künstliche optische Strahlung). (19. Einzelrichtlinie im Sinne des Artikels 16 Absatz 1 der Richtlinie 89/391/EWG). Richtlinie 2006/25/EG. In: Amtsblatt der Europäischen Gemeinschaften.

EUROPÄISCHES PARLAMENT (23.04.2009): RICHTLINIE DER KOMMISSION

2009/37/EG vom 23. April 2009 zur Änderung der Richtlinie 91/414/EWG des Rates zwecks Aufnahme der Wirkstoffe Chlormequat, Kupferverbindungen, Propaquizafop, Quizalofop-P, Teflubenzuron und Zeta-Cypermethrin. In: Amtsblatt der Europäischen Union (L104/23).

EUROPÄISCHES PARLAMENT (23.11.2009): RICHTLINIE 2009/128/EG DES

EUROPÄISCHEN PARLAMENTS UND DES RATES vom 21. Oktober 2009 über einen Aktionsrahmen der Gemeinschaft für die nachhaltige Verwendung von Pestiziden. In: Amtsblatt der Europäischen Union (L 309/71).

FOCUS ONLINE (Hg.) (2016): Festnetz und Mobilfunk. Telekom-Netzstörungen in

Zahlreichen Großstädten behoben. Online verfügbar unter

[http://www.focus.de/digital/handy/festnetz-und-mobilfunk-betroffen-telekom-netzstoerungen-in-zahlreichen-grossstaedten\\_id\\_5618692.html](http://www.focus.de/digital/handy/festnetz-und-mobilfunk-betroffen-telekom-netzstoerungen-in-zahlreichen-grossstaedten_id_5618692.html), zuletzt aktualisiert am 11.06.2016 Uhr, zuletzt geprüft am 06.08.2016.

FORSCHUNGSUNION WIRTSCHAFT – WISSENSCHAFT (Hg.) (2013): Deutschlands

Zukunft als Produktionsstandort sichern. Umsetzungsempfehlungen für das Zukunftsprojekt Industrie 4.0. Abschlussbericht des Arbeitskreises Industrie 4.0. Unter Mitarbeit von Prof. Dr. Henning Kagermann, Prof. Dr. Wolfgang Wahlster und Dr. Johannes Helbig. Promotorengruppe Kommunikation. Frankfurt/Main.

GARFORD (2016): ROBOCROP. präzisionsgeführte Hochgeschwindigkeitshacken. Garford Farm Machinery Ltd. Peterborough PE6 8 RP, England.

GAUL, T. (2016): Agritechnica: Technik für Gemüseprofis. In: gartenbau profi 104.

Jahrgang, 2016 (1/16), S. 32–34.

GELDERMANN, J. (2015): UV-C-Strahlen gegen Dickeya? In: Kartoffelbau 66, 2015 (11), S. 23–25.

- GEO-KONZEPT (2015): GPS-gestützter Verschieberahmen. Lenksystem für Anbaugeräte. geo-konzept - Gesellschaft für Umweltplanungssysteme mbH. Adelschlag.
- GKN (2013): Traktor-Anbau-System TAS. Einfach Ankuppeln-flexibel, schnell und wirtschaftlich. Hg. v. GKN Walterscheid GmbH. Lohmar.
- GRÄF, V.; MÜLLER, A.; BUTZ, P.; GREINER, R. (2014): Nicht-thermische Verfahren: Haltbarmachung von Lebensmitteln am Beispiel der UV-C- und Hochdruckbehandlung. In: GIT: Labor-Fachzeitschrift 58, 2014 (7), S. 42–44.
- GRIEPENTROG, H.-W.; NOERREMARK, M.; NIELSEN, J.; IBARRA, J. (2007): Autonomous Inter-Row Hoeing using GPS-based side-shift Control. Copenhagen University, Taastrup-Denmark. Faculty of Life Science, Dept. of Agricultural Sciences.
- GUDE, J. M. (2012): Wirksamkeit der Unkrautbekämpfung mittels Laser in Abhängigkeit verschiedener biologischer und technisch-physikalischer Parameter. Dissertation. Rheinische Friedrich-Wilhelms-Universität Bonn, Bonn. Landwirtschaftliche Fakultät.
- HAMM, M.; KLÄRNER, S.; STOLL, M.; BERKELMANN-LÖHNERTZ, B. (2016): UV-C gegen Schwarzfäule: Versuche an Topfreben. In: Der deutsche Weinbau, 15.04.2016 (8), S. 12–15.
- HANDLER, F.; NADLINGER, M. (2005): Technische, arbeits- und betriebswirtschaftliche Aspekte der automatischen Lenkung von Hackgeräten. Hg. v. HBLFA Francisco Josephinum. BLT Biomass - Logistics - Technology. Wieselburg, Österreich (Projektbericht).
- HARDER, H. (2003): Bodenbearbeitung und Unkrautregulierung im Ökologischen Landbau. KTBL-Tagung und Workshop vom 13.-14. November 2002 in Kassel. Münster-Hiltrup: Landwirtschaftsverl. (KTBL-Schrift, 416).
- HARKE, R.; AGSTEN, K.; WOURTSAKIS, A. (1991): Bodenkarte von Rheinland Pfalz 1:25000. Blatt 6516 Mannheim-Südwest. Unter Mitarbeit von Jochen Ottenstein und Hans-Dieter Scheer. Hg. v. Geologisches Landesamt Rheinland-Pfalz. Mainz.
- HARTGE, K. H.; HORN, R. (1989): Die physikalische Untersuchung von Böden. 2. Aufl. Stuttgart: Enke.
- HEGE, D. (2012): Einsparpotenziale im Freilandgemüsebau durch den Einsatz eines GPS Lenkautomaten (RTK) unter Berücksichtigung der Minimalkostenkombination. Bachelorthesis. Hochschule Geisenheim University, Geisenheim. Institut für Technik.

- HEGE, D. (2013): Möglichkeiten der Effizienzsteigerung bei der mechanischen Segetalpflanzenbekämpfung in Speisezwiebeln und Spinat, durch den Einsatz von GPS. Masterthesis. Hochschule Geisenheim, Geisenheim. Institut für Technik.
- HEGE, D. (2015): Landwirtschaftliches Zugsystem Positionsbestimmungssystem zum Steuern von Anbaugeräten. Angemeldet durch Hege, Walter am 29.07.2015. Anmeldenr: 20 2015 005 363.7. Veröffentlichungsnr: DE 20 2015 005 363 U1.
- HILBERT, M.; LÓPEZ, P. (2011): The world's technological capacity to store, communicate, and compute information. In: Science (New York, N.Y.) 332 (6025), S. 60–65.
- HILDEBRANDT, E.-A. (2016): Automatisches Hacken wird immer präziser. Hackmaschinentag auf Hofgut Marienborn bei Büdingen. In: Das Landwirtschaftliche Wochenblatt LW, Der Landbote für Rheinhessen und die Pfalz 225, 2016 (24/2016), S. 22–23.
- K.U.L.T (2015): Kamera Steuerungen. Kress umweltschonende Landtechnik GmbH. Vaihingen an der Enz.
- KEICHER, R. (2002): Bestandsorientierte automatische Nachführung landwirtschaftlicher Arbeitsmaschinen in Reihenkulturen mit Hilfe der digitalen Bildverarbeitung. Dissertation. Justus-Liebig-Universität, Gießen. Institut für Landtechnik.
- KESSEL, G. T.; FÖRCH, M. G. (2006): Effect of UV - exposure on germination of sporangia of *Phytophthora infestans*. Plant Research International B.V., Wageningen.
- KIRCHHOFF, C.; DÜLKES, A. (2015): Optische Steuerung. Stand der Technik - Ausblick in die Zukunft. Grünberger Gemüsebautage 2015. Bundesfachgruppe Gemüsebau im Zentralverband Gartenbau (ZVG), 2015.
- KLÄRNER, S. (2016): Informationen zu UV-C, 08.03.2016. Email an Daniel Hege.
- KÖBER, K. (2015): UV C-Technologie auf Sportplätzen? In: TASPO GaLaBauReport, 14.08.2015 (33), S. 3.
- KÖHLER, W.; SCHACHTEL, G. A.; VOLESKE, P. (2007): Biostatistik. [eine Einführung für Biologen und Agrarwissenschaftler] 4. Aufl. Berlin, Heidelberg, New York: Springer.
- KRAUTHAUSEN, H.-J. (2016): Info JKI Knoblauch, 12.08.2016. Email an Daniel Hege.
- KTBL (Hg.) (2009): Gartenbau. Produktionsverfahren planen und kalkulieren. Unter Mitarbeit von Till Belau. 1. Aufl. Darmstadt: KTBL (KTBL-Datensammlung).

- KTBL (Hg.) (2013): Ökologischer Feldgemüsebau. Betriebswirtschaftliche und produktionstechnische Kalkulationen. Unter Mitarbeit von Till Belau. Darmstadt: Kuratorium für Technik und Bauwesen in der Landwirtschaft (KTBL-Datensammlung).
- KUBOTA (2015): Kubota Einzelkornsämaschine. MP1000 Serie. Präzise Vereinzellung und Saatgutplazierung. Kubota (Deutschland) GmbH. Rodgau/Nieder Roden.
- KUNZ, C.; SCHRÖLLKAMP, C.; KOCH, H.-J.; EBER, C.; SCHULZE LAMMERS, P.; GERHARDS, R. (2015a): Potentials of post-emergent mechanical weed control in sugar beet to reduce herbicide inputs. In: Landtechnik - Agricultural Engineering Bd. 70, 2015 (Nr. 3), S. 67–81.
- KUNZ, C.; WEBER, J.; GERHARDS, R. (2015b): Benefits of Precision Farming Technologies for Mechanical Weed Control in Soybean and Sugar Beet-Comparison of Precision Hoeing with Conventional Mechanical Weed Control. In: Agronomy 5, 2015 (2), S. 130–142.
- KVERNELAND GROUP (2014): UNICORN - Precision in all soil conditions. Online Verfügbar unter <http://ien.vicon.eu/News/Product-News/Archive-2014/UNICORN-Precision-in-all-soil-conditions>, zuletzt geprüft am 11.03.2016.
- LABER, H. (1999): Effizienz mechanischer Unkrautregulationsmaßnahmen im Freilandgemüsebau. Dissertation. Universität Hannover. Fachbereich Gartenbau.
- LANDES, A.; KRUSCHE, M. (2014): Unkrautbekämpfung in Petersilie ohne Afalon der AK-Lück- Ergebnisse 2000 - 2013. Bundesberatertagung Gemüsebau. Fachgruppe Gemüsebau im Zentralverband Gartenbau. Grünberg, 11.03.2014.
- LEMMENS, M. (2012): GNSS Positioning - Status and Features. In: GIM International Volume 26 (10), S. 18–25.
- LIENHART, W. (2007): Aktuelle Entwicklungen in der satellitengestützten Positionierung. GNSS-RTCM-RTK. Leica Geosystems, 2007.
- MARX, C.; BARCIKOWSKI, S.; HUSTEDT, M.; HAFERKAMP, H.; RATH, T. (2012): Untersuchungen zur Absorption und Applikation von Laserstrahlung zur Unkrautbekämpfung. In: Biosystems Engineering 67, 2012 (2), S. 95–101.
- MICHAELS, A.; HAUG, S.; ALBERT, A. (2015): Vision-Based High-Speed Manipulation For Robotic Ultra-Precise Weed Control. IEEE/RSJ International Conference on Intelligent Robots and Systems; IROS. Congress Center Hamburg, 28.09.2015.

- MÖLLER, J. (2010): Computer vision - A technology in automation of agriculture machinery. 21th Annual Meeting - EIMA International. Club of Bologna. Bologna-Italien, 2010.
- MÜCKE, M. (2012): Innovationen in der mechanischen Unkrautbekämpfung. 47. Grünberger Gemüsebautage. Landwirtschaftskammer Niedersachsen. Grünberg, 2012.
- MÜCKE, M. (2013): Innovationen: Mechanische Unkrautregulierung. In: gartenbau profi 101. Jahrgang, 2013 (4), S. 34–36.
- MÜLLER, J. (2015): ELISA Testung, 25.02.2015. Email an Daniel Hege.
- NAWROTH, P. (2002): Mechanische Unkrautregulierung in landwirtschaftlichen Reihenkulturen ohne Eingriff in das Bodengefüge. Freising: Wiss.-Zentrum Weihenstephan für Ernährung, Landnutzung und Umwelt der TU München (Forschungsbericht Agrartechnik des Arbeitskreises Forschung und Lehre der Max-Eyth-Gesellschaft (MEG) / hrsg. von der Max-Eyth-Gesellschaft Agrartechnik im VDI, Arbeitskreis "Forschung und Lehre", 382).
- OTTENSTEIN, J.; AGSTEN, K.; WOURTSAKIS, A. (1986): Bodenkarte von Rheinland Pfalz 1:25000. Blatt 6616 Speyer. Unter Mitarbeit von Rolf Harke und Hans-Dieter Scheer. Hg. v. Geologisches Landesamt Rheinland-Pfalz. Mainz.
- PEREZ-RUIZ, M.; UPADHYAYA, S. K. (2012): New Approach of Indoor and Outdoor Localization Systems. GNSS in Precision Agricultural Operations. Chapter 1. Unter Mitarbeit von Fouzia Boukour Elbahhar und Atika Rivenq; Verlag: InTechOpen
- POULSEN (2016): ROBOVATOR. F. Poulsen Engineering ApS. Hvalsoe, Denmark. Online verfügbar unter <http://www.fp-engin.dk/>, zuletzt geprüft am 26.08.2016.
- REICHHARDT (2014): Automatische Anbaugeräte-Lenkung PSR Slide. Reichhardt GmbH Steuerungstechnik. Hungen.
- REICHHARDT (2015a): Der Schlüssel zu günstigen RTK-Korrekturen. RTK CLUE. Reichhardt GmbH Steuerungstechnik. Hungen.
- REICHHARDT (2015b): Für alle Fahrzeuge und Anbaugeräte PSR Lenksysteme. Reichhardt GmbH Steuerungstechnik. Hungen.
- REIDENBACH, H. D. (2013): Leitfaden "Ultraviolettstrahlung künstlicher Quellen". Unter Mitarbeit von Martin Brose, Hauke Brüggemeyer, Klaus Dollinger, Ma Graf, Werner Horak, Hermann Jossen et al. Hg. v. Fachverband für Strahlenschutz e.V. Arbeitskreis "Nichtionisierende Strahlung". Köln.

- RITTER, J. W.; BERG, H.; RICHTER, K. (1986): Entdeckungen zur Elektrochemie, Bioelektrochemie und Photochemie. 1. Aufl. Leipzig: Geest & Portig (Ostwalds Klassiker der exakten Wissenschaften, Bd. 271).
- ROLF, K. H. (2010): Minimization of fertilizer and pesticide usage by stereo camera steering systems. Green Vision – Driving Factor for a Green Future. CLAAS E-Systems KGaA mbH & Co KG. Messe Stuttgart, November 2010.
- ROLLER, S. (2015): Gittersaat wirkt besser gegen Unkräuter. In: Flur und Furche (Juni 2015), S. 22.
- RUCKELSHAUSEN, A. (2010): Erste Feldversuche mit dem autonomen Feldroboter Boni-Rob. Fachhochschule Osnabrück, Osnabrück. Fakultät Agrarwissenschaften und Landschaftsarchitektur.
- RUCKELSHAUSEN, A.; RAHE, F. (2010): Autonome Fahrzeuge. Selbstständige Helfer. In: Neue Landwirtschaft, 2010 (6/2010), S. 40–42.
- SBG (2015): Produktübersicht 2016. GPS-Anwendungen von SBG - Einfacher Zugriff auf mehr Effizienz. Traktorlenkung - Teilbreitenschaltung - Pfluglenkung - TWIN Geräteleitung - Planieren. SBG precision farming. Middenmeer, Niederlande.
- SBG (2016): TWIN Anbaugerätesteuerung. Middenmeer, Niederlande, 21.06.2016. Email an Daniel Hege.
- SCHLAGHECKEN, J. (2013): Giftige Unkräuter. In: gartenbau profi 101. Jahrgang, 2013 (4/2013), S. 30.
- SCHMIDT, G. (2010): Bodenarten. Hg. v. Sachgebiet Bodenuntersuchung. Landwirtschaftliches Technologiezentrum Augustenberg. Karlsruhe.
- SCHMOTZER (2015a): Hacktechnik. Maschinenfabrik Schmotzer GmbH. Bad Windsheim.
- SCHMOTZER (2015b): Kamerasbasierte Steuerung für Hackgeräte. Präzises Hacken mit hoher Flächenleistung dank Kameragesteuertem Seitenverschub. Maschinenfabrik Schmotzer GmbH. Bad Windsheim.
- SCHÜGERL, K. (1997): Bioreaktionstechnik. Bioprozesse mit Mikroorganismen und Zellen : Prozessüberwachung. Basel, Boston: Birkhäuser.
- SCHULZ, S. (2015a): Becher contra Riemen. Unter Mitarbeit von: Stefan Tovornik. In: profi, 2015 (10/2015), S. 26–31.
- SCHULZ, S. (2015b): Kverneland GeoSeed. In Reih und Glied. In: profi, 2015 (05/2015), S. 66–67.

- SENTKER, A. (2014): Ernten via Satellit. Wie die moderne Landwirtschaft versucht, die Erträge zu steigern und gleichzeitig die Böden zu schonen. In: Die Zeit, 2014 (04/14).
- SETZEPFAND, E. (2016): Ohne Pflanzenschutz kein Kartoffelanbau in Deutschland. Interview mit Georg Riede. In: Das Landwirtschaftliche Wochenblatt LW, Der Landbote für Rheinhessen und die Pfalz, 21.01.2016 (3), S. 51.
- STAUB, S. (2016): Precision Farming Technologies for Mechanical Weed control in sugar beets. Comparison of different intra-row hoeing strategies in precision hoeing. Masterthesis. Universität Hohenheim, Hohenheim. Institut für Phytomedizin und Herbologie.
- STEINBERGER, P.; HAUSCHILF, A.; MONTENBRUCK, O.; HUGENTOBLER, U. (2013): Galileo, Compass und QZSS: Aktueller Stand der neuen Satellitennavigationssysteme. In: zfv – Zeitschrift für Geodäsie, Geoinformation und Landmanagement 138. Jg., 2013 (1/2013), S. 53–59.
- STEINMÜLLER, J. (2008): Bildanalyse. Von der Bildverarbeitung zur räumlichen Interpretation von Bildern. Berlin, Heidelberg: Springer (EXamen.press).
- STEKETEE (2013): STEKETEE IC Automatische hackgerät. IC ist das automatische Hack-Gerät von STEKETEE, das mithilfe von Kamerabildern sorgfältig und genau herum die Pflanzen hackt. Machinefabriek STEKETEE BV. LA Stad ann 't Haringvliet, Niederlande.
- STEKETEE (2015): Tausenfüßler im Pflanzenschutz. Machinefabriek STEKETEE kann Ihnen dank eines intelligenten Konzepts eine professionell maßarbeitete Lösung anbieten! Machinefabriek STEKETEE BV. LA Stad ann 't Haringvliet, Niederlande.
- SUNCO (2015): Acura Trak 3G Operator's Manual. Sunco™ Marketing Farm Equipment. North Platte, NE 69101, Vereinigte Staaten.
- TREIBER-NIEMANN, H.; SCHWAIBERGER, R.; FRÖBA, N.; KLOEPFER, F. (2013): Parallelfahrssysteme. 2. Auflage. Darmstadt: KTBL (KTBL-Heft, 96).
- TURTOI, M. (2013): Ultraviolet light treatment of fresh fruits and vegetables surface: A review. In: Journal of Agroalimentary Processes and Technologies 19, 2013 (3), S. 325–337.
- UV-TECHNIK MEYER GMBH (2016): UV BOOK. Produktübersicht. Ortenberg.
- VALENTA, M. (2016): Auf den Zentimeter genau Hacken. In: gartenbau profi 104, 2016 (9), S. 26–28.

- VAN HEMELRIJCK, W.; VAN LAER, S.; HOEKSTRA, S.; AIKING, A.; CREEMERS, P. (2010): UV-c radiation as an alternative tool to control powdery mildew on apple and strawberry. Proceedings for the Eco-fruit conference from February 22nd to February 24th, 2010 at the University of Hohenheim, Germany; 14th International Conference on Organic Fruit-Growing. Weinsberg: Fördergemeinschaft Ökologischer Obstbau.
- WAGNER (2014): Preisliste 2013/2014. Verschieberahmen für universelle Anwendungen. Neue Generation. Wagner Pflanzen-Technik GmbH. Friedelsheim.
- WANNINGER, L. (2006): Präzise Positionsbestimmung in Netzen von GNSS-Referenzstationen. In: Festschrift 125 Jahre Geodäsie und Geoinformatik, Wissenschaftliche Arbeiten der Fachrichtung Geodäsie und Geoinformatik der Leibniz Universität Hannover, 2006 (Nr. 263), S. 313–320.
- WATSON, J. D.; Crick; F.H.C. (1953): Molecular Structure of Nucleic Acids: A Structure for Deoxyribose Nucleic Acid. In: Nature Vol. 171, 1953 (4356), S. 737–738.
- WEBER, H. (1992): Mechanische Unkrautbekämpfung: Untersuchungen zur Arbeitsweise und Wirkung der Reihenhackbürste. Diplomarbeit. TU München - Weihenstephan. Institut für Landtechnik.
- WEBER, H. (1997): Geräte- und verfahrenstechnische Optimierung der mechanischen Unkrautregulierung in Beetkulturen. Freising: Inst. für Landtechnik (Forschungsbericht Agrartechnik des Arbeitskreises Forschung und Lehre der Max-Eyth-Gesellschaft Agrartechnik im VDI (VDI-MEG), 315).
- WILBOIS, K.-P.; SCHWAB, A.; FISCHER, H.; BACHINGER, J.; PALME, S.; PETERS, H.; DONGUS, S. (2004): Leitfaden für Praxisversuche. Eine Anleitung zur Planung, Durchführung und Auswertung von Praxisversuchen. Hg. v. FiBL Deutschland e.V.
- WILDFELLNER, F. (1990): Mechanische Unkrautbekämpfung. Mit Marktübersicht der Geräte. Wien: ÖKL (Landtechnische Schriftenreihe, 170).
- ZÄH, M. (2015): Mit Licht gegen PSSR-Viren. In: profi, 2015 (10), S. 86–88.

## **Anhang**

Der Anhang der vorliegenden Dissertation liegt auf Grundlage seines großen Umfangs in digitaler Form als CD-ROM bei bzw. ist als digitaler Anhang auf dem Server der Justus-Liebig-Universität Gießen für Hochschulschriften abzurufen.

Die Gießener Elektronische Bibliothek (GEB) ist unter <http://geb.uni-giessen.de/geb> zu erreichen.

## Danksagung

Während der dreijährigen Projektlaufzeit dieser Dissertation hatte ich die Möglichkeit mit vielen Menschen interessante Gespräche und Ideen auszutauschen. An dieser Stelle möchte ich mich hiermit bei all diesen Gesprächspartnern für den konstruktiven Austausch von Erfahrungen revanchieren. Einigen dieser Menschen gebührt hiermit ein ganz besonderer Dank, für die langjährige Unterstützung.

An erster Stelle möchte ich mich gerne bei meiner Familie bedanken. Meine Frau, meine Eltern und Geschwister standen mir bei all meinen Ideen immer tatkräftig zur Seite und haben mir den nötigen Rückhalt und den zeitlichen Freiraum für die Verwirklichung dieser Ideen verschafft.

Des Weiteren ist das Team des Instituts für Technik der Hochschule Geisenheim zu nennen. Besonders gebührt mein Dank Herrn Prof. Dr. Schwarz, der immer mit Rat und Tat zur Seite stand und mir die Möglichkeit dieser Dissertation geboten hat. Weiterhin möchte ich mich bei Herrn Dr. Keicher und Herrn Müller für die langjährige Zusammenarbeit erkenntlich zeigen.

Ebenso gebührt dem Team des Queckbrunnerhofs ein herzlicher Dank. Hier sind vor allem Herr Dr. Weinheimer und Herr Bauer zu nennen, die mich vor allem durch die vielen angenehmen und fachlichen Dialoge geprägt haben. Ich bedanke mich nochmals recht herzlich für die Möglichkeiten, meine Ideen vorführen zu dürfen.

Für die konstruktive und sehr angenehme Zusammenarbeit, sowie das zur Verfügung stellen der Lizenzen, möchte ich mich an dieser Stelle bei Herrn Theobald, der Pfalzmarkt eG, bedanken.

Ein weiteres Dankeschön gebührt dem Team der Firma Reichhardt Steuerungstechnik GmbH. Hier ist allen voran die Familie Reichhardt zu nennen, bei der ich mich für die Bereitstellung der Testmaschinen erkenntlich zeigen will.

Für die ausgezeichnete Betreuung und Beratung bei der Erstellung der Patentschrift ist an dieser Stelle das Team der Kanzlei Müller-Boré & Partner hervorzuheben. Ein besonderer Dank gebührt dabei Herrn Dr. Hock und Herrn Haydn.

## Eidesstattliche Erklärung

Gemäß der Promotionsordnung des Fachbereichs 09 der Justus-Liebig-Universität Gießen vom 07. Juli 2004 § 17 (2) erkläre ich hiermit wahrheitsgemäß, dass ich

- die vorgelegte Dissertation selbständig und ohne unerlaubte fremde Hilfsmittel angefertigt habe,
- nur die im Literaturverzeichnis aufgeführten Hilfsmittel benutzt und fremdes Gedankengut als solches kenntlich gemacht habe,
- alle Personen und Institutionen, die mich bei der Vorbereitung und Anfertigung der Abhandlung unterstützt haben, genannt habe,
- die von mir durchgeführten und in der Dissertation erwähnten Untersuchungen gemäß den Grundsätzen guter wissenschaftlicher Praxis, wie sie in der „Satzung der Justus-Liebig-Universität Gießen zur Sicherung guter wissenschaftlicher Praxis“ niedergelegt sind, eingehalten habe und
- die Arbeit noch keiner anderen Stelle zur Prüfung vorgelegt habe

---

Ort, Datum

---

Unterschrift (Vor- und Zuname)

# Anhang

---

## Verzeichnis des Anhangs

Anhang I:	Patentierung der innovativen Anbaugerätesteuerung.....	A 4
Anhang II:	Messwerte Spur-zu-Spur Winterzwiebeln 2014.....	A 5
Anhang III:	Messwerte Spur-zu-Spur Knoblauch 2014.....	A 6
Anhang IV:	Bodenfeuchtemessungen .....	A 6
Anhang V:	Bonitur BKE 2014 .....	A 7
Anhang VI:	Shapiro-Wilk Test BKE 2014 1. Durchgang.....	A 8
Anhang VII:	Levene Test BKE 2014 1. Durchgang.....	A 9
Anhang VIII:	Shapiro-Wilk Test BKE 2014 2. Durchgang.....	A 9
Anhang IX:	Levene Test BKE 2014 2. Durchgang.....	A 10
Anhang X:	Shapiro-Wilk Test BKE 2014 kumuliert.....	A 11
Anhang XI:	Anova BKE 2014 1. Durchgang.....	A 12
Anhang XII:	Anova BKE 2014 2. Durchgang.....	A 13
Anhang XIII:	Kruskal Wallis Test BKE 2014 kumuliert.....	A 13
Anhang XIV:	Bonitur BKE 2015 .....	A 14
Anhang XV:	Shapiro Wilk Test BKE 2015 1. Durchgang .....	A 15
Anhang XVI:	Shapiro Wilk Test BKE 2015 2. Durchgang .....	A 15
Anhang XVII:	Shapiro Wilk Test BKE 2015 kumuliert .....	A 15
Anhang XVIII:	Levene Test BKE 2015 1. Durchgang.....	A 16
Anhang XIX:	Levene Test BKE 2015 2. Durchgang.....	A 16
Anhang XX:	Levene Test BKE 2015 1. kumuliert.....	A 16
Anhang XXI:	Kruskal Wallis Test BKE 2015 1. Durchgang .....	A 17
Anhang XXII:	Kruskal Wallis Test BKE 2015 2. Durchgang .....	A 17
Anhang XXIII:	Kruskal Wallis Test BKE 2015 kumuliert.....	A 17
Anhang XXIV:	Wilcoxon Test BKE 2015 1. Durchgang:.....	A 17
Anhang XXV:	Bonitur BKE 2016.....	A 18
Anhang XXVI:	Shapiro-Wilk Test BKE 2016 1. Durchgang.....	A 19
Anhang XXVII:	Levene Test BKE 2016 1. Durchgang.....	A 20
Anhang XXVIII:	Shapiro-Wilk Test BKE 2016 2. Durchgang.....	A 20
Anhang XXIX:	Levene Test BKE 2016 2. Durchgang.....	A 21
Anhang XXX:	Shapiro-Wilk Test BKE 2016 kumuliert.....	A 21

---

Anhang XXXI:	Levene Test BKE 2016 kumuliert.....	A 22
Anhang XXXII:	Kruskal Wallis Test BKE 2016 1. Durchgang .....	A 22
Anhang XXXIII:	Kruskal Wallis Test BKE 2016 2. Durchgang .....	A 23
Anhang XXXIV:	Einfaktorielle Anova BKE 2016 kumuliert.....	A 23
Anhang XXXV:	Bonitur Kulturschäden 2014.....	A 24
Anhang XXXVI:	Shapiro-Wilk Test Kulturschäden 2014 1. Durchgang .....	A 25
Anhang XXXVII:	Shapiro-Wilk Test Kulturschäden 2014 2. Durchgang .....	A 25
Anhang XXXVIII:	Shapiro-Wilk Test Kulturschäden 2014 kumuliert.....	A 26
Anhang XXXIX:	Levene Test Kulturschäden 2014 1. Durchgang .....	A 26
Anhang XL:	Levene Test Kulturschäden 2014 2. Durchgang .....	A 26
Anhang XLI:	Levene Test Kulturschäden 2014 kumuliert.....	A 27
Anhang XLII:	Kruskal-Wallis Test Kulturschäden 2014 1. Durchgang.....	A 27
Anhang XLIII:	Kruskal-Wallis Test Kulturschäden 2014 2. Durchgang.....	A 27
Anhang XLIV:	Kruskal-Wallis Test Kulturschäden 2014 kumuliert.....	A 28
Anhang XLV:	Wilcoxon Test Kulturschäden 2014 1. Durchgang .....	A 28
Anhang XLVI:	Wilcoxon Test Kulturschäden 2014 2. Durchgang .....	A 28
Anhang XLVII:	Wilcoxon Test Kulturschäden 2014 kumuliert.....	A 29
Anhang XLVIII:	Bonitur Kulturschäden 2015.....	A 30
Anhang XLIX:	Shapiro-Wilk Test Kulturschäden 2015 1. Durchgang .....	A 30
Anhang L:	Shapiro-Wilk Test Kulturschäden 2015 2. Durchgang .....	A 31
Anhang LI:	Shapiro-Wilk Test Kulturschäden 2015 kumuliert.....	A 31
Anhang LII:	Levene Test Kulturschäden 2015 1. Durchgang .....	A 31
Anhang LIII:	Levene Test Kulturschäden 2015 2. Durchgang .....	A 32
Anhang LIV:	Levene Test Kulturschäden Pflanzen 2015 kumuliert.....	A 32
Anhang LV:	Kruskal Wallis Test Kulturschäden 2015 1. Durchgang .....	A 33
Anhang LVI:	Kruskal Wallis Test Kulturschäden 2015 2. Durchgang .....	A 33
Anhang LVII:	Kruskal Wallis Test Kulturschäden 2015 kumuliert .....	A 33
Anhang LVIII:	Wilcoxon Test Kulturschäden 2015 1. Durchgang .....	A 33
Anhang LIX:	Wilcoxon Test Kulturschäden 2015 2. Durchgang .....	A 34
Anhang LX:	Wilcoxon Test Kulturschäden 2015 kumuliert.....	A 34
Anhang LXI:	Bonitur Kulturschäden 2016.....	A 35
Anhang LXII:	Shapiro-Wilk Test Kulturschäden 2016 1. Durchgang .....	A 35

---

---

Anhang LXIII:	Shapiro-Wilk Test Kulturschäden 2016 2. Durchgang .....	A 36
Anhang LXIV:	Shapiro-Wilk Test Kulturschäden 2016 kumuliert.....	A 37
Anhang LXV:	Levene Test Kulturschäden 2016 1. Durchgang .....	A 38
Anhang LXVI:	Levene Test Kulturschäden 2016 2. Durchgang .....	A 39
Anhang LXVII:	Levene Test Kulturschäden 2016 kumuliert.....	A 39
Anhang LXVIII:	Kruskal Wallis Test Kulturschäden 2016 1. Durchgang .....	A 39
Anhang LXIX:	Kruskal Wallis Test Kulturschäden 2016 2. Durchgang .....	A 40
Anhang LXX:	Kruskal Wallis Test Kulturschäden 2016 kumuliert .....	A 40
Anhang LXXI:	Wilcoxon Test Kulturschäden 2016 1. Durchgang .....	A 40
Anhang LXXII:	Wilcoxon Test Kulturschäden 2016 2. Durchgang .....	A 40
Anhang LXXIII:	Wilcoxon Test Kulturschäden 2016 kumuliert.....	A 41
Anhang LXXIV:	Bonitur Haltbarkeit Kürbis und Zwiebeln.....	A 42
Anhang LXXV:	Shapiro-Wilk Test Kürbis.....	A 43
Anhang LXXVI:	Levene Test Kürbis.....	A 43
Anhang LXXVII:	Kruskal-Wallis Test Kürbis .....	A 43
Anhang LXXVIII:	Shapiro-Wilk Test Zwiebeln .....	A 44
Anhang LXXIX:	Levene Test Zwiebeln .....	A 44
Anhang LXXX:	Kruskal-Wallis Test Zwiebeln.....	A 44
Anhang LXXXI:	Shapiro-Wilk Test Zwiebeln .....	A 45
Anhang LXXXII:	Levene Test Zwiebeln .....	A 45
Anhang LXXXIII:	Kruskal-Wallis Test Zwiebeln.....	A 45

Anhang I: Patentierung der innovativen Anbaugerätsteuerung

Da die Anbaugerätsteuerung so noch nicht am Markt erhältlich war, wurde die Erfindung als Patent angemeldet. Bis dato wurde ein Gebrauchsmuster angemeldet und erteilt (HEGE 2015). Daneben wurde ein deutsches Patent angemeldet und eine PCT Anmeldung durchgeführt.

Anhang II: Messwerte Spur-zu-Spur Winterzwiebeln 2014



## Anhang III: Messwerte Spur-zu-Spur Knoblauch 2014

Beet x zu y	Messwert	Abweichung		Fahrspur	Abweichung
6 zu 1	190	-10	1. Tag	1	0
1 zu 2	205	5		2	5
2 zu 11	200	0		3	-1,5
11 zu 10	207	7		4	-1,5
10 zu 9	185	-15		5	0
8 zu 7	197	-3		6	-10
5 zu 7	200	0	2. Start	7	0
4 zu 5	200	0		8	-3
3 zu 4	197	-3	2. Tag	9	-7,5
				10	-7,5
1 zu 2	205	5		11	7
3 zu 4	197	-3			
4 zu 5	200	0			
6 zu 1	190	-10			
8 zu 7	197	-3			
10 zu 9	185	-15			
11 zu 10	207	7			

## Anhang IV: Bodenfeuchtemessungen

Datum	Gewicht feuchter Boden [g]	Gewicht trockener Boden [g]	Volumen Wasser [ml]	Bodenfeuchte [Vol.-%]
14.06.2014	50	47,8	0,0327	3,3
18.06.2014	50	48,1	0,0280	2,8
31.05.2015	50	46,5	0,0534	5,3
03.06.2015	50	45,3	0,0737	7,4
11.06.2015	50	47,5	0,0374	3,7
21.05.2016	50	47,9	0,0311	3,1
11.06.2016	50	45,7	0,0668	6,7

## Anhang V: Bonitur BKE 2014

Var	Variante	Wdh	Blattfläche bevor	Blattfläche nach 1. Hackdurchgang	BKE [%]	Blattfläche nach 2. Hackdurchgang	BKE [%]	BKE kumuliert [%]
Var.1	1 a		583,14	221,26	62,06	52,92	76,08	90,93
Var.1	1 b		345,21	48,72	85,89	31,01	36,35	91,02
Var.1	1 c		608,54	249,99	58,92	29,55	88,18	95,14
Var.1	1 d		426,59	55,04	87,10	16,54	69,95	96,12
Var.2	2 a		1104,47	370,38	66,47	132,58	64,20	88,00
Var.2	2 b		337,91	63,42	81,23	11,82	81,36	96,50
Var.2	2 c		639,04	80,79	87,36	27,63	65,80	95,68
Var.2	2 d		422,49	144,36	65,83	39,48	72,65	90,65
Var.3	3 a		825,91	224,16	72,86	28,42	87,32	96,56
Var.3	3 b		1145,00	84,77	92,60	23,43	72,36	97,95
Var.3	3 c		456,95	257,15	43,73	24,23	90,58	94,70
Var.3	3 d		222,22	36,57	83,54	11,80	67,73	94,69
Var.4	4 a		805,17	203,93	74,67	78,51	61,50	90,25
Var.4	4 b		461,26	59,92	87,01	55,96	6,62	87,87
Var.4	4 c		1328,98	802,30	39,63	67,64	91,57	94,91
Var.4	4 d		259,03	76,73	70,38	17,52	77,17	93,24
Var.5	5 a		615,93	110,30	82,09	21,06	80,91	96,58
Var.5	5 b		373,17	34,38	90,79	13,63	60,36	96,35
Var.5	5 c		416,16	180,11	56,72	71,96	60,05	82,71
Var.5	5 d		259,05	182,99	29,36	26,34	85,61	89,83
Var.6	6 a		262,13	118,53	54,78	20,99	82,29	91,99
Var.6	6 b		714,11	75,72	89,40	56,10	25,91	92,14
Var.6	6 c		1298,26	408,13	68,56	44,73	89,04	96,55
Var.6	6 d		320,75	79,17	75,32	34,72	56,14	89,17
Var.7	7 a		355,42	65,49	81,58	18,23	72,16	94,87
Var.7	7 b		12,42	2,71	78,19	1,57	41,99	87,35
Var.7	7 c		1133,17	692,92	38,85	68,24	90,15	93,98
Var.7	7 d		1046,94	93,27	91,09	38,44	58,78	96,33
Var.8	8 a		125,59	36,64	70,83	11,27	69,23	91,02
Var.8	8 b		33,81	21,93	35,15	2,53	88,44	92,50
Var.8	8 c		309,20	117,63	61,96	28,75	75,56	90,70
Var.8	8 d		149,04	24,67	83,45	6,21	74,83	95,83
Var.9	9 a		74,33	29,21	60,70	3,77	87,10	94,93
Var.9	9 b		406,69	30,54	92,49	11,11	63,62	97,27
Var.9	9 c		291,66	118,75	59,28	24,44	79,42	91,62
Var.9	9 d		121,33	19,12	84,24	1,23	93,58	98,99
Var.10	10 a		304,90	145,37	52,32	33,74	76,79	88,93
Var.10	10 b		311,94	92,24	70,43	14,11	84,71	95,48
Var.10	10 c		829,88	56,04	93,25	8,01	85,71	99,04
Var.10	10 d		517,02	67,10	87,02	24,80	63,04	95,20
Var.10	10 e		349,28	222,58	36,28	8,01	96,40	97,71
Var.10	10 f		264,33	40,70	84,60	9,71	76,15	96,33
Var.10	10 g		142,09	20,77	85,38	4,19	79,82	97,05
Var.10	10 h		180,83	10,26	94,33	2,22	78,41	98,78
Var.10	10 i		153,45	53,71	64,99	21,23	60,48	86,17
Var.10	10 j		124,06	70,45	43,21	31,17	55,76	74,87
Var.10	10 k		244,44	75,24	69,22	3,17	95,78	98,70
Var.10	10 l		316,62	33,00	89,58	2,49	92,44	99,21

## Anhang VI: Shapiro-Wilk Test BKE 2014 1. Durchgang

```
> with(Var1, shapiro.test(BKE....))
      Shapiro-Wilk normality test
data: BKE....
W = 0.7982, p-value = 0.09906
> with(Var2, shapiro.test(BKE....))
      Shapiro-Wilk normality test
data: BKE....
W = 0.8545, p-value = 0.2411
> with(Var3, shapiro.test(BKE....))
      Shapiro-Wilk normality test
data: BKE....
W = 0.925, p-value = 0.5652
> with(Var4, shapiro.test(BKE....))
      Shapiro-Wilk normality test
data: BKE....
W = 0.9103, p-value = 0.4843
> with(Var5, shapiro.test(BKE....))
      Shapiro-Wilk normality test
data: BKE....
W = 0.9394, p-value = 0.6504
> with(Var6, shapiro.test(BKE....))
      Shapiro-Wilk normality test
data: BKE....
W = 0.998, p-value = 0.9935
> with(Var7, shapiro.test(BKE....))
      Shapiro-Wilk normality test
data: BKE....
W = 0.835, p-value = 0.1812
> with(Var8, shapiro.test(BKE....))
      Shapiro-Wilk normality test
data: BKE....
W = 0.957, p-value = 0.7598
> with(Var9, shapiro.test(BKE....))
      Shapiro-Wilk normality test
data: BKE....
W = 0.8511, p-value = 0.2296
```

---

```
> with(Var10, shapiro.test(BKE....))
      Shapiro-Wilk normality test
data:  BKE....
W = 0.8961, p-value = 0.1414
W = 0.8961, p-value = 0.1414
```

#### Anhang VII: Levene Test BKE 2014 1. Durchgang

```
> with(Kürbis, tapply(BKE....., Var, var, na.rm=TRUE))
  Var.1 Var.10 Var.2 Var.3 Var.4 Var.5 Var.6 Var.7 Var.8 Var.9
227.3075 397.3163 116.0971 450.6913 405.4361 765.2018 207.3243 530.8559 418.6937 279.9721
> leveneTest(BKE.... ~ Var, data=Kürbis, center="mean")
Levene's Test for Homogeneity of Variance (center = "mean")
  Df F value Pr(>F)
group 9  0.554 0.8253
  38
```

#### Anhang VIII: Shapiro-Wilk Test BKE 2014 2. Durchgang

```
> with(Var1, shapiro.test(BKE.....1))
      Shapiro-Wilk normality test
data:  BKE.....1
W = 0.9087, p-value = 0.4755
> with(Var2, shapiro.test(BKE.....1))
      Shapiro-Wilk normality test
data:  BKE.....1
W = 0.9123, p-value = 0.4949
> with(Var3, shapiro.test(BKE.....1))
      Shapiro-Wilk normality test
data:  BKE.....1
W = 0.8861, p-value = 0.3653
> with(Var4, shapiro.test(BKE.....1))
      Shapiro-Wilk normality test
data:  BKE.....1
W = 0.8983, p-value = 0.4227
> with(Var5, shapiro.test(BKE.....1))
      Shapiro-Wilk normality test
data:  BKE.....1
```

```

W = 0.8117, p-value = 0.1248
> with(Var6, shapiro.test(BKE.....1))
      Shapiro-Wilk normality test
data:  BKE.....1
W = 0.9217, p-value = 0.5464
> with(Var7, shapiro.test(BKE.....1))
      Shapiro-Wilk normality test
data:  BKE.....1
W = 0.9986, p-value = 0.9957
> with(Var8, shapiro.test(BKE.....1))
      Shapiro-Wilk normality test
data:  BKE.....1
W = 0.8963, p-value = 0.413
> with(Var9, shapiro.test(BKE.....1))
      Shapiro-Wilk normality test
data:  BKE.....1
W = 0.9564, p-value = 0.7564
> with(Var10, shapiro.test(BKE.....1))
      Shapiro-Wilk normality test
data:  BKE.....1
W = 0.9349, p-value = 0.4354

```

## Anhang IX: Levene Test BKE 2014 2. Durchgang

```

> with(Kürbis, tapply(BKE.....1, Var, var, na.rm=TRUE))
  Var.1  Var.10  Var.2  Var.3  Var.4  Var.5  Var.6  Var.7  Var.8  Var.9
492.42631 181.31332  61.11234 124.46354 1380.26205 180.85651 824.08562 416.50447 66.03892
166.61606
> leveneTest(BKE.....1 ~ Var, data=Kürbis, center="mean")
Levene's Test for Homogeneity of Variance (center = "mean")
  Df F value Pr(>F)
group 9  1.9761 0.06986 .
    38
---
Signif. codes:  0 '***' 0.001 '**' 0.01 '*' 0.05 '.' 0.1 ' ' 1

```

## Anhang X: Shapiro-Wilk Test BKE 2014 kumuliert

```
> with(Var1, shapiro.test(BKE.kumuliert....))
```

```
Shapiro-Wilk normality test
```

```
data: BKE.kumuliert....
```

```
W = 0.8163, p-value = 0.1348
```

```
> with(Var2, shapiro.test(BKE.kumuliert....))
```

```
Shapiro-Wilk normality test
```

```
data: BKE.kumuliert....
```

```
W = 0.8995, p-value = 0.4286
```

```
> with(Var3, shapiro.test(BKE.kumuliert....))
```

```
Shapiro-Wilk normality test
```

```
data: BKE.kumuliert....
```

```
W = 0.8641, p-value = 0.2751
```

```
> with(Var4, shapiro.test(BKE.kumuliert....))
```

```
Shapiro-Wilk normality test
```

```
data: BKE.kumuliert....
```

```
W = 0.9693, p-value = 0.8369
```

```
> with(Var5, shapiro.test(BKE.kumuliert....))
```

```
Shapiro-Wilk normality test
```

```
data: BKE.kumuliert....
```

```
W = 0.8718, p-value = 0.3046
```

```
> with(Var6, shapiro.test(BKE.kumuliert....))
```

```
Shapiro-Wilk normality test
```

```
data: BKE.kumuliert....
```

```
W = 0.9321, p-value = 0.6066
```

```
> with(Var7, shapiro.test(BKE.kumuliert....))
```

```
Shapiro-Wilk normality test
```

```
data: BKE.kumuliert....
```

```
W = 0.8425, p-value = 0.2029
```

```
> with(Var8, shapiro.test(BKE.kumuliert....))
```

```
Shapiro-Wilk normality test
```

```
data: BKE.kumuliert....
```

```
W = 0.8617, p-value = 0.2663
```

```
> with(Var9, shapiro.test(BKE.kumuliert....))
```

```
Shapiro-Wilk normality test
```

```
data: BKE.kumuliert....
```

```
W = 0.9745, p-value = 0.8691
```

---

```
> with(Var10, shapiro.test(BKE.kumuliert....))
```

```
    Shapiro-Wilk normality test
```

```
data: BKE.kumuliert....
```

```
W = 0.7355, p-value = 0.001894
```

Anhang XI:           Anova BKE 2014 1. Durchgang

```
> AnovaModel.1 <- aov(BKE.... ~ Var, data=Kürbis)
```

```
> summary(AnovaModel.1)
```

```
      Df Sum Sq Mean Sq F value Pr(>F)
```

```
Var      9  656   72.9  0.19 0.994
```

```
Residuals 38 14575  383.6
```

```
1 observation deleted due to missingness
```

```
> with(Kürbis, numSummary(BKE....., groups=Var, statistics=c("mean", "sd")))
```

```
      mean    sd data:n
```

```
Var.1 73.49068 15.07672  4
```

```
Var.10 72.55093 19.93279 12
```

```
Var.2 75.22139 10.77484  4
```

```
Var.3 73.18158 21.22949  4
```

```
Var.4 67.92262 20.13544  4
```

```
Var.5 64.73996 27.66228  4
```

```
Var.6 72.01455 14.39876  4
```

```
Var.7 72.42631 23.04031  4
```

```
Var.8 62.84636 20.46201  4
```

```
Var.9 74.17918 16.73237  4
```

## Anhang XII: Anova BKE 2014 2. Durchgang

```

> AnovaModel.2 <- aov(BKE.....1 ~ Var, data=Kürbis)
> summary(AnovaModel.2)
      Df Sum Sq Mean Sq F value Pr(>F)
Var      9  2363  262.5   0.76 0.653
Residuals 38 13132  345.6

1 observation deleted due to missingness
> with(Kürbis, numSummary(BKE.....1, groups=Var, statistics=c("mean", "sd")))
      mean      sd data:n
Var.1 67.64073 22.190681    4
Var.10 78.79177 13.465263   12
Var.2  71.00588  7.817438    4
Var.3  79.49694 11.156323    4
Var.4  59.21527 37.151878    4
Var.5  71.73075 13.448290    4
Var.6  63.34533 28.706892    4
Var.7  65.77231 20.408441    4
Var.8  77.01475  8.126434    4
Var.9  80.93021 12.907984    4

```

## Anhang XIII: Kruskal Wallis Test BKE 2014 kumuliert

```

> with(Kürbis, tapply(BKE.kumuliert..., Var, median, na.rm=TRUE))
Var.1 Var.10 Var.2 Var.3 Var.4 Var.5 Var.6 Var.7 Var.8 Var.9
93.08123 96.68942 93.16591 95.62801 91.74341 93.09067 92.06811 94.42443 91.76417 96.09951
> kruskal.test(BKE.kumuliert.... ~ Var, data=Kürbis)

Kruskal-Wallis rank sum test

data: BKE.kumuliert.... by Var
Kruskal-Wallis chi-squared = 8.2823, df = 9, p-value = 0.506

```

## Anhang XIV: Bonitur BKE 2015

Var	Variante	Wdh	Blattfläche bevor	Blattfläche nach 1. Hackdurchgang	BKE [%]	Blattfläche vor 2. Hackdurchgang	Blattfläche nach 2. Hackdurchgang	BKE [%]	BKE kumuliert [%]
Var.1	1 a		33,70	49,13	-45,80	597,25	2,78	99,53	91,74
Var.1	1 b		20,26	35,24	-73,95	311,99	1,63	99,48	91,96
Var.1	1 c		3,83	3,98	-4,02	35,66	1,42	96,01	62,82
Var.1	1 d		61,19	29,98	51,00	330,31	20,87	93,68	65,89
Var.1	1 e		39,77	50,41	-26,77	473,96	0,27	99,94	99,33
Var.1	1 f		46,15	24,98	45,87	332,50	12,14	96,35	73,70
Var.1	1 g		38,84	19,66	49,38	231,06	1,97	99,15	94,93
Var.1	1 h		38,20	23,64	38,13	237,54	8,39	96,47	78,03
Var.1	1 i		71,13	92,15	-29,55	619,70	3,63	99,41	94,89
Var.1	1 j		46,83	23,00	50,89	238,53	1,97	99,17	95,79
Var.1	1 k		78,28	45,79	41,50	391,67	21,38	94,54	72,69
Var.1	1 l		33,59	8,58	74,47	180,80	7,79	95,69	76,80
Var.2	2 a		10,24	12,82	-25,27	279,12	0,02	99,99	99,77
Var.2	2 b		37,99	46,10	-21,35	555,06	16,94	96,95	55,40
Var.2	2 c		21,90	12,92	41,02	151,57	13,74	90,93	37,25
Var.2	2 d		5,83	12,23	-109,78	145,95	1,11	99,24	80,99
Var.2	2 e		9,99	8,04	19,57	44,78	0,25	99,44	97,51
Var.2	2 f		34,88	34,04	2,41	526,50	0,08	99,99	99,78
Var.2	2 g		50,37	35,43	29,66	641,69	41,88	93,47	16,85
Var.2	2 h		37,78	33,28	11,91	485,11	0,03	99,99	99,93
Var.2	2 i		40,72	9,73	76,11	72,11	3,86	94,64	90,51
Var.2	2 j		54,78	31,24	42,99	551,69	11,27	97,96	79,44
Var.2	2 k		44,58	57,03	-27,92	915,48	18,06	98,03	59,48
Var.2	2 l		103,18	59,54	42,29	943,01	6,03	99,36	94,16
Var.3	3 a		37,14	12,20	67,17	265,18	23,55	91,12	36,60
Var.3	3 b		30,39	21,92	27,89	349,46	3,07	99,12	89,91
Var.3	3 c		20,68	24,05	-16,31	264,88	9,24	96,51	55,33
Var.3	3 d		6,07	9,06	-49,30	37,45	5,46	85,42	10,06
Var.3	3 e		31,90	15,26	52,18	95,87	6,28	93,45	80,33
Var.3	3 f		23,69	6,13	74,13	139,44	1,19	99,15	94,99
Var.3	3 g		58,08	26,06	55,13	345,00	24,11	93,01	58,48
Var.3	3 h		31,31	9,69	69,04	258,92	0,01	100,00	99,98
Var.3	3 i		32,98	10,07	69,46	228,89	30,44	86,70	7,69
Var.3	3 j		32,23	4,29	86,69	68,71	0,38	99,45	98,84
Var.3	3 k		32,23	17,04	47,13	107,29	7,98	92,56	75,24
Var.3	3 l		35,32	9,24	73,84	129,26	1,95	98,49	94,49

---

**Anhang XV: Shapiro Wilk Test BKE 2015 1. Durchgang**

```
> with(Var1, shapiro.test(BKE....))
      Shapiro-Wilk normality test
data: BKE....
W = 0.88289, p-value = 0.09546
> with(Var2, shapiro.test(BKE....))
      Shapiro-Wilk normality test
data: BKE....
W = 0.91417, p-value = 0.2412
> with(Var3, shapiro.test(BKE....))
      Shapiro-Wilk normality test
data: BKE....
W = 0.80297, p-value = 0.01013
```

**Anhang XVI: Shapiro Wilk Test BKE 2015 2. Durchgang**

```
> with(Var1, shapiro.test(BKE.....1))
      Shapiro-Wilk normality test
data: BKE.....1
W = 0.86521, p-value = 0.05685
> with(Var2, shapiro.test(BKE.....1))
      Shapiro-Wilk normality test
data: BKE.....1
W = 0.82328, p-value = 0.01745
> with(Var3, shapiro.test(BKE.....1))
      Shapiro-Wilk normality test
data: BKE.....1
W = 0.88739, p-value = 0.1091
```

**Anhang XVII: Shapiro Wilk Test BKE 2015 kumuliert**

```
> with(Var1, shapiro.test(BKE.kumuliert....))
      Shapiro-Wilk normality test
data: BKE.kumuliert....
W = 0.89084, p-value = 0.1208
> with(Var2, shapiro.test(BKE.kumuliert....))
      Shapiro-Wilk normality test
data: BKE.kumuliert....
W = 0.84343, p-value = 0.03049
```

---

```
> with(Var3, shapiro.test(BKE.kumuliert....))
```

```
Shapiro-Wilk normality test
```

```
data: BKE.kumuliert....
```

```
W = 0.86269, p-value = 0.05284
```

#### Anhang XVIII: Levene Test BKE 2015 1. Durchgang

```
> with(Kürbis15, tapply(BKE....., Var, var, na.rm=TRUE))
```

```
Var.1 Var.2 Var.3
```

```
2289.718 2353.731 1651.334
```

```
> leveneTest(BKE.... ~ Var, data=Kürbis15, center="median")
```

```
Levene's Test for Homogeneity of Variance (center = "median")
```

```
Df F value Pr(>F)
```

```
group 2 0.3223 0.7268
```

```
33
```

#### Anhang XIX: Levene Test BKE 2015 2. Durchgang

```
> with(Kürbis15, tapply(BKE.....1, Var, var, na.rm=TRUE))
```

```
Var.1 Var.2 Var.3
```

```
4.946287 8.834437 25.400434
```

```
> leveneTest(BKE.....1 ~ Var, data=Kürbis15, center="median")
```

```
Levene's Test for Homogeneity of Variance (center = "median")
```

```
Df F value Pr(>F)
```

```
group 2 4.4799 0.019 *
```

```
33
```

```
---
```

```
Signif. codes: 0 '***' 0.001 '**' 0.01 '*' 0.05 '.' 0.1 ' ' 1
```

#### Anhang XX: Levene Test BKE 2015 1. kumuliert

```
> with(Kürbis15, tapply(BKE.kumuliert....., Var, var, na.rm=TRUE))
```

```
Var.1 Var.2 Var.3
```

```
166.0065 767.3050 1118.3862
```

```
> leveneTest(BKE.kumuliert.... ~ Var, data=Kürbis15, center="median")
```

```
Levene's Test for Homogeneity of Variance (center = "median")
```

```
Df F value Pr(>F)
```

```
group 2 2.1937 0.1275
```

```
33
```

---

**Anhang XXI: Kruskal Wallis Test BKE 2015 1. Durchgang**

```
> with(Kürbis15, tapply(BKE..., Var, median, na.rm=TRUE))
  Var.1  Var.2  Var.3
39.81572 15.74024 61.15074
> kruskal.test(BKE.... ~ Var, data=Kürbis15)
      Kruskal-Wallis rank sum test
data: BKE.... by Var
Kruskal-Wallis chi-squared = 6.533, df = 2, p-value = 0.03814
```

**Anhang XXII: Kruskal Wallis Test BKE 2015 2. Durchgang**

```
> with(Kürbis15, tapply(BKE.....1, Var, median, na.rm=TRUE))
  Var.1  Var.2  Var.3
97.80683 98.63383 94.98314
> kruskal.test(BKE.....1 ~ Var, data=Kürbis15)
      Kruskal-Wallis rank sum test
data: BKE.....1 by Var
Kruskal-Wallis chi-squared = 3.1667, df = 2, p-value = 0.2053
```

**Anhang XXIII: Kruskal Wallis Test BKE 2015 kumuliert**

```
> with(Kürbis15, tapply(BKE.kumuliert..., Var, median, na.rm=TRUE))
  Var.1  Var.2  Var.3
84.88449 85.75371 77.78409
> kruskal.test(BKE.kumuliert.... ~ Var, data=Kürbis15)
      Kruskal-Wallis rank sum test
data: BKE.kumuliert.... by Var
Kruskal-Wallis chi-squared = 0.94745, df = 2, p-value = 0.6227
```

**Anhang XXIV: Wilcoxon Test BKE 2015 1. Durchgang:**

```
> with(Var12, tapply(BKE..., Var, median, na.rm=TRUE))
  Var.1  Var.2
39.81572 15.74024
> wilcox.test(BKE.... ~ Var, alternative="two.sided", data=Var12)
      Wilcoxon rank sum test
data: BKE.... by Var
W = 81, p-value = 0.6297
alternative hypothesis: true location shift is not equal to 0
```

## Anhang XXV: Bonitur BKE 2016

Var	Variante	Wdh	Blattfläche bevor	Blattfläche nach 1. Hackdurchgang	BKE [%]	Blattfläche bevor 2. Hackdurchgang	Blattfläche nach 2. Hackdurchgang	BKE [%]	BKE kumuliert [%]
Var.1	1 a		7,80	0,00	100,00	3,71	2,71	26,81	65,22
Var.1	1 b		22,43	0,08	99,63	39,64	11,68	70,54	47,93
Var.1	1 c		7,06	0,01	99,93	7,99	3,19	60,03	54,79
Var.1	1 d		16,04	0,70	95,64	68,82	0,02	99,97	99,87
Var.2	2 a		4,28	0,00	99,95	26,14	0,52	98,00	87,81
Var.2	2 b		20,10	0,00	100,00	27,42	7,66	72,07	61,89
Var.2	2 c		11,33	0,00	100,00	26,32	5,52	79,02	51,25
Var.2	2 d		23,27	0,00	100,00	77,92	0,61	99,22	97,40
Var.3	3 a		5,74	0,00	100,00	4,25	3,65	13,99	36,39
Var.3	3 b		12,19	0,00	100,00	23,32	2,82	87,89	76,84
Var.3	3 c		10,30	0,02	99,81	102,84	1,41	98,63	86,35
Var.3	3 d		9,45	0,09	99,08	68,85	1,64	97,61	82,60
Var.4	4 a		25,84	0,00	100,00	68,19	2,22	96,75	91,42
Var.4	4 b		12,39	0,00	100,00	17,38	1,61	90,74	87,01
Var.4	4 c		14,36	0,58	95,98	73,00	7,85	89,25	45,37
Var.4	4 d		37,34	0,00	100,00	9,73	9,53	2,12	74,49
Var.5	5 a		2,64	0,00	100,00	8,55	1,08	87,33	58,93
Var.5	5 b		5,44	0,57	89,49	58,90	5,05	91,43	7,16
Var.5	5 c		61,30	0,02	99,98	6,39	1,23	80,84	98,00
Var.5	5 d		68,76	0,00	100,00	16,52	5,17	68,73	92,49
Var.6	6 a		16,41	0,00	99,99	70,95	14,00	80,27	14,70
Var.6	6 b		17,55	0,02	99,91	20,25	3,39	83,27	80,69
Var.6	6 c		4,28	0,01	99,81	19,90	0,11	99,46	97,50
Var.6	6 d		15,38	0,00	100,00	64,75	0,07	99,90	99,58
Var.7	7 a		20,37	0,00	100,00	32,54	13,04	59,92	35,98
Var.7	7 b		29,37	3,00	89,80	84,58	17,23	79,63	41,32
Var.7	7 c		23,59	0,17	99,30	91,69	7,56	91,75	67,95
Var.7	7 d		8,63	0,02	99,77	82,54	0,38	99,53	95,55
Var.8	8 a		8,92	0,03	99,66	50,19	2,61	94,81	70,79
Var.8	8 b		28,51	0,03	99,88	36,31	3,40	90,64	88,09
Var.8	8 c		19,89	0,00	100,00	11,09	3,19	71,27	83,97
Var.8	8 d		9,10	0,55	93,91	99,67	8,26	91,72	9,22
Var.9	9 a		9,43	0,03	99,68	27,72	4,73	82,94	49,85
Var.9	9 b		21,78	0,09	99,57	68,88	4,51	93,46	79,30
Var.9	9 c		31,11	0,00	100,00	275,50	12,57	95,44	59,59
Var.9	9 d		5,56	0,00	100,00	14,89	1,82	87,78	67,28

## Anhang XXVI: Shapiro-Wilk Test BKE 2016 1. Durchgang

```
> with(Var1, shapiro.test(BKE....))
```

```
Shapiro-Wilk normality test
```

```
data: BKE....
```

```
W = 0.69379, p-value = 0.009808
```

```
> with(Var2, shapiro.test(BKE....))
```

```
Shapiro-Wilk normality test
```

```
data: BKE....
```

```
W = 0.62978, p-value = 0.001241
```

```
> with(Var3, shapiro.test(BKE....))
```

```
Shapiro-Wilk normality test
```

```
data: BKE....
```

```
W = 0.76975, p-value = 0.05811
```

```
> with(Var4, shapiro.test(BKE....))
```

```
Shapiro-Wilk normality test
```

```
data: BKE....
```

```
W = 0.62978, p-value = 0.001241
```

```
> with(Var5, shapiro.test(BKE....))
```

```
Shapiro-Wilk normality test
```

```
data: BKE....
```

```
W = 0.63146, p-value = 0.001322
```

```
> with(Var6, shapiro.test(BKE....))
```

```
Shapiro-Wilk normality test
```

```
data: BKE....
```

```
W = 0.89318, p-value = 0.398
```

```
> with(Var7, shapiro.test(BKE....))
```

```
Shapiro-Wilk normality test
```

```
data: BKE....
```

```
W = 0.68282, p-value = 0.007192
```

```
> with(Var8, shapiro.test(BKE....))
```

```
Shapiro-Wilk normality test
```

```
data: BKE....
```

```
W = 0.67241, p-value = 0.005277
```

```
> with(Var9, shapiro.test(BKE....))
```

```
Shapiro-Wilk normality test
```

```
data: BKE....
```

```
W = 0.83141, p-value = 0.1715
```

## Anhang XXVII: Levene Test BKE 2016 1. Durchgang

```

> with(Kürbis16, tapply(BKE..., Var, var, na.rm=TRUE))
  Var.1  Var.2  Var.3  Var.4  Var.5  Var.6  Var.7  Var.8  Var.9
4.456795e+00 5.456442e-04 1.915605e-01 4.049732e+00 2.755121e+01 7.395502e-03 2.452605e+01
8.825546e+00 4.898297e-02
> leveneTest(BKE... ~ Var, data=Kürbis16, center="median")
Levene's Test for Homogeneity of Variance (center = "median")
  Df F value Pr(>F)
group 8 0.6006 0.7689
27

```

## Anhang XXVIII: Shapiro-Wilk Test BKE 2016 2. Durchgang

```

> with(Var1, shapiro.test(BKE.....1))
  Shapiro-Wilk normality test
data: BKE.....1
W = 0.98975, p-value = 0.9562
> with(Var2, shapiro.test(BKE.....1))
  Shapiro-Wilk normality test
data: BKE.....1
W = 0.85464, p-value = 0.2416
> with(Var3, shapiro.test(BKE.....1))
  Shapiro-Wilk normality test
data: BKE.....1
W = 0.7211, p-value = 0.01991
> with(Var4, shapiro.test(BKE.....1))
  Shapiro-Wilk normality test
data: BKE.....1
W = 0.69597, p-value = 0.01041
> with(Var5, shapiro.test(BKE.....1))
  Shapiro-Wilk normality test
data: BKE.....1
W = 0.94415, p-value = 0.6798
> with(Var6, shapiro.test(BKE.....1))
  Shapiro-Wilk normality test
data: BKE.....1
W = 0.80494, p-value = 0.1114
> with(Var7, shapiro.test(BKE.....1))

```

```

Shapiro-Wilk normality test
data: BKE.....1
W = 0.9568, p-value = 0.7588
> with(Var8, shapiro.test(BKE.....1))
Shapiro-Wilk normality test
data: BKE.....1
W = 0.77788, p-value = 0.06811
> with(Var9, shapiro.test(BKE.....1))
Shapiro-Wilk normality test
data: BKE.....1
W = 0.94431, p-value = 0.6808

```

#### Anhang XXIX: Levene Test BKE 2016 2. Durchgang

```

> with(Kürbis16, tapply(BKE.....1, Var, var, na.rm=TRUE))
  Var.1  Var.2  Var.3  Var.4  Var.5  Var.6  Var.7  Var.8  Var.9
911.54311 185.68085 1652.35857 2041.34712 98.27191 108.47784 297.93115 114.59580 32.09420
> leveneTest(BKE.....1 ~ Var, data=Kürbis16, center="median")
Levene's Test for Homogeneity of Variance (center = "median")
  Df F value Pr(>F)
group 8 0.5615 0.7996
  27

```

#### Anhang XXX: Shapiro-Wilk Test BKE 2016 kumuliert

```

> with(Var1, shapiro.test(BKE.kumuliert...))
Shapiro-Wilk normality test
data: BKE.kumuliert...
W = 0.87773, p-value = 0.329
> with(Var2, shapiro.test(BKE.kumuliert...))
Shapiro-Wilk normality test
data: BKE.kumuliert...
W = 0.92644, p-value = 0.5736
> with(Var3, shapiro.test(BKE.kumuliert...))
Shapiro-Wilk normality test
data: BKE.kumuliert...
W = 0.77795, p-value = 0.0682
> with(Var4, shapiro.test(BKE.kumuliert...))

```

```

Shapiro-Wilk normality test
data: BKE.kumuliert...
W = 0.88116, p-value = 0.3436
> with(Var5, shapiro.test(BKE.kumuliert...))
Shapiro-Wilk normality test
data: BKE.kumuliert...
W = 0.88551, p-value = 0.3627
> with(Var6, shapiro.test(BKE.kumuliert...))
Shapiro-Wilk normality test
data: BKE.kumuliert...
W = 0.78427, p-value = 0.07688
> with(Var7, shapiro.test(BKE.kumuliert...))
Shapiro-Wilk normality test
data: BKE.kumuliert...
W = 0.91381, p-value = 0.5028
> with(Var8, shapiro.test(BKE.kumuliert...))
Shapiro-Wilk normality test
data: BKE.kumuliert...
W = 0.79067, p-value = 0.08652
> with(Var9, shapiro.test(BKE.kumuliert...))
Shapiro-Wilk normality test
data: BKE.kumuliert...
W = 0.99689, p-value = 0.9894

```

#### Anhang XXXI: Levene Test BKE 2016 kumuliert

```

> with(Kürbis16, tapply(BKE.kumuliert..., Var, var, na.rm=TRUE))
  Var.1  Var.2  Var.3  Var.4  Var.5  Var.6  Var.7  Var.8  Var.9
532.1133 466.9881 533.7204 430.5482 1741.4228 1588.0727 750.9287 1340.5736 154.8347
> leveneTest(BKE.kumuliert... ~ Var, data=Kürbis16, center="median")
Levene's Test for Homogeneity of Variance (center = "median")
  Df F value Pr(>F)
group 8 0.4386 0.8871
27

```

#### Anhang XXXII: Kruskal Wallis Test BKE 2016 1. Durchgang

```

with(Kürbis16, tapply(BKE..., Var, median, na.rm=TRUE))
  Var.1  Var.2  Var.3  Var.4  Var.5  Var.6  Var.7  Var.8  Var.9

```

```

99.77737 100.00000 99.90287 100.00000 99.98777 99.95117 99.53232 99.77227 99.84097
> kruskal.test(BKE.... ~ Var, data=Kürbis16)
      Kruskal-Wallis rank sum test
data:  BKE.... by Var
Kruskal-Wallis chi-squared = 5.7424, df = 8, p-value = 0.6761

```

### Anhang XXXIII: Kruskal Wallis Test BKE 2016 2. Durchgang

```

> with(Kürbis16, tapply(BKE.....1, Var, median, na.rm=TRUE))
  Var.1  Var.2  Var.3  Var.4  Var.5  Var.6  Var.7  Var.8  Var.9
65.28140 88.51179 92.75232 89.99483 84.08067 91.36572 85.69118 91.18055 90.61961
> kruskal.test(BKE.....1 ~ Var, data=Kürbis16)
      Kruskal-Wallis rank sum test
data:  BKE.....1 by Var
Kruskal-Wallis chi-squared = 3.2883, df = 8, p-value = 0.915

```

### Anhang XXXIV: Einfaktorielle Anova BKE 2016 kumuliert

```

> AnovaModel.1 <- aov(BKE.kumuliert.... ~ Var, data=Kürbis16)
> summary(AnovaModel.1)
      Df Sum Sq Mean Sq F value Pr(>F)
Var      8  947  118.4  0.141 0.996
Residuals 27 22618  837.7
1 observation deleted due to missingness
> with(Kürbis16, numSummary(BKE.kumuliert...., groups=Var, statistics=c("mean", "sd")))
      mean      sd data:n
Var.1 66.95167 23.06758  4
Var.2 74.58452 21.60991  4
Var.3 70.54671 23.10239  4
Var.4 74.57190 20.74965  4
Var.5 64.14388 41.73036  4
Var.6 73.11795 39.85063  4
Var.7 60.19956 27.40308  4
Var.8 63.01980 36.61384  4
Var.9 64.00766 12.44326  4

```

## Anhang XXXV: Bonitur Kulturschäden 2014

Var	Variante	Wdh	beschädigte Pflanzen 1. Hackdurchgang	Kulturschäden [%]	beschädigte Pflanzen 2. Hackdurchgang	Kulturschäden [%]	Kulturschäden kumuliert [%]
Var.1	1 a		6	8,89	11	16,30	25,19
Var.1	1 b		1	1,48	2	2,96	4,44
Var.1	1 c		3	4,44	2	2,96	7,41
Var.1	1 d		10	14,81	5	7,41	22,22
Var.2	2 a		4	5,93	3	4,44	10,37
Var.2	2 b		3	4,44	3	4,44	8,89
Var.2	2 c		3	4,44	2	2,96	7,41
Var.2	2 d		9	13,33	4	5,93	19,26
Var.3	3 a		5	7,41	2	2,96	10,37
Var.3	3 b		4	5,93	4	5,93	11,85
Var.3	3 c		5	7,41	4	5,93	13,33
Var.3	3 d		5	7,41	5	7,41	14,81
Var.1	1 a		1	1,48	6	8,89	10,37
Var.1	1 b		0	0,00	4	5,93	5,93
Var.1	1 c		2	2,96	3	4,44	7,41
Var.1	1 d		2	2,96	1	1,48	4,44
Var.2	2 a		3	4,44	4	5,93	10,37
Var.2	2 b		0	0,00	2	2,96	2,96
Var.2	2 c		2	2,96	3	4,44	7,41
Var.2	2 d		1	1,48	4	5,93	7,41
Var.3	3 a		0	0,00	4	5,93	5,93
Var.3	3 b		4	5,93	1	1,48	7,41
Var.3	3 c		0	0,00	1	1,48	1,48
Var.3	3 d		3	4,44	2	2,96	7,41
Var.1	1 a		0	0,00	0	0,00	0,00
Var.1	1 b		1	1,48	1	1,48	2,96
Var.1	1 c		0	0,00	0	0,00	0,00
Var.1	1 d		0	0,00	0	0,00	0,00
Var.2	2 a		0	0,00	0	0,00	0,00
Var.2	2 b		1	1,48	1	1,48	2,96
Var.2	2 c		1	1,48	1	1,48	2,96
Var.2	2 d		1	1,48	1	1,48	2,96
Var.3	3 a		1	1,48	0	0,00	1,48
Var.3	3 b		0	0,00	1	1,48	1,48
Var.3	3 c		0	0,00	0	0,00	0,00
Var.3	3 d		0	0,00	0	0,00	0,00
Var.4	4 a		9	13,33	2	2,96	16,30
Var.4	4 b		7	10,37	2	2,96	13,33
Var.4	4 c		9	13,33	5	7,41	20,74
Var.4	4 d		6	8,89	7	10,37	19,26
Var.4	4 e		9	13,33	2	2,96	16,30
Var.4	4 f		5	7,41	9	13,33	20,74
Var.4	4 g		3	4,44	4	5,93	10,37
Var.4	4 h		3	4,44	1	1,48	5,93
Var.4	4 i		3	4,44	1	1,48	5,93
Var.4	4 j		5	7,41	3	4,44	11,85
Var.4	4 k		3	4,44	2	2,96	7,41
Var.4	4 l		4	5,93	1	1,48	7,41

---

**Anhang XXXVI: Shapiro-Wilk Test Kulturschäden 2014 1. Durchgang**

```
> with(Var1, shapiro.test(Kulturschäden....))
      Shapiro-Wilk normality test
data: Kulturschäden....
W = 0.90793, p-value = 0.2007
> with(Var2, shapiro.test(Kulturschäden....))
      Shapiro-Wilk normality test
data: Kulturschäden....
W = 0.70988, p-value = 0.001051
> with(Var3, shapiro.test(Kulturschäden....))
      Shapiro-Wilk normality test
data: Kulturschäden....
W = 0.63959, p-value = 0.0002342
> with(Var4, shapiro.test(Kulturschäden....))
      Shapiro-Wilk normality test
data: Kulturschäden....
W = 0.84125, p-value = 0.02868
```

**Anhang XXXVII: Shapiro-Wilk Test Kulturschäden 2014 2. Durchgang**

```
> with(Var1, shapiro.test(Kulturschäden.....1))
      Shapiro-Wilk normality test
data: Kulturschäden.....1
W = 0.72504, p-value = 0.001485
> with(Var2, shapiro.test(Kulturschäden.....1))
      Shapiro-Wilk normality test
data: Kulturschäden.....1
W = 0.90703, p-value = 0.1954
> with(Var3, shapiro.test(Kulturschäden.....1))
      Shapiro-Wilk normality test
data: Kulturschäden.....1
W = 0.63959, p-value = 0.0002342
> with(Var4, shapiro.test(Kulturschäden.....1))
      Shapiro-Wilk normality test
data: Kulturschäden.....1
W = 0.82558, p-value = 0.01858
```

## Anhang XXXVIII: Shapiro-Wilk Test Kulturschäden 2014 kumuliert

```

> with(Var1, shapiro.test(Kulturschäden.kumuliert....))
      Shapiro-Wilk normality test
data: Kulturschäden.kumuliert....
W = 0.93029, p-value = 0.3832
> with(Var2, shapiro.test(Kulturschäden.kumuliert....))
      Shapiro-Wilk normality test
data: Kulturschäden.kumuliert....
W = 0.92849, p-value = 0.3644
> with(Var3, shapiro.test(Kulturschäden.kumuliert....))
      Shapiro-Wilk normality test
data: Kulturschäden.kumuliert....
W = 0.73725, p-value = 0.001973
> with(Var4, shapiro.test(Kulturschäden.kumuliert....))
      Shapiro-Wilk normality test
data: Kulturschäden.kumuliert....
W = 0.90304, p-value = 0.1736

```

## Anhang XXXIX: Levene Test Kulturschäden 2014 1. Durchgang

```

> with(Kürbis14, tapply(Kulturschäden....., Var, var, na.rm=TRUE))
      Var.1  Var.2  Var.3  Var.4
14.2993723 1.7292264 0.5819512 13.3682504
> leveneTest(Kulturschäden.... ~ Var, data=Kürbis14, center="median")
Levene's Test for Homogeneity of Variance (center = "median")
      Df F value Pr(>F)
group 3  5.1426 0.003901 **
      44
---
Signif. codes:  0 '***' 0.001 '**' 0.01 '*' 0.05 '.' 0.1 ' ' 1

```

## Anhang XL: Levene Test Kulturschäden 2014 2. Durchgang

```

> with(Kürbis14, tapply(Kulturschäden.....1, Var, var, na.rm=TRUE))
      Var.1  Var.2  Var.3  Var.4
13.7506755 5.3705782 0.5819512 14.4157626
> leveneTest(Kulturschäden.....1 ~ Var, data=Kürbis14, center="median")
Levene's Test for Homogeneity of Variance (center = "median")

```

---

```
Df F value Pr(>F)
group 3 1.7471 0.1713
44
```

**Anhang XLI: Levene Test Kulturschäden 2014 kumuliert**

```
> with(Kürbis14, tapply(Kulturschäden.kumuliert..., Var, var, na.rm=TRUE))
  Var.1  Var.2  Var.3  Var.4
40.354159 8.562996 1.928753 31.974062
> leveneTest(Kulturschäden.kumuliert... ~ Var, data=Kürbis14, center="median")
Levene's Test for Homogeneity of Variance (center = "median")
  Df F value Pr(>F)
group 3 5.3609 0.003105 **
44
---
Signif. codes: 0 '***' 0.001 '**' 0.01 '*' 0.05 '.' 0.1 ' ' 1
```

**Anhang XLII: Kruskal-Wallis Test Kulturschäden 2014 1. Durchgang**

```
> with(Kürbis14, tapply(Kulturschäden..., Var, median, na.rm=TRUE))
  Var.1  Var.2  Var.3  Var.4
6.666667 0.000000 0.000000 7.407407
> kruskal.test(Kulturschäden... ~ Var, data=Kürbis14)
  Kruskal-Wallis rank sum test
data: Kulturschäden... by Var
Kruskal-Wallis chi-squared = 35.084, df = 3, p-value = 1.169e-07
```

**Anhang XLIII: Kruskal-Wallis Test Kulturschäden 2014 2. Durchgang**

```
> with(Kürbis14, tapply(Kulturschäden.....1, Var, median, na.rm=TRUE))
  Var.1  Var.2  Var.3  Var.4
5.185185 4.444444 0.000000 2.962963
> kruskal.test(Kulturschäden.....1 ~ Var, data=Kürbis14)
  Kruskal-Wallis rank sum test
data: Kulturschäden.....1 by Var
Kruskal-Wallis chi-squared = 24.745, df = 3, p-value = 1.746e-05
```

---

**Anhang XLIV: Kruskal-Wallis Test Kulturschäden 2014 kumuliert**

```
> with(Kürbis14, tapply(Kulturschäden.kumuliert..., Var, median, na.rm=TRUE))
  Var.1  Var.2  Var.3  Var.4
11.1111111 5.9259259 0.7407407 12.5925926
> kruskal.test(Kulturschäden.kumuliert... ~ Var, data=Kürbis14)
      Kruskal-Wallis rank sum test
data: Kulturschäden.kumuliert... by Var
Kruskal-Wallis chi-squared = 32.419, df = 3, p-value = 4.27e-07
```

**Anhang XLV: Wilcoxon Test Kulturschäden 2014 1. Durchgang**

```
> with(Var12, tapply(Kulturschäden..., Var, median, na.rm=TRUE))
  Var.1  Var.2
6.666667 2.222222
> wilcox.test(Kulturschäden... ~ Var, alternative="two.sided", data=Var12)
      Wilcoxon rank sum test with continuity correction
data: Kulturschäden... by Var
W = 130, p-value = 0.0007981
alternative hypothesis: true location shift is not equal to 0
> with(Var23, tapply(Kulturschäden..., Var, median, na.rm=TRUE))
  Var.2  Var.3
2.222222 0.000000
> wilcox.test(Kulturschäden... ~ Var, alternative="two.sided", data=Var23)
      Wilcoxon rank sum test with continuity correction
data: Kulturschäden... by Var
W = 105, p-value = 0.04521
alternative hypothesis: true location shift is not equal to 0
```

**Anhang XLVI: Wilcoxon Test Kulturschäden 2014 2. Durchgang**

```
> with(Var12, tapply(Kulturschäden.....1, Var, median, na.rm=TRUE))
  Var.1  Var.2
5.185185 4.444444
> wilcox.test(Kulturschäden.....1 ~ Var, alternative="two.sided", data=Var12)
      Wilcoxon rank sum test with continuity correction
data: Kulturschäden.....1 by Var
W = 89, p-value = 0.3294
alternative hypothesis: true location shift is not equal to 0
```

---

```
> with(Var23, tapply(Kulturschäden.....1, Var, median, na.rm=TRUE))
  Var.2  Var.3
4.444444 0.000000
> wilcox.test(Kulturschäden.....1 ~ Var, alternative="two.sided", data=Var23)
  Wilcoxon rank sum test with continuity correction
data: Kulturschäden.....1 by Var
W = 136.5, p-value = 0.0001315
alternative hypothesis: true location shift is not equal to 0
```

#### Anhang XLVII: Wilcoxon Test Kulturschäden 2014 kumuliert

```
> with(Var12, tapply(Kulturschäden.kumuliert....., Var, median, na.rm=TRUE))
  Var.1  Var.2
11.111111 7.407407
> wilcox.test(Kulturschäden.kumuliert.... ~ Var, alternative="two.sided",
+ data=Var12)
  Wilcoxon rank sum test with continuity correction
data: Kulturschäden.kumuliert.... by Var
W = 121.5, p-value = 0.004082
alternative hypothesis: true location shift is not equal to 0
> with(Var23, tapply(Kulturschäden.kumuliert....., Var, median, na.rm=TRUE))
  Var.2  Var.3
7.4074074 0.7407407
> wilcox.test(Kulturschäden.kumuliert.... ~ Var, alternative="two.sided", data=Var23)
  Wilcoxon rank sum test with continuity correction
data: Kulturschäden.kumuliert.... by Var
W = 137, p-value = 0.0001499
alternative hypothesis: true location shift is not equal to 0
```

## Anhang XLVIII: Bonitur Kulturschäden 2015

Var	Variante	Wdh	beschädigte Pflanzen 1. Hackdurchgang	Kulturschäden [%]	beschädigte Pflanzen 2. Hackdurchgang	Kulturschäden [%]	Kulturschäden kumuliert [%]
Var.1	1 a		7	6,22	3	2,67	8,89
Var.1	1 b		5	4,44	3	2,67	7,11
Var.1	1 c		5	4,44	6	5,33	9,78
Var.1	1 d		7	6,22	5	4,44	10,67
Var.1	1 e		10	8,89	5	4,44	13,33
Var.1	1 f		8	7,11	8	7,11	14,22
Var.1	1 g		4	3,56	7	6,22	9,78
Var.1	1 h		6	5,33	5	4,44	9,78
Var.1	1 i		11	9,78	10	8,89	18,67
Var.1	1 j		8	7,11	7	6,22	13,33
Var.1	1 k		10	8,89	7	6,22	15,11
Var.1	1 l		7	6,22	2	1,78	8,00
Var.2	2 a		1	0,89	2	1,78	2,67
Var.2	2 b		1	0,89	1	0,89	1,78
Var.2	2 c		1	0,89	1	0,89	1,78
Var.2	2 d		2	1,78	1	0,89	2,67
Var.2	2 e		0	0,00	0	0,00	0,00
Var.2	2 f		0	0,00	0	0,00	0,00
Var.2	2 g		2	1,78	1	0,89	2,67
Var.2	2 h		2	1,78	2	1,78	3,56
Var.2	2 i		0	0,00	1	0,89	0,89
Var.2	2 j		0	0,00	0	0,00	0,00
Var.2	2 k		0	0,00	2	1,78	1,78
Var.2	2 l		2	1,78	0	0,00	1,78
Var.3	3 a		2	1,78	2	1,78	3,56
Var.3	3 b		1	0,89	2	1,78	2,67
Var.3	3 c		1	0,89	2	1,78	2,67
Var.3	3 d		0	0,00	0	0,00	0,00
Var.3	3 e		1	0,89	0	0,00	0,89
Var.3	3 f		1	0,89	2	1,78	2,67
Var.3	3 g		2	1,78	1	0,89	2,67
Var.3	3 h		3	2,67	0	0,00	2,67
Var.3	3 i		1	0,89	0	0,00	0,89
Var.3	3 j		1	0,89	0	0,00	0,89
Var.3	3 k		0	0,00	3	2,67	2,67
Var.3	3 l		0	0,00	0	0,00	0,00

## Anhang XLIX: Shapiro-Wilk Test Kulturschäden 2015 1. Durchgang

```
> with(Var1, shapiro.test(KulturschÄ.den....))
```

```
Shapiro-Wilk normality test
```

```
data: KulturschÄ.den....
```

```
W = 0.95117, p-value = 0.6541
```

```
> with(Var2, shapiro.test(KulturschÄ.den....))
```

```
Shapiro-Wilk normality test
```

```
data: KulturschÄ.den....
```

```
W = 0.78119, p-value = 0.00577
```

```
> with(Var3, shapiro.test(KulturschÄ.den....))
```

---

```

Shapiro-Wilk normality test
data: KulturschÃ„den....
W = 0.86458, p-value = 0.05582

```

#### Anhang L: Shapiro-Wilk Test Kulturschäden 2015 2. Durchgang

```

> with(Var1, shapiro.test(KulturschÃ„den.....1))
Shapiro-Wilk normality test
data: KulturschÃ„den.....1
W = 0.96225, p-value = 0.8153
> with(Var2, shapiro.test(KulturschÃ„den.....1))
Shapiro-Wilk normality test
data: KulturschÃ„den.....1
W = 0.82444, p-value = 0.01801
> with(Var3, shapiro.test(KulturschÃ„den.....1))
Shapiro-Wilk normality test
data: KulturschÃ„den.....1
W = 0.78232, p-value = 0.005939

```

#### Anhang LI: Shapiro-Wilk Test Kulturschäden 2015 kumuliert

```

> with(Var1, shapiro.test(KulturschÃ„den.kumuliert....))
Shapiro-Wilk normality test
data: KulturschÃ„den.kumuliert....
W = 0.9333, p-value = 0.4164
> with(Var2, shapiro.test(KulturschÃ„den.kumuliert....))
Shapiro-Wilk normality test
data: KulturschÃ„den.kumuliert....
W = 0.90072, p-value = 0.162
> with(Var3, shapiro.test(KulturschÃ„den.kumuliert....))
Shapiro-Wilk normality test
data: KulturschÃ„den.kumuliert....
W = 0.827, p-value = 0.01931

```

#### Anhang LII: Levene Test Kulturschäden 2015 1. Durchgang

```

> with(Küb15, tapply(KulturschÃ„den....., Var, var, na.rm=TRUE))
Var.1 Var.2 Var.3

```

---

```
3.7830153 0.6404789 0.6404789
> leveneTest(KulturschÃ.den.... ~ Var, data=Küb15, center="median")
Levene's Test for Homogeneity of Variance (center = "median")
  Df F value Pr(>F)
group 2  4.8413 0.01433 *
  33
---
Signif. codes:  0 '***' 0.001 '**' 0.01 '*' 0.05 '.' 0.1 ' ' 1
```

#### Anhang LIII: Levene Test Kulturschäden 2015 2. Durchgang

```
> with(Küb15, tapply(KulturschÃ.den.....1, Var, var, na.rm=TRUE))
  Var.1  Var.2  Var.3
4.2139918 0.4968201 1.0056117
> leveneTest(KulturschÃ.den.....1 ~ Var, data=Küb15, center="median")
Levene's Test for Homogeneity of Variance (center = "median")
  Df F value Pr(>F)
group 2  6.0345 0.005841 **
  33
---
Signif. codes:  0 '***' 0.001 '**' 0.01 '*' 0.05 '.' 0.1 ' ' 1
```

#### Anhang LIV: Levene Test Kulturschäden Pflanzen 2015 kumuliert

```
> with(Küb15, tapply(KulturschÃ.den.kumuliert...., Var, var, na.rm=TRUE))
  Var.1  Var.2  Var.3
11.492705 1.412645 1.502432
> leveneTest(KulturschÃ.den.kumuliert.... ~ Var, data=Küb15, center="median")
Levene's Test for Homogeneity of Variance (center = "median")
  Df F value Pr(>F)
group 2  4.8781 0.01393 *
  33
---
Signif. codes:  0 '***' 0.001 '**' 0.01 '*' 0.05 '.' 0.1 ' ' 1
```

---

**Anhang LV: Kruskal Wallis Test Kulturschäden 2015 1. Durchgang**

```
> with(Küb15, tapply(KulturschÄ.den...., Var, median, na.rm=TRUE))
  Var.1  Var.2  Var.3
6.222222 0.888889 0.888889
> kruskal.test(KulturschÄ.den.... ~ Var, data=Küb15)
      Kruskal-Wallis rank sum test
data: KulturschÄ.den.... by Var
Kruskal-Wallis chi-squared = 24.18, df = 2, p-value = 5.614e-06
```

**Anhang LVI: Kruskal Wallis Test Kulturschäden 2015 2. Durchgang**

```
> with(Küb15, tapply(KulturschÄ.den.....1, Var, median, na.rm=TRUE))
  Var.1  Var.2  Var.3
4.888889 0.888889 0.444444
> kruskal.test(KulturschÄ.den.....1 ~ Var, data=Küb15)
      Kruskal-Wallis rank sum test
data: KulturschÄ.den.....1 by Var
Kruskal-Wallis chi-squared = 22.462, df = 2, p-value = 1.326e-05
```

**Anhang LVII: Kruskal Wallis Test Kulturschäden 2015 kumuliert**

```
> with(Küb15, tapply(KulturschÄ.den.kumuliert...., Var, median, na.rm=TRUE))
  Var.1  Var.2  Var.3
10.222222 1.777778 2.666667
> kruskal.test(KulturschÄ.den.kumuliert.... ~ Var, data=Küb15)
      Kruskal-Wallis rank sum test
data: KulturschÄ.den.kumuliert.... by Var
Kruskal-Wallis chi-squared = 24.12, df = 2, p-value = 5.785e-06
```

**Anhang LVIII: Wilcoxon Test Kulturschäden 2015 1. Durchgang**

```
> with(Var23, tapply(KulturschÄ.den...., Var, median, na.rm=TRUE))
  Var.2  Var.3
0.888889 0.888889
> wilcox.test(KulturschÄ.den.... ~ Var, alternative="two.sided", data=Var23)
      Wilcoxon rank sum test with continuity correction
data: KulturschÄ.den.... by Var
W = 65.5, p-value = 0.7144
alternative hypothesis: true location shift is not equal to 0
```

---

**Anhang LIX: Wilcoxon Test Kulturschäden 2015 2. Durchgang**

```
> with(Var23, tapply(KulturschÃ.den.....1, Var, median, na.rm=TRUE))
  Var.2  Var.3
0.8888889 0.4444444
> wilcox.test(KulturschÃ.den.....1 ~ Var, alternative="two.sided", data=Var23)
  Wilcoxon rank sum test with continuity correction
data: KulturschÃ.den.....1 by Var
W = 71.5, p-value = 1
alternative hypothesis: true location shift is not equal to 0
```

**Anhang LX: Wilcoxon Test Kulturschäden 2015 kumuliert**

```
> with(Küb15_23, tapply(KulturschÃ.den.kumuliert...., Var, median, na.rm=TRUE))
  Var.2  Var.3
1.777778 2.666667
> wilcox.test(KulturschÃ.den.kumuliert.... ~ Var, alternative="two.sided", data=Küb15_23)
  Wilcoxon rank sum test with continuity correction
data: KulturschÃ.den.kumuliert.... by Var
W = 59, p-value = 0.4608
alternative hypothesis: true location shift is not equal to 0
```

## Anhang LXI: Bonitur Kulturschäden 2016

Var	Variante	Wdh	beschädigte Pflanzen 1. Hackdurchgang	Kulturschäden [%]	beschädigte Pflanzen 2. Hackdurchgang	Kulturschäden [%]	Kulturschäden kumuliert [%]
Var.1	1 a		6	8,89	5	7,41	16,30
Var.1	1 b		4	5,93	3	4,44	10,37
Var.1	1 c		3	4,44	5	7,41	11,85
Var.1	1 d		4	5,93	5	7,41	13,33
Var.1	1 a		9	13,33	4	5,93	19,26
Var.1	1 b		3	4,44	4	5,93	10,37
Var.1	1 c		6	8,89	9	13,33	22,22
Var.1	1 d		5	7,41	5	7,41	14,81
Var.1	1 a		8	11,85	4	5,93	17,78
Var.1	1 b		5	7,41	5	7,41	14,81
Var.1	1 c		7	10,37	4	5,93	16,30
Var.1	1 d		6	8,89	5	7,41	16,30
Var.2	2 a		0	0,00	2	2,96	2,96
Var.2	2 b		1	1,48	1	1,48	2,96
Var.2	2 c		0	0,00	1	1,48	1,48
Var.2	2 d		0	0,00	1	1,48	1,48
Var.2	2 a		2	2,96	0	0,00	2,96
Var.2	2 b		1	1,48	1	1,48	2,96
Var.2	2 c		1	1,48	1	1,48	2,96
Var.2	2 d		0	0,00	0	0,00	0,00
Var.2	2 a		1	1,48	0	0,00	1,48
Var.2	2 b		0	0,00	2	2,96	2,96
Var.2	2 c		2	2,96	1	1,48	4,44
Var.2	2 d		0	0,00	0	0,00	0,00
Var.3	3 a		2	2,96	1	1,48	4,44
Var.3	3 b		0	0,00	2	2,96	2,96
Var.3	3 c		0	0,00	0	0,00	0,00
Var.3	3 d		0	0,00	1	1,48	1,48
Var.3	3 a		1	1,48	1	1,48	2,96
Var.3	3 b		0	0,00	0	0,00	0,00
Var.3	3 c		0	0,00	1	1,48	1,48
Var.3	3 d		1	1,48	0	0,00	1,48
Var.3	3 a		1	1,48	3	4,44	5,93
Var.3	3 b		0	0,00	0	0,00	0,00
Var.3	3 c		1	1,48	1	1,48	2,96
Var.3	3 d		1	1,48	0	0,00	1,48

## Anhang LXII: Shapiro-Wilk Test Kulturschäden 2016 1. Durchgang

```
> with(Var1, shapiro.test(KulturschÄ.den....))
```

```
Shapiro-Wilk normality test
```

```
data: KulturschÄ.den....
```

```
W = 0.89495, p-value = 0.4064
```

```
> with(Var2, shapiro.test(KulturschÄ.den....))
```

```
Shapiro-Wilk normality test
```

```
data: KulturschÄ.den....
```

```
W = 0.98152, p-value = 0.9109
```

---

```
> with(Var3, shapiro.test(KulturschÃ„den....))
      Shapiro-Wilk normality test
data: KulturschÃ„den....
W = 0.99291, p-value = 0.9719
> with(Var4, shapiro.test(KulturschÃ„den....))
      Shapiro-Wilk normality test
data: KulturschÃ„den....
W = 0.62978, p-value = 0.001241
> with(Var5, shapiro.test(KulturschÃ„den....))
      Shapiro-Wilk normality test
data: KulturschÃ„den....
W = 0.94466, p-value = 0.683
> with(Var6, shapiro.test(KulturschÃ„den....))
      Shapiro-Wilk normality test
data: KulturschÃ„den....
W = 0.86337, p-value = 0.2725
> with(Var7, shapiro.test(KulturschÃ„den....))
      Shapiro-Wilk normality test
data: KulturschÃ„den....
W = 0.62978, p-value = 0.001241
> with(Var8, shapiro.test(KulturschÃ„den....))
      Shapiro-Wilk normality test
data: KulturschÃ„den....
W = 0.72863, p-value = 0.02386
> with(Var9, shapiro.test(KulturschÃ„den....))
      Shapiro-Wilk normality test
data: KulturschÃ„den....
W = 0.62978, p-value = 0.001241
```

### Anhang LXIII: Shapiro-Wilk Test Kulturschäden 2016 2. Durchgang

```
> with(Var1, shapiro.test(KulturschÃ„den.....1))
      Shapiro-Wilk normality test
data: KulturschÃ„den.....1
W = 0.62978, p-value = 0.001241
> with(Var2, shapiro.test(KulturschÃ„den.....1))
      Shapiro-Wilk normality test
data: KulturschÃ„den.....1
```

---

```
W = 0.76348, p-value = 0.05123
> with(Var3, shapiro.test(KulturschÃ.den.....1))
  Shapiro-Wilk normality test
data: KulturschÃ.den.....1
W = 0.72863, p-value = 0.02386
> with(Var4, shapiro.test(KulturschÃ.den.....1))
  Shapiro-Wilk normality test
data: KulturschÃ.den.....1
W = 0.62978, p-value = 0.001241
> with(Var5, shapiro.test(KulturschÃ.den.....1))
  Shapiro-Wilk normality test
data: KulturschÃ.den.....1
W = 0.72863, p-value = 0.02386
> with(Var6, shapiro.test(KulturschÃ.den.....1))
  Shapiro-Wilk normality test
data: KulturschÃ.den.....1
W = 0.86337, p-value = 0.2725
> with(Var7, shapiro.test(KulturschÃ.den.....1))
  Shapiro-Wilk normality test
data: KulturschÃ.den.....1
W = 0.94466, p-value = 0.683
> with(Var8, shapiro.test(KulturschÃ.den.....1))
  Shapiro-Wilk normality test
data: KulturschÃ.den.....1
W = 0.72863, p-value = 0.02386
> with(Var9, shapiro.test(KulturschÃ.den.....1))
  Shapiro-Wilk normality test
data: KulturschÃ.den.....1
W = 0.82743, p-value = 0.1612
```

#### Anhang LXIV: Shapiro-Wilk Test Kulturschäden 2016 kumuliert

```
> with(Var1, shapiro.test(KulturschÃ.den.kumuliert....))
  Shapiro-Wilk normality test
data: KulturschÃ.den.kumuliert....
W = 0.97137, p-value = 0.85
> with(Var2, shapiro.test(KulturschÃ.den.kumuliert....))
  Shapiro-Wilk normality test
```

---

```

data: KulturschÃ.den.kumuliert...
W = 0.97865, p-value = 0.8941
> with(Var3, shapiro.test(KulturschÃ.den.kumuliert...))
      Shapiro-Wilk normality test
data: KulturschÃ.den.kumuliert...
W = 0.94466, p-value = 0.683
> with(Var4, shapiro.test(KulturschÃ.den.kumuliert...))
      Shapiro-Wilk normality test
data: KulturschÃ.den.kumuliert...
W = 0.72863, p-value = 0.02386
> with(Var5, shapiro.test(KulturschÃ.den.kumuliert...))
      Shapiro-Wilk normality test
data: KulturschÃ.den.kumuliert...
W = 0.62978, p-value = 0.001241
> with(Var6, shapiro.test(KulturschÃ.den.kumuliert...))
      Shapiro-Wilk normality test
data: KulturschÃ.den.kumuliert...
W = 0.99291, p-value = 0.9719
> with(Var7, shapiro.test(KulturschÃ.den.kumuliert...))
      Shapiro-Wilk normality test
data: KulturschÃ.den.kumuliert...
W = 0.99291, p-value = 0.9719
> with(Var8, shapiro.test(KulturschÃ.den.kumuliert...))
      Shapiro-Wilk normality test
data: KulturschÃ.den.kumuliert...
W = 0.94466, p-value = 0.683
> with(Var9, shapiro.test(KulturschÃ.den.kumuliert...))
      Shapiro-Wilk normality test
data: KulturschÃ.den.kumuliert...
W = 0.97137, p-value = 0.85

```

#### Anhang LXV: Levene Test Kulturschäden 2016 1. Durchgang

```

> with(Kürbis, tapply(KulturschÃ.den...., Var, var, na.rm=TRUE))
  Var.1  Var.2  Var.3  Var.4  Var.5  Var.6  Var.7  Var.8  Var.9
3.4750800 13.7174211 3.6579790 0.5486968 1.4631916 2.0118884 2.1947874 0.7315958 0.5486968
> leveneTest(KulturschÃ.den.... ~ Var, data=Kürbis, center="median")
Levene's Test for Homogeneity of Variance (center = "median")

```

```

Df F value Pr(>F)
group 8 1.3881 0.2462
27

```

#### Anhang LXVI: Levene Test Kulturschäden 2016 2. Durchgang

```

> with(Kürbis, tapply(KulturschÄ.den.....1, Var, var, na.rm=TRUE))
  Var.1  Var.2  Var.3  Var.4  Var.5  Var.6  Var.7  Var.8  Var.9
2.1947874 12.4371285 0.7315958 0.5486968 0.7315958 2.0118884 1.4631916 0.7315958 4.3895748
> leveneTest(KulturschÄ.den.....1 ~ Var, data=Kürbis, center="median")
Levene's Test for Homogeneity of Variance (center = "median")
  Df F value Pr(>F)
group 8 0.7409 0.6554
27

```

#### Anhang LXVII: Levene Test Kulturschäden 2016 kumuliert

```

> with(Kürbis, tapply(KulturschÄ.den.kumuliert...., Var, var, na.rm=TRUE))
  Var.1  Var.2  Var.3  Var.4  Var.5  Var.6  Var.7  Var.8  Var.9
6.4014632 26.8861454 1.4631916 0.7315958 2.1947874 3.6579790 3.6579790 1.4631916 6.4014632
> leveneTest(KulturschÄ.den.kumuliert.... ~ Var, data=Kürbis, center="median")
Levene's Test for Homogeneity of Variance (center = "median")
  Df F value Pr(>F)
group 8 2.9318 0.01711 *
27
---
Signif. codes:  0 '***' 0.001 '**' 0.01 '*' 0.05 '.' 0.1 ' ' 1

```

#### Anhang LXVIII: Kruskal Wallis Test Kulturschäden 2016 1. Durchgang

```

> with(Kürbis, tapply(KulturschÄ.den....., Var, median, na.rm=TRUE))
  Var.1  Var.2  Var.3  Var.4  Var.5  Var.6  Var.7  Var.8  Var.9
5.9259259 8.1481481 9.6296296 0.0000000 1.4814815 0.7407407 0.0000000 0.7407407 1.4814815
> kruskal.test(KulturschÄ.den.... ~ Var, data=Kürbis)
  Kruskal-Wallis rank sum test
data: KulturschÄ.den.... by Var
Kruskal-Wallis chi-squared = 26.243, df = 8, p-value = 0.0009544

```

## Anhang LXIX: Kruskal Wallis Test Kulturschäden 2016 2. Durchgang

```
> with(Kürbis, tapply(KulturschÄ.den.....1, Var, median, na.rm=TRUE))
  Var.1  Var.2  Var.3  Var.4  Var.5  Var.6  Var.7  Var.8  Var.9
7.4074074 6.6666667 6.6666667 1.4814815 0.7407407 0.7407407 1.4814815 0.7407407 0.7407407
> kruskal.test(KulturschÄ.den.....1 ~ Var, data=Kürbis)

Kruskal-Wallis rank sum test
data: KulturschÄ.den.....1 by Var
Kruskal-Wallis chi-squared = 25.727, df = 8, p-value = 0.001169
```

## Anhang LXX: Kruskal Wallis Test Kulturschäden 2016 kumuliert

```
> with(Kürbis, tapply(KulturschÄ.den.kumuliert..., Var, median, na.rm=TRUE))
  Var.1  Var.2  Var.3  Var.4  Var.5  Var.6  Var.7  Var.8  Var.9
12.592593 17.037037 16.296296 2.222222 2.962963 2.222222 2.222222 1.481481 2.222222
> kruskal.test(KulturschÄ.den.kumuliert.... ~ Var, data=Kürbis)

Kruskal-Wallis rank sum test
data: KulturschÄ.den.kumuliert.... by Var
Kruskal-Wallis chi-squared = 24.704, df = 8, p-value = 0.001745
```

## Anhang LXXI: Wilcoxon Test Kulturschäden 2016 1. Durchgang

```
> with(Var23, tapply(KulturschÄ.den....., Var, median, na.rm=TRUE))
  Var.2  Var.3
0.7407407 0.7407407
> wilcox.test(KulturschÄ.den.... ~ Var, alternative="two.sided", data=Var23)

Wilcoxon rank sum test with continuity correction
data: KulturschÄ.den.... by Var
W = 75, p-value = 0.8735
alternative hypothesis: true location shift is not equal to 0
```

## Anhang LXXII: Wilcoxon Test Kulturschäden 2016 2. Durchgang

```
> with(Var23, tapply(KulturschÄ.den.....1, Var, median, na.rm=TRUE))
  Var.2  Var.3
1.481481 1.481481
> wilcox.test(KulturschÄ.den.....1 ~ Var, alternative="two.sided", data=Var23)

Wilcoxon rank sum test with continuity correction
data: KulturschÄ.den.....1 by Var
W = 76, p-value = 0.8266
alternative hypothesis: true location shift is not equal to 0
```

Anhang LXXIII: Wilcoxon Test Kulturschäden 2016 kumuliert

```
> with(Var23, tapply(KulturschÄ.den.kumuliert..., Var, median, na.rm=TRUE))
  Var.2  Var.3
2.962963 1.481481
> wilcox.test(KulturschÄ.den.kumuliert... ~ Var, alternative="two.sided", data=Var23)

Wilcoxon rank sum test with continuity correction

data: KulturschÄ.den.kumuliert... by Var
W = 79.5, p-value = 0.6726
alternative hypothesis: true location shift is not equal to 0
```

## Anhang LXXIV: Bonitur Haltbarkeit Kürbis und Zwiebeln

Kürbis	07.11.2015	14.11.2015	21.11.2015	28.11.2015	05.12.2015	12.12.2015	19.12.2015	26.12.2015	02.01.2016	09.01.2016	16.01.2016	23.01.2016	30.01.2016
Variante	Bestrahlungszeit [min]												
1	0	3	4	2	1	3	0	0	0	0	3	2	1
2	0,5	3	4	1	3	2	1	1	1	3	3	1	2
3	2	2	3	2	2	3	0	3	1	2	1	2	3
Zwiebeln	07.11.2015	14.11.2015	21.11.2015	28.11.2015	05.12.2015	12.12.2015	19.12.2015	26.12.2015	02.01.2016	09.01.2016	16.01.2016	23.01.2016	30.01.2016
Variante	Bestrahlungszeit [min]												
1	0	1	0	0	1	1	0	0	0	1	1	1	0
2	0,5	0	1	1	1	0	0	0	0	1	1	0	1
3	2	1	0	0	1	1	0	0	0	1	0	0	1

---

**Anhang LXXV: Shapiro-Wilk Test Kürbis**

```
> with(Var1, shapiro.test(Haltbarkeit.Wochen))
      Shapiro-Wilk normality test
data: Haltbarkeit.Wochen
W = 0.87522, p-value = 0.002194
> with(Var2, shapiro.test(Haltbarkeit.Wochen))
      Shapiro-Wilk normality test
data: Haltbarkeit.Wochen
W = 0.93596, p-value = 0.07082
> with(Var3, shapiro.test(Haltbarkeit.Wochen))
      Shapiro-Wilk normality test
data: Haltbarkeit.Wochen
W = 0.91516, p-value = 0.02012
```

**Anhang LXXVI: Levene Test Kürbis**

```
> with(Kürbis, tapply(Haltbarkeit.Wochen, Var, var, na.rm=TRUE))
      Var1  Var2  Var3
23.42989 17.23678 20.09655
> leveneTest(Haltbarkeit.Wochen ~ Var, data=Kürbis, center="median")
Levene's Test for Homogeneity of Variance (center = "median")
      Df F value Pr(>F)
group 2  0.929 0.3988
      87
```

**Anhang LXXVII: Kruskal-Wallis Test Kürbis**

```
> with(Kürbis, tapply(Haltbarkeit.Wochen, Var, median, na.rm=TRUE))
      Var1 Var2 Var3
5.0  5.0  6.5
> kruskal.test(Haltbarkeit.Wochen ~ Var, data=Kürbis)
      Kruskal-Wallis rank sum test
data: Haltbarkeit.Wochen by Var
Kruskal-Wallis chi-squared = 0.97498, df = 2, p-value = 0.6142
```

---

### Anhang LXXVIII: Shapiro-Wilk Test Zwiebeln

```
> with(Var1, shapiro.test(Haltbarkeit.Wochen))
```

```
Shapiro-Wilk normality test
```

```
data: Haltbarkeit.Wochen
```

```
W = 0.52969, p-value = 1.12e-08
```

```
> with(Var2, shapiro.test(Haltbarkeit.Wochen))
```

```
Shapiro-Wilk normality test
```

```
data: Haltbarkeit.Wochen
```

```
W = 0.50091, p-value = 5.479e-09
```

```
> with(Var3, shapiro.test(Haltbarkeit.Wochen))
```

```
Shapiro-Wilk normality test
```

```
data: Haltbarkeit.Wochen
```

```
W = 0.4485, p-value = 1.594e-09
```

### Anhang LXXIX: Levene Test Zwiebeln

```
> with(Zw, tapply(Haltbarkeit.Wochen, Var, var, na.rm=TRUE))
```

```
Var1 Var2 Var3
```

```
11.49885 11.84483 11.32069
```

```
> leveneTest(Haltbarkeit.Wochen ~ Var, data=Zw, center="median")
```

```
Levene's Test for Homogeneity of Variance (center = "median")
```

```
Df F value Pr(>F)
```

```
group 2 0.0413 0.9595
```

```
87
```

### Anhang LXXX: Kruskal-Wallis Test Zwiebeln

```
> with(Zw, tapply(Haltbarkeit.Wochen, Var, median, na.rm=TRUE))
```

```
Var1 Var2 Var3
```

```
13 13 13
```

```
> kruskal.test(Haltbarkeit.Wochen ~ Var, data=Zw)
```

```
Kruskal-Wallis rank sum test
```

```
data: Haltbarkeit.Wochen by Var
```

```
Kruskal-Wallis chi-squared = 0.41979, df = 2, p-value = 0.8107
```

---

### Anhang LXXXI: Shapiro-Wilk Test Zwiebeln

```
> with(Var1, shapiro.test(Haltbarkeit.Wochen))
```

```
Shapiro-Wilk normality test
```

```
data: Haltbarkeit.Wochen
```

```
W = 0.52969, p-value = 1.12e-08
```

```
> with(Var2, shapiro.test(Haltbarkeit.Wochen))
```

```
Shapiro-Wilk normality test
```

```
data: Haltbarkeit.Wochen
```

```
W = 0.50091, p-value = 5.479e-09
```

```
> with(Var3, shapiro.test(Haltbarkeit.Wochen))
```

```
Shapiro-Wilk normality test
```

```
data: Haltbarkeit.Wochen
```

```
W = 0.4485, p-value = 1.594e-09
```

### Anhang LXXXII: Levene Test Zwiebeln

```
> with(Zw, tapply(Haltbarkeit.Wochen, Var, var, na.rm=TRUE))
```

```
Var1 Var2 Var3
```

```
11.49885 11.84483 11.32069
```

```
> leveneTest(Haltbarkeit.Wochen ~ Var, data=Zw, center="median")
```

```
Levene's Test for Homogeneity of Variance (center = "median")
```

```
Df F value Pr(>F)
```

```
group 2 0.0413 0.9595
```

```
87
```

### Anhang LXXXIII: Kruskal-Wallis Test Zwiebeln

```
> with(Zw, tapply(Haltbarkeit.Wochen, Var, median, na.rm=TRUE))
```

```
Var1 Var2 Var3
```

```
13 13 13
```

```
> kruskal.test(Haltbarkeit.Wochen ~ Var, data=Zw)
```

```
Kruskal-Wallis rank sum test
```

```
data: Haltbarkeit.Wochen by Var
```

```
Kruskal-Wallis chi-squared = 0.41979, df = 2, p-value = 0.8107
```