

Fakultät für Agrarwissenschaften

Institut für Agrartechnik

Universität Hohenheim

Verfahrenstechnik in der Pflanzenproduktion

Prof. Dr. Dr. h.c. mult K. Köller

**Entwicklung einer selektiv arbeitenden Reihenhackmaschine mit elektrisch angetriebenem Werkzeug zur Unkrautregulierung im ökologischen Zuckerrübenanbau**

Dissertation

zur Erlangung des Grades eines Doktors

der Agrarwissenschaften

vorgelegt

der Fakultät Agrarwissenschaften

von

M. Sc. Ulrich Paul Bucher

aus Trochtelfingen, Baden-Württemberg

**Hohenheim 2018**

Tag der mündlichen Prüfung:	27.07.2017
1. Prodekan:	Prof. Dr. S. Böttinger (stellvertretender Prüfungsleiter)
Berichterstatter, 1. Prüfer:	Prof. Dr. Dr. h.c. mult. K. Köller
Mitberichterstatter, 2. Prüfer:	Prof. Dr. O. Hensel
3. Prüfer:	Prof. Dr. J. Müller

1	<i>Einleitung</i> .....	1
2	<i>Stand der Technik</i> .....	4
2.1	Grundlagen .....	4
2.2	IP-Schutzarten nach DIN VDE 0470.....	5
2.3	Betriebsarten elektrischer Maschinen nach DIN EN 60034-1 .....	6
2.4	Kühlung .....	6
2.5	Elektrische Isolierung .....	6
2.6	Drehfeld .....	7
2.7	Drehstromasynchronmotoren .....	7
2.8	Drehstromsynchronmotoren .....	8
2.9	Servoantriebe .....	9
2.9.1	Bestandteile eines modernen Servoantriebs .....	10
2.9.2	Drehzahl- und Drehmomentregelung von Servoantrieben.....	11
3	<i>Elektrische Antriebe in der Landtechnik</i> .....	12
3.1	Einteilung dieselektrischer Antriebe für Traktoren .....	13
3.2	Bereitstellung elektrischer Energie für Anbaugeräte.....	16
3.3	Einheitliche Schnittstelle für Traktor und Anbaugerät.....	17
3.3.1	Dieselektrische Antriebe bei Traktoren.....	18
3.3.1.1	Eltrac-Projekt.....	18
3.3.1.2	Belarus 3023 .....	19
3.3.1.3	Elektrischer Einzelradantrieb bei Traktoren.....	20
3.3.1.4	MELA: Mobile elektrische Leistungs- und Antriebstechnik für Fahrzeuge ..	22
3.3.1.5	E Premium Traktorenbaureihe von John Deere .....	23
3.3.1.6	Deutz und Amazone Projekt ElecTra .....	24
3.4	Elektrische Baugruppenantriebe in selbstfahrenden Erntemaschinen.....	27
3.4.1	Elektrischer Baugruppenantrieb Feldhäcksler .....	27
3.4.2	Elektrischer Baugruppenantrieb Mähdrescher .....	29
3.5	Dieselektrische Fahrtriebe bei selbstfahrenden Erntemaschinen.....	31

3.5.1	Dieselelektrischer Fahrtrieb Mähdrescher.....	31
3.5.2	Dieselelektrischer Fahrtrieb selbstfahrender Köpfrdebunker.....	33
3.6	Anforderungen seitens des Gesetzgebers an elektrische Antriebe .....	34
3.7	Zusammenfassung .....	35
4	<i>Unkrautkontrolle im Zuckerrübenanbau.....</i>	<i>36</i>
4.1	Mechanische Unkrautregulierung bei Reihenkulturen .....	39
4.2	Grundlagen selektiver Unkrautregulierung .....	40
4.2.1	Kartieransatz.....	41
4.2.2	Einsatz digitaler Bildverarbeitung zur Erkennung von Pflanzen .....	42
4.2.2.1	Aufbau und Grundlagen digitaler Bilder .....	43
4.2.2.2	Einsatzbereiche digitaler Bildverarbeitung im Pflanzenbau .....	44
4.2.2.3	Herausforderungen der Pflanzenerkennung in digitalen Bildern .....	44
4.2.2.4	Klassifizierung von Kulturpflanzen und Unkräutern in digitalen Bildern .....	45
4.3	Hackmaschinen für selektives Arbeiten innerhalb der Kulturreihe.....	49
4.3.1	Zykloidenhacke .....	49
4.3.2	Rotationshacke der Universität Bonn.....	52
4.3.3	Robocrop von Garford .....	53
4.3.4	Robovator Firma F. Poulsen Engineering Aps.....	56
4.3.5	GPS-gesteuertes Scharhacksystem für den Kulturreihenbereich bei Tomaten..	58
4.3.6	Hackblitz Firma Radis Mecanisation .....	59
4.3.7	Reihenhackmaschine für Mais .....	60
4.3.8	Selektiv arbeitendes Reihenhacksystem von Home.....	61
4.3.9	Hackroboter für mechanische Unkrautregulierung bei Zuckerrüben.....	62
4.3.10	Roboter für den Einsatz mechanischer Unkrautregulierung .....	63
4.4	Kartieransatz Aufzeichnung der Saatposition unter Einsatz von DGPS .....	64
5	<i>Hackmaschinenentwicklung .....</i>	<i>66</i>
5.1	Stand bei Projektübergabe .....	66
5.2	Aufbau der ersten Maschinenstudie .....	66

5.2.1	Werkzeugvarianten.....	67
5.2.2	Antrieb der Werkzeuge .....	68
5.2.3	Drehzahlsteuerung des hydraulischen Antriebs .....	68
5.2.4	Bildverarbeitung.....	69
5.3	Entwicklung eines weiteren Hackwerkzeugs .....	71
5.3.1	Aufbau und Funktionsweise der Neuentwicklung .....	72
6	<i>Feldversuche 2010</i> .....	74
6.1	Material und Methode .....	74
6.1.1	Versuchsfeld.....	74
6.1.2	Versuchsdurchführung .....	74
6.1.3	Auswertung der Boniturbilder.....	76
6.2	Ergebnisse der Feldversuche .....	78
6.3	Diskussion und Rückschlüsse.....	79
6.3.1	Werkzeugvariante Neuentwicklung .....	79
6.3.2	Werkzeugvariante Kreisel .....	80
6.3.3	Werkzeugvariante Schnapper .....	80
7	<i>Feldversuche 2011</i> .....	82
7.1	Material und Methode .....	82
7.1.1	Aufbau des elektrischen Antriebs .....	83
7.1.2	Funktionsweise und Komponenten des elektrischen Antriebs.....	85
7.1.3	3-D-CAD-System.....	86
7.1.4	Aufbau des elektrischen Antriebs auf eine vorhandene Hackmaschine.....	86
7.1.5	Tiefenführung.....	88
7.1.6	Bedienoberfläche und Bildverarbeitungsprogramm Steuerung Hackwerkzeug	90
7.1.7	Anpassung der Bildverarbeitung.....	90
7.1.8	Steuerung der Exakt-Tiefenführung.....	91
7.1.9	Standortbeschreibung .....	92

7.1.10	Bodentemperatur .....	93
7.1.11	Bodenfeuchte.....	94
7.1.12	Geophysikalische Bodenkartierung anhand des EM 38.....	94
7.1.13	Boniturwagen .....	94
7.1.14	Bildauswertungssoftware Bildklick .....	95
7.1.15	Statistische Auswertung der Versuchsergebnisse .....	95
7.1.16	Auswertung der Positionsbestimmung.....	95
7.1.17	Versuchsaufbau .....	96
7.1.18	Versuchsdesign.....	97
7.1.19	Versuchsdurchführung .....	99
7.1.20	Proberodung .....	102
7.2	Ergebnisse der Feldversuche 2011 .....	104
7.2.1	Darstellung der EM-38-Bodenkarte .....	104
7.2.2	Ergebnisse der Handarbeitserfassung Frühsaat.....	106
7.2.3	Ergebnisse der Handarbeitserfassung Spätsaat .....	107
7.2.4	Bestandesdichte und Kulturpflanzenverluste Schlag 25 .....	108
7.2.5	Bestandesdichte und Kulturpflanzenverluste Parzelle P 04 A.....	109
7.2.6	Verlauf des Unkrautbesatzes von Versuchsfeld Schlag 25 .....	110
7.2.7	Verlauf des Unkrautbesatzes von Versuchsfeld Parzelle P 04 A.....	112
7.2.8	Ertragsdaten Schlag 25 .....	113
7.2.9	Ertragsdaten Parzelle P 04 A.....	115
7.2.10	Ergebnisse der Positionserkennung.....	118
7.3	Diskussion der Ergebnisse 2011 .....	119
7.3.1	Randparameter .....	119
7.3.2	Handarbeitsaufwand.....	120
7.3.3	Bestandesdichte .....	122
7.3.4	Unkrautbesatz.....	123

7.3.5	Ertrag.....	124
7.3.6	Bewertung Prototyp und Bildverarbeitung .....	126
8	<i>Feldversuche 2012</i> .....	128
8.1	Material und Methode .....	128
8.1.1	Veränderungen der Bildaufnahmetechnik.....	131
8.1.2	Zweiter Projektabschnitt 2012 .....	132
8.1.3	Bedienung der Hackmaschine.....	132
8.1.4	Inbetriebnahme und Vorversuche .....	134
8.1.5	Standortbeschreibung .....	135
8.1.6	Versuchsaufbau .....	137
8.2	Ergebnisse der Versuche 2012 .....	140
8.2.1	Randparameter Parzelle P 12A .....	140
8.2.2	Randparameter Schlag 9b.....	141
8.2.3	Ergebnis des ermittelten Handarbeitsaufwandes der Versuche 2012 .....	143
8.2.4	Bestandesdichte und Kulturpflanzenverluste .....	144
8.2.5	Verlauf des Unkrautbesatzes .....	146
8.2.6	Ergebnisse der Ertragsermittlung.....	149
8.2.7	Ergebnisse der Pflanzenpositionierung .....	152
8.3	Diskussion der Ergebnisse 2012.....	154
8.3.1	Randparameter .....	154
8.3.2	Handarbeitsaufwand.....	155
8.3.3	Bestandesdichte .....	156
8.3.4	Unkrautverlauf und Regulierungserfolg.....	157
8.3.5	Ertrag.....	158
8.3.6	Bewertung der Bildverarbeitung .....	160
8.4	Fazit der Feldversuche.....	161
8.5	Ausblick.....	162

<i>9 Zusammenfassung.....</i>	<i>163</i>
<i>10 Summary.....</i>	<i>165</i>

Abbildungsverzeichnis

Bild 1: Darstellung der Funktionsweise eines Drehfelds (geändert nach Tkotz 2012).....	7
Bild 2: Aufbau eines Drehstromasynchronmotors (geändert nach Tkotz 2012).....	8
Bild 3: Vollpolläufer (links) und Schenkelpolläufer (rechts) (geändert nach Steinhart 2012) ..	9
Bild 4: Schematische Darstellung des Mehrquadrantenbetriebs (geändert nach Bucher et al.2012).....	11
Bild 5: Regelstruktur eines volldigitalen Servoreglers (Umrichter) der Firma Jetter (Installationsanleitung Firma Jetter, Ludwigsburg) .....	12
Bild 6: Serieller Hybrid (links) und paralleler Hybrid (rechts) (geändert nach Gallmeier 2009) .....	14
Bild 7: Varianten elektrischer Achs-/Radantriebe (geändert nach Geißler et al. 2009).....	15
Bild 8: Powerpacksysteme von GKN Walterscheid (links) und Zuidberg/STW (rechts).....	16
Bild 9: (links) Schematische Darstellung AEF-Schnittstelle; (rechts) AEF-Schnittstelle in eingebautem Zustand auf Traktor (geändert nach Sobotzig & Shi 2012).....	18
Bild 10: Aufbau des elektrischen Antriebs im Eltrac (geändert nach Schmetz & Klett 1998)	19
Bild 11: Schematische Darstellung des Radnabenantriebs (geändert nach Geißler et al 2010) .....	21
Bild 12: Aufbau des Gespanns Triebachsanhänger und Traktor (geändert nach Reinmuth F. und N. Tarasinski 2011).....	24
Bild 13: Aufbau des Generatorsystems von ZF und Deutz Fahr (geändert nach Weinmann et al. 2012) .....	25
Bild 14: Aufbau des elektrischen Baugruppenantriebs von Gallmeier (geändert nach Gallmeier 2009) .....	27
Bild 15: Schematische Darstellung des Mähdrescherantriebs (geändert nach Bernhard 2011) .....	32
Bild 16: Schematischer Aufbau des elektrischen Antriebs des Selbstfahrers .....	34
Bild 17: Funktionsweise des Bispektralkamerasystems (geändert nach Oebel 2006).....	46
Bild 18: Schematische Darstellung der Werkzeugbahn (geändert nach Dedousis 2007) .....	49
Bild 19: Zykloidenhacke: 1: Hydraulikmotor; 2: Zinkenrotor; 3: Parallelogramm; 4: GPS- Antenne (geändert nach Gobor 2007).....	50

Bild 20: Schematische Darstellung der Arbeitsweise (geändert nach Norremark et al. 2012)	51
Bild 21: Rotationshacke: 1: Hackwerkzeug; 2: Tiefenführung; 3: Pflanzenerkennung; 4: Geschwindigkeitsmessung; 5: Spurführung (geändert nach Gobor 2007)	53
Bild 22: Arbeitsweise der Reihenhackmaschine Robocrop (geändert nach Tillett et al. 2008) .....	54
Bild 23: Verschiedene Ausführungen des Werkzeugträgers (geändert nach Dedousis 2007).	54
Bild 24: 6-reihige Reihenhackmaschine von Garford (geändert nach Dedousis 2007)	55
Bild 25: Erkennung von Pflanzenpositionen (geändert nach Dedousis 2007)	56
Bild 26: GPS-gesteuerte Scharhacke (Pérez-Ruiz et al. 2012)	58
Bild 27: Arbeitsweise des Systems (geändert nach Pérez-Ruiz et al. 2012)	59
Bild 28: Reihenhackmaschine Hackblitz bei einer Vorführung der Beet Europe 2010	60
Bild 29: Scharhacksystem (geändert nach Home 2003)	61
Bild 30: Darstellung Hackroboter (geändert nach Åstrand & Baerveldt (2002)	63
Bild 31: Aufbau der ersten Hackmaschine (geändert nach Fischer 2012)	67
Bild 32: Darstellung der Werkzeugvarianten Kreisel (li.) und Schnapper (re.) (geändert nach Fischer 2012)	68
Bild 33: Grafische Bedienoberfläche der ersten Programmversion	71
Bild 34: Holzmodell der Werkzeugumlaufbahn des zu entwickelnden Hackwerkzeugs	72
Bild 35: Funktionsmuster des Hackwerkzeugs (links); variable Tiefenführung (rechts)	73
Bild 36: Neu entwickeltes Hackwerkzeug auf präparierter Versuchsbahn	75
Bild 37: Versuchsplan des Werkzeugversuchs (geändert nach Bier 2010)	76
Bild 38: Ausgewertetes Boniturbild	77
Bild 39: Darstellung der Bearbeitungshorizonte der Werkzeugvarianten Kreisel (links), Schnapper (Mitte) und Neuentwicklung (rechts)	78
Bild 40: Schaltschrank mit Leistungselektronik und PC-Bildverarbeitung bei Inbetriebnahme .....	84
Bild 41: Schematische Darstellung des elektrischen Antriebs (Bucher et al. 2012)	85
Bild 42: Distanzrahmen mit Aufnahmen für Dreipunktanbau sowie Generator	87

Bild 43: Schmotzer-Kombi-PP-Geräterahmen mit allen Komponenten des Prototyps für die Versuche 2011.....	88
Bild 44: Spindeltrieb für Tiefenführung (links); Tiefenführung mit Hackwerkzeug und Ultraschallsensor (weißer Kreis) (rechts).....	89
Bild 45: Lage der Versuchsfelder Schlag 25 und Parzelle P 04A (Google Earth).....	92
Bild 46: Als erkannt definiertes Bild aus dem Bildverarbeitungsprogramm.....	95
Bild 47: Aussaat der Feldversuche 2011.....	97
Bild 48: Versuchsplan (Parzelle P 04 A).....	98
Bild 49: Darstellung der EM 38 Bodenkarte von Schlag 25.....	104
Bild 50: Zusammengeführte Baugruppe Tiefenführung und Hackwerkzeug.....	129
Bild 51: Neues Parallelogramm mit Dunkelkammer und integrierter Baugruppe Hackwerkzeug/Tiefenführung.....	130
Bild 52: Parallelogramme in ausgehobenem Zustand mit Galgenkonstruktion.....	131
Bild 53: Bedienoberfläche zweireihige Maschine.....	133
Bild 54: Simulierte Rübenreihen (li.); Prototyp mit Pinsel für die Vorversuche 2012 (re.) ..	135
Bild 55: Lage der Versuchsfelder 2012 (Google Earth).....	136
Bild 56: EM-38-Bodenkarte Parzelle P 12A.....	140
Bild 57: Bodenkarte Schlag 9b.....	142

Tabellenverzeichnis

Tabelle 1: Übersicht Powerpacksysteme (geändert nach Geißler et al. 2013).....	17
Tabelle 2: Ergebnisse des Werkzeugvergleichs .....	78
Tabelle 3: Versuchsvarianten der Feldversuche 2011 .....	96
Tabelle 4: Übersicht Versuche 2011 Früh- und Spätsaat .....	101
Tabelle 5: Zusammenfassung der Randparametererhebung auf Schlag 25 .....	105
Tabelle 6: Ergebnisse der Randparametererhebung Parzelle P 04 A .....	105
Tabelle 7: Darstellung der gemittelten Werte der Rübeninhaltsstoffe (Schlag 25) .....	114
Tabelle 8: Gemittelte Werte Zuckerrübeninhaltsstoffe (Kalium, Natrium, Amino-N), Standartmelasseverlust und ausbeutbarer Zucker (Parzelle P 04 A) .....	116
Tabelle 9: Auswertung der Bildverarbeitung auf Schlag 25 .....	118
Tabelle 10: Auswertung der Bildverarbeitung auf Parzelle P 04 A .....	118
Tabelle 12: Monetäre Betrachtung des Handarbeitsaufwands der Varianten drei und vier...	120
Tabelle 13: Versuchsglieder Versuchsfeld Parzelle P 12A .....	138
Tabelle 14: Versuchsglieder Versuchsfeld Schlag 9b .....	138
Tabelle 15: Übersicht der Versuche 2012 .....	139
Tabelle 16: Ergebnisse Randparametererhebung Parzelle P 12A .....	141
Tabelle 17: Ergebnisse der Randparametererhebung auf Schlag 9b .....	142
Tabelle 18: Rübeninhaltsstoffe Parzelle P 12A .....	150
Tabelle 19: Rübeninhaltsstoffe Schlag 9b .....	152
Tabelle 20: Positionserkennung Parzelle P 12A .....	152
Tabelle 21: Positionserkennung Schlag 9b .....	153
Tabelle 22: Versuchsglieder 2012 .....	154
Tabelle 23: Monetäre Betrachtung des Handarbeitsaufwands .....	156

Diagrammverzeichnis

Diagramm 1: Temperaturverlauf und Niederschlagsverteilung 2011 (LTZ-Wetterstation Hohenheim).....	93
Diagramm 2: Ergebnisse der Zeitermittlung auf Schlag 25.....	106
Diagramm 3: Ergebnisse der Zeitermittlung auf Parzelle P 04 A.....	107
Diagramm 4: Bestandesdichte der einzelnen Varianten vor und nach den drei Hackdurchgängen auf Schlag 25.....	109
Diagramm 5: Bestandesdichte der einzelnen Varianten vor und nach den drei Hackdurchgängen auf Parzelle P 04 A.....	110
Diagramm 6: Verlauf des Unkrautbesatzes auf Versuchsfeld Schlag 25.....	111
Diagramm 7: Verlauf des Unkrautbesatzes auf Versuchsfeld Parzelle P 04 A.....	112
Diagramm 8: Ertragsdaten Schlag 25.....	114
Diagramm 9: Ertragsdaten Parzelle P 04 A.....	116
Diagramm 10: Darstellung des Jahresniederschlags und des Temperaturverlaufs 2012 (LTZ bw Wetter).....	137
Diagramm 11: Darstellung des benötigten AKh/ha-Einsatzes auf Parzelle P 12A.....	143
Diagramm 12: Darstellung des benötigten AKh/ha-Einsatzes auf Schlag 9b.....	144
Diagramm 13: Bestandesdichte Parzelle P 12A vor und nach den Versuchen.....	145
Diagramm 14: Bestandesdichte Schlag 9b vor und nach den Versuchen.....	146
Diagramm 15: Durchschnittlicher Unkrautbesatz je Boniturbild und Variante (P 12A).....	147
Diagramm 16: Durchschnittlicher Unkrautbesatz je Boniturbild und Variante (Schlag 9b).....	148
Diagramm 17: Ertragsermittlung Parzelle P 12A.....	149
Diagramm 18: Ertragsermittlung Schlag 9b.....	151

## 1 Einleitung

Der Einsatz chemischer Präparate für den Pflanzenschutz in der Landwirtschaft wird zunehmend erschwert. Zum einen führt die fortwährende Einschränkung des Einsatzes von Agrarchemie seitens der Gesetzgebung zum Wegfall einiger Wirkstoffe (Richtlinie 2009/128/EG) zum anderen stellt die fortschreitende Problematik der Resistenzbildung einiger Unkräuter gegenüber Herbiziden (Petersen et al. 2015, Bohren et al. 2006) die Landwirte vor immer neue Herausforderungen.

Zusätzlich zur Einschränkung des chemischen Pflanzenschutzes seitens der europäischen Union steht dieser immer häufiger im Fokus der öffentlichen Kritik. Einige Mittel stehen derzeit im Verdacht, sie könnten gesundheitsschädlich sein (Jayasumana et al. 2014).

Des Weiteren kommt erschwerend hinzu, dass die Agrarchemieindustrie immer weniger neue Wirkstoffe und Pflanzenschutzmittel für den europäischen Markt entwickelt (Preuße & Ahlers 2014). Die Entwicklungsbudgets der Industrie für den europäischen Markt sind in den letzten Jahrzehnten signifikant gesunken. In der Folge werden die Neuzulassungen von Pflanzenschutzwirkstoffen erschwert beziehungsweise sinken sie (Petersen et al. 2015; Bröker 2014, Bundschuh 2010).

Unter diesen Gesichtspunkten könnte ein automatisiertes mechanisches Unkrautregulierungsverfahren für den Pflanzennahbereich innerhalb der Kulturreihe nicht nur die Unkrautregulierung im ökologischen Pflanzenbau vereinfachen, sondern auch eine echte Alternative zum Einsatz von chemischem Pflanzenschutz in Reihenkulturen darstellen.

Das im Folgenden beschriebene Forschungsprojekt wurde vom Ministerium für Ernährung und Ländlichen Raum Baden-Württemberg aus dem Sonderprogramm zur Stärkung und Wettbewerbsfähigkeit des Zuckerrübenanbaus in Baden-Württemberg und der Firma Schmotzer, Bad Windsheim, finanziert. Die Umsetzung geschah in enger Kooperation mit dem Verband baden-württembergischer Zuckerrübenanbauer, der ARGE Südwest (Arbeitsgemeinschaft für Versuchswesen und Beratung im Zuckerrübenanbau in Baden-Württemberg, Hessen und Rheinland-Pfalz Südwest), der Firma Schmotzer und der Firma Jetter, Ludwigsburg. Zudem basiert die Entwicklung auf den Erkenntnissen eines vorangegangenen Projekts, welches in Fischer (2012) beschrieben wird.

Eine wesentliche Voraussetzung für ein mechanisches Regulierungsverfahren ist die Erkennung beziehungsweise die eindeutige Zuordnung der Position von Kulturpflanze und Unkraut. Hierfür bietet digitale Bildverarbeitung bereits einige Lösungsansätze.

Darüber hinaus wird für die Aktuatoren eines mechanischen Verfahrens eine sehr hohe Dynamik bezüglich der Bewegungsabläufe vorausgesetzt.

Durch die derzeitigen Entwicklungen im Bereich der mobilen elektrischen Hochvoltantriebe sind die Grundlagen für ein solches, hochdynamisches Antriebssystem geschaffen.

### **Problemstellung**

Die Optimierung der mechanischen Unkrautregulierung innerhalb der Kulturreihe stellt eine wesentliche Herausforderung für die weitere Ausdehnung des ökologischen Zuckerrübenanbaus dar.

Um Ertragseinbußen durch einen zu hohen Unkrautbesatz zu minimieren (Wetzler 2010), muss die Zuckerrübe gerade während ihrer Jugendentwicklung vor Konkurrenz geschützt werden. Den bisher für diesen Zweck vorherrschenden Einsatz der Handhacke zu minimieren und gar durch automatisierte Verfahren zu ersetzen, ist der heutige Ansatz von Forschung und Entwicklung.

Mit dem Handarbeitsaufwand für die Unkrautregulierung steht und fällt die Wirtschaftlichkeit einer Kultur. Für den Zwischenreihenbereich entstanden in der Vergangenheit ausreichende technische Lösungen, die das Regulieren von Unkraut ohne den Einsatz von Handarbeit ermöglichen (Kern 2007; Handler & Nadlinger 2005). Durch den Einsatz von DGPS-beziehungsweise kameragesteuerten Lenksystemen können diese zudem automatisch an den Reihen entlanggeführt werden. Der Einsatz einer zweiten Arbeitskraft für das Lenken der Hacktechnik, zusätzlich zum Fahrer, ist so nicht notwendig. Eine ähnliche Minimierung des Arbeitskräfteeinsatzes für die Handhacke innerhalb der Reihe und im unmittelbaren Umfeld der Kulturpflanze ist wünschenswert und unter anderem Gegenstand dieser Dissertation. Das größte Problem ist der schwankende Bedarf des Handarbeitsaufwands. Je nach Jahr und Fläche kann der Umfang des Handarbeitseinsatzes stark variieren (Trieschmann 2012; Haberland & Koch 2009; Schwab & Thalmann 2008; Irla et al. 2005). Dadurch ist dessen Ausmaß schwer kalkulierbar und stellt in der Planung des Landwirts eine Unbekannte dar.

Ein mechanisches Regulierungsverfahren bietet zudem den Vorteil eines kulturübergreifenden Einsatzes, welcher bei Pflanzenschutzmitteln nicht immer gegeben ist.

## **Zielsetzung**

In der vorliegenden Dissertation wird der Entwicklungsprozess einer neuartigen Reihenhackmaschine für Zuckerrüben dargestellt. Zu Beginn werden die aus einem vorherigen Projekt (Fischer 2012) stammenden Hackwerkzeuge sowie die erste Projektstudie einer selektiv in der Reihe arbeitenden Hackmaschine optimiert. Dies geschieht anhand eines Feldversuchs, mit dessen Hilfe aus drei vorhandenen Werkzeugentwicklungen das optimale Werkzeug selektiert werden soll. Die untersuchten Versuchsparameter sind die Größe der bearbeiteten Fläche innerhalb der Reihe, der theoretische Unkrautregulierungserfolg sowie die Verstopfungsanfälligkeit der Werkzeuge bei Unkräutern fortgeschrittenen Wachstumsstadiums. Parallel zur Entwicklung eines Hackwerkzeugs folgt die Entwicklung und Integration eines elektrischen Hochvoltantriebssystems für den Hackwerkzeugantrieb und eine hierfür entwickelte Tiefenführung.

Mit der neu entstandenen Projektstudie werden mehrjährige Freilandversuche durchgeführt. Ziel dieser Versuche ist es, die zunächst einreihige Maschine in mehreren Entwicklungsabschnitten zu einer mehrreihigen, praxisnahen Hackmaschine auszubauen.

Die Freilandversuche sind somit Bestandteil eines mehrjährigen, kontinuierlichen Optimierungsprozesses. Zudem sollen die jeweiligen Entwicklungsstufen der Hackmaschine während der Freilandversuche mit den gängigen Unkrautregulierungsverfahren des ökologischen und konventionellen Zuckerrübenanbaus verglichen werden, um einen Vergleich bezüglich des Kulturpflanzenverlusts sowie des Regulierungserfolgs anstellen zu können.

## **2 Stand der Technik**

Das folgende Kapitel umfasst die Grundlagen sowie eine Übersicht über mobile elektrische Antriebe in der Landtechnik. Weiterführend erfolgt eine Zusammenfassung aller bisherigen Forschungs- und Entwicklungstätigkeiten auf dem Gebiet der mechanischen Unkrautregulierung innerhalb der Kulturreihe. Des Weiteren werden mehrere Ansätze zum Einsatz von Bildverarbeitungsverfahren in der Forschung und Entwicklung zur Erkennung von Kulturpflanzen und Unkraut vorgestellt. Zudem soll der Stand der Technik bei mechanischen Unkrautregulierungsverfahren als Basis zur Bewertung der gewonnenen Ergebnisse mit der neuen, im Folgenden als Hohenheimer Reihenhackmaschine genannten, Entwicklung dienen.

### **2.1 Grundlagen**

Sämtliche elektrische Maschinen, ob Motoren unterschiedlicher Bauart oder Generatoren, kann man unter dem Sammelbegriff elektromagnetische Energiewandler zusammenfassen (Tkotz 2012).

Dabei wandeln Elektromotoren generell elektrische Energie in mechanische Energie um, indem sie einem Netz elektrische Energie entziehen und an ihrer Welle mechanische Energie in Form von Drehzahl und Drehmoment bereitstellen. Bei Generatoren läuft dieser Prozess in umgekehrter Richtung ab. Generatoren wandeln die bereitgestellte mechanische Energie in elektrische Energie um (Tkotz 2012).

Bei der angesprochenen Energieumwandlung treten Verluste wie beispielsweise Wirkverluste in Form von Wärme auf. Verluste, die durch Wirbelströme und Ummagnetisierung entstehen, bezeichnet man als Eisenverluste. Des Weiteren entstehen Verluste beim Durchfließen des elektrischen Stroms durch die Wicklungen im Innern der Elektromotoren (Tkotz 2012), sogenannte Wicklungsverluste. Zusätzlich dazu treten Reibungsverluste in den Wellenlagern sowie Lüfterverluste zum Beispiel bei Drehstromasynchronmotoren auf. Als Maß der Gesamtverluste dient der Wirkungsgrad. Dieser gibt an, wie viel von der aufgenommenen Energie aus dem Stromnetz als Drehmoment und Drehzahl an der Welle einer elektrischen Maschine bereitgestellt wird und wie hoch die oben genannten Verluste sind (Tkotz 2012).

Elektrische Antriebe kommen in sehr vielen Bereichen der Industrie, des öffentlichen Nah- und Fernverkehrs sowie in Haushalt und Büro zum Einsatz. Grundsätzlich erfolgt eine Einteilung in Gleichstrom- und Wechselstrommaschinen (Tkotz 2012; Hahn 2011).

Gleichstrommaschinen finden heutzutage meist Anwendung in Antrieben mit Leistungen unter einem Kilowatt, wie beispielsweise in batteriebetriebenen Geräten für den Haushalt oder in Fahrzeugen mit Gleichspannungsbordnetz (Hahn 2011). In der Landtechnik werden seit jeher Gleichstrommotoren und Generatoren als Anlasser für Motoren oder als Lichtmaschinen eingesetzt. Neu hingegen ist der Einsatz sogenannter Hochvoltantriebe in Form von Drehstrommotoren und -generatoren.

Die Häufigkeit des Einsatzes elektrischer Maschinen in den oben genannten Bereichen liegt in ihren Vorzügen begründet.

## **2.2 IP-Schutzarten nach DIN VDE 0470**

Bei der Auswahl eines geeigneten Motors für den mobilen Einsatz in der Landtechnik ist die Einhaltung beziehungsweise die Wahl der richtigen Schutzart von großer Bedeutung. Je nach Einsatzbedingungen müssen die Motoren vor eindringendem Wasser oder Staub geschützt werden. Aber nicht nur der Motor muss geschützt werden, sondern auch der Anwender. Um Unfälle zu vermeiden, muss sichergestellt sein, dass keine spannungsführenden Teile berührt werden können. Für jeden Anwendungsbereich gibt es eine bestimmte Schutzklasse, die der Elektromotor erfüllen muss.

Diese sogenannten Schutzarten werden mit den zwei Buchstaben IP (International Protection) und zwei nachfolgenden Ziffern, angegeben beispielsweise IP68. Hierbei gibt die erste Ziffer jeweils den Schutzgrad für Berührungs- und Fremdkörperschutz und die zweite Ziffer den Schutzgrad gegen das Eindringen von Wasser an. Die Angabe des Berührungs- und Fremdkörperschutzes erfolgt in sieben Klassen von 0 bis 6. Hierbei steht die Klasse 0 für keinen besonderen Schutz sowie die Klasse 6 für Schutz gegen Eindringen von Staub und vollständigen Berührungsschutz. Analog hierzu erfolgt die Einteilung des Schutzgrades vor Eindringen von Wasser in 9 Klassen von 0 bis 8. Die Klasse 0 steht wiederum für keinen besonderen Schutz, Klasse 8 für die höchste Schutzklasse, den Schutz vor eindringendem Wasser bei dauerhaftem Untertauchen des Motors. Des Weiteren können nachgestellte Buchstaben wie beispielsweise IP68AH zusätzliche Informationen über Berührungsschutz und Schutz vor Wassereintritt angeben. Die Auswahl der richtigen Schutzklasse ist gerade in der Landwirtschaft von großer Bedeutung. Im praktischen Feldeinsatz müssen Elektromotoren unter schwierigsten Bedingungen wie Hitze, Feuchtigkeit, Staub und Vibrationen zuverlässig arbeiten.

### **2.3 Betriebsarten elektrischer Maschinen nach DIN EN 60034-1**

Des Weiteren kommt es bei der Motorauswahl darauf an, wie der ausgewählte Motor betrieben werden soll. Je nach Betriebsart, als Dauerläufer oder nur im kurzzeitigen Betrieb, muss der Motor unterschiedlich in Bezug auf Bauform und Kühlung ausgeführt werden. Generell werden zehn Betriebsarten von S1 bis S10 voneinander unterschieden. Die Betriebsarten S1 bis S7 stehen hierbei für den Betrieb mit unveränderten Belastungen. Demnach eignen sich beispielsweise Motoren der Betriebsart S1 für den Dauerbetrieb. Die Klassen S8 bis S10 stehen für den Betrieb mit Last und Drehzahländerung (Tkotz 2012).

### **2.4 Kühlung**

Wärmeverluste in den Wicklungen elektrischer Maschinen führen dazu, dass ein Motor im Dauerbetrieb sich mehr erwärmt als ein Motor bei kurzzeitigem Einsatz. Indem man die Maschine kühlt, kann man bei gleicher Leistung kleiner bauen oder aber bei gleicher Baugröße die Leistung erhöhen. Elektromotoren sind für eine Umgebungstemperatur von 40 °C ausgelegt. Steigt die Temperatur, muss die Leistungsabgabe reduziert werden, um eine Überhitzung bzw. ein Überschreiten der Grenzübertemperatur zu vermeiden. Bei der Kühlung unterscheidet man die läuferabhängige Selbst- und Eigenkühlung von der drehzahlunabhängigen Fremdkühlung. Für die Fremdkühlung können beispielsweise Thermoöle eingesetzt werden.

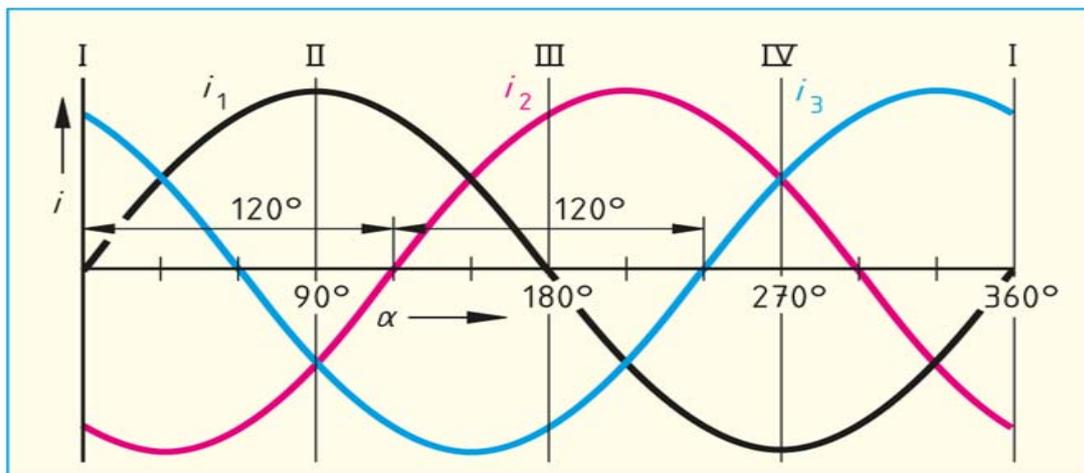
Bei der Selbstkühlung ist meistens ein Lüfter auf der Läuferwelle montiert, welcher drehzahlabhängig für einen kühlenden Luftstrom sorgt (Tkotz 2012).

### **2.5 Elektrische Isolierung**

In einem Elektromotor müssen gewisse Bereiche durch eine Isolierung voneinander getrennt werden. Die Überhitzung einer elektrischen Maschine führt unweigerlich zur Zerstörung ihrer Isolierung im Innern, was wiederum zur Unbrauchbarwerdung der Maschine führt. In den sogenannten Isolierklassen sind jeweils die zulässigen maximalen Gebrauchstemperaturen für die unterschiedlichen Isoliermaterialien angegeben. Je nachdem, welche Isoliermaterialien eingesetzt werden, kann die maximale Gebrauchstemperatur stark variieren. In der Isolierklasse E besteht die Isolierung aus Hartpapier, welches bis 120 °C eingesetzt werden kann. Durch den Einsatz von Silikonen in der Klasse H steigt die maximale Gebrauchstemperatur bis 180 °C an.

## 2.6 Drehfeld

Die Grundlage der physikalischen Energieumwandlung in einem Elektromotor bildet das sogenannte Drehfeld. Ein Drehfeld entsteht zum Beispiel, indem man drei mit Dreiphasenwechselstrom durchflossene Spulen im Abstand von  $120^\circ$  radial in einem Kreis anordnet. Dadurch, dass die Spulen mit Dreiphasenwechselstrom beaufschlagt werden, entsteht ein rotierendes Magnetfeld, welches auch Drehfeld genannt wird (Tkotz 2012, Fuest & Döring 2008). Das rotierende Magnetfeld ist in der Lage, eine im Kreismittelpunkt befindliche Magnetnadel (Welle) in Rotation zu versetzen. Bei der Verwendung von drei Spulen entsteht ein zweipoliges Drehfeld und die Magnetnadel macht beim Durchlauf einer Periode eine Umdrehung. Ordnet man nun zwei Spulensysteme im Abstand von  $60^\circ$  radial an, macht die Magnetnadel nur eine halbe Umdrehung pro Periode. Die Drehfelddrehzahl ergibt sich somit aus der Netzfrequenz sowie der Polpaarzahl.



**Bild 1:** Darstellung der Funktionsweise eines Drehfelds (geändert nach Tkotz 2012)

## 2.7 Drehstromasynchronmotoren

Da in den folgenden Beispielen aus Wissenschaft und Landtechnikindustrie lediglich Wechselstrommotoren in Form von Drehstromasynchron- und Drehstromsynchronmotoren zum Einsatz kommen, sollen im kommenden Abschnitt ausschließlich der Aufbau und die Funktion von Dreh- bzw. Wechselstrommotoren erläutert werden.

Drehstromasynchronmotoren sind die am häufigsten eingesetzten elektrischen Maschinen in der Industrie. Aufgrund ihrer einfachen und robusten Bauweise, ihrer Unempfindlichkeit gegenüber Überlastung und der geringen Anforderungen bezüglich der Wartung wird bei Antriebsplanungen zuerst die Möglichkeit des Einsatzes dieses Maschinentyps geprüft. Die Vielfältigkeit der Anwendungsgebiete macht es schwierig, spezielle Bereiche für den Einsatz von Drehstromasynchronmotoren festzulegen.

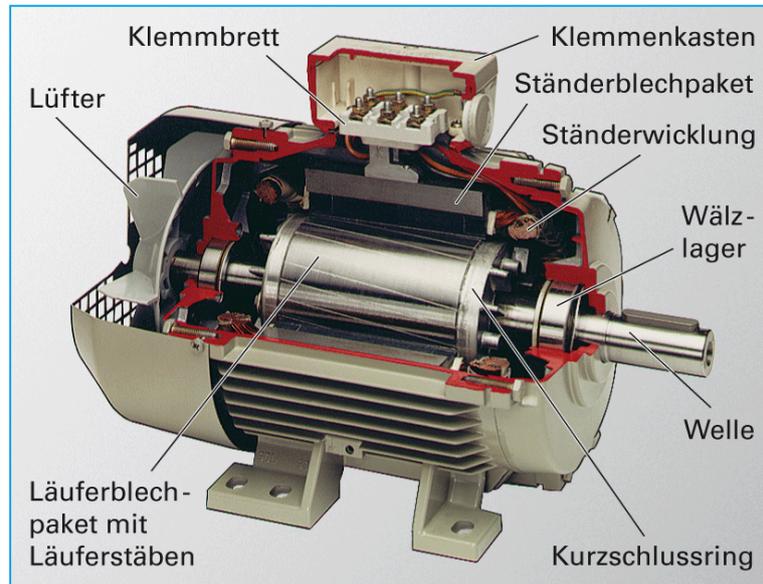
## Aufbau

Grundsätzlich bestehen Drehstromasynchronmotoren aus einem feststehenden Teil, dem Ständer (Stator), und einem rotierenden Bauteil, dem sogenannten Läufer (Rotor). Beide Komponenten des Asynchronmotors sind durch einen Luftspalt (teilweise nur wenige Millimeter) voneinander getrennt (siehe Bild 2). Im Ständer wird zum Beispiel durch Anlegen dreier, um  $120^\circ$  verschobener Phasen ein magnetisches Drehfeld erzeugt. Dieses wiederum versetzt den Läufer in Rotation (Fuest & Döring 2008). In den Läufer wird durch das Magnetfeld des Stators ein Magnetfeld induziert. Die Drehzahl ( $N$ ) eines Asynchronmotors ist generell abhängig von der Polpaarzahl ( $p$ ) und der Netzfrequenz ( $F$ ).

$$N = \frac{F}{p}$$

Der Läufer folgt dem Ständerdrehfeld asynchron mit einem gewissen Schlupf. Dieser ist abhängig von der Belastung des Motors.

Bei den Asynchronmotoren findet eine weitere Einteilung in Kurzschluss- und Schleifringläufer statt.



**Bild 2:** Aufbau eines Drehstromasynchronmotors (geändert nach Tkotz 2012)

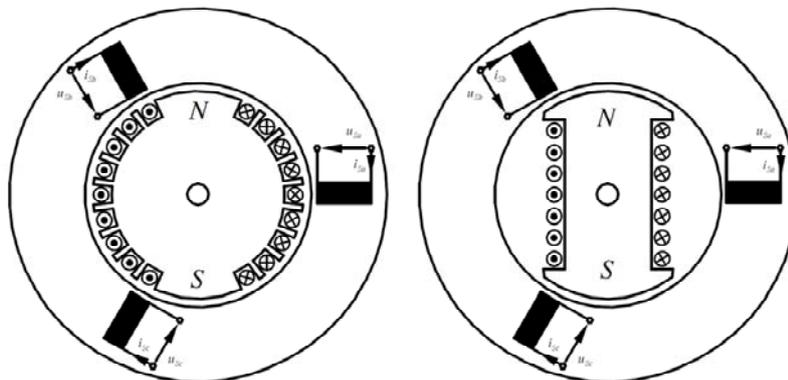
## 2.8 Drehstromsynchronmotoren

Heutzutage ist der Einsatz bei der Erzeugung elektrischer Energie eines der dominierenden Anwendungsgebiete für Drehstromsynchronmotoren. In Dampf- und Wasserkraftwerken werden große Drehstromsynchrongeneratoren mit einer Höchstleistung von bis zu 1,7 GW

verwendet (Steinhart 2012, Tkotz 2012). Aber auch in Servoantrieben, z. B. für die Steuerung von Robotern in der Automobilfertigung, finden sie Anwendung.

Synchronmotoren sind ähnlich aufgebaut wie Asynchronmotoren. Im Wesentlichen unterscheiden sie sich im Aufbau des Rotors. Der Rotor moderner Synchronservomotoren besteht aus hochwertigen, aufgeklebten, permanenterregten Seltenerdmetall-Magneten (Tkotz 2012) wie beispielsweise Magnete aus Samarium-Kobalt oder Neodym-Eisen-Bor (Gallmeier 2009). Diese Permanentmagnete weisen eine hohe Energiedichte auf und erlauben eine kompakte Rotorbauweise. Permanenterregte Synchronmotoren haben einen Wirkungsgrad von 90 bis 95 % und sind verschleißarm (Tkotz 2012).

Des Weiteren läuft der Rotor dem Drehfeld des Ständers synchron nach und hat bei Belastung ebenfalls Drehfeldfrequenz. Die Synchronmotoren werden unterteilt in Vollpoläufer und Schenkelpolläufer (siehe Bild 3).



**Bild 3:** Vollpoläufer (links) und Schenkelpolläufer (rechts) (geändert nach Steinhart 2012)

Zudem findet weiter die Einteilung in Außenpol- und Innenpolmaschinen statt. Außenpolmaschinen weisen die Besonderheit auf, dass der Ständer die rotierende Einheit darstellt (Fuest & Döring 2008).

## 2.9 Servoantriebe

Der Begriff Servo stammt ursprünglich von dem lateinischen Begriff „Servus“ Sklave ab und wurde für diese Antriebsform verwendet, da Servoantriebe in der Vergangenheit unter anderem wegen ihres schlechten Wirkungsgrades nur als Hilfsantriebe eingesetzt wurden (Anonym 2006).

Dank der fortschreitenden Entwicklung im Bereich der Leistungselektronik vergrößert sich das Einsatzfeld stetig. Elektronische Servoantriebe können die wachsenden Anforderungen

seitens der Industrie bezüglich Regeldynamik und Positioniergenauigkeit oftmals besser erfüllen als hydraulische oder pneumatische Antriebe.

Für moderne Servoantriebe eignen sich im wesentlichen Drehstromasynchron-, Drehstromsynchron- und synchrone Linearmotoren. Wobei im Maschinen- und Anlagenbau die Synchronmotoren den größten Marktanteil haben (Anonym 2006).

Im Folgenden sind einige industrielle Einsatzbereiche angeführt:

- Verpackungstechnik
- Werkzeugmaschinen
- Fördertechnik
- Glasflaschenproduktion
- Papierproduktion

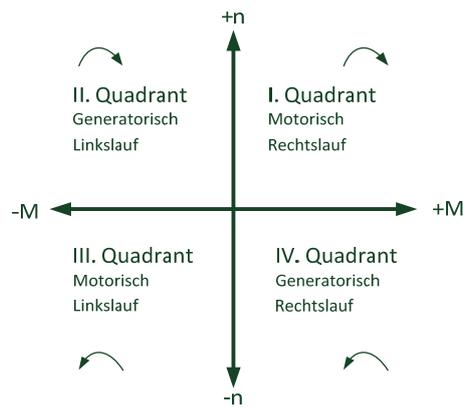
### **2.9.1 Bestandteile eines modernen Servoantriebs**

Ein Synchron- beziehungsweise Asynchronmotor wird durch die zusätzliche Ausrüstung mit einem Rotorlagegebersystem erst zum Servomotor. Der Aufbau eines Servoantriebs besteht klassischerweise aus vier wesentlichen Komponenten (Anonym 2006):

- Steuereinheit
- Servoleistungsverstärker
- Servomotor
- Gebersystem

Als Gebersystem für die Lage des Rotors innerhalb einer Umdrehung werden bei Synchronmaschinen sogenannte Resolver eingesetzt. Diese arbeiten nach dem Drehtransformatorprinzip und sind aus zwei um  $90^\circ$  zueinander versetzten Wicklungen aufgebaut.

Synchronservomotoren arbeiten häufig im sogenannten Vierquadrantenantrieb. Dies bedeutet, dass der Motor je nach Drehrichtung und Drehmoment zum einen als Motor arbeitet und somit Energie aus dem Netz entnimmt und zum anderen als Generator fungiert und somit Energie zum Beispiel einem Zwischenkreis zuführt. In Bild 4 ist dies schematisch dargestellt.



**Bild 4:** Schematische Darstellung des Mehrquadrantenbetriebs (geändert nach Bucher et al.2012)

Über das Vorzeichen des Drehmoments und der Drehzahl wird angezeigt, wie die Maschine arbeitet. Haben beide das gleiche Vorzeichen, arbeitet die elektrische Maschine als Motor, haben diese ein unterschiedliches Vorzeichen, liefert die Maschine als Generator Energie ins Netz bzw. in den Zwischenkreis. Durch diese Betriebsart kann freiwerdende Energie anderen Verbrauchern im Zwischenkreis weitergeleitet oder aber in Kondensatoren gespeichert werden.

### 2.9.2 Drehzahl- und Drehmomentregelung von Servoantrieben

Für die Drehzahlregelung von Servoantrieben kommen Frequenzumrichter zum Einsatz. Diese Umrichter verfügen über feldorientierte Regelung und bestehen im Wesentlichen aus vier Bauteilen (Hahn 2011):

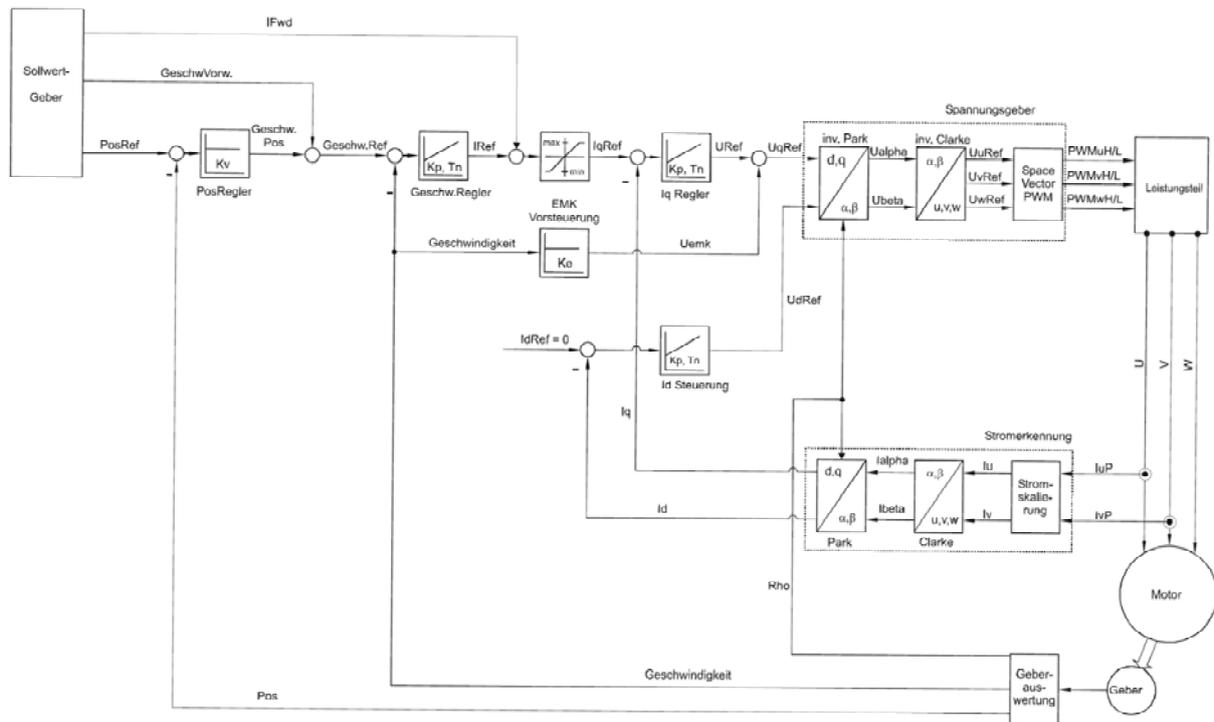
- Gleichrichter
- Gleichspannungs-Zwischenkreis
- Wechselrichter
- Steuerkreis

Zunächst wird der Drehstrom des Stromnetzes oder des Generators gleichgerichtet und in einen Zwischenkreis eingespeist. Dort kann dieser entweder mithilfe von Kondensatoren zwischengelagert oder durch den Einsatz von Wechselrichtern wieder in Drehstrom beliebiger Frequenz umgerichtet werden. Die Frequenz des Drehstroms für den Endverbraucher (Elektromotor) wird durch einen Steuerkreis kommandiert (Hahn 2011).

Für die Umwandlung von Gleichstrom zu Drehstrom kommen in den Wechselrichtern bestimmte Halbleiter, sogenannte IGBTs zum Einsatz. Diese zeichnen sich durch einen

kleinen Durchlasswiderstand und geringe Durchlassverluste aus. IGBTs können mit Schaltfrequenzen bis zu 300 kHz betrieben werden und Durchlassströme bis zu 3000 A schalten (Tkotz 2012).

Die Regelstruktur für die Drehzahl- und Drehmomentregelung ist kaskadenförmig aufgebaut (Anonym 2006). Dabei überlagern sich mehrere Regelkreise. Als Regler eines solchen Regelkreises können z. B. PI-Regler eingesetzt werden. In Bild 5 ist die Regelstruktur eines Umrichters abgebildet, welcher in der Hohenheimer Hackmaschine zum Einsatz kommt.



**Bild 5:** Regelstruktur eines volldigitalen Servoreglers (Umrichter) der Firma Jetter (Installationsanleitung Firma Jetter, Ludwigsburg)

### 3 Elektrische Antriebe in der Landtechnik

In den letzten Jahren gewinnt das Thema elektrische Antriebstechnologie in der Landtechnik immer mehr an Bedeutung. Nahezu alle Landtechnikhersteller setzen sich mehr oder weniger mit diesem Thema auseinander. Anfangs waren es nur einzelne Projektstudien von eher kleineren Herstellern, die als Innovationsführer durch ihr Denken und Handeln eine Vorreiterrolle einnahmen (Schmetz & Klett 1998, Beunk 1999). Durch die Weiterentwicklungen gerade bei der Leistungselektronik moderner Hochvoltantriebe wurde das Thema von weiteren Herstellern aufgegriffen. Im folgenden Abschnitt wird nun eine Übersicht über derzeitige Projekte sowie über anfängliche Aktionen einiger Pioniere dargestellt.

Nachstehend werden die Vorteile und Möglichkeiten elektrischer Antriebe, jedoch ebenso die Probleme und Risiken, die mit elektrischen Antrieben einhergehen, aufgezeigt. Durch die Elektrifizierung stehen ganz neue Antriebsstrategien in der Landtechnik zur Verfügung. Die bisher eingesetzten hydraulischen und mechanischen Antriebe stoßen oftmals in Bezug auf Effizienz und Machbarkeit an ihre Grenzen. Neue Hochvoltantriebe bieten Möglichkeiten, die bisher noch nicht in Betracht gezogen werden konnten. Es werden dynamische Steuerungen und Regelungen möglich, die seither durch die eher statischen hydrostatischen beziehungsweise mechanischen Antriebe nicht realisierbar waren. Außerdem kann durch dieselektrische Antriebe eine Einsparung von fossilen Brennstoffen erzielt werden. Die Umsetzung elektrischer Antriebe ist sehr vielseitig. Angefangen von Hybridtraktoren über elektrisch angetriebene Anbaugeräte bis hin zu Baugruppenantrieben in selbstfahrenden Erntemaschinen (Bernhard 2011) ist die Umsetzung sehr facettenreich. Viele Hersteller sind erst ganz am Anfang ihrer Forschungs- und Entwicklungsaktivitäten. Es wird sehr viel über die Einsatzmöglichkeiten der neuen Antriebstechnik diskutiert. Um dieser Diskussion eine geführte Plattform zu geben, wurde vor einigen Jahren die AEF (Agricultural Industry Electronics Foundation) mit ihren Arbeitsgruppen ins Leben gerufen.

Außerhalb der Landtechnik kommen mobile elektrische Antriebe zum Beispiel im Bereich des Braunkohleabbaus zum Einsatz. Die großen Abbaubagger werden elektrisch angetrieben (Hahn 2011). Des Weiteren werden immer öfter elektrische Antriebe in Elektroautos und Hybrid-Fahrzeugen verbaut.

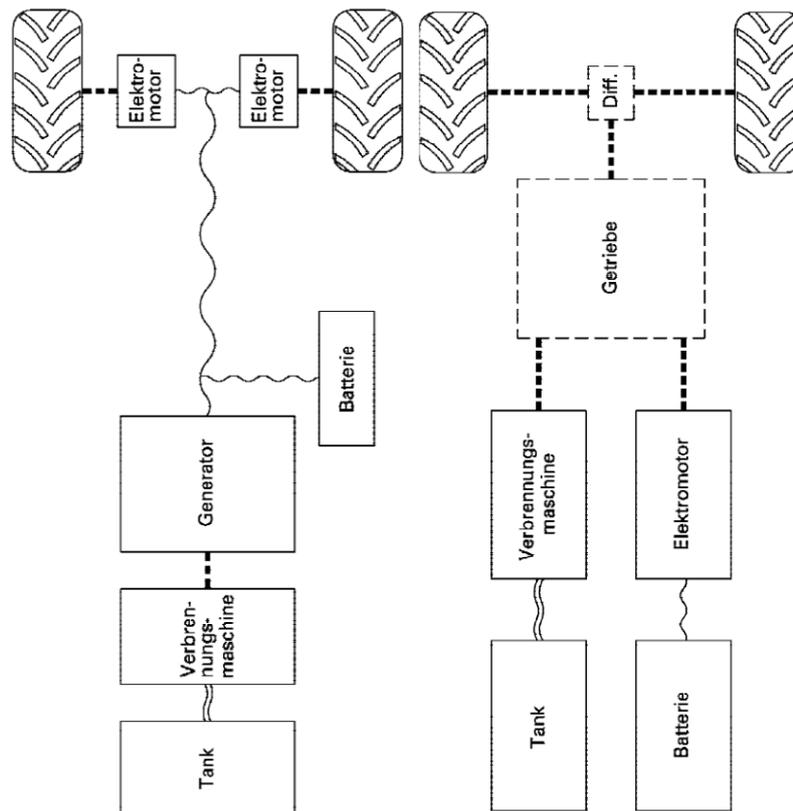
Im landwirtschaftlichen Bereich findet man erste Ansätze für elektrische Antriebe Ende der 90er-Jahre mit dem sogenannten Eltrac-Projekt (Schmetz & Klett 1998).

Nachstehend folgen nun einige Beispiele für die Umsetzung elektrischer Antriebe in der Landtechnik.

### **3.1 Einteilung dieselektrischer Antriebe für Traktoren**

Für den Einsatz dieselektrischer Antriebe für Traktoren gibt es verschiedene Ansätze der Leistungsverzweigung und somit bezüglich der Anordnung von Verbrennungsmotor, Generator, mechanischem Getriebe, Elektromotoren und Batterien für die Speicherung elektrischer Energie. *Gallmeier* (2009) beschreibt den Aufbau sogenannter Hybride mit zwei Energiequellen (Dieseltank und Batterie) sowie zwei Energiewandlern (Verbrennungsmotor und Elektromotor). Demnach ergeben sich mehrere Formen von hybriden Antriebsstrukturen. In Bild 6 sind zwei Anordnungen dargestellt. Hierbei sind eine serielle und eine parallele Anordnung von Hybridantrieben beschrieben. Nach *Aumer et al.* (2008) eignet sich die

serielle Anordnung eher für Traktoren, während die parallele Anordnung eher in der Automobilindustrie Anwendung findet. Zudem teilt *Aumer et al.* (2008) den Hybridisierungsgrad, je nach Integration von Leistungselektronik und Elektromotoren/Generatoren in den Antriebsstrang, weiter in Soft-, Mild- und Full-Hybrid ein.



**Bild 6:** Serieller Hybrid (links) und paralleler Hybrid (rechts) (geändert nach Gallmeier 2009)

Nach dieser Unterteilung handelt es sich lediglich bei einer vollständigen Entkoppelung von Dieselmotor und Antriebsrädern um einen Full-Hybrid. Demnach stellt die serielle Anordnung einen Full-Hybrid dar, da bei dieser Komponentenanzahl keine mechanische Verbindung von Verbrennungsmotor und Antriebsrädern besteht. *Kramer et al.* (2013) nennt folgende Agro-Hybridstrukturen für die Umsetzung dieselektrischer Antriebe in der Landtechnik:

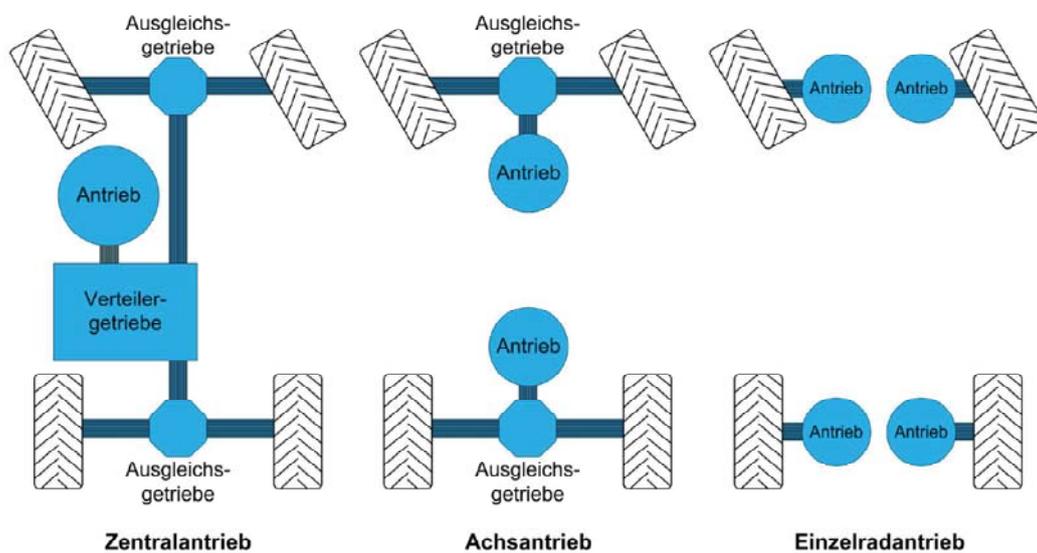
- Elektrifizierung
- Serieller Agro-Hybrid
- Leistungsverzweigter Agro-Hybrid
- Paralleler Agro-Hybrid

Beim seriellen Hybrid ist es möglich, den Verbrennungsmotor über weite Betriebspunkte stationär zu betreiben. Die Pufferung von auftretenden Lastspitzen können mithilfe der Batterie abgedeckt werden. Somit läuft der Verbrennungsmotor in einem verbrauchsgünstigen Betriebspunkt. Bei geringer Beanspruchung von Energieabnehmern erfolgt das Aufladen der Batterie. Als Nachteil ist hier die doppelte Energieumwandlung anzusehen (Gallmeier 2009, Kramer et al. 2013).

Anders gestaltet sich dies beim parallelen Hybrid. Hier sind sowohl der Verbrennungsmotor als auch der Elektromotor über ein mechanisches Getriebe mit den Antriebsrädern verbunden. Beide Systeme laufen parallel und können sich gegenseitig ergänzen beziehungsweise unterstützen. Dies ermöglicht ein sogenanntes Downsizing. Gemeint ist hiermit, dass der Verbrennungsmotor bei gleicher Systemleistung kleiner dimensioniert werden kann. Außerdem findet beim parallelen Hybrid nicht in allen Betriebspunkten eine doppelte Energieumwandlung statt.

Fehlt ein Speicher für die elektrische Energie im Antriebssystem, spricht man lediglich von einer Elektrifizierung des Fahrzeugs beziehungsweise von einem Mild-Hybrid.

Verschiedene Varianten der Integration von Elektromotoren in den Antriebsstrang von Traktoren und selbstfahrenden Erntemaschinen sind in Bild 7 dargestellt.



**Bild 7:** Varianten elektrischer Achs-/Radantriebe (geändert nach Geißler et al. 2009)

### **3.2 Bereitstellung elektrischer Energie für Anbaugeräte**

Für die Bereitstellung von Energie für elektrische Antriebe von Anbaugeräten stehen mehrere Konzepte als werkseitig montiert oder aber auch als nachrüstbare Lösung für vorhandene Traktoren bereit.



**Bild 8:** Powerpacksysteme von GKN Walterscheid (links) und Zuidberg/STW (rechts)

Bei der werkseitigen Lösung wird ein Generator in den Antriebsstrang des Traktors integriert. Sämtliche Komponenten wie Generator, Leistungselektronik und Hochvoltschnittstellen befinden sich auf dem Traktor. Dies ist zum Beispiel bei John Deere in den E Premium-Modellen der älteren 7000er- oder der aktuellen 6000-RE-Traktoren der Fall. Weitere Beispiele befinden sich in den folgenden Abschnitten dieses Kapitels.

Da zurzeit jedoch die meisten Traktoren noch über keine Hochvoltschnittstellen für Anbaugeräte verfügen, können diese nachgerüstet werden (Herlitzius et al. 2010).

Als Nachrüstvariante gibt es von mehreren Herstellern (Thiel et al. 2011; Prankl et al. 2001) sogenannte Powerpacks, die beispielsweise an die Fronthydraulik des Traktors angebaut werden können (siehe Bild 8). Ein Powerpack besteht mindestens aus den Komponenten Generator und Kühlung (Geißler et al. 2013). Je nach Hersteller sind die Leistungselektronik, die Steuereinheit sowie die Hochvoltschnittstellen für das Anbaugerät ebenfalls in das Powerpacksystem integriert.

Zusätzlich besteht die Möglichkeit, einen zapfwellengetriebenen Generator samt Leistungselektronik und Kühlung direkt auf dem Anbaugerät unterzubringen (Feider et al. 2013). Eine Übersicht aktueller Powerpacksysteme ist in Tabelle 1 aufgelistet.

**Tabelle 1:** Übersicht Powerpacksysteme (geändert nach Geißler et al. 2013)

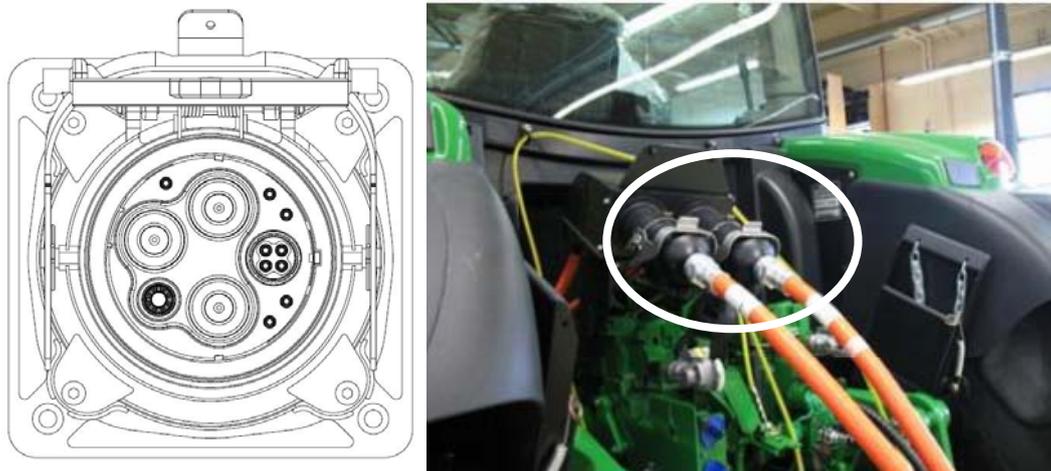
Hersteller	Leistung in kW	Generator- prinzip/ Kühlung	Leistungs- elektronik	Schnittstellen	Besonderheiten
GKN Walterscheid	20, 50, 100	PSM/Öl	Im Traktor	2 x 400 V AC 2 x DC	Front- oder Heckanbau, Zwischenkupplung
Zuidberg/ STW	140	PSM/Öl	integriert	2 x 400 V AC 2 x DC	Front- oder Heckanbau, Durchführung der Zapfwelle, optionale Zusatzgewichte
Raussendorf	45	PSM/Wasser	integriert	2 x 400 V AC 2 x DC	Front- oder Heckanbau

### 3.3 Einheitliche Schnittstelle für Traktor und Anbaugerät

Die AEF mit ihren einzelnen Arbeitsgruppen hat einen Vorschlag für eine einheitliche Schnittstelle zwischen Anbaugerät und Traktor definiert (siehe Abbildung 13 unten). Dies ist hinsichtlich der Kompatibilität zwischen den einzelnen Traktorenherstellern und den Anbaugeräteherstellern unerlässlich. Hier müssen jedoch einige Fragen final erörtert werden. Für die unterschiedlichen Anwendungen stellen sich sehr vielfältige Anforderungen an die Schnittstelle, welche mitunter äußerst divers sind. Im Endeffekt bedeutet dies, dass eine Kompromisslösung unerlässlich ist. Solange nicht geklärt ist, ob der Traktor Wechselstrom (AC) oder Gleichstrom (DC) für das Anbaugerät oder den Anhänger bereitstellen soll, muss die Steckdose für beides eingerichtet sein. Je nachdem, ob die Leistungselektronik auf dem Anbaugerät oder auf dem Traktor sitzt, hängt es davon ab, ob Gleichstrom oder Wechselstrom für das Anbaugerät vom Traktor aus bereitgestellt werden muss. Deshalb wurde die Schnittstelle sowohl für die Bereitstellung von maximal 480 V AC als auch für die Bereitstellung von maximal 750 V DC konzipiert (Sobotzig & Shi 2012). Des Weiteren sind Anschlüsse unterschiedlicher Leistungsklassen von 20 kW bis 150 kW verfügbar. Zusätzlich ist in dem Anschluss eine Schnittstelle für Feldbus-Kommunikation integriert. Ebenfalls verfügt die Schnittstelle über ein Sicherheitsmanagement, welches erst Strom auf die

Schnittstelle leitet, wenn der Stecker sich in der Steckdose befindet. Das Sicherheitsmanagement unterbricht zudem die Stromzufuhr, falls der Stecker oder die Steckdose zum Beispiel bei einem Unfall abgerissen wird.

Da es sich bei selbstfahrenden Erntemaschinen um geschlossene Systeme handelt, spielt die Schnittstellenproblematik hier eine untergeordnete Rolle.



**Bild 9:** (links) Schematische Darstellung AEF-Schnittstelle; (rechts) AEF-Schnittstelle in eingebautem Zustand auf Traktor (geändert nach Sobotzig & Shi 2012)

### **3.3.1 Dieselelektrische Antriebe bei Traktoren**

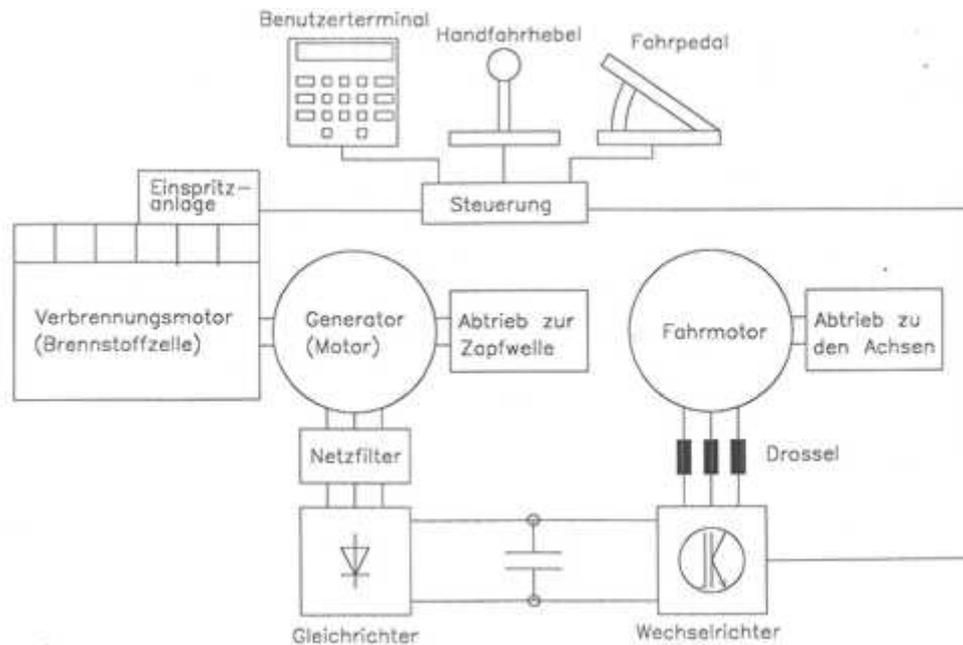
Die anschließenden Abschnitte 3.3.1.1 bis 3.3.1.6 beinhalten Beispiele für die Umsetzung dieselelektrischer Antriebe und den Aufbau von Hochvolt-Bordnetzen in Traktoren.

#### **3.3.1.1 Eltrac-Projekt**

Bei dem Eltrac-Projekt der Firma P. J. Schmetz GmbH aus Kleve handelt es sich um die Realisierung eines dieselelektrischen Antriebs. Bei einem serienmäßigen M60 New-Holland-Traktor mit 101 kW (Beunk 1999) wurde das Lastschalt- und Gruppengetriebe entfernt und durch einen elektrischen Antrieb ersetzt. Das Projekt wurde durch Mittel des Technologie-Programms Wirtschaft (TPW) des Landes Nordrhein-Westfalen unterstützt.

Da bei dem Traktor aus Gründen der Verfügbarkeit der Generator sowie die Umrichter als luftgekühlte Versionen verwendet wurden und die Komponenten zudem an eine Serienmaschine angepasst werden mussten, ist dieser Prototyp von den Abmessungen einen halben Meter länger als die Serienversion des M 60 von New Holland. Bei dem Eltrac treibt ein herkömmlicher Verbrennungsmotor den Generator und die Zapfwelle an. Durch die

Leistungselektronik wird dann ein Elektromotor angetrieben, welcher mit dem konventionellen Endantrieb der Achsen verbunden ist. Zwischen dem Elektromotor und dem Differentialgetriebe ist ein zweistufiges Untersetzungsgetriebe mit einer Ackerstufe (0 – 17 km/h) und einer Transportstufe (0 – 40 km/h) verbaut. Die Bedienung und die Wahl der Fahrstrategie des Fahrentriebs geschehen anhand eines Bedienterminals, eines Fahrpedals sowie eines Handfahrhebels von der Traktorkabine aus (siehe Bild 9).



**Bild 10:** Aufbau des elektrischen Antriebs im Eltrac (geändert nach Schmetz & Klett 1998)

Laut *Schmetz & Klett* (1998) handelt es sich bei dem Eltrac-Prototyp um einen voll einsatzfähigen Traktor. *Schmetz & Klett* (1998) erwähnen des Weiteren mehrere Vorteile des elektromechanischen Getriebes gegenüber hydrostatisch-leistungsverzweigten sowie konventionellen Lastschalt- und Gruppengetrieben. So ist beispielsweise bei einem elektromechanischen Getriebe ein ruck- und verschleißfreies Anfahren, Bremsen und Reversieren möglich. Ebenso können Bauteile wie zum Beispiel Anlasser und Lichtmaschinen sowie die hierfür nötigen Riementriebe komplett eingespart werden. Durch den einfachen Aufbau des Antriebs und die nahezu wartungsfreien Komponenten können die Betriebskosten gesenkt werden. Der Eltrac ist außerdem in der Lage, elektrische Energie an weitere Verbraucher, wie beispielsweise Anbaugeräte, abzugeben.

### 3.3.1.2 Belarus 3023

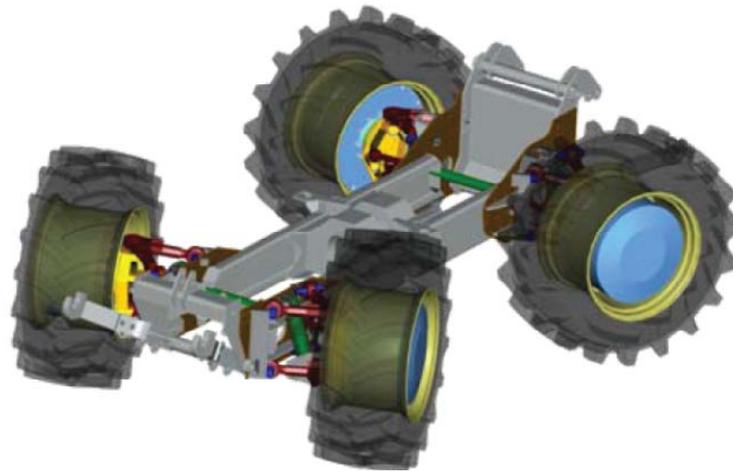
Das Minsker Traktoren Werk MTZ stellte zur Agritechnica 2009 den Prototyp Belarus 3023 mit einem dieselelektrischen Antriebsstrang vor (Rhenius et al. 2010). Der Traktor wird wahlweise mit einem Detroit-Dieselmotor (221 kW) oder einem Deutz-Motor (223 kW)

angeboten. Ebenfalls ist er unter der Bezeichnung 3022 mit einem konventionellen Schaltgetriebe ausgestattet (Neunhaber 2010). In der letzten Ausbaustufe sollen Radnabenmotoren die konventionelle Hinterachse ersetzen. Nach dem Verbrennungsmotor wird ähnlich wie beim Eltrac ein Asynchrongenerator zur Stromerzeugung eingesetzt. Der Drehstrom wird durch Gleichrichter in Gleichstrom umgewandelt und in einen Zwischenkreislauf eingespeist. Umrichter sorgen dann für die gewünschte Frequenz des Asynchronantriebsmotors, der über ein Verteilergetriebe mit einer konventionellen Hinterachse verbunden ist (Neunhaber 2010). Die Kühlung des Generators, des Antriebsmotors und der Leistungselektronik erfolgt mit Kühlwasser.

Die Heckzapfwelle wird direkt über den Verbrennungsmotor angetrieben. Des Weiteren verfügt der Belarus 3023 über eine elektrisch betriebene Frontzapfwelle, über die im Maximum 60 kW mechanische Energie übertragen werden können. Der Prototyp mit elektromechanischem Getriebe wiegt laut Angaben von MTZ circa 500 kg mehr als die Version mit Schaltgetriebe. Ebenfalls liegt der Verkaufspreis um geschätzte 20 % über dem der Serienmaschine. Der Prototyp verfügt durch die Steuerelektronik und den elektrischen Antrieb beim Anhalten bergauf oder bergab über einen aktiven Stillstand. Zusätzlich soll die Kraftstoffersparnis gegenüber dem konventionellen Traktor ungefähr 10 – 15 % betragen (Neunhaber 2010).

### **3.3.1.3 Elektrischer Einzelradantrieb bei Traktoren**

An der TU Dresden wird seit fast 15 Jahren an einem elektrischen Antrieb für Traktoren geforscht (Barucki 2001). In den vergangenen Jahren wurden Simulationsmodelle für die Regelung einzeln angetriebener Räder mit Matlab Simulink erstellt (Wünsche 2000). Diese Modelle wurden durch praktische Versuche mit einem Traktor verifiziert. Hierfür wurde unter anderem ein MB-Trac mit entsprechender Messtechnik ausgerüstet und unter verschiedenen Einsatzszenarien Messungen zur Dimensionierung eines elektrischen Antriebs durchgeführt. Hierbei wurden die Anforderungen der Ansteuerung der Räder und der Drehmomententwicklung untersucht. Des Weiteren erfolgten Messungen zu Boden und Fahrzeugballastierung bei unterschiedlichen Belastungen (Günther et al. 2005). Anhand der gewonnenen Daten wurde ein Traktor mit seriellem dieselektrischem Antriebsstrang entwickelt. Auf der Agritechnika 2011 wurde dieses Forschungsfahrzeug mit 90-kW-Dieselmotor und elektrischem Einzelradantrieb vorgestellt. Bei dem Traktor handelt es sich um eine Maschine von Rigitrac, welche mit vier gleich großen Rädern ausgestattet ist (siehe Bild 11 unten).



**Bild 11:** Schematische Darstellung des Radnabenantriebs (geändert nach Geißler et al 2010)

Ein Einzelradantrieb bietet viele Vorteile gegenüber einem herkömmlichen Zentralantrieb. Da keine mechanische Verbindung zwischen Rad und Fahrzeug besteht, können neue Fahrwerkskonzepte mit höherer Funktionalität und Variabilität realisiert werden (Geißler et al. 2010). Neue Fahreigenschaften bezüglich Rad-Boden-Schlupfregelung führen zu einer besseren Übertragung der Zugkraft. Ein Eingriff in die Fahrzeugdynamik wird durch das Beschleunigen oder Abbremsen einzelner Räder ermöglicht. Jedes Rad kann einzeln angesteuert werden. Somit ist eine optimale Schlupfregelung für die einzelnen Räder umsetzbar. Da lange Übertragungswege zwischen Verbrennungsmotor und Rad entfallen, werden etwaige Verluste reduziert. Der bisherige zentrale Antriebsstrang, welcher sich seither über das gesamte Fahrzeug erstreckte, wird in die Felge verlagert. Der bisher benötigte Bauraum wird dabei frei und kann anderweitig genutzt werden. Zusätzlich kann durch das Wegfallen von Kreuzgelenken und Differenzialgetriebe ein größerer Lenkwinkel der Räder ermöglicht werden (Geißler et al. 2010b).

Das Forschungsfahrzeug der TU Dresden ist, wie bereits erwähnt, mit vier in die Felge integrierten Radnabenmotoren ausgestattet. Die elektrische Energie wird, wie bereits beim Eltrac-Projekt und Belarus 3023 beschrieben, durch einen vom Verbrennungsmotor angetriebenen Generator bereitgestellt. Dieser speist einen Gleichstromzwischenkreis. Ein Bordspannungsmanagement sorgt für die Begrenzung der Zwischenkreisspannung bei voll geladener Batterie. Der Traktor kann zusätzlich mit einer elektromechanischen Zapfwelle ausgestattet werden. Diese kann unabhängig von der Drehzahl des Verbrennungsmotors betrieben werden. Mehrere Geräteschnittstellen stellen über den neuen AEF-Stecker elektrische Energie für Anbaugeräte bereit (siehe Kapitel 3.3).

Bei den Elektromotoren handelt es sich um permanenterrechte Synchronmotoren. Um das Leistungsgewicht so gering wie möglich zu gestalten, fiel die Entscheidung auf einen Getriebeantrieb. Ein Direktantrieb, bei dem der Motor direkt das Rad antreibt, wäre aufgrund des benötigten Drehmoments zu groß und zu schwer ausgefallen. Deshalb sitzt zwischen Motor und Rad ein einstufiges Planetengetriebe (Geißler 2010a). Um die Anforderungen seitens der StVZO zu erfüllen, wurde zusätzlich eine Betriebs- und Feststellbremse in den Einzelradantrieb integriert (Geißler 2010a). Der außen liegende Stator des Elektromotors ist mit dem Fahrzeugrahmen verbunden. Bei den verwendeten Motoren handelt es sich hinsichtlich des Leistungsgewichts um optimierte Komponenten. Der elektrische Antrieb wiegt im Vergleich zum Serienantrieb nur 73 kg mehr (Geißler et al. 2010b). Auch die Höhe der Anschaffungskosten des dieselektrischen Antriebs sind nahezu identisch mit denen der Serienversion. Da das elektrische System des Traktors mit einem Energiespeicher ausgerüstet ist, handelt es sich um einen seriellen Hybridantrieb (Aumer et al. 2008, Geißler 2010b).

#### **3.3.1.4 MELA: Mobile elektrische Leistungs- und Antriebstechnik für Fahrzeuge**

Das MELA-Projekt wurde im Jahre 2000 als Gemeinschaftsprojekt der FH Regensburg und mehreren Unternehmen initiiert. Das Ziel des zunächst auf drei Jahre Laufzeit begrenzten Projekts war es unter anderem, ein elektrisches Hochspannungsnetz sowie ein elektromechanisches leistungsverzweigtes Getriebe in einen mobilen Antrieb zu integrieren. Als Grundlage hierfür dient ein Synchrongenerator der einen 540-V-Gleichstromzwischenkreis speist (Szajek et al. 2004). Aus dem Zwischenkreis werden zwei mit dem Generator leistungsidentische Synchronmotoren betrieben. Diese sitzen zwischen dem Verbrennungsmotor und dem folgenden Getriebe. Es können verschiedene Fahrmodi gewählt werden. Der Antrieb erfolgt entweder rein elektrisch, elektromechanisch leistungsverzweigt oder rein mechanisch (Szajek et al. 2004; Szajek 2007). Zusätzlich können anhand des offenen Stromkreises mehrere Nebenverbraucher, wie beispielsweise Klimakompressor, Motorlüfter und Hydraulikpumpen, elektrisch betrieben werden. Durch den Einsatz eines bidirektionalen Gleichspannungswandlers können sowohl die herkömmliche Lichtmaschine als auch der Anlasser entfallen. Zum Starten des Verbrennungsmotors werden der Synchrongenerator über den Zwischenkreis und die Batterie genutzt. Des Weiteren besteht die Möglichkeit, über eine Geräteschnittstelle externe Verbraucher auf einem Anbaugerät zu betreiben. Bei dem Generator sowie den zwei Motoren bilden Motor, Gleichbeziehungsweise Wechselrichter sowie Zwischenkreiskondensator eine Einheit. Um Bauraum zu sparen, wurde eine spezielle Flüssigkeitskühlung für Statorwicklung, Wicklungsköpfe und Leistungselektronik entwickelt. Durch das neuartige Kühlsystem kann der Bauraum im Vergleich zu Standardkomponenten um 40 % reduziert werden (Szajek (2007).

Das MELA-Kraftwerk stellt eine in sich geschlossene Einheit dar, von der aus der Fahrtrieb, die Nebenantriebe oder externe Verbraucher bedient werden können (Szajek et al. 2004; Szajek 2007).

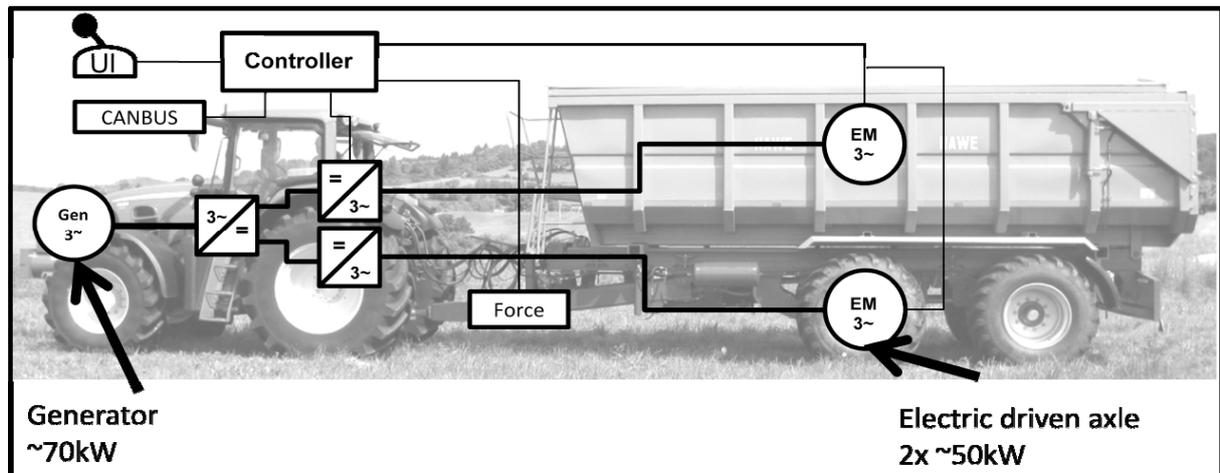
### **3.3.1.5 E Premium Traktorenbaureihe von John Deere**

Zur Agritechnica 2007 stellte John Deere die E Premium-Traktorenbaureihe vor. Diese Traktoren verfügen über eine Hochvolt-Spannungsversorgung, die in den Antriebsstrang integriert wurde. Da kein Speichermedium für elektrische Energie vorhanden ist, liegt hier ein sogenannter Mild-Hybrid vor (Aumer et al. 2008). Für die Bereitstellung der elektrischen Energie setzt John Deere bei dieser Traktorenbaureihe einen Asynchronmotor als Kurbelwellengenerator ein. Bei einer Drehzahl von 1800 U/min des Verbrennungsmotors stellt der Generator eine elektrische Leistung von 20 kW zur Verfügung (Bruning et al 2008). Diese Energie wird beim Serienstand der 7430- und 7530-E Premium-Traktoren zunächst für die Nebenantriebe eingesetzt. Des Weiteren befinden sich zwei Steckdosen am Heck, an denen Verbraucher für 230-V-Wechselstrom und 400-V-Drehstrom angeschlossen werden können. Die Leistung der Steckdosen darf jedoch nur bei stehendem Traktor und nur bis zu einer maximalen Leistung von 5 kW verwendet werden (Wilmer 2007). Wie bereits erwähnt wird bei dieser ersten E Premium-Serie die elektrische Energie lediglich für Nebenantriebe wie Kühlerantrieb, Druckluftkompressor, Kompressor Klimaanlage und Niedertemperaturkreislauf verwendet. Durch die bedarfsgerechte Regelung dieser Antriebe gibt John Deere eine Kraftstoffeinsparung von 5 % an (Wilmer 2007). Zusätzliche Funktionen wie beispielsweise eine Umkehrung der Lüfter-Drehrichtung sind durch die Elektrifizierung und Entkoppelung der Nebenantriebe vom Verbrennungsmotor einfach realisierbar.

*Hahn* (2008) beschreibt eine Erweiterung dieses Systems zur Bereitstellung elektrischer Energie für Anbaugeräte. Hierfür wurde ein Traktor der E Premium-Serie um eine regelbare elektrische Schnittstelle für Anbaugeräte erweitert. Ergebnisse über die Verwendung dieser Schnittstelle in Kombination mit einem elektrifizierten Düngerstreuer der Firma Rauch, einer John Deere Pflanzenschutzspritze mit elektrischem Pumpenantrieb und einem elektrifizierten Triebachsanhänger der Firma HAWE erwähnt *Hahn* in seiner Dissertation (*Hahn* 2011).

*Reinmuth & Tarasinski* (2011) beschreiben weiterführend den Einsatz des Triebachsanhängers unter der Verwendung eines größeren Generators mit 70 kW in einem E Premium-Traktor und zwei 50 kW starken Elektromotoren in der Triebachse eines HAWE Muldenkippers (Bild 12). Durch den Einsatz des Einzelradantriebs im Anhänger stehen neue

Möglichkeiten bezüglich der Verbesserung des Traktionsverhaltens des Gespanns auch unter schwierigen Bodenbedingungen zur Verfügung.



**Bild 12:** Aufbau des Gespanns Triebachsenanhänger und Traktor (geändert nach Reinmuth F. und N. Tarasinski 2011)

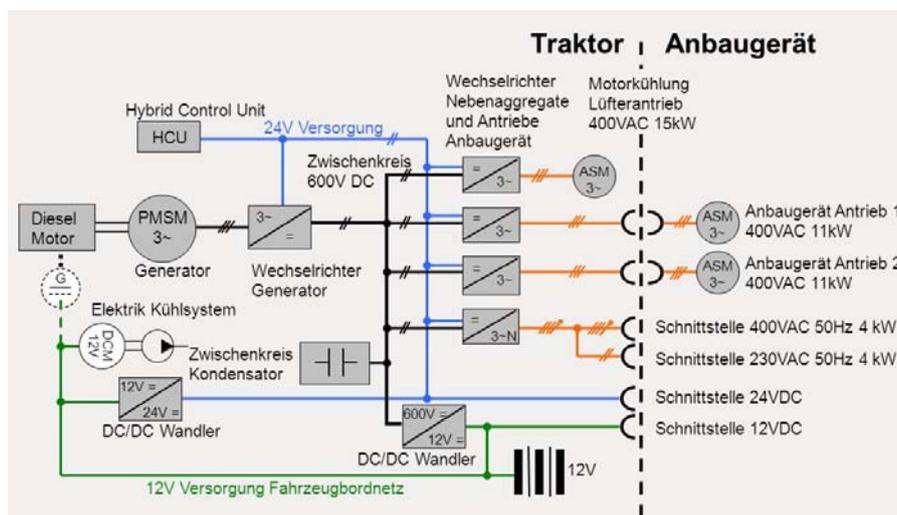
Böhrnsen beschreibt in einem Bericht der Zeitschrift Profi (Böhrnsen 2013) den Einsatz eines neuen John Deere 6210 RE (Sobotzik & Shi 2012) als Nachfolgemodell der bisherigen 7430 und 7530 E Premium-Generation. Sie berichtet über den Einsatz einer neuen Traktor-Anbaugeräte-Schnittstelle für die Verwendung elektrifizierter Antriebe auf Anbaugeräten. Bei dieser Schnittstelle handelt es sich um eine neue, definierte Schnittstelle des AEF, welche in Abschnitt 3.3 detailliert erläutert ist. Des Weiteren handelt dieser Artikel vom Einsatz eines Fliegl-Abschiebewagens mit elektrischem Achsantrieb sowie den ersten Einsatzerfahrungen des Düngerstreuers Axis-E der Firma Rauch. Ebenfalls erstmalig erwähnt wird die integrierte Kommunikation und Bedienung der elektrischen Schnittstellen auf ISOBUS-Basis.

Schrank *et al.* (2011) stellt zudem eine Studie im Rahmen des E-Tour-Allgäu-Projekts vor. Inhalt dieser Studie ist der Einsatz einer 50-kW/h-Batterie als Energiespeicher in Verbindung mit einem E Premium-Traktor. In Zusammenhang mit der E-Tour Allgäu wurden verschiedene Einsatzszenarien eines Mild-Hybrid-Traktors auf einem landwirtschaftlichen Betrieb getestet (Schrank *et al.* 2011).

### 3.3.1.6 Deutz und Amazone Projekt ElecTra

Das ElecTra-Projekt wurde 2009 als Kooperation der Firmen ZF Friedrichshafen, Same-Deutz-Fahr und den Amazone Werken begonnen. Ziel des Projektes ist es, einen elektrisch unterstützten Antriebsstrang zu entwickeln, um dadurch Komponenten der Nebenantriebe eines Traktors sowie etwaige elektrische Antriebe eines Anbaugeräts betreiben zu können.

Durch die Integration eines Generators in einen bestehenden Antriebsstrang eines Deutz-Fahr-Traktors mit 164 kW und stufenlosem Getriebe soll es ermöglicht werden, unter anderem die Effizienz des Kraftstoffverbrauchs zu steigern (Götz et al. 2011). Der Generator ist an die Drehzahl des Verbrennungsmotors gekoppelt. Er befindet sich zwischen Kupplung und Getriebe (Götz et al. 2009). Durch diese Anordnung ist eine Aufrüstung von einem reinen Generatorsystem zu einem Parallelhybrid durch Hinzunehmen eines Speichermediums, wie beispielsweise einer Supercap oder einer Hochvoltbatterie für die Speicherung der elektrischen Energie, möglich. Theoretisch kann das Getriebe durch Entkoppelung des Generators, welcher ebenfalls motorisch betrieben werden kann, unabhängig vom Verbrennungsmotor angetrieben werden (Fellmann et al. 2010). Dieses Szenario könnte zum Beispiel bei häufigem Anfahren während Transportarbeiten oder beim Wendevorgang am Vorgewende zum Einsatz kommen. Eine weitere Möglichkeit wäre, dass das Getriebe bei Bremsvorgängen durch den Generator abgebremst werden könnte, um somit Energie rückzugewinnen (Rekuperation). Ebenfalls könnten durch ein paralleles Hybridsystem die Leistungsspitzen des Verbrennungsmotors durch eine Boost-Funktion (aktiv Boost) gemindert werden. Durch das Wegnehmen der Nebenverbraucher, wie beispielsweise des Klimakompressors oder des Motorlüfters, kann eine zusätzliche Leistungssteigerung des Fahrtriebs erfolgen (passiv Boost) (Fellmann et al. 2010).



**Bild 13:** Aufbau des Generatorsystems von ZF und Deutz Fahr (geändert nach Weinmann et al. 2012)

Der vom Generator erzeugte Drehstrom wird von einem Gleichrichter in Gleichstrom umgewandelt und in einen 600-V-Zwischenkreis gespeist (siehe Bild 12). Als Generator kommt eine permanenterrregte Synchronmaschine mit 50 kW Leistung zum Einsatz. Die Betriebsart des Generators ist mit S1 angegeben (Weinmann et al. 2012). Der

Synchrongenerator kann kurzzeitig bei Überlast bis zu 85 kW bereitstellen (Fellmann et al. 2010). Gekühlt wird der Generator durch den Getriebeölkreislauf. An den Zwischenkreis können elektrische Verbraucher angeschlossen werden. Für Anbaugeräte stehen zwei frequenzgeregelte 400-V-AC Schnittstellen, eine Schnittstelle mit dreiphasigem 400V Drehstrom oder einphasigem 230-V-Wechselstrom mit fester Frequenz von 50 Hz zur Verfügung. Die Wechselrichter der beiden geregelten Schnittstellen sind mit Leistungsmodulen bis zu 15 kW (auf 25 kW erweiterbar) ausgerüstet, die der festen Frequenz mit Modulen bis 4 kW. Das System wird über einen Isolationswächter überwacht. Sobald ein Kabel eine schadhafte Isolierung aufweist, wird das System schnellstmöglich abgeschaltet.

Zusätzlich stehen zwei Schnittstellen für die Standard-12-V und 24-V-Gleichstrom-Energieversorgung bereit (Götz et al. 2011). Die komplette Leistungselektronik befindet sich auf dem Traktor. Gesteuert wird das elektrische System zentral über die sogenannte Hybrid Control Unit (HCU). Diese Einheit kommuniziert sowohl mit dem Anbaugerät als auch mit der Steuerung des Antriebs (Vehicle Drivetrain Control, kurz VDC). Somit wird ein intelligentes Energiemanagement ermöglicht. Anhand eines Tractor Implement Management (TIM) kann das Anbaugerät, falls nötig, beispielsweise die Drehzahl des Verbrennungsmotors über die Kommunikation via ISOBUS zwischen Gerät und Traktor sowie via CAN-Bus innerhalb des Traktors anpassen (Weinmann et al. 2012). Seitens der Firma Amazone wurde für das Projekt eine EDX-9000TC-Einzelkornsämaschine (Arbeitsbreite 9 m) mit elektrischen Antrieben ausgestattet. Die hydraulischen Gebläseantriebe wurden durch Asynchronmaschinen mit 11 kW Nennleistung ersetzt. Für die 12-V-Gleichstrommotoren der Vereinzlungssysteme wurden Synchronservomotoren mit 400 W Nennleistung aus der Automatisierungstechnik eingebaut (Weinmann et al. 2012).

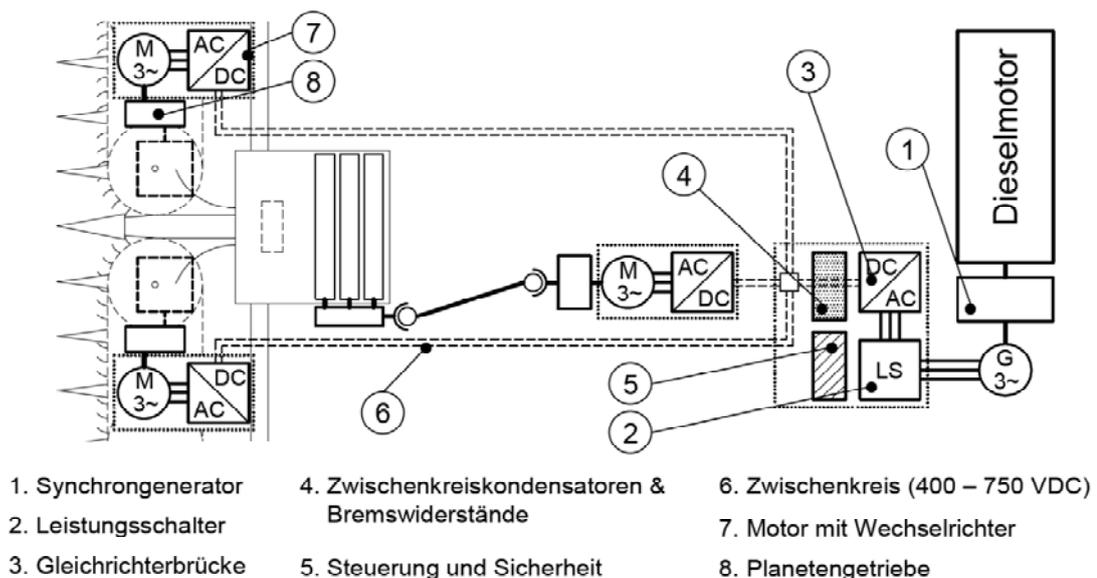
Durch die Umrüstung auf Elektromotoren konnte in Feldversuchen eine Verringerung der Leistungsaufnahme der Gebläse um 30 % gegenüber dem konventionellen hydraulischen Antrieb erzielt werden. Der ermittelte Wirkungsgrad des Gebläseantriebs lag hierbei bei 86 %. Zusätzlich konnten neue Anwendungen wie beispielsweise eine automatische Gebläsedrehzahlabenkung während des Wendevorgangs und eine Druckregelung für die Vereinzlung integriert werden. Außerdem kann durch die vorhandene Sensorik der Servoantriebe eine bessere Überwachung sämtlicher Antriebe realisiert werden. Die Ablagegenauigkeit der EDX eSeed wurde in einem Versuch überprüft und entspricht der der Serienmaschine mit hydraulischem Antrieb.

### 3.4 Elektrische Baugruppenantriebe in selbstfahrenden Erntemaschinen

Der folgende Abschnitt befasst sich mit elektrifizierten Baugruppenantrieben in selbstfahrenden Erntemaschinen. Hierbei liegt der Schwerpunkt auf der Elektrifizierung einzelner Antriebe eines bestehenden Systems.

#### 3.4.1 Elektrischer Baugruppenantrieb Feldhäcksler

An der TU München wurde ein Vergleich von hydraulischen und elektrischen Baugruppenantrieben in einem Feldhäcksler durchgeführt. *Gallmeier & Auernhammer (2004)* beschreiben die möglichen Vorteile elektrisch angetriebener Baugruppenantriebe. Demnach besteht durch den Einsatz elektrischer Baugruppenantriebe anhand der Möglichkeit dynamischer Maschinenparametrisierung eine Effizienzsteigerung. Da elektrische Antriebe meist weniger komplex aufgebaut sind als die derzeit eingesetzten hydrostatisch-mechanischen Wandler, können diese einfach über ein Bus-System miteinander vernetzt werden. Durch die Kommunikation der Leistungselektronik kann demnach eine dynamischere Drehzahlanpassung der Baugruppenantriebe an die jeweiligen Erntebedingungen erfolgen. Hierdurch wird nach *Gallmeier & Auernhammer (2004)* die Prozessqualität gesteigert. In der Praxis stellt der Fahrer die Maschine meist auf einen Mittelwert ein. Da die zu beerntenden Schläge jedoch meist aufgrund von sich ändernden Standortbedingungen sehr heterogen sein können und eine individuelle Anpassung durch zeitliche Verzögerung von Aufnahme und Weiterverarbeitung in der Maschine nicht ohne Weiteres möglich ist, kommt es oftmals zu einem ungleichmäßigen Materialfluss (*Gallmeier & Auernhammer 2004*).



**Bild 14:** Aufbau des elektrischen Baugruppenantriebs von Gallmeier (geändert nach Gallmeier 2009)

In Kooperation mit der Firma Krone wurde ein Selbstfahrhäcksler des Typs BIG X 1000 mit elektrischen Baugruppenantrieben ausgerüstet. Eine schematische Darstellung des Systems befindet sich in Bild 14 oben.

Zunächst wurden in mehreren Prüfstands- und Feldversuchen die an dem hydraulischen Einzugs- und Vorsatzantrieb auftretenden Lastzyklen ermittelt (Gallmeier & Auernhammer 2007a). Durch Einsatz einer entsprechenden Messtechnik erfolgte die Messung auftretender Drehzahl-Drehmoment-Paarungen. Anschließend wurde der elektrische Antrieb gemäß der gemessenen Leistungsparameter dimensioniert. Der bestehende Pumpenturm, für die entsprechenden Baugruppenantriebe am Verbrennungsmotor, wurde durch einen 100 kW starken Synchrongenerator ersetzt. Am Einzug des Häckslers wurde ein 47-kW-Elektromotor angebracht. Zusätzlich wurde der zentrale hydraulische Antrieb des Vorsatzes durch zwei auf dem Vorsatzgerät montierte, 19,8 kW starke Reluktanzmotoren getauscht. Da die Zwischenkreisspannung abhängig von der Generatordrehzahl ist und demnach zwischen 400 und 750 V schwankt, wurden zur Dämpfung dieser Schwankungen Zwischenkreiskondensatoren integriert. Als Schutzeinrichtung des elektrischen Systems kommt ein Isolationswächter, welcher die möglichen Isolationsfehler der Gleich- und Wechselrichter gegenüber der Fahrzeugmasse detektiert, zum Einsatz (Gallmeier & Auernhammer 2007a). Das System ist als IT-System (Isolé Terre) aufgebaut. Dies bedeutet, dass das elektrische Netz der Baugruppenantriebe vollständig von der Fahrzeugmasse isoliert ist. Erst wenn zwei Phasen mit der Fahrzeugmasse in Kontakt kommen, entsteht ein geschlossener Stromkreis und somit eine Lebensgefahr für Personen auf oder an der Maschine. Bei einem einphasigen Kontakt beziehungsweise einem einphasigen Isolationsfehler besteht noch keine Beeinträchtigung des Betriebs (Gallmeier 2009).

In Zusammenarbeit mit der DLG wurden die Wirkungsgrade des hydraulisch angetriebenen Serienantriebsstrangs sowie des elektrischen Antriebsstrangs bei unterschiedlicher Belastung ermittelt. Bei einer eingestellten Häcksellänge von 8 mm und schwankender Dieselmotordrehzahl variiert der Wirkungsgrad des hydraulisch angetriebenen Einzugs bei Volllast zwischen 87,2 und 89,8 %. Ähnlich verhält sich hier auch der elektrisch betriebene Einzug. Hierbei treten Schwankungen im Wirkungsgrad zwischen 88,1 und 90,6 %. Bei Teillast, mit 30 % des Nennmoments, liegt der Wirkungsgrad des elektrischen Antriebs bei 80,7 %, der des hydraulischen Einzugs bei 81 %. Anders hingegen sieht es bei der Leistungsbereitstellung aus. Hier bietet der Generator bei Volllast einen Wirkungsgrad von 95 %. Demgegenüber steht der Wirkungsgrad der hydraulischen Pumpen zwischen 78,2 und

82,5 %. Somit liegt im Volllastbereich eine deutliche Wirkungsgradsteigerung des elektrischen Systems vor (Gallmeier & Auernhammer 2007b).

Bei gesamtheitlicher Betrachtung der beiden Antriebe im stationären Vergleich liegt der Wirkungsgrad des hydraulischen Antriebs unter 70 % und der des elektrischen Antriebs bei 85 % (Gallmeier & Auernhammer 2007b). Die Versuchsergebnisse des dynamischen Vergleichs bei typischen Lastzyklen von Volllast und Leerlauf zeigen eine Steigerung des Wirkungsgrads des elektrischen Antriebs um 23,3 %. Bei Teillast, mit 60 % Auslastung, liegt der Wirkungsgrad des elektrischen Antriebs bis zu 34 % über dem, des hydraulischen Antriebs (Gallmeier 2009).

Bei Betrachtung des Leistungsgewichts liegt der elektrische Antrieb des Einzugs mit einem Gewicht von 5,9 kg/kW, bezogen auf den häufigsten Betriebspunkt, deutlich über dem des hydraulischen Einzugs mit 1 kg/kW. Wenn man jedoch nur das Gewicht der Leistungsbereitstellung betrachtet, so wiegt der Pumpenturm mit 121 kg nur 39 kg weniger als der Synchrongenerator mit 160 kg (Gallmeier & Auernhammer 2007b). Das Gesamtleistungsgewicht des elektrischen Antriebs liegt mit 17,2 kg/kW deutlich über dem des hydraulischen Antriebs mit 14,1 kg/kW (Gallmeier 2009).

Laut *Gallmeier* (2009) gibt es jedoch auch elektrische Motoren, wie beispielsweise permanenterregte Synchronmotoren, mit einem Leistungsgewicht von unter 1 kg/kW.

Zusätzlich zu der erwähnten Wirkungsgradsteigerung ist der elektrische Antrieb wesentlich drehzahlsteifer als der hydraulische Antrieb. Dies führt zu einer Steigerung der Prozessqualität in Form einer gleichmäßigeren Häckselqualität.

Die Beschaffungskosten des elektrischen Antriebs liegen bei Serienproduktion in etwa um das 3,8-Fache über denen des hydraulischen Antriebs. Je nach Entwicklung des Kraftstoffpreises kann bei einer angenommenen Nutzungsdauer des Feldhäckslers von zehn Jahren die Amortisierung des elektrischen Antriebs erreicht werden (Gallmeier 2009).

Obwohl für den Antrieb des Einzugs und des Vorsatzes nur 11 % des Gesamtleistungsbedarfs benötigt werden, beträgt die Kraftstoffersparnis des elektrischen Antriebs 3,1 %.

### **3.4.2 Elektrischer Baugruppenantrieb Mähdrescher**

In der Vergangenheit erfolgte die Entwicklung bei selbstfahrenden Erntemaschinen hinsichtlich Steigerung der Produktivität und Effizienz (Aumer et al. 2008). Dies hatte zur

Folge, dass unter anderem die Schneidwerks- und Kanalbreite gesteigert wurden. Zusätzlich wurden Fahrassistenzsysteme entwickelt, um die Mähdrescher immer an ihrer Leistungsgrenze zu fahren. Über die Jahre änderte sich das Antriebskonzept jedoch nur wenig (Aumer et al. 2008). Der Antriebsstrang des Dreschwerks wird zum Beispiel nach wie vor mit einem Riemenantrieb betrieben. Betrachtet man den gesamten Antriebsstrang, stellt man fest, dass dieser sehr komplex aufgebaut ist. Große Leistungen werden mechanisch oder hydrostatisch übertragen. Mittlere Leistungsübertragung, wie beispielsweise für den Haspelantrieb, erfolgt ebenfalls mit Hydromotoren. Elektrische 12-Volt-Antriebe (Herlitzius et al. 2009) werden derzeit nur für niedrige Leistungsübertragung zum Beispiel als Stellmotoren eingesetzt. Eine Alternative zu den komplexen Übertragungselementen stellen moderne elektrische Hochvoltantriebe dar. Hydraulische Antriebe bieten zwar die gleiche Flexibilität in der Übertragung, haben aber meist einen geringeren Wirkungsgrad. Durch den Einsatz elektrischer Antriebe kann laut *Aumer et al.* (2008) die Komplexität des Antriebsstranges um 60 % reduziert werden.

Durch die bessere Regelbarkeit können neue Strategien bezüglich des Antriebsstrangmanagements entwickelt und somit ebenfalls, wie im vorherigen Beispiel von *Gallmeier* (2011), in eine Prozessoptimierung umgesetzt werden. Da ein elektrischer Antrieb Informationen über Drehzahl und Drehmoment liefert, können diese individuell eingestellt werden. Dies ermöglicht wiederum eine flexible Auslegung der Antriebsselemente. Ein weiterer Aspekt elektrischer Antriebe liegt laut *Aumer et al.* (2008) in der einfachen Integration mehrerer Aktuatoren innerhalb eines Systems. Bei einem geschlossenen Kreislauf, wie beispielsweise dem eines hydrostatischen Antriebs, kann nicht ohne Weiteres ein zusätzlicher Ölmotor hinzugefügt werden. Der Ersatz des hydrostatischen Antriebs durch einen elektrischen Antrieb würde laut *Aumer et al.* (2008) die Reduktion der aktiven Teile um 57 % zur Folge haben. Zwar sind die Anschaffungskosten der elektrischen Komponenten in etwa doppelt so hoch wie die des hydrostatischen Antriebs, jedoch kann durch eine Produktivitätssteigerung, den geringeren Wartungsaufwand und die höhere Zuverlässigkeit sowie spezifische Kraftstoffeinsparung der Mehrpreis über die Einsatzdauer kompensiert werden.

Resultierend aus dem konzeptionellen Vergleich stellte die TU Dresden auf der VDI-Tagung Landtechnik 2009 in Hannover die Integration eines elektrischen Antriebs in einer Tangentialdreschtrummel vor (Herlitzius et al. 2009). Durch den elektrischen Antrieb entfällt der mechanische Riemenantrieb komplett.

Für den elektrischen Trommelantrieb kommt ein permanenterregter Synchronmotor als Außenläufer zum Einsatz. Der Motor ist in die Dreschtrommel integriert und die Drehzahl ist stufenlos im Bereich von 0-1500 U/min einstellbar. Der Synchronmotor ist mit einer Nennleistung von 62,5 kW und einem Nenndrehmoment von 597 Nm angegeben. Das Maximaldrehmoment liegt bei 1200 Nm (Herlitzius et al. 2009). Der Motor kann somit um das Zweifache des Nenndrehmoments kurzzeitig überlastet werden. Er besitzt das maximale Drehmoment von 0 bis 1000 U/min (Aumer et al. 2010a) und ist in diesem Bereich extrem drehzahlsteif. Dies bietet eine erhöhte Druschqualität gerade bei Lastschwankungen und verschiedenen Durchsätzen. Ein Novum stellt das Reversieren der Dreschtrommel bei Verstopfung oder Trommelwicklern dar. Die Ermittlung der elektrischen und thermischen Eigenschaften erfolgt auf einem Prüfstand. Die Verlustwärme der Motorwicklungen wird über das Achsrohr, auf welchem die Dreschtrommel montiert ist, abgeleitet. Der Motor wird dadurch gekühlt. Seine Verharrungstemperatur liegt je nach Umgebungstemperatur (bei einer Lufttemperatur zwischen 16 ° und 45 °C) zwischen 130 °- 157 °C.

Zudem wurde die Trommel für weitere Laborversuche in einen Dreschversuchsstand eingebaut. Bei den Laborversuchen wurde die Dreschtrommel mit einem NKB-Durchsatz von 25 t/h belastet. Dabei trat ein Effektiv-Moment von 470 Nm sowie ein Maximalmoment von 1200 Nm auf. Die effektive Leistung betrug somit 39 kW und die Maximalleistung 100 kW. Der Wirkungsgrad des elektrischen Trommelantriebs lag bei diesen Versuchen geringfügig höher als der eines vergleichbaren mechanischen Antriebs über Riemenantriebe (Aumer et al. 2010b).

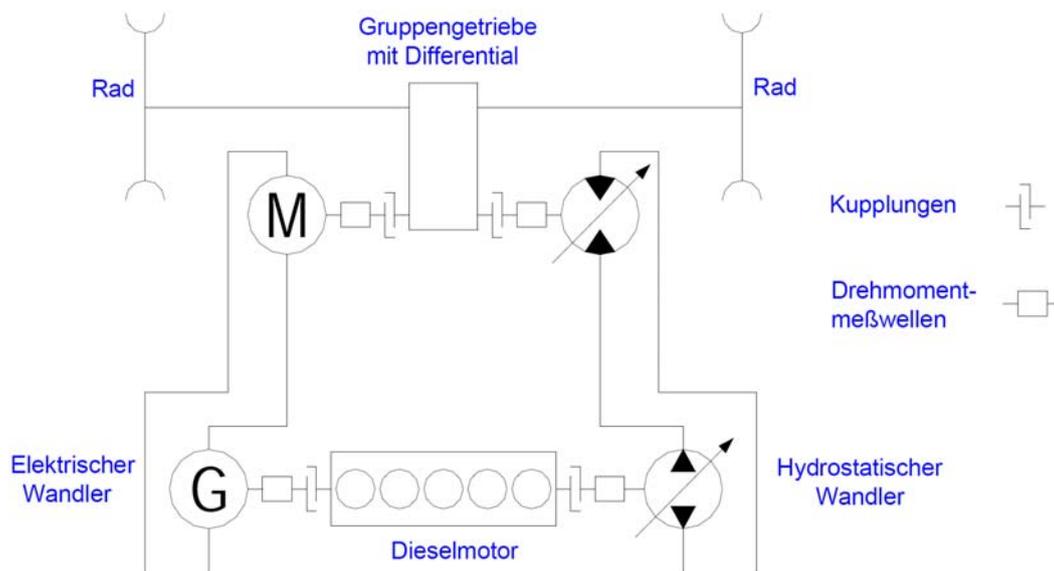
### **3.5 Dieselelektrische Fahrtriebe bei selbstfahrenden Erntemaschinen**

Weiterführend befasst sich der folgende Abschnitt mit dem Ansatz der Integration elektrischer Antriebe in den Fahrtrieb von selbstfahrenden Erntemaschinen.

#### **3.5.1 Dieselelektrischer Fahrtrieb Mähdrescher**

An der Universität Hohenheim fanden in den Jahren 2003 und 2004 Versuche zum Vergleich eines hydrostatischen und eines elektrischen Fahrtriebs in einem Mähdrescher statt (Bernhard & Schreiber 2005). Um das Leistungsverhalten und die Wirkungsgrade vergleichen zu können, wurde hierfür seit 2001 ein Mähdrescher parallel mit beiden Fahrtrieben ausgerüstet (Bernhard et al 2004). Unter identischen Bedingungen sind beide Antriebe durch Flansche mit dem Gruppengetriebe sowie dem Differenzialgetriebe des Mähdreschers verbunden. Für die Bereitstellung der elektrischen Energie wird ein Synchrongenerator vom

Verbrennungsmotor angetrieben. Ein Gleichrichter speist einen Gleichstromzwischenkreis mit 650 V DC (Bernhard et al. 2004), aus welchem wiederum ein daran angeschlossener Umrichter die Drehzahl des am Getriebe angeflanschten Asynchronmotors regelt. Der Asynchronmotor besitzt eine Leistung von 55 kW sowie ein Nenndrehmoment von 240 Nm. Der hydrostatische Antrieb verfügt über eine Axialkolbenverstellpumpe sowie einen Axialkolbenverstellmotor mit einem maximalen Drehmoment von 509 Nm. Diese sind, wie in Bild 15 dargestellt, an den zweiten Getriebeeingang angeflanscht (Bernhard 2011). Beide Antriebe werden von der Kabine aus mit demselben Fahrhebel bedient. Durch die elektronische Ansteuerung beider Antriebe kann per Computer auf beide Antriebsstränge zugegriffen werden (Bernhard & Kutzbach 2002).



**Bild 15:** Schematische Darstellung des Mähdrescherantriebs (geändert nach Bernhard 2011)

Bei den durchgeführten Versuchen im Arbeitseinsatz auf dem Feld zeigten beide Antriebe vergleichbare Wirkungsgrade. Lediglich bei reiner Straßenfahrt liegt der Wirkungsgrad des elektrischen Antriebs marginal über dem des hydraulischen Antriebsstrangs. Eine Begründung hierfür ist darin zu sehen, dass mit zunehmender Drehzahl der Wirkungsgrad des elektrischen Antriebs steigt.

Zusätzlich zu den Arbeits- und Straßentransportuntersuchungen erfolgten definierte Zugkraftversuche beider Antriebe. Hierbei wurde der Mähdrescher mit einer Abschleppstange an einen Kraftmessrahmen gekoppelt. Dieser befand sich im Dreipunkt-Heckanbau eines Traktors, welcher wiederum bei den Versuchsreihen als Bremsfahrzeug diente. Bei den Versuchen wurden laut *Bernhard* (2011) Wirkungsgrade zwischen 0,55 und 0,8 erzielt.

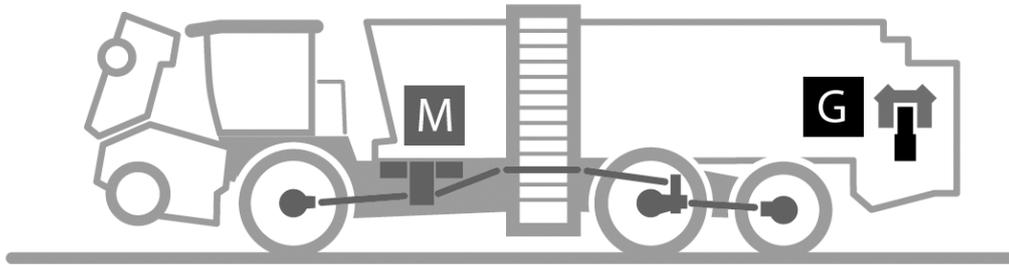
Wobei sich tendenziell wieder leichte Vorteile beim elektrischen Antrieb ergaben. Aufgrund der nicht ausreichend dimensionierten Wechselrichter konnte mit dem elektrischen Antrieb lediglich das Nennmoment von 240 Nm übertragen werden. Das Leistungsgewicht der Komponenten des elektrischen Antriebs liegt um das 6-Fache höher als das des hydrostatischen Antriebs (Bernhard & Schreiber 2005).

### **3.5.2 Dieselelektrischer Fahrtrieb selbstfahrender Köpfrdebunker**

Der Landtechnikhersteller Ropa präsentierte im Rahmen des Kolloquiums Elektrische Antriebe in Dresden, 2012, und bei der VDI-Tagung Landtechnik in Karlsruhe, 2012, ebenfalls einen dieselelektrischen Fahrtrieb für eine selbstfahrende Erntemaschine. Als Grundlage des Projekts diente der sechsstufige Zuckerrübenvollernter Tiger 4. Für diese Maschine, welche serienmäßig einen hydrostatischen Fahrtrieb besitzt, erfolgte die Konzeptionierung eines dieselelektrischen Antriebssystems. Die Motivation des Projekts stellte laut *Wöbke et al. (2012)* der höhere Wirkungsgrad elektrischer Antriebe dar. Zwar erfüllen die hydrostatischen Antriebe zurzeit die Anforderungen von Fahrtrieben in selbstfahrenden Erntemaschinen am besten, aber eine weitere Steigerung der Effizienz ist bei diesen Antrieben nicht ohne Weiteres zu erreichen. Unter den zum Teil sehr schwierigen Erntebedingungen und dem hohen Gewicht der Maschine sind zwischen 100 kW und 300 kW für den Fahrtrieb nötig (*Wöbke et al. 2012*). Die Hydraulikpumpe für den herkömmlichen hydrostatischen Fahrtrieb besitzt demnach eine Nennleistung von 343 kW. Der Antrieb des Ropa Tigers 4 besteht aus zwei Hydromotoren, welche, wie in Bild 16 dargestellt, zentral über ein Verteilergetriebe den Antriebsstrang der drei Triebachsen antreiben. Von den Hydromotoren aus, die an ein Schaltgetriebe mit zwei Fahrstufen angeflanscht sind, erfolgt der Antrieb der jeweiligen Achsen durch Gelenkwellen. Jede Achse ist mit einem Differenzialgetriebe und einem Planetengetriebe als Endantrieb ausgestattet. Um für diesen hydrostatischen Fahrtrieb einen ausreichend dimensionierten elektrischen Antrieb zu entwickeln, erfolgte im Vorfeld des Umbaus die Bestimmung der Lastkollektive bei Feldarbeit und Straßenfahrt. Anhand der gewonnenen Daten konnte daraufhin ein entsprechender Antrieb mit Elektromotoren dimensioniert werden.

Für diesen Zweck kamen als Ersatz für die Hydropumpe des Fahrtriebs zwei 140 kW starke Generatoren zum Einsatz (*Gruber & Dietel 2012*). Diese wurden, um im günstigen Bereich der Nenndrehzahl von 3000 U/min laufen zu können, mit einem Übersetzungsgetriebe an den Verbrennungsmotor angeflanscht. Parallel dazu wurden die Hydromotoren des Antriebsstrangs durch zwei 140 kW starke, permanenterregte Synchronmotoren ersetzt. Die Kühlung der vier Elektromotoren erfolgte anhand einer Flüssigkeitskühlung mit Trafo-Öl. Der

installierte elektrische Fahrtrieb kann kurzzeitig um 30 %, bezogen auf seine Nennlast, überlastet werden. Der zentrale Achsantrieb des hydrostatischen Antriebs über das angesprochene Verteilergetriebe wurde beibehalten. Zur Limitierung der Zwischenkreisspannung kommt ein sogenannter Bremschopper zum Einsatz.



**Bild 16:** Schematischer Aufbau des elektrischen Antriebs des Selbstfahrs

(G = Generatoren; M = Elektromotoren) (geändert nach Wöbke et al. 2012)

Zusätzlich zur Erprobung unter Feldbedingungen wurde mit Matlab/Simulink eine Simulation erstellt. Bei der Felderprobung konnte eine Wirkungsgradsteigerung des elektrischen Fahrtriebs gegenüber dem herkömmlichen hydrostatischen Fahrtrieb von 20 % erzielt werden.

Durch den Einsatz eines Energiespeichers in Form von beispielsweise einer Batterie, zur Abdeckung der Spitzenlast, könnte eine weitere Kraftstoffeinsparung durch Downsizing des Motors erfolgen und das derzeit serielle System somit zu einem Hybridsystem erweitert werden (Wöbke et al. 2012).

### **3.6 Anforderungen seitens des Gesetzgebers an elektrische Antriebe**

Hersteller mobiler elektrischer Antriebe sind mit mehreren Richtlinien und Normen konfrontiert. Diese dienen unter anderem der Produktsicherheit und müssen, um eine Zulassung für eine Maschine innerhalb der EU zu erhalten, eingehalten werden. Durch die Gesetzgebungen sind beispielsweise Anforderungen an die Sicherheit elektrischer Antriebe definiert. Diese sollen den Anwender vor einem etwaigen Stromschlag schützen, denn bei Kontakt besteht für den Anwender akute Lebensgefahr. Für die Zulassung eines mobilen elektrischen Antriebs sind zum einen allgemeine Richtlinien und Normen für die Zulassung und Inverkehrbringung einer Maschine an sich einzuhalten wie beispielsweise die Maschinenrichtlinie 2006/42/EG (CE-Kennzeichnung). Zum Anderen sind entsprechende Richtlinien für den elektrischen Antrieb zu beachten. Dies sind zum Beispiel die EN 60204

(Sicherheit von Maschinen-, Elektrische Ausrüstung von Maschinen) oder die EN 60034 (Drehende elektrische Maschinen).

### **3.7 Zusammenfassung**

Nach umfangreicher Literaturrecherche im Bereich elektrischer Antriebe in der Landtechnik kann zusammenfassend die Aussage getroffen werden, dass sich durch den Einsatz dieser Technik eine Vielzahl von Vorteilen für die Landtechnik ergibt. Durch die Umsetzung dieselektrischer Systeme ergeben sich viele neue Möglichkeiten, die die Anwendung und den Einsatz der Technik effizienter und anwenderfreundlicher macht (Hahn 2011). Außerdem lässt sich durch elektrifizierte Baugruppenantriebe zum Beispiel in selbstfahrenden Erntemaschinen eine Prozessoptimierung in Form einer gesteigerten Prozessqualität umsetzen. Durch die Wirkungsgradsteigerung können kleinere Verbrennungsmotoren mit niedrigerem Dieserverbrauch eingesetzt werden.

Des Weiteren erreichen Elektromotoren eine hohe Lebensleistung von teilweise bis zu 50000 Betriebsstunden (Tarasinski 2004). Sie zeichnen sich zusätzlich durch einen geringen Verschleiß aus und haben außer Lagern keine beweglichen Teile. Dadurch gestalten sich elektrische Antriebe für die Landwirte und Lohnunternehmer deutlich günstiger im Unterhalt. Jedoch liegt ihr Anschaffungspreis zurzeit teilweise noch über dem konventioneller Antriebe. Einen nennenswerten Vorteil beispielsweise gegenüber hydraulischen Antrieben bietet auch die Möglichkeit der kurzzeitigen Überlastung elektrischer Maschinen. Dies ist bei hydraulischen Antrieben nicht möglich. Diese müssen durch ein Überdruckventil beziehungsweise durch ein Druckbegrenzungsventil vor Überlast geschützt werden (Hahn 2011, Tarasinski 2004). Demnach können elektrische Antriebe nicht nach der maximalen Leistung wie ein Öltrieb, sondern nach der im Betrieb auftretenden Durchschnittsleistung dimensioniert werden. Außerdem sind elektrische Antriebe sehr umweltfreundlich, es können beispielsweise keine Ölleckagen auftreten und sie laufen in der Regel geräuscharm.

Reine Elektrofahrzeuge, wie sie bereits von der Automobilindustrie angeboten werden, sind in naher Zukunft in der Landtechnik noch nicht zu erwarten. Dies liegt in der Kapazität der derzeitigen Speichermedien begründet. Um beispielsweise einen Traktor während einer 12-Stunden-Schicht bei der Bodenbearbeitung rein elektrisch zu betreiben, wäre derzeit eine Batterie mit mehreren Tonnen Gewicht nötig. Des Weiteren hätte eine derartige Batterie ein Volumen, welches ungefähr um das 100-Fache über dem eines Dieseltanks läge (Klinger & Fichtl 2012).

#### **4 Unkrautkontrolle im Zuckerrübenanbau**

Nachdem im vorherigen Kapitel ausführlich auf elektrische Antriebe mit ihren Chancen und Möglichkeiten in der Landtechnik eingegangen wurde, folgt nun eine Zusammenfassung pflanzenbaulicher Grundlagen des Zuckerrübenanbaus, da Freilandversuche zur Evaluierung der Hackmaschine mit der Kultur Zuckerrübe durchgeführt wurden. Im Folgenden werden sowohl die Herausforderungen im konventionellen als auch die Besonderheiten des ökologischen Zuckerrübenanbaus erläutert. Der Grund hierfür liegt darin, dass die Entwicklung des Prototyps einer Reihenhackmaschine nach den Anforderungen des ökologischen Anbaus erfolgt.

Eine umfassende Unkrautmanagementstrategie ist im ökologischen Zuckerrübenanbau unerlässlich. Beginnend mit der Auswahl geeigneter Flächen über eine gezielte Fruchtfolge bis hin zum Einsatz geeigneter Technik zur Bodenbearbeitung, Saatbettbereitung und mechanischen Unkrautregulierung muss alles aufeinander abgestimmt sein, um einen erfolgreichen Anbau zu gewährleisten.

Zu den geeigneten Zuckerrübenstandorten zählen unter anderem tiefgründige Böden, die eine gute Bodenstruktur und ein gutes Wasserhaltevermögen aufweisen. Demnach sind Schwarz- und Braunerden sowie sandige Lehme und Niedermoorböden für den Zuckerrübenanbau prädestiniert. Dahingegen sind kalte, schwere und stark tonhaltige Böden aufgrund ihrer langsamen Erwärmung im Frühjahr eher ungeeignet (Kolbe & Petzold 2002; Irla et al. 2005; König et al. 2005).

Bei der Standortwahl sollte des Weiteren unbedingt auf eine geringe Verunkrautung geachtet werden, vor allem ausdauernde Unkrautarten wie Ackerkratzdistel, Gemeine Quecke und Ackerwinde sollten möglichst nicht vorhanden sein (Irla et al. 2005; König et al. 2005).

Ein weiterer, entscheidender Faktor für einen erfolgreichen Zuckerrübenanbau ist die richtige Wahl von Vor- und Zwischenfrüchten. Durch eine geeignete Fruchtfolge können Schädlinge, Krankheiten und Unkräuter im Vorfeld des Zuckerrübenanbaus unterdrückt werden.

Demnach eignen sich besonders Getreidearten wie beispielsweise Roggen und Gerste als Vorfrucht. Für den Zwischenfruchtanbau kommen unter anderem nematodenresistenter Gelbsenf oder Phacelia infrage (Drangmeister 2011). Die Zuckerrübe wiederum hat einen hohen Vorfruchtwert. Demnach können als Folgefrucht Sommergetreide, Körnerleguminosen oder Mais angebaut werden (Bucher 2009, Drangmeister 2011). Eine weitere Rolle im Rübenanbau spielt die ausreichende Zufuhr von Nährstoffen. Dabei muss jedoch darauf geachtet werden, dass auf den Flächen nicht zu viel Stickstoff zugeführt beziehungsweise

durch das Abbauen der Vor- oder Zwischenfrüchte freigesetzt wird. Zu viel verfügbarer Stickstoff führt zu einer geringeren technischen Qualität der Zuckerrübe. Ein erhöhter Alpha-Amino-N-Gehalt der Zuckerrübe fördert die Melassebildung und verringert somit beim Zuckerherstellungsprozess die ausbeutbare Zuckermenge beziehungsweise verringert den bereinigten Zuckerertrag. Zudem beeinflussen Kalium- und Natriumgehalte der Rübe ebenfalls die technische Qualität (Lütke Entrup & Schäfer 2011).

### **Bodenbearbeitung und Saatbettbereitung**

Nach dem Ernten der Vorfrucht beginnt die Bodenvorbereitung für die Zuckerrübenaussaat im Folgejahr. Zunächst erfolgt eine Stoppelbearbeitung mit Grubber oder Scheibenegge. Dabei wird ein Saatbett für Ausfallgetreide und Unkrautsamen geschaffen, welche dann mit der zweiten Stoppelbearbeitung reguliert werden können. Gemeinsam mit der zweiten Stoppelbearbeitung kann die Aussaat einer Zwischenfrucht einhergehen. Als Grundbodenbearbeitung folgt dann in der Regel eine Herbstfurche. Diese sorgt für ein abgesetztes Saatunterbett für die Zuckerrübenaussaat im Frühjahr (Drangmeister 2011; Lütke Entrup & Schäfer 2011; König et al. 2005). Im ökologischen Rübenanbau folgen im Frühjahr, vor der Saatbettbereitung, je nach Witterungsverhältnissen, mehrere ganzflächige Arbeitsgänge zur Regulierung von bereits aufgelaufenen Unkräutern (die sogenannte Unkrautkur). Wenige Tage vor dem Aussaattermin, welcher sich optimalerweise in der Zeitspanne von Mitte März bis Mitte April befindet, erfolgt die eigentliche Saatbettbereitung. Hierfür eignen sich verschiedene Gerätekombinationen aus beispielsweise Kreiselegge in Kombination mit Krümelwalze oder Feineggen (Fischer 2012). Ein ideales Saatbett für Zuckerrüben besteht aus einem festen und feuchten Saatunterbett sowie einer 2 – 3 cm starken, lockeren Oberkrume.

Eine zügige Keimung und ein zeitnaher Auflauf der Rübenpflanzen gründen auf einem gut vorbereiteten Saatbett und optimalen Keimbedingungen. Die Ablagetiefe der Rübenpille sollte deshalb bei einer Tiefe von ca. 2 – 3 cm, auf einen rückverfestigten Ablagehorizont erfolgen. Des Weiteren sollte die Pille mit loser, fein strukturierter Erde im Größenbereich von 0.5 – 5 mm bedeckt sein. Ein guter Indikator für die Größenverteilung stellt hierbei der GMD (Mittlerer Gewogener Aggregatdurchmesser) dar. Dieser sollte bei Zuckerrüben im Bereich von 8 bis 12 mm liegen (Wagner 2012).

Ideale Auflaufbedingungen werden zudem im Wesentlichen von der Bodentemperatur und der Bodenfeuchte bestimmt. Bei einer Temperatur von 5 °C und einer Bodenfeuchte ab 6 % (Nørremark & Griepentrog 2004) beginnt der Auflauf nach wenigen Tagen. Steine und grobe Erdkluten oberhalb der Rübenpille führen dazu, dass die Rübe diese Hindernisse umwachsen

muss. Da die Rübenpille jedoch nur über begrenzte Reserven für das Auflaufen verfügt, ist der Abstand von der Pillenposition bis zum auflaufenden Keimling gering. Befinden sich viele größere Steine und Kluten im Oberboden, kann dies zu einem heterogenen Auflauf beziehungsweise später zu einem unterschiedlich entwickelten Rübenbestand führen. Zusätzlich können aber auch Temperaturschwankungen und Trockenheit für einen heterogenen Auflauf sorgen. Ein heterogener Rübenbestand bietet den Unkräutern mehr Platz und führt unweigerlich zu einer höheren Verunkrautung innerhalb des Feldes.

In der Literatur finden sich, je nach Maximierung des Zuckerertrags, des Rübenetrags oder des Zuckergehalts, Bestandesdichteempfehlungen zwischen 70000 und 95000 Pflanzen/ha (Lütke Entrup & Schäfer 2011; Drangmeister 2011). Die daraus resultierende Aussaatstärke ergibt sich je nach Feldaufgang der Sorte, Saatgutabstand (zwischen 14 und 22 cm) innerhalb der Reihe und nach Reihenweite (45 oder 55 cm). Für die später beschriebenen Hohenheimer Feldversuche wurde eine Aussaatstärke, bei 50 cm Reihenabstand und 20 cm Saatgutabstand, von 100000 Pflanzen/ha gewählt. Dies entspricht einer Saatguteinheit je Hektar (Bucher 2009). Die Aussaat des pillierten Saatguts erfolgt mit Einzelkornsäegeräten.

Da die Rübe, wie bereits erwähnt, gesät und nicht gepflanzt wird, besitzt sie keinen Vorsprung bezüglich ihres Entwicklungsstadiums gegenüber Unkräutern. Gerade während ihrer Jugendentwicklung hat die Zuckerrübe eine geringe Unterdrückungswirkung gegenüber Unkräutern in ihrem unmittelbaren Umfeld. Des Weiteren muss sie vor Verschüttung beim Einsatz von Hacktechnik geschützt werden.

Da Unkräuter zeitlich versetzt in mehreren Wellen (Wetzler 2010) auflaufen, bedeutet dies für den ökologischen Zuckerrübenanbau, dass mehrere Hackdurchgänge vom Auflaufen der Rübenpflanzen (BBCH-Stadium 10) bis hin zum Reihenschluss (BBCH-Stadium 39) notwendig sind, um diese vor der Konkurrenz der Unkräuter zu schützen. Nach dem Reihenschluss verfügen die Pflanzen über eine in der Regel ausreichende Unkrautunterdrückung.

#### **4.1 Mechanische Unkrautregulierung bei Reihenkulturen**

Nachstehend sind die Methoden der mechanischen Unkrautregulierung in Reihenkulturen dargestellt. Grundsätzlich erfolgt bei der mechanischen Unkrautregulierung in Reihenkulturen zunächst die Einteilung der zu bearbeitenden Fläche in drei Bereiche:

- Bereich zwischen den Kulturreihen (je nach Reihenabstand zwischen 35 und 40 cm)
- Bereich innerhalb der Kulturreihe (8 – 10 cm)
- Bereich in unmittelbarer Umgebung der einzelnen Kulturpflanzen (close to crop area) mit einem Radius von 1 bis 3 cm (Nørremark & Griepentrog 2004)

Darüber hinaus kann im Voraufbau oder auch nach erfolgreicher Etablierung eines Rübenbestandes eine ganzflächige Bearbeitung mit beispielsweise Netzege, Striegel oder Yetter Sternhacke durchgeführt werden (Bucher 2009; Fischer 2012).

Für den Bereich zwischen den Reihen können verschiedene Geräte wie beispielsweise Scharhacken, Rollhacken, Reihenfräsen und Bügelhacken zum Einsatz kommen. Dieser Bereich ist ausreichend mechanisiert und auch teilweise automatisiert. Einige Hersteller, wie zum Beispiel die Firma Schmotzer, Bad Windsheim, oder die Firma Garford, England, bieten über GPS oder per Kamera gesteuerte, automatisch gelenkte Hackmaschinen in verschiedenen Arbeitsbreiten an (Bucher 2009; Bier 2010; Fischer 2012).

Dabei basiert die unkrautregulierende Wirkung der aufgeführten Maschinen im Wesentlichen auf den folgenden Prinzipien (Kurstjens & Kropff 2001; Nørremark & Griepentrog 2004; Wilhelm & Hänsel 2011):

- Entwurzeln/ Ausreißen der gesamten Unkrautpflanze
- Abtrennen der Wurzel vom Rest
- Verschütten der Unkräuter

Innerhalb der Kulturreihe kann zwischen selektiv und nicht selektiv arbeitenden Hackmaschinen unterteilt werden. Selektiv arbeitend bedeutet, dass prinzipiell zwischen Kulturpflanzen und Unkräutern eine Differenzierung getroffen wird und dass nur Unkräuter von den jeweiligen Systemen erfasst und reguliert werden. Dahingegen treffen nicht selektiv arbeitende Werkzeuge keine Unterscheidung bezüglich Unkraut und Kulturpflanze. Das heißt, diese bearbeiten den kompletten Bereich innerhalb der Kulturreihe. Dabei ist es essenziell, dass die Kulturpflanze einen Wachstumsvorsprung gegenüber den Unkräutern besitzt und der Bearbeitung durch die Hacktechnik standhält. Ist dies nicht der Fall, können Beschädigungen an den Kulturpflanzen auftreten (Bucher 2009). Somit müssen für den Einsatz dieser

Hacktechnik optimale Bedingungen herrschen, was wiederum bedeutet, dass die Kulturpflanze vor den Unkräutern auflaufen muss und eine ausreichend starke Verwurzelung besitzt. Das Zeitfenster, in dem solche Bedingungen erfüllt sind, kann je nach Witterungsverhältnissen im Frühjahr sehr klein sein und bei größerem Anbauumfang eventuell nicht für die Bearbeitung aller Flächen ausreichen (Bucher 2009).

Als Beispiel für nicht selektiv arbeitende Werkzeuge seien hier die Fingerhacke, der Annaburger Rollstriegel sowie die Torsionshacke genannt. Eine ausführliche Beschreibung vorhandener Maschinen für die nicht selektiv arbeitende Unkrautregulierung und die Mechanisierung für den Zwischenreihenbereich beschreiben *Bucher (2009)*, *Bier (2010)*, *Wilhelm & Hensel (2011)* und *Fischer (2012)*. Einen Überblick über selektiv arbeitende Maschinen und Verfahren befindet sich in Kapitel 3.3.

Wenn der Einsatz der oben genannten Maschinen nicht möglich ist, bleibt für das Entfernen der Unkräuter innerhalb der Reihe nur noch die zeitintensive Handhacke. Diese ist somit im ökologischen Reihenkulturanbau häufig verbreitet.

Aufgrund dieser Tatsache haben sich in den vergangenen Jahren mehrere Forschungseinrichtungen und Hacktechnikhersteller mit dem Thema Automatisierung mechanischer Unkrautkontrolle innerhalb der Kulturreihe befasst und unterschiedliche Lösungsansätze entwickelt.

## **4.2 Grundlagen selektiver Unkrautregulierung**

In dem folgenden Abschnitt werden einige dieser Lösungsansätze aus Forschung und Entwicklung vorgestellt. Bisher haben es nur wenige Maschinen als Serienprodukt auf den Markt geschafft. Die selektive Unkrautregulierung innerhalb der Reihe ist nach wie vor eine große Herausforderung, insbesondere für Saatkulturen wie Mais und Rügen.

Da bei diesen Kulturen die Ablage des Saatgutes durch verschiedenen Parameter beeinflusst wird, ist die mechanische Unkrautregulierung innerhalb der Reihe aufgrund des heterogenen Pflanzenabstands äußerst schwierig. Einfacher gestaltet sich die mechanische Unkrautregulierung bei gepflanzten Kulturen wie beispielsweise bei Salat oder Feldgemüse.

Für die Erkennung und Differenzierung von Unkräutern und Kulturpflanzen, zur Positionsbestimmung von Pflanzen innerhalb der Reihe sowie zur generellen Erkennung von Kulturreihen können unterschiedliche Verfahren eingesetzt werden. Nachstehend sind drei verschiedene Prinzipien aufgeführt:

- Navigation, Positionsbestimmung und Werkzeugsteuerung via GPS mit vorheriger Kartierung der Kulturpflanzen bei der Aussaat/Pflanzung (Kartieransatz)
- Erkennung der Pflanzenposition über optische Systeme in Verbindung mit Bildverarbeitung (kameragestützt)
- Unterscheidung zwischen Unkraut und Kulturpflanze anhand des Einsatzes unterschiedlicher Sensorik (Laser, Lichtschranken etc.)

#### **4.2.1 Kartieransatz**

Als Basis der Werkzeugsteuerung und zur präzisen Lenkung eines Hacksystems entlang der Kulturreihen dient eine bei der Aussaat generierte Saatgutkarte (Griepentrog et al.2003). Ziel eines solchen Ansatzes ist es, die genaue Position der Rübenpille während der Aussaat zu erfassen und diese auch später bei der Unkrautregulierung mit höchstmöglicher Präzision wiederzufinden. Dieser Ansatz ermöglicht zudem die Selektierung einzelner Pflanzen innerhalb eines Bestandes für beispielsweise eine individuelle Beobachtung. *Griepentrog et al.* (2003) beschreiben die Ausrüstung und den Umbau einer sechsreihigen Einzelkornsämaschine für den Einsatz zur Erstellung einer Pflanzenpositionskarte. Für die Erfassung der Saatgutablage am Säaggregat wurden an jedem Schar ein Optosensor angebracht. Dieser gibt ein Signal aus, sobald eine Rübenpille die Vereinzlung der Kverneland Monopill S Sämaschine verlässt.

Zur Erfassung der Quer- und Längsneigung ist ein Neigungssensor im System integriert. Die Positionsbestimmung erfolgt über DGPS. Die Aufzeichnung der GPS-Zeit und der UTM-Koordinaten erfolgt anhand eines Computers mit der Frequenz von 20 Hz. Ebenfalls werden die Signale der Optosensoren zeitlich erfasst.

Die Abweichung der theoretischen Pflanzenposition von der tatsächlichen wird beeinflusst durch die Genauigkeit des DGPS-Signals, die Bewegung des Einzelkornsägeräts zum Referenzpunkt (Quer- und Längsneigung), durch das Verrollen der Pille nach der Ablage und durch die Beschaffenheit des Saatbetts.

Falls das Saatbett zu grob ist oder zu viele Steine die Pillen bedecken, müssen die Pflanzen, wie bereits erwähnt, um das Hindernis herum wachsen. Die erfasste Position der Ablage und der Standort des Keimlings können so bis zu mehreren Zentimetern abweichen.

Bei Versuchen zur Evaluierung des Systems wurde eine Standardabweichung der Ist- zur Sollposition der Rübenpflanzen zwischen 31,8 und 59,2 mm ermittelt. Diese ist für eine präzise mechanische Unkrautregulierung demnach noch nicht immer ausreichend.

Einen ähnlichen Lösungsansatz beschreiben *Ehansi et al.* (2004). Bei dem beschriebenen Projekt wurde eine vierreihige Einzelkornsämaschine für Mais um ein System zur Erfassung des Ablageorts des Saatguts und zur Erstellung einer Positionskarte ergänzt. Die Maschine ist nach einem vergleichbaren Funktionsprinzip wie oben beschrieben aufgebaut. Auch hier wird der Abwurf eines Maiskorns aus der Vereinzelnung optisch erfasst und die Position durch Kopplung mit einem DGPS-Signal in einem Datenspeicher abgelegt. An das System ist zusätzlich ein Inkrementalgeber angeschlossen. Dieser misst die Fahrgeschwindigkeit und ist an ein nicht angetriebenes, schlupffreies Rad montiert.

Mit dieser Sämaschine wurden ebenfalls Versuche zur Ermittlung der Abweichung von Soll- zur Istposition der Maispflanzen durchgeführt. Bei einer Fahrgeschwindigkeit von 3 km/h betrug die Standardabweichung der erhobenen Messwerte im ersten Versuchsjahr zwischen 31 – 48 mm und im zweiten Versuchsjahr zwischen 16 und 21,8 mm.

Ein weiteres Projekt aus den USA (Sun et al. 2010) beschäftigt sich mit der Entwicklung einer Tomatenpflanzmaschine, welche ebenfalls über eine Aufzeichnung der genauen Pflanzenposition verfügt. Dabei werden unterschiedliche Positionserfassungsmöglichkeiten miteinander kombiniert. Unter anderem ist das Pflanzrad der Maschine an einen Inkrementalgeber gekoppelt, dessen Messwerte abgespeichert und im Nachhinein mit den DGPS-Signal-Daten verknüpft werden. Zusätzlich kommt nach der Pflanzeinheit eine Lichtschranke zur Erfassung der Tomatenpflanzen und deren Position. Bei Feldversuchen hat sich allerdings gezeigt, dass mit dem Lichtschrankensystem nur etwa die Hälfte der Tomatenpflanzen erfasst wurde.

Zudem wurden nach der Pflanzung alle Tomatenpflanzen mit einem DGPS-Messsystem von Hand nachgemessen. Die Abweichung der aufgezeichneten Positionswerte zu den tatsächlichen Pflanzenstandorten lag, nach Korrektur der Quer- und Längsneigung, zu 95 % in einem Bereich von 5,1 cm (Sun et al. 2010).

#### **4.2.2 Einsatz digitaler Bildverarbeitung zur Erkennung von Pflanzen**

Der Einsatz optischer Systeme mit digitaler Bildverarbeitung stellt einen neuen Ansatz in der mechanischen und chemischen Unkrautbekämpfung dar. In der Forschung und Industrie gibt es mehrere Projekte, bei denen durch den Einsatz moderner Bildverarbeitung im Pflanzenbau eine deutliche Effizienzsteigerung in verschiedenen Anwendungen ermöglicht wurde (Gerhards & Oebel 2006). Bildverarbeitung wird beispielsweise eingesetzt, um bestehende Systeme zu automatisieren und optimieren. Die Firma Schmotzer, Bad Windsheim, setzt

beispielsweise Kameratechnik für das automatische Lenken einer Hackmaschine entlang von Kulturreihen ein. Des Weiteren beschreiben *Gerhards & Oebel* (2006) eine Mehrkammerspritze die, basierend auf einer durch Bildverarbeitung erstellten Unkrautkartierung, gezielt teilschlagspezifisch Pflanzenschutzmittel ausbringt (Gerards & Christensen 2003).

Da für die Steuerung des entwickelten Hackmaschinenprototyps (siehe Kapitel 5) ebenfalls digitale Kameratechnik in Verbindung mit einem Bildverarbeitungsalgorithmus eingesetzt wird, sind im Folgenden Abschnitt einige Grundlagen und Beispiele für die Funktionsweise digitaler Bildverarbeitung näher beschrieben.

#### **4.2.2.1 Aufbau und Grundlagen digitaler Bilder**

Grundsätzlich werden in der digitalen Bildaufnahme anstatt eines analogen Films lichtempfindliche, elektrofotografische Sensoren verwendet. Die hierbei dominierenden Sensoren sind die sogenannten CCD-Sensorchips (Charge Coupled Device). Neben den genannten CCD-Sensoren können alternativ CMOS-Sensoren (Complementary Metal Oxide Semiconductor) zum Einsatz kommen. Da die CCD-Sensoren zwar preiswert sind, jedoch langsam arbeiten, werden in hochwertigen Digitalkameras aus diesem Grund vor allem CMOS-Sensoren eingebaut. Da CMOS-Sensoren direkt adressierbar sind, können die Bildsignale dieser Sensoren schneller verarbeitet werden und es kann somit eine schnellere Bildfolge realisiert werden. Zusätzlich weisen CMOS-Sensoren einen geringeren Stromverbrauch als CCD-Sensoren auf (Böhringer et al. 2011). Darüber hinaus liegt das Empfindlichkeitsmaximum von CMOS-Sensoren im Nahinfrarotbereich oberhalb einer Wellenlänge von 650 nm, das von CCD-Sensoren hingegen liegt im Bereich des sichtbaren Lichts (550 nm).

Die kleinste Einheit eines digitalen Bildes wird als sogenanntes Picture Element oder kurz Pixel bezeichnet. Ein Pixel stellt die kleinste Flächeneinheit eines digitalen Bildes dar und enthält digitale Informationen zur Farbe.

Die Größe eines digitalen Bildes wird ebenfalls in Pixeln angegeben. Die Gesamtzahl an Pixeln beschreibt das Produkt aus Höhe und Breite eines Bildes. Die Größenangabe erfolgt in der Regel in Megapixeln. Die Farbinformationen eines Bildes bestehen aus den Teilfarbinformationen von Rot-, Grün- und Blau. Daraus wird je nach weiterverarbeitendem Dateiformat entweder ein konvertiertes Bild oder ein digitales Negativ ausgegeben.

Die Farbtiefe gibt an, aus wie vielen Farben sich ein digitales Bild zusammensetzt. Je nachdem, aus wie vielen Bits ein Bild besteht, können mehr oder weniger Farben beziehungsweise Farbschattierungen dargestellt werden. Ein digitales Bild mit der Farbtiefe 8 Bit besteht beispielsweise aus  $2^8$  (256) Farben (Böhringer et al. 2011).

#### **4.2.2.2 Einsatzbereiche digitaler Bildverarbeitung im Pflanzenbau**

Mittlerweile hat sich für die Anwendung optischer Sensorik ein breites Einsatzspektrum entwickelt. Im Folgenden werden einige Bereiche aufgeführt:

- Bedeckungsgrad von Ernterückständen
- Bestandesdichteerfassung
- Messung des Chlorophyllgehalts (für die N-Düngung)
- Pflanzen- und Unkrauterkenennung sowie -klassifizierung
- Spurführung von Traktoren, selbstfahrenden Erntemaschinen und Anbaugeräten

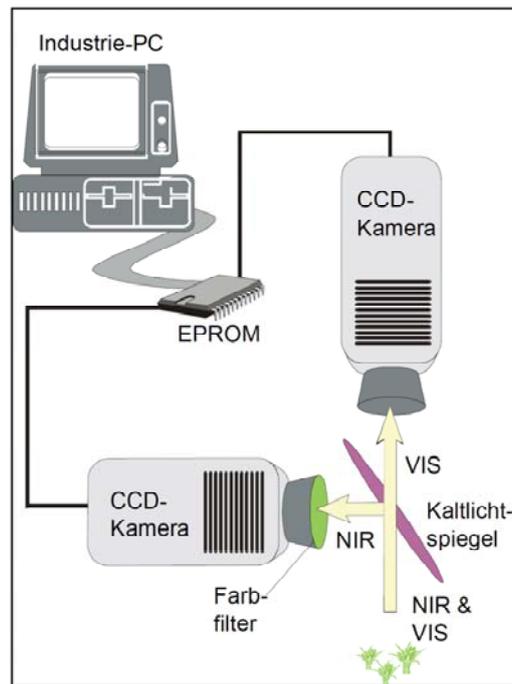
#### **4.2.2.3 Herausforderungen der Pflanzenerkennung in digitalen Bildern**

Die Herausforderung der Pflanzenerkennung in digitalen Bildern liegt zum einen darin, Pflanzen von Ernterückständen, Steinen und dem Boden zu unterscheiden, und zum anderen zu segmentieren, welche der erkannten Pflanzen eine Kulturpflanze und welche eine Unkrautpflanze ist. Allein die Unterscheidung zwischen Pflanzen und Boden in einem digitalen Bild gestaltet sich mitunter äußerst schwierig, da sich unter realen Bedingungen in der Praxis Parameter wie Lichtverhältnisse, Reflexion der Pflanzen, Größenunterschiede innerhalb einer Kultur, Chlorophyllgehalt etc. ständig ändern können. Gerade durch sich ändernde Lichtverhältnisse kommt es zur Schattenbildung in Bildern. Des Weiteren wird es problematisch, wenn sich die Kulturpflanze in Umriss, Farbe und Größe wenig von den vorkommenden Unkräutern unterscheidet. Zudem verändern Pflanzen ihr äußeres Erscheinungsbild bei zeitlich aufeinander folgenden Applikationen durch Wachstum sowie Stressfaktoren wie z. B. Nährstoff- und Wassermangel. Außerdem haben Pflanzen eine unterschiedliche Ausrichtung und stehen nicht homogen ausgerichtet innerhalb einer Reihe. Hinzu kommt, dass sich je nach Witterungsverhältnissen auch die Bodenbedingungen ändern können. Ein trockener Boden bietet einen anderen Kontrast zwischen Boden und Pflanze als ein feuchter Untergrund.

#### **4.2.2.4 Klassifizierung von Kulturpflanzen und Unkräutern in digitalen Bildern**

*Sökefeld & Gerhards* (2003) beschreiben ein System zur Erkennung und Klassifizierung von Kulturpflanzen und Unkräutern. Anhand der eingesetzten Bildverarbeitung werden durch Mustererkennungsalgorithmen Unkräuter und Kulturpflanzen aufgrund mehrerer Merkmale in Klassen eingeteilt. Zusätzlich zur Pflanzenklassifizierung wird eine Applikationskarte der erkannten Unkräuter erstellt. Die Aufnahme der Bilder erfolgt mittels Bisppektralkameras. Dabei handelt es sich um zwei CCD-Monochromkameraköpfe, die zwei pixelkongruente Bilder unterschiedlicher Wellenlängenbereiche aufnehmen. Mehrere dieser Kameras nehmen in der Höhe von 1,5 m Bilder mit der Auflösung 750x580 Pixel auf. Die Bildaufnahme wird mit einem Trägerfahrzeug ausgeführt. Mit der Aufnahme eines Bildes wird gleichzeitig die Position des Aufnahmeorts mit GPS erfasst (*Oebel & Gerhards* 2005). Mit den Erkenntnissen aus der Bildverarbeitung werden dann im Nachgang der Bildaufnahme mittels eines GIS-Programms Applikationskarten für die anschließende, teilflächenspezifische Herbizid-ausbringung erstellt. Neben diesem Kartieransatz wird in *Gerhards & Christensen* (2003) ebenfalls der Einsatz des Systems zur Echtzeitanwendung erwähnt.

Die Spektren der Bisppektralkameras befinden sich zum einen im sichtbaren Wellenlängenbereich zwischen 610 und 690 nm, zum anderen im Infrarotbereich über 770 nm (*Weis et al.* 2008). In Bild 17 ist die Funktionsweise der Bisppektralkameras dargestellt. Beide Bilder werden mit dem EPROM (erasable and progammable read only memory) zu einem Bild zusammengefasst (*Sökefeld et al.* 2007). Dabei wird das Bild des sichtbaren Bereichs mit dem des Nahinfrarotbereichs verrechnet. Der Grund hierfür besteht darin, dass Pflanzen im Bereich zwischen 610 und 690 nm nahezu sämtliche Lichtwellen für die Photosynthese absorbieren und lebendes Pflanzenmaterial in diesem Bereich auf dem Bild nicht zu erkennen ist. Im Gegensatz dazu reflektieren andere Gegenstände, wie beispielsweise Ernterückstände, sehr gut in diesem Bereich (*Oebel* 2006). In dem Verrechnungsschritt mittels EPROM wird dann das sichtbare Bild (VIS) vom Nahinfrarotbild (NIR) abgezogen.



**Bild 17:** Funktionsweise des Bispektralkamerasystems (geändert nach Oebel 2006)

Man erhält nun ein Graustufenbild, in dem grüne Pflanzen hell und der Boden und andere Bildbestandteile relativ dunkel erscheinen (Sökefeld et al. 2007). Im Anschluss daran wird eine Schwellenwertoperation, basierend auf dem Grenzwert histogramm, durchgeführt. Hierbei wird ein Binärbild generiert (Sökefeld & Gerhards 2004). Aus diesem Binärbild (Schwarz-Weiß-Bild) werden die Konturen aller sich auf dem Bild befindlichen Pflanzen extrahiert. Die Konturen der Pflanzen werden von Pixel zu Pixel im Uhrzeigersinn anhand Einheitsvektoren kodiert. Die Anzahl und Abfolge der einzelnen Kettenelemente hängen dabei von Position, Drehung und Größe der jeweiligen Pflanzen ab (Sökefeld & Gerhards 2004, Oebel 2006). Um konstante Parameter aus der Kettencodierung zu erhalten, wird diese als Winkelfunktion dargestellt, anschließend normiert und einer Fourierreihenentwicklung unterworfen. Am Ende aller durchgeführten Berechnungen stehen numerische Werte, die die charakteristische Kontur einer Pflanze beschreiben. Die gewonnenen Daten einer bestimmten Anzahl von Unkräutern und Kulturpflanzen werden in einer Datenbank abgelegt. Die Werte dieser Datenbank werden dann zum wissensbasierten Vergleich unbekannter Pflanzen herangezogen (Sökefeld & Gerhards 2004). Des Weiteren erhält man durch die Bildverarbeitung von jedem Bild Informationen über Anzahl, Art und Bedeckungsgrad aller klassifizierten Unkräuter (Sökefeld & Gerhards 2003). Die Erkennungsrate der Unkrautklassifizierung des Verfahrens liegt bei 70 %.

In Weis et al. (2008) und Weis (2010) wird detailliert beschrieben, wie Pflanzen mit dem entwickelten System aufgrund bestimmter Formparameter klassifiziert werden können. Die

Formparameter sind in regionsbasierte, konturbasierte und skelettbasierte Eigenschaften unterteilt (Weis & Gerhards 2007). Die Erkennungsrate der weiterentwickelten Methode lag zwischen 85 und 98 %.

*Gerhards & Christensen (2003)* sowie *Gerhards & Oebel (2006)* beschreiben unter anderem Feldversuche mit einer Mehrkammer-Pflanzenschutzspritze, die anhand erstellter Applikationskarten, basierend auf der beschriebenen Bildverarbeitung, teilflächenspezifisch Herbizide auf Versuchsflächen applizierte. Die entwickelte Methode ermöglicht eine Herbizideinsparung bei mono- und dikotylen Unkräutern von 90 % (*Gerhards & Christensen 2003*). Die Feldspritze besteht aus einem Mehrtanksystem, in dem mehrere Herbizidmischungen mitgeführt werden können. Durch die Steuerung erfolgt die gezielte Regulierung bestimmter Unkrautklassen (*Gerhards & Oebel 2006*). Durch den gezielten punktuellen Einsatz der Spritzmittel wird eine negative Beeinflussung der Kulturpflanzen vermindert. Dies zeigt sich in einer leichten Ertragssteigerung gegenüber ganzflächig behandelten Kulturen (*Oebel & Gerhards 2005*).

In der Literatur finden sich weitere Beispiele, bei denen digitale Bildverarbeitung eingesetzt wird, um die gezielte Anwendung von Pflanzenschutzmitteln zu ermöglichen (*Lee et al. 1999*). *Burgos-Artizua et al. (2011)* beschreiben eine Methode zur Erkennung von Kulturreihen und die Bestimmung von Unkrautplatten zwischen den Reihen. Dabei laufen zwei Bildverarbeitungsalgorithmen parallel ab. Mit der ersten, etwas langsamer ablaufenden Methode werden die Bereiche der Kulturreihen im aufgenommenen Bild segmentiert. Das daraus resultierende Bild dient einem zweiten Bearbeitungsalgorithmus als Referenzbild zum Erkennen von Unkrautplatten. Mit diesem System wurden 95 % der Unkrautplatten und 80 % der Kulturpflanzen korrekt erkannt.

*Prion et al. (2008)* untersuchte zur Erkennung von Karottenkeimlingen und Unkraut den Einsatz verschiedener Spektralfilterkombinationen. Den Ergebnissen nach erzielten diese Verfahren sehr gute Resultate bei der Lichtwellen-Filterkombination 450, 550 und 700 nm. Dabei lag die erfolgreiche Zuordnung einzelner Pixel zu den entsprechenden Kulturpflanzen durchschnittlich bei 72 %. Die Untersuchungen wurden unter Einsatz definierter Beleuchtung durchgeführt. Bei Einsatz unter Feldbedingungen kam es jedoch zu Fehlklassifizierungen bei Karotten im Keimblattstadium. Mit zunehmendem Wachstum verbesserte sich die Erkennungsrate.

Ebenfalls mit der Erkennung von Karottenkeimlingen hatten sich *Aitkenhead et al. (2003)* beschäftigt. Bei diesem Ansatz wurden Karottenpflanzen von Gänsefuß und Weidelgras selektiert. In Kombination des Einsatzes neuronaler Netzwerke kamen morphologische

Pflanzeigenschaften für die Unterscheidung der drei Spezies zum Einsatz. Die alleinige Anwendung eines Verfahrens ist laut *Aitkenhead et al.* (2003) für eine zuverlässige Erkennung einer Spezies nicht ausreichend. In Kombination der Verfahren werden bis zu 75 % der Pflanzen richtig erkannt.

*Hemming & Rath* (2001) setzten bei ihren Untersuchungen zur Unterscheidung von Gemüsepflanzen (Kraut und Karotten) und Unkräutern acht verschiedene morphologische Pflanzeigenschaften sowie drei Farbeigenschaften ein. Dabei wurden Bilder eines Versuchsfeldes unter definierten Lichtverhältnissen aufgenommen und anschließend analysiert. Morphologische Eigenschaften wie beispielsweise die Kontur der Blätter und ihre Fläche sowie die drei Farbeigenschaften Farbton, Helligkeit und Kontrast konnten am häufigsten zur Erkennung der Pflanzen und Unkräuter eingesetzt werden. Die Erfolgsquote der Bildverarbeitung lag zwischen 51 und 95 %. Das Ziel der Forschung von *Hemming & Rath* (2001) war es, ein Identifizierungs- und Lokalisierungssystem für Unkräuter zu entwickeln. Unter anderem setzten *Hemming & Rath* (2001) hierfür statistisch basierte Algorithmen wie beispielsweise Fuzzy-Logik ein.

Eine weitere Methode zur Unterscheidung von Kulturpflanzen und Unkraut findet sich bei *Jones et al.* (2009). Dabei handelt es sich um die Erkennung von Unkraut und Kulturpflanzen in simulierten Bildern. Die Simulation ermöglicht es, Bilder mit verschiedenen Unkrautdichten und unterschiedlicher Positionierung der Unkräuter innerhalb des Bildes zu erstellen. Die Unkräuter werden nach verschiedenen statistischen Methoden zufällig innerhalb eines zweidimensionalen Bildes verteilt. Die simulierten Bilder entsprachen Aufnahmen tatsächlicher Pflanzenbestände. Mit einer virtuellen Kamera wurden Aufnahmen der Simulation erzeugt. Diese Aufnahmen wurden dann mit zwei Methoden, einer Standard- und einer optimierten Methode, auf Unkräuter und Kulturreihen hin untersucht. Bis zu 98 % der simulierten Pflanzen konnten anhand dieser Methoden erkannt werden.

Ebenfalls mit der Erstellung von Bildsimulationen zur Erkennung von Pflanzen befasste sich *Bossu et al.* (2009). Hierbei wurden mono- und dikotyle Unkräuter nach einem Poission-Neymann-Scott-Prozess zufällig in einem virtuell simulierten Bild verteilt. Der Unkrautbesatz wurde in 5-%-Schritten von 0 bis 80 % simuliert. Im Anschluss an die Simulation wurden verschiedene Wellenlängentransformationen durchgeführt und hinsichtlich der benötigten Prozesszeit sowie der Pflanzenerkennung untersucht.

Des Weiteren wurden mehrere Untersuchungen zur Erkennung von Kulturreihen in digitalen Bildern durchgeführt. *Åstrand & Baerveldt* (2005), *Bakker et al.* (2008), *Guerro et al.* (2013), *Hague & Tillett* (2001) sowie *Tillett et al.* (2002) befassen sich mit der Erkennung und

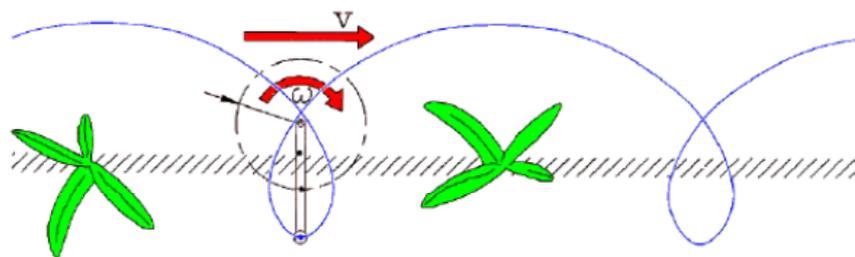
Segmentierung von Kulturreihen. Eine häufig eingesetzte Methode hierbei ist die Hough-Transformation. Durch den Einsatz der Hough-Transformation können Linien oder Umrisse in digitalen Bildern segmentiert werden (Bräunl et al. 1995).

#### 4.3 Hackmaschinen für selektives Arbeiten innerhalb der Kulturreihe

Nach der theoretischen Verfahrensbeschreibung von Bildverarbeitungsalgorithmen erfolgt nun im anschließenden Kapitel eine Übersicht über selektiv arbeitende Regulierungstechnik. Es werden unterschiedliche Werkzeugformen und deren Ansteuerung vorgestellt. Insgesamt erfolgt die Vorstellung von zehn, selektiv in der Kulturreihe arbeitenden Hackmaschinen. Die Steuerung der Maschinen innerhalb der Reihe basiert auf optischen, sensorgesteuerten und GPS-gesteuerten Regelalgorithmen. Dieser Abschnitt dient darüber hinaus dem späteren Vergleich der Hohenheimer Entwicklung mit bestehenden Maschinen.

##### 4.3.1 Zykloidenhacke

Das von der Bundesstiftung Umwelt geförderte Gemeinschaftsprojekt der FH Osnabrück und der Firma Amazonen Werke, Hasbergen-Gaste, beinhaltet die Entwicklung einer mechanischen Hackmaschine für den Einsatz innerhalb der Kulturreihe zunächst bei der Kultur Mais (Wißerodt et al. 2003).



**Bild 18:** Schematische Darstellung der Werkzeugbahn (geändert nach Dedouis 2007)

Das Projekt wurde sowohl von Mitarbeitern der Amazonen Werke als auch von Angehörigen der FH Osnabrück betreut. Bei dem Werkzeug der Hackmaschine handelt es sich um eine Art vertikal arbeitenden Zinkenrotor, bestehend aus einem vertikal rotierenden, scheibenförmigen Werkzeugträger und acht gesteuerten Zinken. Jeder der acht Zinken ist durch eine Kupplung mit dem Werkzeugträger verbunden. Die Bewegungsform der Werkzeuge durch den Boden beschreibt durch die Rotation des Werkzeugträgers um die eigene Achse und die zusätzliche translatorische Bewegung durch die Vorwärtsfahrt eine zyklische Laufbahn über die Kulturreihe hinweg (siehe Bild 18). Durch das Ansteuern der Kupplung kann die Laufbahn

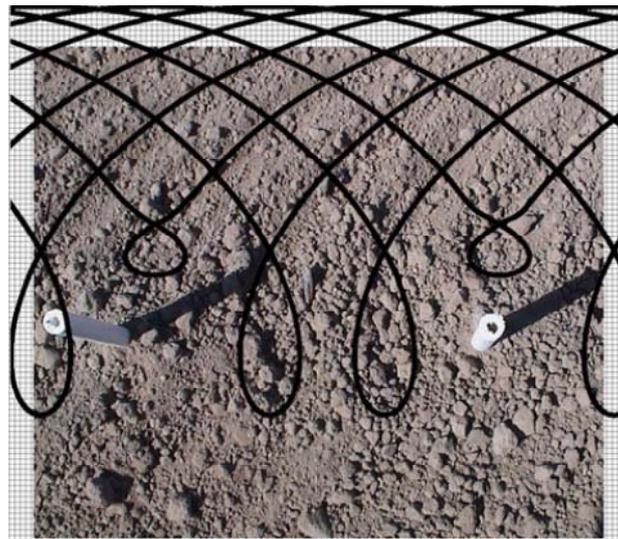
jedes einzelnen Werkzeugs verändert werden (Wißerodt et al. 2003). Sobald die Kupplung betätigt wird, klappt das Zinkenwerkzeug ein und verlässt somit seine eigentliche Laufbahn. Dadurch wird eine Kollision mit der Kulturpflanze verhindert. Die Steuerung der Zinkenkupplung geschieht anhand eines Multisensorsystems, welches die Unterscheidung zwischen Unkraut und Kulturpflanze trifft. Eine Steuereinheit berechnet anhand der Rotorumdrehung, der Vorfahrtgeschwindigkeit und des Signals des Multisensorsystems die Kollisionswahrscheinlichkeit der einzelnen Zinken. Ist ein Zinken auf Kollisionsbahn zu einer Kulturpflanze, wird die Kupplung betätigt und der Zinken verlässt die Kulturreihe. Der Regulierungseffekt beruht, wie bei den meisten mechanischen Unkrautregulierungsverfahren, auf dem Entwurzeln der Unkräuter sowie dem Verschütten der Unkräuter und Abtrennen der Wurzel von der Unkrautpflanze. Der Werkzeugrotor wird, wie in Bild 19 dargestellt, mittels eines Hydraulikmotors angetrieben (Norremark et al. 2012).



**Bild 19:** Zyklidenhacke: 1: Hydraulikmotor; 2: Zinkenrotor; 3: Parallelogramm; 4: GPS-Antenne (geändert nach Gobor 2007)

Für diese Hackmaschine wurde im Anschluss an das Osnabrücker Projekt eine Seitensteuerung, basierend auf Seed mapping und DGPS, an der Universität Kopenhagen (Dänemark) weiterentwickelt (Griepentrog et al. 2006). Dies bedeutet, dass bei der Aussaat der Kultur die genaue Position über ein DGPS-System erfasst wird und eine Karte mit den genauen Koordinaten des Saatguts angefertigt wird. Diese Karte dient dann später bei der Unkrautregulierung als Grundlage für die Steuerung der Hackmaschine.

Die Basis für die seitliche, exakte Steuerung bildet ein Werkzeugträgerrahmen, der als Parallelogramm ausgeführt ist. Dabei ist ein Teil des Rahmens fest mit der Dreipunkt-Heckhydraulik eines Traktors verbunden. Dieser Teil der Rahmenkonstruktion wird über ein Scheibensech stabilisiert in der Spur des Traktors gehalten. Das Scheibensech dient zur Stabilisierung des ersten Rahmens, vor der Querbewegung des zweiten Rahmenteils. Der zweite Teil des Rahmens kann parallel zum ersten Rahmenteil anhand eines Hydraulikzylinders verschoben werden und somit exakt der Kulturreihe folgen (Griepentrog et al. 2006). Der Verstellbereich des Parallelogramms beträgt nach rechts und links je 10 cm von der Mittelposition aus (Norremark et al. 2008). Das Multisensorsystem wurde somit durch den Seed-mapping-Ansatz ersetzt. Feldversuche mit diesem System in Dänemark haben gezeigt, dass durch den Einsatz der Zykloidenhacke in Kombination mit mechanischer Unkrautregulierung zwischen den Kulturreihen bis zu 95,2 % des Feldes mechanisch bearbeitet werden konnten (Griepentrog et al. 2006). Lediglich der Bereich unmittelbar um die Pflanze (close to crop area) herum, ist mit der Hackmaschine nicht zu bearbeiten (siehe Bild 20).



**Bild 20:** Schematische Darstellung der Arbeitsweise (geändert nach Norremark et al. 2012)

Bei weiteren Feldversuchen wurde die bearbeitete Fläche in Abhängigkeit von der Fahrtgeschwindigkeit und Überfahrhäufigkeit untersucht. Hierbei variiert die bearbeitete Fläche innerhalb der Kulturreihe zwischen 30 und 49 % bei einmaliger Überfahrt und zwischen 31 und 58 % bei zweimaliger Überfahrt. Die Größe der unbearbeiteten Fläche variiert durchschnittlich zwischen 64 und 80 cm<sup>2</sup> (Norremark et al. 2012).

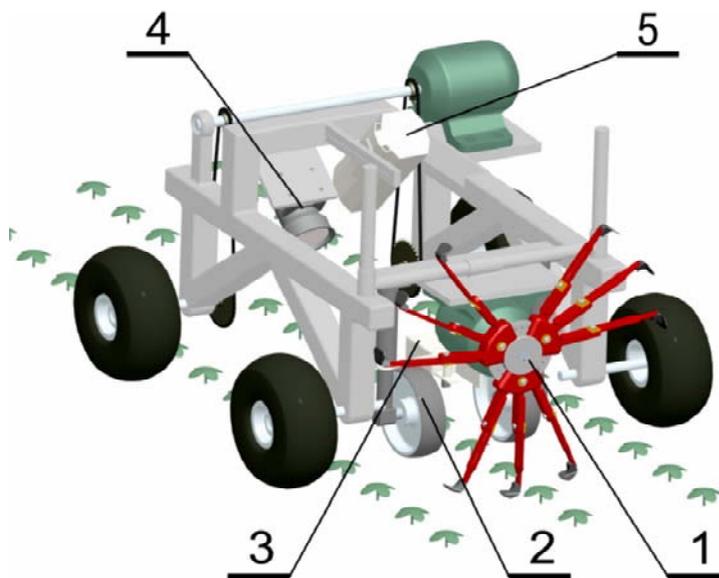
Zusätzlich zu den Feldversuchen wurden Simulationen mit MatLab Simulink durchgeführt. Die Ergebnisse der Simulationen spiegeln im Großen und Ganzen die Ergebnisse der

Feldversuche wider. Zum Teil gibt es allerdings Abweichungen von bis zu 17 %. Die unkrautregulierende Wirkung der rotierenden Zinken wurde von *Norremark et al.* (2012) als nicht ausreichend beschrieben.

#### **4.3.2 Rotationshacke der Universität Bonn**

An der Universität Bonn wurde ebenfalls eine Maschine für das Bearbeiten des Kulturreihenbereichs entwickelt (Gobor 2007). Dieser Prototyp wurde mit dem CAD-Programm Pro/Engineer der Firma PTC entwickelt und konstruiert. Mithilfe des Programms wurde ein dreidimensionales Modell der Rotorhackmaschine erstellt. Gefördert wurde das Projekt von der DFG im Rahmen des Graduiertenkollegs (Gobor & Schulze Lammers 2006).

Die Rotorhackmaschine besteht aus einem vertikal rotierenden Hackwerkzeugträger, der mit einem Trägerfahrzeug verbunden ist (siehe Bild 21). Der Werkzeugträger kann mit einer unterschiedlichen Anzahl an Werkzeugen bestückt werden. Die Arbeitstiefe ist durch eine Tiefenführung individuell einstellbar. Als Hackwerkzeug werden Gänsefußschare verwendet. Der Anstellwinkel der Werkzeuge kann variiert werden. Ebenfalls variabel ist die Länge der Hackwerkzeugarme. Je nach Umfangsgeschwindigkeit des Rotors kann die Bearbeitungsintensität des Pflanzenzwischenraums innerhalb der Kulturreihe angepasst werden (Gobor & Schulze Lammers 2006). Außerdem erfolgt die Anpassung der Rotorumfangsgeschwindigkeit in Abhängigkeit von der Vorfahrtsgeschwindigkeit, der Lage der Werkzeuge auf dem Rotor sowie dem Pflanzenabstand innerhalb der Reihe (Gobor & Schulze Lammers 2006).



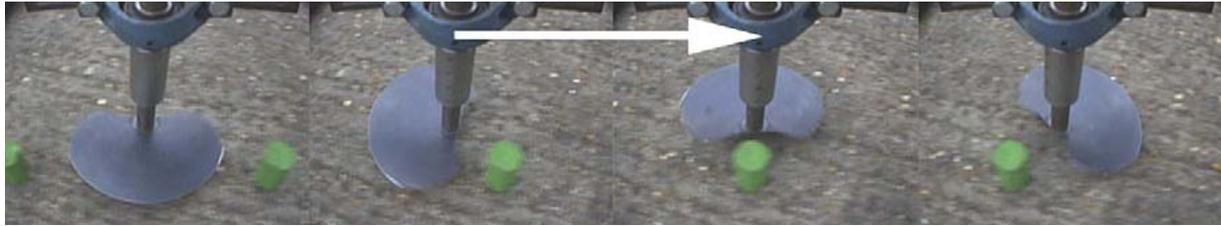
**Bild 21:** Rotationshacke: 1: Hackwerkzeug; 2: Tiefenführung; 3: Pflanzenerkennung;  
4: Geschwindigkeitsmessung; 5: Spurführung (geändert nach Gobor 2007)

Das System verfügt über genügend Freiheitsgrade zur optimalen Anpassung der Hackmaschine an die unterschiedlichen Bedingungen beim Feldeinsatz.

Die Positionsbestimmung der Pflanzen innerhalb der Kulturreihe geschieht anhand eines faseroptischen Sensors zur Erkennung von grünfarbigen Objekten. Zusätzlich kommt ein Lasersensor zur Positionsbestimmung zum Einsatz (Gobor 2007). Zudem wird zur Erfassung der zurückgelegten Wegstrecke ein Seilmesssystem eingesetzt. Dieses kann durch einen Inkrementalgeber zur Erfassung der Wegstrecke ersetzt werden (Gobor 2007).

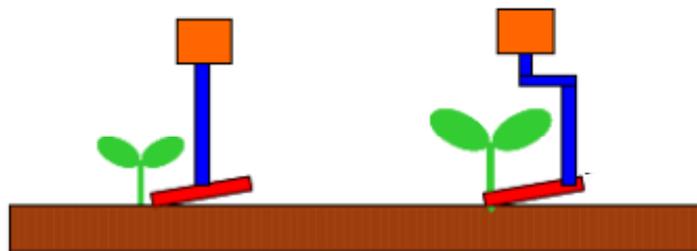
### 4.3.3 Robocrop von Garford

Die von der Firma Garford Ltd., Großbritannien, unter dem Namen „Robocrop“ vertriebene Reihenhackmaschine wurde von mehreren Institutionen parallel entwickelt. Unter anderem waren an der Werkzeugentwicklung und an der Regelung der Hackmaschine durch Bildverarbeitung die Cranfield University sowie die Tillet & Hague Technologie LTD, Greenfield, Großbritannien, beteiligt. Zum Einsatz kommt diese Hackmaschine bei allen gepflanzten Kulturen wie beispielsweise Kohl oder Kopfsalat. Die Funktionsweise der Maschine basiert im Wesentlichen auf einer im Boden rotierenden Scheibe. Diese Scheibe arbeitet horizontal innerhalb beziehungsweise neben der Kulturreihe (siehe Bild 22) und weist eine Aussparung für den Bereich der Kulturpflanze auf (Tillett et al. 2008).



**Bild 22:** Arbeitsweise der Reihenhackmaschine Robocrop (geändert nach Tillett et al. 2008)

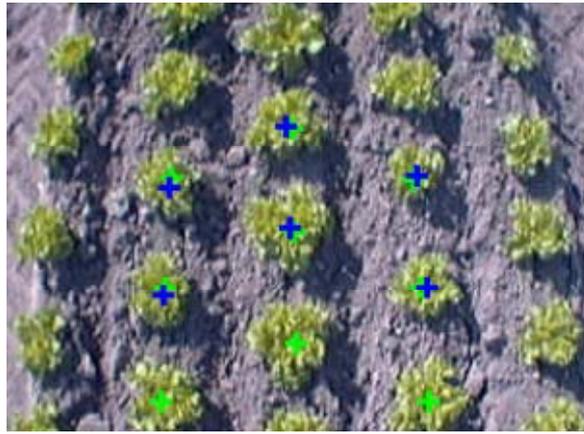
Ein Werkzeugträger, an dessen unterem Ende die Hackscheibe angebracht ist, wird von einem Hydraulikmotor angetrieben. Je nach Kulturpflanzengröße ist dieser Träger in einer geraden oder gekröpften Form ausgeführt (Dedousis 2007; Tillett et al. 2008). Durch die Trägersausführung werden Beschädigungen der Kulturpflanze verhindert (siehe Bild 23).



**Bild 23:** Verschiedene Ausführungen des Werkzeugträgers (geändert nach Dedousis 2007)

Die Scheibe arbeitet mit einer Arbeitstiefe von ca. 20 mm. Die Arbeitstiefe wird parallelogrammgeführt über ein Tastrad eingestellt. Die Rotationsgeschwindigkeit der Scheibe verläuft synchron zur Vorfahrtsgeschwindigkeit des Traktors, in dessen Fronthydraulik die Hackmaschine angebaut wird. Während einer Umdrehung der Scheibe muss sich der Bereich der Aussparung mit dem Standort der Kulturpflanze decken. Die Größe der Aussparung und somit die Größe der unbearbeiteten Fläche hängt von der Regelgeschwindigkeit des Systems als Ganzes und dem Entwicklungsstadium der Kulturpflanze ab. Die Form des Hackwerkzeuges beschreibt einen Kompromiss zwischen größtmöglicher bearbeiteter Fläche und gleichzeitig einem ausreichenden Abstand der Scheibe zur Kulturpflanze, um eine Beschädigung dieser zu vermeiden. Bei variierendem Pflanzabstand innerhalb der Reihe wird das Werkzeug diesbezüglich von der Regelung verzögert oder dementsprechend beschleunigt, um rechtzeitig mit der Aussparung an der richtigen Stelle im Nahbereich der Kulturpflanze zu sein. Die Form sowie die Größe der Aussparung werden zusätzlich mit einem durch die Regelung bestimmten Sicherheitszuschlag versehen. Dieser trägt der Tatsache Rechnung, dass ein gewisser Regelfehler sowie eine Abweichung von Ist- und Sollposition der Kulturpflanze auftreten können. Laut *Tillett et. al.* (2008) findet in Kombination mit Hacktechnik für den Bereich zwischen den Reihen eine





**Bild 25:** Erkennung von Pflanzenpositionen (geändert nach Dedouis 2007)

Zusätzlich kommt ein zweites Erkennungssystem zum Einsatz, das mithilfe eines Kalman-Filters arbeitet. Bei Abweichungen von erkannter Pflanzenposition und Lage des Hackwerkzeugs wird durch ein Magnetventil der Fluss des Hydrauliköls so geregelt, dass durch eine Verzögerung beziehungsweise eine Beschleunigung des Hackarms eine Übereinstimmung von Aussparung der Hackscheibe und Kulturpflanzenbereich stattfindet.

#### 4.3.4 Robovator Firma F. Poulsen Engineering Aps

Die Reihenhackmaschine „Robovator“ der Firma F. Poulsen Engineering Aps, Hvalso, Dänemark, wurde auf der Agritechnica 2009 in Hannover zum ersten Mal der Öffentlichkeit präsentiert (Masur 2010; Haug 2012). Der „Robovator“ ist ebenfalls eine optisch gesteuerte, selektiv in der Kulturreihe arbeitende Hackmaschine. Ähnlich wie beim Robocrop von Garford ist der Einsatzbereich auf gepflanzte Reihenkulturen begrenzt. Die funktionale Einheit des Robovators besteht aus zwei Flachscharen, die in der Pflanzenreihe arbeiten. Die beiden Flachscharen weisen eine Arbeitsbreite von 16 cm auf. Die Scharen sind am unteren Ende zweier Träger befestigt und können hydraulisch geöffnet und geschlossen werden. In geöffnetem Zustand kann die Kulturpflanze unbeschädigt passieren. Der Abstand zwischen beiden Scharspitzen beträgt ca. 10 cm. Die Funktionsweise des Hackwerkzeugs ähnelt der des ersten Prototyps von Fischer (2012). Die Hackwerkzeuge werden über Parallelogramme mit einer Rahmenkonstruktion an die Dreipunkt-Heckhydraulik eines Traktors angebaut. Durch die Rahmenkonstruktion werden die Parallelogramme seitlich entlang der Reihen geführt. Des Weiteren sind Scheibenseche montiert, mit denen die gesamte Hackmaschine um bis zu 30 cm, in Bezug zum Mittelpunkt des Traktorhecks, nach rechts und links verschiebbar ist. An die Parallelogramme, an denen die Flachscharen für den Reihbereich montiert sind, können ebenfalls normale Gänsefußscharen oder Winkelmesser für den Zwischenreihenbereich

montiert werden. Die Tiefenführung der Flachscharre erfolgt über ein verstellbares Stützrad. Die Flachscharre innerhalb der Reihe können separat in ihrer Arbeitstiefe variiert werden. Für die Positionsbestimmung der Kulturpflanzen und die Reihenführung wird, wie bereits angesprochen, ein optisches System verwendet. Pro Reihe befindet sich hierfür eine Bispetralkamera. Die Differenzierung zwischen Unkraut und Kulturpflanze geschieht aufgrund des Größenunterschieds des erkannten Pflanzenmaterials. Hierfür muss zuvor die Größe der Kulturpflanze im Bedienterminal eingegeben werden. Die Positionserkennung ist prozessorgesteuert. Für die Pflanzenerkennung und zur Ansteuerung der Flachscharre können zwei Modi gewählt werden:

1. Center Mode (Bestimmung des Pflanzenzentrums)
2. Edge Mode ( Bestimmung des Pflanzenumrisses)

Beim „Center Mode“ kann unter dem Menüpunkt „Maximum Protect“ der einzuhaltende Sicherheitsabstand zum Pflanzenmittelpunkt eingestellt werden. Beim Erreichen des eingestellten Werts öffnen die Flachscharre. Für die Bestimmung des Öffnungs- und Schließzeitpunkts der Flachscharre läuft ein Messrad mit, welches die Fahrgeschwindigkeit und den zurückgelegten Abstand misst.

Beim Edge-Modus orientiert sich die Pflanzenerkennung am Umriss der Pflanzen. Über den Untermenüpunkt „Save Zone“ kann auch hier ausgewählt werden, wie weit die Flachscharre vor dem erkannten Umriss einer Kulturpflanze öffnen und schließen. Für die Parallelführung entlang der Kulturreihen werden die Bilder aller eingesetzten Kameras verwendet.

Des Weiteren müssen vor dem Arbeiten mit der Hackmaschine weitere Parameter hinterlegt werden:

- Pflanzabstand innerhalb der Kulturreihe
- Kamerahöhe (Abstand Linse-Boden)
- Helligkeitsparameter (Wert zum Anpassen an die Lichtverhältnisse)
- Pflanzengröße (alle Pflanzen unterhalb des eingestellten Werts werden nicht berücksichtigt)

Bei Feldversuchen in der Schweiz (Haug 2012) konnten mit dem Robovator bis zu 95 % der Unkräuter innerhalb der Reihe reguliert werden. Dabei war die Beschädigung der Salatpflanzen gering. Die optimale Arbeitsgeschwindigkeit lag bei 2,5 km/h. Bei höheren Geschwindigkeiten wurden die Pflanzen zu sehr mit Erde bedeckt. Außerdem gelangte mit abnehmendem Sicherheitsabstand ebenfalls mehr Boden auf die Salatpflanzen. *Masur* (2010)

ermittelte ähnliche Ergebnisse. Bei den von *Masur* (2010) durchgeführten Feldversuchen lag der Pflanzenverlust unter einem Prozent.

#### **4.3.5 GPS-gesteuertes Scharhacksystem für den Kulturreihenbereich bei Tomaten**

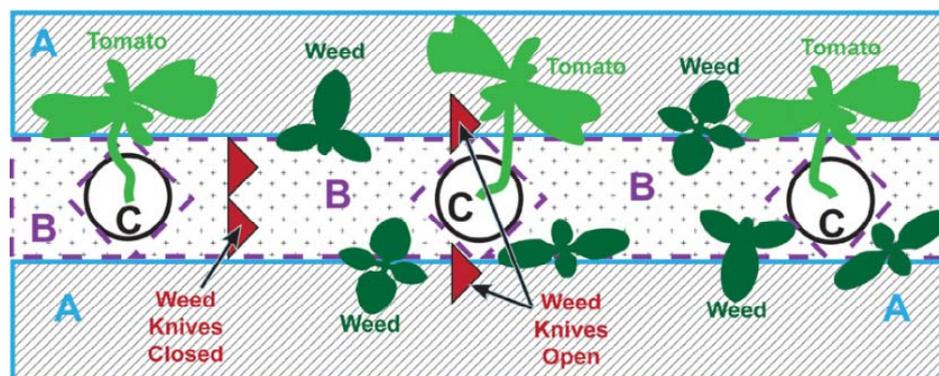
In dem von *Pérez-Ruiz et al.* (2012) beschriebenen Projekt wird die Entwicklung einer selektiv arbeitenden Scharhackmaschine für den Einsatz bei kalifornischen Tomaten dargestellt. Ziel des Projekts war es, Untersuchungen zur Leistung eines Reihenscharhacksystems, basierend auf einem DGPS-Positionierungssystem in Verbindung mit einem Fahrtgeschwindigkeitsdetektor sowie einer im Voraus per DGPS generierten Pflanzkarte mit der Position sämtlicher Tomatensetzlinge, durchzuführen. Dabei lag der wesentliche Schwerpunkt in der Entwicklung eines Hackwerkzeugs, welches geeignet ist, um mit einer GPS-basiert erstellten Pflanzenkartierung gesteuert zu werden. Des Weiteren sollte ein Echtzeitsystem zur präzisen Hackwerkzeugsteuerung innerhalb der Kulturreihe sowie dessen Leistung unter den Anbaubedingungen des kalifornischen Tomatenanbaus unter Feldbedingungen entwickelt und getestet werden.



**Bild 26:** GPS-gesteuerte Scharhacke (*Pérez-Ruiz et al.* 2012)

Das konstruierte Werkzeug besteht im Wesentlichen aus zwei, ca. 7 cm breiten Gänsefußscharen, welche über DGPS gesteuert innerhalb und außerhalb der Pflanzenreihe arbeiten (siehe Bild 26). Sobald eine Pflanzenposition der eingelesenen Pflanzenkartierung von dem DGPS-Steuersystem der Hackschare ermittelt wird, werden die Gänsefußschare per Luftdruckzylinder außerhalb des Reihenbereichs befördert. Das Schließen des Hacksystems

geschieht anhand einer vorher eingestellten Sicherheitszone. Vom Zeitpunkt des Öffnens der Hackschare wird via Inkrementalgeber, welcher mit einem nicht angetriebenen Rad betrieben wird und eine Auflösung von 0,6 mm aufweist, die vorher eingestellte Länge der Schutzzone ermittelt. Ist die Schutzzone verlassen, schließt das Hackwerkzeug über die Pneumatikzylinder und beide Schare laufen wieder innerhalb der Kulturreihe. Die Funktionsweise des Hacksystems ist in Bild 27 beschrieben. Hierbei steht der Buchstabe B für den Bereich innerhalb der Kulturreihe, C für die Sicherheitszone im Pflanzennahbereich und A für den Zwischenreihenbereich.



**Bild 27:** Arbeitsweise des Systems (geändert nach Pérez-Ruiz et al. 2012)

Zur Überprüfung wurden mit der Hackmaschine Feldversuche durchgeführt. Für das georeferenzierte Anpflanzen der Tomatenpflanzen und zur Erstellung der DGPS-Koordinatenkarte aller Pflanzen wurde das von Sun et al. (2010) beschriebene Pflanzgerät benutzt. Die Versuchsdurchführung fand mit den Fahrgeschwindigkeiten 0,8 und 1,6 km/h sowie den eingestellten Durchmessern der Sicherheitszone von 15,24 und 7,62 cm statt. Bei den Versuchen wurde keine der Tomatenpflanzen beschädigt.

#### 4.3.6 Hackblitz Firma Radis Mecanisation

Die Hackmaschine „Hackblitz“ der Firma Radis Mecanisation, Frankreich, wird in Deutschland von der Firma Trinkl vertrieben. Es handelt sich hierbei um ein sensorgesteuertes System. Beidseitig der Kulturreihe arbeitende Hackschare werden bei dieser Maschine mittels Pneumatikzylinder in und aus der Kulturreihe geschwenkt (Haug 2012). Lichtschranken steuern die Betätigung der Hackarme (Bier 2010). Eine Erkennung von Einzelpflanzen erfolgt dabei nicht. Ebenfalls wird keine Unterscheidung zwischen Unkraut und Kulturpflanze getroffen. Sobald eine Pflanze die Lichtschranke unterbricht, werden die Scharträger aus der Reihe geschwenkt. Die Pneumatikzylinder werden mithilfe eines auf dem Rahmen der

Maschine angebrachten Kompressors und dem dazugehörenden Druckkessel mit Druckluft versorgt (siehe Bild 28).



**Bild 28:** Reihenhackmaschine Hackblitz bei einer Vorführung der Beet Europe 2010

#### **4.3.7 Reihenhackmaschine für Mais**

*Cordil & Grift* (2001) haben in den USA eine sensorgesteuerte, selektiv in der Maisreihe arbeitende Hackmaschine entwickelt. Die Steuerung der Aktuatoren erfolgt anhand mehrerer Algorithmen. Es findet dabei keine spezifische Erkennung von Pflanzen statt, sondern lediglich eine Erkennung von Maisstängeln und Unkräutern. Das Ziel dieser Entwicklung ist es, Unkraut mechanisch innerhalb der Maisreihe zu entfernen, ohne dabei die Maispflanze nachhaltig zu beschädigen. Zur Erkennung der Maisstängel werden vier Laserlichtschranken in unterschiedlichen Abständen zum Boden eingesetzt. Durch eine UND-Funktion wird dabei unterschieden, ob es sich bei der Laser-Unterbrechung um ein Blatt, ein Unkraut oder einen Maisstängel handelt. Wenn alle vier Laserstrahlen gleichzeitig unterbrochen werden, handelt es sich höchstwahrscheinlich um einen Maisstängel. Zusätzlich dazu wird durch einen Inkrementalgeber, welcher eine Auflösung von 0,2 mm aufweist, detektiert, wie lange eine Lichtunterbrechung dauert. Untersuchungen zur Ermittlung der durchschnittlichen Lichtunterbrechung bei Maisstängeln ergaben einen Stängeldurchmesser von 20 mm beziehungsweise 100 Inkrementalgeberimpulsen. Dies wird in einem weiteren Algorithmus (Breiten-Funktion) berücksichtigt. Des Weiteren fließt in den Erkennungsalgorithmus ebenfalls der landesübliche Pflanzenabstand innerhalb der Reihe von 150 mm mit ein (Abstandsfunktion). Durch die Kombination der genannten Algorithmen soll eine Positionsbestimmung der Maisstängel ermöglicht werden. Die Komponenten der Lichtschranke sind in einem Abstand von 610 mm beidseitig der Maisreihe montiert.

Die Auswertung der Lichtschrankenunterbrechung erfolgt mittels eines Computers. Dieser generiert anhand der Lichtschrankenimpulse ein Signal, das wiederum die Drehzahl zweier Gleichstrommotoren steuert. Über die Motoren wird beidseitig der Kulturreihe jeweils ein Hebelmechanismus betätigt, welcher zwei Zinken rechtwinklig zur Aussaatrichtung in die Reihe einführt. Die komplette Apparatur befindet sich innerhalb einer Rahmenkonstruktion, die an die Heckhydraulik eines Traktors angebaut wird.

Mit dem entwickelten Erkennungssystem wurden Feldversuche zur Ermittlung der Genauigkeit durchgeführt. Bei der Variante Solo Mais wurden 8 % der Pflanzen schwer und 18 % leicht beschädigt. In der Variante Mais in Kombination mit breitblättrigen Unkräutern, hierfür wurden zwischen die Maispflanzen gezielt Sojabohnen ausgesät, wurden 23 % der Maispflanzen schwer und 20 % leicht beschädigt. Bei der Variante Mais mit grasartigen Unkräutern erfolgte ebenfalls bei 23 % der Maisstängel eine schwere und bei 25 % eine leichte Beschädigung.

#### **4.3.8 Selektiv arbeitendes Reihenhacksystem von Home**

Im Rahmen einer Dissertation entwickelte *Home* (2003) ein weiteres selektiv arbeitendes Reihenhacksystem. Die Funktionsweise beruht dabei auf zwei ein- beziehungsweise ausfahrbaren Messerscharen für den Reihenbereich in Kombination mit einem mittig im Zwischenreihenbereich laufenden Gänsefußschar (Dedousis & Bartzanas 2010). Dieses Hackwerkzeug ist in Bild 29 unten dargestellt.



**Bild 29:** Scharhacksystem (geändert nach Home 2003)

Die Maschine kann aufgrund ihrer Funktionsweise Unkräuter zwischen und innerhalb der Kulturreihen mit einem Arbeitsgang regulieren. Die ausfahrbaren Scharmesser stellen im Prinzip eine variable Verbreiterung des mittig laufenden Gänsefußschars dar (Dedousis & Bartzanas 2010). Die Positionsbestimmung der Pflanzen geschieht computergestützt über Bildverarbeitung. Sobald die Position einer Kulturpflanze erkannt wird, fahren die ausgestellten Scharmesser zusammen. Diese Bewegung wird von einer ellipsenförmigen Scheibe mit eingefräster Nut gesteuert. Die Schare sind drehbar gelagert und folgen mit einer in der Nut laufenden Nocke der Kurvenbahn der Steuerscheibe. Je nach deren Stellung sind sie ein- oder ausgefahren. Die Steuerscheibe wird von einem Hydraulikmotor angetrieben. Die Lage der Steuerscheibe wird mit einem Encoder erfasst und an die Steuereinheit der Bildverarbeitung übermittelt. In Kombination mit der Bildverarbeitung und der aktuellen Stellung der Steuerscheibe wird die Motorgeschwindigkeit mittels eines Magnetventils durch Variieren der Öldurchflussmenge geregelt (Dedousis & Bartzanas 2010).

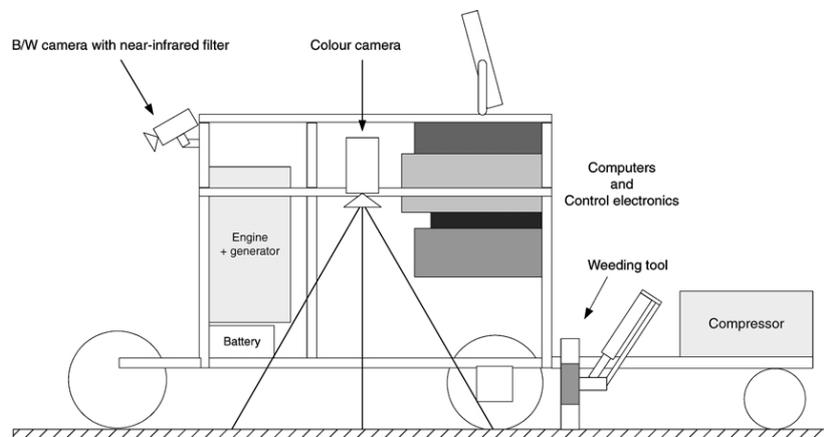
Home untersuchte die bearbeitete Fläche innerhalb der Reihe bei steigender Fahrgeschwindigkeit und unterschiedlichen Pflanzenabständen. Bei einem Pflanzenabstand von 300 mm und einer Fahrgeschwindigkeit von bis zu 4 km/h klappten die Messerschare zuverlässig vor dem Berühren der Kulturpflanzen aus der Reihe. Bei Pflanzenabständen von 250 mm wurden noch 70 % des Reihensbereichs bearbeitet.

Zudem führte die Steigerung der Fahrgeschwindigkeit auf 8 km/h zu einer Reduzierung der bearbeiteten Fläche innerhalb der Reihe auf 17 %. Damit verschlechterte sich mit zunehmender Fahrgeschwindigkeit die Arbeitsqualität maßgeblich (Dedousis & Bartzanas 2010). Durch die variable Scharhacke wurden je nach Fahrgeschwindigkeit und Pflanzenabstand zwischen 88 und 93 % der Gesamtfläche bearbeitet (Home 2003).

#### **4.3.9 Hackroboter für mechanische Unkrautregulierung bei Zuckerrüben**

An der Halmstad University, Schweden, wurde von Åstrand & Baervaeldt (2002) ein optisch gesteuerter Hackroboter für die Unkrautregulierung innerhalb von Zuckerrübenreihen entwickelt. Der Roboter besitzt zwei optische Systeme (siehe Bild 30) zur Kulturreihenerkennung und zur Bestimmung der Pflanzenposition innerhalb der Reihe. Für die Navigation des Roboters entlang der Reihe wird eine Nahinfrarotkamera eingesetzt. Diese ist an der Front des 70 cm breiten und 1,20 m langen Selbstfahrers angebracht (Åstrand & Baervaeldt 2002). Das Sehfeld der Kamera deckt zwei Kulturreihen in einer Länge von etwa 5 m vor dem Fahrzeug ab. Für den mobilen Einsatz auf dem Feld besitzt die Maschine einen an einen Verbrennungsmotor gekoppelten Generator. Gelenkt wird der Roboter von einer

Ackermann-Lenkung. Das Hackwerkzeug besteht aus einem über der Reihe positionierten Rotor, welcher mithilfe eines pneumatisch betriebenen Zylinders angehoben beziehungsweise abgesenkt werden kann.



**Bild 30:** Darstellung Hackroboter (geändert nach Åstrand & Baerveldt (2002))

Aus den Graustufenbildern der Nahinfrarotkamera werden durch mehrere Algorithmen Schwarz-Weiß-Bilder erstellt (Åstrand & Baerveldt 2005). Mit diesen Bildern wird für die Reihenfindung eine Hough-Transformation durchgeführt. Für das zweite optische System zur Positionsbestimmung der Zuckerrüben innerhalb der Reihe wird eine Farbkamera eingesetzt. Das Sehfeld der senkrecht nach unten gerichteten Kamera ist 45 x 85 cm groß. Bei einem Säabstand von 17 cm sind theoretisch bis zu vier Zuckerrüben auf dem Bildausschnitt vorhanden. Die Unterscheidung zwischen Unkraut und Kulturpflanze geschieht anhand verschiedener Farb-, Form- und Positionseigenschaften (Åstrand & Baerveldt 2002).

Wird anhand des Pflanzenklassifizierungsalgorithmus ein Objekt in einem Bild als Zuckerrübe klassifiziert, so findet eine Berechnung der Lage zum Werkzeug statt. Erreicht eine Zuckerrübe den Bereich des Hackwerkzeugs, wird dieses angehoben und nach Passieren der Rübenpflanze wieder abgesenkt. Bei Labor und Feldversuchen konnten mit diesem Erkennungsalgorithmus bis zu 96 % der Zuckerrüben erkannt und als solche klassifiziert werden.

#### 4.3.10 Roboter für den Einsatz mechanischer Unkrautregulierung

*Blasco et al.* (2002) beschreiben ebenfalls einen Roboter, der mittels einer Elektrode zur einreihigen Unkrautregulierung bei Kopfsalat eingesetzt wurde. Basierend auf den Untersuchungen eines französisch-spanischen Gemeinschaftsprojektes wurde dieses Unkrautregulierungssystem entwickelt. Die zentrale Einheit bildet ein in sechs Achsen

bewegbarer Roboterarm, welcher auf einer kleinen, mobilen Plattform montiert ist. Angetrieben wird der Arm von sechs Elektromotoren, die dem Roboterarm einen großen Bewegungsgrad ermöglichen. Am unteren Ende des Arms ist eine Elektrode angebracht, die durch die Abgabe einer elektrischen Ladung von 15000 V mit 30 mA über 200 ms die unkrautregulierende Wirkung erzeugt. Die Steuerung des Vehikels übernehmen elf mittels CAN-Bus kommunizierende Prozessoren. Für die Pflanzenerkennung und die Positionsbestimmung werden zwei Bildverarbeitungssysteme eingesetzt (Blasco et al. 2002). Die erste Kamera sitzt an der Front des Fahrzeugs und ermittelt die Position der Unkräuter. Das zweite Kamerasystem befindet sich am Roboterarm und wird zur Ermittlung der genauen Koordinaten der Unkräuter als Korrektursystem zur erkannten Position des ersten Systems verwendet. Bei Versuchen mit dem Roboter wurden 84 % der Unkräuter und 99 % der Kopfsalatpflanzen richtig lokalisiert. Die Bildverarbeitungssysteme benötigten dabei 800 ms, um die Position eines Unkrauts innerhalb eines Bildes zu erfassen. Dies ermöglicht dem Fahrzeug eine Geschwindigkeit von 0,8 km/h. Der Erkennungsalgorithmus der Bildverarbeitung richtet sich nach der Größe der erkannten Objekte. Eine detaillierte Umrisanalyse beziehungsweise das Erkennen von Unkrautplatten ist mit diesem Algorithmus nicht möglich. Dennoch wurden 95 % der Boden-Pixel und 97 % der Pflanzen-Pixel richtig erkannt (Blasco et al. 2002).

#### **4.4 Kartieransatz Aufzeichnung der Saatposition unter Einsatz von DGPS**

Zum Abschluss des Kapitels Kenntnisstand sind im folgenden Absatz noch Ansätze zur Verbesserung der Arbeitsqualität bei der Aussaat von Reihenkulturen beschrieben.

Das Problem heutiger Reihenkulturen besteht darin, dass durch eine gewisse Ungenauigkeit in der Quer- und Längsverteilung der Rübenpillen bei der Aussaat eine heterogene Standraumverteilung entsteht. Dies bedeutet, dass die Ressourcen Boden, Nährstoffe, Wasser und Licht nicht optimal ausgenutzt werden (Griepentrog et al. 2005). Durch eine ungleichmäßige Längsverteilung der Pflanzen innerhalb der Reihe haben diese eine geringere Unkrautunterdrückungswirkung. Des Weiteren wird durch eine Abweichung des Soll- und Istabstandes innerhalb der Kulturreihe eine mechanische Unkrautregulierung erheblich erschwert.

Durch die Ablage in definierten Verbänden haben alle Pflanzen aufgrund der homogenen Verteilung dieselben Wachstumsbedingungen. Dies vermindert den Stress, welcher durch den Einfluss benachbarter Kulturpflanzen verursacht werden kann. Zudem fördert die uniforme

Ablage eine gleichmäßige und homogene Bestandsentwicklung, was wiederum die Unkrautunterdrückung seitens der Kulturpflanzen steigert (Griepentrog et al. 2005).

Aus den genannten Gründen wurden in den vergangenen Jahren mehrere Forschungsprojekte zur Anlage präziser Quadrat- und Dreieckverbände durchgeführt. Einige Beispiele werden nachstehend beschrieben.

Ein dänisches Forscherteam der KVL Copenhagen entwickelte zu diesem Zweck ein System zur georeferenzierten Aussaat von Zuckerrüben. Hierfür diente als Basis das vierreihige Einzelkornsägerät Unicorn 3 von Kverneland (vormals Accord). Dieser Maschinentyp ermöglicht es, bei bestimmten Fahrgeschwindigkeiten die Pille mit einer sogenannten Null-Ablage in den Säschlitz abzulegen. Dies bedeutet, dass die Umfangsgeschwindigkeit der Säscheibe der Vorfahrtgeschwindigkeit entspricht. Somit soll der Verrolleffekt bei der Ablage minimiert werden.

Für den Antrieb der Säscheiben wurden Schrittmotoren eingebaut. Diese können durch gezielte, schrittweise Bewegung mit einer Auflösung von 200 Teilschritten pro Umdrehung präzise angesteuert werden. Schrittmotoren können zudem Informationen über ihre Lage ausgeben. Durch diese Information ist bekannt, wo die Rübenpille abgelegt wird. Durch die Verwendung dieser Motoren erfolgte eine Synchronisation über alle vier Reihen hinweg. Durch Kopplung der Säaggregate an ein hochpräzises RTK-GPS kann eine synchronisierte, georeferenzierte Saatgutablage über alle Anschlussfahrten hinweg ermöglicht werden. Dabei dient die vorherige Spur der Anschlussspur als Referenz. Vor Beginn der Aussaat muss das System kalibriert werden. Um die Säscheiben aller Säaggregate auf die gleiche Position zu fahren, sind Optosensoren auf allen Säscheiben montiert.

Anhand der Kopplung an eine Datenspeicherung wird jede Position eines Pillenauswurfs gespeichert. Versuchsergebnisse zeigen, dass die Ablagegenauigkeit der einzelnen Aggregate mit einer Standardabweichung von 2,1 bis 2,7 mm bei 1,4 km/h und zwischen 4,1 und 7 mm bei 2,1 km/h laut den DLG Bewertungskriterien im Bereich Gut einzustufen sind. (Griepentrog et al. 2005).

Ein weiteres System zur positionsgenauen Ablage von Zuckerrübensaatgut wird in *Schmittmann et al.* (2008) erläutert. Bei Versuchen erreichte das beschriebene System bei einer Fahrgeschwindigkeit von 5,4 km/h und einem Sollabgabeabstand von 20 cm einen Variationskoeffizienten von 1,9 %.

## 5 Hackmaschinenentwicklung

Im folgenden Kapitel werden die einzelnen Entwicklungsabschnitte des Hackmaschinenprototyps sowie die damit durchgeführten Feldversuche beschrieben. Ausgehend von der Entwicklung des vorangegangenen Projekts *Fischer* (2012) wird zunächst der Status quo bei Projektübergabe aufgeführt. Im weiteren Verlauf des Kapitels folgt dann die detaillierte Vorstellung der darauf aufbauenden Neuentwicklungen. Beginnend mit der Neuentwicklung des Hackwerkzeuges und der Evaluierung der vorhandenen Werkzeugvarianten in den Versuchen 2010 über den Umbau auf einen mobilen elektrischen Hochvoltantrieb bis hin zum Ausbau der Hackmaschine auf zwei Reihen werden sämtliche Entwicklungsschritte dargestellt.

### 5.1 Stand bei Projektübergabe

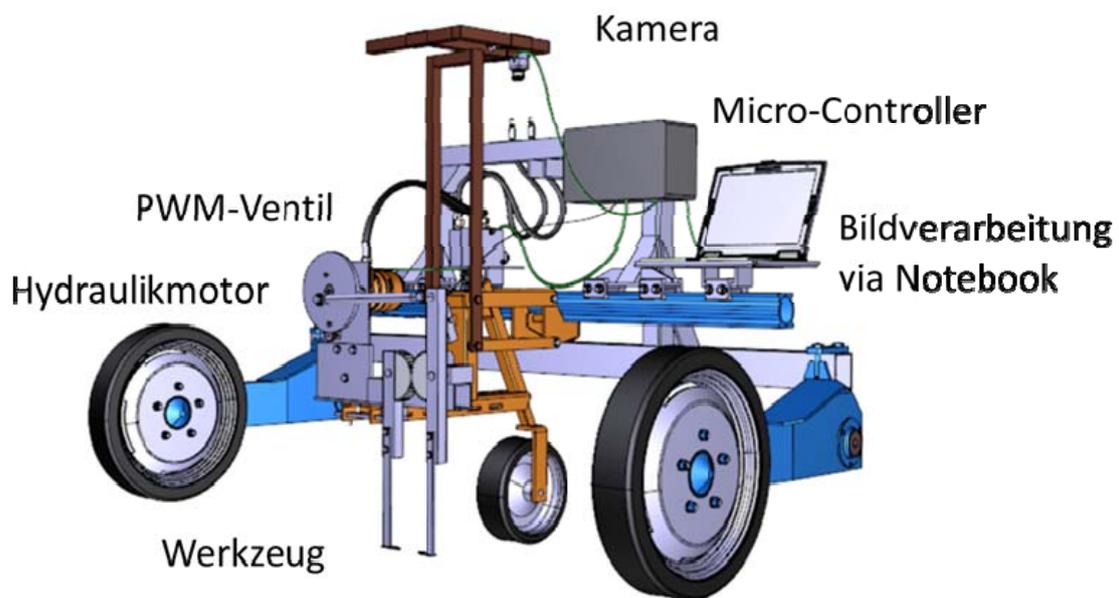
Zu Beginn des Projekts fanden im Jahre 2008 und 2009 Freilandversuche zur Evaluierung vorhandener Hacktechnik für den Bereich zwischen und innerhalb der Kulturreihe statt (Bucher 2009; Fischer 2012). Beim Einsatz nicht selektiv arbeitender Technik für die Unkrautregulierung innerhalb der Zuckerrübenreihe traten Probleme auf. Die eingesetzte Fingerhacke beschädigte zu viele Zuckerrüben. Zudem war der Regulierungserfolg aufgrund des fortgeschrittenen Wachstumsstadiums der Unkräuter unbefriedigend. Aus den genannten Gründen wurde daraufhin am Agrartechnikinstitut der Universität Hohenheim mit der Entwicklung einer innerhalb der Kulturreihe selektiv arbeitenden Hackmaschine begonnen. Zu Beginn der Entwicklung erfolgte zunächst die Erstellung eines Lastenhefts. Dabei wurden folgende Anforderungen für eine Reihenhackmaschine definiert (Fischer 2012):

- Positionsbestimmung der Zuckerrübe in Echtzeit
- Arbeitsgeschwindigkeit  $\geq 1$  m/s
- Einstellbar auf verschiedene theoretische Saatgutablagen (z. B. 14 – 20 cm)
- Zuverlässiges Hacken der Pflanzenzwischenräume
- Geringe Kulturpflanzenverluste

### 5.2 Aufbau der ersten Maschinenstudie

In Anlehnung an die aufgeführten Anforderungen wurde ein erster Prototyp am Institut für Agrartechnik gebaut.

Im nachstehenden Bild 31 ist der Entwicklungsstand zu Beginn dieses Projekts im Jahre 2010 dargestellt. Die Basis der Hackmaschine bildet ein Grundrahmen mit Dreipunktaufnahme für einen Traktor. An diesem Rahmen ist das Parallelogramm mit Hackwerkzeug, Hydraulikmotor und CCD-Kamera befestigt. Die Position des Parallelogramms innerhalb des Grundrahmens ist variabel. Neben dem Parallelogramm befinden sich weiterhin auf dem Grundrahmen ein PWM-Hydraulikventil, das Gehäuse des Micro-Controllers, eine Geräteschiene für die Parallelogrammaufnahme sowie eine Ablage für ein Notebook. Die Tiefenführung des Grundrahmens zur Feldoberfläche erfolgt mittels zweier Tasträder.



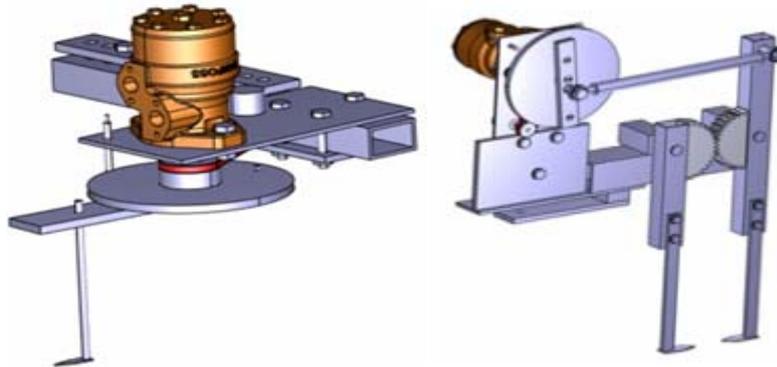
**Bild 31:** Aufbau der ersten Hackmaschine (geändert nach Fischer 2012)

### 5.2.1 Werkzeugvarianten

Für den ersten Prototyp erfolgte der Bau zweier Werkzeuge. Beide Varianten sind in Bild 32 abgebildet. Die Laufbahn der Werkzeugvariante „Schnapper“ beschreibt eine sinusförmige Bewegung. Die Basis dieses Werkzeugs bilden zwei Hackarme, an deren unterem Ende jeweils ein kleines Hackschar angeschweißt ist. Durch einen Hebelmechanismus können die im Boden laufenden Hackschare bei Erreichen einer Kulturpflanzenposition geöffnet werden. Sobald eine Zuckerrübe das Werkzeug passiert hat, werden beide Arme wieder in den Reihenbereich eingeschwenkt.

Die zweite Variante besteht aus einem horizontal im Boden rotierenden Zinken. Dieser ist an einer sich horizontal drehenden Scheibe befestigt. Die Werkzeugvariante „Kreisel“ bearbeitet ebenfalls den Kulturreihenbereich. Dabei wird der Hydraulikmotor mittig über der

Kulturreihe geführt und die Scheibendrehzahl über die Steuerung so angepasst, dass der Zinken jeweils nur den Zwischenbereich zweier Zuckerrüben innerhalb der Reihe bearbeitet. Somit wird der Pflanzennahbereich von einer Bearbeitung ausgespart.



**Bild 32:** Darstellung der Werkzeugvarianten Kreisler (li.) und Schnapper (re.) (geändert nach Fischer 2012)

### 5.2.2 Antrieb der Werkzeuge

Der Antrieb beider Werkzeuge erfolgt über den bereits erwähnten Hydraulikmotor, dessen Umfangsgeschwindigkeit durch den Einsatz eines elektrisch angesteuerten Proportionalventils geregelt wird. Das Öldurchlassvolumen des Ventils und somit die Drehzahl des Motors wird durch die Ausgabe eines elektrischen Signals des Micro-Controllers bestimmt. Die benötigte Hydraulikölmenge wird durch ein einfachwirkendes Steuergerät mit drucklosem Rücklauf seitens eines Traktors zur Verfügung gestellt. Die Auswahl des hydraulischen Werkzeugantriebs erfolgte aus dem Angebot zahlreicher hydraulischer Antriebe in der Landtechnik. Zudem erfüllt nahezu jeder Traktor die Grundanforderung eines einfachwirkenden Hydrauliksteuergeräts.

### 5.2.3 Drehzahlsteuerung des hydraulischen Antriebs

Für die Drehzahlsteuerung des Hackwerkzeugs werden folgende Parameter benötigt:

- Fahrgeschwindigkeit
- Drehzahl Hackwerkzeug
- Korrektursignal der Bildverarbeitung

Unter der Annahme, der Pflanzenabstand innerhalb einer Kulturreihe sei konstant, könnte man den Hackwerkzeugantrieb theoretisch in einem kontinuierlichen Verhältnis zur Fahrgeschwindigkeit, in Abhängigkeit vom Pflanzenabstand innerhalb der Kulturreihe, betreiben. Da dies aber nicht der Realität entspricht und die Abstände der einzelnen Pflanzen

einer Reihe variieren können, ist ein Korrektursignal durch die Bildverarbeitung nötig. Die Messung der Fahrgeschwindigkeit bei diesem Prototyp erfolgt anhand eines Inkrementalgebers an der Nabe eines der Tasträder. Ebenfalls durch einen Inkrementalgeber wird die Drehzahl des Hackwerkzeugs erfasst. Die Signale dieser Sensoren werden an einen Micro-Controller weitergeleitet. Dieser generiert aus den Inkrementalgebersignalen sowie dem Korrektursignal der Bildverarbeitung, welches anhand eines Algorithmus den tatsächlichen Pflanzenabstand ermittelt, die Drehzahl des Hackwerkzeugs, indem er den erforderlichen Öldurchfluss berechnet und mittels der Regelung des Proportionalventils umgesetzt.

#### **5.2.4 Bildverarbeitung**

Das Bildverarbeitungsprogramm ist in der Programmiersprache C# des Softwareherstellers Microsoft geschrieben. Die Programmiersprache C# ist bei der ECMA (European Computer Manufacturers Association) und ISO (Internationale Organisation für Normung) als Standard registriert.

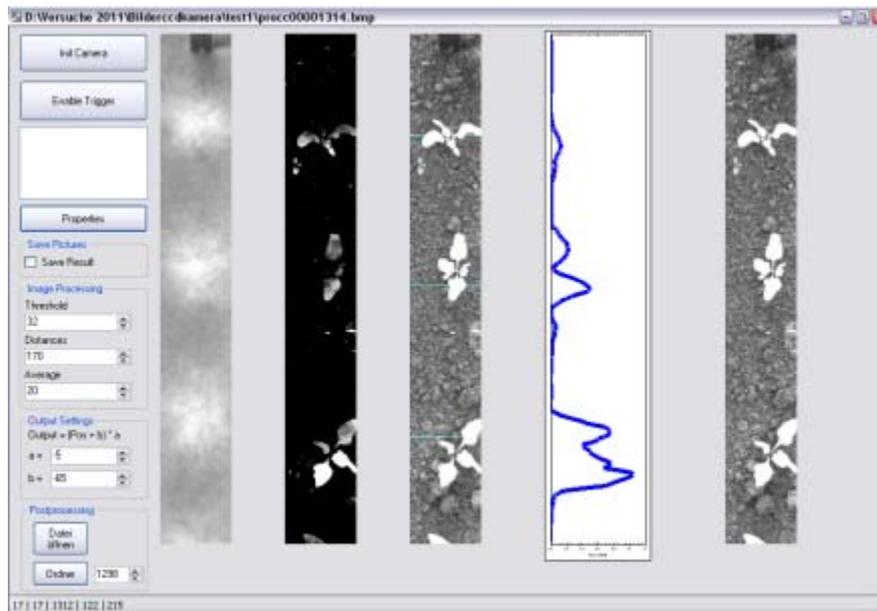
Anhand der von der CCD-Kamera aufgenommenen Bilder wird die Position der Zuckerrübenpflanzen ermittelt. Wie bereits erläutert, erfolgt die Drehzahl des Hydraulikmotors in Abhängigkeit von der Fahrgeschwindigkeit und des theoretischen Pflanzenabstandes. Zusätzlich wird durch die im Folgenden beschriebene Bildverarbeitung die tatsächliche Position der Zuckerrübe ermittelt und das endgültige Übersetzungsverhältnis des Hackwerkzeugs zur Fahrgeschwindigkeit beziehungsweise zur zurückgelegten Strecke berechnet. Durch das Bildverarbeitungsprogramm wird die Abweichung von der Ist- zur Sollposition der Zuckerrübe bestimmt und die Anpassung der Arbeitsgeschwindigkeit des Werkzeugs ermittelt. Durch Ausgabe des aktuellen Übersetzungsverhältnisses wird daraufhin das Hackwerkzeug beschleunigt oder verzögert je nach Vorzeichen der Abweichung.

Da die Kamera über einen Tageslichtsperrfilter verfügt, wird das einfallende Licht gefiltert. Es wird nur Licht oberhalb des Wellenlängenbereichs von 780 nm vom CCD-Sensor erfasst. Nach der Bildaufnahme wird das Bild von der Kamera an das Bildverarbeitungsprogramm auf dem Notebook übertragen. Dort werden den eingehenden Pixeln (Bildpunkten) Zahlenwerte zwischen 0 und 255 zugewiesen. Mit dem so erhaltenen Graustufenbild, welches eine Farbtiefe von 8 Bit besitzt, wird im Anschluss eine Kontrastspreizung mittels Schwellenwertoperation durchgeführt. Ziel dieses Bearbeitungsschrittes ist es, den Kontrast von hellen und dunklen Bildbereichen zu verstärken. Helle Bildbereiche stellen Pflanzen dar, dunkle Bildbereiche stellen im Idealfall den Untergrund beziehungsweise den Boden dar. Durch diese Schwellenwertoperation wird aus dem Graustufenbild ein Schwarz-Weiß-Bild

generiert. Allen Pixeln unterhalb des Schwellenwerts wird der Farbton Schwarz (Zahlenwert 0), allen Pixeln oberhalb des Schwellenwerts wird der Farbton Weiß (Zahlenwert 255) zugeordnet. Der Schwellenwert wird bei jedem Bild erneut berechnet. Bei der Softwareversion des ersten Prototyps erfolgt an dieser Stelle im Programm eine Schattenkompensation. Der Schattenwurf, welcher durch den Traktor oder die Maschine selbst auf dem Bild entstehen kann, wird so kompensiert. Im Anschluss daran erfolgt die Aufsummierung der einzelnen vertikalen Pixelwerte der Reihe nach vom einen zum anderen Bildrand. In der Grafikoberfläche des Programms wird die Datenreihe in einem Kurvendiagramm angezeigt (siehe Bild 33). Anhand der Ausschläge dieses Diagramms erfolgt die Darstellung der Verteilung aller Pflanzen innerhalb eines Bildes. Im darauffolgenden Schritt erfolgt eine sogenannte Glättung dieser Werte. Dabei wird über die Zahlenreihe fortlaufend ein Mittelwert in Abhängigkeit vom Entwicklungsstadium der Rüben gebildet. Hierfür werden, je nach Entwicklungsstadium der Zuckerrüben, mehrere Zahlenwerte zusammengefasst betrachtet. Der Zahlenwert, auf den sich die zusammenfassende Betrachtung bezieht, wird vorab eingegeben und ist abhängig vom jeweiligen Entwicklungsstadium der Zuckerrüben zum Zeitpunkt des Einsatzes der Hackmaschine. Des Weiteren wird eine Gewichtung der Vektorwerte in Abhängigkeit von ihrer Entfernung zum Hackwerkzeug vorgenommen. Dabei werden alle Werte, je nach Entfernung zum Hackwerkzeug, mit einem Faktor multipliziert. Dieser Faktor variiert und wird mit zunehmender Entfernung vom Hackwerkzeug kleiner. Dadurch erhält die erste Zuckerrübe vor der Werkzeugposition Priorität, da im darauffolgenden Prozessschritt die genauere Betrachtung der Maxima der Kurve erfolgt. Hierbei werden die Maxima mit dem theoretischen Pflanzenabstand, der ebenfalls vorgegeben wird und dem Aussaatabstand entspricht, verglichen. Stimmen die Abstände zweier Maxima mit dem theoretischen Rübenabstand überein, werden diese Positionen einer Zuckerrübenposition festgelegt. Allein durch diese Abstandsermittlung einzelner Maximalwerte zueinander wird der wahrscheinliche Standort der Kulturpflanzen festgelegt. Nach Anlage der Abstandsschablone auf dem Bild findet die Berechnung und Ausgabe des Korrekturwerts statt. Daraus wird das Übersetzungsverhältnis für den Werkzeugantrieb abgeleitet und an das Proportionalventil übergeben.

Die Bildaufnahme erfolgt nicht kontinuierlich in einer bestimmten Frequenz, sondern wird durch einen Trigger, der sich auf der Laufbahn des Werkzeugarms befindet, ausgelöst. Die Bildaufnahme findet somit immer an derselben Position statt, nämlich dann, wenn sich das Hackschar an seinem unteren Totpunkt befindet.

Eine ausführliche Beschreibung des Bildverarbeitungsprogramms findet sich in der Dissertation von *Fischer* (2012).



**Bild 33:** Grafische Bedienoberfläche der ersten Programmversion

### 5.3 Entwicklung eines weiteren Hackwerkzeugs

Nach Projektübergabe lag der Fokus zunächst darauf, die vorhandenen Werkzeuge von *Fischer* (2012) auf ihre Funktionsweise hin zu untersuchen und resultierend aus den Ergebnissen eine Optimierung vorzunehmen. Bevor dies umgesetzt wurde, entstand die Idee einer weiteren Werkzeugvariante.

Resultierend aus der bei der Handarbeit mit einer Hacke ausgeführten Bewegung, entstand der Bewegungsablauf der neuen Werkzeugvariante.

Vor Beginn der Werkzeugentwicklung erfolgte zunächst die konkrete Definition der Anforderungen an ein solches. Diese lauteten wie folgt:

- Geringe bis keine Verstopfungsanfälligkeit (auch bei forstgeschrittenem Wachstumsstadium der Unkräuter)
- Werkzeugbewegung muss für hohe Geschwindigkeiten ausgelegt sein
- Variable Hackwerkzeugbreite für unterschiedliche Saatgutablage (14 – 20 cm)
- Stabile Konstruktion
- Minimaler Anteil unbearbeiteter Fläche

Die Umlaufbahn beziehungsweise der Bewegungsablauf des Werkzeuges musste so ausgelegt sein, dass ein Hacken im Zwischenraum zweier Pflanzen möglich ist, ohne diese dabei zu

beschädigen. Zudem musste berücksichtigt werden, dass sich die Zuckerrübenpflanze bei mehrmaligen, in zeitlicher Abfolge aufeinander stattfindenden Hackdurchgängen in ihrer Ausdehnung in Höhe und Breite stark verändert.

### 5.3.1 Aufbau und Funktionsweise der Neuentwicklung

Zunächst wurde aus Holzstäben eine Werkzeugumlaufbahn modelliert. Die Bewegung des Werkzeugs besteht aus einem dreifach gelagerten Hackarm, an dessen unterem Ende ein Hackschar montiert ist. Die Hackarmkonstruktion ist aufgrund ihrer Kinematik dreiteilig aufgebaut. Auf dem unten stehenden Bild 34 sind die drei Holzleisten erkennbar. Die senkrecht stehende Leiste dient als Träger des beweglichen Armteils. Durch die Anordnung der beiden Leisten des beweglichen Armteils beschreibt das später angebrachte Schar eine Kurvenbahn. Der Antrieb erfolgt nach wie vor über einen Hydraulikmotor sowie anhand der Antriebsscheibe der beiden vorhandenen Werkzeugvarianten. Die Anordnung der Holzleisten zueinander wurde so lange variiert, bis die gewünschte Werkzeugbewegung erreicht wurde.



**Bild 34:** Holzmodell der Werkzeugumlaufbahn des zu entwickelnden Hackwerkzeugs

Die Maße sowie die genaue Position der einzelnen Holzstäbe zueinander wurden nach Einstellungen des Holzmodells auf die optimale Werkzeuglaufbahn erfasst und anschließend auf eine stabilere Metallkonstruktion übertragen (siehe Bild 35). Nachdem nun die Bewegung und Dimensionierung des Antriebsarms mit der Funktion als Hackwerkzeugträger erfolgte, wurde ein Hackschar entworfen.



**Bild 35:** Funktionsmuster des Hackwerkzeugs (links); variable Tiefenführung (rechts)

Zusätzlich zur Werkzeugentwicklung erfolgte eine Anpassung der Tiefenführung des von der Firma Schmotzer stammenden Träger-Parallelogramms. Aufgrund erster Einsatzerfahrungen des Prototyps von *Fischer* (2012) wurde der Punkt der Tiefenführung weiter nach hinten, näher an das Hackwerkzeug, verlegt. Hintergrund dieser Anpassung war, dass die Hackwerkzeuge von Fischer durch den Abstand von Tiefenführung und Werkzeugposition des Öfteren zu tief beziehungsweise zu flach arbeiteten. Um eine direktere Tiefenführung und somit ein kontinuierlicheres Arbeitsergebnis zu erzielen, erfolgte die Versetzung der Tiefenführungsrolle möglichst nah zum Werkzeug hin. Die Zusammenlegung der Tiefenführung und des Hackwerkzeugs auf eine Ebene war aufgrund der Werkzeugumlaufbahn nicht exakt möglich, jedoch wurde die Parallelführung im Vergleich zu vorher erheblich verbessert (siehe Bild 35 rechts).

Im Anschluss an die Entwicklungsphase wurden entsprechende Versuchsserien zur Überprüfung der Arbeitsqualität der drei vorhandenen Werkzeugvarianten durchgeführt.

## **6 Feldversuche 2010**

### **6.1 Material und Methode**

Für die Überprüfung der drei vorhandenen Werkzeuge wurde ein Feldversuch durchgeführt. Das Ziel des Versuchs lag darin, herauszufinden, welches Werkzeug sich am besten für die Unkrautregulierung innerhalb der Reihe eignet. Als Maß der Arbeitsgüte wurden die Größe der bearbeiteten beziehungsweise unbearbeiteten Fläche sowie das Ergebnis bei unterschiedlichen Arbeitsgeschwindigkeiten erfasst und bewertet. Der Freilandversuch wurde im Rahmen einer Bachelorarbeit (Bier 2010) durchgeführt und ausgewertet.

Nachstehend sind die Versuche detailliert beschrieben.

#### **6.1.1 Versuchsfeld**

Die Versuche fanden auf einem Schlag des Heidfeldhofs statt, einer Versuchsstation der Universität Hohenheim. Um möglichst praxisnahe Voraussetzungen zu gewährleisten, wurde ein für die Zuckerrübenaussaat typisches Saatbett mit homogener Oberflächenstruktur hergestellt. Um dies zu erreichen, wurde nach der Bearbeitung mit der Kreiselegge eine Überfahrt mit einer Walze vorgenommen. Somit wurde eine ebene, leicht rückverfestigte Oberfläche geschaffen, in der jedes Werkzeug eine klare Kontur hinterlässt. Um die bearbeitete Fläche von der unbearbeiteten Fläche auf den späteren Boniturbildern eindeutig voneinander unterscheiden zu können, wurde auf die Oberfläche eine dünne Schicht handelsüblichen Kalks mittels eines Düngerstreuers aufgebracht.

Auf den somit angelegten Versuchsbahnen wurden dann die Versuche mit den unterschiedlichen Hackwerkzeugen durchgeführt.

#### **6.1.2 Versuchsdurchführung**

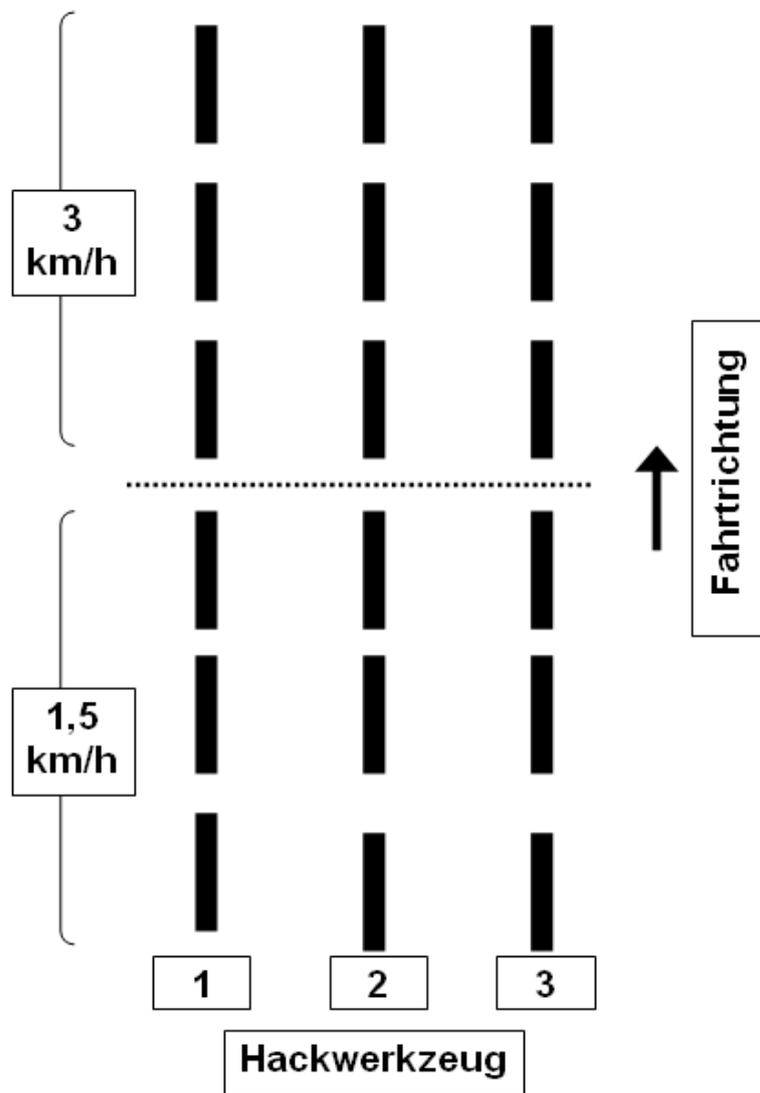
Der Versuchsplan sah für jedes Hackwerkzeug zwei Varianten bestehend aus zwei unterschiedlichen Geschwindigkeiten (1,5 und 3 km/h) mit jeweils drei Wiederholungen vor. Die Varianten und Wiederholungen wurden aufgrund der begrenzten Anzahl an Versuchsbahnen hintereinander – nicht randomisiert – angelegt. Ebenfalls wurden die beiden Varianten 1,5 km/h und 3,5 km/h desselben Werkzeugs hintereinander platziert. Somit konnte mit dem jeweiligen Hackwerkzeug nonstop durchgefahren werden (siehe Bild 36 rechts).



**Bild 36:** Neu entwickeltes Hackwerkzeug auf präparierter Versuchsbahn

Um für alle Hackwerkzeuge gleiche Bedingungen zu schaffen und um die Ergebnisse hinterher miteinander vergleichen zu können, wurde die Bildverarbeitung ausgeschaltet beziehungsweise ein festes Übersetzungsverhältnis zwischen Vorfahrtsgeschwindigkeit und Hackwerkzeugumdrehung eingestellt.

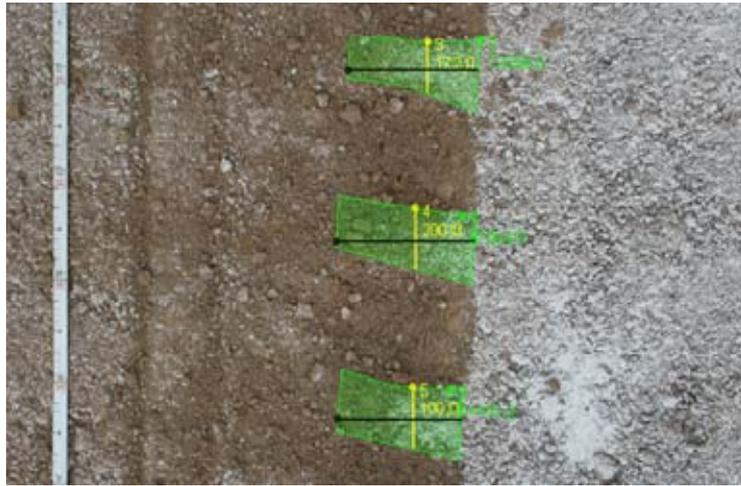
Zwischen den Varianten 1,5 km/h und 3 km/h wurde ein Beschleunigungsstreifen vorgesehen, um mit dem Traktor die erforderliche Geschwindigkeit anpassen zu können (siehe Bild 37). Nach der Überfahrt mit den Hackwerkzeugen wurden mittels eines Maßbandes die jeweiligen Wiederholungen eingemessen. Jede Wiederholung war 10 m lang. Von jeder Wiederholung wurden zehn Boniturbilder mit einem Boniturwagen aufgenommen und später mit dem Bildbearbeitungsprogramm Bildklick ausgewertet. Zusätzlich zu den Boniturbildern erfolgte bei jeder der sechs Varianten die Überprüfung der Hackwerkzeuge mit einer Hochgeschwindigkeitskamera. Von den entscheidenden Sequenzen wurde dann im Nachhinein ein kurzer Film angefertigt, um die Arbeitsweise der Werkzeuge zu dokumentieren.



**Bild 37:** Versuchsplan des Werkzeugversuchs (geändert nach Bier 2010)

### 6.1.3 Auswertung der Boniturbilder

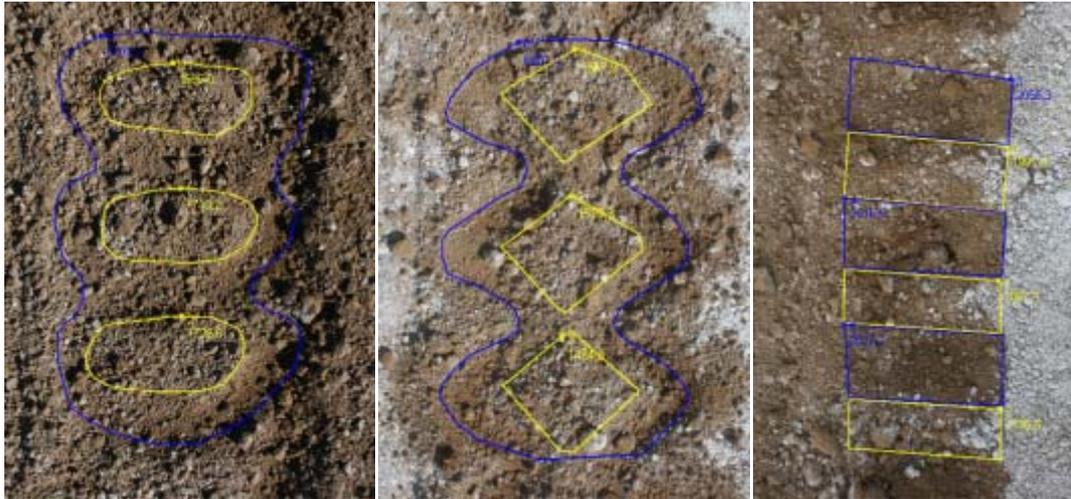
Wie bereits angesprochen, wurden die Bilder mit dem Programm Bildklick ausgewertet. Das Programm ermöglicht das Vermessen und Berechnen von Abständen und Flächen in digitalen Bildern. Es wurde speziell für die Auswertung des Feldversuches dementsprechend angepasst. Neu hinzu kam die Flächenberechnung von Polygonen.



**Bild 38:** Ausgewertetes Boniturbild

In Bild 38 ist beispielhaft ein bearbeitetes Boniturbild des neu entwickelten Hackwerkzeugs dargestellt. Die grüne Fläche entspricht dabei dem unbearbeiteten Bereich in unmittelbarer Umgebung der Pflanze. Mit der schwarzen Linie wird die Breite und mit der gelben Linie die Länge dieses Bereichs angegeben. Da der Bildbereich der zur Bonitur eingesetzten Kamera im Vorfeld kalibriert wurde, konnte ein festes Verhältnis von Pixel zu Zentimeter festgelegt werden. Demnach entsprechen 34 Pixel im Bild einem Zentimeter. Für jedes Hackwerkzeug wurde die bearbeitete sowie die unbearbeitete Fläche ausgerechnet und im Bild mit sogenannten Polygonen markiert. Zudem wurden die Länge in Fahrtrichtung und die Breite der unbearbeiteten Fläche gemessen. Die ermittelten Werte wurden dann statistisch aufbereitet (Bier 2010).

In Bild 39 sind die Konturen des bearbeiteten sowie des unbearbeiteten Bereichs der drei Hackwerkzeuge dargestellt. Deutlich zu erkennen ist dabei, wie unterschiedlich die Form der bearbeiteten Bereiche ist. Beim Kreisel hat der unbearbeitete Bereich eine elliptische Form, beim Schnapper rautenförmig und bei der Neuentwicklung ist er eher rechteckig.



**Bild 39:** Darstellung der Bearbeitungshorizonte der Werkzeugvarianten Kreisel (links), Schnapper (Mitte) und Neuentwicklung (rechts)

Die Form der bearbeiteten Fläche sowie der unbearbeiteten Fläche der Werkzeuge eins und zwei ähneln sich in ihrer Kontur. Lediglich das neu entwickelte Werkzeug unterscheidet sich deutlich hinsichtlich des Bearbeitungsmusters von der Arbeitsweise der beiden anderen (siehe Bild 39). Nach Auswertung der Boniturbilder erfolgte die statistische Bewertung der Ergebnisse, Einzelheiten zur Statistik sind in *Bier* (2010) erläutert.

## 6.2 Ergebnisse der Feldversuche

Die nachstehende Tabelle 2 enthält die statistisch ausgewerteten Ergebnisse. Betrachtet wurde die durchschnittliche Länge, Breite und Gesamtgröße der unbearbeiteten Fläche jeder Werkzeugvariante. Hierbei unterscheiden sich Zahlen mit gleichem Buchstaben am Ende nicht signifikant voneinander.

**Tabelle 2:** Ergebnisse des Werkzeugvergleichs

Werkzeug	Ø unbearbeitete Fläche in cm <sup>2</sup>	Ø Breite der unbearbeiteten Fläche in cm	Ø Länge der unbearbeiteten Fläche in cm
1 (Kreisel)	164,19 a	18,39 a	9,13 a
2 (Schnapper)	80,42 c	10,86 c	9,35 a
3 (Neuentwicklung)	103,34 b	16,98 b	5,99 b

Die Ergebnisse der unbearbeiteten Fläche der drei Hackwerkzeuge weisen einen signifikanten Unterschied auf. Dasselbe gilt für die Breite. Lediglich bei der Länge der unbearbeiteten Fläche unterscheiden sich nur die Werkzeuge eins und zwei von drei, jedoch sind eins und zwei nicht signifikant unterschiedlich.

### **6.3 Diskussion und Rückschlüsse**

Die Versuche wurden mit dem Hintergrund der Bewertung der vorhandenen Werkzeuge durchgeführt. Für die Weiterentwicklung und die Anpassung an den geplanten elektrischen Antrieb sollte lediglich eins der drei Werkzeuge ausgewählt werden. Hierfür sollten die Versuche eine Entscheidungsgrundlage liefern. Das Hauptaugenmerk für die Entscheidung lag dabei auf der Länge der unbearbeiteten Fläche. Zudem wurden die Werkzeuge hinsichtlich ihrer Arbeitsweise und der Anpassungsmöglichkeiten an unterschiedliche Pflanzenabstände untersucht. Die Stabilität der jeweiligen Werkzeuge sowie deren Laufbahn im Boden wurden ebenfalls analysiert. Zusätzlich wird im folgenden Abschnitt jedes Werkzeug hinsichtlich seiner Praxistauglichkeit sowie seines Wirkungsgrades bewertet.

#### **6.3.1 Werkzeugvariante Neuentwicklung**

Bei der neu entwickelten Werkzeugvariante war die durchschnittliche Größe der unbearbeiteten Fläche, neben der des Schnappers, an zweiter Stelle. Lediglich die Länge war bei der Neuentwicklung mit durchschnittlich 5,99 cm am geringsten. Die Breite von 16,98 cm im Mittel spielte für die Entscheidung eine untergeordnete Rolle, da sich durch den Einsatz von Standard Hacktechnik im Bereich zwischen den Reihen diese auf ca. 8 bis 10 cm reduziert wird. Dadurch ergibt sich eine korrigierte unbearbeitete Fläche von durchschnittlich 59,9 cm<sup>2</sup>. Unter Berücksichtigung dieser Tatsache erzielte die Neuentwicklung diesbezüglich das beste Ergebnis.

Bei der Neuentwicklung konnten durch die Highspeed-Filmaufnahmen Schwachstellen im Bereich der Werkzeugbahn aufgedeckt werden. Beim Eingreifen des Werkzeugs in den Boden war eine deutliche Verwindung des Werkzeugträgers zu erkennen. Zudem löste sich des Öfteren die Verbindungsschraube von Werkzeugträger und Antriebsscheibe. Diese Erkenntnisse führten im Anschluss an die Feldversuche und im Zuge der Integration eines elektrischen Antriebs zu einer verbesserten Neuentwicklung des Hackwerkzeugantriebs sowie des Werkzeugträgers. Des Weiteren zeigten die Filmaufnahmen, dass die von dem Hackschar aufgenommene Erde in der bearbeiteten Reihe keine Unkräuter verschüttet hätte, jedoch in der benachbarten Reihe durchaus Zuckerrüben und Unkräuter verschüttet worden wären. Diese Tatsache wurde bei der späteren Weiterentwicklung ebenfalls berücksichtigt. Durch das

Anbringen einer Hohlschutzscheibe zum Schutz der Nachbarreihe wurde hier Abhilfe geschaffen. Eine Anpassung an unterschiedliche Pflanzabstände kann bei der Neuentwicklung durch die Anpassung der Hackscharbreite in Verbindung mit einer Anpassung im Bildverarbeitungsprogramm einfach und schnell realisiert werden. Zudem wurde das Risiko einer Verstopfung durch die rotierende Bewegung als sehr gering eingestuft, was sich auch in späteren Versuchen als richtig herausstellte. Durch die Werkzeugbewegung wird das Unkraut weggeschleudert.

### **6.3.2 Werkzeugvariante Kreisel**

Beim Kreisel wurde sehr viel Erde, gerade bei der 3-km/h-Variante, aufgewirbelt und unkontrolliert umhergeschleudert. Außerdem bearbeitete das Schar nur einen geringen Anteil der Fläche innerhalb der Reihe. Zusätzlich erfolgte nur eine oberflächliche Bearbeitung, eine tiefere Einstellung des Kreisels war aufgrund der enormen Erdbewegung nicht möglich beziehungsweise hätte dies eine Bonitur des Bearbeitungsergebnisses erheblich erschwert. Die Scharform dieser Werkzeugvariante hätte eine umfangreiche Überarbeitung erfordert. Außerdem wurde die Anpassungsfähigkeit des Kreisels an die sich ändernden Bedingungen während der Vegetationsperiode der Zuckerrübe als sehr gering eingestuft.

Die unkrautregulierende Wirkung erfolgte nur in geringem Maße, indem Unkräuter lediglich etwas verschüttet wurden. Bei größeren Unkräutern hätte der Kreisel eine höhere Verstopfungsanfälligkeit als die Neuentwicklung gezeigt. Zudem wies diese Werkzeugvariante bei den Versuchen die größte unbearbeitete Fläche innerhalb der Reihe auf, einer der Hauptgründe weshalb, dieses Werkzeug für die Weiterentwicklung nicht mehr berücksichtigt wurde. Nach *Kurstjens & Kropf* (2001) ist die unkrautregulierende Wirkung durch Verschütten der Unkräuter als gering einzuschätzen. Zudem wurde von dem Zinken des Kreisels nur wenig Bodenoberfläche tatsächlich bearbeitet. Hieraus ließ sich auf eine mangelnde Unkrautregulierung unter realen Bedingungen schließen.

### **6.3.3 Werkzeugvariante Schnapper**

Die Werkzeugvariante „Schnapper“ lieferte neben der Neuentwicklung das zweitbeste Regulierungsergebnis. Die Arbeitsweise dieses Werkzeuges wies auf den ersten Blick bei der Auswertung die geringste unbearbeitete Fläche aus. Dennoch wurde die Anpassungsfähigkeit des „Schnappers“ an sich verändernde Bedingungen während der Vegetationsperiode als wesentlich geringer als bei der Neuentwicklung eingestuft beziehungsweise wurde die technische Umsetzung als umfangreicher als bei der Neuentwicklung bewertet.

Zusätzlich zu dieser Tatsache kann bei der Neuentwicklung eine Anpassung der Arbeitsbreite ohne großen Aufwand durch Tausch des Hackschars vorgenommen werden. Bei den Varianten „Kreisel“ und „Schnapper“ ist dies nur durch eine komplexere Anpassung des Bildverarbeitungsprogrammes und der Motoransteuerung möglich. Zudem konnte beim Schnapper aufgrund des Hebelwegs die Breite der unbearbeiteten Fläche nicht verändert werden. Dadurch, dass die Schare des Schnappers kontinuierlich im Boden laufen, wurde bei diesem Werkzeugtyp die Anfälligkeit gegenüber Verstopfung als wesentlich höher eingestuft als bei der Neuentwicklung.

Darüber hinaus fiel in den Versuchen auf, dass mitunter sehr viel Erde in den Bereich der unbearbeiteten Fläche befördert wurde. Unter realen Bedingungen könnte die Gefahr der Verschüttung von Kulturpflanzen bestehen. Gerade wenn die Zuckerrüben noch sehr klein sind (BBCH 10), reagieren sie sehr empfindlich auf Verschüttung. Dasselbe Problem bestand beim „Kreisel“.

Nach Abschätzung aller Vor- und Nachteile der jeweiligen Werkzeugvarianten und nach gründlicher Prüfung der Ergebnisse fiel die Entscheidung, mit der neu entwickelten Werkzeugvariante in den nächsten Projektabschnitt zu starten. Die Werkzeugvarianten „Kreisel“ und „Schnapper“ werden hier für eine weitere Entwicklung nicht in Betracht gezogen.

## 7 Feldversuche 2011

### 7.1 Material und Methode

Parallel zur Evaluierung der Werkzeuge wurde für den nächsten Projektabschnitt das Konzept eines elektrischen Hochvoltantriebs für die Reihenhackmaschine ausgearbeitet. In Zusammenarbeit mit der Firma Jetter AG, Ludwigsburg, erfolgten die Ausarbeitung eines mobilen elektrischen Antriebskonzepts sowie die Auswahl und Dimensionierung der benötigten Komponenten. Nach gemeinsamem Erstellen eines Anforderungskatalogs wurden der neue Werkzeugantrieb, bestehend aus Leistungselektronik, Generator und Motor für den Antrieb des Hackwerkzeugs sowie die benötigten Über- beziehungsweise Untersetzungsgetriebe gemeinschaftlich zusammengestellt. Durch die Umstellung des Antriebs von hydraulischen Komponenten auf einen elektrischen Hochvoltantrieb wurden gleichzeitig einige Verbesserungen beziehungsweise Veränderungen am bestehenden System vorgenommen. Wie zu Beginn des Kapitels erläutert, hatte Fischer (2012) bereits eine Art „Lastenheft“ für eine selektiv in der Zuckerrübenreihe arbeitende Hackmaschine aufgestellt. Diese Anforderungen wurden bei dem Entwicklungsprozess des elektrischen Antriebs konkretisiert und erweitert. Außerdem wurden die Ziele des nächsten Entwicklungsabschnitts wie folgt definiert:

- Ersatz des hydraulischen Antriebs durch einen elektrischen Hochvoltantrieb
- Erhöhung der Steuer-/Regeldynamik durch direkten Zugriff auf den Hackwerkzeugantrieb (vorher lange Regelstrecke durch Magnetventil über Ölleitung zum Ölmotor)
- Integration eines Jobrechners in das System (Akkukapazität des Laptops zu begrenzt)
- Bedienung und Überwachung des Systems über ein Terminal vom Traktor aus
- Entwicklung/Optimierung des Hackwerkzeuges
- Exakt-Tiefenführung für Parallelogramm
- Weiterentwicklung des Bildverarbeitungsprogramms

Die Umsetzung dieser Anforderungen wird in den folgenden Abschnitten im Einzelnen beschrieben.

### 7.1.1 Aufbau des elektrischen Antriebs

Nach dem Dimensionieren und Aussuchen der erforderlichen elektrischen Komponenten wurde ein Versuchsrahmen zur Inbetriebnahme des neuen Antriebs aufgebaut.

Grundlage der Energieversorgung des Hochvoltantriebs bildet ein Synchronservomotor, der durch die Zapfwelle des Traktors generatorisch betrieben wird. Dieser wurde mit 15 kW Leistung so ausgewählt, dass die Hackmaschine auf bis zu sechs Reihen erweiterbar ist. Da der optimale Drehzahlbereich des Generators bei ca. 2500 U/min liegt, musste mittels eines Übersetzungsgetriebes (SEW Eurodrive) mit dem Übersetzungsverhältnis 1:5 die eingangsseitige Drehzahl der Zapfwelle übersetzt werden. Aus Sicht der Praxis sollte jeder Traktor mit ausreichender Hubkraft für das Anbaugerät einsetzbar sein. Die Eingangsdrehzahl des Übersetzungsgetriebes wurde daher auf maximal 540 U/min begrenzt. Diese Mindestanforderungen seitens der Hackmaschine werden durch nahezu alle Standardtraktoren, welche üblicherweise zur mechanischen Unkrautregulierung in den landwirtschaftlichen Betrieben eingesetzt werden, erfüllt. Für den Werkzeugantrieb wurde ein 600 W starker Synchronservomotor ausgewählt. Durch ein Reduziergetriebe (Neugart PLE 80) mit dem Verhältnis 5:1 wird die Drehzahl der Motorausgangswelle hin zum Hackwerkzeugantrieb unteretzt. Zur Drehzahlregelung sowie zur Zwischenkreisregelung kommen zwei Servoverstärker (JET MOVE) mit dazugehöriger Steuereinheit (JET CONTROL) zum Einsatz. Da die JET-MOVE-Einheiten nicht in mobiler Ausführung verfügbar waren, mussten vorhandene Industriekomponenten den Gegebenheiten in der Landtechnik angepasst und in einem ausreichend gekühlten, staubgeschützten Schaltschrank untergebracht werden. Für die ausreichende Wärmeabfuhr wurde in den Schaltschrank ein 24-V-Lüfter samt Luftfilter eingebaut (siehe Bild 40). Zusätzlich wurde in den Schaltschrank ein Computer mit 12-V-Netzteil für die Durchführung der Bildverarbeitung eingebaut. Der Computer verfügte über einen IntelCore-2-Quad-Prozessor mit 2,66 GHz und einer erschütterungsfähigen Solid-State-Festplatte für eine leistungsoptimierte Bildverarbeitung. Zum Bedienen des Bildverarbeitungsprogramms und der Jetter-Leistungselektronik wurde ein TFT Bildschirm aus dem KFZ-Zubehör beschafft. Dessen Touchscreenfunktion ermöglichte eine einfache Bedienung aller notwendigen Funktionen, ohne dabei vom Traktor absteigen zu müssen.

Aus Sicherheitsgründen wurde ein Notausknopf für die Unterbrechung der Stromzufuhr zum Hackwerkzeugmotor an der Schaltschrankaußenseite angebracht. Ein Isolationswächter war zum Zeitpunkt der Inbetriebnahme des Systems nicht erhältlich.



**Bild 40:** Schaltschrank mit Leistungselektronik und PC-Bildverarbeitung bei Inbetriebnahme

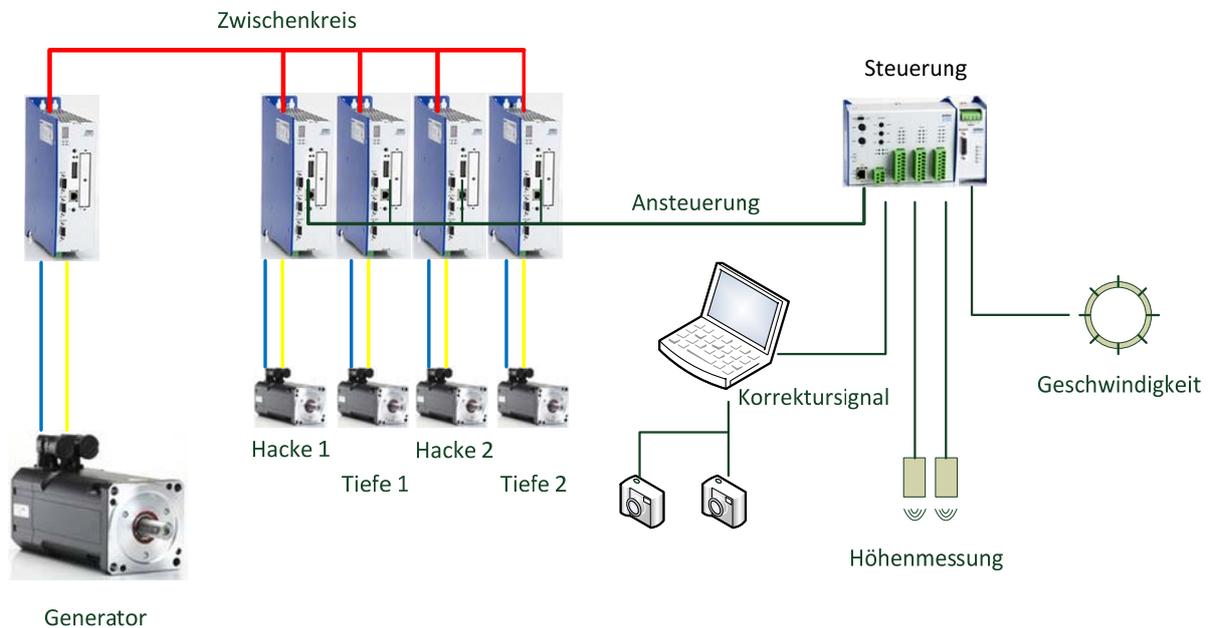
Für die Versorgung des 24-V-Steuerkreises der Leistungselektronik wurde ein Spannungswandler in den Schaltschrank integriert, der aus den 12 V des Bordnetzes des Traktors die erforderlichen 24 V zur Verfügung stellte.

Da vom bestehenden hydraulischen Antrieb bis auf wenige Ausnahmen nichts übernommen werden konnte, mussten sämtliche Teile neu konstruiert und gefertigt werden. Dies waren im Detail:

- Zwischenrahmen mit Generatorhalterung (Verbindung Generator – Versuchsrahmen, siehe Bild 42)
- Schnittstelle/Kupplung Getriebeeingangswelle – Zapfwellenstummel
- Halterung Motor Hackwerkzeugantrieb
- Antriebsarm für Hackwerkzeug
- Anpassung/Weiterentwicklung des neu entwickelten Hackwerkzeugs
- Entwicklung Exakt-Tiefenführung

### 7.1.2 Funktionsweise und Komponenten des elektrischen Antriebs

Im folgenden Abschnitt werden die Funktionsweise sowie die verwendeten Komponenten des elektrischen Antriebs näher beschrieben. In Bild 41 ist eine schematische Abbildung dargestellt.



**Bild 41:** Schematische Darstellung des elektrischen Antriebs (Bucher et al. 2012)

Alle verwendeten Synchronservomotoren verfügen über einen zweipoligen Resolver, der die Lage des Rotors ausgibt.

Die Vorfahrtgeschwindigkeit wird mittels eines Inkrementalgebers, welcher von einem der Stützräder des Schmotzer Rahmens angetrieben wird, an ein Peripheriemodul der JET-CONTROL Steuereinheit übermittelt. Die JET-MOVE-Module (Servoverstärker) sind mittels CAN-Bus mit der Steuereinheit JET-CONTROL verbunden.

Der Drehstrom, welcher am Generator durch den Antrieb mittels Zapfwelle entsteht, wird durch einen JET-MOVE in Gleichstrom umgerichtet und in den Zwischenstromkreis eingespeist. Dort nehmen die JET-MOVE Einheiten der Antriebsmotoren den Strom nach Bedarf ab und wandeln diesen wiederum in Wechselstrom um. Dies geschieht anhand der im JET-MOVE verbauten IGBTs. Durch eine Ethernetschnittstelle kommuniziert die Bildverarbeitung mit der Steuerung beziehungsweise mit der JET-CONTROL-Einheit. Diese arbeitet bei der Drehzahl der Hackmotoren mit einem sich laufend ändernden Übersetzungsverhältnis zwischen Vorfahrtgeschwindigkeit und Werkzeughdrehzahl.

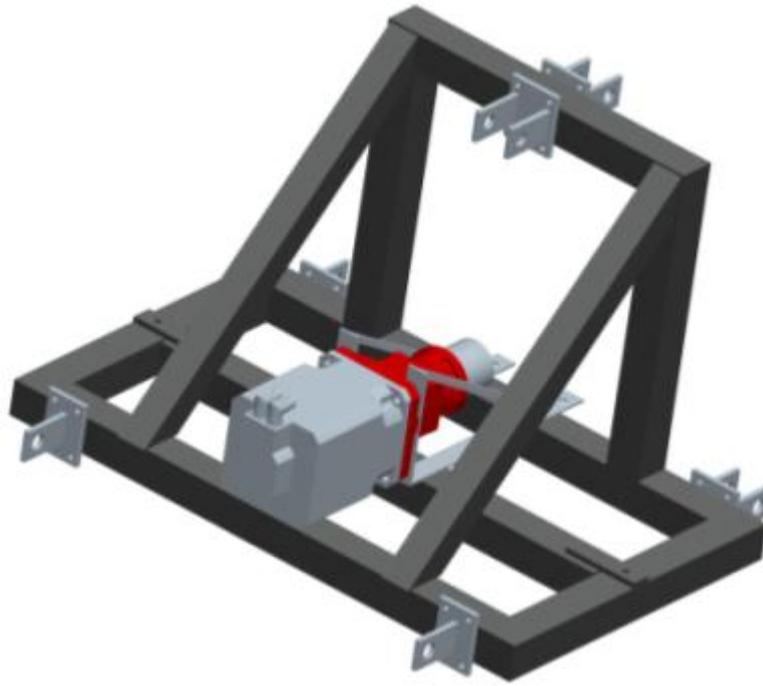
### **7.1.3 3-D-CAD-System**

Für die Anfertigung der Konstruktionen wurde das 3-D-CAD-System PRO-Engineer Wildfire 4.0 der Firma PTC verwendet. Mithilfe des Programms wurden die für die Herstellung der Prototypen erforderlichen Zeichnungen erstellt. Mehrere Lösungsvarianten konnten parallel am Schreibtisch konstruiert und in einem dreidimensionalen Modell begutachtet werden. Zudem ermöglicht das CAD-System die Erstellung von Bewegungsanalysen und Durchdringungsprüfungen. Hierbei konnte im Vorfeld, vor dem tatsächlichen Bau der Komponenten, überprüft werden, ob sich irgendwelche Teile berühren oder ob die geplante Werkzeugbewegung überhaupt realisierbar war. Des Weiteren war es möglich, eine detaillierte Materialliste zu erstellen (Wyndorps 2008). Über die Online-Plattform Trace Parts konnten Normteile, wie beispielsweise Lager, Getriebe, Motoren etc., für die Modelle bezogen werden. Somit war eine detaillierte Aufstellung aller benötigten Komponenten für eine exakte Planung des Maschinenbaus möglich. Die Umsetzung der CAD-Konstruktion erfolgte im Anschluss in der institutseigenen Werkstatt. Durch das kompetente Werkstattteam fand über die gesamte Entwicklungsperiode eine professionelle Beratung in Detailfragen statt.

### **7.1.4 Aufbau des elektrischen Antriebs auf eine vorhandene Hackmaschine**

Nach Inbetriebnahme des elektrischen Antriebs auf einem Versuchsstand erfolgte für die späteren Feldversuche der Umbau beziehungsweise der Aufbau des Systems auf einem Hackrahmen einer Schmotzer-Kombi-PP-Scharhacke. Diese Maßnahme war der Tatsache geschuldet, dass der Rahmen des Versuchsstandes nicht genügend Platz für Schaltschrank, Generator und Parallelogramm bot. Zudem musste das Parallelogramm für die Durchführung von Feldversuchen auf dem Träger verschiebbar sein, um verschiedene Zuckerrübenreihen bearbeiten zu können, ohne dabei mit dem Traktor die Fahrspur wechseln zu müssen.

Da der Anbau des Generators an den Träger des Hackrahmens nicht möglich war, musste zwischen der Heckhydraulik des Traktors und der Dreipunktaufnahme des Schmotzer Rahmens ein Distanzrahmen zur Aufnahme des Generators entwickelt werden (siehe CAD-Model in Bild 42).



**Bild 42:** Distanzrahmen mit Aufnahmen für Dreipunktbau sowie Generator

Die Grundlage des Distanzrahmens bildet eine stabile Schweißkonstruktion aus Vierkantrohren. Die Aufnahmen der Unterlenker sowie des Oberlenkers wurden mittels einer Klemmkonstruktion am Rahmen angeschraubt. Durch die Befestigung der Aufnahmen mit Schrauben bleiben sie variabel versetzbar. Der Generator mit dem Übersetzungsgetriebe wurde im Zentrum der Rahmenkonstruktion platziert.

Zudem musste ein geeigneter Platz für den Schaltschrank festgelegt werden. Um freie Sicht vom Traktor aus auf die Hackmaschine und genügend Anbauraum für das Parallelogramm zu haben, wurde der Schaltschrank mit einem weiteren Rahmen auf dem in Fahrtrichtung linken Führungsrad des Schmotzer Hackrahmens befestigt. Der gesamte Prototyp ist in Bild 43 dargestellt.



**Bild 43:** Schmotzer-Kombi-PP-Geräterahmen mit allen Komponenten des Prototyps für die Versuche 2011

### 7.1.5 Tiefenführung

Nach Abschluss des Umbaus und der Anpassungen an den neuen Schmotzer Rahmen wurde ein Konzept für die automatische Exakt-Tiefenführung erarbeitet. Diese war aufgrund der gewonnenen Erfahrungen aus Vorjahresversuchen (Bier 2010) unerlässlich, um die Arbeitstiefe des Hackwerkzeugs präzise anzusteuern. Da das Tiefenführungsrad des Trägerparallelogramms zwischen den Kulturreihen läuft (siehe Bild 44), müssen Niveauunterschiede zum Reihbereich hin korrigiert werden. Zunächst wurde analysiert, welche Sensortechnik sich am ehesten für diesen Einsatz eignet. Die Auswahl viel letztendlich auf eine ultraschallsensorbasierte Lösung. Im Anschluss daran fand die Auswahl und Dimensionierung der Tiefenführungsmechanik statt. Nach einem Beratungsgespräch bei der Firma Neff, Waldenbuch, wurde eine Trapezgewindespindel mit Gewindemutter sowie Fest- und Loslagereinheit ausgesucht. Die Trapezgewindespindel mit einem Durchmesser von 30 mm und einer Steigung von 8 mm pro Umdrehung ermöglicht ein schnelles Anfahren der erforderlichen Arbeitstiefe. Der maximale Verfahrbereich wurde mit +/-10 Zentimetern aus der Mittelposition nach oben und unten festgelegt. Die Verbindung von der Gewindestange zum ausgewählten Synchronservomotor mit 2 kW Leistung erfolgte mittels einer sogenannten Rotex-Kupplung (siehe Bild 44). Der Motor wurde oberhalb der Festlagereinheit des Spindeltriebs mit einer Halterplatte befestigt. Durch eine zusätzliche JET-MOVE-Einheit im Schaltschrank wird die Drehzahlregelung des Motors beziehungsweise die Arbeitstiefe des

Werkzeugs reguliert (siehe Abschnitt 7.1.2 unten). Die zusätzliche Antriebsachse konnte einfach in das bestehende System des Hackwerkzeugantriebs, durch Anschluss an den Zwischenstromkreis, integriert werden. Der eingebaute JET MOVE verfügt über einen Analogsignaleingang und kann damit das Signal des Ultraschallsensors (Bild 44 rechts) verarbeiten. Das ermittelte Gewicht des Parallelogramms liegt bei ca. 50 kg statisch. Durch das Fahren auf nicht befestigtem Untergrund wurden der Spindeltrieb sowie der Servomotor der Tiefenführung auf ein dynamisches Gewicht von ca. 200 kg ausgelegt.



**Bild 44:** Spindeltrieb für Tiefenführung (links); Tiefenführung mit Hackwerkzeug und Ultraschallsensor (weißer Kreis) (rechts)

Die Führung der Gewindespindel besteht aus zwei Messingführungshülsen und zwei hartverchromten Hydraulikkolbenstangen, welche auf Maß gesägt und an den Enden mit einem Gewinde der Größe M 16 versehen wurden (siehe Bild 44 links). Der Mittelteil der Tiefenführung ist fest mit dem Parallelogramm verbunden. Die restliche Einheit ist mit dem Hackwerkzeug verbunden und kann durch Drehen der Gewindespindel nach oben beziehungsweise nach unten verfahren werden (siehe Bild 44 rechts). Dadurch hebt oder senkt sich das Parallelogramm und die Arbeitstiefe des Hackwerkzugs ändert sich. Unterhalb der Loslagereinheit befindet sich die Aufnahme für das Tiefenführungsrad. Die Arbeitstiefe des Hackwerkzeugs, respektive die Mittelposition der Gewindespindel kann vom Traktor aus am Display über die im folgenden Abschnitt näher beschriebene Bedienoberfläche des Systems eingestellt werden.

### **7.1.6 Bedienoberfläche und Bildverarbeitungsprogramm Steuerung Hackwerkzeug**

Einhergehend mit den Umbaumaßnahmen der Werkzeugmechanik, des elektrischen Antriebs sowie des Schmotzer Rahmens wurde eine neue Benutzeroberfläche für die Steuerung der Bildverarbeitung und der Leistungselektronik entworfen und programmiert. Der Algorithmus des Bildverarbeitungsprogramms wurde grundsätzlich beibehalten und an die Anforderungen des elektrischen Antriebs angepasst.

### **7.1.7 Anpassung der Bildverarbeitung**

Nach Bearbeitung eines aufgenommenen Bildes wird von dem Bildverarbeitungsprogramm ein Übersetzungsverhältnis in ein Register der JET-CONTROL-Einheit via Ethernet-Schnittstelle übertragen. Dieses Übersetzungsverhältnis setzt die Drehzahl des Geschwindigkeitssensors am Stützrad des Schmotzer-Trägerrahmens ins Verhältnis zur Drehzahl des Werkzeugs. Eine Umdrehung des Inkrementalgebers am Stützrad entspricht einer Distanz von 700 mm. Innerhalb dieser Distanz muss durch die Bildverarbeitung die Drehzahl des Hackwerkzeugs durch Ausgabe des jeweils aktuellen Übersetzungsverhältnisses errechnet werden. Die Berechnung startet mit der Übergabe einer Aufnahme nach Auslösen des Triggers an der untersten Hackwerkzeugposition. Theoretisch muss sich das Werkzeug bei einer Saatgutablage von 20 cm und einer Fahrgeschwindigkeit von einem Meter pro Sekunde fünfmal drehen. Da jedoch die tatsächlichen Abstände zweier Rübenpflanzen variieren können, muss in dieses Basisübersetzungsverhältnis eingegriffen werden. Diese Anpassung beziehungsweise Drehzahlkorrektur des Hackwerkzeugantriebs erfolgt über die Änderung dieses Übersetzungsverhältnisses.

Anhand einer weiteren, neuen Funktion des Bildverarbeitungsprogramms erfolgt die Berechnung des Abstands der ersten Rübe zum Bildanfang beziehungsweise zur Position des Hackschars. Unterschreitet dieser Wert ein fixiertes Minimum, wird das Hackwerkzeug um einen bestimmten Wert (wenige Millisekunden) verzögert. Dadurch wird eine Rübe übersprungen und somit vor dem Herausreißen durch das Hackwerkzeug bewahrt. Des Weiteren besteht die Möglichkeit, beim Fehlen einer Rübe mit doppelter Werkzeugumfanggeschwindigkeit zu arbeiten. Dieser Fall tritt ein, wenn eine Fehlstelle innerhalb der Kulturreihe detektiert wird. Der Vorteil dieser Funktion liegt darin, dass bei einer fehlenden Rübe mit doppelter Werkzeugdrehzahl gehackt wird, um somit alle Unkräuter innerhalb der Reihe zu entfernen.

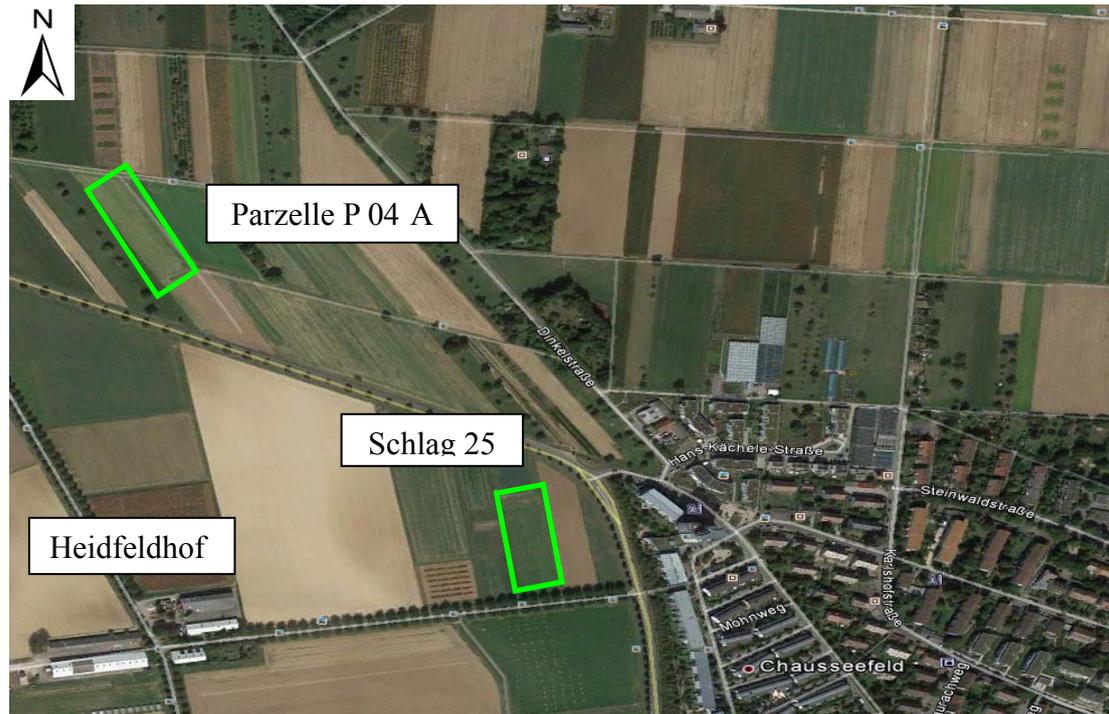
### 7.1.8 Steuerung der Exakt-Tiefenführung

Die Tiefenführung wird durch die Steuerung der Firma Jetter umgesetzt. Durch den Ultraschallsensor der Firma Sick AG, Waldkirch, (UM 30 - 212113) wird der Abstand des Parallelogramms zur Feldoberfläche ermittelt. Je nach Tragfähigkeit des Bodens muss zu Beginn eines Hackdurchgangs zunächst die optimale Arbeitstiefe kalibriert werden. Der Ultraschallsensor sitzt am beweglichen Teil des Parallelogramms. Des Weiteren muss die Maßeinheit der vom Sensor ausgegebenen Werte eingestellt werden. Im Falle der Tiefenführung wurde die Ausgabe in Millimetern gewählt. Die Sensorwerte werden direkt an einen Analogeingang der JET-MOVE-Einheit übermittelt, welche für die Tiefenführungsachse verantwortlich ist. In der Steuerung sind feste Sensorwerte hinterlegt. Im Bereich der eingestellten Grenzwerte reguliert die Steuerung anhand der übermittelten Sensorwerte des Ultraschallsensors die Arbeitstiefe. Bei jedem Start des Systems ermittelt die Jetter-Steuerung den unteren Anschlag der Tiefenführung durch eine Referenzfahrt. Im Anschluss übernimmt die Steuerung den eingestellten Sollwert. Weicht der Istwert vom Sollwert ab, regelt die Steuerung durch Aktivieren des Servomotors über die Trapezgewindespindel die Arbeitstiefe nach. Bei Rechtsdrehung hebt sich das Parallelogramm, bei Linksdrehung senkt es sich. Die Anpassung des Istwerts an den Sollwert wird mit einer leichten Verzögerung vorgenommen, da sich der Ultraschallsensor ungefähr einen Meter vor dem Hackwerkzeug befindet. Somit fällt die Veränderung der Hacktiefe mit dem Ort der Ermittlung zusammen. Der Ultraschallsensor tastet die Feldoberfläche unmittelbar neben der Kulturreihe ab. Er kann in seiner Position an das Wachstumsstadium der Rüben angepasst und lateral verschoben werden. Übersteigt der Abstand zur Feldoberfläche 450 mm, verfährt der Servomotor das Parallelogramm über die Gewindespindel in die oberste Position. Da der Abstand beim Ausheben der Hackmaschine die Obergrenze von 450 mm übersteigt, wird das Parallelogramm nicht mehr nach unten abgesenkt, sondern zum Schutz vor Beschädigung des Hackwerkzeugs beim erneuten Einsetzen der Maschine in die höchste Position hochgefahren.

Nach Fertigstellung des Prototyps wurden in der Vegetationsperiode 2011 auf zwei Versuchsfeldern der Hohenheimer Versuchsstationen Feldversuche durchgeführt.

### 7.1.9 Standortbeschreibung

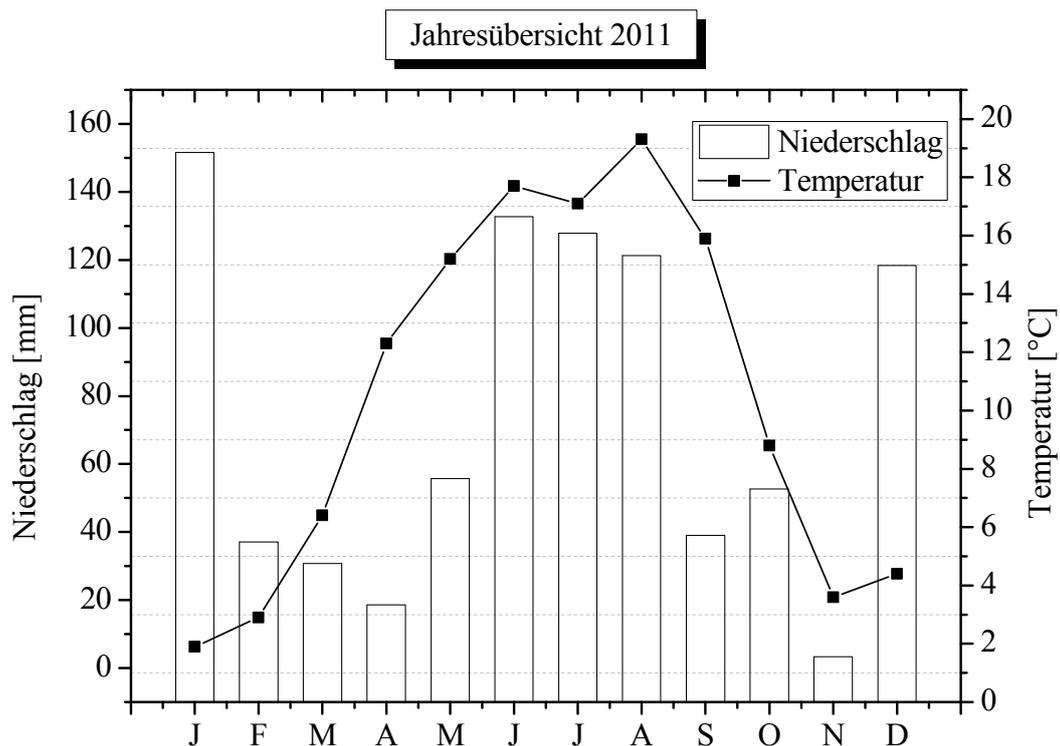
Die Versuche wurden auf Schlägen der Versuchsstationen für Pflanzenzüchtung (Heidfeldhof) sowie für Nutztierbiologie und ökologischen Landbau (Meiereihof) am Standort Hohenheim durchgeführt. Die Versuchsstandorte lagen beide in unmittelbarer Nähe zum Heidfeldhof, welcher sich im Nordwesten in circa einem Kilometer Entfernung zum Campusgelände der Universität Hohenheim befindet (siehe Bild 45).



**Bild 45:** Lage der Versuchsfelder Schlag 25 und Parzelle P 04A (Google Earth)

Die Größe des Schlags 25 (Heidfeldhof) beträgt 0,45 ha, die der Parzelle P 04A des Meiereihofs 0,65 ha. Die genaue Lage der Felder ist in Bild 45 dargestellt. Im Folgenden wird der Schlag 25 als Frühsaat, die Parzelle P 04 A des Meiereihofs als Spätsaat bezeichnet. Bei der Versuchsstation für Pflanzenzüchtung handelt es sich um einen Standort, welcher auf seinen 86 ha arrondierter Fläche rund 26 ha jährlich für pflanzenbauliche Freilandversuche bereitstellt. Mit einer Höhenlage von 400 m über NN, langjährigen Niederschlägen von 685 mm und einer durchschnittlichen Temperatur von 8,5 °C eignet sich dieser Standort ideal für den Anbau aller regional üblichen Kulturpflanzenarten. Der vorherrschende Bodentyp ist leicht pseudovergleyte Braunerde mit der Bodenart nicht ganz steinfreier, schluffiger Lehm. Die Bodenzahl der Schläge schwankt im Mittel zwischen 55 und 60 Bodenpunkten. Des Weiteren liegen keine Bewirtschaftungsauflagen wie beispielsweise Wasserschutzgebiet o.Ä.

vor. Da sich beide Versuchsfelder in unmittelbarer Nähe befanden, waren sowohl für die Frühsaat als auch für die Spätsaat nahezu identische Standortbedingungen gegeben. Die Temperaturentwicklung sowie die Niederschlagsverteilung können dem nachstehenden Diagramm 1 entnommen werden. Bei den angegebenen Temperaturwerten der Temperatur handelt es sich um die monatliche Durchschnittstemperatur. Die dargestellten Niederschlagswerte entsprechen den aufsummierten Niederschlägen des jeweiligen Zeitraums. Die Wetterdaten stammen von der LTZ-Wetterstation in Hohenheim.



**Diagramm 1:** Temperaturverlauf und Niederschlagsverteilung 2011 (LTZ-Wetterstation Hohenheim)

#### 7.1.10 Bodentemperatur

Das Messen der Bodentemperatur der Versuchsfelder erfolgte je einen Tag vor der Aussaat und wurde gemeinsam mit der, im nächsten Absatz beschriebenen Bodenfeuchtebestimmung durchgeführt. Die Messung erfolgte mit einem elektronischen Einstechthermometer auf Höhe des Saathorizonts in ca. 3 cm Tiefe.

### 7.1.11 Bodenfeuchte

Zur Ermittlung der Bodenfeuchte wurden mittels Stechzylinder über den Schlag verteilt Bodenproben aus dem Saatbetthorizont entnommen. Die Entnahme der Bodenproben wurde georeferenziert mit dem Programm Application GPS durchgeführt. Nach der Entnahme erfolgte die Trocknung über 24 Stunden bei 105 °C im Trockenschrank. Der Bodenwassergehalt wurde aufgrund der Gewichts Differenz vor und nach der Trocknung jeder Probe durch Ein- und Auswiegen bestimmt.

### 7.1.12 Geophysikalische Bodenkartierung anhand des EM 38

Das EM 38 der Firma Geonics Ltd, Mississauga, Kanada, wurde eingesetzt, um eine geophysikalische Bodenkartierung der Versuchsflächen durchzuführen. Die berührungsfreie Bodenkartierung des elektromagnetischen Verfahrens EM 38 basiert auf der georeferenzierten Messung der scheinbaren elektrischen Leitfähigkeit des Bodens (ECA) sowie der Kalibrierung der Messwerte. Bei dem Verfahren induziert eine Spule ein magnetisches Wechselfeld im Boden. Dieses magnetische Wechselfeld erzeugt wiederum ein sekundäres Feld, welches von einer zweiten Spule registriert wird. Die scheinbare elektrische Leitfähigkeit wird mit dem elektrischen Leitwert gemessen. Der elektrische Leitwert wird in Siemens ( $S = A/V; = s^3 \times A^2 \times m^2 \text{ kg}^{-1}$ ) angegeben und ist der Kehrwert des elektrischen Widerstands. Die scheinbare elektrische Leitfähigkeit kann von sehr niedrigen Werten von 5 bis 10 mS/m bis zu sehr hohen Werten von  $> 100$  mS/m variieren. Dabei sind Werte zwischen 5 und 15 mS/m typisch für Sandböden. Die Werte für lehmige Böden liegen zwischen 16 und 30 mS/m. Für tonhaltige Böden sind Werte von 30 bis 60 mS/m üblich. Hohe Messwerte von 60 bis über 100 mS/m spiegeln laut *Schmidhalter et al.* (2002) den Einfluss hoher Wassersättigung, häufig in Kombination mit lehmig-tonreichen und/oder organischen Böden wider. Deshalb ist neben der EM-38-Messung die Erfassung der Bodenfeuchte nötig.

### 7.1.13 Boniturwagen

Zur Aufnahme der Boniturbilder wurde der von *Brenneisen* (2009) beschriebene Boniturwagen eingesetzt. Dieser wurde am Agrartechnikinstitut der Universität Hohenheim für die Bonitur von Feldversuchen entwickelt und gebaut. Die Bilder wurden jedoch nicht georeferenziert aufgenommen. Für die spätere Zuordnung kam, wie in Kapitel 7.1.18 nachstehend erwähnt, ein Maßband zum Einsatz. Die Boniturbilder wurden mit einer digitalen Spiegelreflexkamera (Canon 400 D) aufgenommen. Die Größe eines Boniturbildes beträgt 0,9 m<sup>2</sup>.

#### 7.1.14 Bildauswertungssoftware Bildklick

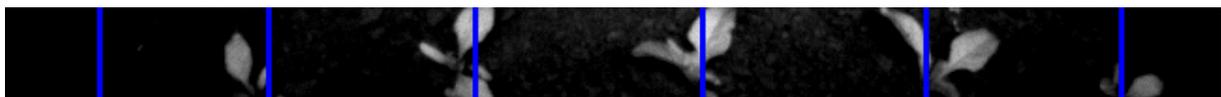
Im Nachgang der Versuchsdurchgänge erfolgte die detaillierte Auswertung der aufgenommenen Boniturbilder am PC. Die Bildauswertungssoftware „Bildklick“ wurde programmiert, um die Position, die Art sowie die Anzahl von Pflanzen in einem Bild zu markieren und die Ergebnisse in einer Datei auszugeben. Die ermittelten Positions- und Identifikationsdaten der Software werden im Anschluss an die Bildauswertung in einer Datei im .csv-Format abgespeichert.

#### 7.1.15 Statistische Auswertung der Versuchsergebnisse

Die statistische Auswertung der Versuchsergebnisse erfolgte anhand einer Varianzanalyse (ANOVA). Die Auswertungen wurden nach dem Vorbild von *Schuster & von Lochow* (1992) mit der Auswertung eines lateinischen Quadrates durchgeführt. Hierfür kam das Statistikprogramm R, welches von den Statistikern Ihaka & Gentleman im Jahre 1992 entwickelt wurde, zum Einsatz. Darüber hinaus wurde für sämtliche Ertragsdaten ein Ausreißertest nach *Anscombe & Tukey* mit 5 beziehungsweise 1 % Irrtumswahrscheinlichkeit durchgeführt. Die dargestellten Diagramme wurden mit dem Programm Origin 8.1 (OriginLab, Northampton, USA) erstellt. Zum Vergleich der errechneten Mittelwerte wurde ein multipler t-Test mit der Irrtumswahrscheinlichkeit (GD) 5 % für signifikant, 1 % für hochsignifikant und 0,1 % für höchst signifikant durchgeführt.

#### 7.1.16 Auswertung der Positionsbestimmung

Für die Auswertung der Bilderkennung des Prototyps wurden die während der Versuchsdurchführung von dem Bildverarbeitungsprogramm der Hackmaschine aufgenommenen und abgespeicherten Bilder hinsichtlich der Positionierung der Zuckerrübenpflanzen bewertet. Hierfür wurden je Hackdurchgang 500 Bilder manuell ausgewertet. Die berechneten Zuckerrübenpositionen wurden in den Bildern mit einem blauen Balken dargestellt. Für ein als richtig bewertetes Bild mussten alle blauen Balken in unmittelbarer Nähe zum Zentrum der Pflanzen positioniert worden sein (siehe Bild 46).



**Bild 46:** Als erkannt definiertes Bild aus dem Bildverarbeitungsprogramm

Das Bild 46 stellt den Sichtbereich der Kamera dar. Die Fahrtrichtung in Bild 46 verläuft vom linken zum rechten Bildrand. Der ersten Pflanze von rechts folgt unmittelbar das Hackwerkzeug.

### 7.1.17 Versuchsaufbau

Für die Versuche wurde nach Absprache mit den Projektpartnern die Auswahl von fünf Varianten getroffen. Es sollten alle gängigen Unkrautregulierungsmethoden, welche im konventionellen sowie im ökologischen Zuckerrübenanbau eingesetzt werden, mit dem entwickelten Prototyp verglichen werden. Zudem sollten die Versuche Erkenntnisse über die Güte des entwickelten Prototyps liefern. Mithilfe der Versuchsanstellung sollte die neue Hackmaschine anhand folgender Punkte mit den übrigen Varianten verglichen werden:

- Einsparpotenzial bei der Handarbeit
- Zuckerrübenverluste durch die einzelnen Versuchsdurchläufe/Applikationen
- Unkrautregulierungserfolg

Die einzelnen Varianten sind in der folgenden Tabelle 3 zusammengefasst. Die Variante eins stellt eine Kontrollvariante (ohne jegliche Unkrautregulierung) dar. Die zweite Variante wurde gewählt, um den Regulierungserfolg innerhalb der Reihe lediglich durch den Einsatz von Technik zu quantifizieren. Ebenfalls diente dieses Versuchsglied zur Ermittlung des Einflusses von Unkräutern in unmittelbarer Umgebung der Kulturpflanzen.

**Tabelle 3:** Versuchsvarianten der Feldversuche 2011

Variante 1	Kontrolle, ohne Unkrautregulierung
Variante 2	Hohenheimer Hacke, Standardscharhacke
Variante 3	Handhacke, Standardscharhacke
Variante 4	Kombination aus Handhacke, Standardscharhacke, Hohenheimer Hacke
Variante 5	Chemische Unkrautkontrolle

Mit der Variante drei wurde der bisherige Standard für die Unkrautregulierung im ökologischen Zuckerrübenanbau abgebildet. Zusätzlich konnte mit dieser Variante die zeitliche Ermittlung des regulären Handarbeitsaufwands durchgeführt werden. Variante vier stellt eine Kombination aus Variante zwei und drei dar. Zum einen konnte mithilfe dieser Variante die Einsparung der Handarbeitszeit gegenüber Variante drei ermittelt werden, zum anderen eine zusätzliche Verlusterfassung durch den Prototyp in Kombination mit der

Handhacke. Die Variante fünf stellt den Standard für die Unkrautregulierung im konventionellen Zuckerrübenanbau dar. Die in der Tabelle 3 aufgeführte farbliche Zuordnung der Varianten wurde über alle Versuche hinweg beibehalten, die Variantenummer hingegen änderte sich bei den Versuchen im Jahr 2012. Mit der Hohenheimer Hacke in Tabelle 3 ist der Hackmaschinenprototyp gemeint.

#### 7.1.18 Versuchsdesign

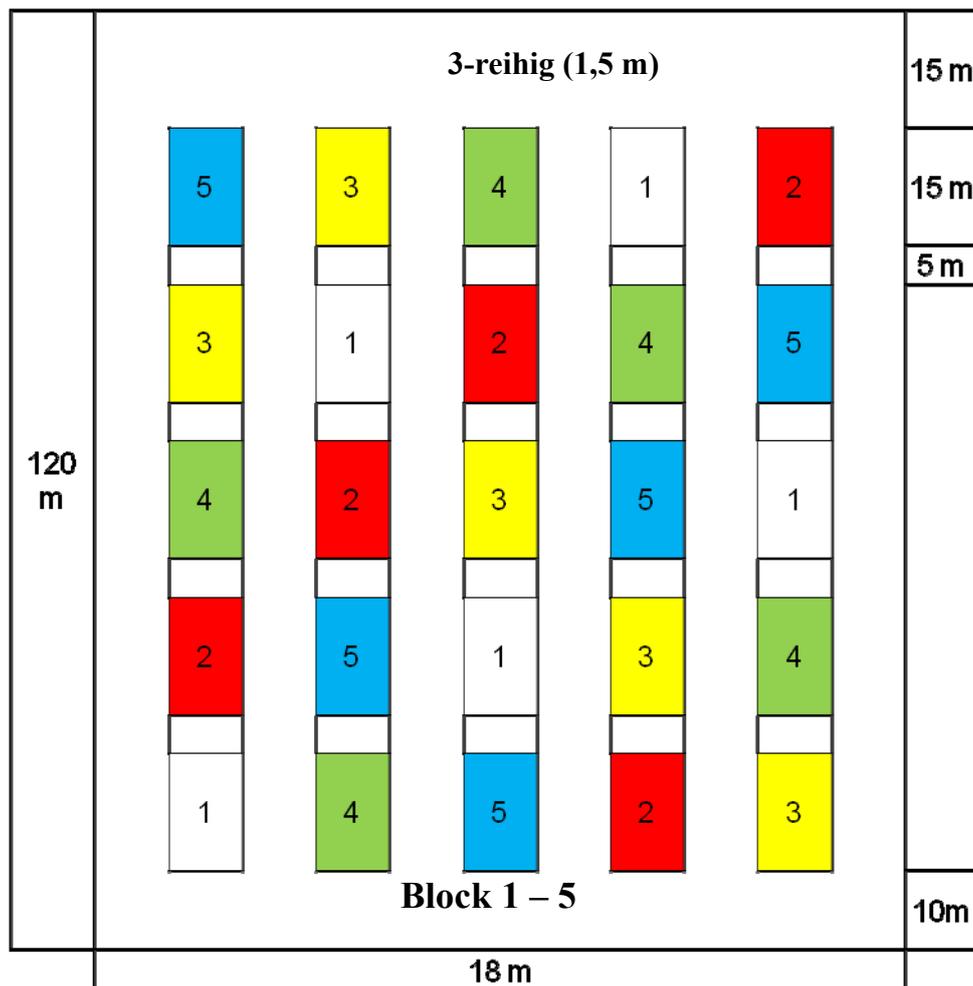
Die Anlage der Versuchsglieder erfolgte nach *Schuster & von Lochow* (1992) in einem lateinischen Quadrat. Da die Versuche aus fünf Gliedern bestanden, wurden, wie es für einen Versuch nach dem Design eines lateinischen Quadrats Vorschrift ist, je Versuchsfeld fünf Wiederholungen angelegt. Insgesamt wurde im Versuchsjahr 2011 auf zwei Versuchsfeldern der gleiche Versuch, mit unterschiedlicher Versuchsgliederanordnung, angelegt. Um das Risiko durch Ausfälle aufgrund von Spätfrösten zu verteilen, wurde ein Feld zur regional üblichen Zeit und ein Feld mit ca. 14-tägigem Abstand als Spätsaat ausgesät. Dies geschah, um nach eintretenden Frühjahrsfrösten und einem damit einhergehenden Ausfall der Rübenversuche mindestens ein Versuchsfeld auswerten zu können. Die Aussaat 2011 erfolgte mit einer dreireihigen Versuchssämaschine der ARGE Südwest (Arbeitsgemeinschaft für Versuchswesen und Beratung im Zuckerrübenanbau in Baden-Württemberg, Hessen und Rheinland-Pfalz Südwest) im Reihenabstand von 50 cm (siehe Bild 47). Innerhalb der Reihe wurden die Rübenpillen in einem Abstand von 20 cm abgelegt.



**Bild 47:** Aussaat der Feldversuche 2011

Im Anschluss an die Aussaat wurden die Einzelparzellen und Wiederholungen mithilfe eines 100-m-Maßbandes eingemessen. Die Länge einer Versuchsparzelle betrug 15 m, die Breite

wurde entsprechend der Arbeitsbreite der Sämaschine auf drei Reihen (1,5 m) angelegt. Ein Block bestand aus den fünf Parzellen der Versuchsglieder, diese wurden hintereinander in derselben Fahrspur angelegt. Zwischen den Versuchsparzellen des gleichen Blocks wurde ein Abstand von 5 Metern eingemessen. Um Randeffekte zu vermeiden, betrug der Abstand zweier Blöcke exakt eine Sämaschinenbreite (1,5 m). Alle Varianten mit manueller und mechanischer Unkrautregulierung wurden dreireihig bearbeitet. Lediglich Variante fünf, das Versuchsglied mit chemischem Pflanzenschutz, wurde aufgrund der Versuchstechnik sechsreihig appliziert. In Bild 48 ist beispielhaft für alle Feldversuche ein Versuchsplan dargestellt.



**Bild 48:** Versuchsplan (Parzelle P 04 A)

Im Vorfeld der Versuche erfolgte die Untersuchung der Versuchsstandorte mit der Erhebung der Randparameter Temperatur bei Aussaat, scheinbare elektrische Leitfähigkeit (EM 38) sowie Bodenfeuchte zur Aussaat.

Die Anzahl der Versuchsdurchläufe wurde in Anlehnung an die Praxis auf drei Durchgänge pro Versuchsfeld und Vegetationsperiode festgelegt. Die Betreuung der Variante fünf erfolgte durch einen Versuchstechniker der ARGE Südwest.

Die Applikation der Herbizide und Fungizide wurde in Anlehnung an den im Zuckerrübenanbau praxisüblichen Einsatz von Pflanzenschutzmitteln und unter Berücksichtigung der guten fachlichen Praxis durchgeführt. Zur Unterstützung der Mittelauswahl und der optimalen Aufwandsmenge wurde das Programm Herbinfo der Online-Plattform BISZ (Beratung und Information für den Süddeutschen Zuckerrübenanbau) des Kuratoriums für Versuchswesen und Beratung im Zuckerrübenanbau hinzugezogen.

#### **7.1.19 Versuchsdurchführung**

Die einzelnen Versuchsdurchläufe beider Versuchsjahre wurden nach einem festen Ablauf durchgeführt. In Abstimmung mit der ARGE Südwest wurde eine Anzahl von drei Hackdurchgängen festgelegt. Der Zeitpunkt der Versuchsdurchläufe wurde zum einen an die Größe der Zuckerrüben und zum anderen auf die Anzahl der aufgelaufenen Unkräuter gekoppelt.

Zu Beginn eines Durchgangs wurden zunächst von allen Wiederholungen eines Versuchsfeldes jeweils zehn Boniturbilder (insgesamt 250 Bilder) mit dem in Abschnitt 7.1.13 beschriebenen Boniturwagen gemacht. Dies geschah, um zu einem späteren Zeitpunkt am PC mit der Bildverarbeitungssoftware Bildclick die Anzahl der Kulturpflanzen und der Unkräuter zu bestimmen. So konnte die Dauer eines Versuchsdurchgangs erheblich reduziert werden. Der Einsatz anderer Boniturverfahren, bei denen beispielsweise die Anzahl der Unkräuter und Kulturpflanzen mittels eines Zählrahmens vor Ort ausgezählt werden, wäre bei der Größe und Anzahl der Versuchspartellen nicht ideal gewesen. Vor der Bildaufnahme wurden über die gesamte Versuchslänge mehrere 100 m lange Maßbänder zwischen den Zuckerrübenversuchsreihen ausgelegt. Die Bildaufnahme erfolgte in einer gleichbleibenden Reihenfolge, beginnend mit Block eins. Somit konnte im Nachhinein jedes Bild aufgrund der Reihenfolge und der Abbildung des Maßbandausschnitts der entsprechenden Parzelle zugeordnet werden. Zudem war dadurch eine Zuordnung der vorher und nachher aufgenommenen Bilder der jeweiligen Parzelle möglich. Dieses Boniturverfahren ermöglichte im Nachhinein die Feststellung des Unkrautregulierungserfolgs über die drei zeitlich aufeinander folgenden Hackdurchgänge und die jeweilige Unkrautregulierungsmaßnahme hinweg.

Darüber hinaus wurden bei allen Versuchsgliedern je vor und nach den Versuchsdurchgängen die Anzahl der Zuckerrübenpflanzen mit digitalen Handzählern ausgezählt und notiert.

Anhand dieser Auszählung konnten die Kulturpflanzenverluste der Varianten zwei, drei und vier durch die manuelle beziehungsweise maschinelle Unkrautregulierung innerhalb der Reihe detailliert dokumentiert werden.

Im Anschluss an die erwähnten Bonituren erfolgte die Durchführung der einzelnen manuellen und mechanischen Hackverfahren.

Zunächst kam der Prototyp zum Einsatz. Für die Dauer der Versuche wurde hierfür ein Traktor (Typ: Deutz-Fahr 4807, 48 PS) des Heidfeldhofs ausgeliehen und mit Schmalspurreifen im Spurabstand von 1,5 m ausgerüstet. Der Hackmaschinen-Prototyp wurde in der Heckhydraulik angebaut und der Generator mit der 540er-Zapfwelle betrieben. Zudem wurde der TFT-Bildschirm zur Steuerung des Prototyps mit einem Halter im Blickfeld des Fahrers montiert. Die Steuerung des Hackrahmens entlang der Reihen während der Überfahrt der Parzellen erfolgte manuell über die hydraulisch gesteuerten Stützräder des Schmotzer Hackrahmens. Die drei Reihen der Varianten zwei und vier beziehungsweise die Versuchsglieder rot und grün wurden nacheinander mit dem Prototyp bearbeitet. Da in der Versuchsperiode 2011 die von Schmotzer zugesagte Standard Hackmaschine nicht geliefert werden konnte, mussten im Anschluss an die Überfahrten mit dem Prototyp, dessen Parallelogramm abgebaut und vier Standardscharhackparallelogramme an den Rahmen angebaut werden. Die Parallelogramme der Standardhackmaschine waren mit je drei Gänsefußscharen und einem nachlaufenden Striegel ausgerüstet.

Daraufhin wurden die Varianten rot, gelb und grün mit der Scharhacke bearbeitet. Im Anschluss erfolgte die Handhacke in den Varianten gelb und grün. Dabei wurde die benötigte Zeit für jede komplette Parzelle sekundengenau mit einer Stoppuhr erfasst. Die zu bearbeitenden Parzellen wurden dabei den einzelnen wissenschaftlichen Hilfskräften zugewiesen, um etwaige Unterschiede in der Arbeitsgeschwindigkeit und der Arbeitsqualität der einzelnen Personen über die jeweiligen Versuchsdurchgänge und unterschiedlichen Versuchsfelder hinweg zufällig zu verteilen.

Nach der Handhacke wurden bei den Varianten gelb, rot und grün erneut die Zuckerrüben ausgezählt sowie die Boniturbilder aufgenommen.

Lediglich die Variante blau mit der chemischen Unkrautregulierung wurde getrennt von den Hackdurchgängen, wie bereits erläutert, von einem Versuchstechniker der ARGE Südwest zum jeweilig optimalen Zeitpunkt mit den im konventionellen Zuckerrübenanbau zugelassenen Herbiziden in den erlaubten Aufwandsmengen durchgeführt. Bei jeder NAK wurden zunächst die Leitunkräuter, deren Entwicklungsstadien sowie die aktuellen

Witterungsverhältnisse in das Beratungsprogramm Herbinfo eingegeben. Daraus generierte daraus die Mittelauswahl mit entsprechender Aufwandsmenge.

In Tabelle 4 sind die einzelnen Maßnahmen von der Aussaat bis hin zum Abtransport der Rüben in das Ochsenfurter Werk der Südzucker AG aufgeführt.

Nach dem letzten Hackdurchgang wurde die Fläche außerhalb des Versuchs mit einem Schlegelmulcher abgemulcht. Lediglich die Versuchspartellen blieben auf den Versuchsfeldern stehen. Diese Maßnahme wurde durchgeführt, um die Unkrautvermehrung auf den Flächen für die Fruchtfolge einzudämmen.

**Tabelle 4:** Übersicht Versuche 2011 Früh- und Spätsaat

Datum	Frühsaat (Schlag 25)	Spätsaat (Parzelle P 04 A)
23.03.2011	Aussaat (KWS Sabrina) Ablage 20 cm	
04.04.2011	Feldaufgang	
06.04.2011	1. NAK BE 0,8+GG 1,0+REB 0,8	
08.04.2011		Aussaat (KWS Sabrina) Ablage 20 cm
18.04.2011	2. NAK BE 1,25+GG 0,75+REB 0,75	Feldaufgang
19.04.2011	1. Hackdurchgang	
23.04.2011		1. NAK BE 1,3+REB 0,8
26.04.2011	2. Hackdurchgang	
29.04.2011		1. Hackdurchgang
02.05.2011	3. NAK BE 1,15+GG 0,9+DEB 30+FHS	2. NAK BE 0,9+GG 0,9
03.05.2011	3. Hackdurchgang	
05.05.2011		2. Hackdurchgang
11.05.2011		3. Hackdurchgang
16.05.2011	4. NAK BE 1,75+GG 1,0+DEB 30+FHS	
23.05.2011		4. NAK BE 1,0+GG 1,0+Agil 0,5
30.05.2011	Hirsebeh. Select 0,75+Para So. 1,5	
05.07.2011	1. Fungizidbehandlung: 1,0 Juwel	1. Fungizidbehandlung: 1,0 Juwel
23.07.2011	Mulchen außerhalb Versuchsfläche	Mulchen außerhalb Versuchsfläche
27.07.2011	2. Fungizidbehandlung: 1,0 Spyräle	2. Fungizidbehandlung: 1,0 Spyräle
04.10.2011	Beerntung	Beerntung
07.10.2011	Verladung/Abtransport nach Ochsenfurt	Verladung/Abtransport nach Ochsenfurt

### 7.1.20 Proberodung

Nach Durchführung der Unkrautregulierungsversuche wurden im Herbst die 50 Parzellen der beiden Versuchsfelder in Hohenheim mit einem Versuchsroder (Firma Edenhall) der ARGE Südwest gerodet. Die Größe der Rodeparzelle betrug 10,05 m<sup>2</sup> (6,7 m Länge und 1,5 m Breite). Die Lage dieser Rodefläche befand sich in der Mitte der Versuchsparzelle, es handelte sich somit um eine Parzellenkernrodung. Damit konnten etwaige Randeffekte ausgeschlossen werden.

Im Vorfeld der Kernrodung musste jeweils vor und hinter jeder zu rodenden Versuchsvariante eine 1,5 m lange Rangierfläche freigeräumt werden.

Die Rodeeinheit der Firma Edenhall ist zweigeteilt. Im Frontanbau des Traktors befinden sich der dreireihige Blattschlegler sowie das Köpfmesser. Im Heckanbau werden die Rüben mit drei Polderscharen gerodet, über Siebketten und Gummiwalzen gereinigt und anschließend auf einem Förderband gelagert. Von dort aus werden die Zuckerrüben der einzelnen Parzellen in stabile Plastiksäcke verpackt und per Lkw in das Südzuckerwerk Ochsenfurt transportiert, wo sich das Labor zur Auswertung von Zuckerrübenversuchen befindet. Vor Ort erfolgt zunächst das Waschen und Reinigen der Rüben. Im Anschluss werden die Zuckerrüben gewogen und für die Bestimmung der Inhaltsstoffe vermüst. Der dabei entstehende Rübenbrei wird dann in einem Analyseverfahren auf seine Inhaltsstoffe untersucht.

Anhand der Analyse kann so der Rübenertrag pro Hektar, der Zuckergehalt der Rüben und der bereinigte Zuckergehalt ermittelt werden. Für die Berechnung des bereinigten Zuckergehalts müssen die Anteile  $\alpha$  –Amino N, Natrium und Kalium ermittelt werden. Nach Ermittlung dieser Inhaltsstoffe kann durch Zuhilfenahme der sogenannten Braunschweiger Formel (Fischer 2012) der Anteil des ausbeutbaren Zuckers bestimmt werden:

$$\text{SMV [\% a.R.]} = 0,12 (\text{K} + \text{Na}) + 0,24 \text{ AmN} + 0,48$$

SMV = Standardmelasseverlust in % auf Rübe

K + Na = Summe von Kalium und Natrium in mmol/1000g Rüben

AmN = Aminosäure-Stickstoff in mmol/1000g Rüben

$$\text{BZG} = \text{ZG} - \text{SMV} - 0,6 \% \text{ (Standard-Fabrik-Verlust)}$$

BZG = Bereinigter Zuckergehalt (%)

ZG = Zuckergehalt in (%)

$$\text{BZE [t/ha]} = \text{RE [t/ha]} \times \text{BZG [\%]} / 100$$

BZE = Bereinigter Zuckerertrag in [t/ha]

RE = Rübenfrischmasse in [t/ha]

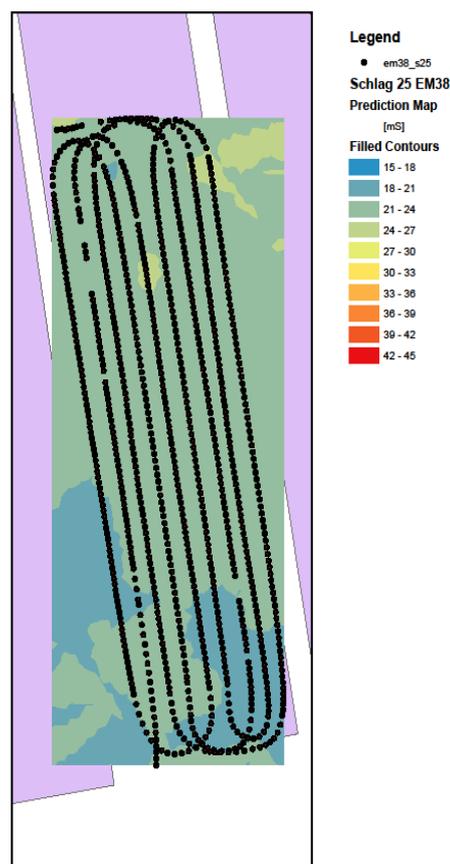
## 7.2 Ergebnisse der Feldversuche 2011

Im folgenden Kapitel sind die Ergebnisse der Feldversuche des Jahres 2011 dargestellt. Das Kapitel beinhaltet die Ergebnisse der Bestandesdichteerhebungen vor und nach den jeweiligen Hackdurchgängen, die Ermittlung der benötigten Arbeitskraftstunden für die Handhacke (AKh/ha), die Anzahl der Unkräuter in den jeweiligen Versuchsgliedern vor und nach den Hackdurchgängen sowie die Ertragsdaten der Kernparzellenrodung. Zusätzlich erfolgt die Darstellung der spezifischen Standorteigenschaften.

Hierfür sind die Ergebnisse der Bodentemperatur, der Bodenfeuchte sowie der scheinbaren elektrischen Leitfähigkeit zum Zeitpunkt der jeweiligen Aussaat aufgeführt.

### 7.2.1 Darstellung der EM-38-Bodenkarte

In Bild 49 und in Tabelle 5 sind die Ergebnisse der EM-38-Messung auf dem Versuchsfeld Schlag 25 veranschaulicht.



**Bild 49:** Darstellung der EM 38 Bodenkarte von Schlag 25

Die dargestellte Bodenkarte zeigt im Bereich der Versuchsanlage eine überwiegend homogene Verteilung der Messwerte. Die Werte schwanken zwischen 18,43 und 25,39 mS/m. Die gemessenen Werte liegen im Bereich von lehmigen Böden und stimmen mit der Standortbeschreibung zu Beginn von Kapitel 7.1 überein. Die Bodenfeuchte auf Schlag 25 beträgt zum Aussaattermin im Mittel 16,47 %. Der gemittelte Wert der Bodentemperatur liegt bei 5,4 °C.

**Tabelle 5:** Zusammenfassung der Randparametererhebung auf Schlag 25

	Einheit	Mittelwert $\bar{x}$	Min.	Max.	Standardabweichung S
EM 38	mS/m	22,11	18,43	25,39	1,202
Bodenfeuchte	%	16,47	14,28	16,97	0,72
Bodentemperatur	°C	5,4	5,1	5,9	0,26

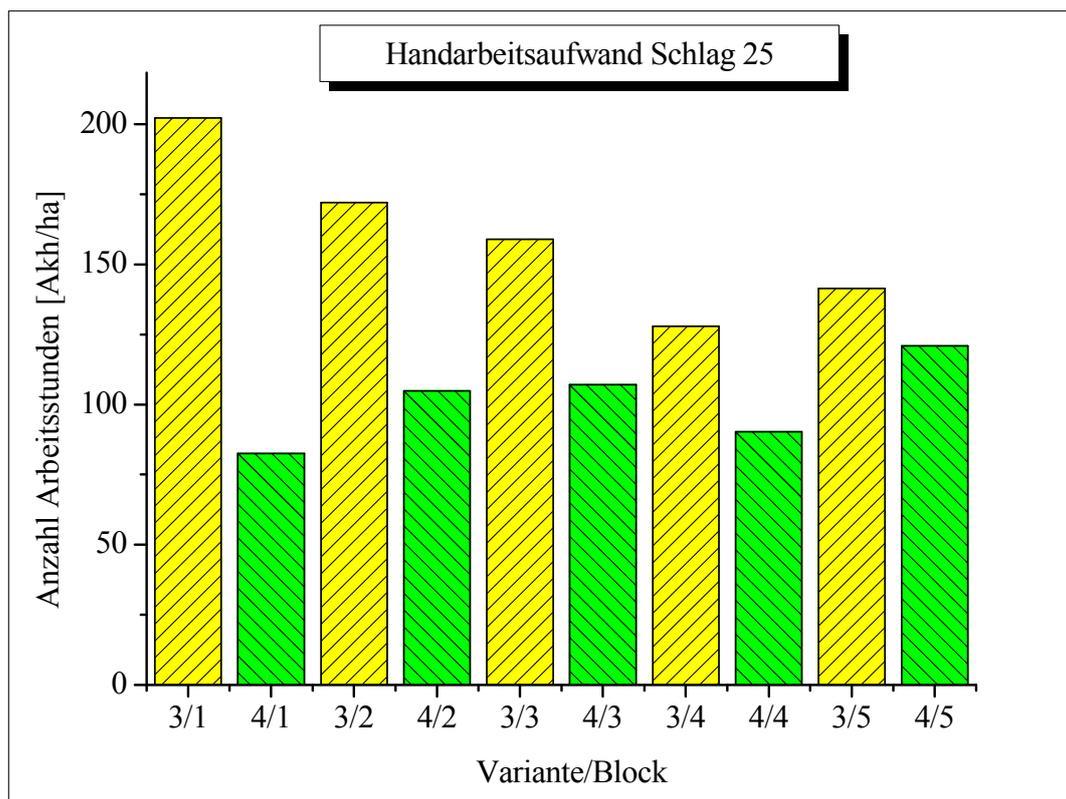
Die erfassten Werte der scheinbaren elektrischen Leitfähigkeit von Parzelle P 04 A können nachstehender Tabelle 6 entnommen werden. Der Mittelwert entspricht 21,03 mS/m. Die Bodenfeuchte variiert zwischen 15,11 und 18,34 %. Der ermittelte Mittelwert liegt hier bei 17,17 %. Die gemessenen Bodentemperaturwerte bewegen sich zwischen 6,5 und 7,9 °C. Der daraus resultierende Mittelwert beläuft sich auf 6,8 °C.

**Tabelle 6:** Ergebnisse der Randparametererhebung Parzelle P 04 A

	Einheit	Mittelwert $\bar{x}$	Min.	Max.	Standardabweichung S
EM 38	mS/m	21,03	14,02	24,28	1,53
Bodenfeuchte	%	17,17	15,11	18,34	0,92
Bodentemperatur	°C	6,8	6,5	7,9	0,26

### 7.2.2 Ergebnisse der Handarbeitserfassung Frühsaat

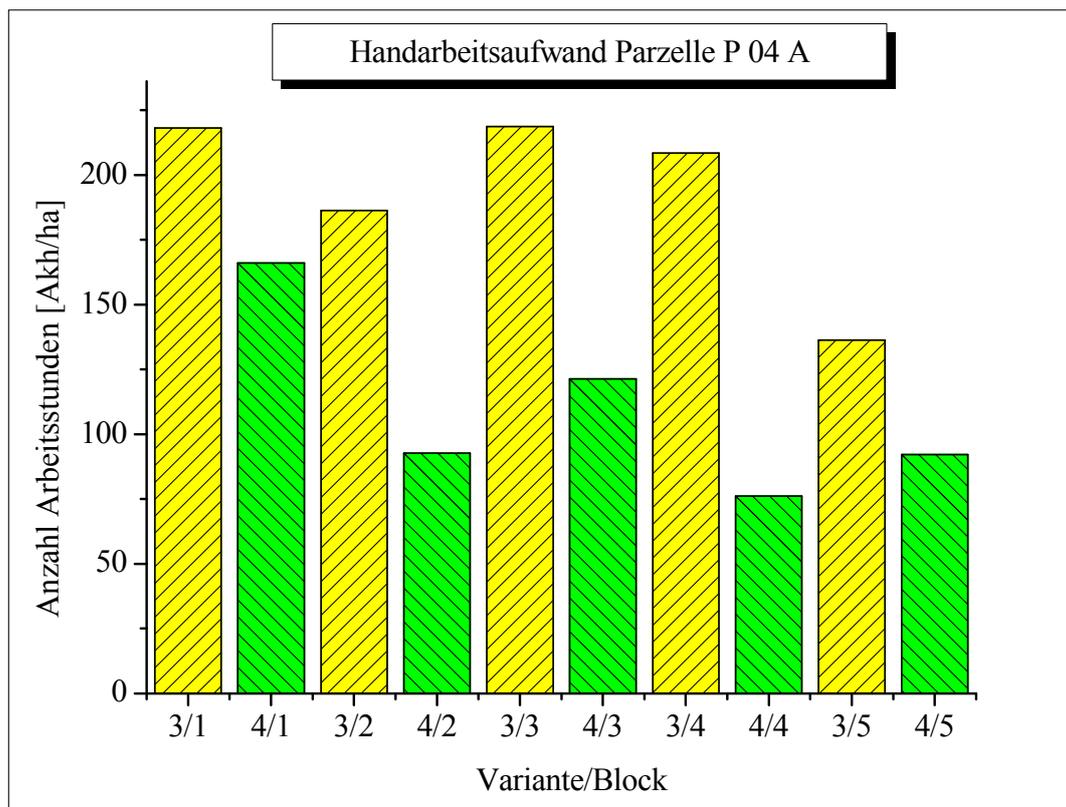
Die dargestellten Ergebnisse in Diagramm 2 zeigen die blockweise aufsummierten Werte der drei Hackdurchgänge, welche zum besseren Vergleich mit Ergebnissen der Literatur von der benötigten Zeit pro Versuchsparzelle auf AKh/ha umgerechnet wurden. Die linke Säule des Diagramms beschreibt jeweils den Aufwand von Variante drei, die rechte Säule den von Variante vier. Der Handarbeitsaufwand für die Regulierung der Unkräuter innerhalb der Reihe und im Pflanzennahbereich schwankt bei Variante drei zwischen 127 und 202 AKh/ha. Bei Variante vier variiert dieser zwischen 82 und 120 AKh/ha. Der durchschnittliche Zeitbedarf von Variante drei liegt bei 160 Stunden, der von Variante vier bei durchschnittlichen 101 Stunden. Die Werte weisen einen höchst signifikanten Unterschied auf. Die Differenz des mittleren Arbeitsaufwands der beiden Varianten beträgt 59 Arbeitsstunden. Dabei variiert die Differenz des verringerten Handarbeitsaufwands von Variante vier gegenüber Variante drei je nach Block zwischen 14 und 59 % (siehe Diagramm 2). Die größte Differenz tritt bei Block eins, die niedrigste bei Block fünf auf.



**Diagramm 2:** Ergebnisse der Zeitermittlung auf Schlag 25

### 7.2.3 Ergebnisse der Handarbeitserfassung Spätsaat

In Diagramm 3 sind die aufsummierten Blockwerte der Spätsaat abgebildet. Bei Variante drei liegt der benötigte Arbeitseinsatz zur manuellen Unkrautregulierung zwischen 136 und 218 AKh/ha. Der durchschnittliche Handarbeitsaufwand für Variante drei liegt bei 193 AKh/ha. Dem gegenüber steht bei Variante vier ein gemittelter Aufwand von 109 AKh/ha. Hierbei variiert dieser bei Variante vier zwischen 76 und 166 AKh/ha. Mit einer durchschnittlichen Differenz der beiden Varianten von 83 Stunden ist der Unterschied höchst signifikant.



**Diagramm 3:** Ergebnisse der Zeitermittlung auf Parzelle P 04 A

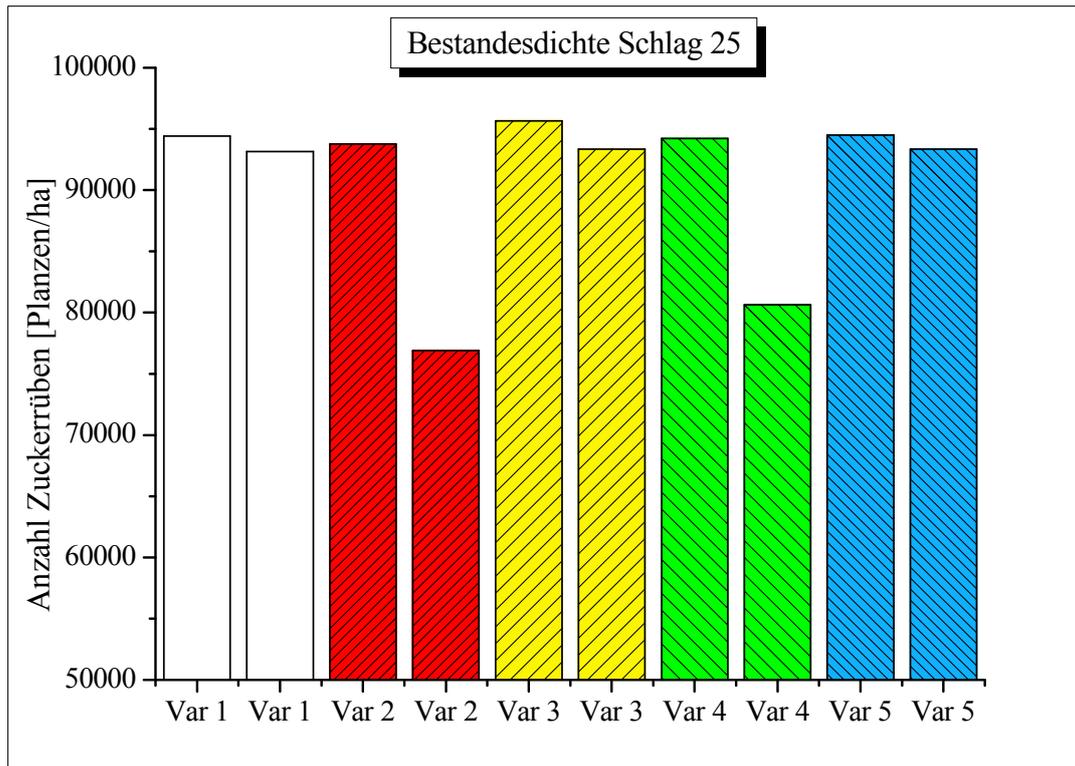
#### 7.2.4 Bestandesdichte und Kulturpflanzenverluste Schlag 25

Die dargestellten Ergebnisse in Diagramm 4 entsprechen den gemittelten und auf Pflanzen je Hektar umgerechneten Werten der einzelnen Versuchspartzen innerhalb der fünf Wiederholungen. Dargestellt sind die Bestandesdichte beziehungsweise der Feldaufgang der Zuckerrüben zum Zeitpunkt des ersten Hackdurchgangs sowie die Bestandesdichte nach Durchführung des letzten von insgesamt drei Versuchsdurchläufen. In der linken Säule des Diagramms ist der Feldaufgang jeder Variante dargestellt. In der rechten Säule ist der Zuckerrübenbestand nach Beendigung der Versuchsdurchläufe dargestellt.

Für die Ergebnisdarstellung erfolgt zunächst die Berechnung des arithmetischen Mittels der drei Versuchsreihen innerhalb einer Versuchspartzele, danach die Berechnung des arithmetischen Mittels über die fünf Wiederholungen der einzelnen Varianten hinweg. Der Auflauf vor Versuchsbeginn innerhalb der Versuchsglieder schwankt zwischen 93778 und 95644 Pflanzen je Hektar. Nach Durchführung der Versuche beträgt der Kulturpflanzenverlust bei Variante zwei durchschnittlich 18 %, bei Variante drei 2,6 % sowie bei Variante vier 14,5 %. Bei den angegebenen Werten handelt es sich um die aufsummierten Gesamtverluste der drei Hackdurchläufe. Dabei unterscheiden sich lediglich die Varianten zwei und vier höchst signifikant von Variante drei. Die Varianten zwei und vier hingegen unterscheiden sich laut statistischer Auswertung in Bezug auf die Zuckerrübenverluste nicht signifikant voneinander. Die Bestandesdichte nach Beendigung der Versuche beträgt im Durchschnitt bei Variante zwei 76889 Pflanzen pro Hektar, bei Variante vier 80533 Pflanzen pro Hektar. Bei Variante drei stehen nach Versuchsdurchführung im Mittel 93156 Pflanzen je Hektar.

Je Hackdurchgang tritt bei Variante zwei ein Verlust in der Größenordnung zwischen 4,6 und 8,3 % auf. Bei Variante vier variieren die Rübenverluste je Durchgang zwischen 4,2 und 5,7 %.

Die Zuckerrübenverluste der Varianten eins und fünf liegen über die Dauer der Versuche unter 2 %. Da hier keine großartigen Bestandesveränderungen zu erwarten waren, wurden diese Varianten nicht in die statistische Auswertung mit einbezogen.



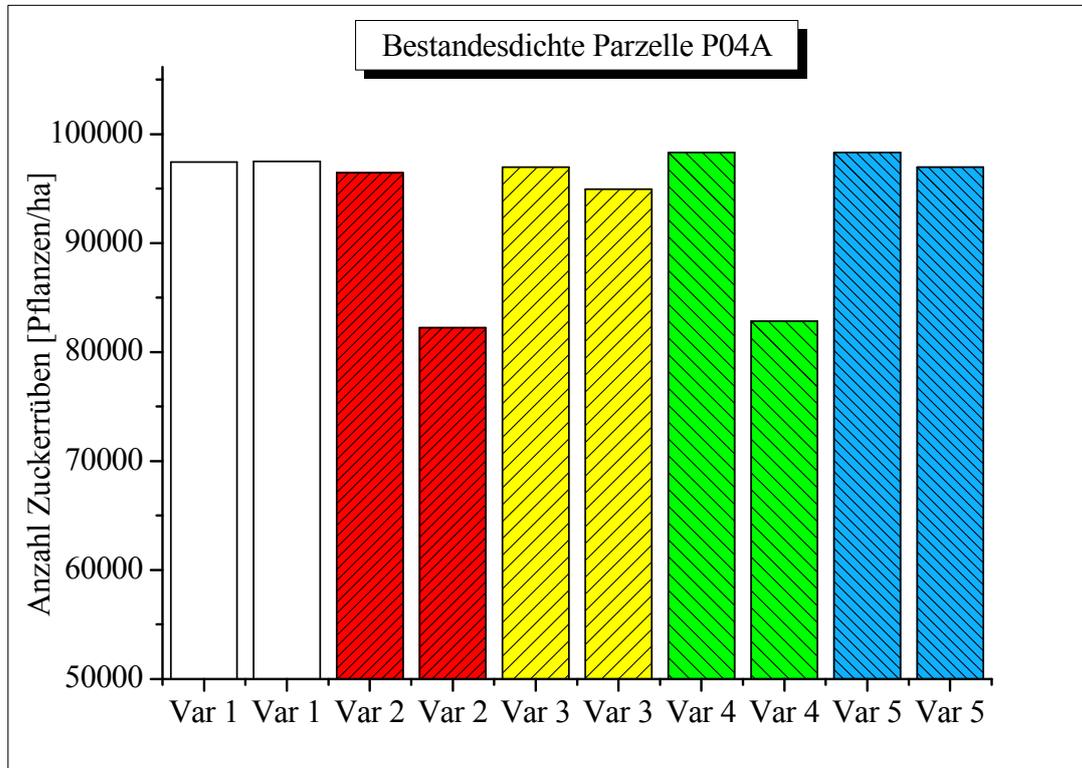
**Diagramm 4:** Bestandesdichte der einzelnen Varianten vor und nach den drei Hackdurchgängen auf Schlag 25

### 7.2.5 Bestandesdichte und Kulturpflanzenverluste Parzelle P 04 A

Die Anzahl der durchschnittlich aufgelaufenen Zuckerrüben bei der Versuchsanlage auf Parzelle P 04 A liegt zwischen 96448 und 98312 Pflanzen je Hektar (siehe Diagramm 5). Dabei handelt es sich, wie bereits im vorherigen Abschnitt erwähnt, um die gemittelten und auf Pflanzen je Hektar umgerechnete Bestandesdichte der einzelnen Zuckerrübenreihen je Versuchsparzelle. Die Zuckerrübenverluste der beiden relevanten Versuchsglieder zwei und vier belaufen sich auf durchschnittlich 14,7 beziehungsweise 15,7 %. Die durchschnittliche Anzahl Pflanzen je Hektar beträgt bei den Varianten zwei und vier somit nach der Versuchsdurchführung absolut betrachtet 82222 und 82844 Rüben/ha. Diese weisen aufgrund der geringen Differenz keinen signifikanten Unterschied auf. Für Variante drei beläuft sich der gemittelte Zuckerrübenverlust auf 2,1 %. Dabei besteht ein signifikanter Unterschied zu den Varianten zwei und vier.

Wie bereits bei Schlag 25 liegen die Kulturpflanzenverluste der Varianten eins und fünf unter 2 %.

Bei Betrachtung der Verluste der einzelnen Hackdurchgänge fällt auf, dass die Verluste von Variante zwei und vier beim ersten Hackdurchgang mit jeweils 11 % ausfallen. Die folgenden Hackdurchgänge verursachen jeweils Verluste bei beiden Variante zwischen 3,5 und 4,2 %.

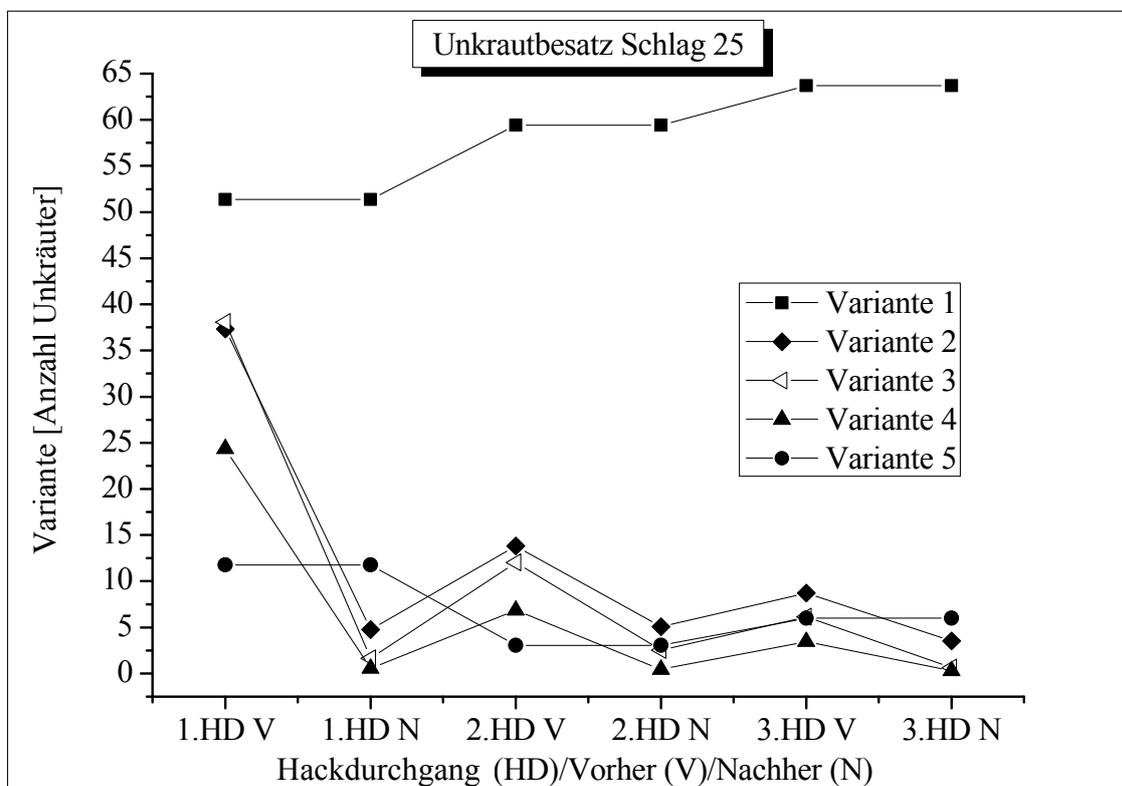


**Diagramm 5:** Bestandesdichte der einzelnen Varianten vor und nach den drei Hackdurchgängen auf Parzelle P 04 A

### 7.2.6 Verlauf des Unkrautbesatzes von Versuchsfeld Schlag 25

Der Verlauf des Unkrautbesatzes der einzelnen Varianten auf Schlag 25 während des Versuchs ist in Diagramm 6 abgebildet. Das Diagramm zeigt die jeweilige durchschnittliche Anzahl Unkräuter je Boniturbild und Variante. Die dargestellten Werte entsprechen dem Mittel, gebildet aus zehn Boniturbildern je Parzelle beziehungsweise insgesamt 50 Bildern je Variante über die fünf Wiederholungen hinweg. Auffällig ist die heterogene Verteilung des Unkrautbesatzes der einzelnen Varianten vor dem ersten Hackdurchgang. Zu Beginn der Versuche variiert der Unkrautbesatz der einzelnen Varianten zwischen 11 und 51 Unkräutern je Boniturbild. Die Kontrollvariante eins hebt sich in Bezug auf den Unkrautbesatz hierbei deutlich von den anderen Varianten ab. Ebenfalls deutlich zu erkennen ist die Differenz vor und nach den Hackdurchgängen der Varianten zwei, drei und vier. Zum Vergleich der Effektivität der unterschiedlichen Varianten bezüglich des Regulierungserfolgs werden die jeweiligen gemittelten Anfangs- und Endbestände der Unkräuter je Boniturbild betrachtet.

Nach dem ersten Hackdurchgang befinden sich in Variante zwei 88 % weniger Unkräuter bezogen auf den Anfangsbestand. Bei den Varianten drei und vier stehen 94 beziehungsweise 98 % weniger Unkräuter. Bei diesem Ergebnis unterscheiden sich die Varianten drei und vier hochsignifikant beziehungsweise signifikant von Variante zwei. Die Varianten drei und vier unterscheiden sich hingegen nicht signifikant voneinander. Nach dem zweiten Hackdurchgang fehlen bei Variante zwei durchschnittlich 62 % der Unkräuter, bei Variante drei 80 % und bei Variante vier 93 %. Beim zweiten Hackdurchgang unterscheiden sich alle drei Varianten signifikant voneinander. Nach dem dritten und letzten Versuchsdurchlauf sind bei Variante zwei 56 %, bei Variante drei 91 % sowie bei Variante vier 89 % der Unkräuter bezogen auf den Anfangsbestand des Hackdurchgangs reguliert. Hierbei besteht ein signifikanter Unterschied zwischen den Varianten drei und vier gegenüber Variante zwei.

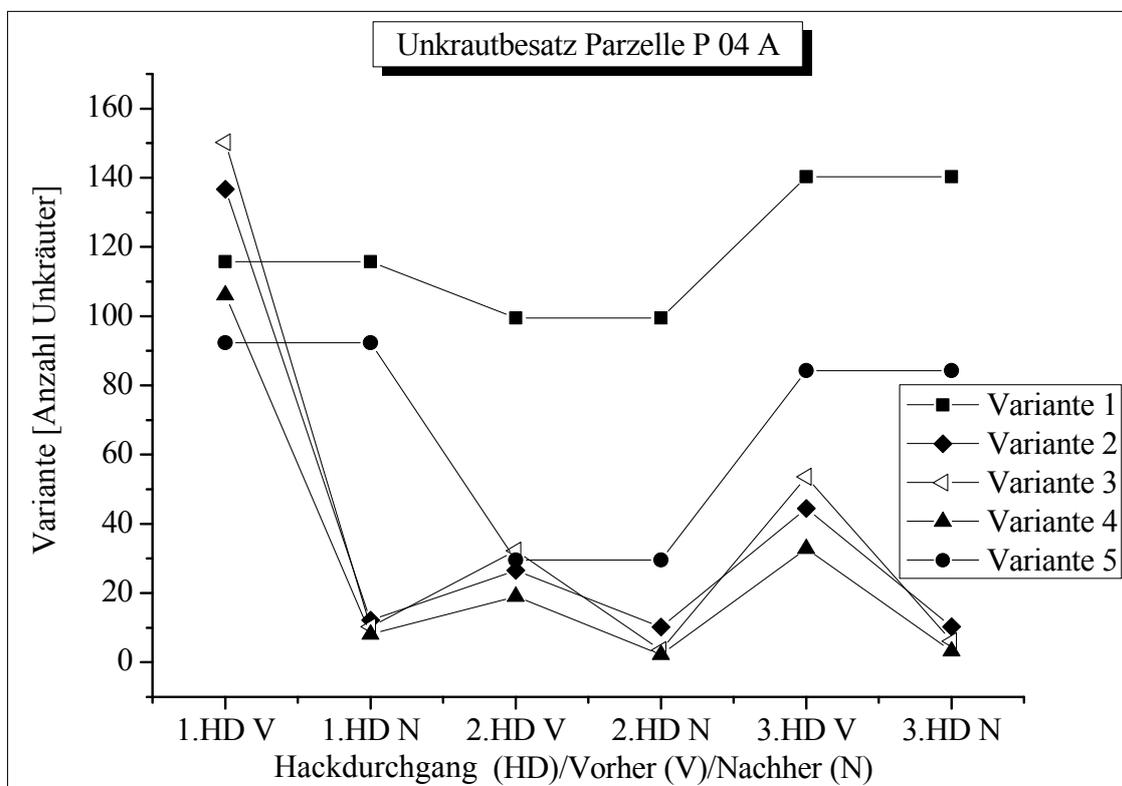


**Diagramm 6:** Verlauf des Unkrautbesatzes auf Versuchsfeld Schlag 25

Nach dem letzten Versuchsdurchgang sind auf den Boniturbildern der Varianten zwei und vier jeweils durchschnittlich 3,5 beziehungsweise 0,3 Unkräuter zu erkennen. Auf den Bildern der Variante drei befinden sich 0,6 Unkräuter. Bei der Kontrollvariante eins stehen durchschnittlich 63,7 und bei der chemischen Variante fünf 6 Unkräuter je Boniturbild.

### 7.2.7 Verlauf des Unkrautbesatzes von Versuchsfeld Parzelle P 04 A

Im nachstehenden Diagramm 7 ist der zeitliche Verlauf des Unkrautbesatzes auf der Spätsaat 2011 dargestellt. Beim Betrachten des Diagramms fällt zunächst, verglichen mit der Frühsaat auf Schlag 25, der deutlich höhere Unkrautbesatz zu Beginn der Versuche auf. Der Unkrautbesatz variiert zwischen 90 und 150 Unkräutern je Bild. Ebenfalls deutlich ist, dass nach dem ersten und zweiten Hackdurchgang wesentlich mehr Unkräuter erneut auflaufen. Nach dem ersten Hacktermin ist der Unkrautbesatz der Varianten zwei, drei und vier zwischen 89 und 93 % verringert. Dabei besteht zwischen den Versuchsgliedern kein signifikanter Unterschied. Beim zweiten Versuchsdurchlauf stellt sich der höchste Regulierungserfolg bei Variante drei mit 88 % ein. Die Varianten zwei und vier weisen einen Regulierungserfolg von 54 beziehungsweise 80 % auf. Hierbei unterscheidet sich Variante zwei höchst signifikant von den Varianten drei und vier. Ebenfalls signifikant unterscheiden sich Variante drei und vier voneinander. Beim dritten Durchgang liegen die Varianten drei und vier mit 87,5 beziehungsweise 89 % nahezu gleichauf. Aus diesem Grund besteht hier kein statistischer Unterschied. Höchst signifikant hingegen ist der Unterschied der Variante zwei mit 74 % gegenüber den Versuchsgliedern drei und vier.



**Diagramm 7:** Verlauf des Unkrautbesatzes auf Versuchsfeld Parzelle P 04 A

Nach Durchführung des letzten Hackdurchgangs stehen bei Variante eins durchschnittlich 140,3, bei Variante zwei 10,3, bei Variante drei 6,1 und bei Variante vier 3,2 Unkräuter je Boniturbild. Bei Variante fünf stehen durchschnittlich noch 84,3 Unkräuter pro Bild.

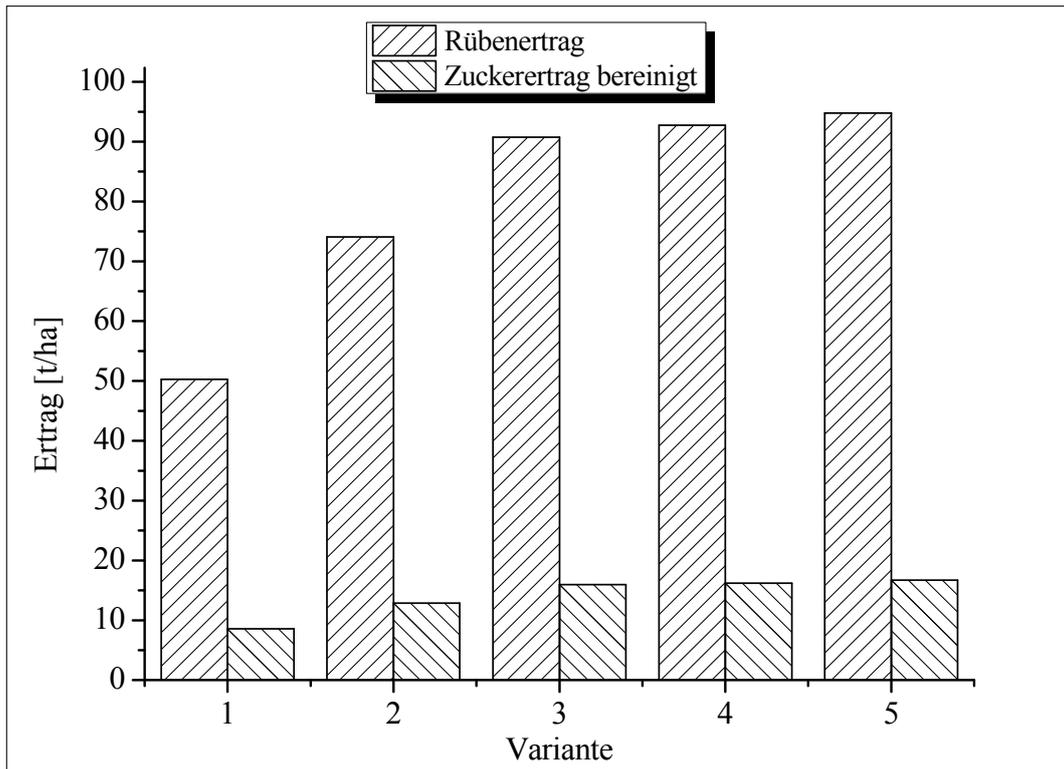
### **7.2.8 Ertragsdaten Schlag 25**

Diagramm 8 enthält die über fünf Wiederholungen einer Variante gemittelten und auf Tonnen je Hektar umgerechneten, Ergebnisse der Kernparzellenrodung. Neben den Rübeneträgen ist, als ausschlaggebendes Merkmal, der bereinigte Zuckerertrag der jeweiligen Variante ebenfalls in Tonnen je Hektar abgebildet. Die Rübeneträge der einzelnen Varianten sind jeweils in der linken Säule des Diagramms dargestellt. Die rechte Säule enthält den dazugehörigen bereinigten Zuckerertrag.

Den höchsten Rübenertrag erzielt Variante fünf mit durchschnittlich 94,8 t/ha. Danach folgen die Varianten vier mit 92,8 t/ha und drei mit 90,8 t/ha. Variante zwei hat einen Ertrag von 74 t/ha und die Kontrollvariante eins einen Rübenertrag von 50,3 t/ha.

Ein ähnliches Bild zeigt sich beim bereinigten Zuckerertrag. Hier liegen die Varianten fünf, vier und drei mit 16,74, 16,24 sowie 16,01 t/ha dicht beieinander. Anschließend folgen mit größerem Abstand die Varianten zwei mit 12,89 t/ha und eins mit 8,57 t/ha.

Die Rübeneträge sowie die bereinigten Zuckererträge unterscheiden sich bei den Varianten drei, vier und fünf nicht signifikant voneinander. Lediglich die Varianten eins und zwei unterscheiden sich signifikant voneinander sowie ebenfalls signifikant von den drei anderen Varianten.



**Diagramm 8:** Ertragsdaten Schlag 25

Zusätzlich zu den Ertragsdaten sind in Tabelle 7 die Kalium-, Natrium- und Amino-N-Gehalte sowie der ausbeutbare Zuckergehalt und der Standardmelasseverlust der Versuchsglieder angegeben.

**Tabelle 7:** Darstellung der gemittelten Werte der Rübeninhaltsstoffe (Schlag 25)

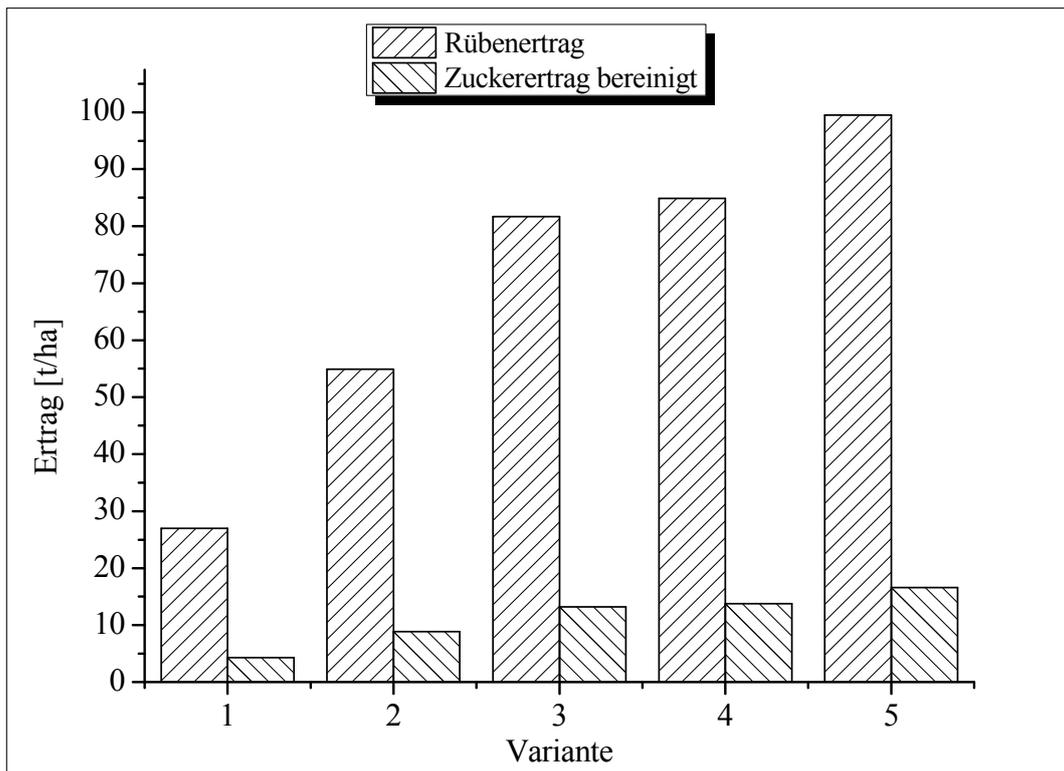
	Ausbeutbarer Zucker (in %)	SMV (in %)	in mmol/1000g Rüben		
			Kalium	Natrium	$\alpha$ -Amino N
Variante eins	91,41	0,99	31,6	1,6	4,8
Variante zwei	91,36	1,04	33,4	1,4	5,8
Variante drei	91,58	1,02	32,9	1,4	5,5
Variante vier	91,45	1,04	33,3	1,4	5,8
Variante fünf	91,59	1,02	32,2	1,3	5,9

Der prozentuale Anteil des ausbeutbaren Zuckers vom Gesamtzuckergehalt schwankt über die fünf Varianten hinweg zwischen 91,36 und 91,59 %, keine der Varianten unterscheidet sich dabei signifikant von den anderen. Die Ergebnisse des Standardmelasseverlusts (SMV) variieren auf Schlag 25 zwischen 0,99 und 1,04 %. Beim SMV unterscheidet sich Variante eins signifikant von allen anderen Varianten. Die Kaliumgehalte der Varianten zwei, drei und vier (33,4, 32,9 und 33,3 mmol/1000g Rüben) unterscheiden sich nicht voneinander, die der Varianten eins und fünf (31,6 und 32,2 mmol/1000g Rüben) unterscheiden sich signifikant von den restlichen Varianten. Beim Natriumgehalt gibt es lediglich einen signifikanten Unterschied der Variante eins mit 1,6 mmol/1000g Rüben gegenüber den restlichen Versuchsgliedern (1,3 – 1,4 mmol/1000g Rüben). Darüber hinaus unterscheidet sich Variante eins bezüglich des  $\alpha$ -Amino-N-Gehalts mit 4,8 mmol/1000g Rüben von den Varianten zwei, vier und fünf (5,8 – 5,9 mmol/1000g Rüben) signifikant.

### **7.2.9 Ertragsdaten Parzelle P 04 A**

Die ermittelten Ertragsergebnisse der Parzelle P 04 A sind in Diagramm 9 grafisch dargestellt. Auf dem Versuchsfeld Parzelle P 04 A lieferte Variante 5 mit 99,5 t/ha den höchsten Ertrag. Parallel zur Versuchsanlage auf Schlag 25 folgen darauf die Varianten drei und vier mit einem Ertrag von 81,7 sowie 84,9 t/ha. Daraufhin folgen Variante zwei mit 54,9 und Variante eins mit 27 t/ha. Ein ähnliches Bild bietet sich beim bereinigten Zuckerertrag, dort führt wiederum Variante fünf mit einem bereinigten Zuckerertrag von 16,58 t/ha. Danach folgen die Varianten drei und vier mit jeweils 13,2 beziehungsweise 13,73 t/ha. Der bereinigte Zuckergehalt der Varianten zwei und eins beträgt je 8,87 beziehungsweise 4,28 t/ha.

Beim Rübenenertrag unterscheiden sich die Varianten eins, zwei, drei und fünf signifikant voneinander. Des Weiteren unterscheidet sich Variante fünf signifikant von Variante vier. Die Varianten drei und vier unterscheiden sich nicht signifikant voneinander. Das Gleiche gilt für den bereinigten Zuckerertrag. Hierbei unterscheiden sich lediglich die Varianten drei und vier nicht signifikant voneinander. Bei den Varianten eins, zwei, drei und fünf sowie zwischen vier und fünf besteht ein signifikanter Unterschied.



**Diagramm 9:** Ertragsdaten Parzelle P 04 A

Zusätzlich zu den bereits genannten Ertragsparametern beinhaltet Tabelle 8 wiederum die Analyseergebnisse.

**Tabelle 8:** Gemittelte Werte Zuckerrübeninhaltsstoffe (Kalium, Natrium, Amino-N), Standartmelasseverlust und ausbeutbarer Zucker (Parzelle P 04 A)

	Ausbeutbarer Zucker (in %)	SMV (in %)	in mmol/1000g Rüben		
			Kalium	Natrium	$\alpha$ -Amino N
Variante eins	89,97	1,14	34,4	3,8	8,3
Variante zwei	90,10	1,17	36,3	3,1	8,8
Variante drei	90,07	1,18	36,7	2,8	9,5
Variante vier	90,12	1,17	37,7	2,8	8,7
Variante fünf	90,31	1,19	39,0	2,4	8,8

Weder bei den Werten des ausbeutbaren Zuckers (89,97 – 90,31 %) noch bei denen des Standardmelasseverlustes (1,14 – 1,19 %) gibt es signifikante Unterschiede. Jedoch unterscheidet sich beim Kaliumgehalt die Variante fünf mit 39 mmol/1000g Rüben signifikant von den Varianten zwei mit 36,3 und eins mit 34,4 mmol/1000g Rüben. Zusätzlich unterscheidet sich Variante eins signifikant von Variante vier (37,7 mmol/1000g Rüben). Bei den Varianten zwei, drei (36,7 mmol/1000g Rüben) und vier gibt es keine Unterschiede bezüglich des Kaliumgehalts. Darüber hinaus unterscheidet sich Variante fünf hinsichtlich des Natriumgehalts von den Varianten zwei und eins. Zudem gibt es einen signifikanten Unterschied zwischen der Variante eins und den restlichen Versuchsgliedern. Beim  $\alpha$ -Amino-N Gehalt unterscheidet sich lediglich Variante eins von Variante drei signifikant.

### 7.2.10 Ergebnisse der Positionserkennung

In den folgenden Tabellen 9 und 10 sind die Auswertungen der Positionsbestimmung dargestellt. Auf Schlag 25 variiert die Anzahl der richtig erkannten Pflanzenpositionen zwischen 90,6 und 96,2 %.

**Tabelle 9:** Auswertung der Bildverarbeitung auf Schlag 25

	BBCH Stadium	Anteil richtig erkannter Zuckerrübenpflanzen (in %)
1. Hackdurchgang	10	90,6
2. Hackdurchgang	12	96,2
3. Hackdurchgang	14	92,8

Ein ähnliches Ergebnis zeigt sich auf dem Versuchsfeld P 04 A. Hier sind jedoch aufgrund eines Datenverlustes die Bilder des dritten Hackdurchgangs verloren gegangen. Die als richtig erkannte Positionierung schwankt zwischen 88,2 und 94,6 %.

**Tabelle 10:** Auswertung der Bildverarbeitung auf Parzelle P 04 A

	BBCH Stadium	Anteil richtig erkannter Zuckerrübenpflanzen (in %)
1. Hackdurchgang	10	88,2
2. Hackdurchgang	12 – 14	94,6
3. Hackdurchgang	14 – 16	Verlust der Bilder

### 7.3 Diskussion der Ergebnisse 2011

Im nachstehenden Abschnitt erfolgt die Diskussion der Ergebnisse des Versuchsjahres 2011. Die Durchführung der Feldversuche diente zum einen der Bewertung des Prototyps an sich. Darüber hinaus sollten die Versuche zeigen, wie sich die Maschine im Vergleich zum chemischen Pflanzenschutz des konventionellen Zuckerrübenanbaus schlägt. Ziel der Versuche war es ebenfalls herauszufinden, ob sich bei dem Einsatz einer selektiv arbeitenden Reihenhackmaschine Auswirkungen in Bezug auf den Handarbeitsaufwand ergeben. Des Weiteren sollte durch die Versuchsanstellung geklärt werden, inwiefern sich der Einsatz des Prototyps auf die Bestandesdichte der Zuckerrüben und somit auf den späteren Ertrag auswirkt. Zudem stand zur Klärung, ob beziehungsweise unter welchen Umständen auf eine manuelle Unkrautregulierung durch das Verwenden einer Reihenhackmaschine gänzlich verzichtet werden kann. Als letzte Versuchsfrage stand der Vergleich des Einsatzes verschiedenster mechanischer Regulierungsverfahren mit dem konventionell chemischen Verfahren im Raum. Dort war zu klären, wie sich unterschiedliche mechanische Regulierungsverfahren im direkten Wettbewerb zur chemischen Unkrautkontrolle schlagen. Zum besseren Verständnis der nachstehenden Diskussion sind in unten stehender Tabelle 3 noch einmal die einzelnen Versuchsvarianten erläutert.

**Tabelle 3:** Versuchsvarianten der Feldversuche 2011

Variante 1	Kontrolle, ohne Unkrautregulierung
Variante 2	Hohenheimer Hacke, Standardscharhacke
Variante 3	Handhacke, Standardscharhacke
Variante 4	Kombination aus Handhacke, Standardscharhacke, Hohenheimer Hackmaschine
Variante 5	Chemische Unkrautkontrolle

#### 7.3.1 Randparameter

Die gemessenen Werte der scheinbaren elektrischen Leitfähigkeit liegen im Bereich von lehmigen Böden und stimmen somit mit der Standortbeschreibung zu Beginn des Kapitels 7.1 überein. Sowohl die Bodentemperatur als auch die Bodenfeuchtigkeit zum Zeitpunkt der Aussaat lagen auf den Versuchsflächen oberhalb des empfohlenen Minimums von 5 °C beziehungsweise 6 % (Nørremark & Griepentrog 2004). Somit kann ein Einfluss außerhalb der jeweiligen Versuchsglieder mit großer Wahrscheinlichkeit ausgeschlossen werden.

### 7.3.2 Handarbeitsaufwand

Die ermittelten Handarbeitsdaten der Versuchsfelder Schlag 25 und Parzelle P 04 A liegen in einem vergleichbaren Umfang wie in der hinzugezogenen Literatur. *Irla et al.* (2005) erwähnt einen Handarbeitsaufwand, bei ähnlichen Versuchen aus der Schweiz, von 70 bis 140 AKh/ha. Des Weiteren erwähnt *Irla et al.* (2005) zusätzlich einen Handarbeitsaufwand aus der Praxis zwischen 90 und 340 AKh/ha. *Schwab & Thalmann* (2008) gehen bei ihren Berechnungen von etwa 130 AKh/ha aus. *König et al.* (2005) geht von einem Handarbeitsaufwand in Abhängigkeit von Verunkrautung und Witterung zwischen 80 und 150 AKh/ha und in Einzeljahren auch mehr als 200 AKh/ha aus. Mit durchschnittlichen 101 AKh/ha auf Schlag 25 und 109 AKh/ha auf Parzelle P 04 A liegt Variante vier im Vergleich mit den Zahlen der Literatur in etwa im Mittelfeld. Anders hingegen sind die Ergebnisse von Variante drei zu werten. Diese sind mit 160 und 193 AKh/ha an der Obergrenze. Laut *König et al.* (2005) sollte aus wirtschaftlichen Gründen ein Wert von 150 AKh/ha nicht überschritten werden. Dies bedeutet, dass der Einsatz der Hohenheimer Hacke in Variante vier zu einem deutlich geringeren Handarbeitsaufwand führte. So konnte in Bezug auf den Handarbeitseinsatz ein deutlicher Unterschied zu Variante drei und somit zum Standardverfahren im ökologischen Zuckerrübenanbau realisiert werden. Zum besseren Vergleich ist in Tabelle 12 eine rudimentäre Betrachtung der Wirtschaftlichkeit des unterschiedlichen Handarbeitsaufwands aufgeführt.

**Tabelle 11:** Monetäre Betrachtung des Handarbeitsaufwands der Varianten drei und vier

	Schlag 25		Parzelle P 04 A	
Variante	3	4	3	4
Ø AKh/ha	160	101	193	109
Aufwand Handarbeit (10 €/AKh)	1600	1010	1930	1090
Einsparung (€)		<b>590</b>		<b>840</b>

Beim Betrachten der Tabelle fällt auf, dass durch den Einsatz des Prototyps in Variante vier auf beiden Versuchsflächen eine Einsparung zu erkennen ist. Es wurde ein Stundenlohn für die Vergütung der Arbeitserledigungskosten der Handhacke von 10 € angenommen. Eine Kostensenkung von 590 beziehungsweise von 840 € wäre unter Anbau- und Witterungsbedingungen auf den Versuchsflächen im Jahre 2011 möglich gewesen. Diese Ergebnisse liegen weit über der Einsparung, die *Irla et al.* (2005) beschreibt. Danach belaufen sich die Einsparungen bei der Handarbeit durch den ganzflächigen Einsatz einer Yetter-Sternhacke im Nachauflauf und in Kombination mit einer Standardscharhacke für den Zwischenreihenbereich auf 15 bis 25 %. Zudem wird durch den zusätzlichen Einsatz eines Rollstriegels innerhalb der Zuckerrübenreihe in Kombination mit der Scharhacke von einer Reduzierung des Handarbeitsaufwands von 20 bis 40 % (Kern 2007) berichtet.

Die Gründe für die Einsparung der Handarbeit durch den Einsatz der Hohenheimer Hacke liegen darin, dass bei der Unkrautregulierung innerhalb der Kulturreihe wesentlich weniger Zeit für das Beseitigen von Unkräutern zwischen den Zuckerrübenpflanzen benötigt wurde. Da die Fläche innerhalb der Reihe mit der Hohenheimer Hackmaschine vorgearbeitet wurde, müssen lediglich die Unkräuter im unmittelbaren Umfeld der Zuckerrüben beseitigt werden. Dies ist bei Variante drei nicht der Fall, da hier ebenfalls Unkräuter im Zwischenraum zweier Rüben entfernt werden müssen, entsteht somit eine wesentlich größere Fläche.

### 7.3.3 Bestandesdichte

Der Feldaufgang zu Beginn der Versuchsdurchläufe lag auf beiden Versuchsfeldern auf einem sehr hohen Niveau. Auf Schlag 25 schwankte der Aufgang zwischen 93 und 95 %. Das entspricht einer Bestandesdichte, bei einer Aussaatstärke von 100000 Rübenpillen je Hektar, von 93000 bis 95000 Pflanzen je Hektar. Diese Anzahl an Zuckerrübenpflanzen deckt sich mit der empfohlenen beziehungsweise anzustrebenden Bestandesdichte von 75000 bis 100000 Pflanzen je Hektar im konventionellen Zuckerrübenanbau (König et al. 2005; Lütke Entrup & Schäfer 2011; Drangmeister 2011). Für den ökologischen Anbau gelten ähnliche Empfehlungen. Allerdings liegen hier aufgrund des ungebeizten Saatguts die Aussaatstärken zum Teil deutlich über 100000 Pflanzen je Hektar. Das für den Versuch eingesetzte zertifizierte Saatgut (Sorte Sabrina, KWS) war gebeizt. Diese Tatsache und die guten pflanzenbaulichen Bedingungen während und nach der Aussaat führten bei beiden Versuchsfeldern zu dem sehr guten Feldaufgang.

Die Bestandesdichten der Varianten zwei und vier auf den Versuchsfeldern nach Beendigung der Feldversuche lagen ebenfalls noch im Bereich der angestrebten Anzahl von Pflanzen je Hektar. Der Zuckerrübenverlust, der durch die Hackmaschine auf den Versuchsfeldern im Jahr 2011 entstanden ist, liegt demnach in einem pflanzenbaulich betrachtet noch akzeptablen Umfang.

Durch den Einsatz nicht selektiver Hacktechnik, wie beispielsweise der Yetter-Sternhacke, kam es bei Feldversuchen in der Schweiz zu Rübenverlusten in Höhe von 2 – 3 % je Überfahrt (Irla et al. 2005). Fischer (2012) berichtet von Gesamtverlusten von bis zu 13 % beim Einsatz der Yetter-Sternhacke. Diese sind vergleichbar mit den Bestandsminderungen auf dem Versuchsfeld Parzelle P 04 A mit 14,7 % bei Variante zwei und 15,7 % bei Variante vier. Lediglich Variante zwei auf Schlag 25 liegt mit 18 % leicht über den in der Literatur genannten Verlusten. Somit sind die Verluste der Feldversuche 2011 mit denen einer nicht selektiv arbeitenden Hacktechnik in etwa vergleichbar beziehungsweise leicht erhöht.

Dennoch sind diese Bestandsminderungen im Vergleich zu ähnlichen Versuchen und ebenfalls selektiv arbeitender Hacktechnik wie beispielsweise dem Robovator (Hauk 2012) deutlich höher. Hierbei kam es beim Einsatz in Salatkulturen zu keinen nennenswerten Verlusten. Auch Pérez-Ruiz et al. (2012) berichtet über keinerlei Beschädigung durch den Einsatz selektiv arbeitender Hacktechnik innerhalb der Kulturreihe bei gepflanzten Kulturen.

Jedoch erfassten Cordill & Grift (2001) bei der Anwendung einer sensorgesteuerten Hackmaschine bis zu 23 % Beschädigungen in einem Maisbestand.

Demnach gibt es einen großen Unterschied zwischen gesäten und gepflanzten Kulturen beim Kulturpflanzenverlust. Die Ergebnisse des neuen Hackmaschinenprototyps sind im Versuchsjahr 2011 somit annähernd deckungsgleich mit den Verlusten ganzflächig eingesetzter Hacktechnik. Jedoch liegen die Verluste deutlich über denen selektiv arbeitender Maschinen in Pflanzkulturen.

Aufgrund der Annahme, dass bei Variante eins und fünf nur sehr geringe Kulturpflanzenverluste auftreten, lag der Fokus bei der statistischen Auswertung auf den Varianten zwei, drei und vier.

#### **7.3.4 Unkrautbesatz**

Im nachstehenden Absatz werden die Ergebnisse des Unkrautverlaufs beider Versuchsflächen diskutiert. Die Erfassung des Unkrautverlaufs sollte dazu dienen, die Effektivität der unterschiedlichen Unkrautregulierungsmethoden zu vergleichen. Das Hauptaugenmerk lag dabei auf den Versuchsgliedern zwei, drei und vier. Besonders bei der Variante zwei sollte die Auswirkung des Verzichts auf Handarbeit auf den Unkrautverlauf geklärt werden. Auf beiden Versuchsanlagen wird dabei deutlich, dass mit voranschreitender Vegetationsperiode der Unkrautregulierungserfolg der Variante zwei sinkt. Beim ersten Hackdurchgang liegen alle Varianten nahezu gleichauf. Ab dem zweiten Hackdurchgang zeigt sich jedoch deutlich, dass die Varianten drei und vier, bei denen jeweils die Handhacke zum Einsatz kam, einen deutlich höheren und auch statistisch aussagekräftigen Regulierungserfolg aufweisen. Ein Aspekt hierbei ist die Lage der Unkräuter. Durch den Verzicht auf die Handhacke wurden auf den Parzellen von Variante zwei keine Unkräuter unmittelbar im Umfeld der Zuckerrübenpflanzen entfernt. Lediglich der Bereich, der von der Reihenhackmaschine bearbeitet wurde, blieb nahezu unkrautfrei.

Ein weiterer Aspekt für die niedrigeren Erträge nach der Spätsaat stellt die Spätverunkrautung dar. Diese war bei der Spätsaatfläche deutlich stärker ausgeprägt. Die dabei dominierenden Unkräuter waren Hirse, Schwarzer Nachtschatten sowie Weißer Gänsefuß. Die Spätverunkrautung wurde zwar durch die Aufnahme von Bildern dokumentiert, jedoch nicht weiter quantifiziert. Die Bilder zeigen jedoch einen deutlichen Unterschied bezüglich der Spätverunkrautung auf Schlag 25 und Parzelle P 04 A. Auf zuletzt genannter Versuchsfläche fiel der Bedeckungsgrad der Unkräuter je Bild höher aus.

Der Unkrautregulierungserfolg der Varianten drei und vier stimmt mit den Ergebnissen ähnlicher Verfahren überein (Dedousis et al. 2007; Haug 2012). Mit der automatischen Reihenhackmaschine Robocrop der Firma Garford, England, können laut *Dedousis et al.* (2007) bis zu 80 % der Unkräuter innerhalb der Reihe entfernt werden. Ähnliches berichtet

*Haug* (2012) von dem System Robovator der Firma F. Poulsen Engineering Aps, Hvalso, Dänemark. Bei Versuchen auf einer Salatfläche konnten mit der Maschine bis zu 95 % der Unkräuter beseitigt werden. Bei den ersten Hackdurchgängen konnte auch Variante zwei Regulierungsergebnisse von 88 beziehungsweise 89 % erzielen, dies änderte sich jedoch mit Voranschreiten der Vegetationsperiode. Die Ergebnisse des zweiten und dritten Versuchsdurchgangs lagen jeweils im Bereich von 54 bis 74 % und damit deutlich unter den Ergebnissen der beiden anderen Varianten. Durch den Einsatz der Standardhacktechnik konnte der Bereich zwischen den Kulturreihen nahezu unkrautfrei gehalten werden. Durch das manuelle Hacken bei Variante drei und vier konnten durchschnittlich ca. 30 % mehr Unkräuter entfernt werden. Bei den oben beschriebenen Versuchen von *Dedousis et al.* (2007) und *Haug* (2012) wurde ausschließlich maschinell gehackt und die Ergebnisse sind somit nur mit der Variante zwei direkt vergleichbar. Zwar schneidet der ausschließliche Einsatz maschineller Hacktechnik bei den Hohenheimer Feldversuchen ab dem zweiten Hackdurchgang deutlich schwächer ab, jedoch ist dabei zu erwähnen, dass sowohl der Robovator als auch der Robocrop für den Einsatz von gepflanzten Kulturen entwickelt wurden und nicht bei gesäten Kulturen wie der Zuckerrübe, mit dem Nachteil des heterogenen Pflanzenabstands, eingesetzt werden können. Ebenfalls ist an dieser Stelle zu erwähnen, dass die Lage der Unkräuter innerhalb des Boniturbildes nicht weiter bestimmt wurde. Bei den genannten Versuchsvarianten ist jedoch davon auszugehen, dass sich die Anzahl der Unkräuter nach den Hackdurchgängen in den meisten Fällen auf den Standort im unmittelbaren Pflanzennahbereich innerhalb der Kulturreihe bezieht.

### **7.3.5 Ertrag**

Einen deutlichen Unterschied im Ertragsvolumen weist auf beiden Versuchsfeldern Variante zwei auf. Es zeigt sich, dass der Einsatz von Standardhacktechnik und des Hackmaschinenprototyps zu einem erheblichen Minderertrag führen. Dieser geht jedoch ebenfalls mit der Einsparung der Handarbeit einher. Es zeigt sich hier deutlich, dass der Einsatz der Handhacke einen positiven Effekt auf den Rübenertrag hat. Dies ist natürlich auch mit einem höheren Kostenaufwand für die Unkrautregulierung verbunden. Durch die Versuche galt es deshalb herauszuarbeiten, ob eventuell auf den Einsatz der Handhacke verzichtet werden kann. Demnach muss die Ertragsminderung mit der Einsparung der Handarbeitskosten verglichen werden. Ist dabei der Einspareffekt der Handarbeit größer als die Erlösminderung durch den geringeren Rübenertrag, können so Rückschlüsse auf einen etwaigen Verzicht der Handarbeit gezogen werden. Solche Betrachtungen können jedoch erst

nach der Beerntung angestellt werden. Es ist nicht von vorneherein klar, wie sich die Unkrautsituation während des Vegetationszeitraums gestaltet beziehungsweise wie hoch das Unkrautpotenzial eines Schlag ist. Dies lässt sich lediglich durch eine fortwährende Beobachtung der Unkrautentwicklung entscheiden. Ähnlich wie bei der Anwendung von Pflanzenschutzmitteln gilt es, vor dem Einsatz der Handhacke die Schadschwelle der Unkräuter zu ermitteln und demnach zu handeln. Auf Schlag 25 führte der Verzicht der Handhacke in Variante zwei im Vergleich zu Variante vier zu einem Ertragsdefizit von ca. 19 t/ha beim Rübenenertrag beziehungsweise zu einem geminderten Zuckerertrag von rund 3,5 t. Verglichen mit der Nullvariante ließ sich jedoch der Ertrag lediglich durch den Einsatz von Technik um rund 24 t steigern. Dasselbe Ergebnis zeigt sich auf dem zweiten Versuchsfeld. Hier sind die Effekte ebenfalls zu erkennen. Jedoch zeigt sich bei der Nullvariante, dass ein höherer Unkrautdruck zu massiven Ertragsverlusten führt. Der Ertrag der Nullvariante auf Schlag 25 lag in etwa auf dem Niveau des durchschnittlichen Bio-Rübenenertrags mit 51,5 t/ha. Auf dem Versuchsfeld Parzelle P 04 A lag der Ertrag mit 27 t/ha deutlich darunter. Im Vergleich zur Variante mit chemischem Pflanzenschutz, der Variante mit der geringsten Konkurrenz von Unkräutern, bedeutet dies einen Ertragseinbruch von 46,8 % auf Schlag 25 beziehungsweise 73,8 % auf Parzelle P 04 A. Über ähnliche Verluste berichtet auch *Bräutigam (1997)*. Bei Untersuchungen zur Konkurrenz zwischen Unkräutern und Zuckerrüben stellte *Bräutigam (1997)* auf Parzellen mit dauerhafter Verunkrautung von Beginn der Vegetationsperiode an Ertragsverluste bis zu 77 % fest. Des Weiteren stellte *Bräutigam (1997)* fest, dass ein Auftreten von Unkrautkonkurrenz ab einem späteren Vegetationsstadium der Zuckerrüben zu keinen wesentlichen Ertragseinbußen führte. Dies deckt sich mit den Ergebnissen auf Schlag 25. Auf Parzelle P 04 A hingegen hatte das massive Auftreten einer Spätverunkrautung mit den Leitunkräutern Weißer Gänsefuß, Schwarzer Nachtschatten und Hirse einen deutlichen Einfluss auf die Ertragsentwicklung.

Das Auftreten gewisser konkurrenzstarker Leitunkräuter wie beispielsweise Weißer Gänsefuß kann laut *Wellmann (1999)* enorme Auswirkungen auf den bereinigten Zuckerertrag von Zuckerrüben haben. Eine Ertragsminderung von 4,7 % je Weißer Gänsefußpflanze/m<sup>2</sup> ist möglich. Besonders die Konkurrenz um Licht spielt eine entscheidende Rolle (*Kobusch 2003*). Außerdem beschreibt *Kobusch (2003)* standort- und jahresabhängige Effekte von Konkurrenzauswirkungen auf den Ertrag von Zuckerrüben.

Bei Betrachtung der Inhaltsstoffe fällt bei den Ergebnissen auf, dass die Nullvariante auf beiden Versuchsfeldern im Vergleich mit den restlichen Varianten einen erhöhten Natriumgehalt aufweist. Dieses Ergebnis findet sich ebenfalls bei *Bräutigam (1997)* wieder.

Er berichtet von um bis zu 20 % erhöhten Natriumwerten bei dauerhaft verunkrauteten Zuckerrüben. Des Weiteren besteht ein Unterschied zwischen den beiden Versuchsflächen. Auf Parzelle P 04 A treten höhere Kalium-, Natrium- und  $\alpha$ -Amino N-Gehalte auf als auf Schlag 25. Zudem ist der SMV dieser Fläche höher als auf Schlag 25. Die unterschiedliche Bestandesdichte der Varianten wirkt sich jedoch, wie vermutet, nicht auf die Inhaltsstoffe aus. Somit rufen der Einsatz des Hackmaschinenprototyps und die damit einhergehenden erhöhten Kulturpflanzenverluste keine Veränderung der technischen Zuckerrübenqualität hervor.

Darüber hinaus zeigt sich bei den Versuchen deutlich, dass sich ein Bestandesdichteunterschied von bis zu 18 % nicht auf den Rübenenertrag auswirkt. Auch führen die Rübenverluste des Prototyps nicht zu einer schlechteren technischen Qualität der Zuckerrüben. Eine Spätverunkrautung wirkt sich dahingegen wesentlich deutlicher auf den Rübenenertrag aus als die Anzahlreduzierung.

### **7.3.6 Bewertung Prototyp und Bildverarbeitung**

An Tagen mit diffuser Sonneneinstrahlung funktionierte die Bilderkennung durchaus zufriedenstellend. Dies wird bei der Betrachtung der Ergebnisse der Bildverarbeitung deutlich. Die Erkennungsquote von über 90 % auf Schlag 25 zeigt, dass das System durchaus in der Lage ist, die Zuckerrübenpflanzen zu erkennen und richtig zu positionieren. Dennoch traten bei der Pflanzenerkennung einige Fehler auf. Gerade bei direkter Sonneneinstrahlung kam es zu vermehrter Schattenbildung auf den Kamerabildern. Diese konnten durch den Einsatz eines Sonnenschirms vermindert werden. Zusätzlich führten lückige Bestände zu einer Fehlfunktion bei der Bildverarbeitung. Da Zuckerrüben keine einheitliche Blattausrichtung haben, ist es zum Teil schwierig, immer genau das Zentrum der Pflanze zu bestimmen. Bei unterschiedlichen Pflanzenentwicklungsstadien legte die Bilderkennung zum Teil die Priorität auf die größte Pflanze und so konnte es passieren, dass die dem Hackwerkzeug am nächsten stehende Rübe nicht richtig positioniert wurde. In der Folge wurde das Hackwerkzeug nicht präzise genug angesteuert und eine Rübe wurde beschädigt oder sogar ausgerissen. Außerdem muss die Hackmaschine immer präzise in der Mitte der Kulturreihe gehalten werden, was dem Traktorfahrer sowie dem Steuermann des Schmotzer-Hackrahmens nicht immer gelang.

Zusätzlich kam es zu technischen Problemen bei der Tiefenführung. Aufgrund der nicht ausbalancierten Gewichtsverteilung des Parallelogramms verkantete sich ab und zu der Spindeltrieb. Dadurch fiel die Tiefenführung mehrmals aus. Diesem Umstand konnte durch eine regelmäßige Schmierung des Spindeltriebs sowie durch veränderte Motoreinstellungen Abhilfe geschaffen werden.

Der hohe Unkrautbesatz von Parzelle P 04 A mit durchschnittlich bis zu 135 Pflanzen/m<sup>2</sup> wirkte sich kaum auf die Positionierung der Bildverarbeitung aus. Auch unter diesen Bedingungen war eine Erkennung von 88 % der Zuckerrüben möglich.

Zusammenfassend lässt sich die Aussage treffen, dass der erste Prototyp einer Hackmaschine mit elektrischem Hackwerkzeugs- und Tiefenführungsantrieb ein insgesamt gutes Ergebnis erzielte.

Als sehr umständlich und wenig praktikabel hingegen gestaltete sich der ständige Umbau des einreihigen Prototyps während der Hackdurchgänge. Jede Parzelle bedurfte im Endeffekt einer dreimaligen Überfahrt. Zudem musste im Anschluss der Durchgänge des Prototyps dieser vom Trägerrahmen getrennt und die normalen Hackparallelogramme für Unkrautregulierung zwischen den Reihen montiert werden, da aufgrund von Lieferschwierigkeiten eine zugesagte Hackmaschine der Firma Schmotzer nicht geliefert werden konnte.

Nach den Versuchen stand fest, dass ein mehrreihiger Ausbau des Prototyps zu erfolgen hatte.

## 8 Feldversuche 2012

### 8.1 Material und Methode

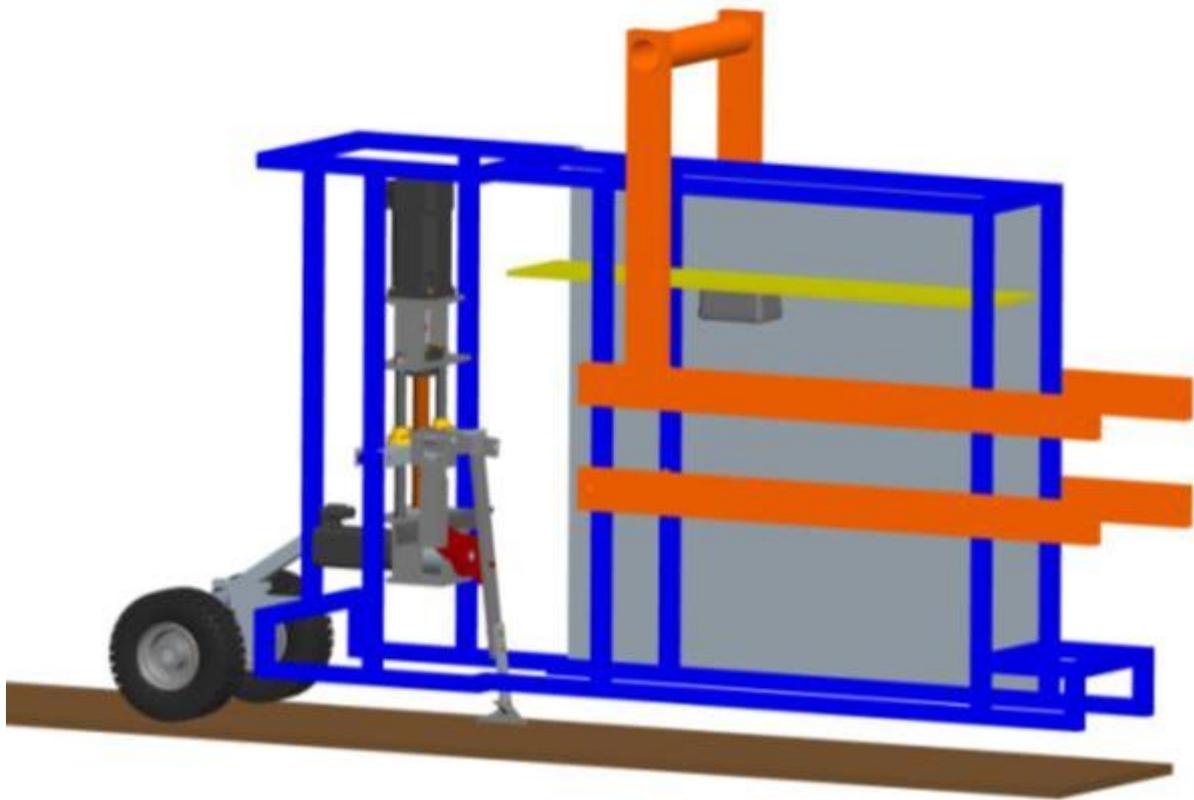
Resultierend aus den Ergebnissen der Feldversuche 2011 wurden einige Komponenten ausgewechselt beziehungsweise komplett neu entwickelt. Aufgrund der Probleme mit der direkten Sonneneinstrahlung wurde die Entscheidung getroffen, ein komplett neues Parallelogramm zu konstruieren. Bislang wurde auf den Einsatz einer künstlichen Beleuchtung bewusst verzichtet, um Bilder unter realen Bedingungen aufzunehmen. Im Zuge der Weiterentwicklung wurde nach umfangreicher Informationsbeschaffung dazu übergegangen, definierte Lichtverhältnisse in Kombination mit einer Art Dunkelkammer zu schaffen. Durch diese Entwicklung konnte die Bildaufnahmequalität durch ungünstige Lichtverhältnisse nicht mehr negativ beeinträchtigt werden. Ebenfalls konnten somit Probleme durch Schattenbildung in den Bildern verhindert werden. Da sich der für die Bildverarbeitung benötigte Bildausschnitt vor dem Hackwerkzeug befindet, mussten sowohl dieser Bildbereich als auch das Hackwerkzeug samt Antrieb in einem vom Sonnenlicht abgeschirmten Parallelogramm untergebracht werden. Zusätzlich wurde der Bildausschnitt von 75 auf 125 cm verlängert. Dadurch sind bei einer Saatgutablage von 20 cm statt seither durchschnittlich drei nun bis zu sechs Rüben im Bildbereich sichtbar. Für die Umsetzung der Dunkelkammer wurde eine Rahmenkonstruktion (diese ist in Bild 51 blau dargestellt) als Basis für die Pflanzenerkennung und die mechanische Unkrautregulierung entwickelt. Die Rahmenkonstruktion wurde in zwei Bereiche unterteilt. In Fahrtrichtung betrachtet im vorderen Bereich wurden die Kamera und die Beleuchtung untergebracht. Im hinteren Bereich wurde das Hackwerkzeug zusammen mit der Tiefenführung integriert. Hierfür wurden die im vorherigen Entwicklungsabschnitt getrennten Baugruppen Tiefenführung und Hackwerkzeug in einer gemeinsamen Baugruppe zusammengeführt.



**Bild 50:** Zusammengeführte Baugruppe Tiefenführung und Hackwerkzeug

Die Breite der Rahmenkonstruktion des neuen Parallelogramms durfte ein gewisses Maß nicht überschreiten, da eine zweireihige Version der Hackmaschine geplant war. Beide Parallelogramme sollten nebeneinander zwei Kulturreihen bearbeiten und dies unabhängig vom Reihenabstand (45 oder 50 cm).

An der Baugruppe Tiefenführung wurde an die vorherige Position des Tiefenführungsrad (siehe Bild 44) nun der Hackwerkzeugantrieb und das Hackwerkzeug montiert. Die neu entstandene funktionale Einheit von Tiefenführung und Hackwerkzeug ist in Bild 50 dargestellt. Diese neue Baugruppe wurde in die Parallelogrammkonstruktion integriert (siehe Bild 51). Die Rahmenkonstruktion wird über die Parallelogrammführung (in Bild 51 orange dargestellt) mit dem Schotzer-Arbeitsrahmen verbunden. Die gesamte Konstruktion wird durch eine Pendelachse im Heck parallel zur Bodenoberfläche geführt. Die Achse verfügt über einen Anschlag, mit dessen Hilfe das Aufsitzen des Basisrahmens auf der Bodenoberfläche verhindert wird (siehe Bild 51).



**Bild 51:** Neues Parallelogramm mit Dunkelkammer und integrierter Baugruppe  
Hackwerkzeug/Tiefenführung

Durch eine Art Galgenkonstruktion kann das auf der Pendelachse lastende Gewicht mittels eines Kettenspanners sowie einer Feder variiert werden. Zudem wird das gesamte Parallelogramm beim Ausheben des Schmotzer-Rahmens durch die Galgenkonstruktion fixiert (siehe Bild 52). Damit die Feder beim Ausheben des Parallelogramms keine Überdehnung erfährt, schränkt eine parallel zur Feder gespannte Kette deren Ausdehnung ein. Durch die Anordnung von Kette und Feder wird das Parallelogramm im ausgehobenen Zustand bei Unebenheiten im Feld oder während des Transports auf der Straße vor starken Erschütterungen geschützt. Die komplette Rahmenkonstruktion (siehe Bild 51) wurde mit Aluminiumblech verkleidet. Die ursprünglich geplante Holzverkleidung musste aus Gewichtsgründen durch Aluminiumblech ersetzt werden, da das Gewicht pro Reihe bei über 150 kg lag.

Durch die Aluminiumblechverkleidung entsteht die für die Bilderkennung erforderliche Dunkelkammer. Im Bereich der Kamera und der Beleuchtung ist diese fest an den Rahmen angeschraubt. Der hintere Bereich mit Tiefenführung und Hackwerkzeugantrieb muss jedoch für Wartungs- und Reparaturarbeiten frei zugänglich sein. Die Lösung besteht aus einem abnehmbaren Deckel und zwei abnehmbaren Seitenverkleidungen. Um einen schnellen und werkzeuglosen Zugriff zu ermöglichen, werden der Deckel und die Seitenverkleidungen

mithilfe von Haken und Gummiseilen mit den fest am Rahmen verschraubten Verkleidungseinheiten verspannt.



**Bild 52:** Parallelogramme in ausgehobenem Zustand mit Galgenkonstruktion

Zusätzlich zur Aluminiumverkleidung sind am unteren Ende des Rahmens auf dem Boden aufsitzende, flexible Gummistreifen angebracht. Dadurch fällt bei der Überfahrt auf dem Feld so wenig Licht wie möglich von außen in den Bildausschnitt ein. Zusätzlich dazu befindet sich in der Front und im Heck des Basisrahmens eine Lichtschleuse aus sich überlappenden Gummimatten. Diese Matten sind aus einem dünnen und äußerst flexiblen Gummi, um die Rübenpflanzen nicht zu beschädigen. Jedes der beschriebenen Parallelogramme besteht aus über 150 Einzelteilen.

### **8.1.1 Veränderungen der Bildaufnahmetechnik**

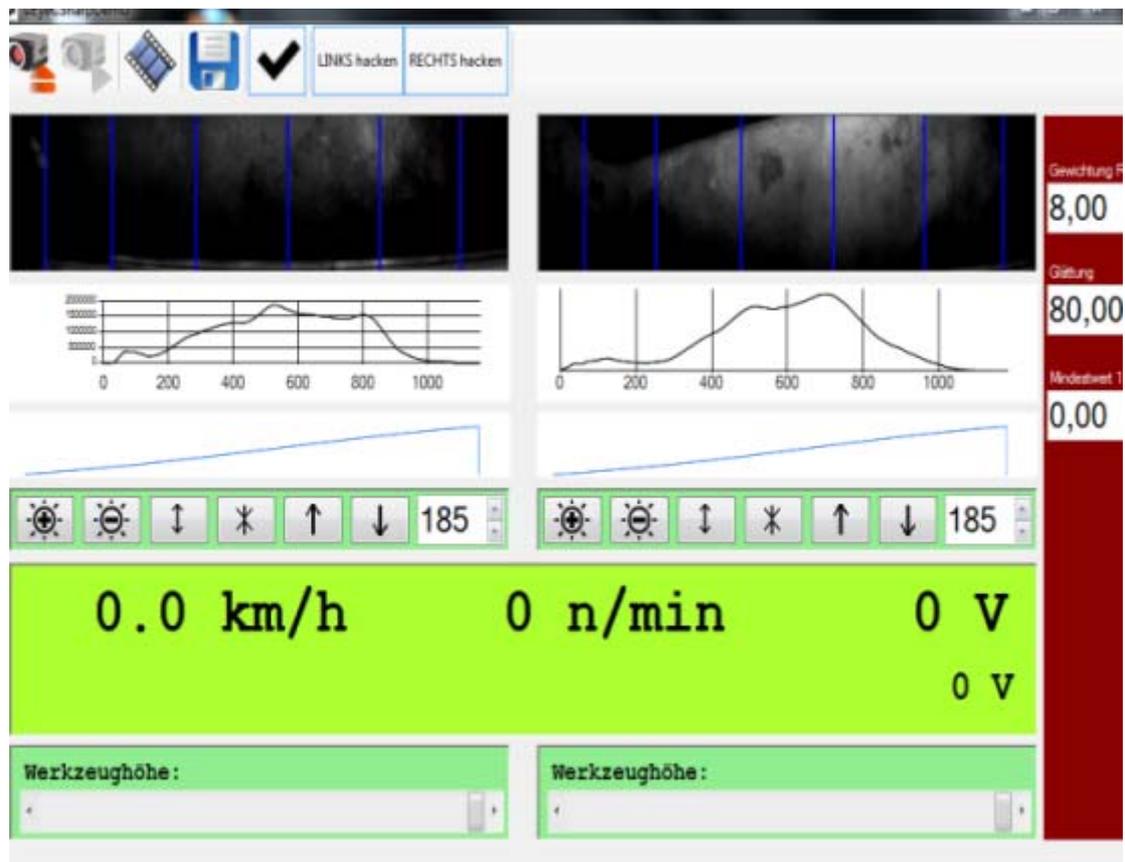
Die CCD-Kameratechnik wurde durch eine CMOS-Kamera ersetzt. Um den Kontrast zwischen Boden und Pflanze zu maximieren, wurde zusätzlich zu der Dunkelkammer eine Infrarot-LED-Beleuchtung installiert. Der Einsatz der LED-Beleuchtung wurde nicht auf Dauerbetrieb, sondern mit einer gewissen Voreilung vor der Bildaufnahme pulsierend eingestellt.

### **8.1.2 Zweiter Projektabschnitt 2012**

Nach Fertigstellung der zweireihigen Hackmaschine fand die Erprobung des neuen Funktionsmusters in zahlreichen Versuchen zur Inbetriebnahme statt. Dabei wurden in mehreren Versuchsreihen auch das neue Bildverarbeitungsprogramm, die neue Kamertechnik und die Bedienoberfläche im TFT-Monitor überprüft und Einstellungen optimiert.

### **8.1.3 Bedienung der Hackmaschine**

Für die zweireihige Hackmaschine musste die Bedienoberfläche des Programms sowie des elektrischen Antriebs angepasst werden. Aus den Erfahrungen des Vorjahres wurden zusätzliche Funktionen in die Anzeige der Bedienoberfläche eingefügt. Der jeweilige Bildausschnitt beider Kameras kann in der Bedienoberfläche bezüglich der Bildbreite an das Vegetationsstadium der Zuckerrüben angepasst werden. Die Breite des Bildausschnitts muss so gewählt werden, dass die gesamte Zuckerrübenpflanze erfasst wird. Zusätzlich kann der Bildausschnitt in Fahrtrichtung nach rechts und links verschoben werden. Somit kann eine virtuelle Korrektur der Reihenmitte durchgeführt werden, ohne dabei die Kameras physisch verschieben zu müssen. Im Menübereich befinden sich in der oberen Menüleiste Schaltflächen (virtuelle Tasten) zur Aktivierung der Kameras, für die Umstellung auf ein Live-Bild, zur Auswahl des Speicherorts der Kamerabilder, zum Hinzuschalten verschiedener Bildverarbeitungsfilter sowie zur Aktivierung und zum Abschalten des elektrischen Antriebs eines der beiden Hackwerkzeuge. Mit der zuletzt genannten Funktion können die elektrischen Antriebsachsen jeweils eines Hackwerkzeuges ferngesteuert aus- und angeschaltet werden. Erfolgt die Abschaltung einer Hackeinheit, fährt die Tiefenführung automatisch in die oberste Position. Durch diese Stellung werden Schäden am Hackwerkzeug sowie eine ungewollte Beschädigung der Kulturpflanzen verhindert. Auch das Abschalten einer Reihe wird bei dreireihiger Versuchsanstellung benötigt. Da bei der zweiten Überfahrt nur die dritte Reihe einzeln bearbeitet wird, jedoch beide Parallelogramme die Versuchsreihen überfahren, kann eine Reihe über die Bedienoberfläche deaktiviert werden. Unter der oberen Menüleiste liegt die Anzeige der aktuellen Kamerabilder mit Anlage der Abstandsschablone. Dies ist in Bild 53 mit blauen Streifen im Bildmenü angezeigt. Darunter befindet sich die Maxima-Kurve, welche die Verteilung der hellen und dunklen Bildbereiche anzeigt. Für die Umrechnung der Pixel in das metrische System wird eine Umrechnungsskala mit Interpolation verwendet.



**Bild 53:** Bedienoberfläche zweireihige Maschine

Im Bereich der Kamerabedienung erfolgt neben der lateralen Anpassung an die Kulturreihe und der Breite des Bildausschnitts noch die Änderung der Belichtungszeit beziehungsweise die Anpassung der Helligkeit der Bilder. In den Numeric-up-down-Boxen (hierbei sind die Kästchen mit dem Wert 185 des Bildes 53 gemeint) wird die Saatgutablage in Millimetern eingegeben. Die Anzeige in dem hellgrünen Bereich beinhaltet die wichtigsten Kennzahlen der Leistungselektronik und der Hackmaschine.

Diese sind im Einzelnen:

- Fahrtgeschwindigkeit in km/h
- Zapfwellenumdrehung
- Spannung, die am Zwischenkreis anliegt
- Spannung Steuerkreis

Im unteren Menübereich der Bedienoberfläche erfolgt die Eingabe der Grundwerkzeughöhe. Diese ist vom unteren bis zum oberen Anschlag der Trapezugewindespindel über einen Bereich von circa 20 cm stufenlos einstellbar.

Am rechten Bildrand der Anzeige können Parameter der Bildverarbeitung geändert werden. Von oben nach unten sind dies die Gewichtung der ersten Rübe aus der Sicht des Hackwerkzeugs, die Anzahl, über wie viele Pixel die Kurvenglättung erfolgen soll, sowie der Mindestwert, der der durchschnittlichen Größe einer Rübe im aktuellen Bildausschnitt entspricht. Mithilfe der Glättung erfolgt eine Anpassung an das BBCH-Stadium der Zuckerrüben zum Bearbeitungszeitpunkt.

#### **8.1.4 Inbetriebnahme und Vorversuche**

Zur Inbetriebnahme des zweireihigen Hacksystems wurden Versuche in einer Maschinenhalle am Institut durchgeführt. Da die Maschine durch die Neuentwicklung der Parallelogramme zu groß und zu schwer für ein Umsetzen in die Bodenrinne war, mussten die Versuche außerhalb stattfinden. Dafür wurden in einer Halle Versuchsbahnen mit Erde angelegt. Auf diese Erdbahnen wurden weiße Holzplättchen, die die Zuckerrübenpflanzen simulierten, ausgelegt. Zwei Streifen Erde wurden gerade und in einem Abstand von 50 cm zueinander auf dem Betonboden der Maschinenhalle ausgelegt. Darauf wurden weiße Holzplättchen ausgelegt, die in etwa der Größe einer Zuckerrübe mit voll entwickeltem Keimblattpaar entsprachen (siehe Bild 54 links). Auf diesem Versuchsstand wurde die Maschine das erste Mal eingesetzt.

Das Hackschar der Hackmaschine wurde für die Versuche durch einen Pinsel ersetzt (siehe Bild 54 rechts). So konnte sichtbar gemacht werden, in welchem Bereich die Erde, innerhalb der simulierten Rübenreihe, bewegt wurde.

Zur Einstellung beziehungsweise zum Kalibrieren der Software fand die Ablage der Holzplättchen in einem Abstand von 20 cm statt. Zum Überprüfen der Steuerung konnte für das Auslegen der weißen Holzplättchen auf mit dem Seilmessgerät aufgezeichnete Abstände realer Zuckerrübenreihen zurückgegriffen werden.

Die Versuche mit den neuen Parallelogrammen und der veränderten Bildverarbeitung waren sehr vielversprechend. Da die Versuche jedoch im Winter stattfanden, konnten diese lediglich mit Holzplättchen und nicht mit realen Pflanzen durchgeführt werden.



**Bild 54:** Simulierte Rübenreihen (li.); Prototyp mit Pinsel für die Vorversuche 2012 (re.)

Im Jahr 2012 wurden die Versuche aus dem Vorjahr im selben Umfang wiederholt, dieses Mal mit dem neuen, zweireihigen Prototyp.

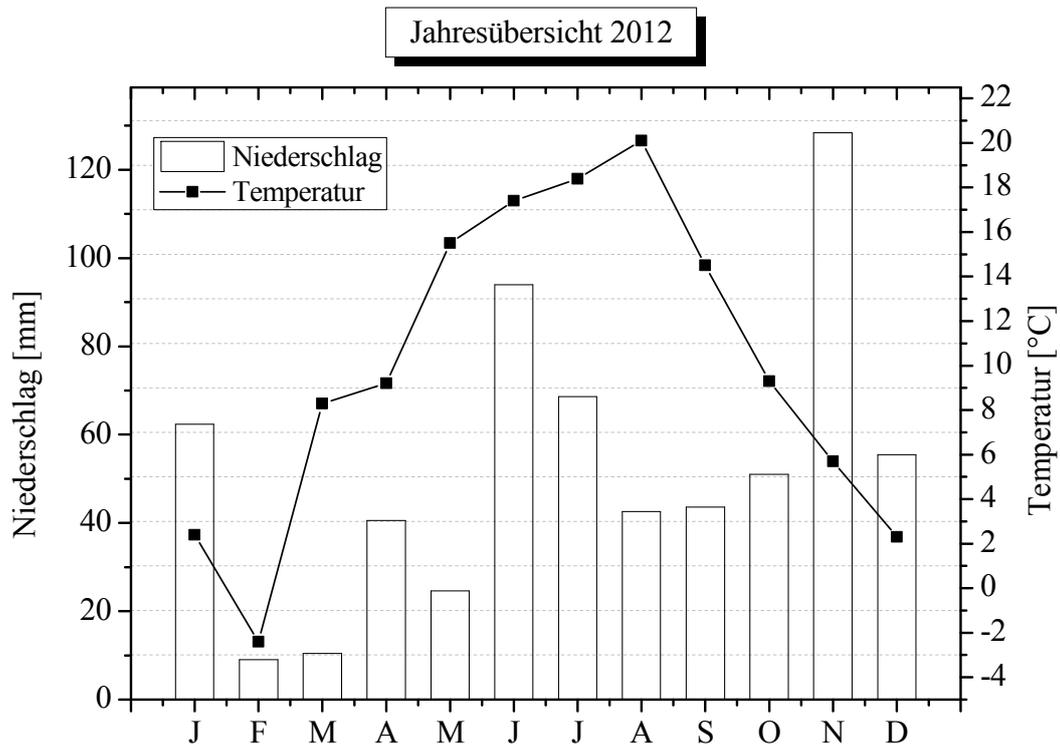
#### **8.1.5 Standortbeschreibung**

Auf zwei Standorten der Hohenheimer Versuchsstationen Heidfeldhof und Meiereihof erfolgte wiederum die Anlage der Freilandversuche. Die Lage der beiden Versuchsflächen ist in Bild 55 dargestellt. Ebenfalls sind, zufälligerweise, in dem Google-Earth-Bild die einzelnen Versuchsblöcke der Zuckerrübenversuche nach dem Abmulchen der restlichen Fläche deutlich zu erkennen. Die Versuchsflächen Parzelle P 12A des Meiereihofs sowie Schlag 9b des Heidfeldhofs befinden sich nordwestlich des Campusgeländes der Universität Hohenheim. Eine detaillierte Standortbeschreibung der Versuchsstation für Pflanzenzüchtung (Heidfeldhof) befindet sich in Kapitel 7.1.9.



**Bild 55:** Lage der Versuchsfelder 2012 (Google Earth)

Aus Diagramm 10 können die Klimadaten des Jahres 2012 entnommen werden. Dargestellt sind der Verlauf der monatlichen Durchschnittstemperatur sowie des Niederschlags. Vergleicht man diese Werte mit denen von Diagramm 1, fällt auf, dass der April 2012 eine geringere Durchschnittstemperatur aufweist, als dies im Vorjahr der Fall war. Dies hatte Auswirkungen auf den Versuch von Parzelle 12 A.



**Diagramm 10:** Darstellung des Jahresniederschlags und des Temperaturverlaufs 2012 (LTZ bw Wetter)

### 8.1.6 Versuchsaufbau

Im Wesentlichen entsprachen der Versuchsaufbau sowie die Versuchsdurchführung den in Kapitel 7.10 und 7.12 beschriebenen Versuchen des Vorjahres. Lediglich die Variantenzuweisung unterscheidet sich.

Da die Versuchssämaschine der ARGE Südwest nicht zur Verfügung stand, wurden die Versuche mit einer speziellen Einzelkornsämaschine Unicorn der Firma Kverneland ausgesät. Bei dem Gerät handelte es sich um eine sechsreihige Einzelkornsämaschine mit einem georeferenzierten Ablagesystem, ähnlich dem in *Griepentrog et al. (2005)* beschriebenen System. Da es sich bei der Maschine um einen Prototyp handelt, kann dies nicht näher erläutert werden. Um jedoch gleiche Aussatbedingungen wie im Vorjahr zu schaffen, wurde die Anordnung der Säaggregate so verändert, dass immer drei Säaggregate zwischen den Rädern des Traktors angeordnet waren. Einflüsse aufgrund von Bodenverdichtungen innerhalb der versuchsrelevanten Zuckerrübenreihen konnten so minimiert werden.

Für die Aussaat wurde ein Traktor mit RTK-Lenksystem benutzt. Die nachstehende Tabelle 13 enthält die Versuchsglieder des Versuchsfeldes Parzelle P 12A. Wie bereits erwähnt variiert die Variantenummer, jedoch nicht die farbliche Zuweisung.

**Tabelle 12:** Versuchsglieder Versuchsfeld Parzelle P 12A

Variante 1	Kombination aus Handhacke, Standardscharhacke, Hohenheimer Hacke
Variante 2	Hohenheimer Hacke, Standardscharhacke
Variante 3	Chemische Unkrautkontrolle
Variante 4	Kontrolle, ohne Unkrautregulierung
Variante 5	Handhacke, Standardscharhacke

In Tabelle 14 sind die Versuchsglieder des zweiten Versuchsfeldes Schlag 9 b aufgeführt.

**Tabelle 13:** Versuchsglieder Versuchsfeld Schlag 9b

Variante 1	Kontrolle, ohne Unkrautregulierung
Variante 2	Kombination aus Handhacke, Standardscharhacke, Hohenheimer Hacke
Variante 3	Hohenheimer Hacke, Standardscharhacke
Variante 4	Chemische Unkrautkontrolle
Variante 5	Handhacke, Standardscharhacke

Tabelle 15 enthält eine Übersicht der beiden Versuche, beginnend mit der Aussaat bis hin zur Kernrodung der Parzellen. Enthalten sind ebenfalls die verschiedenen NAKs des chemischen Pflanzenschutzes.

**Tabelle 14:** Übersicht der Versuche 2012

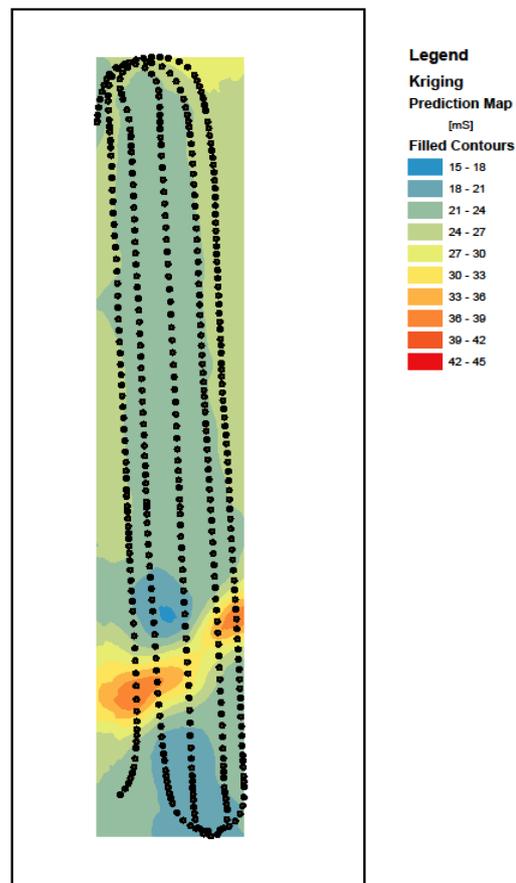
Datum	Frühsaat (Parzelle P 12 A)	Spätsaat (Schlag 9b)
23.03.2012	Aussaat (KWS Sabrina) Ablage 20 cm	
04.04.2012	Feldaufgang	
09.04.2012	1. NAK BE 1,0 + Rebell 0,8 + Oleo FC 0,5	
19.04.2012	2. NAK BE 1,25 + Rebell 1,0 + Mero 1,0	
26.04.2012		Aussaat (KWS Sabrina) Ablage 20 cm
02.05.2012	1. Hackdurchgang	
03.05.2012		Feldaufgang
08.05.2012	3. NAK BE 1,25 + GG 1,5	
10.05.2012	2. Hackdurchgang	
14.05.2012		1. NAK BE 1,0 + Rebell 0,8
15.05.2012		1. Hackdurchgang
20.05.2012	3. Hackdurchgang	
21.05.2012	Hirsebehandlung: Agil 0,75 + 0,4 Spectrum	
24.05.2012		2. Hackdurchgang
25.05.2012		2. NAK BE 1,0 + Rebell 1,0
30.05.2012	4. NAK BE 1,25 + GG 1,5 + Mero 1,0	3. Hackdurchgang
18.06.2012		Hirsebehandlung: Agil 1,0 + 0,5 Spectrum
09.07.2012	1. Fungizidbehandlung: 1,0 Spyrale	1. Fungizidbehandlung: 1,0 Spyrale
08.08.2012	2. Fungizidbehandlung: 1,0 Spyrale	2. Fungizidbehandlung: 1,0 Spyrale
02.10.2012	Beerntung	Beerntung
05.10.2012	Verladung/Abtransport nach Ochsenfurt	Verladung/Abtransport nach Ochsenfurt

## 8.2 Ergebnisse der Versuche 2012

Im nachstehenden Kapitel sind die Ergebnisse der Feldversuche des Jahres 2012 dargestellt. Beginnend mit den ermittelten Randparametern scheinbare elektrische Leitfähigkeit, Bodenfeuchte und Bodentemperatur zum Aussaatzeitpunkt. Darauf folgen dann die Ergebnisse der Feldversuche.

### 8.2.1 Randparameter Parzelle P 12A

Die Darstellung (siehe Bild 56) der ermittelten EM-38-Werte zeigt eine über weite Teile des Versuchsfeldes homogene Bodenverteilung. Lediglich in einem kleinen Bereich im unteren Teil des Versuchsfeldes weichen die gemessenen Werte von dem Bereich lehmiger Böden ab. Der Versuchsbereich lag jedoch oberhalb der markanten Stelle. Der durchschnittlich gemessene Wert liegt bei 23,69 mS/m. Die Messwerte variieren zwischen 17,81 und 45,66 mS/m.



**Bild 56:** EM-38-Bodenkarte Parzelle P 12A

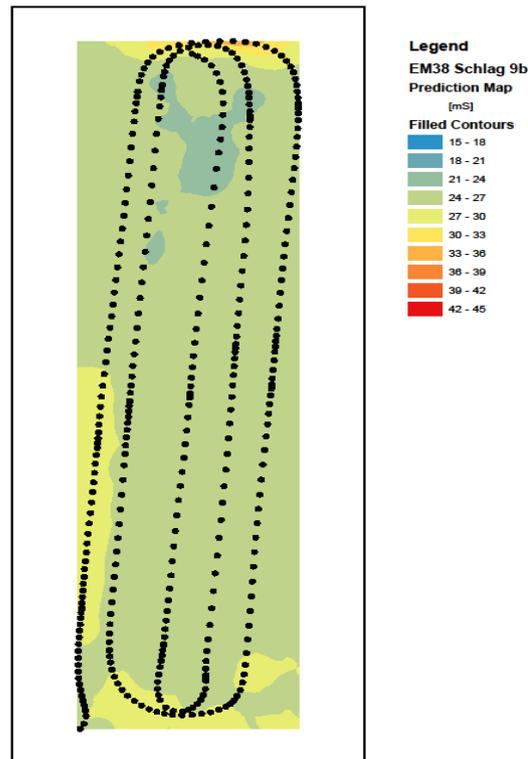
In Tabelle 16 sind zusätzlich zu den EM-38-Werten die ermittelte Bodenfeuchtigkeit und die gemessene Bodentemperatur zum Aussaatzeitpunkt dargestellt. Die Bodenfeuchtigkeit schwankt zwischen 15,73 und 36,13 %. Der Mittelwert beträgt 18,18 %. Des Weiteren variiert die Bodentemperatur zur Aussaat zwischen 8,9 und 10,1 °C, der dazugehörige Mittelwert entspricht 9,3 °C.

**Tabelle 15:** Ergebnisse Randparametererhebung Parzelle P 12A

	Einheit	Mittelwert $\bar{x}$	Min.	Max.	Standardabweichung S
EM 38	mS/m	23,69	17,81	45,66	3,312
Bodenfeuchte	%	18,18	15,73	36,13	5,09
Bodentemperatur	°C	9,3	8,9	10,1	0,31

### 8.2.2 Randparameter Schlag 9b

Die nachstehende Karte in Bild 57 zeigt die Bodenverhältnisse von Schlag 9b. Die Messwerte zeigen eine gleichmäßige Ausprägung. Der Mittelwert liegt bei 26,07 mS/m und die einzelnen Messungen schwanken zwischen 22,91 und 35,34 mS/m. Die Werte liegen damit im Sollbereich lehmiger Böden.



**Bild 57:** Bodenkarte Schlag 9b

Aus Tabelle 17 sind die Randparameter Bodenfeuchtigkeit und Bodentemperatur zum Aussaatzeitpunkt ersichtlich. Die Bodenfeuchte schwankt mit 14,29 bis 17,37 % um den Mittelwert 15,48 %.

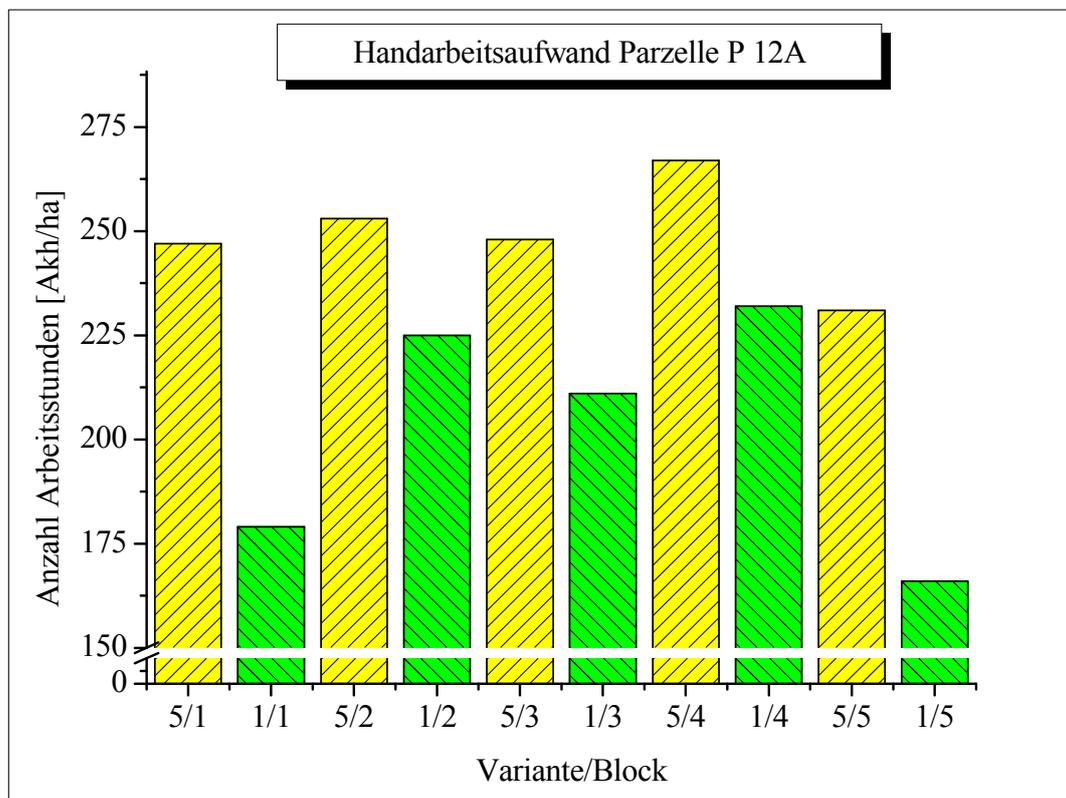
**Tabelle 16:** Ergebnisse der Randparametererhebung auf Schlag 9b

	Einheit	Mittelwert $\bar{x}$	Min.	Max.	Standardabweichung S
EM 38	mS/m	26,07	22,91	35,34	1,84
Bodenfeuchte	%	15,48	14,29	17,37	0,95
Bodentemperatur	°C	8,9	8,4	9,9	0,46

Bei der Bodentemperatur variieren die Messungen zwischen 8,4 und 9,9 °C. Der ermittelte Mittelwert liegt auch hier bei 8,9 °C.

### 8.2.3 Ergebnis des ermittelten Handarbeitsaufwandes der Versuche 2012

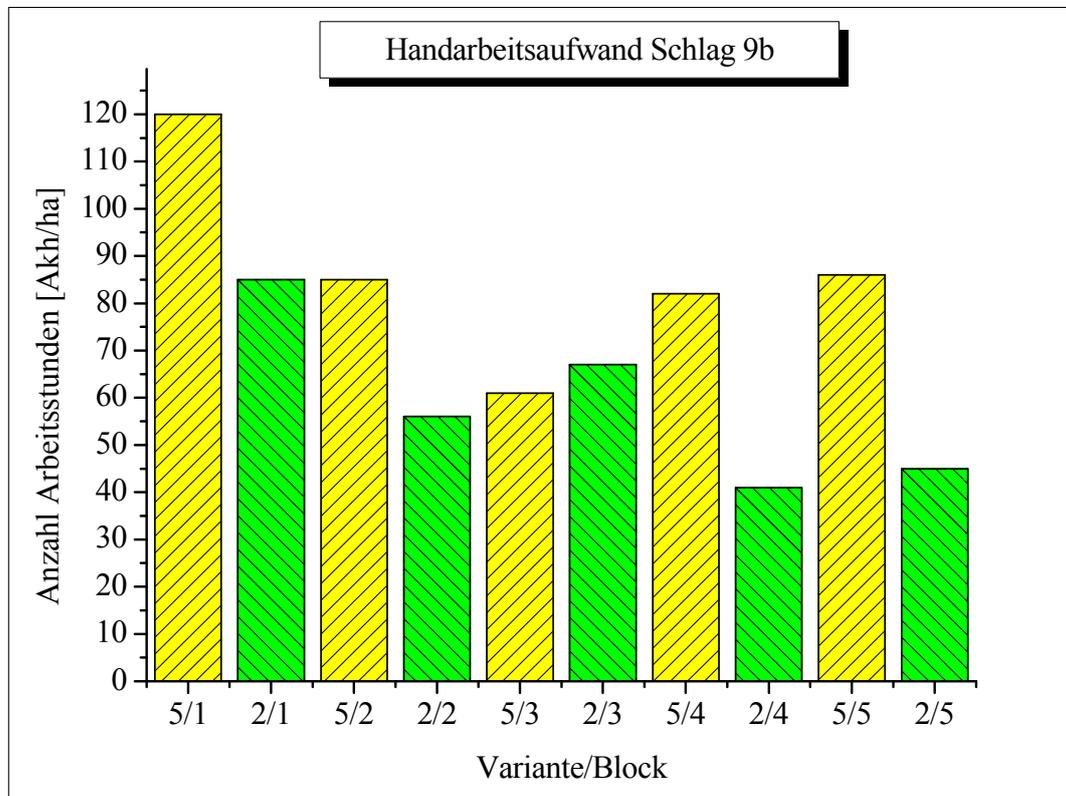
Aus Diagramm 11 können die Ergebnisse der Zeitermittlung für den Handarbeitsaufwand auf Parzelle P 12A entnommen werden. In dem Säulendiagramm sind die über die einzelnen Hackdurchgänge aufsummierten Werte der Zeiterfassung in AKh/ha dargestellt. Dabei stellt die gelbe Säule die Werte von Variante fünf und die grüne Säule die Werte von Variante eins dar. Der durchschnittliche Handarbeitsaufwand für Variante eins betrug 202,5 AKh/ha, bei Variante fünf lag dieser bei 249,3 AKh/ha. Dies entspricht bei Variante eins einem Minderaufwand an Handarbeit von durchschnittlich 19 % beziehungsweise 46,8 AKh/ha gegenüber Variante fünf. Beide Varianten unterscheiden sich somit höchst signifikant voneinander. In Diagramm 11 ist dies zu erkennen: Beide Varianten zeigen über die fünf Wiederholungen hinweg eine Differenz.



**Diagramm 11:** Darstellung des benötigten AKh/ha-Einsatzes auf Parzelle P 12A

Die Ergebnisse der Handarbeitserfassung auf Schlag 9b sind in Diagramm 12 abgebildet. Der über die drei Hackdurchgänge und fünf Wiederholungen hinweg gemittelte Handarbeitsaufwand beträgt für Variante fünf 88 AKh/ha und für Variante zwei 59 AKh/ha. Der höchste Wert liegt bei Variante 5 in Block 1 mit 120 AKh/ha. Ebenfalls gut zu erkennen ist, dass mit der Ausnahme von Wiederholung drei Variante fünf einen höheren Handarbeitsaufwand als Variante zwei aufweist. Die durchschnittliche Differenz der beiden

Varianten beläuft sich auf 29 AKh/ha. Statistisch betrachtet unterscheidet sich der durchschnittliche Arbeitsaufwand von Variante fünf hochsignifikant von dem der Variante zwei. In Prozent ausgedrückt ist der Arbeitsaufwand bei Variante zwei um 33 % geringer als bei Variante eins.

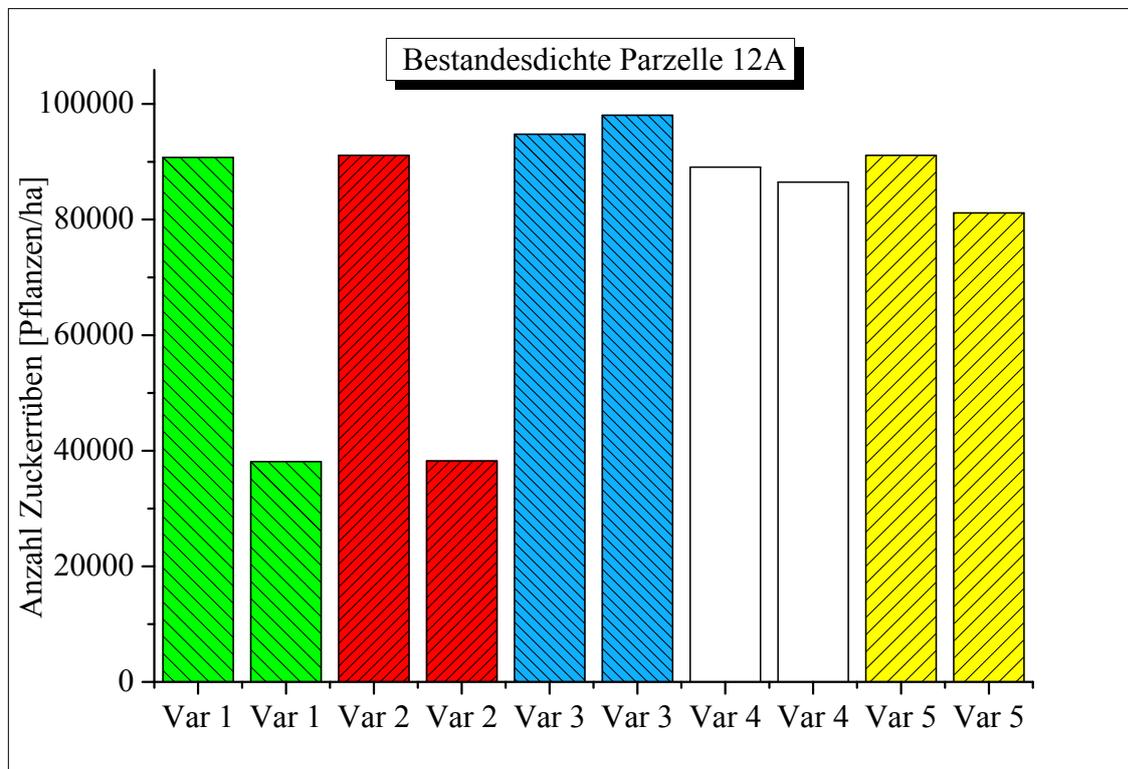


**Diagramm 12:** Darstellung des benötigten AKh/ha-Einsatzes auf Schlag 9b

#### 8.2.4 Bestandesdichte und Kulturpflanzenverluste

Zu Beginn der Versuchsreihe auf Parzelle P 12A war der Zuckerrübenfeldaufgang über alle Varianten hinweg homogen. Der Feldaufgang schwankt zwischen 89000 und 94000 Pflanzen je Hektar. In Diagramm 13 sind die Bestandesdichten vor und nach den Versuchen abgebildet. Die linke Säule des Diagramms stellt die Bestandesdichte zu Beginn, die rechte Säule die Anzahl Kulturpflanzen nach Abschluss der Versuche dar. Beim Anblick des Diagramms ist bei den Varianten eins und zwei eine auffallende Differenz zwischen der Bestandesdichte vor und nach den Hackversuchen zu erkennen. Bei beiden Varianten stehen zum Abschluss noch hochgerechnet 38667 Zuckerrüben auf dem Hektar. Die Verluste von Variante eins belaufen sich demnach auf 57,9 %, die von Variante zwei auf 58,3 %. Beide Varianten unterscheiden sich statistisch nicht signifikant voneinander. Jedoch besteht ein signifikanter Unterschied zwischen den Varianten eins und zwei gegenüber fünf. Variante fünf weist einen Endbestand

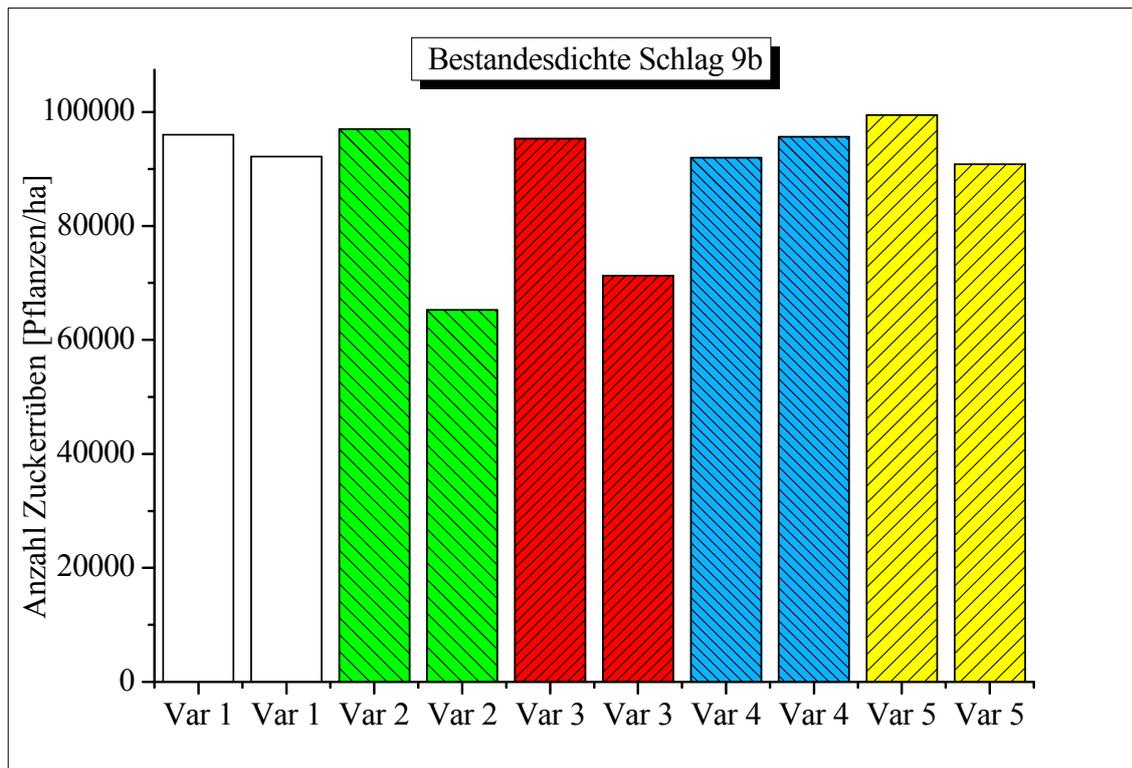
von 81333 Pflanzen je Hektar auf und hat somit einen Rübenverlust von 10,9 %. Auf der Kontrollvariante (vier) stehen zum Zeitpunkt des letzten Versuchsdurchgangs 2,7 % weniger Rüben und auf der chemischen Variante (drei) stehen sogar rund 4 % mehr als zu Beginn.



**Diagramm 13:** Bestandesdichte Parzelle P 12A vor und nach den Versuchen

In nachstehendem Diagramm 14 ist die Bestandesdichte des Schlags 9b beginnend mit dem Feldaufgang bis hin zum Ende der Feldversuche abgebildet. Beim Feldversuch sind bei den einzelnen Varianten zwischen 92000 und 99000 Zuckerrübenpflanzen je Hektar aufgelaufen.

Nach den Versuchen zeigt sich bei den Varianten zwei und drei, bei denen der Prototyp zum Einsatz kam, eine Bestandsminderung von 30 beziehungsweise 25 %. Die Bestandesdichte von Variante zwei beträgt nach dem letzten Durchlauf 65333 Pflanzen je Hektar, die der Variante drei 70667 Pflanzen je Hektar. Der unterschiedlich hohe Rübenverlust dieser Varianten weist jedoch statistisch keinen Unterschied auf. Des Weiteren treten bei Variante fünf Verluste in Höhe von 8,7 % auf. Dieser Wert unterscheidet sich hochsignifikant von dem der Variante drei und höchst signifikant von dem Verlust von Variante zwei. Für die übrigen Varianten liegen die Veränderungen in einem Bereich unterhalb von 4 %.



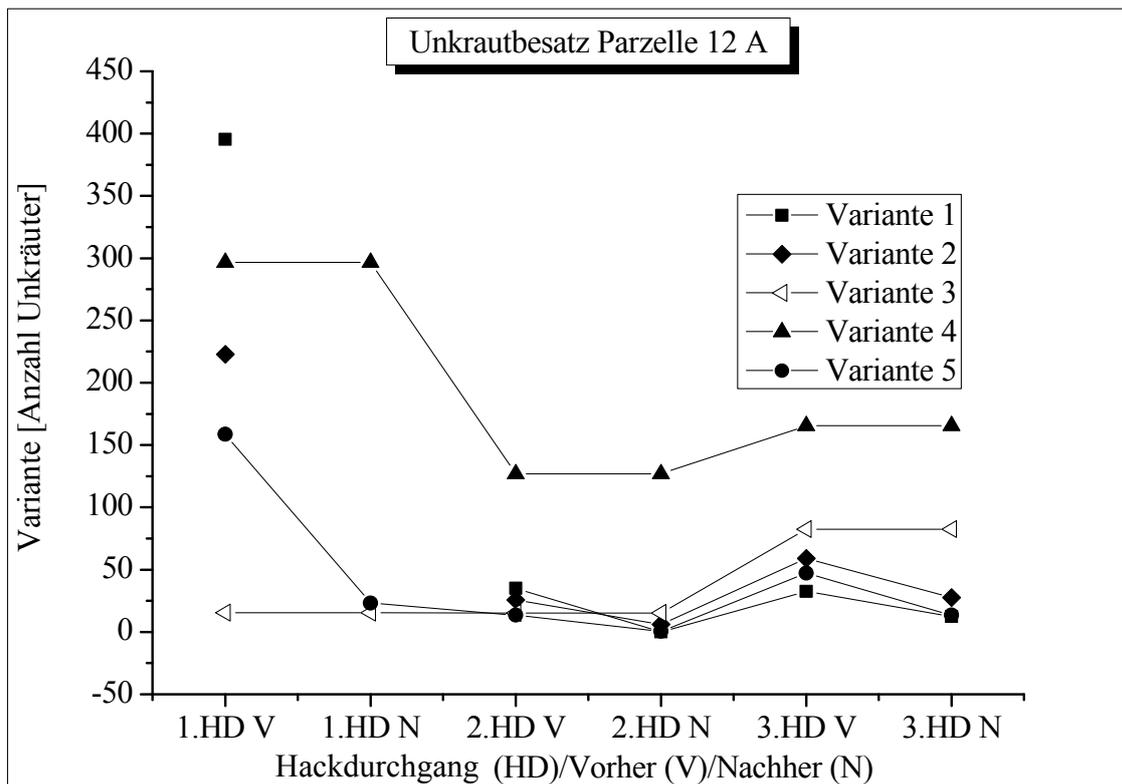
**Diagramm 14:** Bestandesdichte Schlag 9b vor und nach den Versuchen

### 8.2.5 Verlauf des Unkrautbesatzes

In den folgenden Diagrammen ist der Verlauf des Unkrautbesatzes beider Versuchsflächen dokumentiert. Dargestellt sind jeweils die Anfangsbestände der Unkräuter sowie deren Anzahl vor und nach den einzelnen Hackdurchgängen. Zudem werden die Endbestände nach den durchgeführten Maßnahmen betrachtet.

In Diagramm 15 ist der Unkrautbesatz der Frühsaat auf dem Versuchsfeld Parzelle P 12A abgebildet. Die durchschnittlichen Anfangsbestände der einzelnen Varianten weisen eine Streuung von 16 bis 400 Unkräutern je Boniturbild auf. Die Linien der Varianten eins und zwei sind nach dem ersten Hackdurchgang unterbrochen, da der erste Hackdurchgang dieser Varianten nicht ausgewertet werden konnte. Der zweite und dritte Hackdurchgang konnte bei allen Varianten wie geplant durchgeführt werden. Die Linien des unten stehenden Diagramms zeigen den Verlauf des Unkrautbesatzes der jeweiligen Varianten. Die Linien stellen zum einen die Anzahl der Unkräuter vor und nach jedem Hackdurchgang dar, zum anderen wird deutlich, dass Unkräuter in mehreren Wellen während der Vegetationszeit auflaufen. Deswegen entspricht der Endbestand nach einem Hackdurchgang nicht unbedingt dem Anfangsbestand des nächsten Hackdurchgangs. Bezüglich des Regulierungserfolgs

unterscheiden sich die Varianten eins und fünf mit durchschnittlich 96,9 beziehungsweise 88,7 % regulierter Unkräuter nach dem zweiten Hackdurchgang nicht signifikant voneinander. Variante zwei hingegen unterscheidet sich mit einem Regulierungserfolg von 73,2 % signifikant von den Varianten eins und zwei. Da sich bei den Varianten drei und vier zum Zeitpunkt der Hackdurchgänge keine Änderung des Unkrautbesatzes ergibt, fließt deren Unkrautbesatz nicht in die statistische Auswertung mit ein.



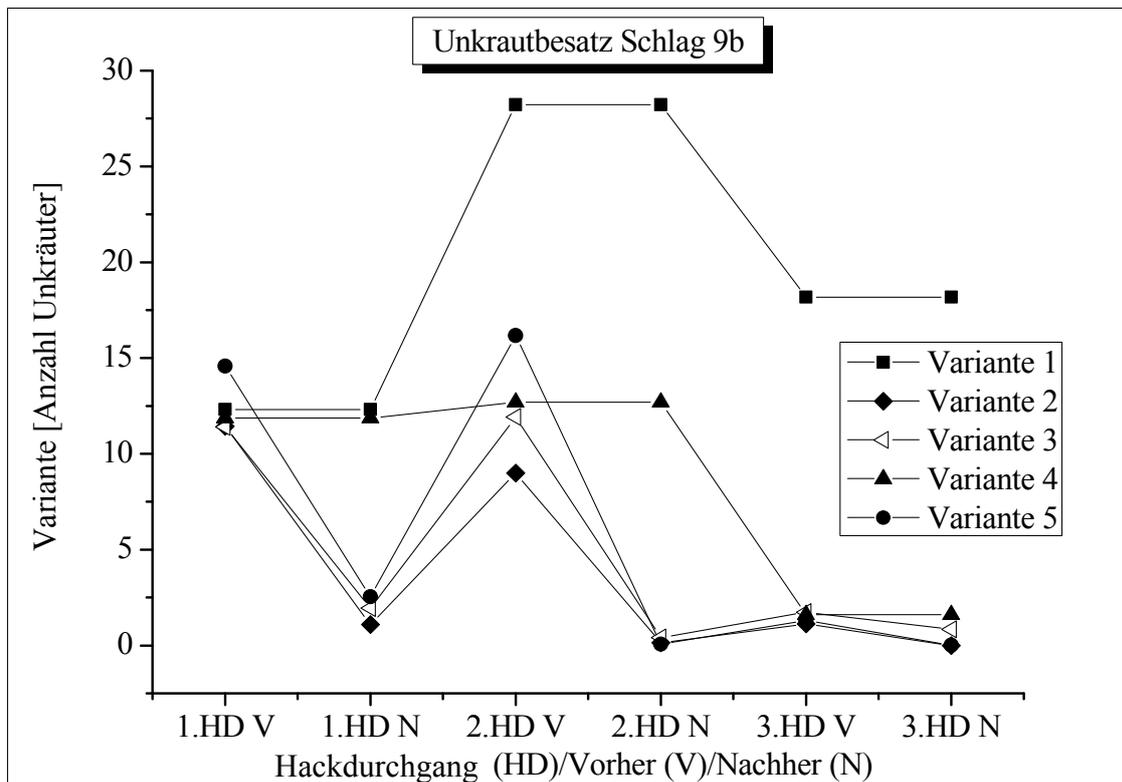
**Diagramm 15:** Durchschnittlicher Unkrautbesatz je Boniturbild und Variante

Beim dritten und letzten Versuchsdurchgang unterscheiden sich die Varianten eins und fünf mit 67,1 und 51,9 % Regulierungserfolg wiederum nicht signifikant voneinander. Lediglich Variante zwei unterscheidet sich mit 42,2 % Regulierungserfolg von Variante eins signifikant, jedoch nicht von Variante fünf. Nach dem letzten Hackdurchgang befinden sich auf den Boniturbildern der Varianten eins und fünf, auf denen in unterschiedlicher Kombination die Handhacke zum Einsatz kam, durchschnittlich 12,5 beziehungsweise 13,5 Unkräuter. Auf Variante zwei sind noch 27,5 Unkräuter je Bild zu sehen. Des Weiteren befinden sich auf den Bildern der chemischen Variante 82,5 und bei der Kontrollvariante 165,5 Unkräuter.

Das folgende Diagramm 16 enthält den Unkrautverlauf des Versuchsfeldes Schlag 9b. Zu Beginn variiert der durchschnittliche Unkrautbesatz der einzelnen Varianten zwischen 11 und 15 Unkräutern je Boniturbild. Die Unkräuter sind über die Varianten hinweg eher

gleichmäßig verteilt. Nach Durchlauf des ersten Hackdurchgangs sind bei Variante zwei, drei und fünf jeweils 89,6, 84,8 und 73,5 % der Unkräuter reguliert. Hierbei unterscheidet sich Variante zwei signifikant von Variante fünf. Für die Varianten zwei und drei sowie für die Varianten drei und fünf besteht kein signifikanter Unterschied.

Zum Zeitpunkt des zweiten Hackdurchgangs ist ein Anstieg des Unkrautbesatzes über alle Varianten hinweg zu beobachten. Durch den zweiten Versuchsdurchlauf konnten bei den Varianten zwei, drei und fünf zwischen 95,4 und 99,6 % des Unkrautbestandes reguliert werden. Ein signifikanter Unterschied im Regulierungserfolg ergibt sich zwischen Variante drei und Variante fünf. Vor dem dritten Hackdurchgang hält sich der erneute Unkrautauflauf in Grenzen. Von den wenigen Unkräutern werden bei den Varianten zwei und fünf 100 beziehungsweise 98 % reguliert. Lediglich Variante drei mit 58 % Regulierungserfolg unterscheidet sich signifikant von den beiden anderen.

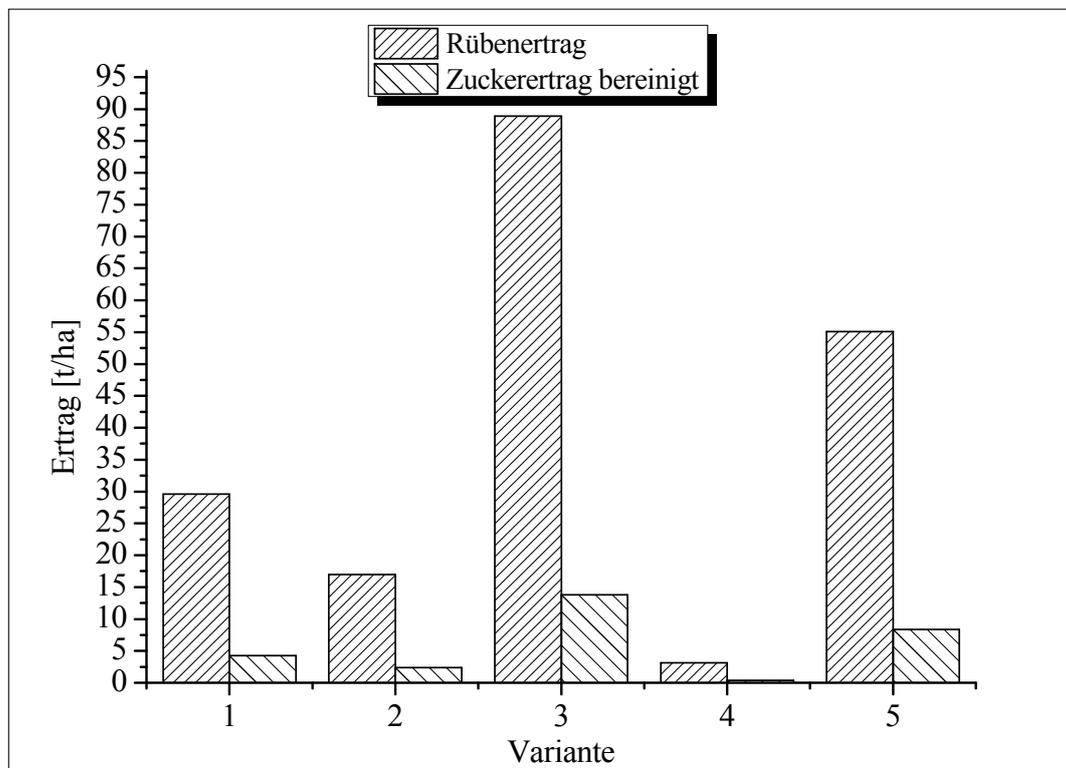


**Diagramm 16:** Durchschnittlicher Unkrautbesatz je Boniturbild und Variante

Nach Abschluss der Versuche weisen die Boniturbilder der Varianten zwei und fünf keine Unkräuter mehr auf. Bei Variante drei steht im Durchschnitt noch ein Unkraut je Bild und bei Variante vier stehen im Mittel noch 1,6 Unkräuter. Auf den Bildern der Kontrollvariante (eins) finden sich noch durchschnittlich 18,1 Unkräuter je Bild.

### 8.2.6 Ergebnisse der Ertragsermittlung

In diesem Absatz sind die Ertragsparameter der beiden Versuchsflächen Parzelle P 12 A sowie Schlag 9b wiedergegeben. In Diagramm 17 sind die über die fünf Wiederholungen gemittelten Erträge der Parzelle P 12A dargestellt. Die linke Säule des Diagramms stellt den Rübenenertrag, die rechte Säule den bereinigten Zuckerertrag der jeweiligen Variante in der Einheit t/ha dar. Die Variante chemischer Pflanzenschutz (drei) erzielt einen durchschnittlichen Rübenenertrag von 88,9 t/ha. Die Kontrollvariante vier liefert demgegenüber das Minimum der Versuche mit 3,1 t/ha. Die Gründe für diesen extremen Wert werden in der Diskussion weiter erläutert. Das Mittelfeld bilden Variante fünf mit 55,1 t/ha, Variante eins mit 29,6 t/ha und Variante zwei mit 17 t/ha. Aus statistischer Sicht unterscheiden sich alle Varianten hinsichtlich des Rübenertrags signifikant voneinander. Ein ähnliches Bild bietet sich bei Betrachtung des bereinigten Zuckerertrags. Hier beträgt das Ergebnis von Variante drei 13,8 t/ha. Danach folgen die Varianten fünf, eins und zwei mit 8,33, 4,24 und 2,37 t/ha. Variante vier liefert einen bereinigten Zuckerertrag von 0,38 t/ha. Parallel zum Rübenenertrag unterscheiden sich alle Varianten hinsichtlich des bereinigten Zuckerertrags signifikant voneinander.



**Diagramm 17:** Ertragsermittlung Parzelle P 12A

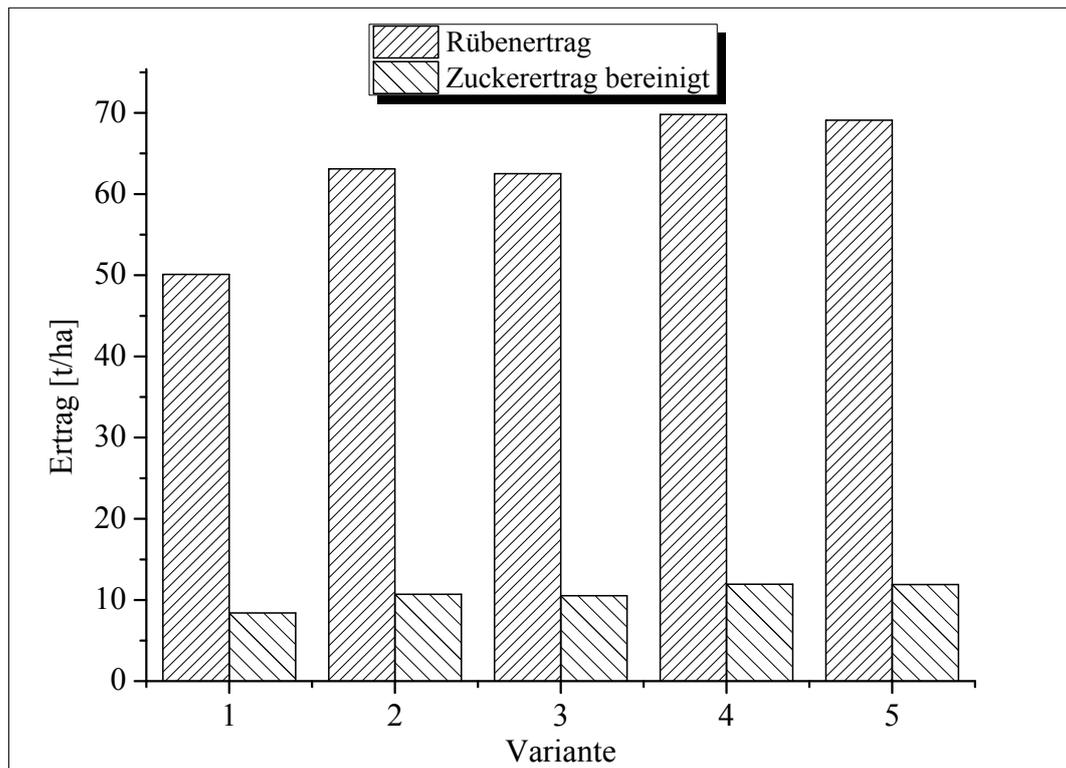
Die analysierten Messwerte bezüglich der Pflanzeninhaltsstoffe sind in Tabelle 18 festgehalten. Beim ausbeutbaren Zucker, dessen Werte sich zwischen 82,55 und 87,24 % bewegen, besteht unter den Varianten kein statistischer Unterschied. Der SMV schwankt zwischen 1,61 und 1,88 %. Hierbei unterscheidet sich Variante eins signifikant von den Varianten drei und zwei. Zudem weist Variante drei mit 41,5 mmol/1000g Rüben den höchsten Kaliumgehalt auf und unterscheidet sich damit signifikant von Variante zwei mit 35,5 mmol/1000g Rüben. Die restlichen Werte liegen zwischen 39,2 Rube und 41,1 mmol/1000g Rube. Wiederum besitzt Variante drei mit 3,5 mmol/1000g Rüben den geringsten Natriumgehalt, welcher sich signifikant von dem der Variante vier mit 5,5 mmol/1000g Rüben unterscheidet. Darüber hinaus besitzt Variante eins den höchsten  $\alpha$ -Amino-N-Gehalt mit 35,1 mmol/1000g Rüben und unterscheidet sich signifikant von den restlichen Versuchsgliedern. Deren Anteil an  $\alpha$ -Amino N variiert zwischen 26,6 und 28,7 mmol/1000g Rüben.

**Tabelle 17:** Rübeninhaltsstoffe Parzelle P 12A

	Ausbeutbarer Zucker (in %)	SMV (in %)	Kalium	Natrium	$\alpha$ -Amino N
			in mmol/1000g Rüben		
Variante vier	83,78	1,69	39,6	5,5	28,0
Variante zwei	82,55	1,61	35,5	5,0	26,6
Variante fünf	86,63	1,70	39,2	4,7	28,7
Variante eins	84,96	1,88	41,1	5,6	35,1
Variante drei	87,24	1,67	41,5	3,5	27,0

Im folgenden Diagramm 18 sind die Ertragsparameter von Schlag 9b dargestellt. Analog zu Diagramm 17 stellt die linke Säule den Rübenertrag, die rechte Säule den bereinigten Zuckerertrag jeweils in t/ha dar. Der ermittelte Rübenertrag schwankt bei den unterschiedlichen Versuchsgliedern des Ende April angelegten Versuchs zwischen 69,8 t/ha bei Variante vier mit chemischer Unkrautregulierung und 50,1 t/ha bei der Kontrollvariante (Variante eins). Dazwischen liegen die Varianten drei, zwei und fünf mit 62,5, 63,1 und

69,1 t/ha. Bei Schlag 9b unterscheiden sich die Varianten zwei bis fünf hinsichtlich des Rübenetrags nicht signifikant voneinander. Lediglich Variante eins unterscheidet sich signifikant von den restlichen Varianten. Das Gleiche gilt für den bereinigten Zuckergehalt. Hierbei bewegen sich die ermittelten Werte der Versuchsglieder zwei bis fünf zwischen 10,53 und 11,94 t/ha. Variante eins mit 8,39 t/ha unterscheidet sich, wie bereits erwähnt, signifikant vom Rest.



**Diagramm 18:** Ertragsermittlung Schlag 9b

Die Tabelle 19 zeigt die Inhaltsstoffanalyse der Rüben von Schlag 9b. Die Ergebnisse der Analysen aller Inhaltsstoffe variieren gering. Weder beim ausbeutbaren Zucker noch beim SMV besteht ein signifikanter Unterschied zwischen den einzelnen Versuchsgliedern. Auch die Natrium- und  $\alpha$ -Amino-N-Werte weisen keinen statistisch begründeten Unterschied auf. Lediglich beim Kaliumgehalt besteht ein signifikanter Unterschied zwischen Variante eins (39,2 mmol/1000g Rüben) und Variante zwei (42 mmol/1000g Rüben).

**Tabelle 18:** Rübeninhaltsstoffe Schlag 9b

	Ausbeutbarer Zucker (in %)	SMV (in %)	Kalium Natrium $\alpha$ -Amino N in mmol/1000g Rüben		
Variante eins	90,66	1,13	39,2	1,8	6,4
Variante drei	90,48	1,17	41,9	1,7	7,0
Variante fünf	90,78	1,15	41,7	1,6	6,4
Variante zwei	90,52	1,18	42,0	1,8	7,2
Variante vier	90,64	1,17	41,1	1,6	7,3

### 8.2.7 Ergebnisse der Pflanzenpositionierung

In der unten stehenden Tabelle 20 ist das Ergebnis der Pflanzenpositionierung des Bildverarbeitungsprogramms auf Parzelle P 12A dargestellt. Aufgrund der sehr hohen Unkrautentwicklung war beim ersten Hackdurchgang keine Pflanzenerkennung möglich. Beim zweiten und dritten Hackdurchgang wurden 64,2 beziehungsweise 70 % der Rübenpflanzen in den Bildern richtig erkannt und entsprechend positioniert.

**Tabelle 19:** Positionserkennung Parzelle P 12A

	BBCH – Stadium	Prozentualer Anteil richtig positionierter Rübenpflanzen
1. Hackdurchgang	10 – 12	Keine Erkennung möglich
2. Hackdurchgang	14 – 19	64,2
3. Hackdurchgang	19	70

Bei Schlag 9b (Tabelle 21 unten) ist die richtige Positionierung der Zuckerrübenpflanzen innerhalb der Bilder deutlich über den Ergebnissen von Parzelle P 12A. Das Maximum an erkannten Rüben mit durchschnittlich 95,2 % liegt beim dritten Hackdurchgang. Das niedrigste Erkennungsergebnis liefert mit 80,6 % der erste Hackdurchgang.

**Tabelle 20:** Positionserkennung Schlag 9b

	BBCH Stadium	Prozentualer Anteil richtig positionierter Rübenpflanzen
1. Hackdurchgang	10-12	80,6
2. Hackdurchgang	10-14	86,8
3. Hackdurchgang	14-19	95,2

### 8.3 Diskussion der Ergebnisse 2012

Das anschließende Kapitel beinhaltet zum einen die Diskussion der Versuchsergebnisse des Versuchsjahres 2012 sowie eine gesamtheitliche Betrachtung der entwickelten Hackmaschine. Zum besseren Verständnis sind in Tabelle 22 die Versuchsglieder des Jahres 2012 nochmals aufgeführt.

**Tabelle 21:** Versuchsglieder 2012

Versuchsglied	Parzelle P 12A	Schlag 9b
Kontrolle, ohne Unkrautregulierung	Variante 4	Variante 1
Hohenheimer Hacke, Standardscharhacke	Variante 2	Variante 3
Handhacke, Standardscharhacke	Variante 5	Variante 5
Kombination aus Handhacke, Standardscharhacke, Hohenheimer Hacke	Variante 1	Variante 2
Chemische Unkrautkontrolle	Variante 3	Variante 4

#### 8.3.1 Randparameter

Die EM – 38 – Bodenkarten der beiden Versuchsflächen weisen auf eine homogene Verteilung der Bodenverhältnisse im Bereich der Feldversuche hin. Mit Mittelwerten von 23,69 mS/m auf Parzelle P 12A und 26,67 mS/m auf Schlag 9b liegen die Werte im Bereich lehmiger Böden (Schmidhalter et al. 2002). Dies stimmt mit der Standortbeschreibung in Kapitel 7.1 überein. Des Weiteren liegen die gemessene Bodentemperatur sowie die ermittelte Bodenfeuchte ebenfalls in einem für Zuckerrüben günstigen Bereich (Drangmeister 2011; Nørremark & Griepentrog 2004). Zu erwähnen ist jedoch, dass der Temperaturverlauf im Anschluss an die Aussaat des Versuchs auf Parzelle P 12A äußerst ungünstig für die Jugendentwicklung der Zuckerrüben war.

Abgesehen vom Temperaturverlauf auf Parzelle P 12A während der Jugendentwicklung ist somit festzuhalten, dass die Ergebnisse nicht durch andere Faktoren als die durchgeführten Varianten beeinflusst wurden.

### 8.3.2 Handarbeitsaufwand

Der Handarbeitseinsatz auf beiden Versuchsfeldern liegt im Rahmen der in der Literatur beschriebenen Werte. Es zeigt sich jedoch eine deutliche Differenz zwischen den Versuchsfeldern. Auf Parzelle P 12A liegt der Arbeitseinsatz bei beiden relevanten Versuchsgliedern bei über 200 AKh/ha, auf Schlag 9b deutlich unter 100 AKh/ha bei beiden Varianten. Dies liegt eindeutig an der unterschiedlichen Verunkrautungssituation. Das Feld des Meiereihofs weist ein höheres Unkrautpotenzial auf als das des Heidfeldhofs. Auch bei den Versuchen von *Irla et al.* (2005) treten starke Schwankungen bezüglich der benötigten Arbeitszeit für die Handhacke von Jahr zu Jahr auf. Aus der Literatur sind Extremwerte bis zu 340 AKh/ha bekannt (*Irla et al.* 2005; *König et al.* 2005). Demnach liegen die Ergebnisse von Parzelle P 12A noch im Rahmen.

In der Versuchssaison 2012 fielen die Einsparungen hinsichtlich der Handarbeit durch Einsatz des zweireihigen Prototyps, zumindest auf Parzelle P 12A, deutlich geringer aus als bei den Versuchen im Vorjahr. Mit lediglich 19 % Handarbeitseinsparung lieferte der Versuch den schlechtesten Wert. Dies ist der speziellen Situation auf Parzelle P 12A geschuldet. Der erste Versuchsdurchlauf musste aufgrund der starken Verunkrautung und zusätzlicher Probleme mit der Bildverarbeitung vorzeitig abgebrochen werden. Dementsprechend gab es beim ersten Durchlauf keine Einsparung bei der Handarbeit. Die Differenz von 19 % zwischen den Varianten eins und fünf kommt durch den Einspareffekt des zweiten und dritten Hackdurchgangs zustande. Jedoch wurde der Einspareffekt nicht ausschließlich durch den Einsatz des zweireihigen Prototyps bei Variante eins ausgelöst, sondern ebenfalls durch die geringere Bestandesdichte innerhalb der Versuchsreihen. Da beim ersten Hackdurchgang sehr viele Zuckerrüben zum einen durch den fehlerhaft funktionierenden Prototyp und zum anderen durch die Handhacke herausgerissen wurden, fiel der Handarbeitsaufwand von Variante eins bei den beiden folgenden Versuchsdurchgängen ebenfalls geringer aus.

Auf der zweiten Versuchsanlage Schlag 9 b war der Handarbeitsaufwand deutlich geringer. Der Unkrautdruck war wesentlich geringer und die Jugendentwicklung der Rüben erfolgte reibungslos. Auf dieser Fläche war der Effekt durch den Einsatz des Prototyps merklich ausgeprägter. Die Handarbeit von Variante zwei konnte gegenüber Variante fünf um durchschnittlich 33 % reduziert werden. Da jedoch der Handarbeitsaufwand von Variante fünf mit 88 AKh/ha ebenfalls sehr gering ausfiel, schlägt die Einsparung von 290 € (siehe Tabelle 23) bei der monetären Betrachtung wenig zu Buche.

**Tabelle 22:** Monetäre Betrachtung des Handarbeitsaufwands

Versuchsfeld	Parzelle P 12A		Schlag 9b	
	fünf	eins	fünf	zwei
Ø AKh/ha	249,3	202,5	88	59
Aufwand Handarbeit (10 €/AKh)	2493	2025	880	590
Einsparung Handarbeit (€)		<b>468</b>		<b>290</b>

Vergleicht man die Ergebnisse aus dem Jahr 2012 mit denen des Vorjahres, so waren die Resultate des einreihigen Prototyps besser als die des zweireihigen. Jedoch ist dies nicht alleine den unterschiedlichen Prototypen zuzuweisen, sondern ebenfalls den unterschiedlichen Bedingungen der beiden Versuchsjahre. Auf Parzelle P 12A war die Verunkrautung extrem hoch, verglichen mit den Versuchsfeldern des Vorjahres und auf Schlag 9b gab es generell sehr wenig Unkraut.

### 8.3.3 Bestandesdichte

Auf beiden Versuchsflächen ist der Feldaufgang sehr gut und entspricht dem in der Literatur erwähnten Optimum. Jedoch wird bei der Frühsaat deutlich, dass die Bestandesdichte der Varianten, auf denen der Prototyp zum Einsatz kam, deutlich unter dem empfohlenen Pflanzenbestand liegt. Beide Varianten liegen mit knapp 39000 Pflanzen/ha noch über der von *Drangmeister* (2011) empfohlenen Umbruchgrenze von 30.000 Pflanzen/ha. Der Prototyp hat jedoch zu viele Kulturpflanzen herausgerissen beziehungsweise die Rübenpflanzen wurden von der Bildverarbeitung nicht richtig erkannt. Verluste von nahezu 60 % auf beiden Parzellen sind als extrem zu bewerten und sicherlich nicht praxistauglich. Die enormen Verluste hatten einen großen Einfluss auf den in Kapitel 8.2.6 dargestellten Ertrag. Die Bildverarbeitung kam mit dem hohen Unkrautbesatz eindeutig nicht zurecht (siehe Abschnitt 8.2.7). Die Rübenverluste sowie die Bestandesdichten nach Abschluss der Versuche der beiden Prototypenvarianten (eins und zwei) sind mit den Ergebnissen aus dem Vorjahr nicht zu vergleichen. Auf den restlichen Versuchsgliedern sind die Rübenbestände in etwa mit denen des Vorjahres vergleichbar.

Bei der Spätsaat zeigt sich ein völlig anderes Bild. Hier liegen die Verluste mit 32,3 und 24,2 % auf einem deutlich niedrigeren Niveau. Mit einer Bestandesdichte von 65333 Pflanzen/ha (Variante zwei) beziehungsweise 70667 Pflanzen/Hektar (Variante drei) liegen beide Versuchsglieder leicht über beziehungsweise unter der empfohlenen minimalen Bestandesgröße von 70.000 (Lütke Entrup & Schäfer 2011; Drangmeister 2011). Dennoch sind die Pflanzenverluste höher als im Versuchsjahr 2011. Im Jahr 2011 kam es zu Verlusten in der Größenordnung von 14,5 bis 18 %. Somit konnten die guten Ergebnisse des einreihigen Prototyps des Vorjahres, auch unter nahezu optimalen Versuchsbedingungen auf Schlag 9b, mit dem zweireihigen Prototyp des Jahres 2012 nicht ganz wiederholt werden. Die Pflanzenbestände der Prototypvarianten lagen nach Versuchsdurchführung ebenfalls unter denen des Vorjahres. Im Jahr 2011 standen hier nach den Versuchen noch 77000 bis 83000 Zuckerrüben je Hektar.

#### **8.3.4 Unkrautverlauf und Regulierungserfolg**

Bei den beiden Versuchsflächen handelt es sich, verglichen mit dem Unkrautverlauf des Vorjahres, jeweils um zwei Extreme. Parzelle P 12A hatte ein für den Anbau von ökologisch erzeugten Rüben deutlich zu hohes Unkrautpotenzial. Mit bis zu 400 Unkräutern je Boniturbild war eine Unterscheidung von Kulturpflanze und Unkraut nicht mehr möglich. Der Abstand zwischen Aussaat und erstem Hackdurchgang betrug 39 Tage. Verglichen mit Schlag 9b und einem Abstand zwischen Aussaat und erstem Hacktermin von lediglich 19 Tagen ist diese große Distanz auf Parzelle P 12A eindeutig mit den niedrigen Temperaturen im April zu erklären. Die Durchschnittstemperatur des Aprils lag mit 9 °C um 3,5 °C niedriger als im gleichen Zeitraum des Vorjahres 2011. Die Unkrautsamen hatten somit genug Zeit, um aufzulaufen. Die Zuckerrüben waren in ihrer Jugendentwicklung extrem gehemmt. Diese sind zwar aufgelaufen, sind aber in einem für die Bildverarbeitung zu geringen Entwicklungsstadium über mehrere Wochen stehen geblieben.

Auf Schlag 9b stellt sich eine völlig andere Situation dar. Durch den sehr späten Aussaattermin am 26.04.2012 konnte zuvor noch eine Unkrautkur mit einem Totalherbizid durchgeführt werden. Der erste Hacktermin konnte bereits nach 19 Tagen am 15.05.2012 erfolgen. Dies entspricht mit 21 Tagen in etwa der Distanz zwischen Aussaat und erstem Hacktermin bei der Spätsaat 2011. Durch den schnellen Auflauf, den geringeren Unkrautdruck der Fläche und die zuvor durchgeführte Unkrautkur war die Anzahl der zum ersten Hacktermin aufgelaufenen Unkräuter im Vergleich zu Parzelle P 12A extrem gering.

Betrachtet man den Unkrautregulierungserfolg der Varianten eins, zwei und fünf auf Parzelle P 12A, zeigt sich, dass zwischen den Varianten mit manueller Unkrautregulierung in

Kombination mit und ohne den Prototyp erwartungsgemäß kein statistischer Unterschied besteht. Dies deckt sich mit den Ergebnissen des Vorjahres. Ebenfalls eindeutig ist das Ergebnis von Variante zwei. Hierbei wird, parallel zu den Vorjahresversuchen, deutlich, dass sich bei Verzicht auf die Handhacke ein schlechteres Regulierungsergebnis einstellt und gerade bei hohem Unkrautdruck mehr Unkräuter im unmittelbaren Umfeld der Zuckerrüben stehen bleiben. Die Auswirkung dieser Unkräuter auf den Rübenantrag ist nachstehend in Abschnitt 8.3.5 beschrieben. Zudem kam es auf diesem Versuchsfeld nach Versuchsende zu einer erheblichen Spätverunkrautung. Dies hatte sich bereits nach dem letzten Hackdurchgang durch den Verbleib von Unkräutern auf den Boniturbildern abgezeichnet. Die Spätverunkrautung wurde durch Boniturbilder dokumentiert, jedoch nicht weiter ausgewertet.

Auf Schlag 9b ist der Regulierungserfolg zwischen den Varianten zwei, drei und fünf zwar statistisch betrachtet abwechselnd signifikant, faktisch jedoch bezüglich des generell niedrigen Unkrautdrucks nicht eindeutig. Die Regulierungserfolge liegen auf gleichem Niveau, was sich auch bei den Ertragsdaten in Abschnitt 8.2.6 widerspiegelt. Ebenfalls eindeutig zeigen sich die Auswirkungen der geringen Spätverunkrautung auf die Ertragsparameter.

Bei allen Versuchen der beiden Versuchsjahre zeigt sich, dass die zeitliche Distanz zwischen den durchgeführten Hackdurchgängen jeweils ausreichte, um genügend Unkräuter nachwachsen zu lassen.

### **8.3.5 Ertrag**

Die Ertragsparameter auf Versuchsfeld Parzelle P 12A zeigen eindeutig den Einfluss, den ein hoher Unkrautbesatz auf das Wachstum der Zuckerrüben ausübt. Dies wird deutlich, wenn man die Kontrollvariante mit der konventionell chemischen Variante vergleicht. Das massive Auftreten von Unkraut wie Weißer Gänsefuß, Schwarzer Nachtschatten und später Hirse führt zu einem nahezu kompletten Ertragsausfall. Ebenfalls ist dies bei Variante fünf ersichtlich. Die rund 38 % Ertragseinbuße sind zum Großteil dem Unkrautbesatz zuzuschreiben. Zwar stehen auf der Parzelle nach Dezimierung durch die manuelle Unkrautregulierung rund 17000 Pflanzen/ha weniger als bei Variante drei, dies kann ein Bestand, wie die Versuche aus dem Vorjahr zeigen, jedoch ausgleichen. Dass sich jedoch ein zu geringer Bestand ertragsmindernd auswirkt, ist bei Variante eins sichtbar. Mit knapp 39000 Pflanzen je Hektar ist die unkrautunterdrückende Wirkung gering. Zwar ist die Anzahl der Unkräuter je Boniturbild nahezu identisch mit der von Variante fünf, doch durch Lücken im Bestand fiel die Spätverunkrautung dementsprechend höher aus. Der Ertrag liegt jedoch bei gleicher

Bestandesdichte höher als bei Variante zwei. Dies ist eindeutig mit dem im Vergleich höheren Unkrautbesatz zu begründen. Dabei hat die manuelle Unkrautregulierung bei Variante eins einen großen Anteil am Mehrertrag. Die Rübenanalyse von Parzelle P 12A zeigt deutlich erhöhte  $\alpha$ -Amino –N – Werte. Von allen vier Versuchsfeldern beider Versuchsjahre liegen diese am höchsten. Dies könnte daran liegen, dass hier im Februar die Wintergerste umgebrochen wurde, um eine Versuchsfläche für die Zuckerrübenversuche im März zu haben. Somit war mehr pflanzenverfügbarer Stickstoff im Boden, was zu einer schlechteren technischen Rübenqualität und dem höchsten SMV der Versuche führte.

Erhöhte Natriumgehalte aller Versuchsglieder deuten zudem auf eine Konkurrenzeinwirkung hin. Verglichen mit den Vorjahresergebnissen weist sogar Variante drei mit 3,5 mmol/1000g Rüben auf eine partielle Verunkrautung hin (Bräutigam 1997).

Verglichen mit dem durchschnittlichen Biorübenenertrag der Südzucker – Gruppe in 2012 mit 51 t/ha (Triebe 2013) ist der Ertrag von Variante fünf mit 55,1 t/ha überdurchschnittlich.

Die Ergebnisse von Schlag 9b sind nicht mit denen des Versuchsfeldes Parzelle P 12A vergleichbar. Sämtliche Versuchsglieder, mit Ausnahme der Kontrollvariante, weisen keinen statistisch relevanten Unterschied auf. Dieses Resultat ist klar der geringen Verunkrautung (siehe Abschnitt 8.2.5) zuzuschreiben. Das Ertragsniveau der Versuchsglieder vier und fünf liegt auf dem durchschnittlichen Niveau der Südzucker – Gruppe mit 68,1 t/ha. Vergleicht man auf beiden Versuchsfeldern die Variante mit dem chemischen Pflanzenschutz, fällt auf, dass der Ertrag von Schlag 9b trotz geringer Verunkrautung deutlich geringer ist als bei Parzelle P 12A. Dies ist dem späten Aussaatzeitpunkt und der somit um 34 Tage geringeren Vegetationsperiode geschuldet. Mit 159 Tagen Vegetationsperiode liegt diese erheblich unterhalb der Empfehlung von 180 – 220 Tagen (Böhler et al. 2012).

Darüber hinaus hat die durch den Einsatz des Prototyps hervorgerufene Reduktion der Bestandesdichte zwar statistisch betrachtet keinen Ertragseinfluss, dennoch führt diese zu einer Minderung von knapp 10 % des Ertrags.

Vergleicht man die Varianten zwei und drei, wird der geringe Effekt der Handhacke auf Variante zwei ersichtlich. Der Einsatz manueller Unkrautregulierung führt zu einem durchschnittlichen Mehrertrag von nur 600 kg. Unter den vorherrschenden Unkrautverhältnissen hätte auf die manuelle Unkrautregulierung in Variante zwei verzichtet werden können. Dieses Resultat deckt sich allerdings nicht mit den Vorjahresversuchen. Im Vorjahr spiegelte sich der Handarbeitseinsatz im Ertragsergebnis wider. Variante zwei (2011),

bei der die Standardhacktechnik und der einreihige Prototyp eingesetzt wurde, hatte auf beiden Versuchsfeldern einen geringeren Rübenantrag als Variante vier mit zusätzlicher Handhacke.

### **8.3.6 Bewertung der Bildverarbeitung**

Aufgrund der starken Verunkrautung auf Parzelle P 12A waren die Pflanzenverluste des zweiten und dritten Hackdurchgangs sehr hoch.

Die Anordnung der einzelnen LED-Elemente reichte zu Beginn der Versuche für eine gleichmäßige Ausleuchtung des Bildausschnitts nicht aus. Außerdem lieferten die CMOS – Kameras unscharfe Bilder, was eine Rübenanerkennung beim ersten Hackdurchgang auf Parzelle P 12A zusätzlich unmöglich machte.

Aufgrund der aufgezählten Probleme musste deshalb der erste Hackdurchgang mit dem zweireihigen Prototyp abgebrochen werden.

Bei mehreren Untersuchungen im Nachgang des Hackdurchgangs wurde geschlussfolgert, dass durch eine veränderte Anordnung der einzelnen LED – Beleuchtungseinheiten sowie die Veränderung der Kamerapositionen ein wesentlich besseres Ergebnis bezüglich der Kulturpflanzenanerkennung erreicht werden könnte. Bei den Versuchen im Rahmen der Inbetriebnahme des Prototyps mit weißen Holzplättchen war die Bilderanerkennung sehr gut, jedoch konnte dieses Ergebnis beim ersten Feldeinsatz entgegen der Theorie nicht wiederholt werden.

Die Zuckerrüben liefen zwar homogen auf, die anschließende Jugendentwicklung war aufgrund des Temperatursturzes jedoch deutlich verzögert. Bis Ende April waren die Rüben zu klein für einen ersten Hackdurchgang. Ein Temperaturanstieg ab dem 26.04.2012 sorgte für ein rasches Wachstum sowohl der Zuckerrüben als auch der Unkräuter. Beim ersten Hackdurchgang am 03.05.2012 waren bereits bis zu 400 Unkräuter je Boniturbild aufgelaufen. Dies machte eine Anerkennung der Zuckerrübenpflanzen beziehungsweise eine Unterscheidung der Kulturpflanzen von den Unkräutern auf dem Großteil der Versuchsfläche unmöglich. Erschwerend hinzu kam die Fehlfunktion der Bildverarbeitung. Bei dieser konnten die durchweg positiven Ergebnisse der Inbetriebnahme leider nicht bestätigt werden. Da ein Einsatz unter realen Bedingungen vor Versuchsbeginn aufgrund der mangelnden Entwicklung der Rüben nicht möglich gewesen war, wurden die Probleme der Bildverarbeitung erst am Versuchstag bemerkbar. Es stellte sich heraus, dass die neue Filterfunktion „fill holes“ des Bildverarbeitungsprogramms unter den gegebenen

Bedingungen nicht das gewünschte Klassifizierungsergebnis liefern konnte. Zudem funktionierte die installierte Beleuchtung nicht in dem Maße, wie sie bei der Inbetriebnahme getestet wurde. Des Weiteren bildete die Beleuchtung in einzelnen Bildabschnitten Schatten.

Aufgrund der aufgezählten Probleme wurde deshalb der Hackdurchgang mit dem zweireihigen Prototyp abgebrochen. Für die späteren Hackdurchgänge wurden die Kameraposition und die Einstellung der Beleuchtung verändert. Danach war die Positionierung der Rübenpflanzen zufriedenstellend.

#### **8.4 Fazit der Feldversuche**

Nach zwei Versuchsjahren mit den unterschiedlichen Prototypen hat sich gezeigt, dass sich je nach Unkrautbesatz, der Anteil der Handarbeit durch den Einsatz der Reihenhackmaschine deutlich reduzieren lässt und ein Effekt nachweisbar ist.

Bestandesunterschiede von bis zu 13500 Pflanzen/ha konnten in den Versuchen von 2011 ohne Weiteres durch die Entwicklung der einzelnen Zuckerrübenpflanzen ausgeglichen werden. Erst ab Zuckerrübenverlusten von 18000 Pflanzen/ha war 2012 eine Ertragsminderung von 10 % erkennbar, welche statistisch jedoch nicht signifikant ist. Für die Ertragsentwicklung ist der Einfluss einer Spätverunkrautung im Nachgang der Feldversuche wesentlich entscheidender. Des Weiteren wirkt sich eine unterschiedliche Bestandesdichte nur sehr gering auf die technische Qualität der Rüben aus.

Der Regulierungserfolg einer selektiv arbeitenden Reihenhackmaschine in Verbindung mit Standardhacktechnik im Zwischenreihenbereich ist geringer als die Kombination der selektiv arbeitenden Reihenhackmaschine, der Standardhacktechnik und der Einsatz einer Handhacke. Bei einem geringen Unkrautbesatz von unter 15 Unkräuter/m<sup>2</sup> kann theoretisch auf den Einsatz der Handhacke verzichtet werden. In drei von vier Versuchen war der Einsatz der Handhacke ertragswirksam.

Alles in allem hat der einreihige Prototyp in Bezug auf den Kulturpflanzenverlust besser abgeschnitten als der zweireihige Nachfolger. Dies liegt eindeutig an der besseren Lokalisierung von Rüben und Unkraut im Jahr 2011. Obwohl sehr viele Veränderungen in Mechanik, Kameratechnik und Software durchgeführt wurden, wurde dies mit dem zweiten Prototyp nicht in dem gewünschten Maß erreicht. Die Maschine wurde unter Praxisbedingungen im Feld getestet. Für ein serienfähiges Produkt müssten noch erhebliche Optimierungen der Software durchgeführt werden. Besonders bei der Positionierung und Unterscheidung von Kulturpflanze und Unkraut besteht noch Verbesserungspotenzial.

Die Mechanik und der elektrische Antrieb des Schars funktionieren hingegen sehr zuverlässig. Die Entscheidung für den Wechsel von einem hydraulischen Antrieb hin zu einem elektrischen Hochvoltantrieb erwies sich als richtig. Die Dynamik der Drehzahlveränderung des Antriebs konnte erheblich verbessert werden. Zudem wurde die Erweiterung des einreihigen Prototyps auf zwei Reihen dadurch maßgeblich vereinfacht.

### **8.5 Ausblick**

Das größte Potenzial für eine Verbesserung des Arbeitsergebnisses bietet die Weiterentwicklung der digitalen Bildverarbeitung. Hier sollte der Fokus nachfolgender Entwicklungen auf die Verbesserung der Bildverarbeitungssoftware gelegt werden. Da bisher keine Pflanze sondern nur helle und dunkle Bildpunkte voneinander selektiert und anhand des Aussaatabstands Zuckerrüben- oder Unkrautpflanzen zugeordnet werden, würde eine „echte“ Pflanzenerkennung im Sinne von Erkennung und Unterscheidung einzelner Kultur- und Unkrautpflanzen zur Minimierung der bisher unvermeidbaren Zuckerrübenverluste durch die Hackmaschine führen. Zudem kann durch den Einsatz neuester Computertechnik die benötigte Zeit für die Bildverarbeitung enorm verkürzt werden und eine Steigerung der Arbeitsgeschwindigkeit auf über 4 km/h erfolgen. Dies würde die Flächenleistung je Stunde erheblich beeinflussen und auf ein praxistaugliches Niveau steigern. Darüber hinaus sollte die Anzahl der Hackaggregate an die Arbeitsbreite der Sätechnik angepasst werden.

## 9 Zusammenfassung

Nach wie vor stellt die Unkrautregulierung innerhalb der Kulturreihe im ökologischen Zuckerrübenanbau eine große Herausforderung für die Landwirte dar. Da die Zuckerrübe während ihrer Jugendentwicklung sehr anfällig gegenüber Konkurrenz von Unkräutern ist, muss bis zum Reihenschluss darauf geachtet werden, dass sie möglichst unkrautfrei gehalten wird. Für den Zwischenreihenbereich ist ausreichend mechanische Hacktechnik verfügbar. Für die Regulierung innerhalb der Reihe bleibt, mit Ausnahme einiger nicht selektiv arbeitender Reihenhacktechnik, oftmals nur die Handhacke übrig. Deren Einsatz kann je nach Unkrautbesatz des Feldes in einem Bereich von 60 bis 340 AKh/ha schwanken.

Um den ökologischen Zuckerrübenanbau zu unterstützen, wurde ab 2009 an der Universität Hohenheim gemeinsam mit dem Ministerium für Ernährung und Ländlichen Raum Baden-Württemberg, dem Verband Baden-Württembergischer Zuckerrübenanbauer und der Firma Schmotzer, Bad Windsheim, ein Projekt zur Entwicklung einer selektiv arbeitenden Reihenhackmaschine durchgeführt.

Als Grundlage für das Projekt diente ein aus einem vorherigen Projekt stammender, einreihiger Hackmaschinen-Prototyp. Dieser verfügte bereits über einen Bildverarbeitungsalgorithmus für die Selektierung und Positionierung von Zuckerrüben. Zudem waren zwei Werkzeugformen für die Unkrautkontrolle innerhalb einer Zuckerrübenreihe vorhanden. Angesteuert wurden diese Hackwerkzeuge über einen Hydraulikmotor, dessen Drehzahl in Abhängigkeit von der Fahrtgeschwindigkeit sowie der Bildverarbeitung über ein PWM-Magnetventil geregelt wurde.

Zu Beginn des weiterführenden Projekts wurden zunächst Feldversuche mit den beiden vorhandenen sowie einer neu konstruierten Hackwerkzeugvariante durchgeführt. Hierbei wurde die Arbeitsgüte der drei Werkzeuge miteinander verglichen. Es wurde unter anderem die Größe der bearbeiteten und unbearbeiteten Fläche innerhalb einer simulierten Zuckerrübenreihe untersucht. Darüber hinaus wurden Arbeitsweise und Verstopfungsanfälligkeit beim Auftreten größerer Unkräuter bewertet. Parallel zu den Freilandversuchen wurde aufgrund auftretender Probleme der Regeldynamik des hydraulischen Antriebs gemeinsam mit der Firma Jetter AG, Ludwigsburg, ein mobiler elektrischer Hochvoltantrieb konzipiert. In der darauffolgenden Vegetationsperiode erfolgten mit dem erweiterten Prototyp auf zwei Versuchsstandorten in Hohenheim Freilandversuche unter Praxisbedingungen. Dabei wurde die Reihenhackmaschine mit unterschiedlichen Verfahren wie beispielsweise der Handhacke und einer Standardhackmaschine für den

Zwischenreihenbereich kombiniert beziehungsweise mit dem Regulierungserfolg einer konventionell chemischen Unkrautkontrolle verglichen. Im Anschluss an die ersten Praxisversuche und anhand der damit gewonnenen Erkenntnisse fanden eine weitere Überarbeitung sowie ein zweireihiger Ausbau der Reihenhackmaschine statt. Mit der zweireihigen Maschine wurden die Freilandversuche in derselben Versuchsanordnung wie im Vorjahr und ebenfalls an zwei Standorten wiederholt.

Nach zweijähriger Testphase ist festzuhalten, dass sich durch den Einsatz einer selektiv arbeitenden Reihenhackmaschine eine Verringerung des Handarbeitsaufwands, in Abhängigkeit von der Verunkrautung, von bis zu über 40 % erzielen lässt. Die manuelle Unkrautkontrolle ist nach wie vor für die Dezimierung der Unkräuter im unmittelbaren Radius um die Zuckerrübenpflanzen herum unerlässlich. Diese können sich bei nicht Entfernen negativ auf den Ertrag auswirken.

Des Weiteren entsteht durch den Einsatz der Reihenhackmaschine ein nicht zu vermeidender Kulturpflanzenverlust. Bis zu einem gewissen Maß wirkt dieser sich jedoch weder auf die technische Qualität noch auf den Masseertrag der Zuckerrüben aus. Dahingegen kann eine einsetzende Spätverunkrautung nach Reihenschluss deutliche Ertragseinbußen verursachen.

Abschließend ist zu erwähnen, dass die Bildverarbeitung unter schwierigen Bedingungen mit bis zu 400 Unkräutern/m<sup>2</sup> an ihre Grenzen stößt. Zudem bedarf der Bildverarbeitungsalgorithmus weiterer Optimierung. Dahingegen erfüllen der mobile, elektrische Hochvoltantrieb sowie das Hackwerkzeug durch seine kontinuierliche Bewegungsform die Anforderungen.

Zukünftige Entwicklungen sollten ihren Fokus auf die weitere Verbesserung und Optimierung der Pflanzenerkennung und somit der Unterscheidung von Kultur- und Unkrautpflanze sowie deren Positionierung im Vorfeld der Hackmaschine legen. Durch einen schnelleren und präziseren Bildverarbeitungsprozess könnte die Arbeitsgeschwindigkeit auf jenseits der 3,6 km/h gesteigert und zudem die Beschädigung oder gar der Verlust von Zuckerrübenpflanzen verhindert beziehungsweise minimiert werden.

## 10 Summary

Weed control within the planted rows continues to present a major challenge to organic sugar beet farmers. As sugar beet is very susceptible to competition from weeds during its early development, it is essential that farmers ensure that the soil is kept weed-free until row closure. Mechanical hoeing is available for the soil between the rows, but often only manual hoeing can be used for weed control within the row, with the exception of a small number of non-selective row hoeing techniques. Depending on the level of weed infestation in the field, its use can fluctuate within a range of 60 to 340 Akh/ha.

A project for the development of a selectively working row hoeing machine was jointly started in 2009 at Universität Hohenheim with the Baden-Wuerttemberg Ministry for Nutrition and Rural Affairs, the Association of Baden-Wuerttemberg Sugar Beet Growers and Schmotzer, based in Bad Windsheim, to support organic sugar beet cultivation.

The project was based on a single-row hoeing machine prototype from a previous project, which already had an image processing algorithm for the selection and positioning of sugar beets. There were also two tool shapes for weed control within a row of sugar beets. These hoeing tools were powered by a hydraulic motor, the speed of which was regulated by a PWM solenoid valve based on driving speed and image processing.

Field tests were carried out with both at the start of the follow-on project, and a new design of hoeing tool was also tested. The quality of work performed by the three tools was then compared. The extent of the worked and unworked area within a simulated row of sugar beets was examined, among other aspects, and the method of operation and susceptibility of the tool to becoming blocked when it met larger weeds were also assessed. A mobile electric high-voltage drive was also designed with Ludwigsburg-based Jetter AG, in parallel to the field experiments, in view of problems experienced with the control dynamics of the hydraulic drive. Field experiments were then conducted with the advanced prototype under practical conditions on two test sites in Hohenheim during the following vegetation period. The row hoeing machine was compared with various methods, including manual hoeing combined with a standard hoeing machine for the soil between the rows, and also compared to the results achieved by using conventional chemical weed control. Following the initial practical experiments and the findings obtained from them, the row hoeing machine was further revised and a second row was added. The field experiments were then repeated in the same arrangement as in the previous year, again at two sites, using this two-row hoeing machine.

After a two-year long test phase, it is clear that the use of a selectively working row hoeing machine reduces manual work by up to 40 %, depending on the extent of the weeds. Manual weed

control continues to be indispensable for removing weeds in the immediate vicinity of the sugar beet plants, which can have an adverse impact on the yield if not removed.

Furthermore, the use of the row hoeing machine leads to an unavoidable loss of plants, which, to a certain extent, neither affects the technical quality nor overall harvest of the sugar beets. In contrast, later weeding after row closure can cause significant loss of yield.

In conclusion, it is worth mentioning that image processing reaches its limits under difficult conditions of up to 400 weeds per m<sup>2</sup>. The image processing algorithm also requires further improvement. By contrast, the mobile electrical high-voltage drive and the continuously moving shape of the hoeing tool both fulfill all requirements.

Future developments should focus on the further improvement and optimisation of plant recognition and thus the differentiation between cultivated plants and weeds and their position in front of the hoeing machine. The working speed could be increased to more than 3.6 km/h with a faster and more precise image processing method, and damage to plants, or even loss of sugar beet plants, could then be prevented or minimised.

## Literaturverzeichnis

**AITKENHEAD, M. J., I. A. DALGETTY, C. E. MULLINS, A. J. S. McDONALD UND N. J. C. STRACHAN (2003):** Weed and crop discrimination using image analysis and artificial intelligence methods. Zeitschrift Computers and Electronics in Agriculture, Heft 39 (2003), 157 – 171.

**ANONYM (2006):** Praxis der Antriebstechnik: Servoantriebe. Firmenzeitschrift Firma SEW Eurodrive, Ausgabe 9/2006.

**ANONYM (2009):** Richtlinie 2009/128/EG des Europäischen Parlaments und des Rates vom 21.10.2009 über einen Aktionsrahmen der Gemeinschaft für die nachhaltige Verwendung von Pestiziden.

**ÅSTRAND, B. UND A. - J. BAERVAELDT (2002):** An Agricultural Robot with Vision-based Perception for Mechanical Weed Control. Zeitschrift Autonomous Robots, Heft 13 (2002), S. 21 – 35.

**ÅSTRAND, B. UND A.-J. BAERVELDT (2005):** A vision based row-following system for agricultural field machinery. Zeitschrift Mechatronics, Heft 15 (2005), S. 251 – 269.

**AUMER, W., M. GEISSLER, M. LINDNER, T. HERLITZIUS, U. SCHUFFENHAUER UND N. MICHALKE (2010b):** Funktionsintegration elektrischer Antriebe in selbstfahrende Erntemaschinen. Tagungsband VDI/MEG-Tagung Landtechnik, Braunschweig 2010, VDI-Berichte Nr. 2111, S. 351 – 356.

**AUMER, W., M. LINDNER, M. GEISSLER UND T. HERLITZIUS (2008):** Elektrischer Traktor: Vision oder Zukunft. Fachzeitschrift Landtechnik, 63. Jahrgang, Heft 1, S. 14 – 15.

**AUMER, W., M. LINDNER, T. HERLITZIUS UND G. BERNHARDT(2008):** Konzeptioneller Vergleich von elektrischen und hydrostatischen Fahrtrieben im Mährescher. Zeitschrift Landtechnik 63. Jahrgang (2008), Heft 2, S. 88 – 89.

**AUMER, W., U. SCHUFFENHAUER, T. HERLITZIUS, M. LINDNER, M. GEIBLER UND N. MICHALKE (2010a):** Funktionsintegration eines elektrischen Antriebs in eine Dreschtrommel. Zeitschrift Landtechnik 65. Jahrgang (2010), Heft 3, S. 194 – 197.

**BAKKER, T., H. WOUTERS, K. VAN ASSELT, J. BONTSEMA, L. TANG, J. MÜLLER UND G. VAN STRATEN (2008):** A vision based row detection system for sugar beet. Zeitschrift Computers and Electronics in Agriculture, Heft 60 (2008), S. 87 – 95.

- BAKKER, T., H. WOUTERS, K. VAN ASSELT, J. BONTSEMA, L. TANG, J. MÜLLER UND BARUCKI, T.** (2001): Optimierung des Kraftstoffverbrauches und der Dynamik eines dieselelektrischen Fahrtriebs für Traktoren. Dissertation Technische Universität Dresden, 2001, Forschungsbericht Agrartechnik der VDI/MEG Nr. 393.
- BERNHARD, B. UND H. D. KUTZBACH** (2002): Alternative Konzepte für den Mähdrescherfahrtrieb. Tagungsband VDI/MEG-Tagung Landtechnik, Halle/Saale 2002, VDI-Bericht 1716, S. 93 – 97.
- BERNHARD, B. UND M. SCHREIBER** (2005): Experimenteller Vergleich von Fahrtrieben am Mähdrescher. Landtechnik 60 (2005) Heft 2, S. 82 – 83.
- BERNHARD, B.** (2011): Untersuchungen zur Bewertung stufenloser Fahrtriebe für Mähdrescher. Dissertation Universität Hohenheim, 2011, Forschungsbericht Agrartechnik der VDI/MEG Nr. 499.
- BERNHARD, B., M. SCHREIBER UND H. D. KUTZBACH** (2004): Vergleich elektrischer und hydraulischer Fahrtriebe für Mähdrescher. Tagungsband VDI/MEG-Tagung Landtechnik, Dresden 2004, VDI-Bericht 1855 (2004), S. 211 – 219.
- BEUNK, H.** (1999): Stufenlos mit Diesel und Strom. Profi-Magazin für Agrartechnik, 10. Jahrgang, Heft 6, S. 30 – 32.
- BIER, P.** (2010): Vergleich und Bewertung von Hackwerkzeugen für die selektive Unkrautregulierung bei der Reihenkultur Zuckerrübe. Bachelor-Thesis, Universität Hohenheim, Institut für Agrartechnik, unveröffentlicht.
- BLASCO, J., N. ALEIXOS, J. M. ROGER, G. RABATEL UND E. MOLTO** (2002): Robotic weed control using machine vision. Zeitschrift Biosystem Engineering, Heft 83 (2), S.149 – 157.
- BÖHLER, D., M. LICHTENHAHN, H. DIERAUER, A. BERTSCHI, S. JENNI UND H. RAMSEIER** (2012): Merkblatt Biozuckerrüben. Bestellnummer 1172, Ausgabe Schweiz. Forschungsinstitut für Biologischen Landbau (FiBL), CH-5070 Frick.
- BOHREN, C., G. MERMILLOD UND N. DELABAYS** (2006): Erstmals Resistenz gegen Sulfonylharnstoffe in der Schweiz bestätigt. Fachzeitschrift Agrarforschung, 13. Jahrgang, Heft 3, S. 120 – 125.
- BÖHRNSEN, A.**(2013): Elektrisch angetriebene Maschinen – Hochspannung für Streuer und Achse. Profi-Magazin für Agrartechnik 25. Jahrgang 2013, Heft 6, S. 82 – 84.

- BOSSU, J., CH. GÉE, G. JONES und F. TRUCHETET (2009):** Wavelet transform to discriminate between crop and weed in perspective agronomic images. Zeitschrift Computers and Electronics in Agriculture, Heft 65 (2009), S. 133 – 143.
- BRÄUNL, T., S. FEYRER, W. RAPF und M. REINHARDT (1995):** Parallele Bildverarbeitung. Addison-Wesley, Bonn, S. 99 ff.
- BRÄUTIGAM, H. (1997):** Untersuchungen zur Konkurrenz zwischen Unkraut und Zuckerrüben – Auftreten, Ursachen und Konsequenzen für die Unkrautregulierung. Dissertation, Universität Göttingen.
- BRENNEISEN, T. (2009):** Konzeption und Evaluierung eines Boniturverfahrens für Feldversuche am Beispiel des Zuckerrübenanbaus. Bachelor-Thesis, Universität Hohenheim, unveröffentlicht.
- BRÖKER, M. (2014):** Pflanzenschutz: Der Kollaps droht. Fachzeitschrift Top agrar, 43. Jahrgang, Heft 9.
- BUCHER, U. (2009):** Potentiale mechanischer Unkrautregulierungsverfahren im Bio-Zuckerrübenanbau. Master-Thesis, Universität Hohenheim, Institut für Agrartechnik, unveröffentlicht.
- BUCHER, U., M. STRÖBEL, K. KÖLLER UND M. FEIDER (2012):** Entwicklung und Realisierung einer mehrreihigen Reihenhackmaschine mit elektrischem Hackwerkzeugantrieb. Tagungsband VDI/MEG-Tagung Landtechnik, Karlsruhe 2012, VDI-Bericht 2173 (2010), S. 439 – 447.
- BUNDSCHUH, B. (2010):** Panik vor dem Pflanzenschutzpaket der EU. Fachzeitschrift Top agrar, 39. Jahrgang, Heft 12, S. 62 – 64.
- BRUNING, E., T. KEMPF UND R. KEIL (2008):** E Premium – Höhere Spannung in landwirtschaftlichen Nutzfahrzeugen. Neue E Premium Traktorbaureihe von John Deere. Tagungsband VDI/MEG- Tagung Landtechnik, Hohenheim 2008, VDI-Bericht 2045 (2008), S. 77 – 82.
- BURGOS-ARTIZZUA, X. P., A. RIBEIROA, M. GUIJARROB UND G. PAJARES (2011):** Real-time image processing for crop/weed discrimination in maize fields. Zeitschrift Computers and Electronics in Agriculture, Heft 75 (2011), S. 337 – 346.
- CORDILL, C. UND T. E. GRIFT (2011):** Design and testing of an intra-row mechanical weeding machine for corn. Zeitschrift Biosystem Engineering, Heft 110 (2011), S. 247 – 252.

- DEDOUSIS, A. P.** (2007): An investigation into the design of precision weeding mechanism for inter and intra-row weed control. PhD Thesis, Cranfield University, School of Applied Sciences.
- DEDOUSIS, A. P.** und **T. BARTZANAS** (2010): Soil Engineering, Springer Verlag (2010), S. 171 – 179.
- DRANGMEISTER, H.** (2011): Zuckerrübenanbau im ökologischen Landbau. Informationsmaterialien – D2 Spezieller Pflanzenbau. Informationsmaterialien über den ökologischen Landbau für den Unterricht an landwirtschaftlichen Berufs- und Fachschulen. Herausgegeben vom Bundesministerium für Ernährung, Landwirtschaft und Verbraucherschutz.
- EHSANI, M. R., S. K. UPADHYAYA** UND **M. L. MATTSON** (2004): Seed Location Mapping using RTK GPS. Transactions of the ASAE (American Society of Agricultural Engineers), Vol. 47 (3), S. 909 – 914.
- FEIDER, M., U.-P. BUCHER, M. STRÖBEL-FRÖSCHLE** UND **K. KÖLLER** (2013): Erfahrungen bei der Elektrifizierung einer Hackmaschine im Zuckerrübenanbau. Tagungsband Herstellerunabhängige Mobiltagung für mobile Automatisierungs-Profis, 03.-04.06.2013, Ludwigsburg, S. 33 – 36.
- FELLMANN, M., GÖTZ M. UND J. BERNER** (2010): Längsdynamiksimulationen beim Traktor – Vergleich zwischen Hybridisierung und Elektrifizierung. Tagungsband VDI/MEG-Tagung Landtechnik, Braunschweig 2010, VDI-Bericht 2111 (2010), S. 371 – 377.
- FISCHER, D.** (2012): Mechanische Unkrautkontrolle im biologischen Zuckerrübenanbau. Dissertation, Universität Hohenheim, Schriftenreihe Agrarwissenschaftliche Forschungsergebnisse, Band 43, Verlag Dr. Kovac, Hamburg.
- FUEST, K. UND P. DÖRING** (2008): Elektrische Maschinen und Antriebe. Unveränderter Nachdruck 2008, Vieweg+Teubner, GWV Fachverlag GmbH, Wiesbaden.
- GALLMEIER, M.** (2009): Vergleichende Untersuchungen an hydraulischen und elektrischen Baugruppenantrieben für landwirtschaftliche Arbeitsmaschinen. Dissertation Technische Universität München, 2009, Forschungsbericht Agrartechnik der VDI/MEG Nr.479.
- GALLMEIER, M. UND H. AUERNHAMMER** (2004): Eignung mechanischer, hydraulischer und elektrischer Antriebskonzepte als effiziente Antriebsstränge in mobilen landwirtschaftlichen Arbeitsmaschinen. Tagungsband VDI/MEG- Tagung Landtechnik, Dresden 2004, VDI-Bericht 1855 (2004), S. 221 – 229.

**GALLMEIER, M. UND H. AUERNHAMMER (2007a):** Bewertung stufenloser Antriebssysteme in Arbeitsmaschinen. Tagungsband VDMA Informationstagung Hybridantriebe für mobile Arbeitsmaschinen, Karlsruhe 2007, S. 81 – 93.

**GALLMEIER, M. UND H. AUERNHAMMER (2007b):** Hydraulic and electric drivelines for mobile working machines – Assessment of powertrains for use in mobile applications based on stationary and dynamic efficiency test. Tagungsband VDI/MEG-Tagung Landtechnik, Hannover 2007, VDI-Berichte Nr. 2001, S. 115 – 120.

**GEISSLER, M., M. LINDNER, W. AUMER, T. HERLITZIUS, P.-K. BUCHING, H. STEINBACH UND H. GRÄF (2009):** Dieselelektrische Antriebssysteme in selbstfahrenden Landmaschinen. Tagungsband Fachtagung Baumaschinentechnik, 14.-15.Mai 2009, Dresden, S. 135 – 144.

**GEISSLER, M., W. AUMER und T. HERLITZIUS (2013):** Mit elektrifizierten Antrieben den Anwendernutzen vergrößern. Tagungsband Herstellerunabhängige Mobiltagung für mobile Automatisierungs-Profis, 03.-04.06.2013, Ludwigsburg, S. 13 – 19.

**GEISSLER, M., W. AUMER, M. LINDNER UND T. HERLITZIUS (2010a):** Elektrifizierter Radnabenantrieb im Traktor. Tagungsband VDI/MEG-Tagung Landtechnik, Braunschweig 2010, VDI-Bericht 2111 (2010), S. 363 – 369.

**GEISSLER, M., W. AUMER, M. LINDNER UND T. HERLITZIUS (2010b):** Elektrifizierter Einzelradantrieb in mobilen Landmaschinen. Zeitschrift Landtechnik, 65. Jahrgang, Heft 2, S.368 – 371.

**GERHARDS, R. UND H. OEBEL (2006):** Practical experiences with a system for site-specific weed control in arable crops using real-time image analysis and GPS-controlled patch spraying. Zeitschrift Weed Research, 46. Jahrgang (2006), S. 185 – 193.

**GERHARDS, R. UND S. CHRISTENSEN (2003):** Real-time weed detection, decision making and patch spraying in maize, sugar beet, winter wheat and winter barley. Weed Research, Vol. 43 (2003), S. 385 – 392.

**GOBOR, Z. (2007):** Development of a novel mechatronic system for mechanical weed control of the intra-row area in row crops based on detection of single plants and adequate controlling of the hoeing tool in realtime. Dissertation Universität Bonn, VDI/MEG-Forschungsbericht Agrartechnik 464.

**GOBOR, Z. UND P. SCHULZE LAMMERS (2006):** Concept and virtual prototype of a rotary hoe for intra-row weed control in row crops. Tagungsband VDI/MEG, EurAgEng, CGRI,

FAO World Congress: Agricultural Engineering for a Better World, Bonn 2006, VDI-Bericht 1958 (2006), S. 323 – 324.

**GÖTZ, M., A. M. MÜLLER UND M. ABELE** (2011): Electrification of a traktor and implement – The ZF project ElecTra. Tagungsband VDI/MEG-Tagung Landtechnik, Hannover 2011, VDI-Bericht 2124 (2011), S. 15 – 20.

**GÖTZ, M., W.-D. GRUHLE, M. MOHR UND K. GRAD** (2009): Electically Assisted Powertrains for Agricultural Machinery, in particular Tractors. Tagungsband VDI/MEG-Tagung Landtechnik, Hannover 2009, VDI-Bericht 2060 (2009), S. 67 – 72.

**GRIEPENTROG, H. W., M. NØRREMARK UND J. NIELSEN** (2006): Autonomous intra-row weeding based on GPS. Tagungsband VDI/MEG, EurAgEng, CGI, FAO World Congress: Agricultural Engineering for a Better World, Bonn 2006, VDI-Bericht 1958 (2006), S. 325 – 326.

**GRIEPENTROG, H. W., M. NØRREMARK, H. NIELSON UND B. S. BLACKMORE** (2005): Seed mapping of sugar beet. Fachzeitschrift Precision Agriculture, Heft 6 (2005), S. 157 – 165.

**GRIEPENTROG, H. W., M. NØRREMARK, H. NIELSEN UND B. S. BLACKMORE** (2003): Individual plant care in cropping systems. Tagungsband 4<sup>th</sup> European Conference on Precision Agriculture, S. 247 – 251.

**GRIEPENTROG, H. W., P. T. SKOU, J. F. SORIANO UND B. S. BLACKMORE** (2005): Design of a seeder to achieve highly uniform sowing patterns. Tagungsband 5<sup>th</sup> European Conference Precision Agriculture, S. 675 – 689.

**GRUBER UND DIETEL** (2012): Fahrtrieb Ropa Rübenroder, Effizienzvergleich, Kühlkonzept. Vortrag beim 3. VDI/MEG-Kolloquium: Elektrische Antriebe in der Landtechnik, 26.-27. Juni 2012, Dresden.

**GRUNDY, A. C.** (2007): Inter and intra-row mechanical weed control with rotating discs. Tagungsband 6<sup>th</sup> European Conference on Precision Agriculture, Skiathos, Griechenland (2007), S. 493 – 498.

**GÜNTHER, A., G. BERNHARDT, S. MANN UND H. JÄHNE** (2005): Anforderungen an einen elektrischen Radantrieb. Zeitschrift Landtechnik, 60. Jahrgang, Heft 4, S. 192 – 193.

**HABERLAND, R. UND W. KOCH** (2009): Anbau von Biozuckerrüben: Aufwendig aber lohnend. Fachzeitschrift Neue Landwirtschaft, 6/2009, S. 60 – 64.

- HAGUE, T. UND N. D. TILLET** (2001): A bandpass filter-based approach to crop row location and tracking. Zeitschrift Mechatronics, Heft 1 (2001), S. 1 – 12.
- HAHN, K.** (2008): Electric Tractor Implement Interface. High Voltage Drives for Agricultural Tractors and Their Implements. Tagungsband VDI/MEG-Tagung Landtechnik, Hohenheim 2008, VDI-Bericht 2045 (2008), S. 77 – 82.
- HAHN, K.** (2011): Einsatzmöglichkeiten elektrischer Antriebe für landwirtschaftliche Maschinenkombinationen. Dissertation Universität Hohenheim, 2011, Forschungsbericht Agrartechnik der VDI/MEG Nr. 496.
- HANDLER, F. UND M. NADLINGER** (2005): Technische, arbeits- und betriebswirtschaftliche Aspekte der automatischen Lenkung von Hackgeräten. Endbericht zum Forschungsprojekt BLT 2003/2277, Wieselburg.
- HAUG, K.** (2012): Untersuchung einer optischen Selektivhacke zur mechanischen Unkrautregulierung im Salat. Bachelor Thesis (2012) Institut für Agrartechnik, Universität Hohenheim, unveröffentlicht.
- HEMMERDE, T.** (2009): Untersuchungen von Herbizidresistenzen bei Unkräutern in Deutschland. Bachelor-Thesis, Justus-Liebig-Universität Gießen.
- HEMMING, N. UND T. RATH** (2001): Computer-Vision-based weed identification under field conditions using controlled lighting. Journal of Agricultural Engineering Research, 78 (3), S. 233 – 243.
- HERLITZIUS, T., W. AUMER, M. LINDNER, G. BERNHARDT, H. KUB, N. MICHALKE UND U. SCHUFFENHAUER**: Integration of an electrical Drive into a tangential threshing cylinder. Tagungsband VDI/MEG-Tagung Landtechnik, Hannover 2009, VDI –Berichte Nr. 2060, S. 495 – 500.
- HERLITZIUS, T., M. GEIBLER, W. AUMER UND M. LINDNER** (2010): Powerpack-Systeme und Ihre Einsatzmöglichkeit in mobilen Landmaschinen. Tagungsband VDI/MEG-Tagung Landtechnik, Braunschweig 2010, VDI-Bericht 2111, S. 357 – 362.
- HOME, M.** (2003): An investigation into design of cultivation systems for inter- and intra-row weed control, Dissertation (2003), National Soil Resources Institute, Cranfield University, Silsoe, UK.
- IRLA, E., E. SPIESS UND J. HEUSSER** (2005): Verbesserung der Anbau- und Unkrautregulierungstechnik bei Biozuckerrüben. FAT-Bericht Nr. 633, Eidgenössische Forschungsanstalt für Agrarwirtschaft und Landtechnik, Etthausen, Schweiz.

- JAYASUMANA, C., S. GUNATILAKE UND P. SENANAYAKE** (2014): Glyphosate, hard water and nephrotoxic metals: Are they the culprits behind the epidemic of chronic kidney disease of unknown etiology in Sri Lanka? *International Journal of Environmental Research and Public Health*, 11. Jahrgang, Heft 2, S. 2125 – 2147.
- JONES, G., CH. GÉE UND F. TRUCHETET** (2009): Assessment of an inter-row weed infestation rate on simulated agronomic images. *Zeitschrift Computers and Electronics in Agriculture*, Heft 67 (2009), S. 43 – 50.
- KERN, J.** (2007): Verfahren der mechanischen Unkrautkontrolle im Bio-Zuckerrübenanbau (unveröffentlicht). Master-Thesis, Universität Hohenheim.
- KLINGER, M. UND H. FICHTL** (2012): Forschung für eine mobile Zukunft. Vortrag beim 3. VDI/MEG Kolloquium: Elektrische Antriebe in der Landtechnik, 26.-27. Juni 2012, Dresden.
- KOBUSCH, H.** (2003): Unkrautbekämpfung in Zuckerrüben – Ermittlung der kritischen Periode. Dissertation Universität Hohenheim, Fakultät Agrarwissenschaften, Institut für Phytomedizin.
- KOLBE, H. UND W. PETZOLD** (2002): Zuckerrüben ökologisch anbauen – Informationen für Praxis und Beratung. Sächsische Landesanstalt für Landwirtschaft, Dresden.
- KÖNIG, H. P., A. MAYERCORDT UND H. J. KOCH** (2005): Zuckerrüben ökologisch anbauen – Ein Leitfaden für die Praxis. Institut für Zuckerrübenforschung, Göttingen.
- KRAMER, J., M. BALDINGER, P. SCHOBER, B. REICHL UND H. PRANKL** (2013): Hybridsysteme für die Landtechnik. *Fachzeitschrift Landtechnik*, 68. Jahrgang, Heft 1, S. 22 – 25.
- KRUSTJENS, D. A. G. UND M. J. KROPF** (2001): The impact of uprooting and soil-covering on the effectiveness of weed harrowing. *Zeitschrift Weed Research* 41 (2001), S. 211 – 228.
- LEE, W. S., D. C. SLAUGHTER UND D. K. GILES** (1999): Robotic Weed Control System for Tomatoes. *Zeitschrift Precision Agriculture*, Heft 1 (1999), S. 95 – 113.
- LÜTKE ENTRUP, N. UND B. C. SCHÄFER** (2011): Lehrbuch des Pflanzenbaues. Band 2: Kulturpflanzen. 3. Auflage, AgroConcept GmbH, Bonn.
- MASUR, F.** (2010): Selektive, mechanische Unkrautregulierung in Reihenkulturen - Erörterung der Möglichkeiten anhand des „Robovator“. Diplomarbeit, Fachbereich Landtechnik, Fachhochschule Weihenstephan, Abteilung Triesdorf.
- NEUNHABER, M.** (2010): Stufenlos mit dem Strom-Exklusiver Fahrbericht Prototyp Belarus 3023. *Profi-Magazin für Agrartechnik*, 22. Jahrgang, Heft 6, S. 34 – 37.

- NORREMARK, M., H. W. GRIEPENTROG, J. NIELSEN UND H. T. SOGAARD** (2008): The development of the accuracy of the autonomous GPS-based system for intra-row mechanical weed control in row crops. *Zeitschrift Biosystems Engineering*, Heft 101 (2008), S. 396 – 410.
- NORREMARK, M., H. W. GRIEPENTROG, J. NIELSEN UND H. T. SOGAARD** (2012): Evaluation of an autonomous GPS-based system for intra-row weed control by assessing the tilled area. *Zeitschrift Precision Agriculture* 13 (2012), S. 149 – 162.
- NØRREMARK, M. UND H. W. GRIEPENTROG** (2004): Analysis and definition of the close-to-crop area in relation to robotic weeding. Tagungsband: 6<sup>th</sup> EWRS Workshop on Physical and Cultural Weed Control, Lillehammer, Norwegen, 8.-10. Mai 2004, S.127 – 140.
- NØRREMARK, M., H. W. GRIEPENTROG, H. NIELSEN UND B.S. BLACKMORE** (2003): A method for high accuracy geo-referencing of data from field operations. Tagungsband 4<sup>th</sup> European Conference on Precision Agriculture, S. 463 – 467.
- O'DOHERTY, M. J., R. J. GODWIN, A. P. DEDOUSIS, J. L. BRIGHTON UND N. D. TILLET** (2007): A Mathematical Model of the Kinematics of a Rotating Disc for Inter- and Intra-row Hoeing. *Zeitschrift Biosystem Engineering*, Heft 96 (2007), S. 169 – 179.
- OEBEL, H. UND R. GERHARDS** (2005): Site-specific weed control using image analysis and georeferenced application maps: on-farm experiences. Tagungsband 5<sup>th</sup> European Conference on Precision Agriculture, S.131 – 138.
- OEBEL, H.** (2006): Teilschlagspezifische Unkrautbekämpfung durch raumbezogene Bildverarbeitung im Offline- (und Online-) Verfahren (TURBO). Dissertation Universität Hohenheim, Fakultät Agrarwissenschaften, Institut für Phytomedizin.
- PÉREZ-RUIZ, M., D. C. SLAUGHTER, C. J. GLIEVER UND S. K. UPADHAYAYA** (2012): Automatic GPS-based intra-row weed knife control system for transplanted row crops. *Zeitschrift Computers and Electronics in Agriculture*, Heft 80 (2012), S. 41 – 49.
- PETERSEN, J., M. MANSCHREIBER, B. AUGUSTIN UND D. DICKE** (2015): Ein Schritt vor dem Abgrund. Deutsche-Landwirtschafts-Gesellschaft (DLG), Mitteilungen 1/2015, S. 44 – 47.
- PIRON, A., V. LEEMANS, O. KLEYNEN, F. LEBEAU UND M.-F. DESTAIN** (2008): Selection of the most efficient wavelength bands for discriminating weeds from crop. *Zeitschrift Computers and Electronics in Agriculture*, Heft 62 (2008), S. 141 – 148.

**PRANKL, H., M. NADLINGER, F. DEMMELMAYR, M. SCHRÖDL, T. COLLE UND G. KALTEIS** (2011): Multi-Functional PTO Generator for Mobile Electric Power Supply of Agricultural Machinery. Tagungsband VDI/MEG-Tagung Landtechnik AgEng, Hannover 2011, VDI-Bericht 2124, S. 7 – 13.

**REINMUTH, F. UND N. TARASINSKI** (2011): Electric Driven Implement Axles. Potentials, systemic and control strategies. Tagungsband VDI/MEG-Tagung Landtechnik AgEng, Hannover 2011, VDI-Bericht 2124 (2011), S. 27 – 32.

**RENIUS, K. TH., H. KNECHTGES UND M. GEIMER** (2011): Gesamtentwicklung Traktoren. In: Harms, H.-H. und R. Metzner: Jahrbuch Agrartechnik 2011, Band 23, DLG-Verlag, Frankfurt, S. 55 – 61.

**SCHMETZ, R. UND J. KLETT** (1998): Neue Produkttechnologie im Traktorenbau, insbesondere elektromechanische Traktorgetriebe. Tagungsband VDI/MEG-Tagung Landtechnik, Garching, VDI-Berichte 1449, S. 1 – 6.

**SCHMIDHALTER, J., T. SELIGE UND J. BOBERT** (2002): Geophysikalische und fernerkundliche Ermittlung teilflächenspezifischer Ertragspotentiale auf der Grundlage des Wasserhaushalts. KTBL Sonderveröffentlichung 038.

**SCHMITTMANN, O., H. KAM UND P. SCHULZE LAMMERS** (2008): Entwicklung eines Sägerätantriebs mit Steuerung zur positionsgenauen Ablage von Saatgut. Tagungsband VDI/MEG-Tagung Landtechnik, Hohenheim 2008, VDI-Bericht 2045 (2008), S. 179 – 186.

**SCHRANK, C., P. PICKEL, R. GUGLER, B. BÖHM UND N. TARASINSKI** (2011): Electromobility in agriculture, a contribution towards a safe and sustainable energy supply. Tagungsband VDI/MEG-Tagung Landtechnik AgEng, Hannover 2011, VDI-Bericht 2124 (2011), S. 231 – 237.

**SCHWAB, B. UND H. THALMANN** (2008): Bio-Zuckerrüben sind gesucht, Fachzeitschrift Bioland 1/2008, S. 8 – 10.

**SCHUSTER, W. UND J. VON LOCHOW** (1992): Anlage und Auswertung von Feldversuchen – Anleitung und Beispiele für die Praxis der Versuchsarbeit. 3., überarbeitete Auflage, Verlag Alfred Strohte, Frankfurt.

**SOBOTZIG, J. UND B. SHI** (2012): Elektrische Antriebe für Traktoren und Anbaugeräte. Tagungsband VDI/MEG-Tagung Landtechnik, Karlsruhe 2012, VDI-Bericht 2173 (2012), S. 37 – 44.

**SÖKEFELD, M. UND R. GERHARDS (2004):** Automatische Unkrautkartierung mit digitaler Bildverarbeitung. Zeitschrift Landtechnik, 59. Jahrgang (2004), Heft 3, S. 154 – 155.

**SÖKEFELD, M. UND R. GERHARDS (2003):** Unkrautkartierung mit digitaler Bildverarbeitung. Weed mapping using digital image processing. Tagungsband VDI/MEG-Tagung Landtechnik, Hannover 2003, VDI-Bericht 1798 (2003), S. 103 – 108.

**SÖKEFELD, M., R. GERHARDS, H. OEBEL UND R.-D. THERBURG (2007):** Image acquisition for weed detection and identification by digital image analysis. Tagungsband 6<sup>th</sup> European Konferenz on Precision Agriculture, S 523 – 528.

**STEIN, M. (2012):** Technische und rechtliche Herausforderungen beim Einsatz elektrischer Antriebe in der Landtechnik – Prüfung/Zertifizierung/Zulassung hinsichtlich Maschinenrichtlinie. Vortrag beim 3. VDI/MEG-Kolloquium: Elektrische Antriebe in der Landtechnik, 26.-27. Juni 2012, Dresden.

**STEINHART, H. (2012):** Elektrische Antriebe 1. Vorlesungsunterlagen Sommersemester 2012, Hochschule Aalen.

**SUN, H., D. C. SLAUGHTER, M. PEREZ RUIZ, C. GLIEVER, S. K. UPADHYAYA UND R. F. SMITH (2010):** RTK-GPS mapping of transplanted row crops. Computers and Electronics in Agriculture, Heft 71, S. 32 – 37.

**SZAJEK, A. (2007):** Motivation und Konzepte zum Einsatz elektrischer Antriebstechnik im Ackerschlepper am Beispiel MELA. Tagungsband VDMA Informationstagung Hybridantriebe für mobile Arbeitsmaschinen, Karlsruhe 2007, S. 97 – 105.

**SZAJEK, A., M. SALLER, A. ALBRECHT, U. HERB, T. TREICHL, M. HACKNER, W. SCHLEICH UND M. KROMPASS (2004):** MELA – Mobile Leistungs- und Antriebstechnik für Fahrzeuge – ein offenes elektrisches Leistungsnetz für Offroad-Anwendungen. Tagungsband VDI/MEG-Tagung Landtechnik, Dresden 2004, VDI-Bericht 1855 (2004), S. 241 – 246.

**TARASINSKI, N. (2004):** Elektrische Antriebe in Traktoren. Tagungsband VDI/MEG-Tagung Landtechnik, Dresden 2004, VDI-Bericht 1855 (2004), S. 231 – 239.

**THIEL, M., A. SARFERT, G. MAIR AM TINKHOF UND M. OREHEK (2011):** Development of a PTO driven generator for electrical drives in agricultural machinery concept and realization of an add-on power generator. Tagungsband VDI/MEG-Tagung Landtechnik AgEng, Hannover 2011, VDI-Bericht 2124 (2011), S. 21 – 26.

- TILLET, N. D., T. HAGUE UND S.J. MILES** (2002): Inter-row vision guidance for mechanical weed control in sugar beet. Zeitschrift Computers and Electronics in Agriculture, Heft 33 (2002), S. 163 – 177.
- TILLET, N.D., T. HAGUE, A.C. GRUNDY UND A.P. DEDOUSIS** (2008): Mechanical within-row weed control for transplanted crops using computer vision. Zeitschrift Biosystem Engineering, Heft 99 (2008), S. 171 – 178.
- TKOTZ, K.** (2012): Fachkunde Elektrotechnik. 28. Auflage (2012), Verlag Europa – Lehrmittel, Nourney, Vollmer GmbH & Co.KG, Haan-Gruiten, Europa-Nr.: 30138.
- TRIEBE, S.** (2013): Biokampagne 2012 und Anbauplanung 2013. Vortrag bei der Infoveranstaltung zum Biorübenanbau, 25.01.2013, Hausen bei Würzburg.
- TRIESCHMANN, M.** (2012): Öko-Zuckerrüben Saison. Fachzeitschrift Naturland Nachrichten, Heft 4, August 2012.
- VAN STRATEN, G.** (2008): A vision based row detection system for sugar beet. Zeitschrift Computers and Electronics in Agriculture, Heft 60 (2008), S. 87 – 95.
- WAGNER, L.** (2012): Evaluierung eines georeferenzierten Einzelkornsäverfahrens für die Reihenkultur Zuckerrübe. Bachelor-Thesis, Universität Hohenheim, Institut für Agrartechnik, unveröffentlicht.
- WEINMANN, O., M. GÖTZ, M. WESSELS UND F. RAHE** (2012): Elektrifizierung eines Traktors mit Anbaugerät. Tagungsband VDI/MEG-Tagung Landtechnik, Karlsruhe 2012, VDI-Bericht 2173 (2012), S. 45 – 50.
- WEIS, M.** (2010): An image analysis and classification system for automatic weed species identification in different crops for precision weed management. Dissertation Universität Hohenheim, Fakultät Agrarwissenschaften, Institut für Phytomedizin.
- WEIS, M. UND R. GERHARDS** (2007): Feature extraction for the identification of weed species in digital images for the purpose of site-specific weed control. Tagungsband 6<sup>th</sup> European Conference on Precision Agriculture, S. 523 – 528.
- WEIS, M., C. GUTJAHR, V. RUEDA AYALA, R. GERHARDS, C. RITTER UND F. SCHÖLDERLE** (2008): Precision farming for weed management: techniques. Zeitschrift Gesunde Pflanzen, 60. Jahrgang (2008), S. 171 – 181.
- WELLMANN, A.** (1999): Konkurrenzbeziehungen und Schadensprognose in Zuckerrüben bei variiertem zeitlichem Auftreten von *Chenopodium album* L. und *Chamomilla recutita* (L.). Dissertation Universität Göttingen.

**WETZLER, H.** (2010): Immer eine Herausforderung – Unkrautbekämpfung in Zuckerrüben. Fachzeitschrift Schwäbischer Bauer, 62. Jahrgang, Heft 12, S. 16 – 22.

**WILHELM, B. UND O. HENSEL** (2011): Landtechnische Lösungen zur Beikrautregulierung im Ökolandanbau. Deutsches Institut für Tropische und Subtropische Landwirtschaft (DITSL) GmbH, Witzenhausen.

**WILMER, H.** (2007): Mit Spannung in die Zukunft - Exklusiver Fahrbericht John Deere 7530 E Premium. Profi-Magazin für Agrartechnik, 19. Jahrgang (2007), Heft 12.

**WISSERODT, E., J. GRIMM, M. KEMPER, A. KIELHORN, H. KLEINE-HARTLAGE, M. NARDMANN, J. NAESCHER UND D. TRAUTZ** (2003): Gesteuerte Hacke zur Beikrautregulierung innerhalb der Reihe von Pflanzenkulturen. Tagungsband VDI/MEG-Tagung Landtechnik, Hannover 2003, VDI-Bericht 1798 (2003), S. 155 – 160.

**WÖBKE, S., M. LINDNER UND T. HERLITZIUS** (2012): Systemvergleich zwischen elektrischem und hydraulischem Fahrtrieb einer selbstfahrenden Erntemaschine. Tagungsband VDI/MEG-Tagung Landtechnik, Karlsruhe 2012, VDI-Berichte 2173 (2012), S. 321 – 328.

**WÜNSCHE, M.** (2000): Dynamische Lastsimulation auf dem Antriebsprüfstand. Zeitschrift Landtechnik, 55. Jahrgang, Heft 1, S. 30 – 31.

**WYNDORPS, P.** (2008): 3D-Konstruktion mit Pro/Engineer-Wildfire. Verlag Europa-Lehrmittel, Nourney, Vollmer GmbH & Co.KG, Haan-Griuten.