

Institut für Landtechnik

der Rheinischen Friedrich-Wilhelms-Universität Bonn

Kameragesteuerte mechanische Unkrautbekämpfung in Reihenkulturen

Inaugural-Dissertation

zur Erlangung des Grades:

Doktor der Ingenieurwissenschaften

(Dr.-Ing.)

der Landwirtschaftlichen Fakultät

der Rheinischen Friedrich-Wilhelms-Universität Bonn

vorgelegt im Januar 2017

von

Dipl.-Ing. Matthias Müter

aus

Schapen

Referent: Prof. Dr.-Ing. Peter Schulze Lammers

Korreferent: Prof. Dr.-Ing. Jan-Welm Biermann

Fachnahes Mitglied: Prof. Dr. Ralf Pude

Prüfungsvorsitz: Prof. Dr. Heinrich W. Scherer

Tag der mündlichen Prüfung: 18.05.2017

Erscheinungsjahr: © 2017

Danksagung

Während meiner gesamten Zeit als wissenschaftlicher Mitarbeiter am Institut für Landtechnik wurde ich von vielen Menschen sowohl bei der Lehrtätigkeit als auch bei der Durchführung der mit dieser Dissertation verbundenen Versuche unterstützt. Mein Dank gilt insbesondere:

Meinem Doktorvater Herrn Prof. Dr. Peter Schulze Lammers für das in mich gesetzte Vertrauen, die stetige wissenschaftliche und methodische Unterstützung sowie die mir gebotene Gelegenheit, meine Dissertation über dieses zukunftsweisende Thema zu schreiben.

Herrn Prof. Dr. Jan-Welm Biermann vom Institut für Kraftfahrzeuge der RWTH Aachen für die Übernahme des Korreferats und Herrn Prof. Dr. Heinrich W. Scherer für den Vorsitz bei meiner mündlichen Prüfung.

Herrn Prof. Dr. Ralf Pude für die Unterstützung als fachnahes Mitglied bei meiner mündlichen Prüfung und die Möglichkeit, meine Versuche auf dem Campus Klein-Altendorf durchzuführen.

Den Mitarbeitern des Instituts für Landtechnik für die hervorragende Arbeitsatmosphäre, vor allem Herrn Dr. Lutz Damerow und Frau Monika Förster für die anhaltende Unterstützung in der Sektion „Systemtechnik in der Pflanzenproduktion“ sowie dem gesamten Werkstattteam (Toni Berg, Roland Lutz, Walter Petriwski und Willi Berchtold) für die Herstellung jeder erdenklichen Konstruktion.

Herrn Bernd Bünten und dem gesamten Versuchs- und Werkstattteam vom Campus Klein-Altendorf für das Anlegen und Pflegen meiner Versuchsflächen und die technische Hilfe.

Frau Dr. Christa Lankes und ihrem Team der Abteilung Gartenbauwissenschaften des INRES für die Anzucht und Pflege der Topf-Versuchspflanzen.

Dem Lehr- und Forschungsschwerpunkt "Umweltverträgliche und Standortgerechte Landwirtschaft" (USL) für die finanzielle Unterstützung meines Forschungsprojektes.

Den Firmen Fendt und Kverneland für die Bereitstellung von Maschinen.

Herrn Dr. Tobias Meinhold für die Anregungen, fachlichen Gespräche, die Durchsicht dieser Arbeit und besonders die freundschaftliche Unterstützung.

Anne und meiner Familie, ohne deren Rückhalt, Unterstützung und Motivierung diese Arbeit nicht hätte verwirklicht werden können.

Allen Nichtgenannten, Freunden und Studenten, die mich während meiner Arbeit begleitet und moralisch sowie auch durch nicht-wissenschaftliche Gespräche unterstützt haben.

Meinen Eltern

Inhaltsverzeichnis

Inhaltsverzeichnis	V
Abkürzungs- und Symbolverzeichnis	IX
Kurzfassung	XVIII
Abstract	XIX
1. Einleitung	1
1.1 Schäden und Ertragsverluste durch Unkräuter	1
1.2 Chemische Pflanzenschutzverfahren	3
1.2.1 Unerwünschte Wirkung von Pflanzenschutzmitteln	4
1.2.1.1 Gefährdung des Menschen	4
1.2.1.2 Kontamination von Grund- und Oberflächenwasser	5
1.2.1.3 Entstehung herbizidresistenter Unkräuter	6
1.2.2 Entwicklung und Zulassung von Pflanzenschutzmitteln	6
1.3 Nicht-chemische Pflanzenschutzverfahren	8
1.3.1 Thermische Unkrautbekämpfung	8
1.3.2 Manuelle Unkrautbekämpfung	9
1.3.3 Mechanische, reihenunabhängige Unkrautbekämpfung	10
1.3.4 Mechanische Unkrautbekämpfung zwischen den Reihen (inter-row)	11
2. Stand des Wissens	18
2.1 Hacken innerhalb der Reihe (intra-row)	18
2.1.1 Passive Werkzeugführung	19
2.1.2 Aktive Werkzeugführung	22
2.2 Pflanzenerkennung	29
2.2.1 Tastsensoren	30
2.2.2 Georeferenzierung	30
2.2.3 Lichtschranken	31
2.2.4 Abstandssensoren	32
2.2.5 Bildverarbeitung	33

3. Problemstellung.....	39
4. Material und Methoden.....	43
4.1 Aufbau der Versuchsträger.....	43
4.1.1 Versuchsträger für Laborversuche.....	46
4.1.2 Versuchsträger für Feldversuche	48
4.1.2.1 Stromversorgung des Gesamtsystems	49
4.1.2.2 Systemkommunikation und Informationsverarbeitung	49
4.1.2.3 Antrieb und Regelung der Rotationshacke	51
4.1.2.4 Beleuchtung	55
4.2 Kameratechnik, Bildverarbeitung und Datenauswertung.....	57
4.2.1 Bildaufnahme	60
4.2.2 Farbkamera	60
4.2.3 Infrarotkamera	65
4.2.4 Multispektralkamera.....	67
4.2.4.1 Erkennung der Pflanzen unabhängig von ihrer Gattung	69
4.2.4.2 Pflanzenunterscheidung anhand der Farbe.....	74
4.2.4.3 Pflanzenerkennung anhand der Form, Größe und Lage.....	75
4.2.5 Stereo-Kamera	77
4.2.6 Laser-Lichtschnittverfahren	83
4.3 Computersimulation	86
4.3.1 CAD-Modell der Bodenrinne für Laborversuche	87
4.3.2 CAD-Modell des Versuchsträgers für Feldversuche	88
4.4 Versuche	88
4.4.1 Gewächshausversuche.....	89
4.4.2 Versuche auf der Bodenrinne	90
4.4.3 Feldversuche	90
5. Ergebnisse und Diskussion	94
5.1 Simulation.....	94
5.1.1 Einfluss der Motorausrichtung auf die Kinematik	94

5.1.2	Einfluss der Werkzeuganzahl auf die Kinematik.....	101
5.2	Bildverarbeitung und Pflanzenerkennung.....	103
5.2.1	Analyse der zweidimensionalen, kamerabasierten Pflanzenerkennung.....	103
5.2.1.1	Versuche mit Pflanzendummys	103
5.2.1.2	Versuche mit Zuckerrüben im Zweiblattstadium	105
5.2.1.3	Versuche mit Zuckerrüben im Vierblattstadium	109
5.2.1.4	Versuche mit Zuckerrüben im Sechsbblattstadium.....	110
5.2.1.5	Versuche mit Zuckerrüben kurz vor Pflanzenschluss in der Reihe	112
5.2.1.6	Versuche mit Durchwachsener Silphie	115
5.2.1.7	Ergebnisübersicht der Pflanzenerkennung.....	116
5.2.1.8	Herausforderungen bei der Pflanzenerkennung	118
5.2.2	Analyse der Pflanzenerkennung mit einer Stereo-Kamera	119
5.2.3	Analyse der Pflanzenerkennung mit dem Laser-Lichtschnittverfahren	123
5.3	Ergebnisse zu den Feldversuchen mit der Rotationshacke.....	129
5.3.1	Genauigkeit der Bildverarbeitungs-Servomotor-Kette.....	129
5.3.2	Versuche mit unkrautregulierenden Werkzeugen	131
5.3.2.1	Unkrautregulierung bei Zuckerrüben im Vierblattstadium.....	131
5.3.2.2	Unkrautregulierung bei Zuckerrüben im Sechsbblattstadium	132
6.	Schlussfolgerungen und abschließende Diskussion	135
7.	Ausblick	139
8.	Anhang	140
8.1	EC Entwicklungsstadien der Zuckerrübe	140
8.2	Morphologischer Kasten zur Lösungsfindung	141
8.3	Technische Daten	142
8.3.1	Beleuchtung	142
8.3.1.1	Halogenscheinwerfer	142
8.3.1.2	LED-Modul Neutral-Weiß.....	142
8.3.1.3	LED-Modul IR	143
8.3.1.4	LED Strobe Controller	143

8.3.1.5	Laser	144
8.3.2	Kameras.....	144
8.3.2.1	Farbkamera	144
8.3.2.2	Farbkameras für 3D-Stereo-Vision	145
8.3.2.3	Multispektralkamera.....	146
8.3.3	Inkrementeller Drehgeber	147
8.3.4	Echtzeit-Controller	147
8.3.5	Notstromaggregat.....	149
8.3.6	Antriebsmotor.....	149
8.4	Einstellungen	150
8.4.1	Motorregelung	150
8.4.2	Laser-Lichtschnittverfahren	151
9.	Literaturverzeichnis	152

Abkürzungs- und Symbolverzeichnis

Abkürzung/ Symbol	Physikalische Einheit	Bedeutung
%		Prozent
“		Zoll
°		Grad
°C		Grad Celsius
μg	= 10 ⁻⁶ g	Mikrogramm
μm	= 10 ⁻⁶ m	Mikrometer
μs	= 10 ⁻³ s	Mikrosekunde
μW	= 10 ⁻⁶ W	Mikrowatt
2D		zweidimensional
3D		dreidimensional
a		Jahre
A		Menge aller Pixel der Bildmatrix; Ampere (Einheit)
a _{m,n}		Pixel der m-ten Zeile und n-ten Spalte im Ergebnisbild
AC		alternating current (dt.: Wechselstrom)
AKh		Arbeitskraftstunden
a _{m,n}		Pixel der m-ten Zeile und n-ten Spalte im Ursprungsbild
a _{m+m',n+n'}		Pixel der m+m'-ten Zeile und n+n'-ten Spalte im Ursprungsbild, wobei m sowie n Koordinaten des Ergebnisbildes und m' sowie n' Koordinaten des Strukturelementes darstellen
B		Intensität der Farbe Blau; Byte (Einheit)
b		Stereoskopische Basis eines Stereoskopie-Aufbaus

BfR		Bundesinstitut für Risikobewertung
BiSS		Bidirektional/Seriell/Synchron
bit		binary digit (dt.: Binärziffer)
BMEL		Bundesministerium für Ernährung und Landwirtschaft
BVL		Bundesamt für Verbraucherschutz und Lebensmittelsicherheit
CAD		computer aided design (dt.: rechnerunterstütztes Konstruieren)
CAE		computer aided engineering (dt.: rechnergestützte Entwicklung)
CAM		computer aided manufacturing (dt.: rechnerunterstützte Fertigung)
CCD		charge-coupled device (dt.: ladungsgekoppeltes Bauteil)
cd · sr		Steradiancandela
CL		Camera Link
close-to-crop		Bereich direkt um die Kulturpflanze
cm ²	= 10 ⁻² m	Quadratcentimeter
cm ³	= 10 ⁶ mm ³	Kubikcentimeter
CMOS		complementary metal-oxide-semiconductor (dt.: sich ergänzender Metalloxid-Halbleiter)
CO ₂		Kohlenstoffdioxid
CPU		central processing unit (dt.: Prozessor)
d		Disparität (Verschiebung zwischen korrespondierenden Bildpunkten)
dB		Dezibel
DC		direct current (dt.: Gleichstrom)
dt.		deutsch

EC		European Association for Research on Plant Breeding (EUCARPIA) Code (Entwicklungsstadien von Pflanzen, benannt nach der Europäischen Gesellschaft für Züchtungsforschung)
ECNC		European Centre for nature Conservation (dt.: Europäisches Zentrum für Naturschutz)
EU		Europäische Union
EUREAU		Europäische Vereinigung der nationalen Verbände in der Wasserver- und Abwasserentsorgung
EWG		Europäische Wirtschaftsgemeinschaft
f		Brennweite einer Kamera
FCI		Fonds der Chemischen Industrie
f_{Ersatz}	mm	Ersatzbrennweite (Abstand zwischen Kameragehäuse und Boden)
FFT		fast fourier transform (dt.: schnelle Fourier-Transformation)
FPGA		field programmable gate array (dt.: im Anwendungsfeld programmierbarer integrierter Schaltkreis)
FPS		frames per second (dt.: Bilder pro Sekunde)
g		Gramm
G		Intensität der Farbe Grün
G_{HSL}^*		Ergebniswert eines Pixels von HSL-Farbbildern nach einem Schwellwertverfahren
G_{NIR}^*		Ergebniswert eines Pixels von Nahinfrarotbildern nach einem Schwellwertverfahren
GB	= 10^9 byte	Gigabyte
GigE		Gigabit-Ethernet
Gl		Gleichung
G_{NIR}		Grauwert eines Pixels von Nahinfrarotbildern

GNSS		Global Navigation Satellite System (dt.: Globales Satellitennavigationssystem)
H		hue (dt.: Farbwert)
h	= 3600 s	Stunde
ha		Hektar
HSI		hue, saturation, intensity (dt.: Farbwert, Farbsättigung, Lichtintensität) (Farbraum)
HSL		hue, saturation, lightness (dt.: Farbwert, Farbsättigung, relative Helligkeit) (Farbraum)
HSV		hue, saturation, value (dt.: Farbwert, Farbsättigung, Helligkeitswert) (Farbraum)
Hz	s ⁻¹	Hertz
I		intensity (dt.: Lichtintensität)
I	A	Stromstärke
ILT		Institut für Landtechnik
inter-row		Bereich zwischen den Pflanzenreihen
intra-row		Bereich zwischen den Kulturpflanzen in der Pflanzenreihe
IP		International Protection (dt.: internationaler Schutz) (gibt mit nachfolgender Nummer eine Schutzklasse an)
$i_{\text{Pixel/mm}}$	mm ⁻¹	Verhältnis (Anzahl der Pixel pro mm)
IR		Infrarot
I_{RMS}	A	Effektivstrom
IUCN		International Union for Conservation of Nature (dt.: Weltnaturschutzunion)
IVA		Industrieverband Agrar e. V.
JKI		Julius Kühn-Institut
JPEG		Joint Photographic Experts Group (dt.: Verbindung der Fotografieexperten)
K		Kelvin

kbit	= 10^3 bit	Kilobit
kHz	= 10^3 Hz	Kilohertz
kSa	= 10^3 Sa	Kilosample
kV	= 10^3 V	Kilovolt
kW	= 10^3 W	Kilowatt
l	= 10^{-3} m ³	Liter
L		lightness (dt.: relative Helligkeit)
lm	cd · sr	Lumen
LUT		Lookup-Tabelle
lx	lm · m ²	Lux
m		Zeilenkoordinate in Bildmatrix; Meter (Einheit)
M		Anzahl der horizontalen Pixel (parallel zur Fahrtrichtung)
m'		Zeilenkoordinate in Strukturelementmatrix
mA	= 10^{-3} A	Milliampere
max.		maximal
MB	= 10^6 byte	Megabyte
Mbit	= 10^6 bit	Megabit
MHz	= 10^6 Hz	Megahertz
min	= 60 s	Minute
Mio.		Million
mm	= 10^{-3} m	Millimeter
mm ³		Kubikmillimeter
MOD		Minimale Objektdistanz
mrاد	= 10^{-3} rad	Milliradian
mV	= 10^{-3} V	Millivolt
mW	= 10^{-3} W	Milliwatt
N		Anzahl der vertikalen Pixel (orthogonal zur Fahrtrichtung)

n		Spaltenkoordinate in Bildmatrix; Anzahl der Zuckerrüben; Stichprobenumfang
n'		Spaltenkoordinate in Strukturelementmatrix
NIR		Nahes Infrarot
NIRS		Nahinfrarotspektrum
nm	= 10^{-9} m	Nanometer
Nm	= $\text{kg} \cdot \text{m}^2 \cdot \text{s}^{-2}$	Newtonmeter
p		Bildpunkt
P	W	Leistung
P(X,Y,Z)		Objektpunkt im dreidimensionalen Raum mit den Koordinaten X, Y und Z
R		Intensität der Farbe Rot
R _s		äußerste Koordinate (Rand) eines Strukturelementes relativ zum Ankerpunkt
rad		Radian
RAM		Random-Access Memory (dt.: Direktzugriffsspeicher)
RGB		Rot, Grün, Blau (Farbraum)
RMS		Root Mean Square (dt.: Quadratisches Mittel)
ROI		region of interest (dt.: Bereich von Interesse)
rpm	= $60^{-1} \cdot \text{s}^{-1}$	revolutions per minute (dt.: Umdrehungen pro Minute)
RTK		Real Time Kinematic (dt.: Echtzeitkinematik)
S		saturation (dt.: Farbsättigung)
S _M		Menge der Maskenpixel einer binären Faltung oder Mengenoperation
s		Sekunde
Sa		Sample
S _{m',n'}		Pixel der m'-ten Zeile und n'-ten Spalte des Strukturelementes

S_p		Maske/Strukturelement mit zum Bildpunkt p verschobenem Referenzpunkt
sr		Steradian
SW		Schwarzweiß
$t_{\text{Belichtung}}$	s	Belichtungszeit
$t_{H \text{ max}}$		Max. Hue Threshold (dt.: maximaler Farbschwellwert)
$t_{H \text{ min}}$		Min. Hue Threshold (dt.: minimaler Farbschwellwert)
T_{HSL}		Punktoperator des Schwellwertverfahrens eines HSL-Farbbildes
$t_{L \text{ max}}$		Max. Lightness Threshold (dt.: max. Schwellwert der relativen Helligkeit)
$t_{L \text{ min}}$		Min. Lightness Threshold (dt.: min. Schwellwert der relativen Helligkeit)
t_{NIR}		Threshold (dt.: Schwellenwert eines Nahinfrarotbildes)
T_{NIR}		Punktoperator des Schwellwertverfahrens eines Nahinfrarotbildes
$t_{S \text{ max}}$		Max. Saturation Threshold (dt.: maximaler Farbsättigungsschwellwert)
$t_{S \text{ min}}$		Min. Saturation Threshold (dt.: minimaler Farbsättigungsschwellwert)
TTL		Transistor-Transistor-Logik
U	V	Spannung
UBA		Umweltbundesamt
u. a.		unter anderem
USB		Universal Serial Bus (dt.: universelles serielles Bussystem)
USV		unterbrechungsfreie Stromversorgung
UV		Ultraviolett

V		Value (dt.: Helligkeitswert); Volt (Einheit)
v	$\text{mm} \cdot \text{s}^{-1}$	Vorfahrtgeschwindigkeit
VA		Volt Ampere
VCI		Verband der Chemischen Industrie
VIS		Visible light (dt.: sichtbares Licht)
v_{\max}	$\text{mm} \cdot \text{s}^{-1}$	maximale Vorfahrtgeschwindigkeit
W		Watt
x		Position in Richtung der Pflanzenreihe
x_{image}	Pixel	Position im Bild in Richtung der Pflanzenreihe
X_L		x-Achse der linken Kamera eines Stereokamera-Aufbaus
x'_L	Pixel	x-Koordinate einer Projektion des realen Punkts P auf dem linken Bild
X_R		x-Achse der rechten Kamera eines Stereokamera-Aufbaus
x'_R	Pixel	x-Koordinate einer Projektion des realen Punkts P auf dem rechten Bild
y		Position orthogonal und waagrecht zur Pflanzenreihe
y_{image}	Pixel	Position im Bild orthogonal zur Pflanzenreihe
Y_L		y-Achse der linken Kamera eines Stereokamera-Aufbaus
y_I	Pixel	Lichtschnitt-Profilkoordinate senkrecht zur Höhe des Profils
y'_L	Pixel	y-Koordinate einer Projektion des realen Punkts P auf dem linken Bild
$y_{\text{Lücke}}$	Pixel	Lichtschnitt-Profilkoordinate senkrecht zur Höhe des Profils
Y_R		y-Achse der rechten Kamera eines Stereokamera-Aufbaus

y_r	Pixel	Lichtschnitt-Profilkoordinate senkrecht zur Höhe des Profils
y'_R	Pixel	y-Koordinate einer Projektion des realen Punkts P auf dem rechten Bild
z	mm	Position (Höhe) über der Bodenoberfläche
Z		Z-Achse eines Stereokamera-Aufbaus
z. B.		zum Beispiel
$z_{\text{Profil}}(y_l)$	Pixel	Profilhöhe links von einer Lichtschnitt-Profillücke
$z_{\text{Profil}}(y_{\text{Lücke}})$	Pixel	zu berechnende Profilhöhe in einer Lichtschnitt-Profillücke
$z_{\text{Profil}}(y_r)$	Pixel	Profilhöhe rechts von einer Lichtschnitt-Profillücke
α_{max}	$\text{rad} \cdot \text{s}^{-2}$	rotatorische Maximalbeschleunigung des Servomotors
β	$^\circ$	Winkel zwischen Motorachse und Pflanzenreihe
μrad	$= 10^{-6} \text{ rad}$	Mikroradian
σ_d		Disparitätenmessgenauigkeit
σ_y		mittlerer Tiefenmessfehler
φ	rad	allgemeine rotatorische Position des Servomotors
φ_{ist}	rad	rotatorische Ist-Position des Servomotors
φ_{soll}	rad	rotatorische Soll-Position des Servomotors
Φ_v	lm	Lichtstrom
ω	$\text{rad} \cdot \text{s}^{-1}$	allgemeine, rotatorische Geschwindigkeit des Servomotors
ω_{ist}	$\text{rad} \cdot \text{s}^{-1}$	rotatorische Ist-Geschwindigkeit des Servomotors
ω_{max}	$\text{rad} \cdot \text{s}^{-1}$	rotatorische Maximalgeschwindigkeit des Servomotors
ω_{soll}	$\text{rad} \cdot \text{s}^{-1}$	rotatorische Soll-Geschwindigkeit des Servomotors
ζ_{max}	$\text{rad} \cdot \text{s}^{-3}$	rotatorischer Maximalruck des Servomotors

Kurzfassung

Das Institut für Landtechnik der Universität Bonn beschäftigt sich seit einigen Jahren mit der Entwicklung der mechanischen Unkrautbekämpfung für den Bereich innerhalb der Pflanzenreihe. Die Online-Erkennung der einzelnen Pflanzenpositionen und die Differenzierung zwischen Unkraut und Nutzpflanze sind die größten Herausforderungen einer mechanischen Unkrautbekämpfung in der Reihe.

Das Ziel des Forschungsprojektes war die Entwicklung und Felderprobung eines Systems zur mechanischen Unkrautbekämpfung. Um dieses System auf dem Feld anwenden zu können, wurde ein am Traktor angebauter Versuchsträger mit einem kamerabasierten Pflanzenerkennungssystem und zwei Hackaggregaten für die mechanische Unkrautbehandlung aufgebaut. Der Schwerpunkt lag dabei auf der Entwicklung eines echtzeitfähigen Algorithmus für die Pflanzenerkennung und die Ansteuerung der Motoren.

Auf dem Feld hat sich gezeigt, dass eine zuverlässige Bildererkennung sowie Ansteuerung der Servomotoren bis 7 km/h möglich ist. Die Grenzen werden hier vor allem durch die Hackwerkzeuge gesetzt, da mit erhöhter Vorfahrtgeschwindigkeit die Drehzahl proportional ansteigt und damit der Erdaufwurf zunimmt. Wird die Erkennung von Zuckerrüben in unterschiedlichen Entwicklungsstadien untersucht, zeigt sich, dass 82 % der Rüben im Zweiblattstadium erkannt wurden. Im Vierblattstadium stieg der Anteil der erkannten Nutzpflanzen auf 91 % und erreichte im Sechsbblattstadium mit 100 % den Höchstwert. Somit lässt sich ein linearer Zusammenhang zwischen dem Entwicklungsstadium und der Erkennung der Nutzpflanzen herleiten. Dies belegt, dass die erfolgreiche Erkennung der Nutzpflanzen mit dem Pflanzenwachstum steigt. Die Grenzen des Bildererkennungssystems liegen derzeit bei zu dicht nebeneinander stehenden Pflanzen. Als Lösungsansatz hierfür wurden zwei kamerabasierte 3D-Erkennungsverfahren untersucht.

Bei den Hackversuchen im Sechsbblattstadium wurden durchschnittlich 92 % der Unkräuter beseitigt. Im Rahmen dieser Versuche kam es auch zu Verlusten bei den Zuckerrüben. So wurden 2 % der Zuckerrüben von den Hackwerkzeugen entfernt. Die auf dem Feld verbliebenen Unkräuter stehen vor allem in der Nähe der Zuckerrüben. Der vorher festgelegte Schutzbereich rund um die Zuckerrüben schont somit auch die Unkräuter in direkter Umgebung, ist aber notwendig, um die Zuckerrüben nicht zu beschädigen.

Abstract

The Institute of Agricultural Engineering has been working several years to develop a mechanical weed control system for the area within the plant row. The online detection of plant positions and the determination between weed and crop are the main problems of mechanical weed control in the row.

The aim of the research project was the development and field testing of the mechanical weed control system. To be able to use this system in the field, a tractor mounted test rig was developed. For detecting the plants, a camera-based plant recognition system was installed on the test device. As actuators for hoeing the weed, two servo motors with hoeing tools were mounted on the frame. The focus was on the development of a real-time algorithm for plant identification and motor control.

The field tests have shown that the current algorithms allow a reliable image recognition and motor control up to 7.2 km/h forward speed. The limits are set primarily by the hoeing tools, since the rotational speed rises proportionally to the increased forward speed and thus the mound of earth grows. The investigation for recognizing sugar beet at different growth stages shows, that 82 % of the beet in the two-leaf stage were recognized. In the four-leaf stage the proportion of detected crops increased up to 91 % and closed at 100 % in the six-leaf stage. However, looking at the crop recognition in different stages of growth, a linear relationship between the growth stage and the detection of the crops can be derived. It can be said that the successful detection of the crops increases with the growth stage of plants. The boundaries of the image detection system are currently at plants that are too close together. Two camera-based 3D recognition methods were evaluated as a solution to this problem.

In the experiments with sugar beet plants in the six leaf stage 92 % of the weeds were removed. It also came to losses of sugar beet plants. Thus, 2 % of the sugar beet plants were chopped by the hoeing tools. The remaining weed plants on the field are especially close to the sugar beet plants. In this way the predetermined safety area around the sugar beet plants also protects the weeds in the immediate vicinity, but is necessary to prevent damage to the beet.

1. Einleitung

Die Bekämpfung von Unkräutern ist eine pflanzenbaulich wichtige Maßnahme, um einen hohen Ertrag zu erzielen. Die vormals manuelle Beseitigung der Unkräuter veränderte sich erst im vorletzten Jahrhundert mit dem Einsetzen der Mechanisierung in der Landwirtschaft und der damit einhergehenden Unterstützung durch Geräte (HERRMANN 2002). Das mechanische Hacken beschränkte sich jedoch auf den Bereich zwischen den Pflanzenreihen. Mit der Entwicklung der chemischen Pflanzenschutzmittel wurde eine flächendeckende Unkrautbekämpfung erreicht, so dass sich dieses Verfahren in der Landwirtschaft durchsetzte.

Erst in den letzten Jahren ist die mechanische Unkrautbekämpfung wieder stärker in den Fokus gerückt, da die Zulassung von Pflanzenschutzmitteln immer aufwändiger wird (IVA 2013; BVL 2009) und die Resistenzen von Unkräutern gegen Herbizide zunehmen (BÖRNER 1995; DIETZ et al. 2014). Zusätzlich zwingt der politische Druck in Deutschland und ein kritischeres Bewusstsein der Verbraucher bezüglich der landwirtschaftlichen Anbau- und Verarbeitungsverfahren von Lebensmitteln zu einem Umdenken in der Landwirtschaft. Dies bedeutet nicht zwingend eine radikale Abkehr von bisherigen Produktionsmethoden, da ein akzeptables Preis-Leistungs-Verhältnis gewahrt werden muss und der Einzelhandel trotz Zunahme von Bio-Produkten weiterhin von Discountern dominiert wird. Die Gesellschaft fordert eine Reduzierung des Einsatzes von chemischen Pflanzenschutzmitteln, da nicht mehr nur die Qualität der Lebensmittel, sondern auch die Auswirkungen auf Flora und Fauna kritisch hinterfragt werden, was zu einer steigenden Nachfrage nach ökologisch angebauten Lebensmitteln führt. Vor allem die höheren Produktionskosten durch den intensiveren Einsatz von Arbeitskräften sorgen dafür, dass die ökologische Landwirtschaft sich trotz gesellschaftlichen Zuspruchs nicht stärker durchsetzt. Der verstärkte Arbeitskräfteeinsatz ist vor allem der manuellen Unkrautkontrolle geschuldet.

1.1 Schäden und Ertragsverluste durch Unkräuter

Unabhängig von der Frage, welche Pflanzenschutzverfahren eingesetzt werden, muss zunächst erläutert werden, wozu die Unkrautbekämpfung notwendig ist. Wie die Nutzpflanze selbst benötigt auch die Unkrautpflanze neben Licht, Luft (CO₂) und Wasser Nährstoffe, die nur begrenzt zur Verfügung stehen (SEIPEL 2007). Mit zunehmender Größe

erzeugen die Unkrautpflanzen auch eine Verschattung, so dass die Unkräuter mit den Nutzpflanzen nicht nur um Nährstoffe und Wasser, sondern auch um Licht konkurrieren (BÖRNER 1995). Unkraut gilt somit als einer der wichtigsten Verursacher für eine quantitative und qualitative Ertragsminderung (OERKE & STEINER 1996; SCHANS et al. 2006).

Neben geringeren Erträgen dienen Unkräuter auch Pflanzenkrankheiten als Zwischenwirt und fungieren somit als Krankheitsüberträger. Eine große Gefahr geht deshalb von Unkräutern aus, die eng mit der Kulturpflanze verwandt sind und Erkrankungen in die nächste Saison übertragen (PALTÍ 1981). Da die Unkrautbekämpfung durch Arbeits- und Materialeinsatz auch mit Kosten verbunden ist, muss geklärt werden, ob die verursachten Schäden und Ertragsverluste diesen Einsatz rechtfertigen.

Die Ertragsverluste bei verschiedenen Gemüsearten, die in Bild 1.1 dargestellt sind, zeigen allerdings deutlich, dass ein genereller Verzicht auf Unkrautbekämpfung nicht tragbar ist. Ähnlich verhält es sich bei Zuckerrüben. So können die Verluste nach PETERSEN (2004) bis zu 95 % betragen. Dies begründen DIEPENBROCK et al. (1999) mit der langsamen Jugendentwicklung der Kulturpflanzen, wodurch Unkräuter früh mit den Zuckerrüben in Konkurrenz stehen oder sogar einen Vorsprung in der Entwicklung haben. Trotz derzeit praktizierter Unkrautbekämpfungsmaßnahmen sind nach AGRIOS (1988) immer noch durchschnittlich 10 % der Ertragsverluste auf Unkräuter zurückzuführen.

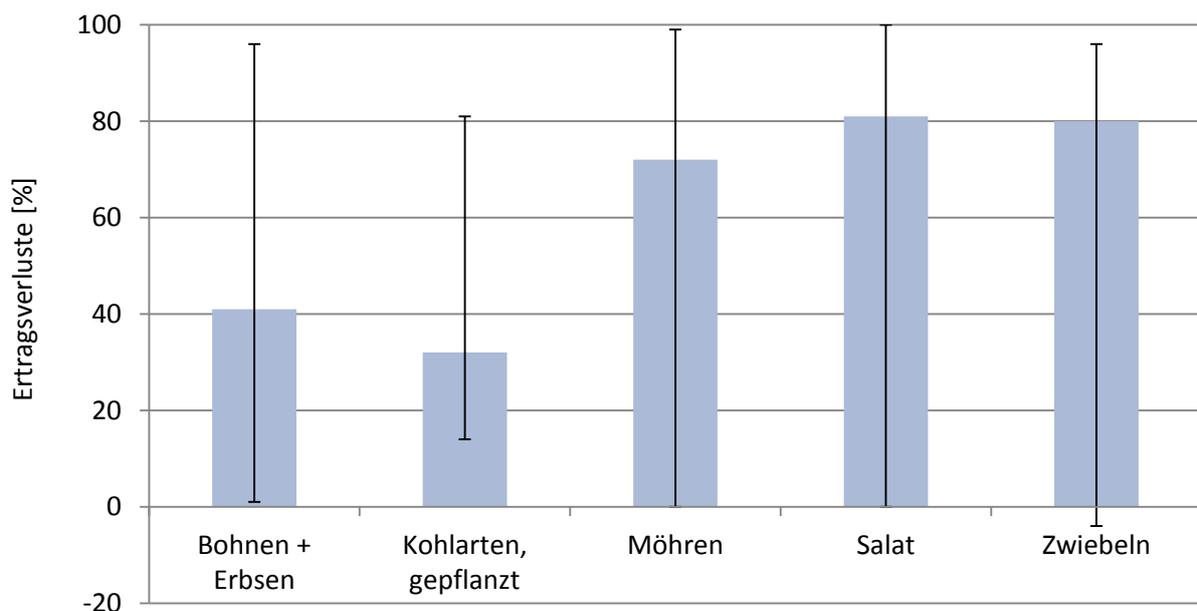


Bild 1.1: Ertragsverluste verschiedener Gemüsearten bei fehlender Unkrautbekämpfung (BOND 1991; KOLBE 1987; LABER 1999)

1.2 Chemische Pflanzenschutzverfahren

Derzeit werden in der Landwirtschaft überwiegend Herbizide zur Unkrautbekämpfung eingesetzt. Vor über hundert Jahren wurde in Frankreich durch Zufall die selektive Wirksamkeit von Kupfersulfat-Lösungen entdeckt. Seitdem ist die Entwicklung von chemischen Pflanzenschutzmitteln immer weiter fortgeschritten. Viele Stoffe, deren Schadenspotential für Mensch und Tier heutzutage bekannt ist, wurden noch vor Jahrzehnten zur Bekämpfung von Unkräutern eingesetzt. Dazu gehören Schwefel, Arsen, Quecksilber, Bleiarsenat und andere Mittel (GOBOR 2007). Diese Stoffe wurden durch synthetische Produkte ersetzt, deren Einsatz zum Standardverfahren wurde.

In den letzten Jahrzehnten wurden die Einflüsse von chemischen Pflanzenschutzmitteln auf das Ökosystem und potentieller Rückstände in den Ernteprodukten kritischer hinterfragt. Als Folge hat die Europäische Union (EU) Schritte zur Begrenzung des Einsatzes von Herbiziden, Fungiziden, Insektiziden und Wachstumsregulatoren unternommen. Derzeit sind ca. 700 Pflanzenschutzmittel zugelassen, davon 255 Herbizide (BMEL 2012). Der Absatz von Pflanzenschutzmitteln und speziell Herbiziden ist inklusive Schwankungen in den letzten Jahren leicht gestiegen, wie Bild 1.2 zeigt.

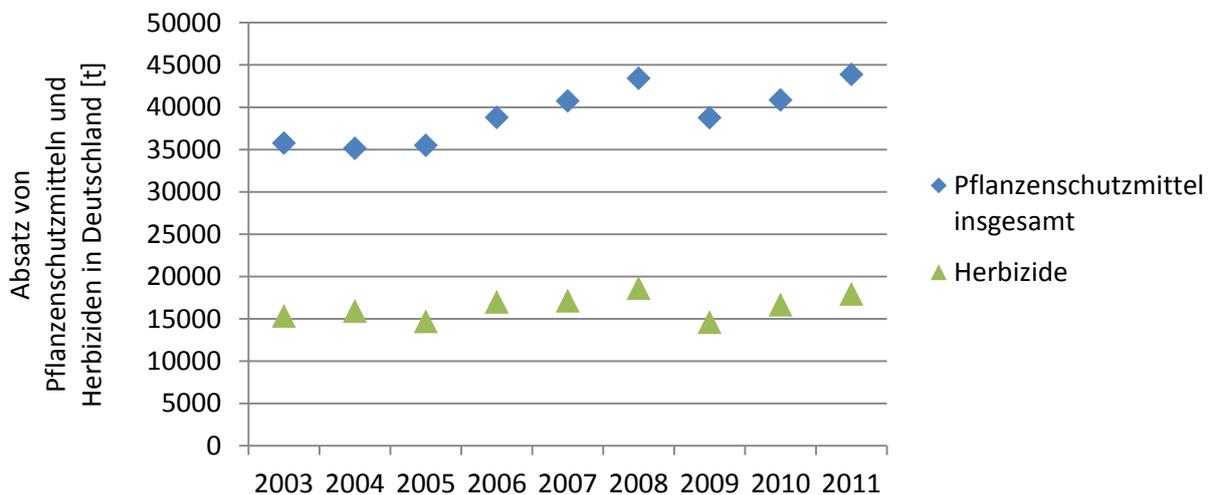


Bild 1.2: Absatz von Pflanzenschutzmitteln und insbesondere Herbiziden in Deutschland von 2003 bis 2011 (BMEL 2012)

Der Wirkmechanismus bei heutigen Mitteln ist nach BAEUMER (1992) ätzend, vergiftend oder anderweitig stoffwechselstörend. Es findet eine Unterteilung in selektiv und nicht selektiv wirkende Pflanzenschutzmittel statt. Nicht selektive Herbizide töten die gesamte

gegenwärtige Vegetation ab, selektiv wirkende Herbizide sollen im Idealfall die Kulturpflanze schonen (BAEUMER 1992). Trotz einer hohen Überdeckungsrate bei der Ausbringung von Pflanzenschutzmitteln überleben nach BAEUMER (1992) bis zu 10 % der Unkräuter.

1.2.1 Unerwünschte Wirkung von Pflanzenschutzmitteln

Neben der Wirkung auf Unkräuter haben Pflanzenschutzmittel auch ungewollte Nebenwirkungen. Es treten Schädigungen der Kulturpflanze und Beeinträchtigungen bei Mensch, Tier und Umwelt auf. In einer Studie wurden der Bestand und die Biodiversität auf Flächen verglichen, die jeweils mindestens 25 Jahre ökologisch oder unter Einsatz von Pflanzenschutzmitteln konventionell bewirtschaftet wurden. Auf den ökologisch bewirtschafteten Flächen traten bei 79 % der Vegetationsaufnahmen eine oder mehrere gefährdete Arten der Roten Liste der IUCN (engl.: International Union for Conservation of Nature; Weltnaturschutzunion) auf (FRIEBEN 1990). Die Aufnahmen der konventionell bewirtschafteten Flächen wiesen nur in 29 % der Fälle gefährdete Arten auf (FRIEBEN 1990). Bei den Wildkräutern, die neben ertragsmindernden Unkräutern auch nützliche oder nicht schädliche Pflanzen umfassen, war der Unterschied noch höher. So ist das Ergebnis von 25 Vergleichsuntersuchungen eine bis zu fünfmal höhere Anzahl von Wildkrautarten auf rein ökologisch bewirtschafteten Ackerflächen (FRIEBEN & KÖPKE 1994). Neben den Unkräutern kann auch die Kulturpflanze geschädigt werden. Dies wird akzeptiert, solange der Einsatz des Mittels schwerer wiegende Ertragsverluste infolge des Unkrautbesatzes verhindert (BAEUMER 1992). Kritischer zu betrachten sind Auswirkungen auf Trinkwasser, Lebensmittel, Tiere und dadurch auch indirekt auf den Menschen.

1.2.1.1 Gefährdung des Menschen

Der Kontakt zwischen Pflanzenschutzmitteln und dem Menschen kann auf vielfältige Weise entstehen: Beginnend bei der Herstellung der chemischen Pflanzenschutzmittel, bei der praktischen Anwendung und Ausbringung, sowie durch die Aufnahme über Nahrungsmittel, Luft und Wasser. Nach BÖRNER (1995) ist eine Schädigung über Lebensmittel wenig wahrscheinlich, da zwischen der Herbizidanwendung und dem Erntetermin ein zu großer Zeitraum liegt, in dem die Wirkstoffe weitgehend abgebaut werden. Kritischer ist der Bereich der Anwendung anzusehen. Dazu gehören die Befüllung der Ausbringgeräte und die Ausbringung der Herbizidbrühe. Hier können die Herbizide durch Evaporation in die Luft

diffundieren (FRITZ 1993). Die Verdunstung hängt dabei vom Dampfdruck der Verbindung selbst und von äußeren Bedingungen wie Wind und Lufttemperatur ab (LUCAS 2007).

1.2.1.2 Kontamination von Grund- und Oberflächenwasser

Eine weitere Gefahr ist die Belastung von Grund- sowie Oberflächenwasser, wodurch gleichzeitig Trinkwasserquellen gefährdet werden können. So werden 74 % der Trinkwasserprimärquellen aus Grund- und Quellwasser gespeist (BANNIK et al. 2008). Herbizide können auf verschiedenen Wegen in Grund- sowie Oberflächenwasser gelangen:

- Durch versickerndes Niederschlagswasser und Auswaschung (Leaching) dringen Herbizide ins Grundwasser ein (BÖRNER 1995)
- Über Drainagen gelangen ausgetragene Herbizide in Entwässerungssysteme und damit in Gräben, Flüsse und Trinkwassertalsperren (BÖRNER 1995)
- Durch Bodenerosion kontaminierten Bodens infolge starker Regenfälle werden Herbizide in Oberflächengewässer eingetragen. Dies wird durch Ackerböden mit Gefälle begünstigt (BARTELS 1994)

Um die Gefahr für den Menschen zu verringern, gelten europaweite Grenzwerte. So dürfen Einzelstoffe nur in einer maximalen Konzentration von 0,1 µg/l und die Gesamtheit der Pflanzenschutzmittel nur in einer Konzentration von maximal 0,5 µg/l im Trinkwasser enthalten sein (BMJV 2013). Die Europäische Vereinigung der nationalen Verbände in der Wasserver- und Abwasserentsorgung (EUREAU) stuft besonders die Tieflandflüsse als gefährdet ein (EUREAU 2001). So wies ein hoher Anteil der Proben aus diesen Quellen in Belgien, den Niederlanden, Frankreich und Großbritannien Pflanzenschutzmittelkonzentrationen von über 0,1 µg/l auf (EUREAU 2001). Deutschland wird in dem EUREAU-Bericht als eines der sechs Länder in Europa aufgeführt, die am meisten betroffen sind, da die Konzentrationen in 5-10 % der Quellen regelmäßig 0,1 µg/l überschreiten (EUREAU 2001). Das Europäische Zentrum für Naturschutz (ECNC: European Centre for nature Conservation) untermauerte diese Ergebnisse 2003 in seiner Umweltverträglichkeitsanalyse bezüglich des Risikos der Gewässerverunreinigung durch Pflanzenschutzmittel. Die größte Verunreinigung weist, neben Norditalien und den Niederlanden, der Nordwesten Deutschlands auf. Die höchste Konzentration an Herbiziden wurde dabei in der Regel während der Unkrautbekämpfung gemessen (KUDSK & STREIBIG 2003).

Die Ergebnisse einer Untersuchungsreihe des Industrieverbands Pflanzenschutz (IPS 1987) zu nachgewiesenen Pflanzenschutzmitteln in Rohwasser zeigen, dass:

- in 16 von 206 Rohwasser-Entnahmestellen Herbizide mit einer Konzentration von über 0,1 µg/l gefunden wurden
- 6 Herbizide der insgesamt 35 Pflanzenschutzwirkstoffe über dem Grenzwert lagen

Als Folge dieser Verunreinigungen muss das Trinkwasser aufwändig gereinigt werden. So wurden wegen der Belastung durch chemische Pflanzenschutzmittel von 1991 bis 2000 von der niederländischen Wasserindustrie 244 Mio. Euro für die Analyse, den Schutz und die Reinigung von Wasser aufgewendet (PUJIKER et al. 2001). WAIBEL & FLEISCHER (1998) schätzen die jährlichen Folgekosten durch den Einsatz von Pflanzenschutzmitteln in Deutschland auf nahezu 130 Mio. Euro. Diese Kosten entstehen vor allem durch die notwendige Überwachung, Produktionseinbußen und Gesundheitsschäden.

1.2.1.3 Entstehung herbizidresistenter Unkräuter

Bereits 1968 wurde die Entstehung herbizidresistenter Unkräuter beobachtet. Als Ursachen benennt BÖRNER (1995) Veränderungen am Wirkungsort der Herbizide und eine verstärkte Metabolisierung, die eine Inaktivierung der Herbizide bedeutet. Daneben wurde beobachtet, dass mit Herbiziden behandelte Unkräuter auch Resistenzen gegen andere Herbizide entwickelten, mit denen sie keinen Kontakt hatten. Diese so genannte Kreuzresistenz muss nicht zwangsläufig bei Herbiziden mit ähnlichen Wirkmechanismen auftreten, sondern kann auch bei Herbiziden mit unterschiedlichen Wirkungsorten auftreten (RUBIN et al. 1985).

1.2.2 Entwicklung und Zulassung von Pflanzenschutzmitteln

Herbizidwirkstoffe benötigen eine Zulassung, um in den Verkehr gebracht zu werden. Diese erfolgt durch das Bundesamt für Verbraucherschutz und Lebensmittelsicherheit (BVL) und wird unterstützt durch das Bundesinstitut für Risikobewertung (BfR), das Umweltbundesamt (UBA) und die wissenschaftliche Bewertung des Julius Kühn-Instituts (JKI 2014). In Bild 1.3 sind die Schritte für die Entwicklung und Zulassung von Pflanzenschutzmitteln dargestellt. Neben den hohen Entwicklungskosten von 200 Mio. Euro ist vor allem der zeitliche Aufwand von 11 Jahren von Bedeutung, in denen von 140.000 synthetisierbaren Substanzen nur ein marktreifes und zulassungsfähiges Produkt übrig bleibt (IVA 2013).

Jahre	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	Mio. Euro	
Wirkstoff	Synthese											66	
			Kilolabor										
Chemie				Verfahrensentwicklung									
Formulierung		Entwicklung								Produktion*			
					Verpackungsentwicklung								
									Produktion*				
Forschung	Screening Labor/Gewächshaus								Zulassung				65
Biologie		Kleinparzellenversuche											
Entwicklung			Feldversuche (weltweit)										
Abbau und Rückstände			Pflanze, Tier, Boden, Wasser, Luft										
Toxikologie			akute und chronische Toxizität, Kanzerogenität, Mutagenität, Teratogenität, Reproduktionstoxizität										
Ökotoxikologie			z.B. Algen, Daphnien, Fische, Vögel, Bienen, Mikroorganismen, Nützlinge, Nicht-Ziel-Organismen										
Mio. Euro	102		98									200	
Substanzen	100 000							→ 1					

* ohne Kosten für Produktionsanlagen

Bild 1.3: Entwicklung und Zulassung eines Pflanzenschutzmittels (FRANGENBERG & REUB 2011)

Dadurch ist es schwer, schnell auf eine neue Gesetzeslage und neue restriktivere Gesetze zu reagieren. Neben der Zulassung von neuen Pflanzenschutzmitteln werden auch bestehende Zulassungen alter Mittel geprüft. So wurden im Rahmen des Altwirkstoffprogramms der EU von 941 Altwirkstoffen 722 Mittel nicht in die Positivliste der Richtlinie 91/414/EWG aufgenommen (BVL 2009). In Bild 1.4 sind die Zulassungszahlen bei Pflanzenschutzmitteln in Deutschland dargestellt. Für die gesunkenen Zulassungen können u. a. die zuvor genannten Gründe angeführt werden.

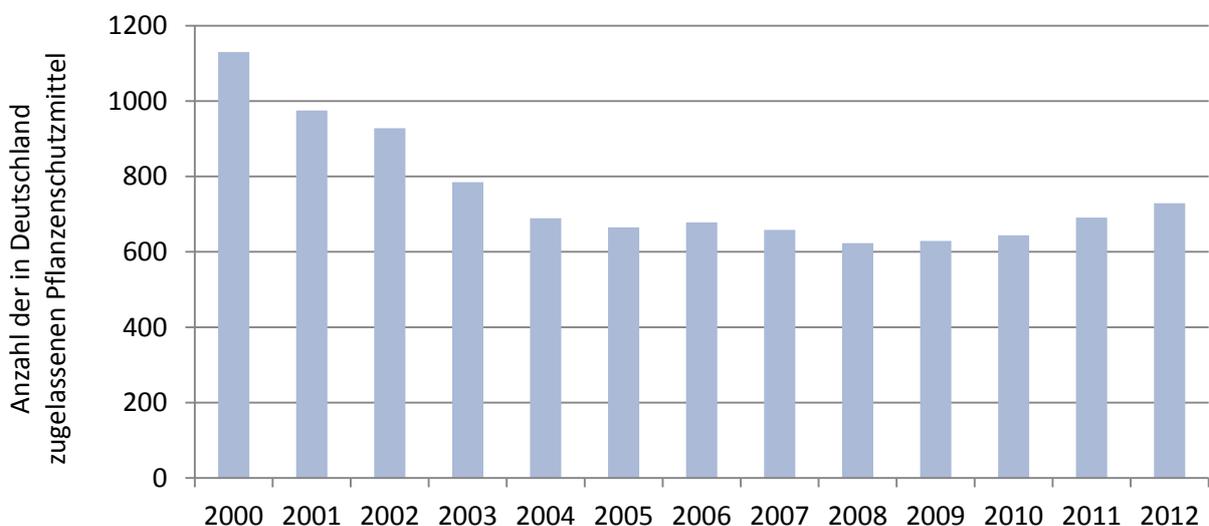


Bild 1.4: In Deutschland zugelassene Pflanzenschutzmittel (BVL 2013)

1.3 Nicht-chemische Pflanzenschutzverfahren

Vor allem im Gemüseanbau hat der nicht-chemische Pflanzenschutz nie gänzlich seine Bedeutung verloren. Dies liegt unter anderem an einer geringeren Verfügbarkeit zugelassener Herbizide (BÖRNER 1995). Hinzu kommt die Unkrautbekämpfung in der ökologischen Landwirtschaft. Nach EU-Verordnung 2092/91 ist im organischen Landbau nur die nicht-chemische Unkrautbekämpfung zulässig (EU-VO 2002). Aufgrund der speziellen Anforderung der nicht-chemischen Schädlingsbekämpfung gibt FOGELBERG (2001) folgende Empfehlungen für die weitere Forschung und Entwicklung:

- Erforschung und Entwicklung von alternativen Methoden der Schädlingsbekämpfung, die wirtschaftlich mit chemischen Pflanzenschutzmitteln konkurrieren können
- Forschung an neuen Techniken/Methoden zur physikalischen Unkrautbekämpfung
- Entwicklung von selbstfahrenden Hack-Robotern
- Entwicklung neuer Anbaustrategien zur präventiven Schädlingsbekämpfung
- Entwicklung von neuen schädlingsresistenten Sorten

Nach BOND et al. (2003) gibt es eine Vielzahl von nicht-chemischen Methoden zur Unkrautbekämpfung. Neben mechanischen Methoden wie Hackscharen und Bürsten sind dies thermische und pneumatische Verfahren, Gefrieren, Abflammen, Heißdampfbehandlung, elektrische Verfahren, Mikrowellenstrahlung, Infrarotstrahlung, Laserstrahlung, ultraviolette Strahlung und Solarisation. Im Folgenden sollen nur die Verfahren näher erläutert werden, die im Pflanzenbau bereits eine größere Rolle spielen.

1.3.1 Thermische Unkrautbekämpfung

Bei der thermischen Unkrautbehandlung ist im Pflanzenbau außerhalb von Gewächshäusern vor allem das Abflammen von Bedeutung. Dies kann im Voraufbau (EC 1–9) (Anhang 8.1) ganzflächig oder gezielt als Band auf den Saatreihen erfolgen, da die mechanische Unkrautregulierung zwischen den Reihen aus energetischer Sicht effizienter und damit günstiger ist (KÖNIG et al. 2005). Die Unkräuter werden nicht verbrannt, sondern bei 50–70 °C zellulär so stark geschädigt, dass sie absterben (HOFFMANN 1989). Die Wirksamkeit ist im Jugendstadium am höchsten (BÖRNER 1995). Als Verfahren kommen dabei das direkte Abbrennen mit einer Flamme, das indirekte Abflammen mit Infrarotstrahlern und eine

Kombination beider Verfahren zur Anwendung (HOFFMANN 1990). PETZOLD & KOLBE (1998) sehen die fehlende Bodenlockerung als Vorteil, da somit die Keimstimulierung von Unkrautsamen entfällt. Als weiteren Vorteil nennt HOFFMANN (1989) die geringere Witterungsabhängigkeit, da die Anwendung auch bei Böden erfolgen kann, die für das mechanische Hacken zu nass sind. MEYER (1994) benennt zwei grundsätzliche Probleme. Zum einen ist die Arbeitsgeschwindigkeit für eine ausreichende Wärmeeinwirkung auf 1–4 km/h begrenzt. Das zweite Problem ist der geringe energetische Wirkungsgrad, da nur 15 % der Verbrennungsenergie zur Erwärmung der Pflanzen verwendet wird.

1.3.2 Manuelle Unkrautbekämpfung

Die manuelle Unkrautbekämpfung ist die ursprünglichste Form der Pflanzenschutzverfahren und verlor erst mit Beginn der Mechanisierung (PIERENKEMPER 1989) und der Entwicklung chemischer Pflanzenschutzverfahren ihre Relevanz (BAEUMER 1992). Trotzdem hat dieses Verfahren aus zwei Gründen immer noch eine Bedeutung. Zum einen ist es in den Entwicklungsländern immer noch das Mittel der Wahl, da das Knowhow und die wirtschaftlichen Mittel für alternative Verfahren fehlen (PINGALI et al. 1987) und zum anderen gibt es im ökologischen Landbau Gründe, die für dieses Verfahren sprechen.

Da der Einsatz chemischer Pflanzenschutzmittel aus Akzeptanz- und Zulassungsgründen nicht in Betracht gezogen werden kann und das maschinelle Hacken bisher nicht die Effektivität der manuellen Bearbeitung erreicht hat, ist die manuelle Unkrautbekämpfung trotz hoher Personalkosten weiterhin ein fester Bestandteil des ökologischen Landbaus (KÖNIG et al. 2005). Der Erfolg der Bearbeitung hängt von der Erfahrung der Arbeitskraft ab, die sowohl die Pflanzenunterscheidung als auch den Hackvorgang ausführt. Bei Reihenkulturen im ökologischen Landbau wird dieses Verfahren mit traktorgebundenen Reihenhacken kombiniert. So können die Arbeitskosten gesenkt werden, da nur noch der Bereich in der Reihe manuell bearbeitet werden muss.

Nach den Untersuchungen von WEBER (1997) ist trotzdem noch in 70–85 % der Betriebe im Freiland- und Feldgemüsebau die Einstellung von zusätzlichem Personal für die manuelle Handarbeit notwendig. Diese Ergebnisse passen zu der Einschätzung von AUST (1986), dass der Arbeitskraftbedarf zur Unkraut- und Schädlingsregulierung in der ökologischen Landwirtschaft etwa um ein Drittel höher liegt als in der konventionellen Landwirtschaft.

Dies bestätigen auch die Ergebnisse von SCHLÜTER (1985), PRIEBE (1990) und LINDNER (1992), die den Mehraufwand mit bis zu 30 % beziffern. KÖNIG et al. (2005) kalkulieren mit drei Handarbeitsgängen und beziffern den Aufwand je nach Witterung und Verunkrautung auf 80-150 AKh ha⁻¹ a⁻¹. In einzelnen Jahren steigt der Aufwand auf über 200 AKh ha⁻¹ a⁻¹.

1.3.3 Mechanische, reihenunabhängige Unkrautbekämpfung

Im Voraufbau können vor der Kulturpflanze keimende Unkräuter durch reihenunabhängige Verfahren bekämpft werden. Dazu werden Geräte wie Hackstriegel und Netzeggen verwendet (PETZOLD & KOLBE 1998). Die Wirkung ist umso besser, je kleiner die Unkräuter sind und ist im Keimblattstadium am höchsten. Weitere Faktoren sind die Lage und Größe des Unkrautsamens im Boden. Eine geringe Tiefe des Samens sowie eine kleine Samengröße sind für den Bekämpfungserfolg von Vorteil (KÖNIG et al. 2005).

Beim Anbau von Winterweizen konnten LUKASHYK et al. (2004) durch einmaliges Striegeln bereits einen um 48% höheren Ertrag als in der unbehandelten Kontrolle feststellen. Der Einsatz eines Hackstriegels kann sich aber auch nachteilig auf den Auflauf der Kulturpflanze auswirken. So zeigten Untersuchungen von BERTRAM (1966), dass der Einsatz von Federzinken- und Netzeggen im Voraufbau den Feldaufgang um 4–33 % verringern kann.

Der Hackstriegel kann auch nach Auflauf der Kulturpflanze eingesetzt werden, da der einstellbare Zinkendruck eine Schonung der gegenüber den Unkräutern größeren Kulturpflanzen erlaubt. Moderne Hackstriegel können aufgrund der leichten Bauweise in Ausführungen mit Arbeitsbreiten von bis zu 27 m eingesetzt werden (HATZENBICHLER 2014). Bild 1.5 zeigt beispielhaft den Einsatz eines Hackstriegels im Mais. Die Federzinken des Hackstriegels arbeiten ganzflächig und weichen den stärker verwurzelten Pflanzen, in diesem Fall der Kulturpflanze Mais, leichter aus (EICHHORN 1999). Da die Kulturpflanzen auch Schaden nehmen können, wird ab einem Entwicklungsstadium von EC 19 (Anhang 8.1) von einem Einsatz abgeraten (KÖNIG et al. 2005).



Bild 1.5: Hackstriegel bei der Unkrautbekämpfung im Mais (HATZENBICHLER 2014) (links); Federzinken eines Hackstriegels (rechts)

1.3.4 Mechanische Unkrautbekämpfung zwischen den Reihen (inter-row)

Ab dem Zeitpunkt, an dem die Pflanzen sichtbar werden, kann eine Unkrautregulierung zwischen den erkennbaren Pflanzenreihen erfolgen (KÖNIG et al. 2005). Wurde das Verfahren vor Jahren noch durch den kostengünstigeren, chemischen Pflanzenschutz verdrängt, so wird das Verfahren aufgrund der restriktiveren Zulassungssituation in der EU (BVL 2013) und den zunehmenden ökologischen Landbau wieder interessanter. Nach PARISH (1990) muss eine erfolgreiche Unkrautbekämpfung zwischen den Reihen folgende Grundvoraussetzungen erfüllen:

- Abschneiden oder Entwurzeln der Unkräuter und anschließend vollständig verschütten oder zum Austrocknen an der Bodenoberfläche belassen
- Schützen der Kulturpflanze
- Steuerung der Werkzeugrichtung
- Steuerung der Bearbeitungstiefe
- Erhaltung oder Verbesserung der Bodenbeschaffenheit

Für die Unkrautbekämpfung zwischen den Pflanzenreihen gibt es eine Vielzahl von Geräten, deren Vielfalt aufgrund der Konkurrenz durch andere Verfahren zugenommen hat. Dazu gehören unter anderem die Maschinenhacke mit starren oder federnden Zinken,

Hackstriegel, Hackbürsten, Hacksterne, Bügelhacken, Hackfräsen u. a. (EICHORN 1999). In Bild 1.6 ist eine Übersicht der Werkzeuge dargestellt, die nach ESTLER (1993) in gezogene, abrollende und angetriebene, rotierende Geräte unterteilt werden. Die Qualität der Unkrautbekämpfung hängt stark von der Geräteeinstellung und Lenkgenauigkeit des Trägerfahrzeuges sowie der Reihentreue der Kulturpflanzen ab.

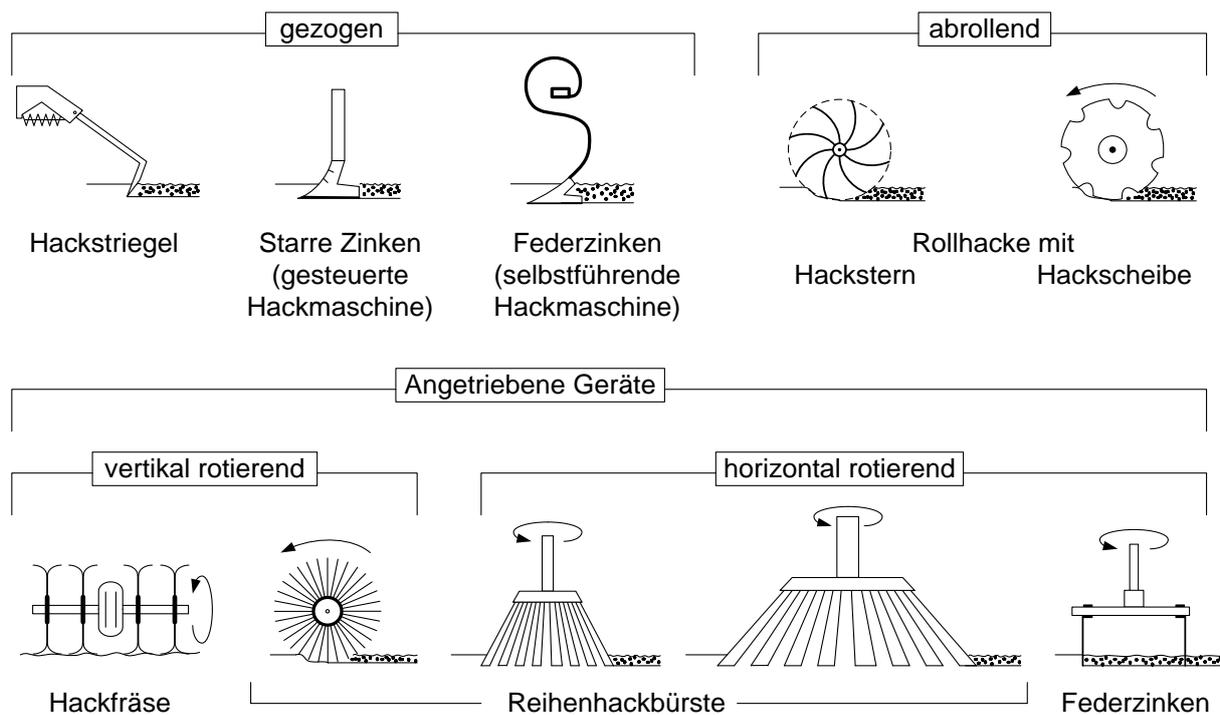


Bild 1.6: Geräte für die mechanische Unkrautregulierung in Reihenkulturen (verändert nach Estler 1993)

Zu den gezogenen und weit verbreiteten Techniken gehört das Hacken mit starren Hackwerkzeugen wie Gänsefußscharen. Zwischen den Reihen wird oft eine Kombination aus zwei äußeren Winkelmessern und einem mittig angeordneten Gänsefußschar eingesetzt. Da jede dieser Werkzeugkombinationen an einem eigenen, tastradgeführten Parallelogramm montiert ist, kann auch bei größeren Arbeitsbreiten eine Boden Anpassung in dem Zwischenreihenbereich erreicht werden (WEBER 1997). In Bild 1.7 ist zu erkennen, dass die Werkzeuge, wie von PARISH (1990) gefordert, neben der eigentlichen Unkrautbekämpfung auch die Bodenoberfläche aufbrechen und so die Bodenbeschaffenheit verbessern. Junge Pflanzen müssen deshalb durch geeignete technische Maßnahmen, wie Schutzbleche oder Hohlschutzscheiben, vor Verschüttung geschützt werden (KÖNIG et al. 2005). Je höher die Vorfahrtgeschwindigkeit ist, desto stärker ist die schüttende Wirkung. Demgegenüber steht

eine höhere Gefahr, die Kulturpflanzen zu verletzen, so dass KOOLEN & KUIPERS (1983) eine Geschwindigkeit zwischen 6–8 km/h empfehlen. Der in Bild 1.6 dargestellte Hackstriegel wird in der Reihe vor allem als unterstützender Nachläufer hinter starren Zinken verwendet. Neben der Einebnung des bearbeiteten Zwischenreihenbereichs sorgen sie für eine Zerkleinerung von Kluten und ein Ablegen der Unkräuter auf der Oberfläche, um das Austrocknen zu erleichtern (STEINBERGER 2014).



Bild 1.7: Werkzeuge eines Anbaugerätes für das Hacken zwischen den Pflanzenreihen

Ein weiteres Gerät zur Unkrautbekämpfung in der Reihe ist die Rollhacke. In jeder Reihe sind zwei Hacksternaggregate mit jeweils vier Sternen hintereinander und schräg zur Bearbeitungsrichtung angeordnet. Anstatt der Hacksterne können auch Hackscheiben eingesetzt werden. Durch den Anstellwinkel kann die Bearbeitungsintensität eingestellt werden. Da die Aggregate ähnlich wie Sechsscheiben eine spurführende Wirkung haben, werden die Anstellwinkel der hintereinanderliegenden Hacksterne in entgegengesetzter Richtung eingestellt, so dass die jeweiligen Kräfte quer zur Fahrtrichtung ausgeglichen werden. Die an dem Gerät eingesetzten Hacksterne reißen die Unkräuter heraus und verschütten diese. Durch die Arbeitsweise ist im Gegensatz zu starren Zinken eine Bearbeitung von Mulchsaatflächen möglich (STEINBERGER 2014). Ein weiterer Vorteil ist die vergleichsweise hohe Vorfahrtgeschwindigkeit von 8–12 km/h (HOFFMANN 1991 in PETZOLD & KOLBE 1998).

Eine relativ junge Entwicklung stellt die Bügelhacke dar. Das Prinzip ist der Krümelwalze bei Nachläufern von Saatbettkombinationen nachempfunden (NAWROTH 2001). Zwei hintereinander befindliche Drahtbügelkörbe sind drehbar gelagert und über eine Antriebskette miteinander verbunden. Durch eine unterschiedliche Zahnradgröße wird ein Übersetzungsverhältnis erzeugt, so dass sich die nachfolgende Walze schneller als die vordere dreht. Die vordere Walze dient als Antrieb und bricht gleichzeitig verkrusteten Boden auf. Die Bügel der zweiten Walze werden durch den Boden bewegt. Dabei ziehen sie Unkräuter heraus und legen diese auf der Oberfläche ab (WILHELM 2011).

Neben den gezogenen und abrollenden Geräten zur Unkrautregulierung gibt es die angetriebenen Geräte. Die Hackfräse erlaubt durch die zusätzliche Energieeinbringung die intensivste Arbeitsweise der von ESTLER (1993) aufgezählten Maschinen. Somit können Hackfräsen auch auf Mulchsaatflächen oder bei starker Verunkrautung eingesetzt werden. Die auf einer zapfwellengetriebenen, horizontalen Rotorwelle befestigten, gekröpften Messerelemente schneiden den Boden sowie die Unkräuter und hinterlassen durch die intensive Bearbeitung einen feinkrümeligen Boden, der zu Verschlämmung neigt. Die Unkräuter selbst werden kaum zerkleinert, sondern vor allem durch Vergraben am weiteren Wachstum gehindert (NAWROTH 2001).

Ein weiterer angetriebener Gerätetyp ist die Reihenhackbürste, deren Welle um eine horizontale oder vertikale Achse rotiert. Für die Bearbeitung zwischen den Reihen wird vor allem die horizontal rotierende Bürste eingesetzt, wie sie an der Maschine in Bild 1.8 zu sehen ist. Die auf der angetriebenen Welle montierten Bürsten bestehen aus Scheiben, auf denen Polypropylen-Borsten von 2–4 mm Durchmesser befestigt sind. Der Außendurchmesser der Bürsten beträgt 500 mm.



Bild 1.8: Reihenhackbürste in Transport- (A) und Arbeitsposition (B)(C) (BAERTSCHI 2014)

Um die Pflanzenreihe vor den Bürsten und vor Verschüttung zu schützen, sind zwischen den Bürstenscheiben Pflanzenschutztunnel installiert (WEBER 1997). Die Wirkungsweise ist ähnlich der Reihenfräse, allerdings kann näher an der Pflanzenreihe gearbeitet werden (BOND et al. 2003). Die Bearbeitung in frühen Entwicklungsstadien ist möglich, da die Bürsten keinen Druck in Richtung der Pflanzenreihe aufbauen und somit keine Verschiebung des Bodens und damit der Kulturpflanzen verursachen (WEBER 1997). Dies bezieht sich allerdings nicht auf Reihenhackbürsten, die horizontal rotieren. Diese verschieben die Erde je nach Drehrichtung in die Reihe oder in den Bereich zwischen den Reihen. Dies kann gezielt genutzt werden, um Unkräuter in der Reihe mit Erde zu bedecken. Voraussetzung dafür ist aber eine ausreichende Wuchshöhe der Kulturpflanze, so dass diese nicht negativ beeinflusst wird (FOGELBERG & KRITZ 1998).

Um die Kulturpflanzen beim Einsatz der Geräte zu schützen und gleichzeitig die nah an der Reihe stehenden Unkräuter entfernen zu können, ist eine Reihensteuerung der Maschine notwendig. Ein großer Sicherheitsabstand zu den Pflanzen erlaubt eine feste Montage am Traktor, so dass die Steuerung allein über die Lenkung des Traktors erfolgt. Eine günstige Kinematik ist durch die Montage zwischen den Antriebsachsen eines speziellen Pflgetraktors gegeben. Durch die gute Sicht auf das Gerät kann der Fahrer den Traktor genauer lenken und im Gegensatz zum Anbau am hinteren Hubwerk bewirkt eine Lenkkorrektur keine entgegengesetzte Bewegung des Gerätes. Die Genauigkeit hängt stark von den Fähigkeiten des Fahrers ab.

Um den Fahrer zu entlasten und näher an der Pflanzenreihe arbeiten zu können, gibt es weitere Systeme, die eine partielle Entkoppelung der Maschine vom Traktor erfordern. Eine Möglichkeit ist die Entkoppelung der Unterlenker quer zur Fahrtrichtung, so dass das Gerät zur Seite schwenken kann oder eine Pendelkinematik an den einzelnen Hackwerkzeugen, so dass diese zwischen die beiden benachbarten Reihen geführt werden (BROEK 2009). Die Führung der Hackwerkzeuge erfolgt durch die Kulturpflanzen in der Reihe, so dass diese dafür ausreichend robust sein müssen. Nach SCHANS et al. (2006) kann dies z. B. ab dem Vierblattstadium bei Zuckerrüben erfolgen.

Um die Hackwerkzeuge unabhängig vom Entwicklungsstadium nah an die Reihenkulturen heranführen zu können, muss das Gerät aktiv gesteuert werden. Die einfachsten Geräte dieser Art arbeiten mit einem Bediener, der den Hackrahmen über ein zusätzliches Steuerrad quer zur Fahrtrichtung und unabhängig vom Traktor bewegt und somit einen optimalen Abstand zur Pflanzenreihe einstellt. Zur Senkung der Arbeitskosten werden Sensorsysteme für eine automatisierte Quersteuerung angeboten. Dabei nimmt eine auf dem seitlich verschiebbaren Hackrahmen montierte Kamera Bilder der Pflanzen auf und berechnet anhand der identifizierten Pflanzenreihen eine Leitlinie. Weicht die Maschine von der Leitlinie ab, erkennt die Software anhand der Kamerabilder die genaue Abweichung und steuert einen hydraulischen oder elektrischen Aktuator an, der den Rahmen mit den Hackaggregaten quer zur Fahrtrichtung bewegt. Die Kamera wird dadurch auch mitbewegt. Somit ist ein geschlossener Regelkreis vorhanden, der die Position laufend korrigiert. Um bei unsymmetrischem Pflanzenwachstum oder Hanglage eine Korrektur zu ermöglichen, haben die Systeme Terminals für die Traktorkabine, an denen der Fahrer ein seitliches Offset-Signal einstellen kann. Darüber hinaus bieten die Terminals wie in Bild 1.9 teilweise die Möglichkeit, das Livebild der Kamera anzuzeigen, um das Ergebnis zu kontrollieren (SØGAARD et al. 2002; POULSEN 2011; GARFORD 2011).

Eine noch jüngere Entwicklung stellt die direkte Steuerung des Traktors über ein globales Satellitennavigationssystem (GNSS) (engl.: Global Navigation Satellite System) dar. Nachdem der Traktor bei der Aussaat der Kulturpflanze die GNSS-Daten der Fahrspuren aufgezeichnet hat, können diese bei einer erneuten Überfahrt während des Hackens genutzt werden. Der Traktor kann anhand der Daten der aufgezeichneten Fahrspur folgen und somit theoretisch in konstantem Abstand zu den Reihen fahren. Durch die Verwendung von RTK Korrektursignalen (engl.: Real Time Kinematic; Echtzeitkinematik) sind mittlere Abweichungen von Fahrt zu Fahrt im Bereich von 22–51 mm möglich (GRIEPENTROG & NØRREMARK 2001; WATTSON & LOWENBERG-DEBOER 2004). Diese Werte sind allerdings nur bei optimalem Signalempfang erreichbar. WILSON (2000) und GRIEPENTROG et al. (2006) empfehlen daher die Kombination mit einem optischen Sensor wie einer Kamera. Der Aufbau sieht eine GNSS-Steuerung des Traktors und eine Feinsteuerung des Hackrahmens in Querrichtung über eine Kamera vor.



Bild 1.9: Kameragesteuerte Reihenhacke (links) mit einer Beispielsicht des Kontrollterminals in der Traktorkabine (rechts) (GARFORD 2011)

Mit den Systemen konnten zwar größere Fahrgeschwindigkeiten von bis zu 15 km/h (BÖHRNSEN 2001) und eine verbesserte Arbeitsqualität erreicht werden, aber der Bereich zwischen den Kulturpflanzen innerhalb einer Reihe (intra-row) wird nicht bearbeitet. Aufgrund dieser Einschränkung wurde nach Möglichkeiten gesucht auch den intra-row Bereich zu bearbeiten. Die Mechanisierung dieser Arbeit ist jedoch aufgrund der hohen Anforderungen an die Arbeitsgeschwindigkeit, den Schutz der Kulturpflanzen und der variablen Pflanzenabstände sehr komplex. Zwei verschiedene Ansätze zur Lösung des Problems wurden angestrebt: Der Einsatz passiver bzw. der Einsatz aktiver Werkzeuge.

2. Stand des Wissens

2.1 Hacken innerhalb der Reihe (intra-row)

Nach NØRREMARK & GRIEPENTROG (2004) können ca. 80 % des Feldes durch konventionelle mechanische Hackgeräte für den Bereich zwischen den Pflanzenreihen (inter-row) bearbeitet werden. Allerdings haben die übrigen Unkräuter im Bereich zwischen den Kulturpflanzen in der Pflanzenreihe (intra-row) und im direkten Umfeld der Kulturpflanzen (close-to-crop) einen stärkeren Einfluss auf die Entwicklung der Kulturpflanze. Im Gegensatz zum Bereich zwischen den Reihen ist die Bearbeitung in der Reihe deutlich aufwändiger, da die Kulturpflanzen keinen konstanten Abstand zueinander haben.

Eine Ausnahme bilden gepflanzte Kulturen, bei denen zusätzlich der Vorteil besteht, dass die Nutzpflanzen bereits einen Wachstumsvorsprung vorweisen, der eine Unterscheidung gegenüber Unkräutern vereinfacht. Eine weitere Ausnahme bilden Sonder-Anbauverfahren wie die Parallelsaart. Dabei werden z. B. Zuckerrüben mit einem Abstand von 30 cm in Quer- und Längsrichtung zueinander gesät, so dass der typische Reihenabstand von 45 cm auf 30 cm verringert und somit eine unveränderte Bestandsdichte erreicht wird (SCHULZE LAMMERS et al. 2010). Die Ablage im Quadratverband ermöglicht im Idealfall das Hacken mit einem konventionellen Hackgerät für den Zwischenreihenbereich in Quer- und Längsrichtung. Das Hacken quer zur Säreihe erfolgt in diesem Fall wie das Hacken in Längsrichtung.

Neben dem Problem, dass die Erntegeräte an die veränderten Reihenabstände angepasst werden müssen, tritt das Problem der mangelnden Genauigkeit beim Säen auf. Ungenaue GNSS-Positionssignale und Verrollungen beim Säen führen vor allem bei steigender Fahrgeschwindigkeit zu steigenden Abweichungen, die eine genaue Ablage im Quadratverband verhindern (SCHULZE LAMMERS et al. 2010). Hinzu kommt die unvorhersehbare, horizontale Positionsabweichung der aufgelaufenen Pflanze von der Position der Saatgutablage, die in Versuchen von GRIEPENTROG & NØRREMARK (2001) zu mittleren Abweichungen von 11,5 - 21,5 mm führten. Somit hat dieses Verfahren trotz der theoretischen Vorteile bisher keine Anwendung außerhalb der Forschung gefunden. Ein Großteil der Hackfrüchte wird bislang immer noch konventionell ausgesät, so dass die

Abstände der Pflanzen zueinander in der Reihe variieren. Um die Unkräuter in der Reihe zu bekämpfen, stehen Geräte mit passiver und aktiver Werkzeugführung zur Verfügung.

2.1.1 Passive Werkzeugführung

Das einfachste Mittel zur Bekämpfung von Unkräutern in der Reihe sind Maschinen mit passiv geführten Werkzeugen. Diese arbeiten nicht-selektiv und erlauben deshalb keine direkte Unterscheidung zwischen Unkräutern und Kulturpflanzen. Eine indirekte Unterscheidung wird durch unterschiedliche Entwicklungsstadien und damit unterschiedliche Verwurzelung und Pflanzengröße erreicht. Voraussetzung ist damit ein Wachstumsvorsprung der Nutzpflanze vor den Unkräutern, so dass diese robuster bzw. besser verwurzelt sind. Ein Gerät für die Bearbeitung in der Reihe ist der Hackstriegel, der bereits in Kapitel 1.3.4 vorgestellt wurde und üblicherweise gleichzeitig in und zwischen den Reihen arbeitet. Die Torsionshacke ist ähnlich aufgebaut und arbeitet mit federnden Werkzeugen aus Rundstahl. Im Gegensatz zum Hackstriegel ist dieses Gerät speziell für die Bearbeitung in der Reihe ausgelegt. Pro Reihe sind dafür zwei Zinken vorgesehen, die jeweils an einer Seite der Reihe arbeiten. Anders als beim Hackstriegel sind die Zinken in einem flacheren Winkel zum Boden angeordnet, so dass diese den Kulturpflanzen leichter ausweichen können und von der Reihe geführt werden (Bild 2.1). Das Gerät ist einfach einzustellen, aber nur für die Entfernung von kleineren Unkräutern geeignet (MÜCKE 2012).



Bild 2.1: Zwei federnde Werkzeuge einer Torsionshacke im Einsatz (MÜCKE 2012)

Ein intensiver arbeitendes Gerät stellt die Fingerhacke in Bild 2.2 dar. Links und rechts neben der Reihe ist jeweils eine schräg zum Boden gestellte Metallscheibe mit flexiblen Kunststoffzinken (Finger) angeordnet. Die Größe der Scheiben kann je nach Kultur variieren und der Abstand der Scheiben zueinander kann eingestellt werden. Durch den Eingriff von zusätzlichen, mit der Scheibe verbundenen Metallzinken mit dem Boden werden die Scheiben bei einer Vorfahrtbewegung passiv angetrieben (ANONYMUS 2007). Die Finger dringen im Bereich der Reihe in den Boden ein, scheren die empfindlicheren Pflanzen ab und ziehen die Unkräuter aus der Reihe heraus (MÜCKE 2013; SCHANS et al. 2006). Daher sollte die Kulturpflanze im Gegensatz zum Unkraut schon so weit entwickelt sein, dass die Finger keinen Einfluss auf diese haben (KÖNIG et al. 2005). Die Geräteeinstellung ist aufwändiger als bei der Torsionshacke und die intensivere Bearbeitung kann bei falscher Einstellung schneller zu Schäden an den Nutzpflanzen führen (MÜCKE 2012).



Bild 2.2: Fingerhacke in einer Reihenkultur (HATZENBICHLER 2013)

Da dieses Gerät nur für das Hacken in der Reihe konzipiert wurde, wird es standardmäßig mit einem konventionellen Hackrahmen mit Gänsefußscharen kombiniert. Für eine möglichst präzise Bearbeitung ist eine genaue Spurführung erforderlich, so dass die Werkzeuge in der Reihe geführt werden. Deshalb sind die in Kapitel 1.3.4 vorgestellten Spurführungssysteme nach optischem Prinzip auch für die nicht-selektiven Hackmechanismen wie die Fingerhacke vorteilhaft (SØGAARD et al. 2002; POULSEN 2011; GARFORD 2011).

Ein weiteres, passiv angetriebenes Gerät ist der Rollstriegel, der im Gegensatz zur Fingerhacke aus nur einer rotierenden Scheibe pro Reihe besteht. Bild 2.3 zeigt den Einsatz in Zuckerrüben. Die radial angeordneten Federstahlzinken sind in einer Kunststoffscheibe montiert, so dass durch die Materialpaarung eine Elastizität zugelassen wird. Durch die Anordnung der Scheibe in einem 30°-Winkel zur Fahrtrichtung wird erreicht, dass sich die Zinken beim Abrollen auch quer zur Fahrtrichtung durch den Boden bewegen und ein Band von ca. 10 cm Breite bearbeiten (EßER 2014). Als Vorteil kann die Unempfindlichkeit gegenüber unterschiedlichen Bodenbedingungen genannt werden. Anders als die Fingerhacke kann der Rollstriegel auch auf schweren, lehmigen Böden eingesetzt werden (SCHANS et al. 2006).



Bild 2.3: Rollstriegel in Zuckerrüben (MÜCKE 2012)

Die bereits in Kapitel 1.3.4 vorgestellte Bürstenhacke mit vertikaler Rotationsachse kann bei richtiger Einstellung auch für die Bekämpfung von Unkräutern in der Reihe eingesetzt werden. Wird die Drehrichtung so eingestellt, dass eine häufelnde Wirkung in der Reihe entsteht, können somit Unkräuter durch Verschütten bekämpft werden. Bei entgegengesetzter Drehrichtung werden die Unkräuter entwurzelt (MELANDER 1997; FOGELBERG 1998). Die Bekämpfung ist, wie in Kapitel 1.3.4 erläutert, auf kleinere Unkräuter und Nutzpflanzen im fortgeschrittenen Entwicklungsstadium beschränkt.

Neben den erläuterten Geräten zur nicht-selektiven Bekämpfung von Unkräutern in der Reihe sind noch weitere, weniger bekannte Geräte auf dem Markt oder in der Entwicklung. Dazu gehört z. B. die pneumatische Unkrautbekämpfung, die intensiver als die Torsions- oder Fingerhacke arbeitet (SCHANS et al. 2006). Das Gerät bläst Unkräuter mit Pressluft aus der Reihe (LÜTKEMEYER 1993). Die intensivere Bearbeitung benötigt einen höheren Energieaufwand, der ungefähr dem doppelten des herkömmlichen Hackens entspricht (WEIDE et al. 2008).

Die nicht-selektive Behandlung der unterschiedlichen Pflanzen führt zu zwei Problemen, die mit passiv geführten Werkzeugen nicht zu lösen sind. So stellt die Einstellung des Gerätes immer einen Kompromiss dar. Einerseits werden nicht alle Unkräuter beseitigt, da das Gerät nicht zu aggressiv eingestellt werden kann, andererseits werden immer auch Kulturpflanzen von dem Gerät verletzt oder entfernt, wenn es zu aggressiv arbeitet. In jungen Entwicklungsstadien ist eine Unkrautregulierung mit geringen Verlusten nur schwer möglich. Ein weiterer Nachteil besteht in der Wetterabhängigkeit der vorgestellten Systeme. Da die Werkzeuge vor allem junge und schwache Unkräuter bekämpfen können, kann ein verspäteter Einsatz aufgrund von ungeeigneten Wetterbedingungen dazu führen, dass weniger Unkräuter entfernt werden. Eine Lösung stellt die aktive Werkzeugführung dar, die eine aggressive Werkzeugeinstellung erlaubt, aber gezielt Kulturpflanzen verschont.

2.1.2 Aktive Werkzeugführung

Die aktive Führung von Hackwerkzeugen hat den Vorteil, eine selektive Wirkung erzielen zu können. Um eine aktive Führung zu ermöglichen, ist eine Regelung notwendig, die über einen Sensor angesteuert wird. Dabei wird in Abhängigkeit von einem Erkennungssystem, das eine Unterscheidung von Nutzpflanze und Unkrautpflanze ermöglichen soll, das eigentliche Bearbeitungswerkzeug in Bewegung gesetzt (ÅSTRAND & BAERVELDT 2002; ÅSTRAND 2005; GRIEPENTROG 2005). Das von ÅSTRAND & BAERVELDT (2002) vorgestellte System (Bild 2.4) ist ein autonomer Roboter, der an der Universität Halmstad in Schweden entwickelt wurde. Die Pflanzenerkennung erfolgt mit einer Farbkamera und einer Bildanalysesoftware. Die Unkrautregulierung wird durch ein schnell rotierendes Hackwerkzeug durchgeführt, welches bei einem entsprechenden Signal der Bildanalysesoftware mittels eines Hydraulikzylinders abgesenkt oder angehoben wird.

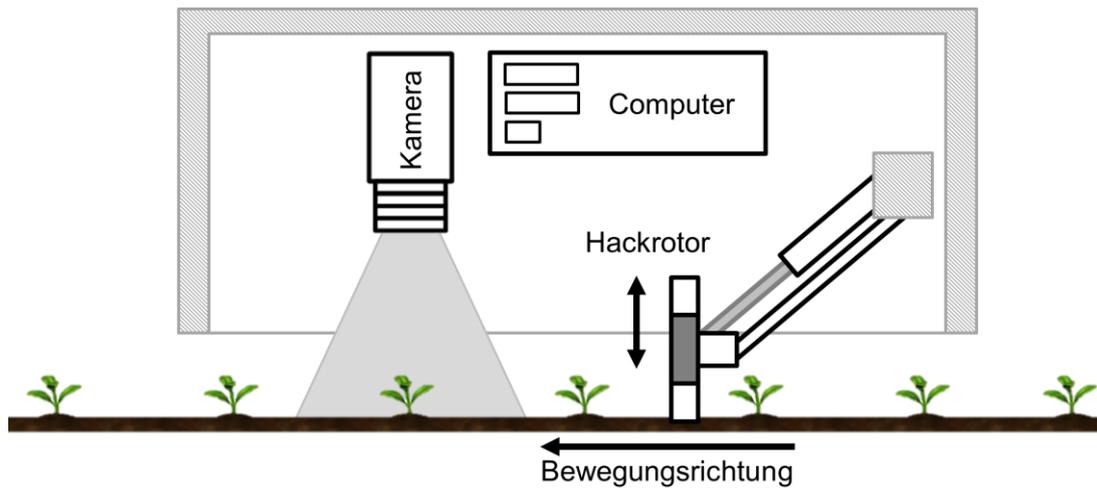


Bild 2.4: Konzept für die Unkrautbekämpfung in der Reihe mit einer Farbkamera zur Erkennung der Pflanzen, einem Computer zur Berechnung der Pflanzenposition und für die Ansteuerung des Hackrotors zur Unkrautregulierung (verändert nach ÅSTRAND & BAERVELDT 2002)

Das System der Fachhochschule Osnabrück in Bild 2.5, das auch von GRIEPENTROG (2005) genutzt wird, verfügt über einen hydraulisch angetriebenen, rotierenden Zylinder, der sich vertikal über der Pflanzenreihe befindet und an dem im Kreis angeordnete Zinken montiert sind. Durch die Drehung des Zylinders und die Vorfahrtbewegung hinterlassen die Zinken ein zyklisches Muster auf dem Boden, welches in Bild 2.6 dargestellt ist.

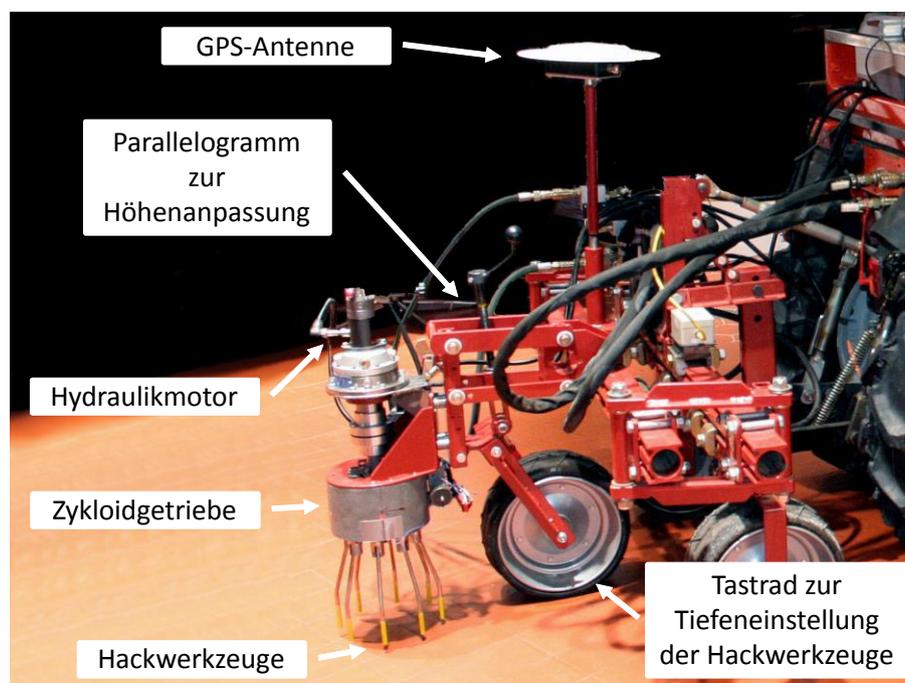


Bild 2.5: Bei dem Hacksystem der Fachhochschule Osnabrück erfolgt die Ansteuerung mithilfe von Georeferenzdaten, die beim Säen gespeichert wurden (verändert nach GRIEPENTROG et al. 2006)

Durch das Einschwenken einzelner Zinken kann dieses Muster verändert werden, so dass Nutzpflanzen gezielt geschont werden (Bild 2.6). Gleiches ist auch über die Änderung der Drehzahl des Zylinders möglich. Durch diese Anordnung der Systemkomponenten ist der Einsatz an die freie Höhe zwischen Zylinder und Boden gebunden. Die Erkennung der Pflanzen erfolgt über eine Vielzahl verschiedener Sensoren. Neben einem Kamerasystem ist auch eine Ansteuerung über GNSS-Referenzdaten möglich, die während der Aussaat gesammelt und in einer Datenbank gespeichert werden (NØRREMARK et al. 2008, 2012).

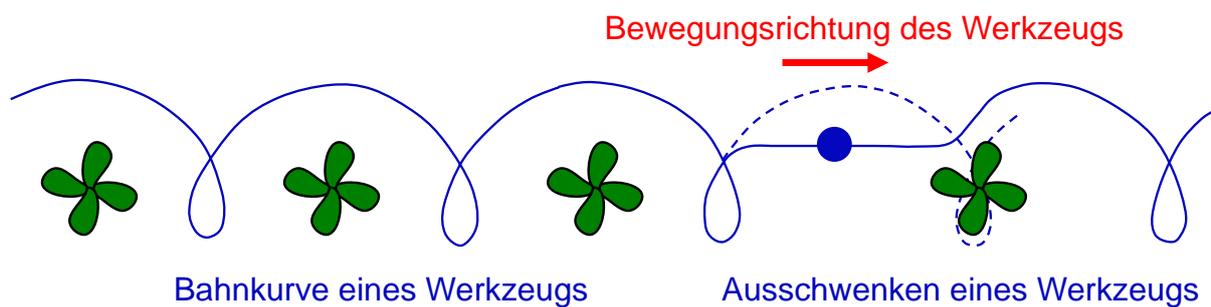


Bild 2.6: Zykloide Trajektorie eines Werkzeugzinkens der Osnabrücker Hacke. Vor der rechten Pflanze schwenkt das Werkzeug aus, um eine Kollision mit der Nutzpflanze zu vermeiden

Ein System der Universität Wageningen (BAKKER et al. 2006) arbeitet, ebenso wie das System der University Cranfield (DEDOUSIS et al. 2006), mit rotierenden Scheiben, die beidseitig der Pflanzenreihe, parallel zur Erdoberfläche geführt werden. Dadurch werden im günstigsten Fall die Unkrautpflanzen zerschnitten, jedoch erfolgt keine Bodenbearbeitung, die beim Hackvorgang ebenfalls von wesentlicher Bedeutung ist.

Seit einigen Jahren existieren auch kommerziell vertriebene Geräte, deren Einsatz vor allem für den Gemüseanbau beworben wird. Der in Bild 2.7 dargestellte Robovator von F. Poulsen Engineering ApS (POULSEN 2011) arbeitet sowohl im intra-row- als auch im inter-row Bereich. Der inter-row Bereich wird vom System konventionell bearbeitet. Der intra-row Bereich wird durch ein schnell aus dem inter-row-Bereich in die Pflanzenzwischenräume bewegtes Hackmesser bearbeitet. Die Steuerung erfolgt durch eine Kamera und eine Bildanalysesoftware.



Bild 2.7: Hackgerät Robovator von F. Poulsen Engineering ApS für den Bereich zwischen und in den Reihen (links) mit einem sensorgesteuerten Werkzeug für den intra-row-Bereich (rechts) (POULSEN 2011)

Bild 2.8 zeigt eine Weiterentwicklung des Robovator mit jeweils zwei schneidenden Hackwerkzeugen pro Reihe. Geräte, deren Funktion ähnlich ist, sind der Ferrari Remoweed, der 2013 auf der Agritechnica vorgestellt wurde und der pneumatisch angesteuerte Steketee IC-Cultivator (HUITING et al. 2014).

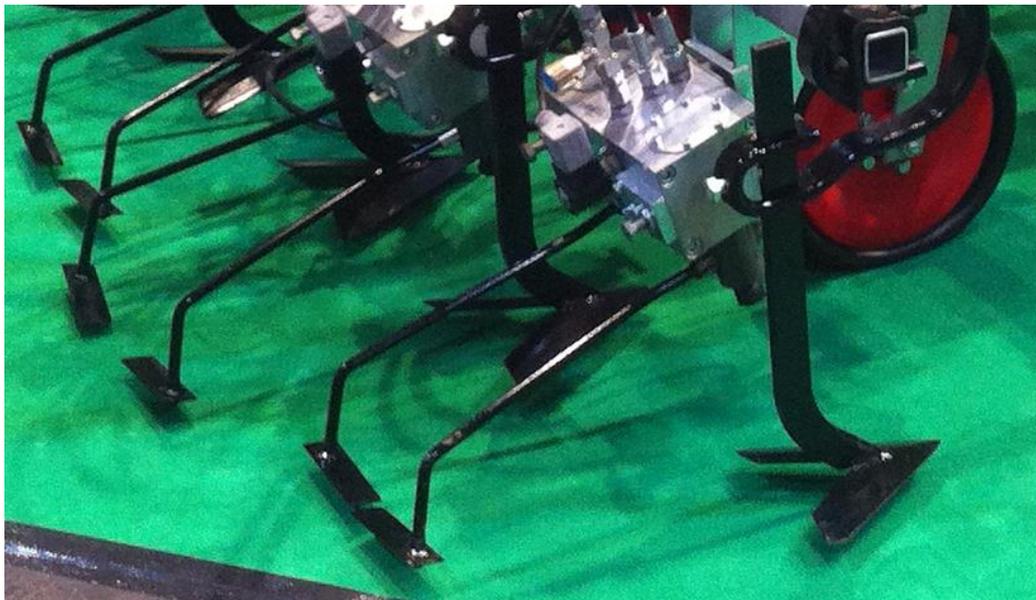


Bild 2.8: Weiterentwicklung des Robovator mit einem Gänsefußschar für den Bereich zwischen den Reihen und jeweils zwei pendelnden Werkzeugen für die Unkrautregulierung in der Reihe von F. Poulsen Engineering ApS

Ein kinematisch grundsätzlich unterschiedliches Gerät wurde an der Universität Cranfield (GB) erforscht. Das in Bild 2.9 dargestellte System von DEDOUSIS (2007) und TILLET et al. (2008) arbeitet mit rotierenden Scheiben, die eine V-förmige Aussparung aufweisen. Die Scheibe ist parallel zum Boden ausgerichtet und taucht nur minimal in den Boden ein. Die Kante der Aussparung dient als Schneide, die bei einer Drehung der Scheibe als Werkzeug dient. Die Scheibe kann je nach Kulturpflanze und Arbeitsbedingungen mit einem unterschiedlichen Winkel zum Boden ausgerichtet werden (DEDOUSIS et al. 2007). Die Tiefeneinstellung wird durch ein Tastrad sichergestellt. Nachteilig wirkt sich die mangelnde Flexibilität aus, da die Größe der Scheibe zum Pflanzenabstand in der Reihe passen muss, so dass die Scheiben bei Nutzung in unterschiedlichen Kulturen ausgetauscht werden müssen.

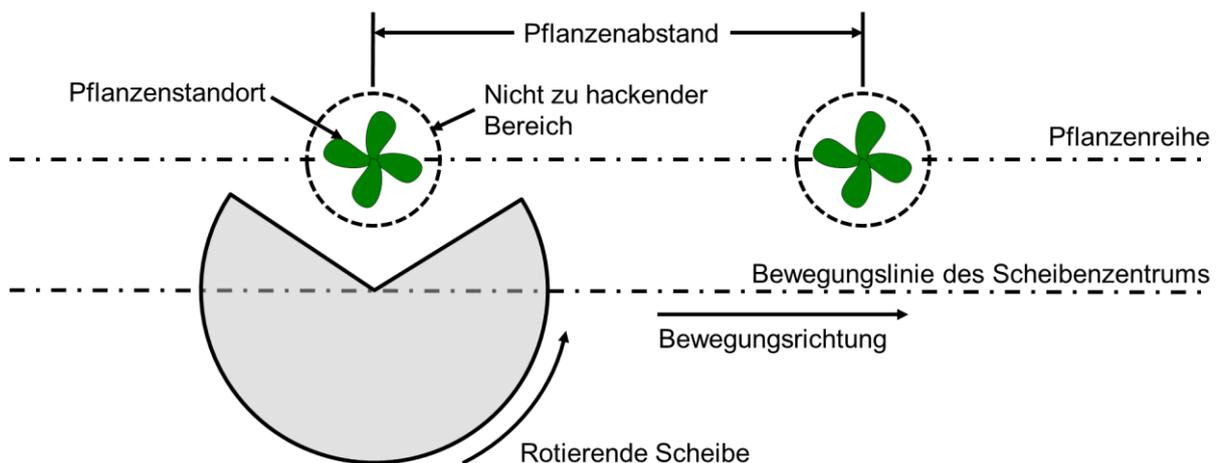


Bild 2.9: Darstellung des Hackmechanismus mit rotierenden Scheiben (verändert nach DEDOUSIS et al. 2006)

Mit dem in Bild 2.10 dargestellten Gerät wurde von GARFORD (2011) ein Gerät auf den Markt gebracht, das nach dem vorgestellten Prinzip arbeitet. Eine Kamera erkennt die Pflanzen und steuert parallel die Hydraulikmotoren für mehrere Reihen. Für die Erkennung der Kulturpflanzen und somit eine verlustfreie Bearbeitung der Kultur sind zwei Voraussetzungen zu erfüllen. Nach WUCHERPFENNIG (2011) dürfen sich die Blätter der Pflanzen nicht überlagern, da die Kameras in diesem Fall nicht zwischen den einzelnen Pflanzen unterscheiden können. Zudem müssen die Unkräuter für eine Differenzierung zwischen Kultur- und Unkrautpflanze wesentlich kleiner sein.



Bild 2.10: Kommerzielles Gerät für die Unkrautbekämpfung in der Reihe mit rotierenden Hackscheiben und Kameras für die Pflanzenerkennung (GARFORD 2011)

Am Institut für Landtechnik (ILT) der Universität Bonn wurde von GOBOR (2007) ein System mit einem neuen kinematischen Ansatz entwickelt, das aus einem Schrittmotor und drei oder mehreren an der Nabe montierten Armen besteht, die um die horizontale Achse oberhalb der Reihe rotieren (Bild 2.11).

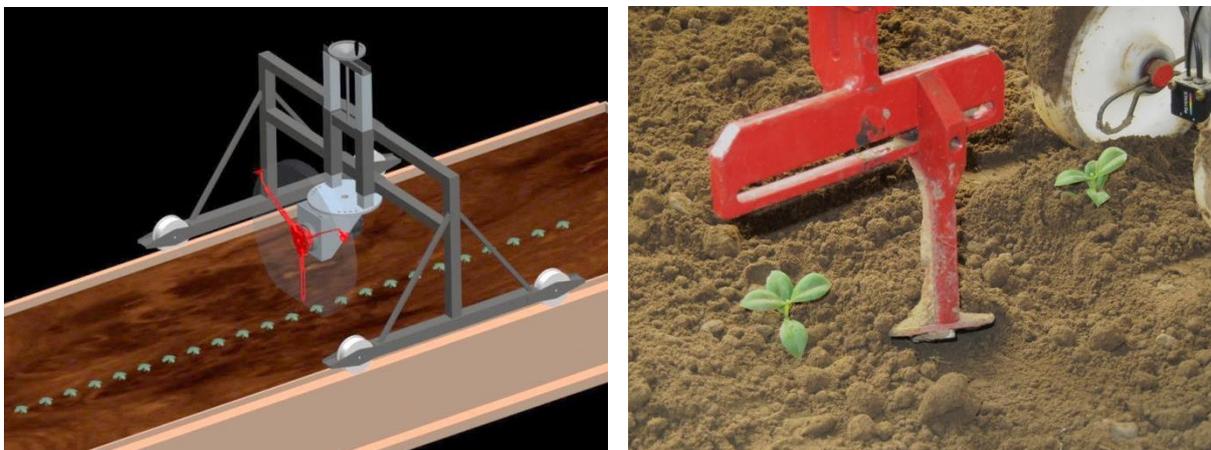


Bild 2.11: CAD-Modell der ILT-Rotationshacke auf der Bodenrinne (links), Werkzeugeingriff eines von drei Werkzeugen zwischen den Pflanzen in der Reihe (rechts)

Die Hackschare kreuzen die Reihe nahezu orthogonal (Bild 2.12) zwischen den Kulturpflanzen und entfernen die Unkräuter in diesem Bereich. Die Wirkung ähnelt durch die Scharform der von Gänsefußscharen. Das daraus resultierende kinematische Modell wird durch die Fahrgeschwindigkeit, den Pflanzensollabstand und einer sensorbasierten online-Erkennung der Pflanzen in der Reihe gesteuert. Die Steuerung des Werkzeugträgers (Rotors) erfolgt mittels eines Programms, dessen Eingangsdaten der Sollpflanzenabstand und der Ist-Pflanzenabstand sind.

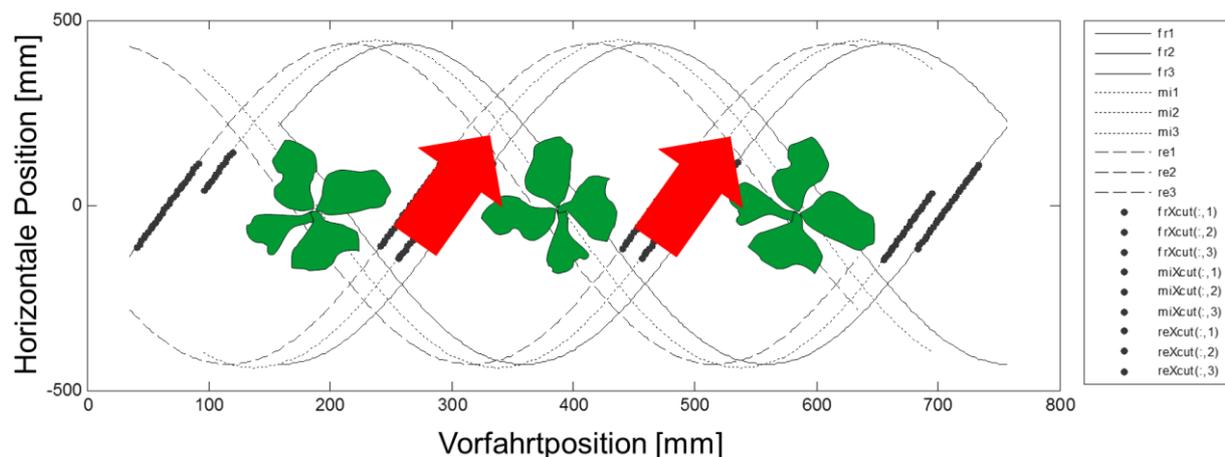


Bild 2.12: Trajektorie der 3 Hackwerkzeuge der Bonner Rotationshacke. Im Bereich der roten Pfeile tauchen die Werkzeuge in den Boden ein (verändert nach GOBOR 2007)

Die Position der Pflanzen wurde in den Versuchen durch zwei verschiedene Sensoren ermittelt, die an einem Sensorträger montiert wurden, der über zwei Tasträder in einem konstanten Abstand zum Boden geführt wurde (Bild 2.13). So wurde ein Laser-Reflexionstaster verwendet, der den Abstand zu Oberflächen direkt unter dem Sensor misst. Da die Blätter der Pflanzen höher als die Bodenoberfläche sind und dadurch eine kürzere Distanz zum Sensor besteht, ist eine Unterscheidung möglich. Als Einstellwert dient in erster Linie ein Schwellwert, der die Grenze zwischen dem Abstand zum Boden und zu den Blättern markiert. Der Sensor gibt lediglich ein zeitkontinuierliches, wertdiskretes Signal (unter/über Schwellwert) weiter. Eine Unterscheidung zwischen Kulturpflanze, Unkraut oder einem Stein findet nicht statt.

Ein zweiter im Versuchsaufbau eingesetzter Sensor war ein Farbsensor. Dieser wurde auf den Farbton der Kunstpflanzen, die im Labor anstelle natürlicher Pflanzen verwendet wurden, eingestellt. Ähnlich dem Distanz-Sensor gibt dieser Sensor auch nur ein

zeitkontinuierliches wertdiskretes Signal (Pflanzenfarbe: ja/nein) ab. Für die genaue Bestimmung des Pflanzenmittelpunktes sind bei beiden Sensoren nachfolgende computergestützte Auswertungen der Sensorsignale notwendig. Die Ergebnisse dieser Arbeit (GOBOR 2007) zeigten, dass die Überführung des kinematischen Modells in ein praxisrelevantes System möglich ist.



Bild 2.13: Sensorträger mit einem Farb- und Laser-Distanzsensoren zur Detektion der Pflanzen in der Reihe (links); Reflexionen des Farbsensors (blau) sowie des Laser-Distanzsensors (rot) (rechts)

2.2 Pflanzenerkennung

Für eine Unkrautregulierung in der Reihe, bei der die Nutzpflanzen gezielt geschont werden sollen, ist eine Erkennung der Pflanzen zwingend notwendig. Zur Erkennung wurden in der Vergangenheit verschiedene Verfahren erprobt und befinden sich auch teilweise im Einsatz. Neben berührenden Sensoren sind berührungslose Sensoren für die Standortermittlung der Pflanzen geeignet. Diese können entweder anhand von den bei der Saat gespeicherten Georeferenzen oder durch die Online-Erkennung während des Hackens die Nutzpflanzenposition ermitteln. Um die Erkennung zu verbessern, werden auch Kombinationen verschiedener Sensoren angewendet. Teilweise sind die Sensoren als Einzelemente nicht in der Lage, Pflanzen zu unterscheiden und bieten erst in der Kombination mit anderen Sensoren die Möglichkeit dazu (KIELHORN et al. 2000).

2.2.1 Tastsensoren

Die Erkennung der Kulturpflanzen über mechanische Tastsensoren wird bereits seit 1970 für die Erkennung von Pflanzenreihen zur Steuerung von Erntemaschinen eingesetzt (COENENBERG et al. 1977; CLAAS 2015; GRAEBER 1970). Das Verfahren bietet auch die Möglichkeit, einzelne Pflanzen zu detektieren. Dies wurde unter anderem für die Vereinzelung von Zuckerrüben eingesetzt (BRINKMANN 1964). In diesem Fall ist eine Unterscheidung zwischen Kulturpflanze und Unkräutern nicht möglich, aber auch nicht notwendig. Für eine Unkrautregulierung in der Reihe ist dieses Verfahren nicht geeignet, da eine Unterscheidung zwischen Unkräutern und Nutzpflanzen erforderlich ist. Eine Ausnahme können, je nach Unkrautbesatz, gepflanzte Nutzpflanzen sein, da die Abstände zwischen den Nutzpflanzen in der Reihe konstant gehalten werden können und die Erkennung durch diese Information unterstützt werden kann.

2.2.2 Georeferenzierung

Die Georeferenzierung nutzt die Informationen über die Pflanzenstandorte, die während der Saat aufgezeichnet werden können (GRIEPENTROG & NØRREMARK 2001). Die Verwendung eines RTK-GNSS-Systems auf der Sämaschine und zusätzlicher optischer Sensoren an den Säscharen erlaubten die Ermittlung der ungefähren Ablagepositionen von Zuckerrübenpillen. Unter optimalen Bedingungen betrug die mittlere Abweichung zwischen gespeicherter und realer Pflanzenposition bei Zuckerrüben 11,5 mm bis 21,5 mm. Dies deckt sich mit den Ergebnissen von Studien zur Reihenerkennung, die eine mittlere Abweichung von 16 mm bei optimalem Signalempfang zeigen (SLAUGHTER et al. 2008). WATTSON & LOWENBERG-DEBOER (2004) geben eine Genauigkeit des RTK-GNSS von 1 inch (\cong 25,4 mm) an, so dass der Fehler beim Aufzeichnen (Saat) und Anwenden (Hacken) zu einer Verdopplung auf 51 mm führen kann.

Unabhängig von der Genauigkeit der GNSS-Systeme bleiben zwei unbekannte Konstanten bei der Berechnung der Pflanzenposition. Bei der Aussaat kann es zu Verrollungen des Saatguts kommen. Das bedeutet, dass die Ablageposition des Saatgutes nicht genau festgehalten werden kann. Ein weiterer Punkt ist das Keimen der Pflanze. Je nach Auflaufbedingung und Saatbettzustand kann die horizontale Position des Hypokotyls von der Position des Saatkorns abweichen.

2.2.3 Lichtschranken

Bei der Pflanzenerkennung mithilfe von Lichtschranken wird ein Licht- bzw. Laserstrahl erzeugt und auf der gegenüberliegenden Seite des zu untersuchenden Objekts mithilfe einer Photozelle detektiert. Wird der Strahl unterbrochen, so registriert dies der Sensor. Das Vorhandensein einer Pflanze kann somit erkannt werden. Um auch deren Form, Größe und Position zu bestimmen, können mehrere Sensoren in unterschiedlichen Winkeln zueinander positioniert werden.

Alternativ ist es möglich, die Lichtschranken übereinander mit parallelem Strahlengang zu montieren, so dass ein Lichtgitter wie in Bild 2.14 erzeugt wird. Der Sender besteht aus einzelnen Dioden, die eine bestimmte Wellenlänge, z. B. im Infrarotbereich, emittieren. Auf der gegenüberliegenden Seite empfangen Photodioden die Strahlung. Befindet sich ein Objekt zwischen Sensor und Empfänger, wird ein Teil der Photodioden abgeschattet, so dass z. B. die Objekthöhe ermittelt werden kann. Dies ermöglicht bei gleichzeitiger Bewegung senkrecht zur Ebene des Lichtgitters eine zweidimensionale Formerkennung (FENDER et al. 2005; WUNDER et al. 2012; DZINAJ et al. 1998).

Das Verfahren kann bei größeren Pflanzen ohne Probleme eingesetzt werden, hat aber bei kleineren Pflanzen den Nachteil, dass der Sensor dicht über dem Boden geführt werden muss, so dass erstens eine genaue Höhenführung erforderlich ist und zweitens auch nichtpflanzliche Objekte, wie z. B. Steine und Strohreste, detektiert werden.



Bild 2.14: Schematische Darstellung eines Lichtgitter-Sensors

2.2.4 Abstandssensoren

Eine weitere berührungslose Möglichkeit zur Pflanzendetektion bieten Abstandssensoren. Dazu gehören Ultraschall- und Laser-Distanzsensoren. Aufgrund des robusten Aufbaus eignen sich vor allem Ultraschallsensoren für den Einsatz in der Landtechnik und können für die Höhen- und Seitenführung von Maschinen eingesetzt werden (HARTMANN 1999). Die Seitenführung kann anhand von Pflanzenreihen erfolgen. So konnte UHLIG (1987) bei der Untersuchung von Halmreihen und geköpften Rüben die Objekte mit einer mittleren Abweichung von ± 15 mm detektieren.

Die Distanzmessung mithilfe von Lasersensoren kann auf drei Arten erfolgen. Bei den einfach aufgebauten Sensoren wird ein Laserstrahl auf die zu messende Oberfläche gerichtet und die Distanz anhand der reflektierten Strahlungsintensität gemessen. Da die Reflexionsfähigkeit von der Oberflächenbeschaffenheit abhängt, ist die Genauigkeit bei der Messung unterschiedlicher Materialien negativ beeinträchtigt. Eine genauere Messung ist durch Triangulation oder Laufzeitmessung möglich und wurde bereits zum Messen morphologischer Pflanzenparameter genutzt (EHLERT 2005; EHLERT & ADAMEK 2007). Bei der Triangulation wird der reflektierte Laserstrahl durch ein Objektiv auf einen CMOS-Sensor (engl.: Complementary Metal-Oxide-Semiconductor; sich ergänzender Metalloxid-Halbleiter) gelenkt. Je nach Distanz verändert sich der Strahlengang und der Laserstrahl wird in einem anderen Bereich des CMOS-Elements registriert. Bei der Laufzeitmessung wird die Zeit zwischen Emittieren und Empfangen gemessen und einer Distanz zugeordnet.

Insgesamt bieten die Lasersensoren eine höhere Genauigkeit bei der Distanzmessung, allerdings ergeben sich dieselben Probleme wie bei Lichtschranken und Ultraschallsensoren. Die Sensoren erlauben die Erstellung von Höhenprofilen, können aber bei kleinen Pflanzen nicht zwischen diesen und nichtpflanzlichen Elementen wie Steinen unterscheiden. In Kombination mit einem weiteren Sensor, z. B. den von GOBOR (2007) eingesetzten Farbsensor, kann die Unterscheidung zwischen pflanzlichen und nichtpflanzlichen Elementen verbessert werden.

2.2.5 Bildverarbeitung

In der Automations- und Fertigungsindustrie wird die Bildverarbeitung bereits seit längerer Zeit eingesetzt. Als eines der ersten industrietauglichen Bildverarbeitungssysteme gilt das Intellect, welches 1979 für rund 87.000 Euro erhältlich war (FRAUNHOFER 2007). Durch die Fortschritte in der Entwicklung und dem seither gewachsenen Markt sind die Systeme mittlerweile kostengünstiger, kleiner und leistungsfähiger geworden. So betrug der Branchenumsatz der industriellen Bildverarbeitung 2012 laut SCHWARZKOPF (2013) 1,49 Milliarden Euro. Auch wenn die Systeme seit ihrer Einführung kleiner geworden sind, liegt ihre Komplexität immer noch weit oberhalb der bereits vorgestellten Sensorsysteme.

Der Aufbau ist oft ähnlich. Zunächst wird ein Bild von einer Digitalkamera aufgenommen, wie sie in Bild 2.15 dargestellt ist. Das Umgebungslicht oder das Licht einer zusätzlichen Beleuchtung wird von der Bildfläche und Gegenständen reflektiert und gelangt durch die Linsen des Objektivs in die Kamera. Je nach Anordnung der Linsen kann die Brennweite und die Größe der aufzunehmenden Bildfläche eingestellt werden. Die Brennweite muss für ein scharfes Bild dem Abstand zum Messobjekt entsprechen. Das Licht wird in der Kamera auf einen optischen Sensor gelenkt. Bei industriellen Kameras sind dies vor allem CMOS- und CCD-Sensoren (engl.: Charge-Coupled Device; ladungsgekoppeltes Bauteil). Bisher beherrschen nach LITWILLER (2001) vor allem CCD-Sensoren den Markt im Bereich der Industrielkameras. CMOS-Sensoren sind vor allem als Massenprodukt für Mobiltelefone oder bei Spezialanwendungen, die die Vorteile der CMOS-Technik nutzen, zu finden.

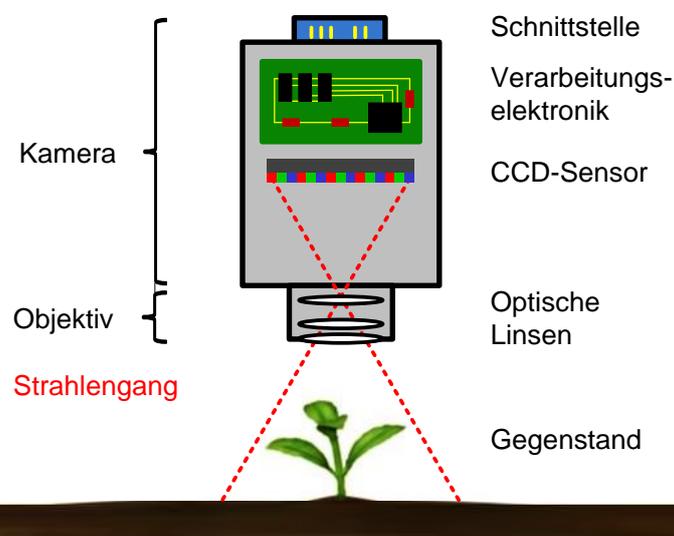


Bild 2.15: Schematischer Aufbau und Funktion einer CCD-Digitalkamera

Der Sensor selbst besteht aus lichtempfindlichen Pixeln, die in einem Raster flächig auf einem elektronischen Chip angeordnet sind. Jeder Pixel ist ein Photodetektor, der einfallende Photonen durch den inneren photoelektrischen Effekt in messbare Ladungsverschiebungen umwandelt. Die Anzahl verschobener Elektronen ist dabei proportional zur emittierten Strahlung (STEMMER 2013). Die erzeugte Spannung wird nachfolgend in ein digitales Signal transformiert. Die Werte aller Pixel ergeben somit ein digitales Rohbild, welches direkt verwendet oder weiterverarbeitet werden kann. Die Anzahl der Pixel bestimmt die Auflösung der Bilder und der Kamera. Eine hohe Auflösung ermöglicht die Erkennung kleinerer Details, generiert aber auch eine höhere zu verarbeitende Datenmenge, so dass die Verarbeitungszeit steigt.

Eine Verarbeitungselektronik in der Kamera bietet die Möglichkeit, die Datenmenge zu reduzieren oder Teile der Bildverarbeitung vom Computer in die Kamera zu verlagern. Findet eine aufwändige Bildverarbeitung in der Kamera statt, wird diese als Smart-Kamera bezeichnet. Dadurch kann ein zusätzlicher Computer für die Bildverarbeitung entfallen. Häufig findet nur eine Vorverarbeitung statt, um die über die Schnittstelle zu versendende Datenmenge zu verringern oder den Bildverarbeitungscomputer zu entlasten. Nach STEMMER (2013) gehören dazu vor allem folgende Funktionen:

- Binning: Zusammenfassen mehrerer benachbarter Pixelwerte zu einem, so dass mit der einhergehenden, verringerten Auflösung eine Datenreduktion erreicht wird
- Umwandlung in einen anderen Farbraum (von Bayer in RGB (Rot, Grün, Blau), HSI (engl.: Hue, Saturation, Intensity; Farbwert, Farbsättigung, Lichtintensität) o. ä.)
- Korrektur von Sensorartefakten und Weißbild-Korrektur
- Programmierbare Look-Up-Tabellen
- Bildspiegelung
- Komprimierung, z. B. nach der JPEG-Norm (engl.: Joint Photographic Experts Group; Verbindung der Fotografieexperten)
- Bild-Trigger (Bildaufnahme zu einem definierten Zeitpunkt, der über ein externes Signal festgelegt wird)
- Ausschneiden eines definierten Bildbereichs, auf den sich die weitere Verarbeitung konzentriert. Der Ausschnitt wird auch als ROI (engl.: Region Of Interest; Bereich von Interesse) bezeichnet

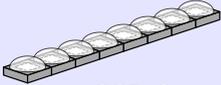
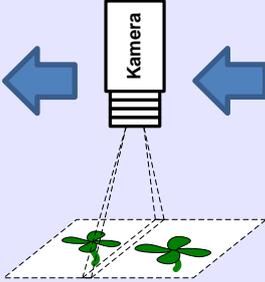
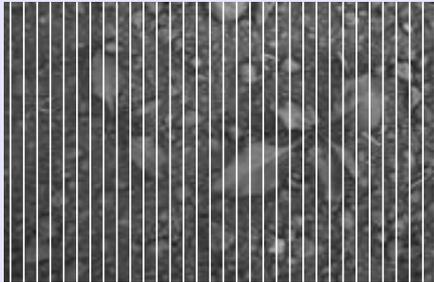
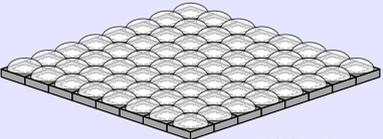
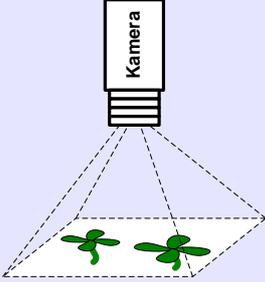
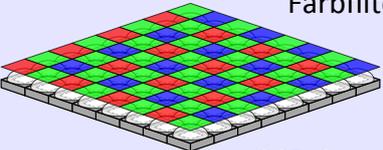
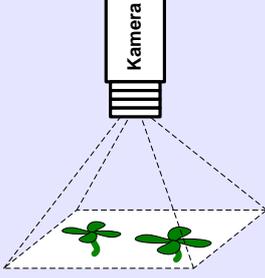
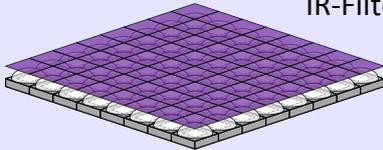
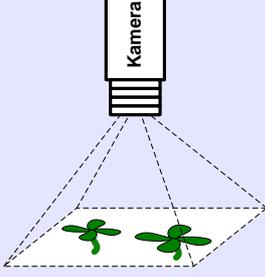
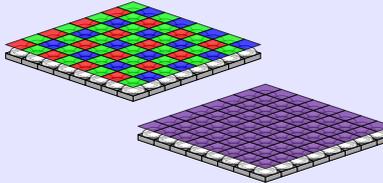
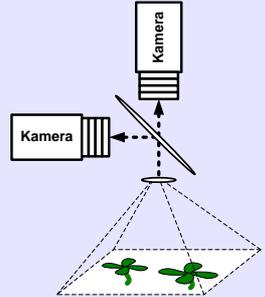
Die Weitergabe der Bilddaten kann über verschiedene Übertragungssysteme erfolgen. Zu den vorrangigen Schnittstellen gehören USB (engl.: Universal Serial Bus; universelles serielles Bussystem), FireWire und CameraLink (CL). Der Anschluss an ein Ethernet-Netzwerk bietet darüber hinaus die Möglichkeit, dass verschiedenste Sensoren, Kameras, Verarbeitungscomputer und Aktuatoren über ein Feldbus-System kommunizieren können.

Die Weiterentwicklung der Industriekameras hat auch zur Entwicklung unterschiedlicher Kameratypen für spezielle Anwendungen geführt. In Tabelle 2.1 sind verschiedene Kameras, deren Sensoraufbau, die Aufnahmetechnik und eine Darstellung der aufgenommenen Bilder zu sehen.

In der obersten Reihe ist eine Zeilenkamera dargestellt, deren Besonderheit im Aufbau des Sensors liegt. Die Pixel sind nicht in einem rechteckigen Raster, sondern wie beim Sensorkopf eines Flachbettscanners auf einer Linie angeordnet. Die zweidimensionalen (2D) Bilder entstehen durch den zeilenweisen Aufbau über eine lineare Bewegung der Kamera relativ zum Objekt. Die einzelnen Zeilen werden also zeitlich nacheinander aufgenommen und von der nachfolgenden Bildverarbeitung und nicht dem Sensor zusammengesetzt. Zeilenkameras eignen sich vor allem für die Inspektion von Endlosmaterial, so dass auch die Untersuchung von Pflanzenreihen in Betracht gezogen werden kann. Um die einzelnen Zeilen präzise aneinanderzufügen, ist ein optimales Timing der einzelnen Aufnahmen nötig.

Die ersten digitalen Industriekameras waren Schwarzweißkameras, die ein monochromes Bild erzeugen. Da die industrielle Bildverarbeitung nicht zwangsläufig auf Farben angewiesen ist, sondern teilweise die Kontraste zwischen hellen und dunklen Bereichen für Bildverarbeitungsalgorithmen nutzt, werden die Kameras oft als ausreichend bewertet. Die Vorteile sind eine höhere räumliche Auflösung und eine geringere zu verarbeitende Datenmenge (STEMMER 2013).

Tabelle 2.1: Aufnahmetechnik und Beispielaufnahmen verschiedener Kameras für die industrielle Bildverarbeitung

Bezeichnung/Sensoraufbau	Aufnahmetechnik	Beispielaufnahmen
Zeilenkamera  CCD-Sensor		
Monochromkamera  CCD-Sensor		
Farbkamera  Farbfilter CCD-Sensor		
Infrarotkamera  IR-Filter CCD-Sensor		
Multispektralkamera 		

Zur Erzeugung farbiger Bilder gibt es Farbkameras, deren Aufbau den Schwarzweißkameras ähnelt. Um unterschiedliche Farben im sichtbaren Bereich (VIS) (DIN 5031-7) erkennen zu können, werden einzelne Farbfilter vor den Pixeln platziert, die im Normalfall die Farben Rot, Grün und Blau aufweisen. So können die einzelnen Pixel die Helligkeit der jeweiligen Farbe ermitteln (STEMMER 2013). Die Anordnung ist in den meisten Fällen schachbrettartig, wie in Tabelle 2.1 dargestellt, und wird nach deren Erfinder Bryce E. Bayer als Bayer-Matrix (engl.: Bayer Pattern) (BAYER 1975) bezeichnet. Da das menschliche Auge vor allem auf grüne Farbtöne reagiert und die Farbkameras diese Empfindlichkeit nachahmen sollen, sind 50 % der Pixel grün. Da die einzelnen Pixel nur die Helligkeit der jeweils gefilterten Farbe messen, muss der Farbton für ein Vollfarbbild über Interpolation benachbarter Pixel errechnet werden (KIMMEL 1998). Mit Farbkameras kann eine Erkennung (ANDERSEN 2001) und auch Unterscheidung von Pflanzen erfolgen, wie MÜTER (2013) und NIEUWENHUIZEN (2009) zeigen konnten.

Mit der Filtertechnik ist es nicht nur möglich, einzelne Farben im sichtbaren VIS-Bereich zu filtern, sondern gezielt Wellenlängen über Langpass-, Kurzpass- und Bandpassfilter herauszufiltern. Für bestimmte Anwendungen wie die Pflanzenerkennung ist der Nahinfrarotbereich (NIR) mit einer Wellenlänge von 780 nm bis 1400 nm (DIN 5031-7) von besonderer Bedeutung. Pflanzen enthalten im Gegensatz zu nichtpflanzlichen Stoffen einen hohen Anteil an Chlorophyll, welches im NIR-Spektrum eine besonders hohe Reflektivität aufweist. Dieses Unterscheidungsmerkmal wurde bereits von KNIPLING (1970) für die Unterscheidung einzelner Pflanzenarten genutzt und von BORREGAARD et al. (2000) sowie FEYAERTS & VAN GOOL (2001) für spektroskopische Pflanzenunterscheidung mit CCD-Sensoren weiterentwickelt. Um einfache NIR-Aufnahmen zu erstellen, können einfache Monochrom-CCDs verwendet werden, wie sie HARALSON et al. (1997) zur Pflanzenerkennung für die gezielte Applikation chemischer Pflanzenschutzmittel verwendete. Um störendes, sichtbares Licht herauszufiltern, werden Langpassfilter (Tageslicht-Sperrfilter) vor dem Sensor oder dem Objektiv platziert, die das kurzwellige Licht unterhalb der NIR-Strahlung blockieren und nur die NIR-Strahlung passieren lassen. Langwellige Strahlung oberhalb des NIR-Bereichs kann den Filter zwar passieren, wird jedoch aus physikalischen Gründen nicht vom Sensor detektiert (STEMMER 2013). FISCHER et al. (2010) und MILLER et al. (1997) nutzten diesen Aufbau zur Erkennung von Pflanzen in Reihenkulturen.

Um die Vorteile unterschiedlicher Kameras zu vereinen, gibt es Ansätze, verschiedene Kameratechniken für die Pflanzenerkennung zu kombinieren. In Tabelle 2.1 ist eine Multispektralkamera dargestellt, die zwei Kameratypen vereint. Eine Farbkamera und eine IR-Kamera werden mit einer Optik kombiniert, die es ermöglicht, dass zwei Bilder eines Gegenstandes mit identischem Bildausschnitt aufgenommen werden. SÖKEFELD & GERHARDS (2004) sowie OEBEL (2006) nutzten für die Unkrautkartierung einen ähnlichen Aufbau, der eine Monochrom-Kamera und eine IR-Kamera kombinierte. Die Reflexionen der aufgenommenen Szene werden dabei über einen Kaltlichtspiegel in zwei Strahlengänge aufgeteilt und von zwei unterschiedlichen Kameras eingefangen. Eine Kamera nimmt ein Bild im IR-Bereich auf, während die andere zeitgleich ein Bild im sichtbaren Frequenzspektrum aufnimmt. Durch die Aufnahme der unterschiedlichen Bilder aus der gleichen Perspektive werden bei genauer Positionierung der optischen Komponenten identische Bildausschnitte aufgenommen, wodurch eine pixelkongruente Umrechnung der beiden Bilder zu einem Differenzbild möglich ist. Da beide Kameras einen Monochrom-Chip nutzen und zwei begrenzte Spektralbereiche aufnehmen, wird die Kombination Bispektralkamera genannt. Die Kombination verschiedener Kameras wird seit einiger Zeit auch kommerziell von Kameraherstellern angeboten. So existiert von JAI (2012) eine Multispektralkamera, die ein einzelnes Objektiv zur Bildaufnahme und je einen CCD-Chip für den VIS- und IR-Spektralbereich besitzt. Sie ist äußerlich von einer normalen CCD-Kamera nicht zu unterscheiden und besitzt im Gegensatz zu diesen lediglich zwei Schnittstellen zur Übertragung von Daten der einzelnen CCD-Chips.

3. Problemstellung

Wie schon in der Einleitung anhand von bisherigen Entwicklungen erläutert wurde, ist das Ziel der Unkrautregulierung die vollständige Entfernung aller Pflanzen, mit Ausnahme der Nutzpflanzen, auf dem Feld. Eine typische, unbehandelte und verunkrautete Fläche ist auf der linken Seite von Bild 3.1 dargestellt. Neben den Zuckerrüben stehen diverse Unkräuter auf dem Feld. Nach der Bearbeitung sollte das Feld idealerweise wie auf der rechten Seite von Bild 3.1 aussehen.



Bild 3.1: Verunkrautetes Zuckerrübenfeld mit diversen Unkräutern (links), unkrautfreies Zuckerrübenfeld nach mechanischer Unkrautregulierung (rechts)

Die mechanische Unkrautregulierung zwischen den Reihen stellt dabei kein Problem dar, wie die Beispiele in Kapitel 1.3.4 zeigen. Der problematische Bereich liegt in der Reihe. Da eine automatisierte, mechanische Behandlung des intra-row-Bereichs eine sehr komplexe Technik voraussetzt, wird dieser Bereich je nach Kulturpflanze und Anbauverfahren bisher vor allem manuell oder nicht-selektiv behandelt. Um die Kulturpflanze zu schonen und gleichzeitig die Arbeitskosten zu senken, muss die Forschung und Entwicklung selektiv arbeitender Hack-Mechanismen für den intra-row- und close-to-crop-Bereich intensiviert werden. Dazu gehört auch die Möglichkeit, die Geräte und Werkzeuge an den Boden anzupassen (KURSTJENS 1998). Im Gegensatz zu einfachen Bodenbearbeitungsgeräten ist das Arbeitsergebnis der auf dem Markt erhältlichen mechanischen Hackgeräte vor allem von Geschick, Erfahrung und Wissen des Fahrers für den Erfolg entscheidend (BOND et al. 2003).

Ziel sollte ein sich selbst einstellendes Gerät sein, das ähnlich den modernen Mähreschern das Arbeitsergebnis kontrolliert und die Einstellungen automatisch korrigiert.

Am Institut für Landtechnik wurden von GOBOR (2007) bereits Versuche mit einer Rotationshacke durchgeführt, deren Aufbau in Kapitel 2.1.2 vorgestellt wurde. Die Versuche waren aufgrund der begrenzten Länge der Bodenrinne auf eine Geschwindigkeit von 0,2 m/s begrenzt. Daher ist ein Teilziel die Weiterentwicklung des Prinzips der Rotationshacke und die Implementierung einer echtzeitfähigen Regelung für die Positionssteuerung der Hackwerkzeuge, um auf dem Feld Fahrgeschwindigkeiten von bis zu 2 m/s zu ermöglichen.

Der Schwerpunkt der Forschungsarbeit lag in der Entwicklung einer geeigneten Pflanzenerkennung auf optischer Basis, die nicht nur unter Laborbedingungen, sondern auch auf dem Feld zuverlässig einsetzbar ist. Um eine Erkennung der Nutzpflanzen und eine nachfolgende Unkrautregulierung darzustellen, ist zunächst die Definition der geometrischen Rahmenbedingungen notwendig. In Bild 3.2 sind Nutzpflanzen einer Reihenkultur dargestellt.

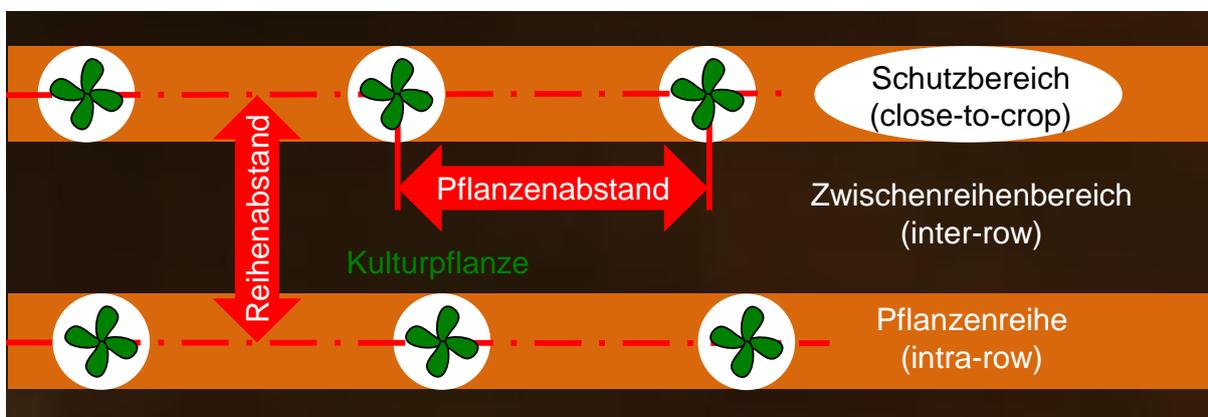


Bild 3.2: Definition der geometrischen Bereiche einer Reihenkultur

Der Zwischenreihenbereich wird nach englischer Definition als inter-row-Bereich bezeichnet. Der Bereich innerhalb der Reihe wird dementsprechend intra-row-Bereich genannt. Um die Kulturpflanze ist ein dazu konzentrischer Schutzbereich angeordnet, der nicht bearbeitet werden soll und dem Schutz der Nutzpflanze dient. Dieser sogenannte close-to-crop-Bereich und die anderen Bereiche sind virtuelle Größen, die auf dem Feld nicht zu erkennen sind. Ihre Positionen werden durch die Kulturpflanzen bestimmt und die jeweilige Größe vorher festgelegt oder vom Computer errechnet.

Bei der Erkennung der Nutzpflanzen auf dem Feld ergeben sich Probleme, die im Gewächshaus oder in Laboruntersuchungen nicht auftreten. In Bild 3.3 ist eine Auswahl dieser Probleme dargestellt. Aus unterschiedlichen Gründen können einzelne Nutzpflanzen in Ihrem Wachstum den anderen Pflanzen nachstehen oder voraus sein, so dass sie kleiner (1) oder größer (2) als der Durchschnitt sind. Neben einer abweichenden Saattiefe kann der Zustand des Saatguts oder die örtliche Versorgung mit Nährstoffen eine Rolle spielen, so dass dieses Problem nicht nur bei einzelnen Pflanzen, sondern auch bei einer Serie von aufeinanderfolgenden Pflanzen auftreten kann. Ein Phänomen, das bei Gewächshauspflanzen nur selten auftritt, ist eine Veränderung des Habitus durch Wind und andere äußere Einflüsse (3). Dies bedeutet nicht notwendigerweise eine veränderte Blattform, sondern kann auch ein verändertes Gesamtaussehen der Pflanze durch atypisch zueinander stehende Blätter bedeuten.

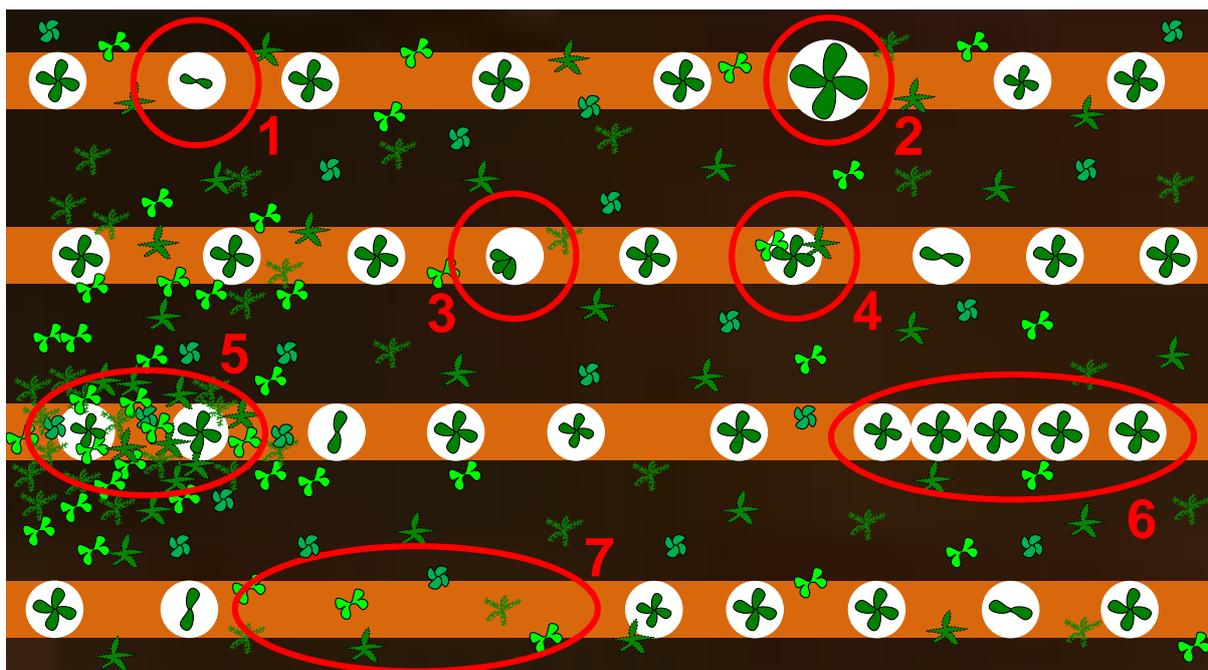


Bild 3.3: Darstellung unterschiedlicher Probleme bei der Erkennung von Nutzpflanzen in Reihenkulturen: Im Vergleich zum durchschnittlichen Entwicklungsstadium zu kleine Kulturpflanze (1), vergleichsweise große Kulturpflanze (2), durch Wind und andere äußere Einflüsse verändertes Aussehen des Blattwerkes (3), Unkräuter in der direkten Umgebung der Nutzpflanze sowie Doppelstellen (4), große Anzahl von dicht nebeneinanderstehenden Unkräutern (5), Nutzpflanzen mit zu geringem Abstand zueinander (6), Fehlstellen (7)

Eine weiteres Problem sind Unkräuter, die im close-to-crop-Bereich stehen oder deren Blätter sich mit denen der Nutzpflanze überschneiden (4). Dies trifft auch auf Doppelstellen zu, bei denen der Abstand der Nutzpflanzen zueinander auf ein Minimum reduziert ist. In Extremfällen kann das Auftreten von Unkräutern zu sogenannten Unkrautnestern führen, die wie ein grüner Teppich den Boden bedecken (5). Bei der Saat kann es als Folge von falscher Maschineneinstellung, zu hoher Geschwindigkeit oder durch Vereinzlungsfehler zu unregelmäßigen Abständen kommen. Neben Doppelstellen bzw. zu geringen Pflanzenabständen (6) können dies Fehlstellen (7) sein, bei denen eine oder mehrere Pflanzen fehlen.

Um ein Gesamtsystem darzustellen, das diese Anforderungen erfüllen kann, sind einzelne Teilaufgaben zu lösen. Zusammengefasst müssen folgende Punkte bei der Betrachtung des Gesamtsystems bearbeitet werden:

- Entwicklung und Erprobung eines zuverlässigen Kamera- und Bildverarbeitungssystems, das in der Lage ist, die Kulturpflanzen zu erkennen und ihre Position zu bestimmen
- Weiterentwicklung der von GOBOR (2007) bereits im Labor erfolgreich untersuchten Rotationshacke für den Einsatz auf dem Feld und Entwicklung einer echtzeitfähigen Regelung des Antriebssystems
- Zusammenführung von Pflanzenerkennung und Hackmechanismus zu einem Gesamtsystem, das im Online-Verfahren die Pflanzen erkennt, die Zwischenräume hackt und für die Anwendung auf dem Feld geeignet ist

Um die einzelnen Aufgaben in grundlegende Teilaspekte zu untergliedern oder das Gesamtsystem zu untersuchen, werden folgende Methodiken eingesetzt:

- Laboruntersuchungen unter definierten, wiederholbaren Umgebungsbedingungen
- Simulation zur Fehlererkennung und zum schnellen Verifizieren von Algorithmen
- Feldversuche für die Untersuchungen unter realistischen Umgebungsbedingungen

4. Material und Methoden

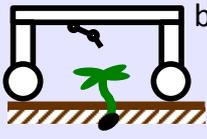
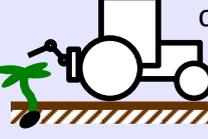
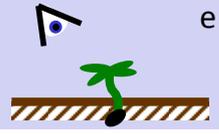
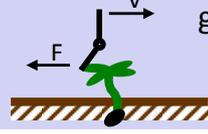
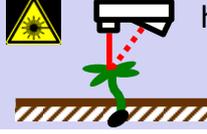
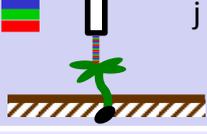
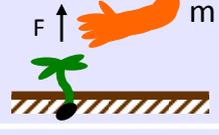
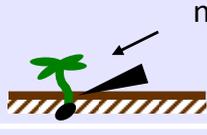
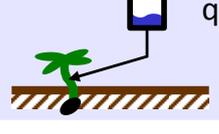
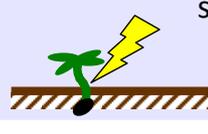
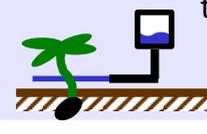
4.1 Aufbau der Versuchsträger

Um einen geeigneten Versuchsträger zu entwickeln, wurde ein morphologischer Kasten als heuristisches Hilfsmittel zur Auffindung möglicher Lösungszusammenstellungen verwendet. Um das komplexe Problem der Unkrautregulierung in Pflanzenreihen zu lösen, wurde das Gesamtsystem im morphologischen Kasten in Tabelle 4.1 in Subsysteme unterteilt. Neben einem Bewegungsapparat sind das die Pflanzendetektion und die Behandlungsmethode. Das Gesamtsystem kann nun durch die Kombination verschiedener Lösungen für die einzelnen Teilaufgaben zusammengestellt werden. So können innovative und vorher unbekannte Lösungen gefunden werden. Die aufgeführten Einzellösungen sind nur eine Auswahl möglicher Prinzipien, die sich durch ihre Größe beziehungsweise physikalische oder chemische Prinzipien voneinander unterscheiden.

Um die einzelnen Pflanzen zu erreichen, ist ein Bewegungsapparat beziehungsweise ein Fahrzeug notwendig. Dies kann ein kleines, autonomes, computergelenktes Fahrzeug (a) (Tabelle 4.1) sein, das einzelne Unkräuter gezielt ansteuert und eine Behandlung durchführt. Eine weitere Möglichkeit ist ein Portalfahrzeug (b), wie es beispielsweise im Versuchswesen eingesetzt wird. Die Bewegung erfolgt entlang einer Linie, so dass das Fahrzeug z. B. an einer Pflanzenreihe entlang geführt werden kann. Ein weiteres Fahrzeug kann ein vom Menschen bewegtes Fahrzeug (c) wie ein Traktor sein, der wie (a) zweidimensional in der Ebene bewegt werden kann. Für die Bewegung können auch Luftfahrzeuge (d) eingesetzt werden, so dass einzelne Pflanzenpositionen reihenunabhängig aus der Luft angefliegen werden können.

Vor der Unkrautbehandlung muss die Nutzpflanze oder die Unkrautpflanze detektiert werden. Eine der ältesten Methoden ist die Detektion durch das menschliche Auge (e), wie es beim manuellen Hacken geschieht. Der Erkennungsgrad hängt stark von den Fähigkeiten und der Erfahrung der Person ab. Eine weitere Detektionsmöglichkeit durch Personen ist die Detektion per Tastsinn (i). Eine Methode, die bereits zur Detektion von Pflanzenreihen verwendet wird, ist die Ultraschalldetektion (f) (ERO 2015).

Tabelle 4.1: Auszug aus einem morphologischen Kasten zur Lösungsfindung für die Aufgabe der Unkrautregulierung in Pflanzenreihen (Ausschnitt aus Tabelle 8.3 in Anhang 8.2)

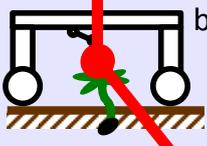
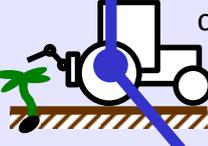
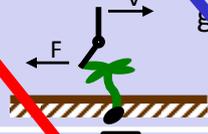
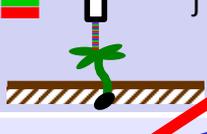
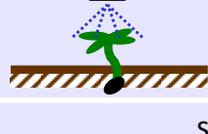
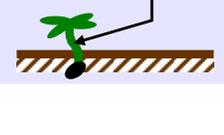
Fahrzeug	 a	 b	 c	 d
Detektion der Pflanzen	 e	 f	 g	 h
	 i	 j	 k	 l
Art der Behandlung	 m	 n	 o	 p
	 q	 r	 s	 t

Eine weitere Methode, die auch schon im Bereich der Pflanzenreihendetektion angewendet wird, ist die mechanische Abtastung (g), bei der ein Taster durch Kontakt mit einer Pflanze ausweicht und diese Bewegung registriert (WILLIAMS 1985). Zur Abstandserfassung werden in der Automationsindustrie Lasersensoren (h) eingesetzt, die auch zur Detektion von Pflanzen verwendet werden können. Neben einem Lasersensor wurde von GOBOR (2007) auch ein Farbsensor (j) zur Pflanzendetektion benutzt. Zur Erkennung von Pflanzen eignen sich auch verschiedene Arten von Kameras, die nicht alle im morphologischen Kasten aufgeführt sind. Unter anderem können Farbkameras (k) oder Spezialkameras, wie eine Multispektralkamera (l), eingesetzt werden.

Nach der Detektion folgt die Unkrautregulierung selbst. Wie zuvor die Detektion kann auch die Behandlung manuell erfolgen (m), wie es im Hobbygartenbau ausgeübt wird. Eine weitere Methode ist die mechanische Unkrautregulierung (n), die hier nur allgemein dargestellt wird, aber auch noch in schneidend, reißend oder verschttend unterteilt werden kann (KOCH 1959). Eine heute übliche Methode ist die Ausbringung von chemischen Lösungen (o) zur Bekämpfung von Unkräutern. Neben dem Besprühen ist auch ein injizieren von chemischen Mitteln (q) möglich. Ein anderes praktiziertes Verfahren ist das Abflammen

(p) (HOFFMANN 1989). Eine bisher experimentelle Methode ist die Bekämpfung mit dem Laser (r), der das Wachstumszentrum der Unkrautpflanze zerstört (GUDE 2012). Weitere experimentelle Methoden sind elektrische Verfahren (s) (BOND et al. 2003) und das Wasserstrahlschneiden (t), welches bisher z. B. zum Schneiden von organischen Materialien verwendet wurde (BRÜSER & HARMS 2005). Zusätzliche Methoden, die zum Beispiel von BOND et al. (2003) genannt werden, sind im morphologischen Kasten in Anhang 8.2 aufgeführt. Für die Versuche wurden zwei Lösungskombinationen zusammengestellt, um einen Versuchsaufbau für Laborversuche und einen Versuchsträger für Feldversuche zu erhalten (Tabelle 4.2). Neben vorhandenen Geräten wie einer Bodenrinne gab es die Vorgabe, dass die Behandlung mechanisch erfolgen soll.

Tabelle 4.2: Morphologischer Kasten mit zwei Lösungskombinationen für das Problem der Unkrautregulierung in Pflanzenreihen: Laboraufbau mit Portalaufbau, Farbkamera und mechanischer Unkrautregulierung (rot); Feldaufbau mit Traktor, Multispektralkamera und mechanischer Unkrautregulierung (blau)

Fahrzeug	 a	 b	 c	 d
Detektion der Pflanzen	 e	 f	 g	 h
	 i	 j	 k	 l
Art der Behandlung	 m	 n	 o	 p
	 q	 r	 s	 t

4.1.1 Versuchsträger für Laborversuche

Für die Laborversuche auf der Bodenrinne im Maschinenlabor des Instituts für Landtechnik (ILT) wurde ein Portalgerüst auf Schienen (b) (Tabelle 4.2) eingesetzt, so dass daran angebaute Sensoren und Aktuatoren parallel zur Bodenrinne geführt werden konnten (Bild 4.1). Die Höhe der Anbaugeräte kann per Spindel stufenlos verstellt werden. Das Portalgerüst wird durch einen Elektromotor mit stufenlosem Getriebe angetrieben, so dass eine Antriebsgeschwindigkeit von 0–0,2 km/h eingestellt werden kann. Die Geschwindigkeit wird über einen Inkrementalgeber erfasst. Das Portalgerüst, der sogenannte Schlitten, simuliert das Fahrzeug, das auf dem Feld entlang der Pflanzenreihen fahren würde.

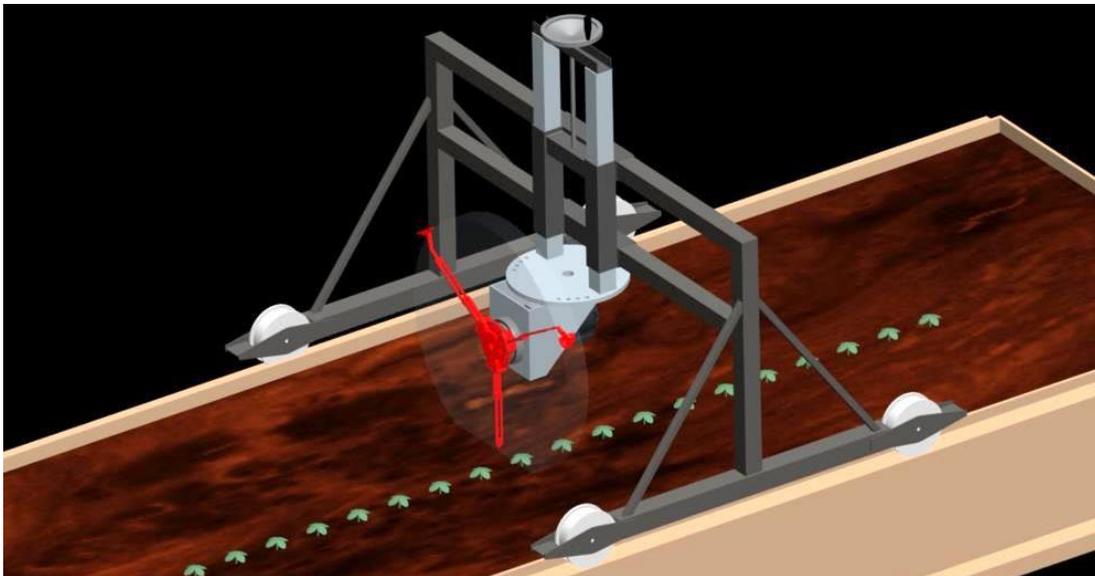


Bild 4.1: CAD-Modell der Bodenrinne mit Pflanzennachbildungen und einem beweglichen Portalgerüst mit Anbaugerät

Die Bodenrinne ist 9 m lang und in 3 Abschnitte mit unterschiedlichen Bodenarten unterteilt. Der erste Abschnitt ist mit Sandboden gefüllt, der zu 56,9 % aus Sand, zu 34,5 % aus Schluff und zu 8,6 % aus Ton besteht. Der zweite Abschnitt wurde mit einem schluffigen Boden gefüllt, der zu 10,7 % aus Sand, zu 71,8 % aus Schluff und zu 17,5 % aus Ton besteht. Der dritte Abschnitt wurde mit einem lehmigen Boden gefüllt, der zu 16,1 % aus Sand, zu 52,6 % aus Schluff und zu 45,6 % aus Ton besteht.

Für die Versuche wurden neben Topfpflanzen vor allem Kunststoffnachbildungen von Pflanzen, sogenannte Pflanzendummys, eingesetzt. Diese garantieren bei Versuchen eine bessere Wiederholbarkeit.

Für die Versuche mit Unkrautregulierungsmaßnahmen wurde ein Schrittmotor mit einem Hackstern am Schlitten montiert. Die Anzahl, Länge und Anordnung der Arme konnte dabei genauso wie die Ausrichtung der Motorachse variiert werden. Für die Erkennungsversuche wurden unterschiedliche Sensoren eingesetzt. Neben einfachen RGB-Farbsensoren und Laser-Distanzsensoren aus Vorversuchen wurden auch verschiedene Kamerasysteme und Sensorkombinationen verwendet. Ein Großteil der Versuche wurde mit einfachen Farbkameras durchgeführt und entspricht somit der rot markierten Lösungskombination aus Tabelle 4.2. Der schematische Aufbau ist in Bild 4.2 dargestellt.

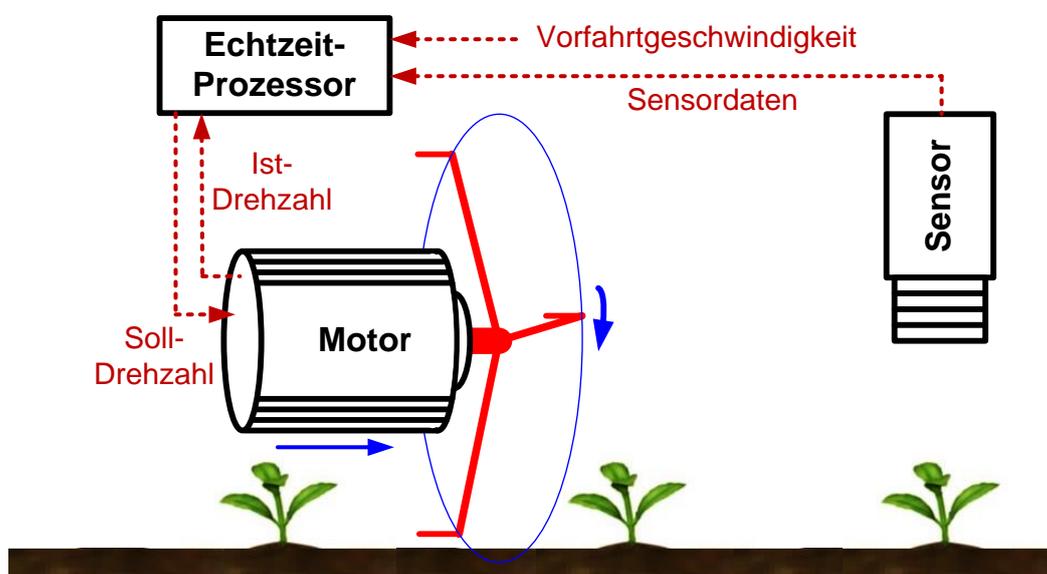


Bild 4.2: Schema des Versuchsaufbaus zur Darstellung des Zusammenhangs zwischen sensorischer Pflanzenerkennung und mechanischem Eingriff. Als Bindeglied der Datenverarbeitungskette zwischen Sensoren und Servomotor verarbeitet ein Echtzeit-Prozessor die Eingangsdaten zu einem Ausgangssignal zur Ansteuerung der Aktorik

Der Sensor sendet Rohdaten an einen Prozessor. Im Fall der eingesetzten Kameras sind das Bilddaten der aufgenommenen Boden- und Pflanzenoberfläche. Der Aufbau der Bilderfassung ist in Bild 4.3 dargestellt. Um geeignete Bilddaten zu erzeugen, ist eine Beleuchtung neben der Kamera installiert. Zusätzlich werden die Positionsdaten des Schlittens vom Inkrementalgeber an den Prozessor gesendet. Aus diesen Informationen wird die Pflanzenposition mithilfe einer Software vom Prozessor errechnet. Nach der Berechnung der Pflanzenposition wird in Verbindung mit der Ist-Position der Hackwerkzeuge eine Soll-Position vom Prozessor errechnet. Die Ist-Position wird durch einen Encoder im Schrittmotor erfasst. Aus den einzelnen Soll-Positionen wird eine Trajektorie errechnet, deren Stützstellen

dem Motor als Soll-Positionen vorgegeben werden. Somit entsteht ein geschlossener Regelkreis, der Änderungen der einzelnen Eingangsgrößen und der Regelgröße laufend ausgleicht. Die rotierenden Werkzeuge werden dann so gesteuert, dass sie an definierten Positionen zwischen den Kulturpflanzen oder Pflanzendummys den Boden durchkämmen.



Bild 4.3: Bilderfassung mit einer CCD-Kamera auf der Bodenrinne (links); Aufnahmeperspektive der Kamera mit Pflanzendummy im Bildausschnitt (rechts)

4.1.2 Versuchsträger für Feldversuche

Für die Feldversuche wurde ein Anbaugerät für einen Traktor entwickelt (Tabelle 4.2 c). Der Aufbau ist in Bild 4.4 dargestellt und bestand aus einem Traktor, einem Stromaggregat im Frontanbau und dem angebauten Versuchsträger.

Der Versuchsträger selbst besteht aus einem Standardrahmen für Bodenbearbeitungs- und Sätechnik. Daran ist ein Gehäuse für Kameras, Beleuchtung und andere Sensorik befestigt. Ein Schaltschrank schützt die Servoumrichter, die Beleuchtungssteuerung sowie die Mess- und Regelungstechnik, die aus einem Echtzeit-Controller und einem Notebook bestehen. Das Hackaggregat ist über ein Parallelogramm mit dem Rahmen verbunden und wird über einstellbare Tasträder in der Höhe geführt. Der Hackmechanismus des Versuchsträgers ist mit dem Laboraufbau identisch. Um die Position in der Reihe bestimmen zu können, wurde ein inkrementeller Drehgeber (Anhang 8.3.3) mit dem Stützrad verbunden, welches deshalb im Folgenden als Encoderrad bezeichnet wird. Die Übersetzung zwischen Rad und Drehgeber erlaubt eine Auflösung der Ortsbestimmung von 0,1 mm.

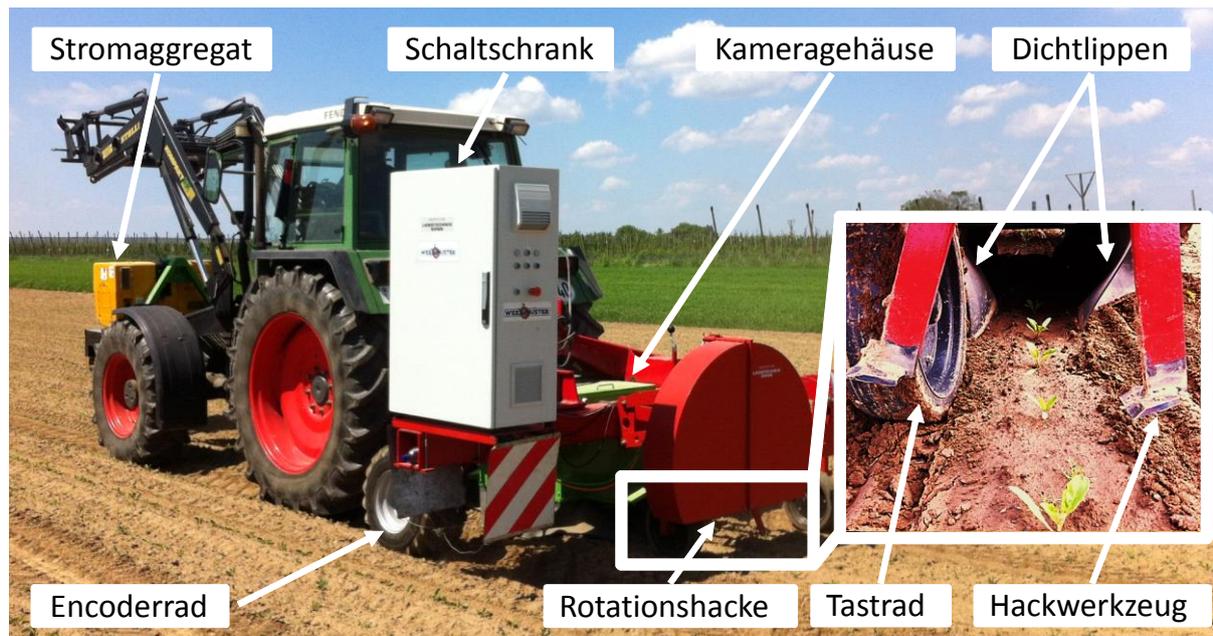


Bild 4.4: An einem Traktor angebauter Versuchsträger mit einer Rotationshacke, einem Gehäuse für Kamera und Beleuchtung, einem Schaltschrank zur geschützten Unterbringung der Controller, der Servoumrichter und den weiteren elektronischen Komponenten

4.1.2.1 Stromversorgung des Gesamtsystems

Bei Parallelbetrieb von zwei Servomotoren, der Sensorik, Messcomputer, Controller, Beleuchtung und der restlichen Elektronik sind bis zu 8 kW elektrische Leistungen notwendig. Da diese Leistung derzeit bis auf einige Versuchsmaschinen (Hoy et al. 2014) von keinem Standardtraktor zur Verfügung gestellt werden kann, wurde ein Stromaggregat im Frontanbau (Bild 4.4 sowie Anhang 8.3.5) eingesetzt. Die Servomotoren wurden über einen 400 V-Anschluss mit der benötigten Leistung versorgt. Die weiteren elektrischen Verbraucher erhielten ihre Leistung über einen 230 V-Anschluss. Die am 230 V-Anschluss vorgeschaltete, unterbrechungsfreie Stromversorgung (USV) schützte die Messtechnik bei einem Ausfall oder Störungen des Generators, indem für eine begrenzte Zeit (mind. 15 Minuten) Strom für ein geregeltes Herunterfahren der Controller zur Verfügung gestellt werden konnte. Neben dem Schutz der Hardware diente dies dem sicheren und verlustfreien Abspeichern der Daten.

4.1.2.2 Systemkommunikation und Informationsverarbeitung

Eine wesentliche Änderung gegenüber dem stationären Aufbau auf der Bodenrinne ist die konsequente Nutzung Ethernet-basierter Kommunikationsstandards aus der Industrie (Bild 4.5). So kommunizieren der Benutzer-PC (Notebook), die Kamera und der CompactRIO-

Echtzeitrechner über ein Gigabit-Ethernet-Protokoll (GigE). Dies erlaubt eine hohe Datenrate bei gleichzeitiger Echtzeitfähigkeit, die z. B. eine USB-Verbindung nicht ermöglicht. Die Ansteuerung der Servomotoren erfolgt ebenfalls über ein Ethernet-basiertes Protokoll. Der aus der Automationsindustrie stammende EtherCAT-Standard gestattet nicht nur die echtzeitfähige Weitergabe der Befehle an den Servoumrichter, sondern bietet aufgrund der hohen Datentransferrate auch eine sehr hohe Abtastrate des Motorencoders, so dass die Winkelposition bei einer interpolierten Auflösung von 2.621.440 Signalen pro Umdrehung auch ausreichend schnell ausgelesen werden kann.

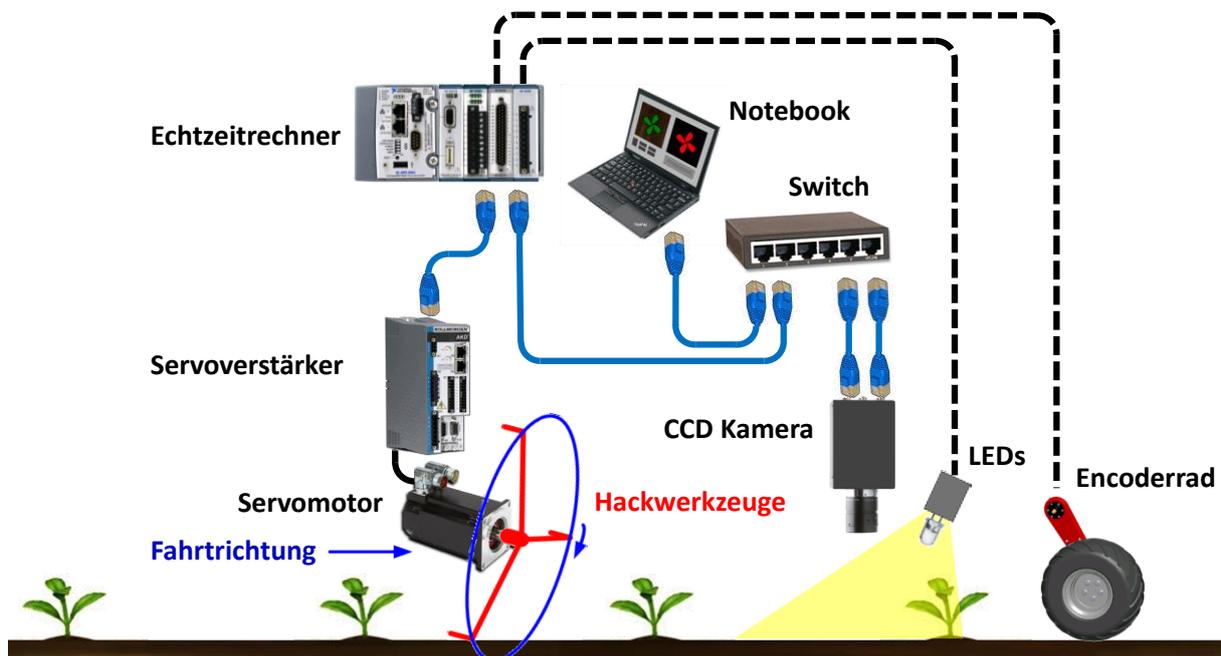


Bild 4.5: Ethernet-basierte Bus-Kommunikation zwischen den Hauptbaugruppen des traktorgebundenen Versuchsträgers. Als Bindeglied zwischen Sensoren und Servomotor verarbeitet ein Echtzeit-Prozessor die Eingangsdaten zu einem Ausgangssignal zur Ansteuerung des Motors

Der zentrale Computer, an dem die zeitkritischen Informationen zusammenlaufen, ist ein CompactRIO-Echtzeitrechner (Anhang 8.3.4). Unterprogramme, die eine hohe Verarbeitungsgeschwindigkeit benötigen und parallele Prozesse aufweisen, werden auf einem deterministischen FPGA (engl.: Field Programmable Gate Array; im Anwendungsfeld programmierbarer integrierter Schaltkreis) ausgeführt. Alle weiteren Echtzeit-Programme laufen auf dem integrierten Echtzeitprozessor.

Neben der Anbindung an ein Ethernet-Netzwerk sind diverse Module, u. a. ein Modul mit digitalen Ein-/Ausgängen, integriert. Als digitales Eingangssignal wird die Positionsänderung des Encoderrades eingelesen. Durch das Auslesen von phasenverschobenen Rechtecksignalen über zwei getrennte Eingänge kann neben Positionsänderungen auch die Bewegungsrichtung erkannt werden. Ein digitales Ausgangssignal wird zur Triggerung der Kamera und der LED-Beleuchtung erzeugt. Bei jedem Trigger-Signal wird ein Bild aufgenommen und per GigE-Protokoll an das Notebook zur weiteren Auswertung gesendet. Dies geschieht bei Einsatz einer Multispektralkamera simultan bei beiden CCD-Sensoren.

Die Berechnung der Pflanzenpositionen geschieht auf dem Notebook, die Ergebnisse werden danach über das Netzwerk zurück an den cRIO-Controller gesendet. Neben den Pflanzenpositionen und der Vorfahrt-Position des Versuchsträgers benötigt der Prozessor die Ist-Position des Servomotors, um in einem geschlossenen Regelkreis die Soll-Position für den Motor zu berechnen. Die so in Rotation versetzten Hackwerkzeuge durchdringen dann bei korrekter Berechnung den Boden zwischen den Kulturpflanzen. Dafür werden Ist- und Soll-Positionen über EtherCAT mit dem Servoverstärker ausgetauscht.

4.1.2.3 Antrieb und Regelung der Rotationshacke

Der Rotor mit den Hackwerkzeugen wird von einem Servomotor (Anhang 8.3.6) mit einem max. Drehmoment von 29,7 Nm angetrieben, dessen 22 bit Multiturn-Encoder als Absolutwertgeber jederzeit eine exakte Bestimmung der Rotor-Winkelposition ermöglicht. Zur Ansteuerung benötigt der Motor eine Leistungselektronik, einen sogenannten Servoverstärker. Dieser wandelt das leistungsschwache Referenzsignal (Soll-Position/-Geschwindigkeit/-Beschleunigung) des Echtzeit-Controllers in ein leistungsstarkes frequenz- und amplitudenmoduliertes Signal für den Servomotor um.

Bei der Ansteuerung der Servomotoren ergeben sich aus den Umgebungsbedingungen zwei Möglichkeiten: Die Regelung über einen Geschwindigkeits- oder über einen Positionsregelkreis. Um eine möglichst hohe Dynamik mit einem geringen Schleppfehler zu erreichen, werden in diesem Fall beide Regelkreise verwendet (Bild 4.6), deren Regler-Kennwerte in Anhang 8.4.1 hinterlegt sind. Die blauen Kästen markieren die Elemente der geschlossenen Regelkreise, die von den äußeren Einflüssen (grün) beeinflusst werden und auf den mechanischen Hackmechanismus (rot) einwirken.

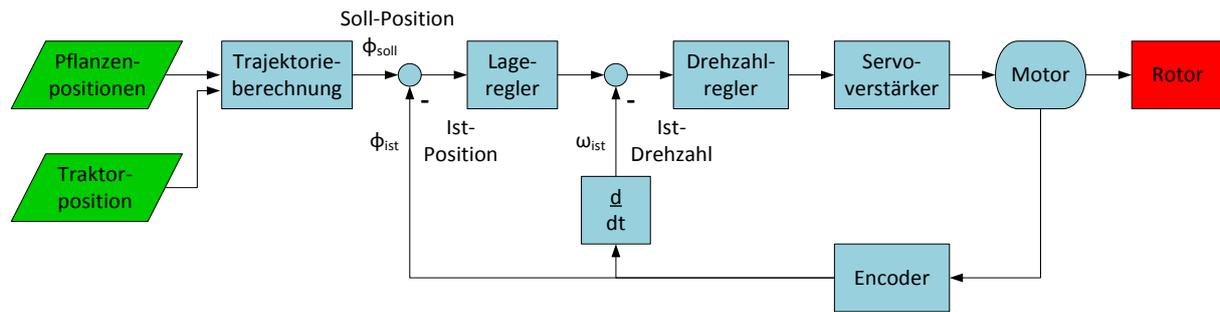


Bild 4.6: Vereinfachte Darstellung der Motorregelkreise

Aus den Eingangsgrößen Traktorposition und Pflanzenpositionen wird auf dem FPGA eine Trajektorie für ein Werkzeug berechnet, so dass eine Soll-Position des Motorwinkels an den Regelkreis weitergegeben werden kann. So wirken sich Änderungen der Führungsgrößen Traktorposition und Pflanzenpositionen auf den Regelkreis aus und erzeugen eine Regelabweichung, die von der Lage- und Drehzahlregelung ausgeglichen werden muss.

Weitere fest definierte Parameter, die hier einwirken, sind eine vorgegebene maximale Drehzahl ω_{\max} , die maximale Beschleunigung α_{\max} und die Ableitung der Beschleunigung, der sogenannte maximale Ruck ζ_{\max} . Diese Maximalwerte werden u. a. zum Schutz des Motors sowie der angeschlossenen Mechanik verwendet. In erster Instanz werden diese Maximalwerte bereits bei der Berechnung der Trajektorie berücksichtigt, so dass ruckfreie und gleichmäßige Drehzahländerungen des Servomotors erreicht werden.

Das errechnete Referenzsignal wird zur Ansteuerung des Motors an den Servoverstärker weitergegeben. Durch das wechselnde Lastmoment und die Massenträgheit des Hackrotors wird das Anfahren der Soll-Position gestört. Diese Störung wird durch den im Motor integrierten Encoder erfasst, indem die Position φ_{ist} des Rotors laufend an die Motorregelung zurückgeführt und von der Soll-Position φ_{soll} subtrahiert wird. Die so errechnete Regelabweichung durchläuft erneut den Lageregler, so dass ein geschlossener Regelkreis entsteht. Zusätzlich wird in der Regelung eine Ableitung des Soll-Wertes φ_{soll} gebildet, die Ist-Drehzahl ω_{ist} (Gl. 4-1). Diese wird mit der Soll-Drehzahl ω_{soll} verglichen und vervollständigt somit den zweiten Regelkreis.

$$\omega(t) = \frac{d\varphi}{dt} \quad (4-1)$$

Die Trajektorie wird vom FPGA aus den Führungsgrößen Traktorposition und Pflanzenpositionen errechnet. Die Programmierung des FPGA wurde mithilfe von LabVIEW erstellt und vor dem Einsatz durch einen Compiler in eine Konfiguration übersetzt und auf den FPGA übertragen. Die Programmierung mit LabVIEW erlaubte dabei eine funktionsorientierte Herangehensweise, die sich an den Herausforderungen der Motorsteuerung und nicht der FPGA-Programmierung orientierte.

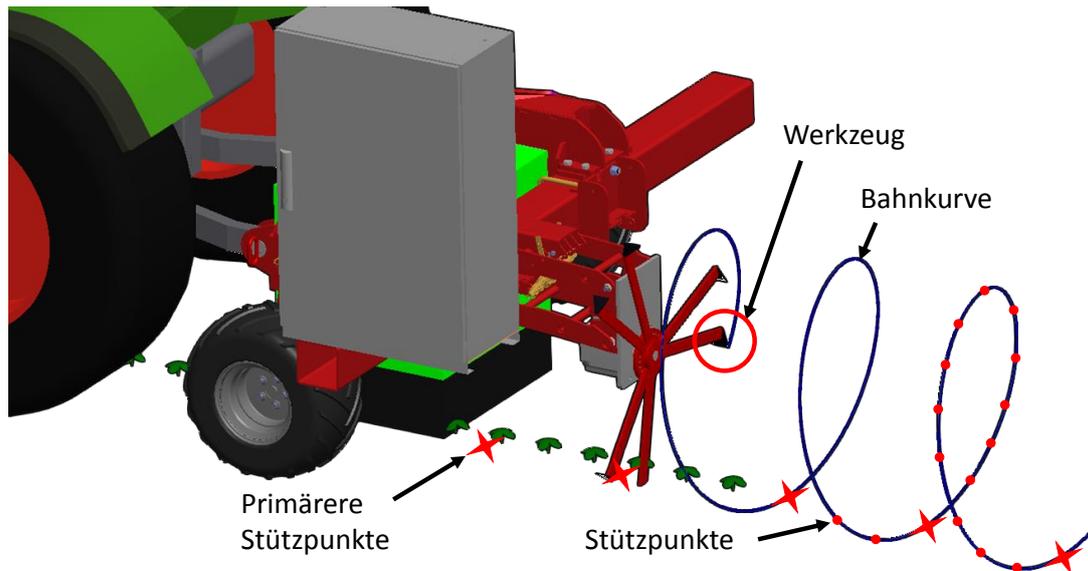


Bild 4.7: Trajektorie eines einzelnen Werkzeugs der Rotationshacke bei Überlagerung der translatorischen Bewegung des Traktors und der Rotationsbewegung der Hackwerkzeuge

Im ersten Schritt werden aus der Traktorposition und den Pflanzenpositionen primäre Stützpunkte (Bild 4.7) errechnet, die die Position markieren, an denen ein Werkzeug die Pflanzenreihe schneiden soll. Um diese Positionen anzufahren und den Boden nahezu orthogonal zur Reihe zu durchschneiden, wird eine Bahnkurve errechnet, die von einzelnen Stützpunkten gebildet wird. Die Bahnsegmente zwischen den Stützpunkten werden jeweils einzeln unter Berücksichtigung des vorangegangenen und des folgenden Segmentes berechnet. In Bild 4.8 ist das Anfahren eines neuen Stützpunktes und damit einer neuen Winkelposition φ dargestellt. Bei einer vorgegebenen maximalen Winkelbeschleunigung α_{\max} steigt die Winkelgeschwindigkeit ω im ersten Bewegungsabschnitt langsam an und erreicht dann die maximale Winkelgeschwindigkeit ω_{\max} . Die Bewegung wird im zweiten Abschnitt für einen der Zielposition entsprechenden Zeitraum bis zum dritten Bewegungsabschnitt fortgesetzt. Da für das Abbremsen auch die maximale Winkelbeschleunigung α_{\max} gilt, wird die Winkelgeschwindigkeit ω vor Erreichen der Endposition reduziert und fällt bei Erreichen der

Endposition auf die Zielgeschwindigkeit ab. Falls der Rotor vor dem Bahnsegment zum Zeitpunkt $t=0$ bereits rotierte, ist die Winkelgeschwindigkeit ω entgegen der Abbildung ungleich null, die Verläufe ändern sich jedoch nicht. Das gleiche gilt für das Ende der Trapezbewegung, wenn die Zielgeschwindigkeit ω ungleich null ist. Beide Annahmen gelten in der Regel für die Bewegung der Rotationshacke, da der Rotor nicht an den Stützpunkten anhält, sondern lediglich seine Drehzahl ändert. Falls die Winkeländerung so kurz ist, dass die maximale Winkelgeschwindigkeit ω_{\max} nicht erreicht werden kann, erscheint das Geschwindigkeitsprofil dreieckig anstatt trapezförmig.

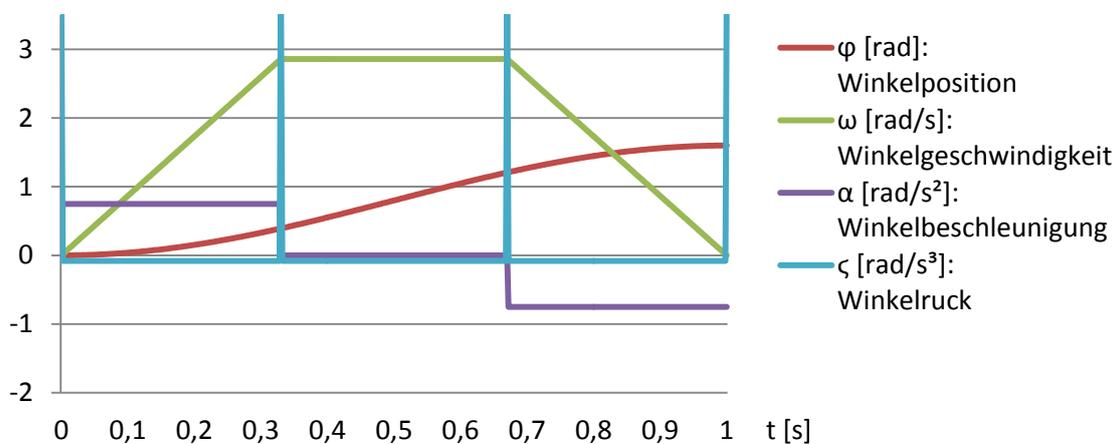


Bild 4.8: Bewegungsprofil mit unetstetiger Beschleunigungsfunktion und theoretisch unendlich hohem Winkelruck an den Unetstetigkeitsstellen

Ist die Funktion der Winkelposition φ noch stetig und differenzierbar, so ist die Winkelgeschwindigkeit ω bereits bei $t=0$, $t=0,33$ s, $t=0,66$ s und $t=1$ s nicht differenzierbar. An diesen Stellen weist die Winkelbeschleunigung α als Ableitung der Winkelgeschwindigkeit nach Gl. 4-2 Unetstigkeiten auf. Daraus resultiert nach Gl. 4-3 als Ableitung der Beschleunigung nach der Zeit ein theoretisch unendlich hoher Winkelruck ζ , der auch in Bild 4.8 an den Unetstetigkeitsstellen als Peak erkennbar ist.

$$\alpha(t) = \frac{d\omega}{dt} = \frac{d^2\varphi}{dt^2} \quad (4-2)$$

$$\zeta(t) = \frac{d\alpha}{dt} = \frac{d^2\omega}{dt^2} = \frac{d^3\varphi}{dt^3} \quad (4-3)$$

Der Winkelruck ζ entspricht der umgangssprachlichen Bedeutung des Rucks. So entsteht der Ruck durch abrupte Änderungen der Beschleunigung und ist akustisch sowie durch

entstehende Schwingungen wahrnehmbar. Da diese Schwingungen und Geräusche nicht nur störend sind, sondern im Dauerbetrieb auch zu Schäden an der Maschine führen können, wurde die Regelung diesbezüglich optimiert. Die Ansteuerung der einzelnen Stützpunkte wird über einen Spline-Algorithmus berechnet, der neben den reinen Positionen auch die maximale Winkelgeschwindigkeit, die maximale Winkelbeschleunigung und den maximalen Winkelruck berücksichtigt. Als Ergebnis eines solchen Algorithmus sind die optimierten kinematischen Größen aus Bild 4.8 in Bild 4.9 dargestellt.

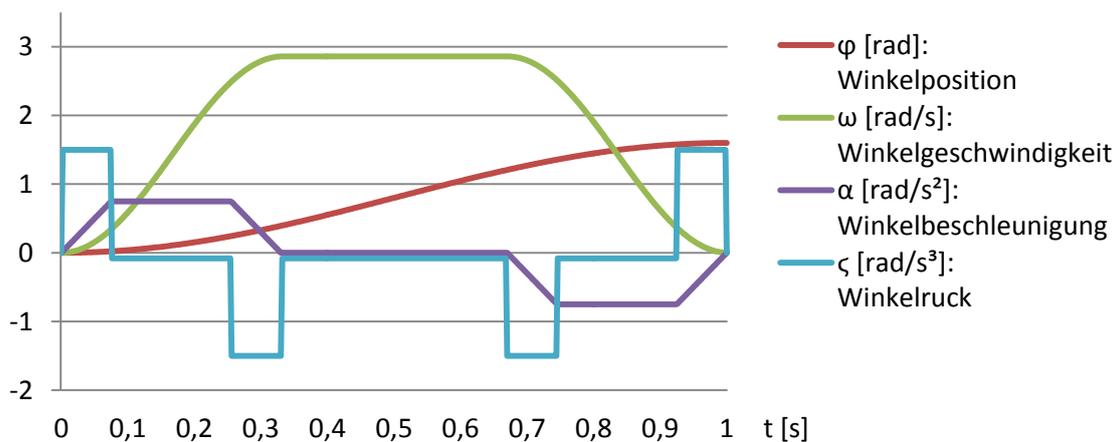


Bild 4.9: Bewegungsprofil mit Berücksichtigung des Winkelrucks und einer Rampenfunktion der Beschleunigung

Der Kurvenverlauf der Winkelposition ϕ hat sich kaum verändert. Jedoch führte die Begrenzung des Winkelrucks ζ zu einer stetigen Winkelbeschleunigung α und einer stetig differenzierbaren Winkelgeschwindigkeit ω . Dies war durch einen ruhigeren Lauf bei Drehzahländerungen zu erkennen.

4.1.2.4 Beleuchtung

Als Grundvoraussetzung für die Aufnahme von Bildern mit einer CCD-Kamera muss eine ausreichende Helligkeit vorhanden sein. Um unabhängig von Sonnenstand und Umgebungslicht Bilder aufnehmen zu können, wurde ein System aus festen Lichtquellen in einem Kameragehäuse aufgebaut (Bild 4.4 und Bild 4.10). Dichtlippen aus flexiblem Kunststoff stellten sicher, dass zwischen den unteren Gehäuserändern und dem Boden möglichst wenig Licht von außen in das Gehäuseinnere eindringen konnte. Dadurch war eine reproduzierbare Beleuchtungssituation herstellbar, die als Grundlage für eine kontrastreiche Visualisierung der Pflanzenmerkmale diente.

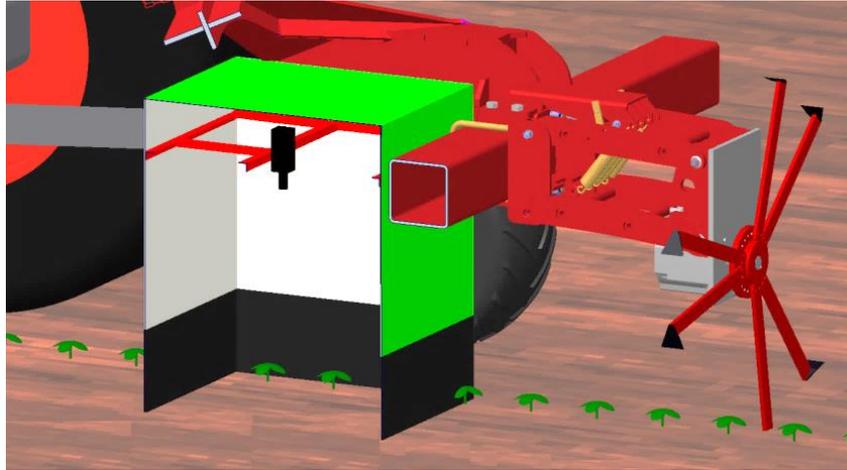


Bild 4.10: Schnittansicht der Rotationshacke mit Innenansicht des Kameragehäuses für die Aufnahme von Bildern der Pflanzenreihe

Um eine Beleuchtung mit hohem energetischen Wirkungsgrad einzusetzen, wurden ausschließlich LEDs eingesetzt. Weitere Vorteile, die auch im speziellen für die mobile Anwendung eine Rolle spielen, sind die hohe Lebensdauer von bis zu 50.000 h, mechanische Robustheit und die geringe Wärmeabstrahlung (STEMMER 2013). Da neben einer Farbkamera auch eine Infrarotkamera oder als Kombination dieser Spektralbereiche eine Multispektralkamera eingesetzt wurde, musste die Beleuchtung Wellenlängen im sichtbaren und im NIR-Bereich erzeugen. Da LEDs ein schmales Wellenlängenband erzeugen, wurden zwei Arten eingesetzt. Für den NIR-Bereich waren dies monochromatische LEDs mit einem Intensitätsspek bei 850 nm (Anhang 8.3.1.3) und für den sichtbaren Bereich weiße LEDs mit einem aufgefächerten Frequenzband (Anhang 8.3.1.2).

Um bei geringem Bauraum eine ausreichende Leuchtstärke zu erzielen, wurde neben den Hochleistungs-LEDs mit hohem Wirkungsgrad ein Strobe Controller (dt.: Blitz-Beleuchtungsregler) zur Spannungsversorgung der LEDs verwendet. Ein Strobe Controller versorgt die LEDs nur im Moment der Bildaufnahme mit elektrischem Strom, so dass markante stroboskopartige Lichtblitze erzeugt werden. Die Pausen zwischen den Lichtblitzen, in denen die LEDs abkühlen können, erlauben ein gezieltes Übersteuern der LEDs. Das heißt, die LEDs werden durch kurzes Schalten hoher Leistung mit mehr als der maximalen Stromstärke versorgt, um eine höhere Intensität zu erreichen. Am Versuchsträger wurde das Fünffache der maximalen Stromstärke eingestellt. Die Zeitpunkte der Lichtblitze wurden durch ein elektrisches Trigger-Signal definiert, welches auch zur Ansteuerung der Kameras diente.

Die Dauer einer Beleuchtungsphase entspricht der Belichtungszeit. Die Belichtungszeit ist das Zeitfenster für die Aufnahme eines Bildes, während dessen Photonen auf den CCD-Sensor auftreffen. Je länger dieser Zeitraum ist, desto heller wird das Bild. Allerdings tritt auch ein Rauschen und eine durch die relative Bewegung der Kamera zum Boden ausgelöste Bewegungsunschärfe auf (STEMMER 2013). Um eine maximale Belichtungszeit für ein scharfes Bild zu errechnen, darf sich das Objekt während der Belichtung des Sensors maximal um einen Bildpixel bewegen. Bei bekannter maximaler Vorfahrtgeschwindigkeit und Kamera-Boden-Distanz ist die maximale Belichtungszeit anhand der folgenden Formeln 4-4 und 4-5 zu errechnen. Zuerst wird anhand der folgenden Formel das Verhältnis $i_{\text{Pixel/mm}}$ von Pixeln auf dem Bild zu der äquivalenten Distanz in mm auf dem Boden errechnet:

$$i_{\text{Pixel/mm}} = \frac{M}{(1,1 * f_{\text{Ersatz}}) - 39} \quad (4-4)$$

Dazu wird die Anzahl der horizontalen Pixel M (parallel zur Fahrtrichtung) des aufgenommenen Bildes und als Ersatz für die Brennweite f eine Ersatzbrennweite f_{Ersatz} eingesetzt, die über die Messung der Distanz zwischen Boden und Kameragehäuse einfacher zu messen ist. Die Formel gilt nur für die vorwiegend eingesetzte Multispektralkamera (Anhang 8.3.2.3) und unverändertem Bildwinkel und musste bei anderen Kameras geändert werden. Die maximale Belichtungszeit $t_{\text{Belichtung}}$ kann anhand der folgenden Formel aus dem zuvor berechneten Verhältnis $i_{\text{Pixel/mm}}$ und der maximalen Vorfahrtgeschwindigkeit v_{max} errechnet werden:

$$t_{\text{Belichtung}} = \frac{1}{i_{\text{Pixel/mm}} * v_{\text{max}}} \quad (4-5)$$

4.2 Kameratechnik, Bildverarbeitung und Datenauswertung

Neben verschiedenen Arten von Kameraaufbauten wurden auch Farbsensoren und Laser-Abstandssensoren zu Vergleichszwecken eingesetzt. Da der Aufbau mit diesen Sensoren in der Arbeit von GOBOR (2007) umfassend beschrieben wurde, soll an dieser Stelle darauf verzichtet werden und in erster Linie die Pflanzenerkennung mit Kamerasystemen betrachtet werden.

Die von einer Kamera aufgenommenen Bilder erzeugen eine große Datenmenge, aus der die einfache Information des Nutzpflanzenstandortes extrahiert werden muss. Die dafür entwickelten Algorithmen orientieren sich an verschiedenen Faktoren. Allein die Farbe reicht oft nicht aus, da die Grüntöne der Nutzpflanzen denen der Unkräuter ähneln und zusätzlich je nach Wassergehalt, Entwicklungsstadium und Lichtverhältnis variieren. Bild 4.11 zeigt in der Mitte die Blattform einer Zuckerrübe im Zweiblattstadium und als Vergleich die Silhouetten der konkurrierenden Unkräuter. Für das Auge des geübten Betrachters ist eine Unterscheidung einfach, für den Computer ist dies im ersten Moment nur eine Ansammlung von Pixeln unterschiedlicher Farbe.

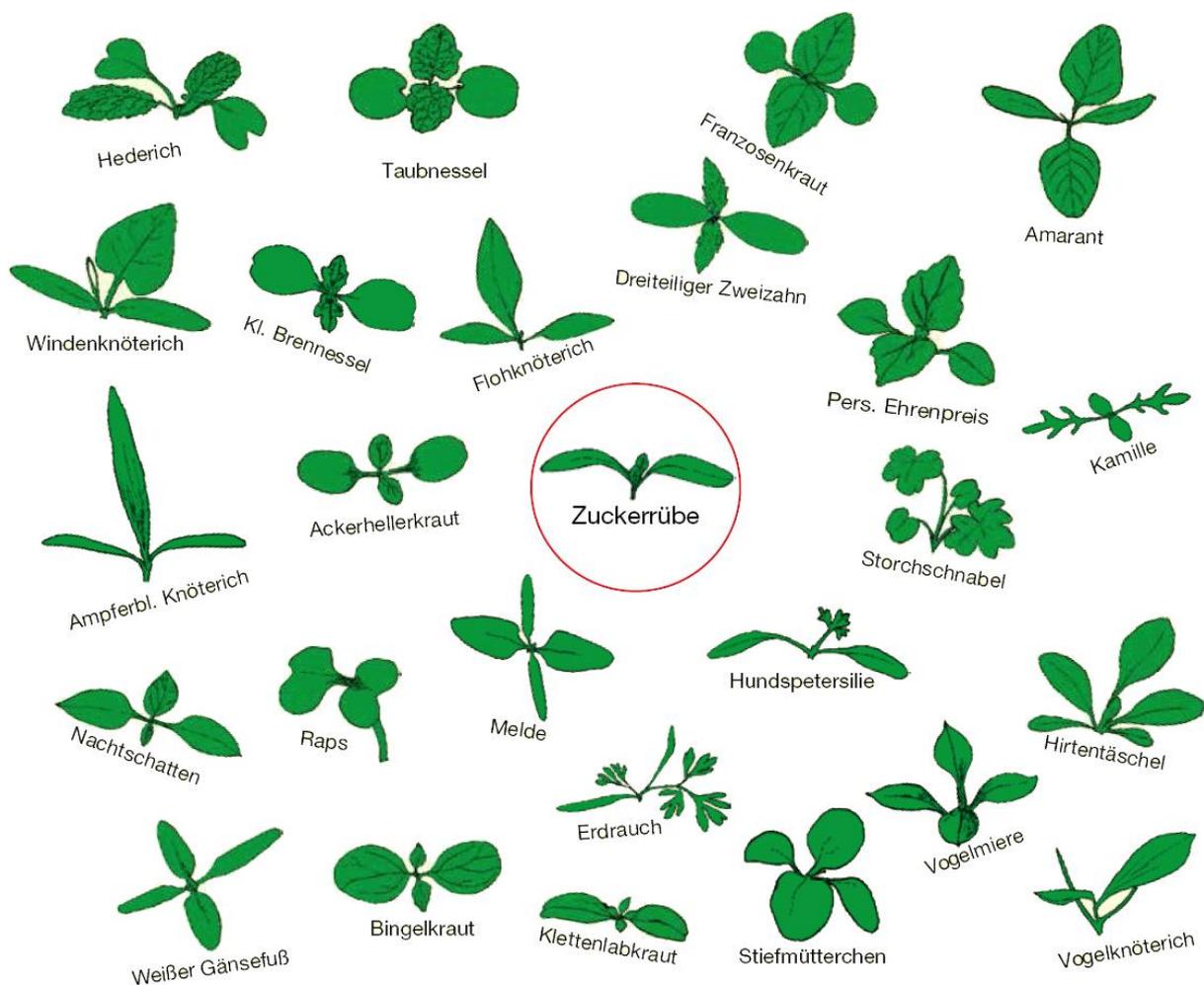


Bild 4.11: Typische Unkräuter und eine Zuckerrübe im Zweiblattstadium in der Ansicht von oben. Die vor dem weißen Hintergrund klar zu erkennende Silhouette ist eines der Hauptmerkmale im Zuge der Bilderkennung (LIZ 2014)

Die Methoden zur Pflanzenerkennung hängen von der Art des aufgenommenen Bildes ab und werden jeweils in den Kapiteln 4.2.3 bis 4.2.6 erläutert. Als Programmierumgebung wurde das Programm LabVIEW eingesetzt, das zusätzlich auch für die Signalerfassung und Motorregelung verwendet wurde. Um dem Benutzer die Eingabe von Parametern und die Überwachung der Bildverarbeitung zu ermöglichen, wurde eine Benutzeroberfläche erzeugt (Bild 4.12). Hier kann die Quelle der Pflanzenerkennung gewählt und Daten zu der Pflanzengattung sowie zu Umgebungsbedingungen (A) eingegeben werden. Zusätzlich werden Originalbilder der Kameras (B) und verarbeitete Bilder (C) als Zwischenstufe der Bildverarbeitung angezeigt. Auf einem Originalbild werden zusätzlich Fadenkreuze an den errechneten Pflanzenpositionen (D) eingefügt, die eine Kontrolle durch den Bediener erleichtern.

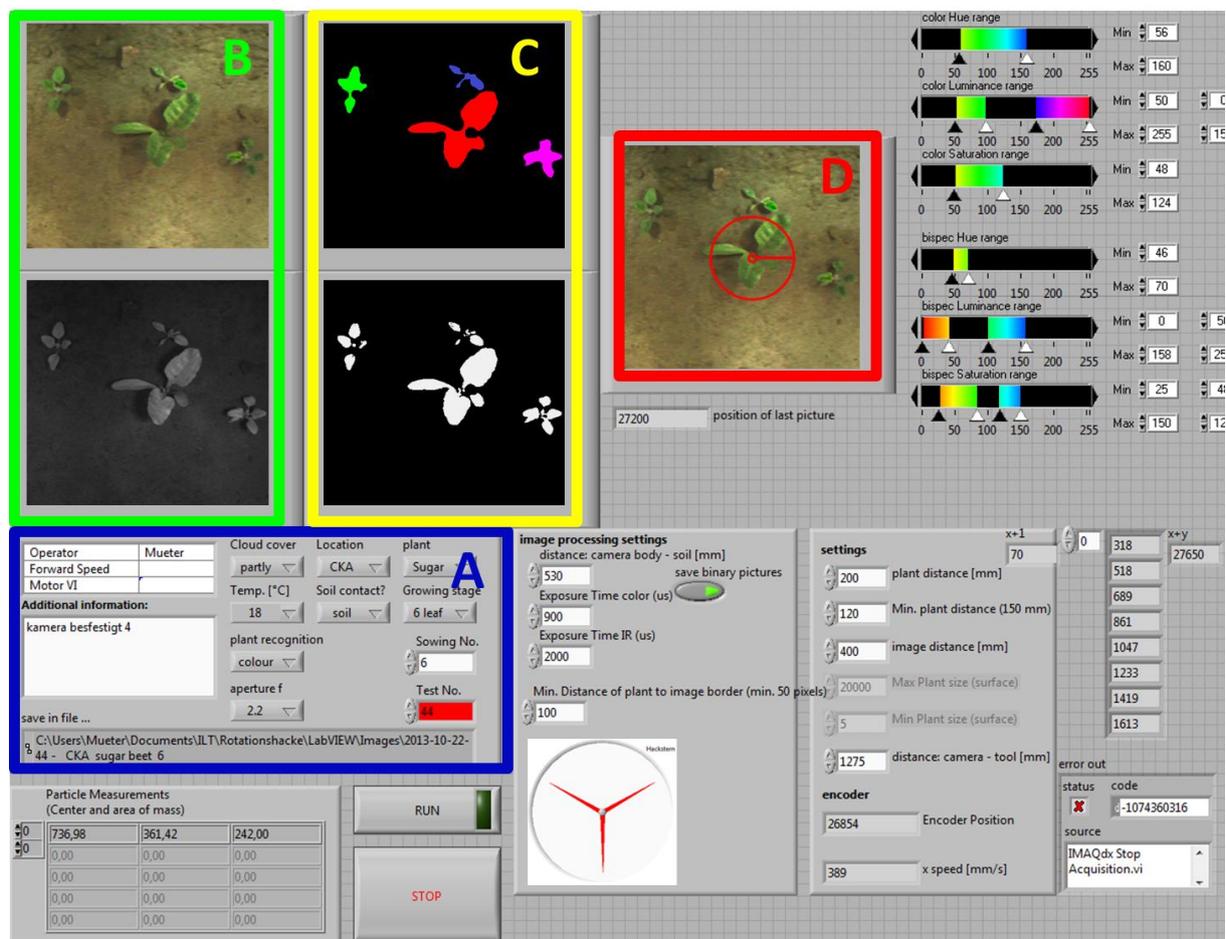


Bild 4.12: Für die Rotationshacke entwickelte LabVIEW Benutzeroberfläche mit Einstellmöglichkeiten und aktuellen Werten (Bilder) aus der Bildverarbeitung und der Motorsteuerung (Werkzeugposition)

4.2.1 Bildaufnahme

Der Aufnahmezeitpunkt der Bilder wird von einem Encoder am Stützrad vorgegeben (Bild 4.4 und Bild 4.5), so dass je nach Einstellung in einem fest definierten Abstand Bilder aufgenommen werden (Bild 4. 13). Da jedes Bild einzeln verarbeitet wird, muss sichergestellt werden, dass jede Pflanze mindestens auf einem Bild vollständig dargestellt wird.

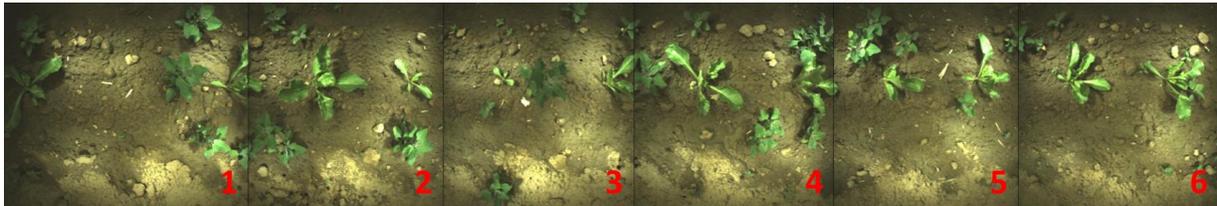


Bild 4. 13: Aufnahmeserie von 6 Farbbildern entlang einer Pflanzenreihe.

Deshalb wurde je nach Entwicklungsstadium und Pflanzengattung eine feste Überlappungsfläche eingestellt, deren Breite mindestens dem maximalen Pflanzendurchmesser, bezogen auf das Blattwerk, entsprach (Bild 4.14). Die Aufnahme der Bilder wurde sowohl bei der Farb-, als auch bei der NIR-, Multispektral- und Stereokamera auf diese Weise durchgeführt. Die Verarbeitung der Bilder unterscheidet sich jedoch und wird deshalb in den folgenden Kapiteln einzeln beschrieben.

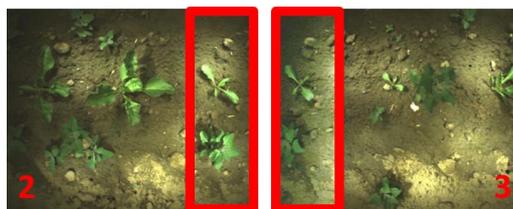


Bild 4.14: Überlappung der Aufnahmefläche hintereinander aufgenommener Farbbilder

4.2.2 Farbkamera

Für die Versuche wurden CCD-Farbkameras und eine Multispektralkamera im Farbmodus eingesetzt. Nach der Bildaufnahme durch die Kamera durchlaufen die Bilder in LabVIEW verschiedene Bildverarbeitungsschritte. Zuerst werden die Farbinformationen genutzt, um ein Binärbild zu erzeugen, in dem sich die Pflanzen vom Boden abgrenzen lassen. In Bild 4.15 ist die Umwandlung mit dem Schwellwertverfahren dargestellt. Mit Hilfe des HSL-Farbraummodells werden den einzelnen Bildpunkten des RGB-Bildes jeweils Farbton H

(engl.: Hue), Farbsättigung S (engl.: Saturation) und relative Helligkeit L (engl.: Lightness) zugewiesen. Dazu werden die RGB-Werte des Farbbildes mit den Formeln nach KLINGER (2003) in HSL-Werte umgerechnet. Die Formeln wurden so verändert, dass die Werte wie die RGB-Werte zwischen 0 und 255 liegen. Mit Gl. 4-6 wird der Farbton H (engl.: Hue) berechnet.

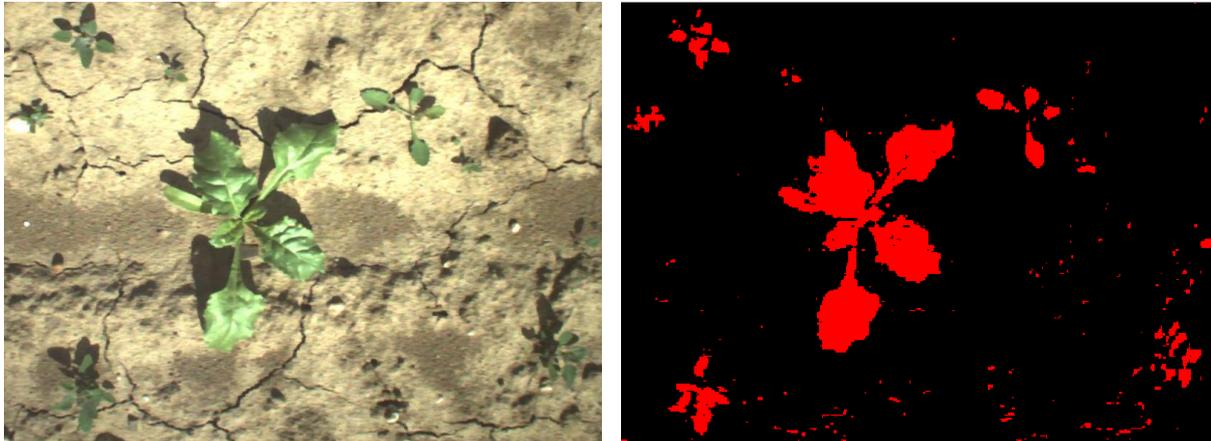


Bild 4.15: Segmentierung (rechts) des Farbbildes (links) durch das Schwellwertverfahren

$$H = \begin{cases} 0 & \text{falls } R = B = G \\ \cos^{-1} \left[\frac{\frac{1}{2}[(R - G) + (R - B)]}{\sqrt{(R - G)^2 + (R - B)(G - B)}} \right] & \text{falls } B > G \end{cases} \quad (4-6)$$

Zur Berechnung der Farbsättigung S (engl.: Saturation) wird die Formel 4-7 eingesetzt.

$$S = \begin{cases} 0 & \text{falls } R = B = G = 0 \\ 255 * \left[1 - \frac{3}{R + G + B} [\min (R, G, B)] \right] & \text{falls } R, G, B \neq 0 \end{cases} \quad (4-7)$$

Die Berechnung der relativen Helligkeit L (engl.: Lightness) erfolgt mithilfe der Formel 4-8.

$$L = 0,299 * R + 0,587 * G + 0,114 * B \quad (4-8)$$

Für den Fall undefinierbarer Werte werden die Ergebnisse der Formeln mit Null angegeben. Durch das Festlegen von minimalen und maximalen Schwellwerten der H-, S- und L-Werte können Farben herausgefiltert werden, in diesem Fall die Grüntöne der Nutzpflanzen (Bild 4.15). Liegt der H-, S- oder L-Wert jeweils zwischen den minimalen und maximalen Schwellwerten $t_{H \min}$, $t_{H \max}$, $t_{S \min}$, $t_{S \max}$, $t_{L \min}$ und $t_{L \max}$, wird das Pixel in Bezug auf die Farbe den Nutzpflanzen zugeordnet. Die Zuordnung zu den Segmenten 0 und 1 (Pflanze mit nutzpflanzenähnlichem Grün) findet nach folgender Berechnungsvorschrift 4-9 statt:

$$G_{HSL}^* = T_{HSL}(H, S, L) = \begin{cases} 0 & \text{falls } (H < t_{H \min} \vee H > t_{H \max}) \\ & \vee (S < t_{S \min} \vee S > t_{S \max}) \\ & \vee (L < t_{L \min} \vee L > t_{L \max}) \\ 1 & \text{falls } (t_{H \min} \leq H \leq t_{H \max}) \\ & \wedge (t_{S \min} \leq S \leq t_{S \max}) \\ & \wedge (t_{L \min} \leq L \leq t_{L \max}) \end{cases} \quad (4-9)$$

Der einfache Vergleich, ob der H-, S- und L-Wert unter oder oberhalb des Schwellwertes liegt, reicht für die Berechnung des Ergebniswertes G_{HSL}^* aus. Dabei wird Pixel für Pixel berechnet und die jeweilige Umgebung des Pixels außer Acht gelassen, weshalb T_{HSL} auch als Punktoperator bezeichnet wird. Da die Berechnung unabhängig von den umgebenden Pixeln durchgeführt wird, entstehen keine zwangsläufig zusammenhängenden Segmente. Die Größe zusammenhängender Flächen wird in erster Linie durch die Wahl des Schwellwertes beeinflusst.

In dem errechneten Bild sind sowohl Nutzpflanzen als auch Unkräuter sowie diverse Fragmente zu erkennen, die als nächstes herausgefiltert werden. Die schnelle Fourier-Transformation FFT (engl.: fast Fourier transform) ermöglicht eine Tiefpass-Filterung, durch die kleinere Fragmente herausgefiltert und die Konturen der verbliebenen Objekte geglättet werden (Bild 4.16). Diese Einstellung muss dem Entwicklungsstadium angepasst werden, da es ansonsten zu starken Konturenveränderungen bis hin zur Zersetzung einzelner Objekte kommen kann. Bei zu geringer Filterwirkung bleiben störende Fragmente sowie Defekte innerhalb der Objekte, die eine weitere Bearbeitung ebenfalls erschweren.

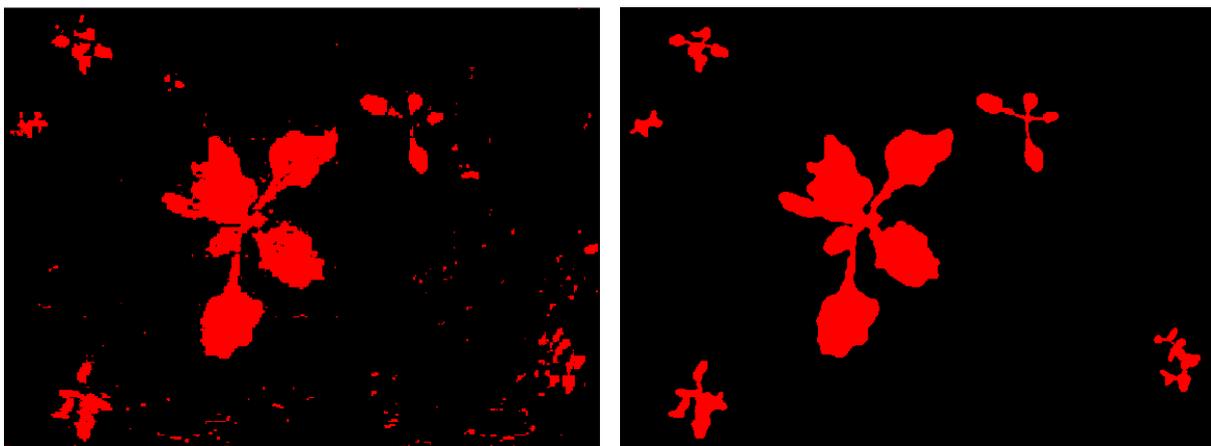


Bild 4.16: Bild vor Bearbeitung (links); Ergebnis einer schnellen Fourier-Transformation FFT zur Filterung des Binärbildes (Entfernen kleiner Partikel und Randglättung größerer Partikelcluster) (rechts)

In dem bearbeiteten Bild sind mehrere Objekte erkennbar, die vom Computer als Pflanze angesehen werden. Um nun die Pflanzen voneinander zu unterscheiden, würden in der industriellen Bildverarbeitung die Objekte mit Beispielobjekten aus einer Datenbank verglichen. Da es sich hier nicht um präzise gefertigte Bauteile wie Zahnräder handelt, deren Kontur unverändert bleibt, ist der Aufwand deutlich höher. So entscheiden Wind, Sonne, Wasser, Nährstoffgehalt des Bodens und Pflanzensorte über das Wachstum und die Ausrichtung der Blätter. Eine Möglichkeit wäre eine Datenbank mit tausenden Beispielkonturen der Nutzpflanze, so dass die Objekte auf den Bildern mit der Datenbank abgeglichen werden können. Die dazu benötigte Rechenleistung stand bei den Versuchen allerdings nicht mobil zur Verfügung, so dass ein anderer Weg beschritten wurde.

Als erstes wird die Größe der Objekte mit einem Minimal- und Maximalwert abgeglichen, so dass zu kleine oder große Pflanzen gelöscht werden (Bild 4.17). Im zweiten Schritt wird die Objektform untersucht. Über Formfaktoren werden filigrane Objekte wie z. B. Gräser erkannt und entfernt.

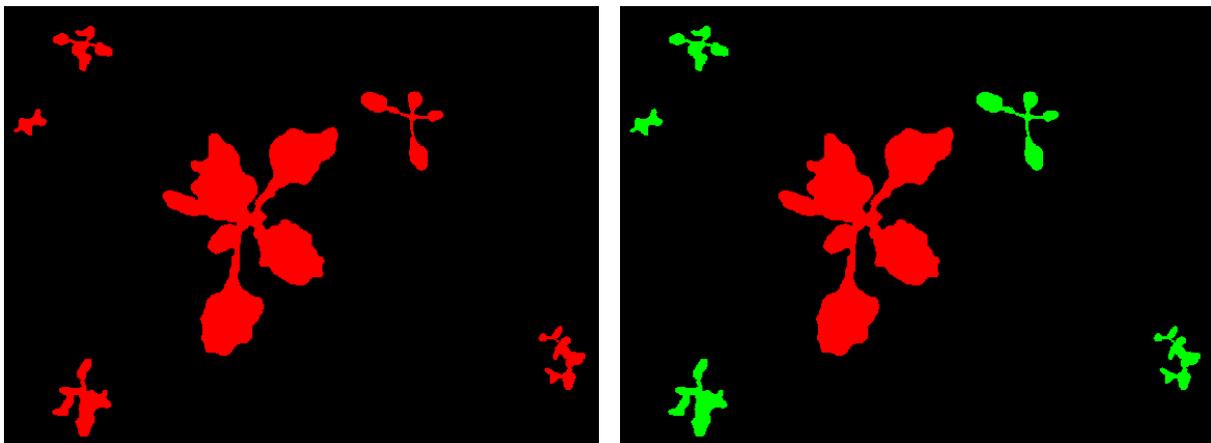


Bild 4.17: Pflanzenunterscheidung und Markierung anhand von Größe und Form

Die verbliebenen Pflanzenpositionen werden im letzten Schritt einer statistischen Untersuchung unterzogen. Dabei wird untersucht, welche der erkannten Pflanzen aus statistischen Gründen nicht als Nutzpflanze in Frage kommen. Hierbei spielen der von der Einzelkornsämaschine vorgegebene Soll-Abstand zwischen den Pflanzen sowie die seitliche Abweichung von der statistisch errechneten Pflanzenreihe eine Rolle. So ist in Pflanzenreihe A der Bild 4.18 ein idealer Pflanzenabstand zu sehen, in dem alle Pflanzen vom Computer als Nutzpflanze erkannt werden.

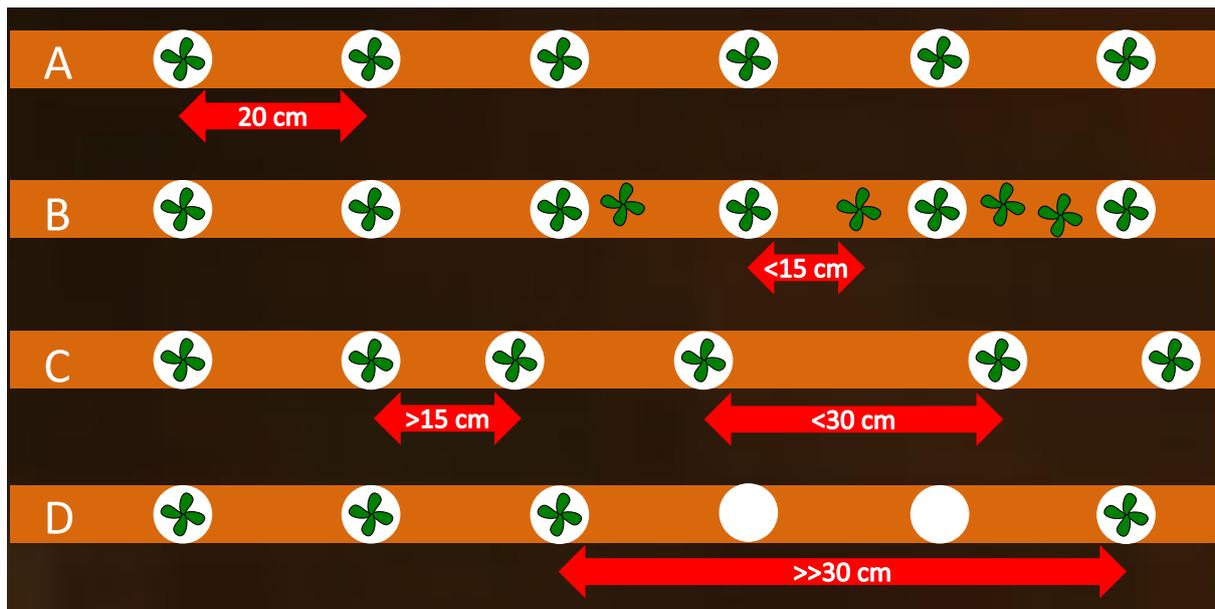


Bild 4.18: Mögliche Konstellationen der Pflanzenabstände innerhalb der Pflanzenreihe: Idealabstand (Reihe A), Doppelstellen (Reihe B), Pflanzenabstände im Toleranzband zwischen Fehl- und Doppelstellen (C), Fehlstellen (Reihe D)

Die weißen, kreisrunden Flächen markieren die statistisch akzeptierten Nutzpflanzen. Passt eine Pflanze nicht in das statistische Schema, wird sie nicht akzeptiert, wie das Beispiel in Reihe B (Bild 4.18) zeigt. Kleinere Abweichungen von der Statistik wie in Reihe C werden akzeptiert. Wird keine Pflanze auf dem Bild erkannt, werden wie in Reihe D künstliche Pflanzenpositionen erzeugt, an denen sich statistisch gesehen eine Nutzpflanze befinden muss. Alle Pflanzenpositionen, die jetzt noch in Frage kommen, werden markiert (Bild 4.19) und in einer Datenbank abgespeichert.

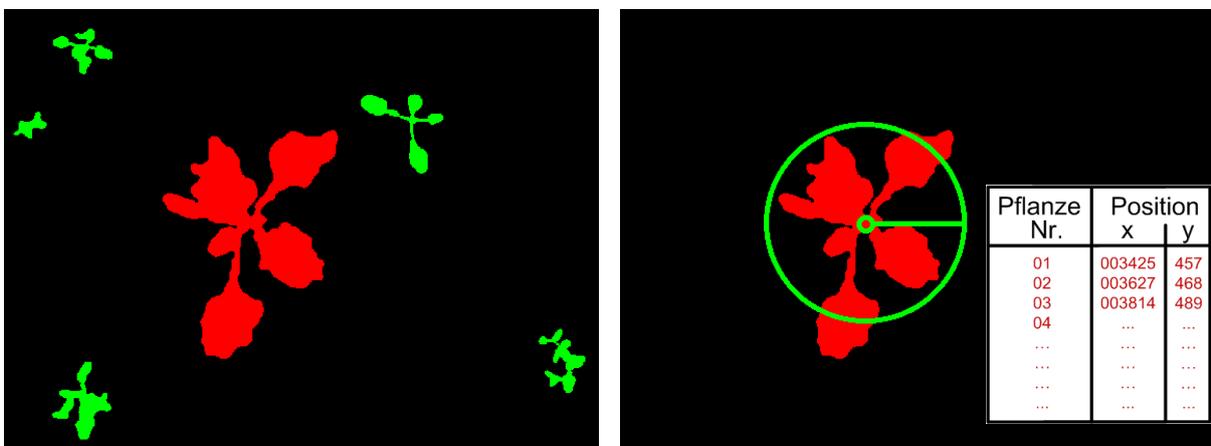


Bild 4.19: Erkennung und Speicherung der Nutzpflanzenpositionen

4.2.3 Infrarotkamera

Für die Aufnahme von Infrarotbildern wurde der Infrarot-CCD-Chip der Multispektralkamera im Single-Betrieb (Kapitel 4.2.4 bzw. Anhang 8.3.2.3) eingesetzt. Das Nahinfrarotbild eignet sich besonders zur Erkennung von Pflanzen, da diese durch das enthaltene Chlorophyll eine hohe Reflexionsfähigkeit in diesem Spektralbereich aufweisen. Wie bei Farbbildern wird zunächst eine Segmentierung mit dem Schwellwertverfahren durchgeführt. Bei den NIR-Bildern müssen die Bildverarbeitungsalgorithmen nur die Helligkeit zwischen den einzelnen Bildpunkten unterscheiden, so dass ein Schwellwert t_{NIR} (engl.: threshold) ausreicht. Der Schwellwert kann durch die Betrachtung verschiedener Bildausschnitte der IR-Bilder bestimmt werden.

In Bild 4.20 sind die NIR-Bilder von Zuckerrüben dargestellt. Auf der linken Seite ist das Histogramm des Gesamtbildes (grün umrandet) mit den Pflanzen und dem großflächigen Erdboden eingeblendet. Auf der x-Achse sind die Grauwerte G_{NIR} von 0 bis 255 dargestellt. Ein höherer Grauwert ist mit einer größeren Helligkeit verbunden. Auf der y-Achse wird die Anzahl der Pixel mit dem jeweiligen Grauwert dargestellt. Das Histogramm weist zwei Peaks auf. Der größte Peak liegt bei einem Grauwert von $G_{\text{NIR}} = 40$ und der kleinere bei $G_{\text{NIR}} = 95$.

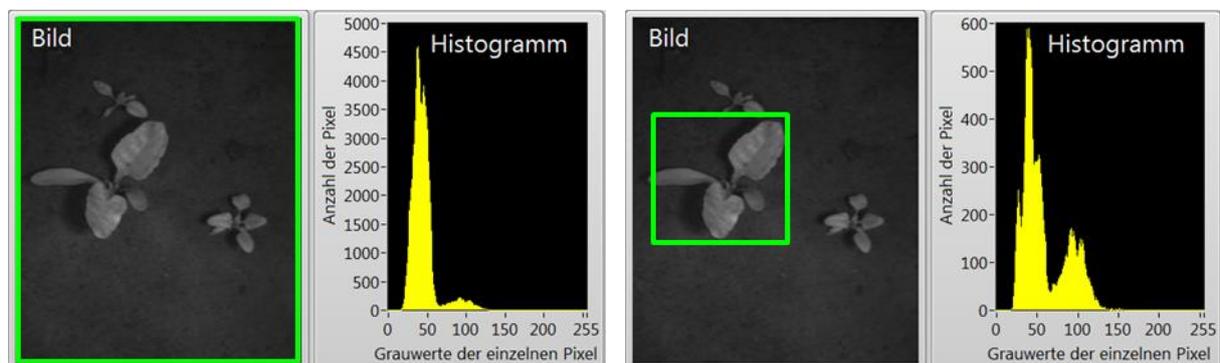


Bild 4.20: Histogramm eines IR-Bildes mit einem hohen Bodenoberflächenanteil (links); Histogramm eines IR-Bildausschnitts (grün umrandet) mit einem hohen Pflanzenanteil (rechts)

Auf der rechten Seite von Bild 4.20 wird nur ein Ausschnitt des Bildes (grün umrandet) betrachtet, bei dem der Anteil des Erdbodens gegenüber dem Blattanteil geringer ist. Das dazugehörige Histogramm weist bei den gleichen Grauwerten zwei Peaks auf. Das Verhältnis der Peakhöhen zueinander ist jedoch ausgeglichener. Der rechte Peak steht dementsprechend für die hellen Pixel der Blattflächen, die in dem Bildausschnitt einen

größeren Anteil einnehmen als im Gesamtbild. Als Schwellwert t_{NIR} wurde dementsprechend ein Grauwert im lokalen Minimum zwischen den Peaks gewählt. Mithilfe des Schwellwertes findet nach folgender Berechnungsvorschrift eine Zuordnung zu den Segmenten 0 und 1 statt:

$$G_{NIR}^* = T_{NIR}(G_{NIR}) = \begin{cases} 0 & \text{falls } G_{NIR} < t_{NIR} \\ 1 & \text{falls } G_{NIR} \geq t_{NIR} \end{cases} \quad (4-10)$$

Der einfache Vergleich, ob der Grauwert unter- oder oberhalb des Schwellwertes liegt, reicht für die Berechnung des Ergebniswertes G_{NIR}^* aus. Dabei wird, wie beim Schwellwertverfahren für Farbbilder (Kapitel 4.2.2), Pixel für Pixel berechnet und die jeweilige Umgebung des Pixels nicht in die Berechnung miteinbezogen. Dementsprechend ist der Rechenaufwand relativ gering und mit den noch folgenden Verfahren nicht zu vergleichen. Der zugehörige Punktoperator heißt T_{NIR} .

Die Anwendung des Schwellwertverfahrens ist in Bild 4.21 dargestellt. Auf der linken Seite ist das aufgenommene NIR-Bild dargestellt. Auf der rechten Seite ist das durch das Schwellwertverfahren errechnete Binärbild mit rot hervorgehobenen Pflanzen dargestellt. Nach der Segmentierung werden die gleichen Algorithmen wie bei der Farbkamera verwendet, da mit dem Binärbild ein technisch gleiches Zwischenergebnis vorliegt.

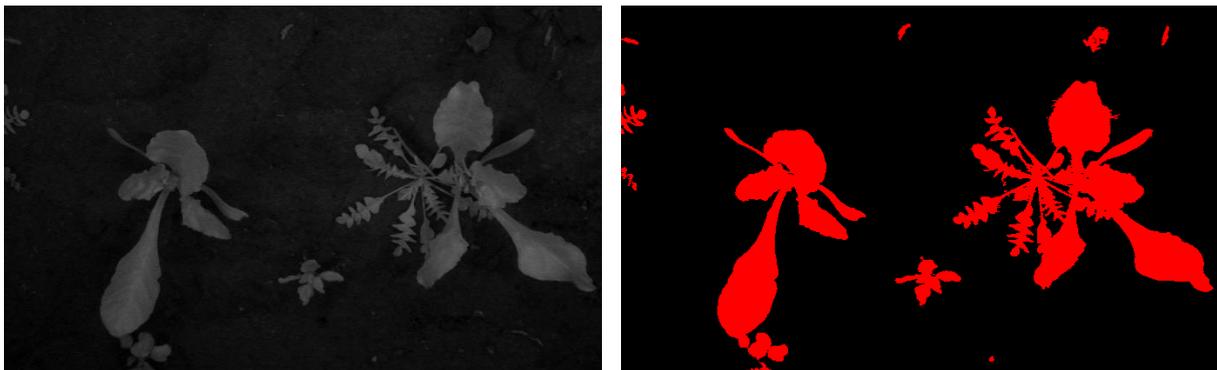


Bild 4.21: Infrarotaufnahme (links) mit dem über das Schwellwertverfahren errechneten Binärbild (rechts)

4.2.4 Multispektralkamera

Die verwendete Multispektralkamera (2-CCD-Kamera) (Anhang 8.3.2.3) nimmt neben einem Farbbild ein Bild im Nahinfrarotspektrum (NIRS) auf. Im Gegensatz zu der Aufnahme mit zwei verschiedenen Kameras werden die zwei Bilder zeitgleich durch ein Objektiv aufgenommen, so dass auf den Bildern identische Bildausschnitte zu sehen sind. Die Positionen der aufgenommenen Objekte/Pflanzen sind somit deckungsgleich.

Bild 4.22 zeigt vereinfacht den inneren Aufbau der eingesetzten Multispektralkamera (Anhang 8.3.2.3). Das von den Objekten reflektierte Licht wird durch das Objektiv auf ein dichroitisches Prisma gelenkt. Dieses teilt den Lichtstrahl in Nahinfrarotlicht und sichtbares Licht auf. Das sichtbare Licht fällt direkt auf einen BAYER Farb-CCD-Chip, der das digitale Farbbild erzeugt.

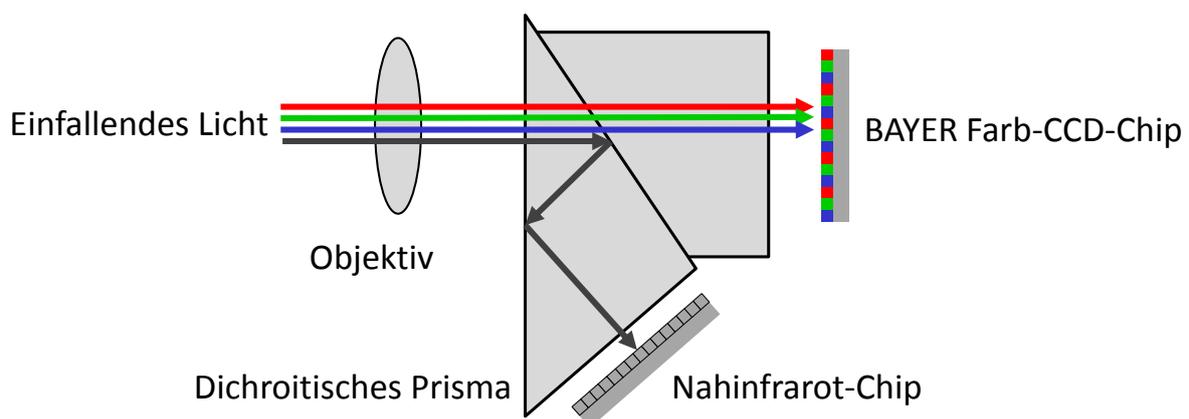


Bild 4.22: Strahlengang im Inneren einer Multispektralkamera

Die Infrarotstrahlung wird an einem dichroitischen Spiegel reflektiert und auf einen monochromen Bildsensor gelenkt. Dieser Nahinfrarot-Chip erzeugt das digitale Nahinfrarotbild. Bild 4.23 zeigt die spektrale Empfindlichkeit der Pixel auf den Kamerachips in Abhängigkeit von der Wellenlänge der auf den Chip treffenden elektromagnetischen Strahlung. Im linken Bereich sind der für den Menschen sichtbare Bereich des elektromagnetischen Spektrums und die Empfindlichkeit der drei RGB-Farben des BAYER-Farb-CCD-Chips abgebildet. Im rechten Teil ist das für den Menschen unsichtbare Nahinfrarotspektrum, welches zwischen 780 nm und 1400 nm liegt (DIN 5031-7), und die Empfindlichkeit des Nahinfrarotchips, der seine maximale Empfindlichkeit bei 800 nm aufweist, dargestellt.

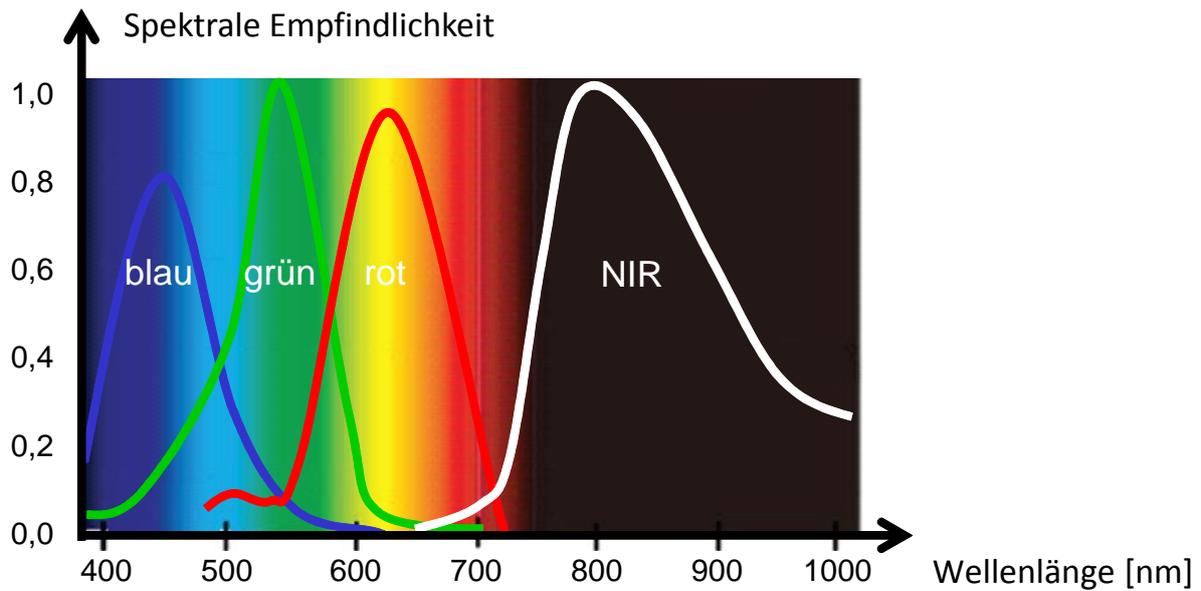


Bild 4.23: Spektrale Empfindlichkeit vom RGB- und NIR-CCD-Sensor der Multispektralkamera (JAI 2012)

In Bild 4.24 sind die erzeugten Bilder der beiden Sensoren dargestellt. Die jeweiligen Vorteile der beiden Bildaufnahmemethoden wurden in Kapitel 2.2.5 sowie in den beiden vorangegangenen Kapiteln 4.2.2 und 4.2.3 erläutert. Bei der Überlagerung der Bilder ist es möglich, die Informationen und Vorteile beider Aufnahmen zu nutzen. So leuchten Steine, Kunststoffe oder Pflanzenreste wie z. B. Stroh auf NIR-Bildern genauso hell auf wie Pflanzen, sind aber auf den Farbbildern leicht zu unterscheiden. Umgekehrt sind die Konturen der Pflanzen auf den NIR-Bildern häufig besser zu extrahieren. Im Folgenden werden die einzelnen Schritte der Bildverarbeitung erläutert. Grundlage sind die aufgenommen Rohbilder aus Bild 4.24.



Bild 4.24: Farb- (links) und Nahinfrarotbild (rechts) von Zuckerrüben, aufgenommen mit einer Multispektralkamera

4.2.4.1 Erkennung der Pflanzen unabhängig von ihrer Gattung

Im ersten Schritt wird das NIR-Bild über eine Binarisierung von einem Graustufenbild in ein Binärbild umgewandelt. Die genaue Vorgehensweise mithilfe des Schwellwert-Verfahrens wurde bereits in Kapitel 4.2.3 erläutert. Als Ergebnis entsteht das Binärbild auf der rechten Seite von Bild 4.25. Die weißen Flächen entsprechen den Blattflächen der verschiedenen Pflanzen unabhängig von ihrer Gattung, da die Unterscheidung nur anhand der Reflexionsintensität im NIR-Bereich durchgeführt wurde.

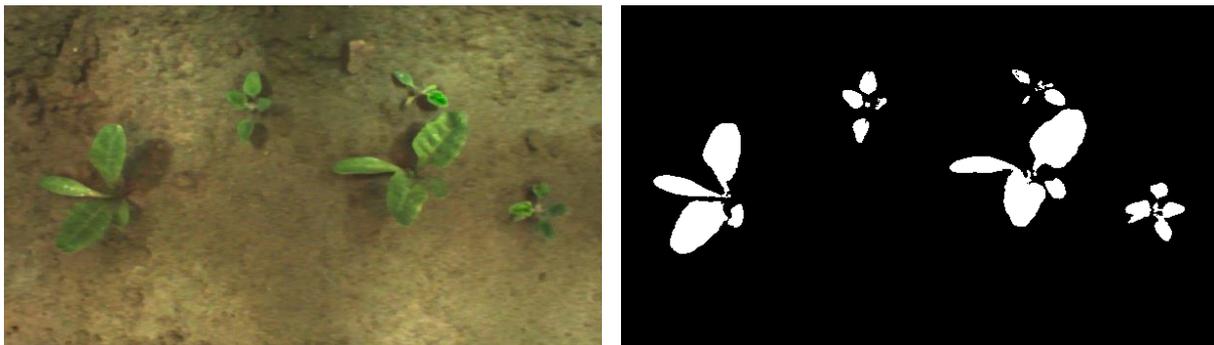


Bild 4.25: Original-Farbbild (links) und aus dem IR-Bild errechnetes Binärbild (rechts)

Neben Pflanzen können deshalb auch Gegenstände und Materialien wie Steine, Metalle, Kunststoffe oder Stroh als weiße Fläche im Binärbild erscheinen, da ihre Reflexionsfähigkeit generell, und deshalb auch im NIR-Bereich, hoch ist.

Für die weitere Untersuchung der einzelnen Flächen wurden nun morphologische Untersuchungen notwendig, die im Gegensatz zum Punktoperator auch die Betrachtung benachbarter Pixel miteinbeziehen. Dabei kann die zu betrachtende Nachbarschaft durch ein Strukturelement vorgegeben werden, das bei den notwendigen mathematischen Operationen als Maske bzw. Matrix aus Nullen und Einsen gebildet wird.

In Bild 4.26 sind Nachbarschaften eines Pixels (dunkelblau) auf einem quadratischen Gitter, das der Anordnung der Pixel auf dem Kamera-Chip und den Bildern entspricht, dargestellt. Auf der linken Seite sind die direkten Nachbarschaften dargestellt. Die 4er-Nachbarschaft beinhaltet die direkt an den Pixelrändern anliegenden 4 Pixel, die 8er-Nachbarschaft schließt zusätzlich die an den Ecken anliegenden Pixel mit ein. Bei Berücksichtigung weiterer Pixel können symmetrische Flächen wie konzentrische Scheiben (Mitte) um das Pixel gebildet werden, aber auch unsymmetrische, frei gewählte Formen (rechts).

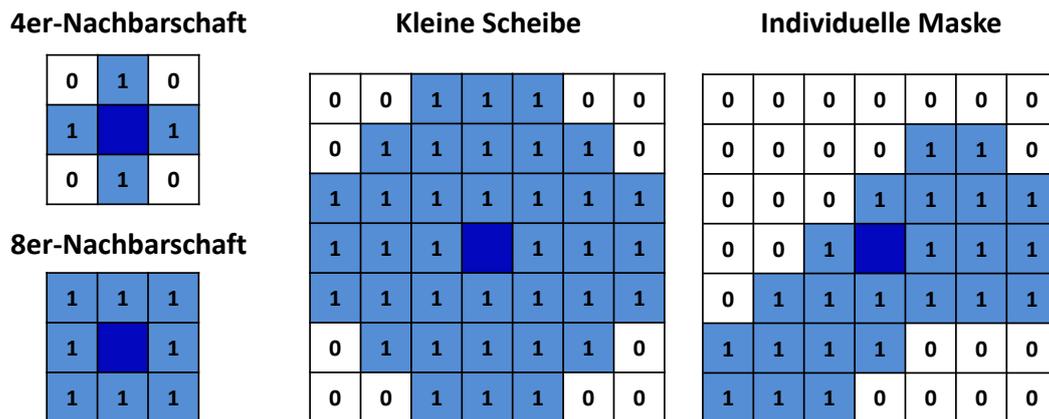


Bild 4.26: Nachbarschaften auf einem quadratischen Gitter

Für die weitere mathematische Beschreibung der Verarbeitungsalgorithmen können die Nachbarschaften, wie in Bild 4.27 dargestellt, einfach in eine Matrix umgewandelt werden. Die vorgestellten Nachbarschaften bzw. Strukturelemente dienen bei den Bildbearbeitungsoperationen als Maske für binäre Faltungsoperationen.

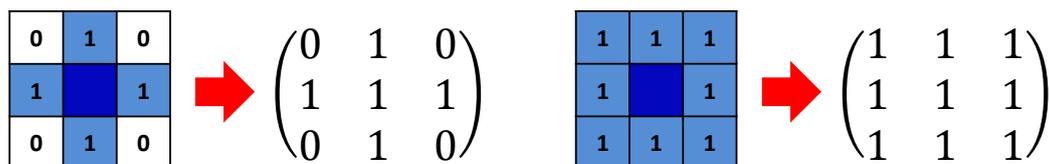


Bild 4.27: Matrixdarstellung verschiedener Nachbarschaften

Um Objekte im Binärbild zu vergrößern, wird die Faltungsoperation in Gl. 4-11 (JÄHNE 2012) eingesetzt. Die Ursprungsmatrix A mit den Pixeln $a_{m,n}$ im Ursprungbild wird mit einer $(2R+1) \times (2R+1)$ -Maske S_M mit den Pixeln $s_{m',n'}$ gefaltet. Hierbei sind m und n die Zeilen- bzw. Spaltenkoordinaten im Ursprungsbild und m' sowie n' die Zeilen- bzw. Spaltenkoordinaten der Strukturmatrix. R_S ist die äußerste Koordinate (Rand) des Strukturelementes, relativ zum Ankerpunkt gesehen. Bei einer 3×3 -Matrix mit mittigem Ankerpunkt, der hier vorausgesetzt wird, ist der Wert von R_S somit 1.

$$a'_{m,n} = \bigvee_{m'=-R_S}^{R_S} \bigvee_{n'=-R_S}^{R_S} s_{m',n'} \wedge a_{m+m',n+n'} \quad (4-11)$$

Als Beispiel für die Wirkung dieser auch Dilatation genannten Operation wird eine 4er-Nachbarschaft als Maske und das links in Bild 4.28 dargestellte Ursprungsbild herangezogen. Auf der rechten Seite ist das Ergebnisbild mit den vergrößerten Objekten sowie den

gestrichelten Ursprungsumrissen der Objekte dargestellt. Wird die obere beispielhaft dargestellte und rot umrandete Maske betrachtet, so befindet sich mindestens ein Maskenpixel auf dem Ursprungsobjekt. Der Ankerpunkt (der mittige Pixel des Strukturelementes) wird als neuer Objektpunkt a'_{mn} des Ergebnisbildes grün markiert. Bei Betrachtung des unteren Strukturelementes gibt es keine Überschneidung mit dem Ursprungsobjekt. Der Ankerpunkt wird deshalb weiß gelassen. Allgemein formuliert werden Objekte ausgedehnt, Löcher oder Sprünge gefüllt und die Konturen geglättet (JÄHNE 2012), wie es auch in Bild 4.28 erkennbar ist. Die Operation wird je nach Bedarf auch mehrmals hintereinander ausgeführt.

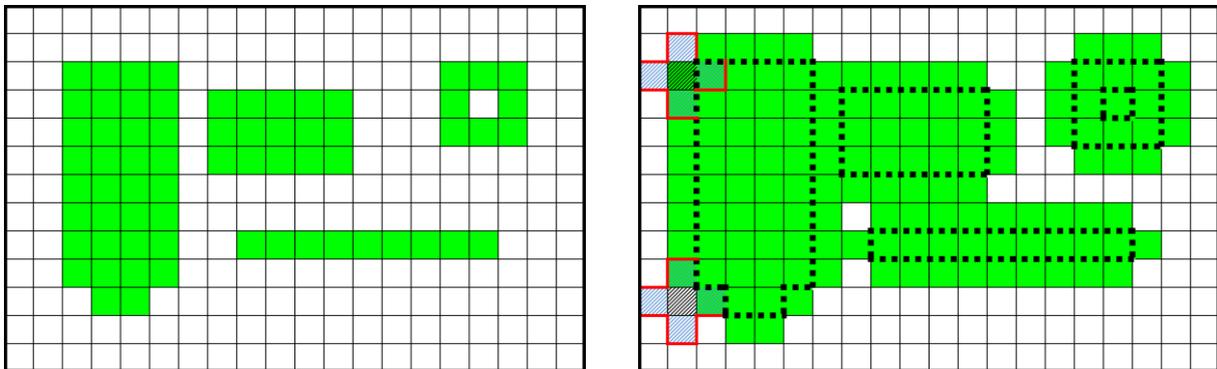


Bild 4.28: Dilatation eines Binärbildes (links: Originalbild; rechts: Bild nach der Dilatation mit gestrichelten Originalumrissen) mithilfe eines 4er-Strukturelementes (Bild 4.26)

Die Dilatation kann auch als Mengenoperation betrachtet werden. Die Minkowski-Summe in Gl. 4-12 stellt eine Dilatation der Menge aller Pixel A des Ursprungsbildes mit der Menge aller Maskenpixel S_M des Strukturelementes dar. S_p ist ein Strukturelement mit zum Bildpunkt p verschobenem Referenzpunkt. Die Gleichung ist nach JÄHNE (2012) äquivalent zu Gl. 4-11 und soll wegen der besseren Übersichtlichkeit für die weiteren Betrachtungen verwendet werden.

$$A \oplus S_M = \{p: S_p \cap A \neq \emptyset\} \quad (4-12)$$

Neben Vergrößerungsoperationen muss zwingend auch die Möglichkeit einer Verkleinerung von Objekten bestehen. Die sogenannte Erosion kann wieder durch eine binäre Faltung durchgeführt werden (Gl. 4-13). Dabei wird in Gl. 4-11 einfach der Oder-Operator durch einen Und-Operator ersetzt, so dass die gegenteilige Wirkung einer Dilatation erzeugt wird.

$$a'_{m,n} = \bigwedge_{m'=-R_S}^{R_S} \bigwedge_{n'=-R_S}^{R_S} s_{m',n'} \wedge a_{m+m',n+n'} \quad (4-13)$$

Wie bei der Dilatation soll für die folgenden Operationen auch hier eine zu Gl. 4-13 äquivalente Mengenoperation betrachtet werden. Die Erosion ist dementsprechend nach Gl. 4-14 als Minkowski-Subtraktion definiert:

$$A \ominus S_M = \{p: S_p \subseteq A\} \quad (4-14)$$

Als Beispiel für die Wirkung der Erosions-Operation wird erneut eine 4er-Nachbarschaft als Maske und das links in Bild 4.29 dargestellte Ursprungsbild herangezogen. Auf der rechten Seite ist das Ergebnisbild mit den verkleinerten Objekten sowie den gestrichelten Ursprungsumrissen der Objekte dargestellt. Wird die obere beispielhaft dargestellte und rot umrandete Maske betrachtet, so befindet sich mindestens ein Maskenpixel außerhalb des Ursprungsobjektes. Der Ankerpunkt (der mittige Pixel des Strukturelementes) wird dementsprechend als Objektpunkt gelöscht und auf dem Ergebnisbild weiß markiert. Bei Betrachtung des unteren Strukturelementes liegen alle Pixel des Elements innerhalb des Ursprungsobjektes. Der Ankerpunkt wird deshalb als alter und neuer Objektpunkt a'_{mn} identifiziert und im Ergebnisbild grün markiert.

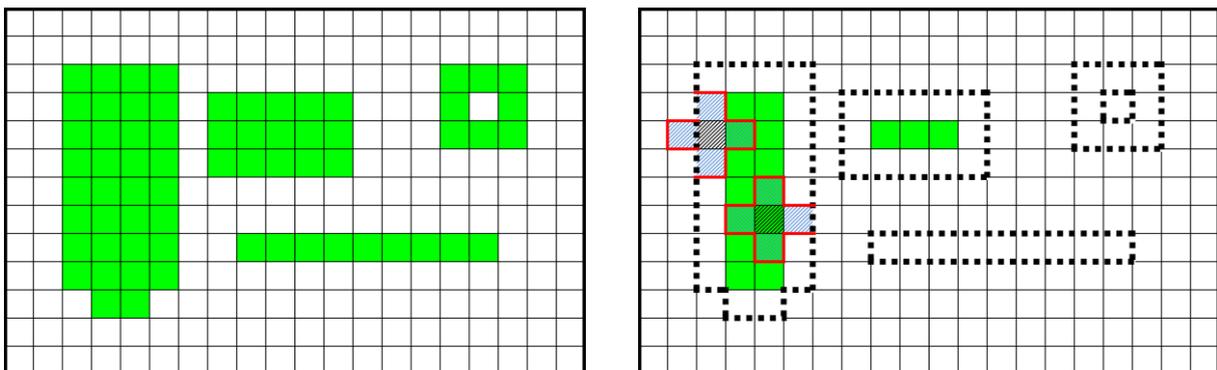


Bild 4.29: Erosion eines Binärbildes (links: Originalbild; rechts: Bild nach der Erosion mit gestrichelten Originalumrissen) mithilfe eines 4er-Strukturelementes (Bild 4.26)

Wie in Bild 4.29 dargestellt, werden Objekte, die kleiner als das Strukturelement sind, vollständig aus dem Ergebnisbild entfernt. Im Vergleich zur Dilatation dienen Löcher oder schmale Brücken zwischen Objektteilen als Schwachpunkte, die zu einer Auslöschung oder Teilung von Objekten führen können. Das Objekt oben rechts in Bild 4.29 ist von der äußeren

Kontur groß genug, um das Strukturelement aufzunehmen. Allerdings führt das Loch in der Mitte zu der Auslöschung des Objektes. Durch eine geschickte Wahl der Form des Strukturelementes können gezielt bestimmte Objektformen erhalten bleiben, weshalb die Elemente auch morphologische Operatoren genannt werden. Die beiden Operationen Dilatation und Erosion können jeweils mehrfach hintereinander ausgeführt werden. Um ein gezieltes Öffnen von Objekten oder das Schließen von Lücken zu erreichen, ohne die Objektgröße wesentlich zu ändern, ist eine Kombination der beiden Operationen notwendig.

Bei der weiteren Analyse des Binärbildes auf der rechten Seite von Bild 4.25 sollen die einzelnen Flächen, die die Einzelblätter symbolisieren, untersucht werden. Dazu wird zunächst eine Erosion und anschließend eine Dilatation des Binärbildes mit dem gleichen Strukturelement durchgeführt (Gl. 4-15).

$$A \circ S_M = (A \ominus S_M) \oplus S_M \quad (4-15)$$

Neben der Entfernung kleiner Objekte werden schmale Brücken zwischen Objekten durchtrennt. Die verbliebenen Objekte werden danach als Einzelobjekte erfasst und gelabelt, wie es auf der rechten Seite in Bild 4.30 durch Einfärben dargestellt ist. Die einzelnen gelabelten Blattflächen, die im rechten Bild der Bild 4.31 farblich markiert sind, dienen im linken Bild als Maske. Bei der weiteren Untersuchung werden die gelabelten Blattflächen als Einzelbilder untersucht. Die in Bild 4.31 rot umrandete Blattfläche wird beispielhaft für die weitere Algorithmik analysiert.

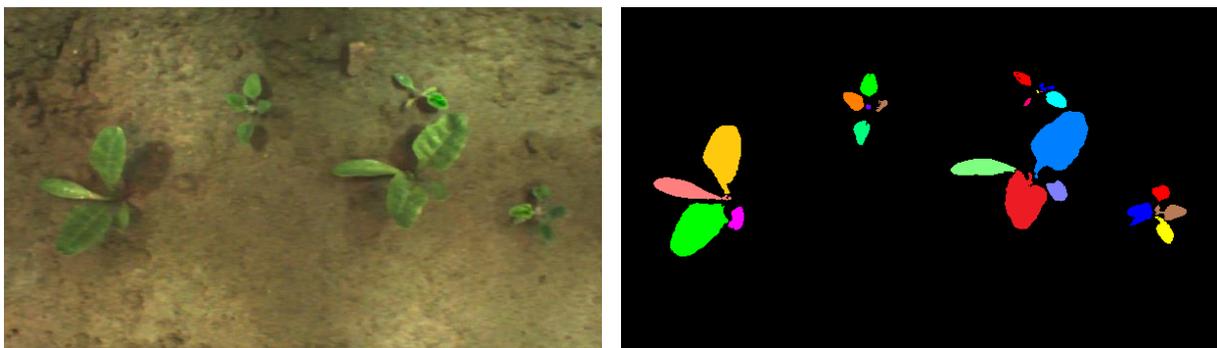


Bild 4.30: Original-Farbbild (links) und aus dem IR-Bild errechnetes Binärbild mit farblich markierten, gelabelten Blattflächen (rechts)



Bild 4.31: IR-basiertes Binärbild mit farblich markierten, gelabelten Blattflächen (links); Original-Farbbild mit überblendeter Maske aus dem IR-basierten Binärbild (rechts)

4.2.4.2 Pflanzenunterscheidung anhand der Farbe

In Bild 4.32 ist der gelabelte Bildausschnitt aus Bild 4.31 dargestellt. Auf der rechten Seite ist das dazugehörige Histogramm dargestellt. Das Histogramm stellt die Häufigkeitsverteilung der einzelnen Farbwerte im Bildausschnitt dar. Auf der x-Achse ist die Intensität der einzelnen Farben in einer 8-bit Auflösung mit Werten zwischen 0 und 255 dargestellt. Die Anzahl der einzelnen roten, grünen und blauen Pixel wird intensitätsabhängig auf der y-Achse dargestellt. Um eine Unterscheidung zwischen Nutzpflanzen und Unkräutern vorzunehmen, wurden für jede Farbe minimale und maximale Intensitätsschwellwerte festgelegt. Um als Nutzpflanze klassifiziert zu werden, müssen dazu je nach Einstellung 80–90 % der Pixelwerte innerhalb der minimalen und maximalen Intensitätsgrenze liegen.

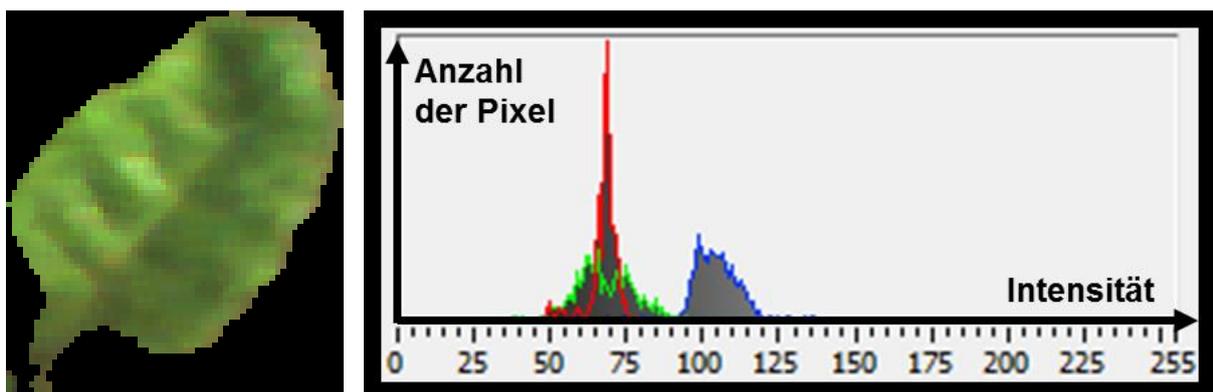


Bild 4.32: Gelabelter Bildausschnitt mit einem Blatt aus Bild 4.31 (links) mit dem dazugehörigen Histogramm (rechts)

Die Unterscheidung zwischen den Pflanzenarten anhand der Farbe kann auch bei Verwendung eines anderen Farbraumes erfolgen. Das ursprüngliche RGB-Bild wird dazu wie in Kapitel 4.2.2 in ein HSL-Bild umgerechnet, in dem den einzelnen Bildpunkten jeweils

Farbton (engl.: Hue), Farbsättigung (engl.: Saturation) und relative Helligkeit (engl.: Lightness) zugewiesen werden. Im Gegensatz zu den Farben Rot, Grün und Blau werden dabei die HSL-Werte im Histogramm dargestellt und dienen mithilfe von minimalen und maximalen Schwellwerten als Entscheidungskriterien für die Pflanzenzuordnung.

4.2.4.3 Pflanzenerkennung anhand der Form, Größe und Lage

Die verbliebenen Flächen, die aufgrund ihrer Farbe als mögliche Kulturpflanzen eingestuft wurden, müssen im nächsten Schritt auf Ihre Form und Lage zueinander untersucht werden. Durch das Erosionsverfahren wurden bereits im Infrarotbild schmale Strukturen wie monokotyle (einkeimblättrige) Unkräuter herausgefiltert. Um Blätter, die zu einer Pflanze gehören, zu verknüpfen, werden wieder die Verfahren der Dilatation und Erosion eingesetzt. Um benachbarte Flächen zu verschmelzen, wird die Dilatation durchgeführt. Da die ursprüngliche Größe der Flächen aber nahezu erhalten werden soll, wird darauf folgend eine Erosion durchgeführt. Diese Kombination wird nach BREDIES & LORENZ (2011) auch Schließen (engl.: closing) genannt und ist in Gl. 4-16 dargestellt:

$$A \cdot S_M = (A \oplus S_M) \ominus S_M \quad (4-16)$$

Das Verfahren in umgekehrter Reihenfolge wird nach BREDIES & LORENZ (2011) auch Öffnen (engl.: opening) genannt und wird nach Gl. 4-17 folgendermaßen formuliert:

$$A \cdot S_M = (A \ominus S_M) \oplus S_M \quad (4-17)$$

Um ein besseres Ergebnis zu erzielen, wurden die Verfahren Dilatation und Erosion mehrfach hintereinander angewandt, so dass einzelne Flächen wie in Bild 4.33 auf der rechten Seite „verschmelzen“. Es wird davon ausgegangen, dass diese neu entstandenen Flächen einzelne Pflanzen darstellen.

Bei der weiteren Untersuchung der Form und Größe ergeben sich die gleichen Schwierigkeiten wie bei der Farbkamera aus Kapitel 4.2.2. Deshalb werden auch hier die Flächen der Objekte mit einem Minimal- und Maximalwert abgeglichen, die für die jeweiligen Entwicklungsstadien der Nutzpflanze in einer Datenbank hinterlegt sind und während der Fahrt über das Feld anhand der aktuell ermittelten Nutzpflanzendaten laufend aktualisiert werden.

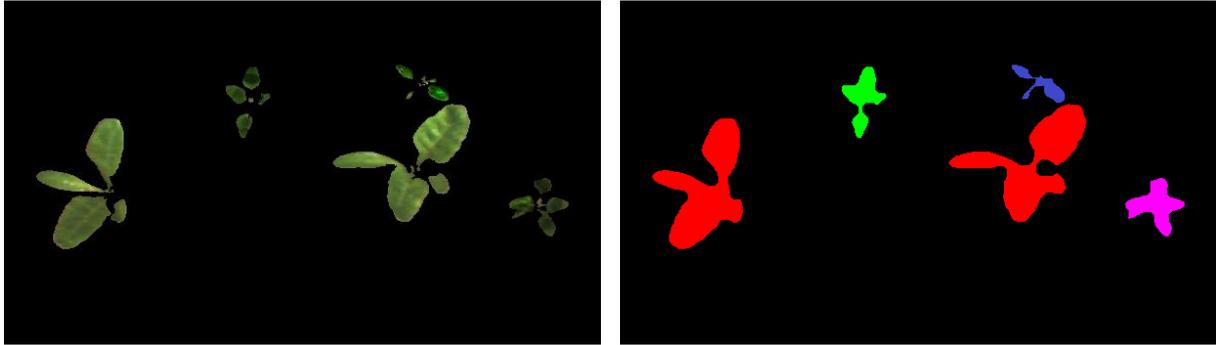


Bild 4.33: Original-Farbbild mit überblendeter Maske aus dem IR-basierten Binärbild (links); farblich markierte Pflanzen nach Dilatations- und Erosionsberechnungen (rechts)

Die Mittelpunkte der verbliebenen Objekte werden wie in Kapitel 4.2.2 statistisch untersucht, so dass nur die Objekte im Bild verbleiben, die statistisch und morphologisch als Nutzpflanze in Frage kommen (Bild 4.34).

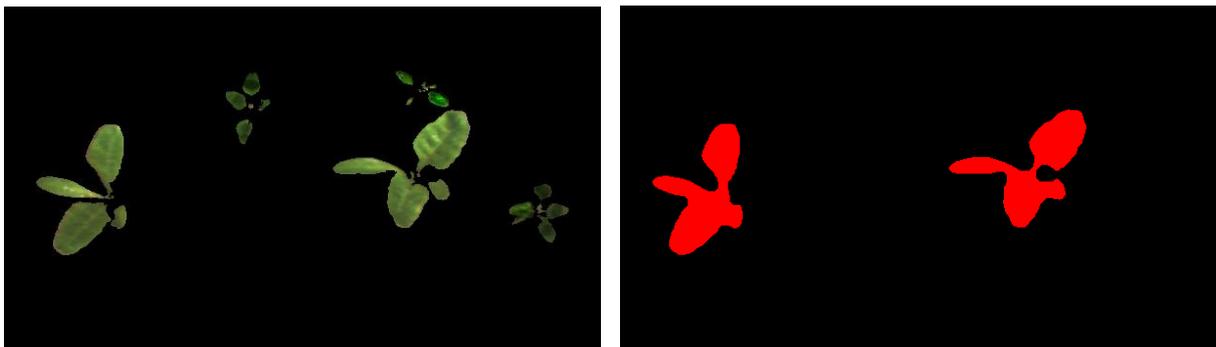


Bild 4.34: Original-Farbbild mit überblendeter Maske aus dem IR-basierten Binärbild (links) und Binärbild mit ausschließlicher Darstellung der Nutzpflanzen/Zuckerrüben (rechts)

Um die Ergebnisse der Pflanzenerkennung online und unabhängig vom Hackergebnis kontrollieren zu können, werden die Pflanzenmittelpunkte mit einem als Fadenkreuz dienenden Doppelkreis im Original-Farbbild und im Binärbild markiert. Wie in Bild 4.35 dargestellt, dient der innere Kreis der einfacheren Erkennung des Punktes und der äußere dazu konzentrische Kreis visualisiert anhand des Durchmessers die Größe der Blattoberfläche. Um eine spätere offline-Untersuchung zu ermöglichen, werden die Bilder mit den eingefügten Markierungen abgespeichert.

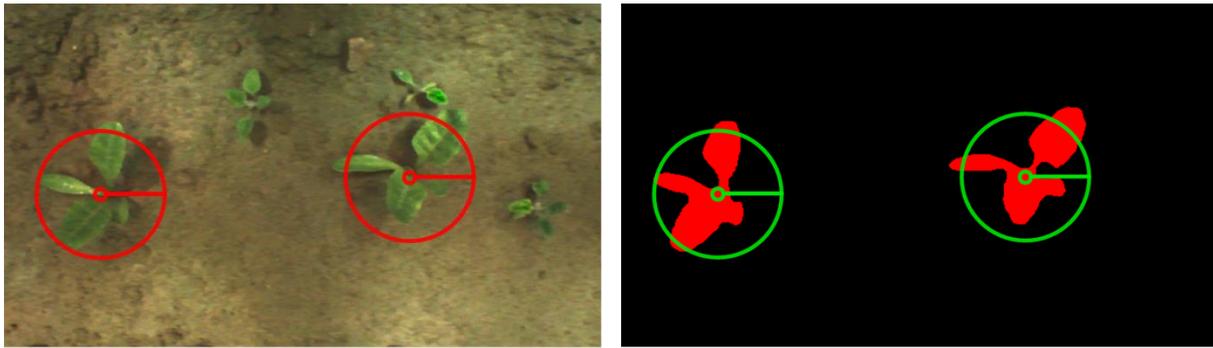


Bild 4.35: Originales Farb- (links) und Binärbild (rechts) mit den markierten Pflanzenmittelpunkten

Zusätzlich werden die Originalbilder und je nach Einstellung auch Bilder der Zwischenschritte abgespeichert. Die Pflanzenmittelpunkte und weitere Daten werden nach jeder Bildberechnung in einer Tabelle gespeichert und parallel an die Motorsteuerung weitergegeben. Zu den zusätzlichen Daten, die für die Ansteuerung des Servomotors irrelevant sind gehören u. a. die Blattfläche und Daten zu der Blattfarbe. Im Fall von Fehl- und Doppelstellen werden die gleichen Algorithmen angewendet, wie bei der Farbkamera (Kapitel 4.2.2).

4.2.5 Stereo-Kamera

Ein Problem bei der Pflanzenerkennung mit Kameras ist die Überlappung von Pflanzen. Im Extremfall entsteht durch starken Unkrautbewuchs ein „grüner Teppich“, so dass eine Kamera die Konturen der Blätter nur schwer erkennen lässt. Einzelne Industriekameras bilden nur ein 2D-Abbild der Wirklichkeit ab. Die dreidimensionale Komponente, die ein Mensch z. B. mit den Augen wahrnehmen kann, geht verloren.

Eine Möglichkeit, dies zu verhindern, ist die Nachahmung des menschlichen Vorbildes. Dazu wurden zwei Kameras in einem festen Abstand parallel zueinander montiert und auf das Objekt ausgerichtet (Bild 4.36). Beide Kameras nehmen ein Schwarzweißbild (SW-Bild) auf, deren Disparität bzw. Parallaxe (Verschiebung der Bildebenen) für ein Errechnen eines 3D-Tiefenbildes genutzt wurde (JÄHNE 2012). Die schwarzen Bereiche stehen dabei für Bereiche, die hinter dem Beobachtungshorizont liegen, rote Objekte liegen im Vordergrund und die weiteren Farben stellen Objekte dazwischen dar. Die Disparität wird durch den Vergleich der Position eines Merkmals im linken Bild mit der Position im rechten Bild errechnet.

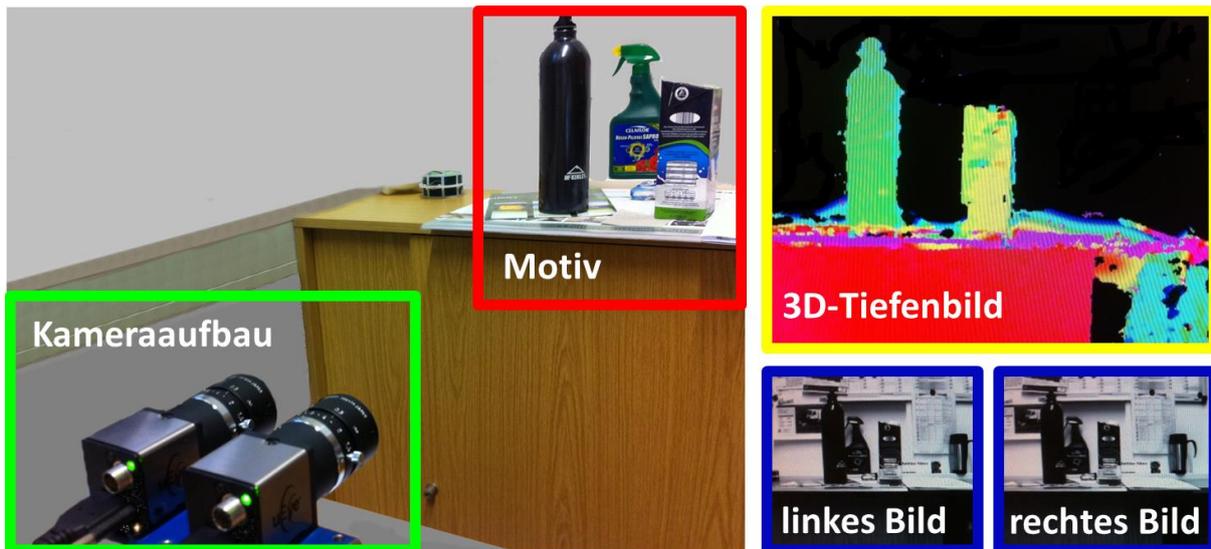


Bild 4.36: Auf zwei Industriekameras basierende Stereo-Kamera mit einem Beispielmotiv (links); aufgenommene SW-Bilder der beiden Kameras (rechts unten); aus den beiden Rohbildern errechnetes 3D-Tiefenbild (Disparitätenbild) (oben rechts)

Um einzelne Merkmale zu erkennen, müssen die Bilder eine ausreichende Textur aufweisen, beispielsweise durch Helligkeitsunterschiede zwischen einzelnen Objekten oder Objektpunkten. So unterscheidet sich die schwarze Trinkflasche in Bild 4.36 deutlich von der hellen Rückwand, so dass die Umriss der Flasche von der Bildverarbeitung erkannt werden können. Die Positionen der einzelnen Punkte auf dieser Linie werden nun mit dem jeweils zugehörigen Punkt des anderen Bildes verglichen.

Bild 4.37 stellt vereinfacht den geometrischen Aufbau und die Ermittlung der Distanz durch die binokulare Bildverarbeitung dar. Die beiden baugleichen Kameras sind achsparallel zueinander angeordnet und auch die Brennweite f der Objektive ist gleich. Der Abstand zwischen den Kameras wird auch als stereoskopische Basis b bezeichnet (JÄHNE 2012). X_L , X_R , Y_L , Y_R und Z stellen die Achsen der linken und rechten Kamera dar. Im dreidimensionalen Raum vor den Kameras befindet sich der reale Objektpunkt P mit den Koordinaten X , Y und Z . Der zu vermessende Objektpunkt P wird von beiden Kameras erfasst und kann in den Bildern vermessen werden. Die Ebene, die von dem Punkt P und der Achse X_L bzw. X_R aufgespannt wird, wird nach ZHANG (1998) als Epipolarebene bezeichnet. Die zweidimensionalen Projektionen des Punktes P weisen im linken Bild die Koordinaten x'_L und y'_L sowie im rechten Bild x'_R und y'_R auf, wobei sich mathematisch nur die x -Koordinaten unterscheiden, da die Epipolarebene parallel zur stereoskopischen Basis steht (KRAUS 1994).

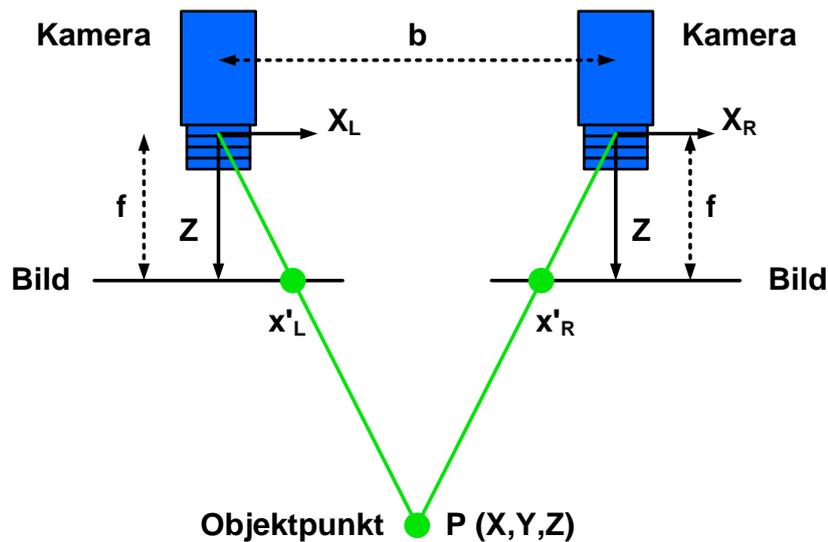


Bild 4.37: Geometrischer Aufbau eines vereinfachten Stereobildverarbeitungssystems mit zwei Kameras und einem zu vermessenden Objektpunkt

Die Differenz zwischen den beiden x-Koordinaten wird als Disparität d (Gl. 4-18) bezeichnet. Durch einfache Trigonometrie ergibt sich in Gl. 4-18 die Beziehung dieser Projektionsdaten zum gesuchten Objektabstand Z .

$$d = x'_L - x'_R = \frac{f * b}{Z} \quad (4-18)$$

Die zugehörige Berechnungsvorschrift der Abbildung lautet dann:

$$Z = \frac{f * b}{d} = \frac{f * b}{x'_L - x'_R} \quad (4-19)$$

In Bild 4.38 sind die beiden gegensätzlichen Situationen mit einem kameranahen und kamerafernen Objekt dargestellt. In den Kamerabildern ist neben dem Objekt auch die gestrichelte Projektion des jeweils anderen Bildes dargestellt. Die Disparität d , also der horizontale Versatz, ist bei nahen Objekten größer. Dabei zeigen sich zwei Grenzen dieses Aufbaus. Die Objekte können nur in einem bestimmten Abstand vermessen werden, da zu nahe Objekte nicht vollständig von beiden Kameras zu erfassen sind. Die Tiefeninformation zu weit entfernter Objekte ist ebenfalls schwer zu berechnen, da die geringe Disparität d aufgrund der begrenzten Auflösung der Kamera nicht mehr zu erkennen ist. Dieser Bereich befindet sich hinter dem Beobachtungshorizont. Durch Vergrößerung des Kameraabstandes b kann der Beobachtungshorizont erweitert werden, allerdings geht hiermit die gleichzeitige Verschlechterung im Nahbereich einher.

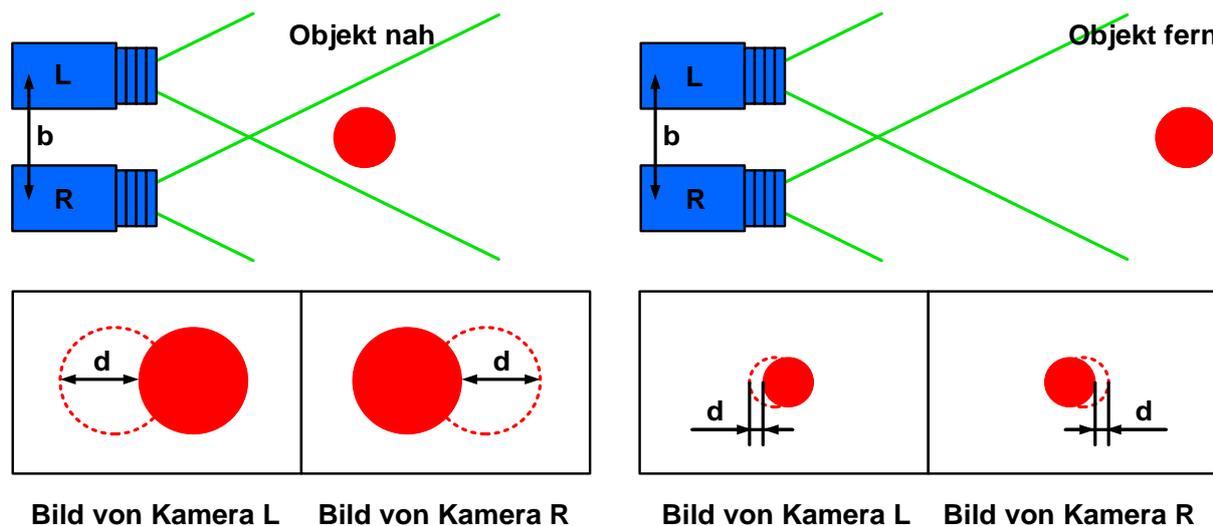


Bild 4.38: Disparität d bei unterschiedlichen Abständen des Objekts zu den Kameras

Der Zusammenhang zwischen der stereoskopischen Basis b , der Kamera-Objekt-Distanz Z und dem mittleren Tiefenmessfehler σ_y wird durch Gl. 4-20 (KRAUS 1994) deutlich.

$$\sigma_y = \frac{Z^2}{f * b} \sigma_d \quad (4-20)$$

Die Brennweite f und die von der Kameraauflösung abhängige Disparitätenmessgenauigkeit σ_d sind konstant. Eine Vergrößerung der Distanz Z bewirkt nach Gl. 4-20 einen quadratischen Anstieg des Tiefenmessfehlers σ_y , wohingegen eine Vergrößerung der stereoskopischen Basis b zu einem proportional niedrigeren Tiefenmessfehler σ_y führt.

Die vorgestellten Annahmen zeigen ein vereinfachtes Stereobildverarbeitungssystem. Da die Objektive der Kameras zu einer radialen und tangentialen Verzerrung führen, muss diese Linsenverzeichnung rechnerisch ausgeglichen werden, damit die beiden Bilder miteinander verglichen werden können (REMONDINO & STOPPA 2013; WEISSLER & HOLST 2007). Dazu kommt, dass es nur schwer möglich ist, beide Kameras zu 100 % parallel zueinander auszurichten. Eine Abweichung von diesem Idealzustand muss über eine Transformation der Originalbilder korrigiert werden.

Die unbekannt zu bestimmenden Parameter dieser Transformation teilen sich in innere (intrinsische) Parameter (Brennweite, Linsendezentrierung, radialsymmetrische Verzerrung, Pixel-Seitenverhältnis des Bildsensors) und äußere (extrinsische) Parameter (Kameraabstand, Abweichung von der idealen Parallelität der Kameras). Die Parameter konnten über einen

Kalibrierprozess ermittelt werden. Dazu wurde die in Bild 4.39 dargestellte Platte mit einer Punktmatrix bedruckt. Dann folgte eine Bildaufnahme der Punktmatrix durch die Kameras. Dabei wurde die Platte durch Drehung um die x- und y-Achse (Koordinatensystem in Bild 4.37) in unterschiedlichen Ausrichtungen zur Kamera aufgenommen. Der mathematische Kalibrierprozess wird von BRADSKI & KAEHLER (2008) genauer beschrieben.

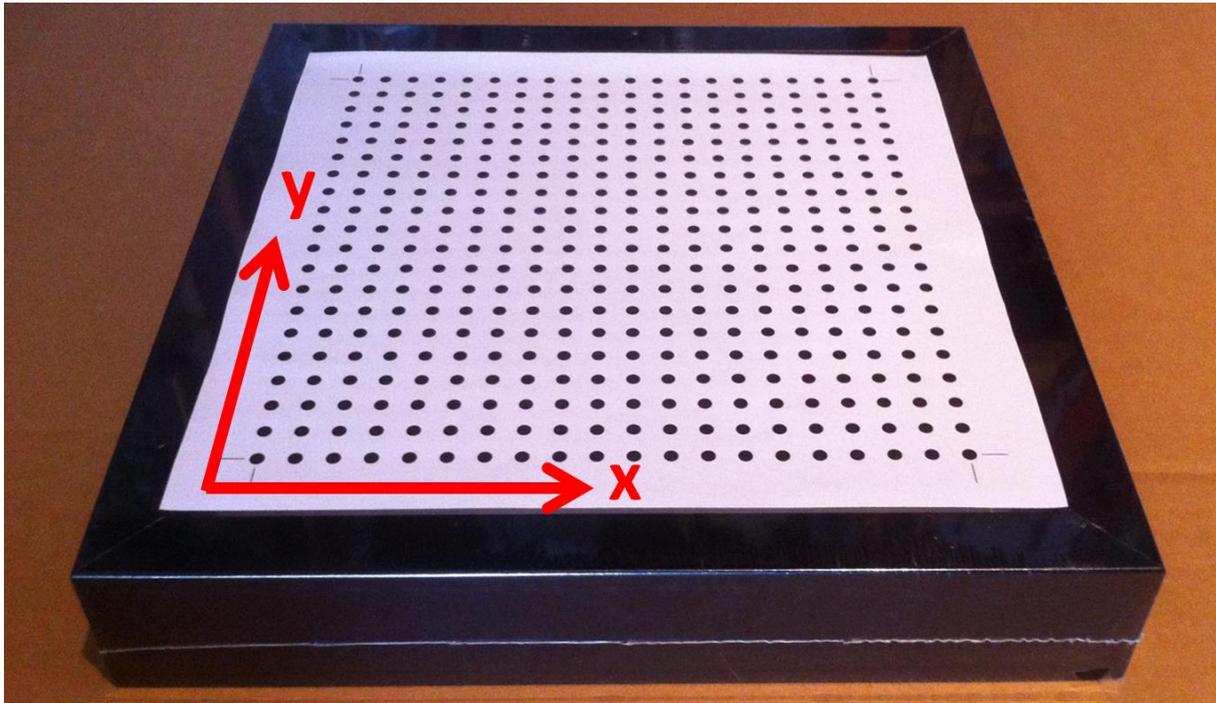


Bild 4.39: Kalibriermatrix

Der Prozess ist vereinfacht in Bild 4.40 dargestellt. Links und rechts sind die Rohbilder (a) der realen Matrixtafel dargestellt. Im ersten Schritt wird die durch die Linsen verursachte Verzerrung aufgehoben, so dass entzerrte Bilder (b) entstehen. Die durch den Ansichtswinkel entstandene Verzerrung wird durch eine Rektifizierung rückgängig gemacht, so dass die Punkte der Punktmatrix wieder auf einem rechtwinkligen Raster liegen (c). Da bei diesem Verfahren ein Teil der äußeren Bildpunkte nicht im Zielbild abgebildet würde, musste das inverse (umgekehrte) Mapping verwendet werden. Für jede Position eines Pixels im rektifizierten Bild (c) wurde seine Position im Rohbild (a) ermittelt, so dass daraus eine Lookup-Tabelle (LUT) erstellt werden konnte. Für die Entzerrung und Rektifizierung der Rohbilder konnte dann die ermittelte LUT verwendet werden.

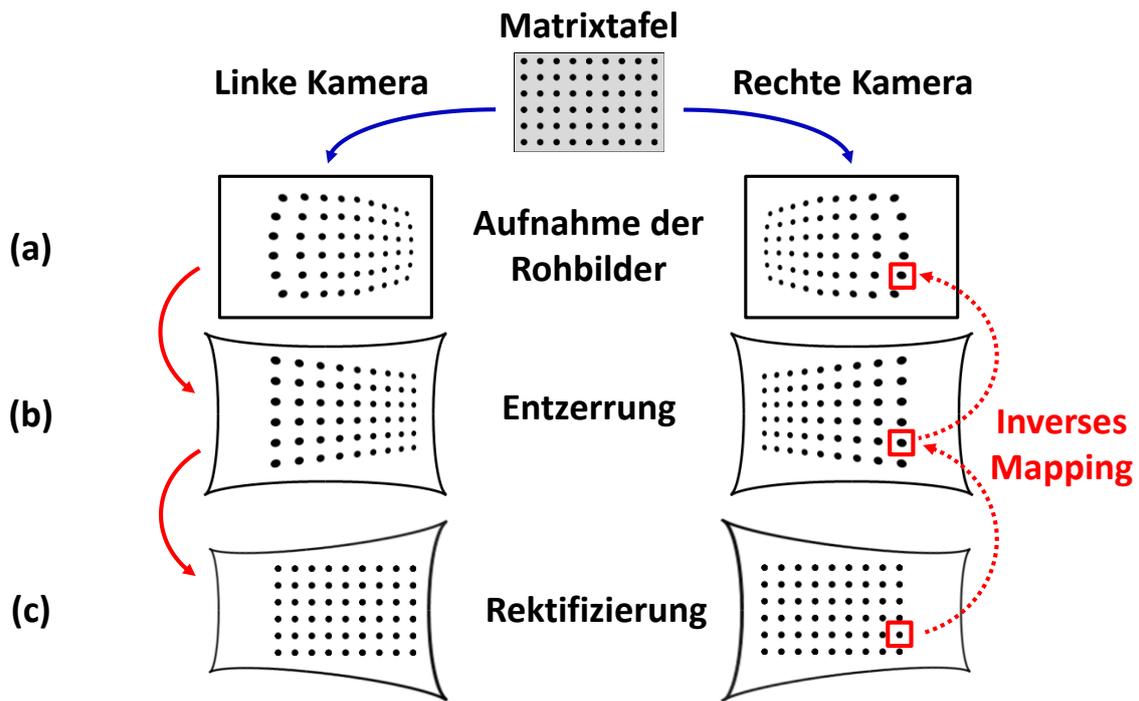


Bild 4.40: Transformationsprozess von den Rohbildern (a) der aufgenommenen Matrixtafel zu den entzerrten Bildern (b) und den rektifizierten Bildern (c) (BRADSKI & KAEHLER 2008)

Das so kalibrierte stereoskopische System wurde danach für Versuche verwendet. In Bild 4.41 ist der Aufbau über der Pflanzenreihe dargestellt. Die Kameras wurden so montiert, dass die optischen Achsen orthogonal zum Boden stehen. Die Schnittachsen der Epipolarebenen mit dem Boden sind ebenfalls orthogonal zur Pflanzenreihe. Der Abstand von den Kameras zum Boden betrug $Z = 770$ mm. Auf der rechten Seite von Bild 4.41 ist die optische Sicht der Kamera auf die Pflanzen dargestellt.

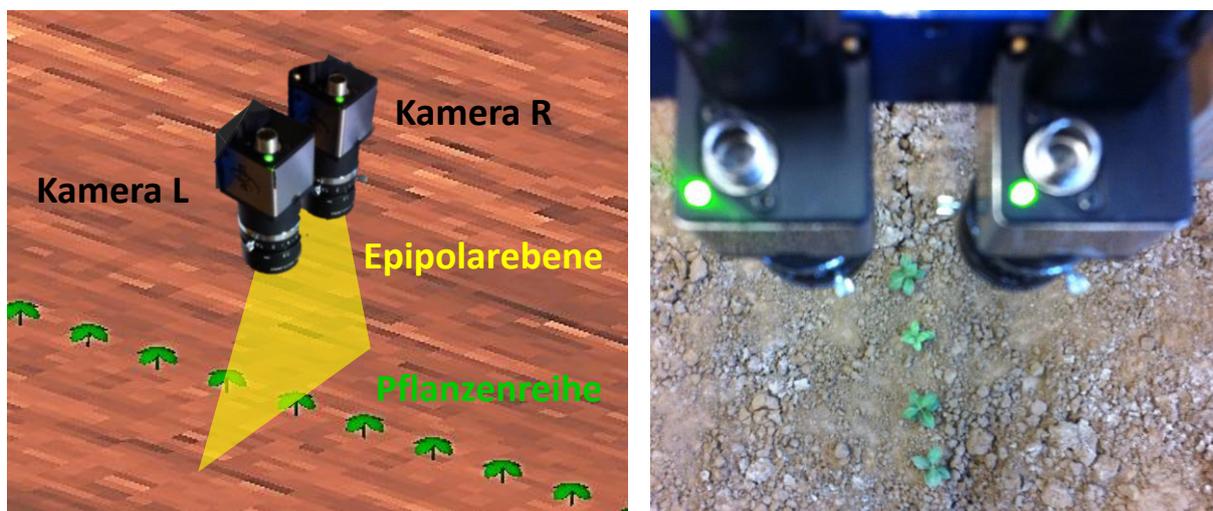


Bild 4.41: Geometrische Anordnung der Stereokamera über einer Pflanzenreihe (links); Ansicht des realen Aufbaus von oben (rechts)

4.2.6 Laser-Lichtschnittverfahren

Wie bei der Stereo-Kamera wird das Lichtschnittverfahren dazu genutzt, die durch eine einzelne Kamera nicht zu messenden 3D-Tiefeninformationen zu erfassen. Um die Identifizierung der einzelnen Kulturpflanzen zu verbessern, wurde ein Lichtschnittverfahren getestet, das in der Automationsindustrie für 3D-Überprüfungen eingesetzt wird.

Bei dem Verfahren wird ein Laserstrahl orthogonal auf den Erdboden gerichtet (Bild 4.42). Durch eine spezielle Optik erzeugt der Laser eine gut sichtbare Laserlinie auf dem Boden, die orthogonal zur Pflanzenreihe liegt. Eine Kamera wird über der Pflanzenreihe im 45°-Winkel zum Erdboden angeordnet, so dass die Laserlinie im unteren Bereich des Bildausschnitts erscheint. Trifft der Laserstrahl auf Gegenstände oder Pflanzen, so wird die Höhenkontur des Gegenstandes bzw. der Pflanze sichtbar. Während einer Überfahrt über die Pflanzenreihe wird aus den zweidimensionalen Höheninformationen ein dreidimensionales Höhenprofil erzeugt. Die zusätzlichen Daten können getrennt von den Bildern verwertet, oder auf das Bild gelegt und zusammen ausgewertet werden.

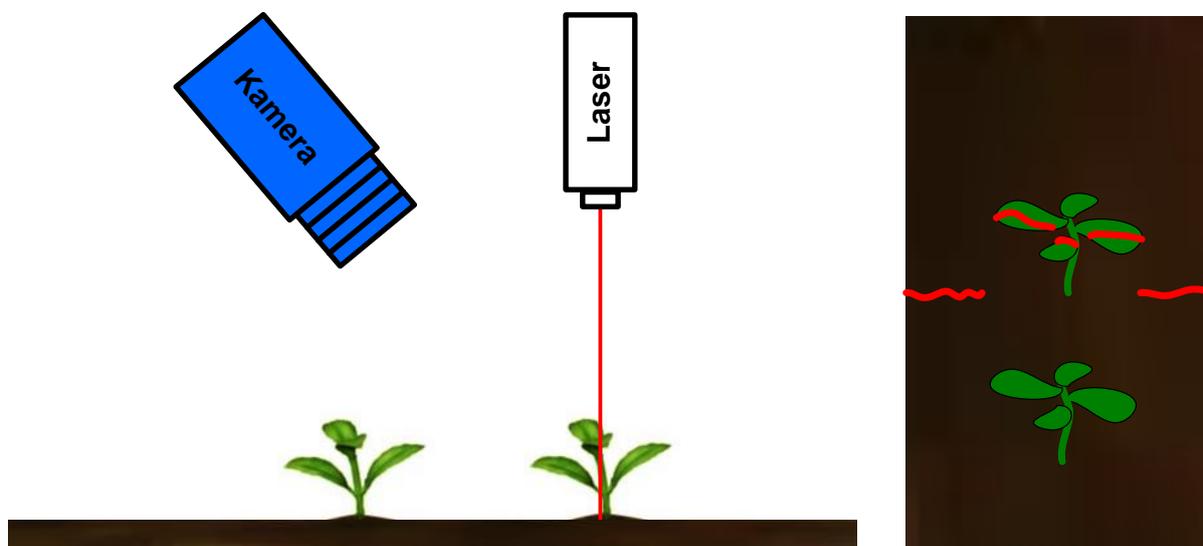


Bild 4.42: Aufbau aus Kamera und Linienlaser für das Lichtschnittverfahren (links) mit der dazugehörigen Kameraperspektive (rechts)

Der Versuchsaufbau auf der Bodenrinne ist in Bild 4.43 dargestellt und bestand aus den gleichen Komponenten wie der Aufbau am Versuchsträger für Feldversuche. Als Kamera wurde eine Industriefarbkamera verwendet (Anhang 8.3.2.1) und mit einem Laser (Anhang 8.3.1.5) kombiniert, der eine Optik zur Erzeugung einer homogenen Linie enthält.



Bild 4.43: Aufbau für das Lichtschnittverfahren auf der Bodenrinne (links) mit der detaillierten, abgedunkelten Ansicht einer vom Linienlaser gekreuzten Pflanze (rechts)

Auf der rechten Seite von Bild 4.43 ist eine vergrößerte Ansicht ohne Hintergrundbeleuchtung dargestellt, so dass die Profilvisualisierung durch die Laserreflexionen gegenüber den Farbinformationen in den Vordergrund tritt. Neben dem Bodenprofil sind 2 gebogene Blätter eines Pflanzendummys zu erkennen.

In Bild 4.44 und Bild 4.45 sind die Schritte zur Erfassung des Höhenprofils dargestellt. Das linke Bild in Bild 4.44 zeigt ein von der Kamera aufgenommenes Bild zur Erfassung des Profils. Auf den obersten Blättern des Pflanzendummys und dem Boden sind die Reflexionen des Linienlasers zu sehen. Um die Laserreflexionen zu verdeutlichen, ist rechts in Bild 4.44 das gefilterte Bild zu sehen, in dem über das Schwellwert-Verfahren eine Binarisierung des Bildes vorgenommen wurde. Die Einstellungen (Anhang 8.4.2) wurden so vorgenommen, dass die Laserreflexionen im Binärbild rot und alle anderen Farben schwarz dargestellt werden. Die rote Linie visualisiert das zweidimensionale Höhenprofil einer Schnittebene orthogonal zur Pflanzenreihe. Da die Linie durch Verschattung oder schlechte Reflexion lückenhaft ist, werden die roten Bereiche im ersten Schritt über eine Dilatation mit einer 3x3-Maske vergrößert (Bild 4.45 links).

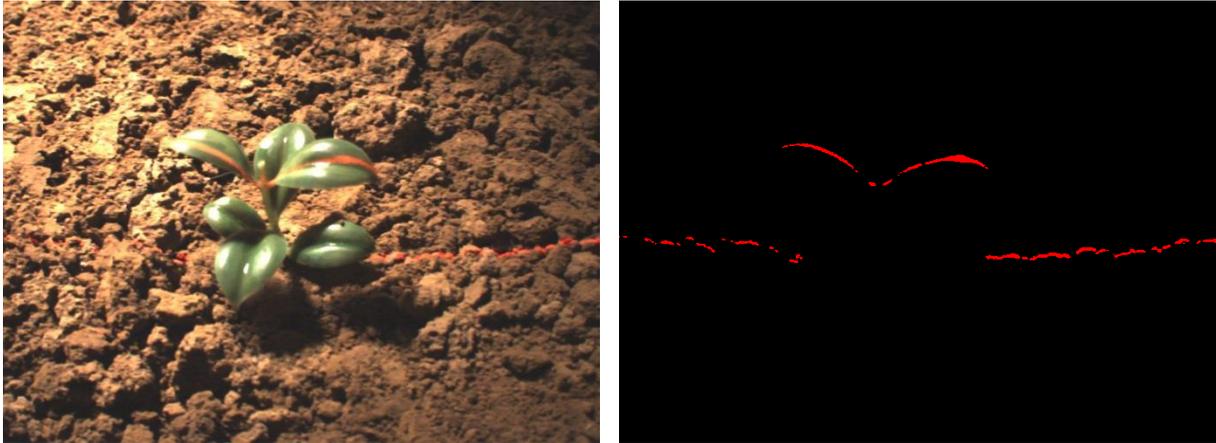


Bild 4.44: Von einem Laser auf den Boden/die Pflanze projizierte Linie (links); Ansicht der reflektierten Linie bei Dunkelheit (rechts)

Um die einzelnen Höhenwerte des Profils zu bestimmen, wurde zunächst ein ROI festgelegt (Bild 4.45 rechts), in dem parallele, senkrechte Linien als ein sogenannter rake (dt.: Rechen) mit einem festen Abstand zueinander erzeugt werden. Bei der höchsten Auflösung liegen die Linien auf den Pixeln und haben damit einen Abstand von einem Pixel zueinander. Die Funktion errechnet dann Linie für Linie auf welcher Höhe diese von oben nach unten folgend von einem schwarzen Pixel zu einem roten Pixel wechselt. Ist die Reflexion aufgrund der Reflexionsoberfläche relativ breit, wird also immer die oberste Kante errechnet. Dies ist notwendig, da der Laser in Randbereichen von Blättern sowohl Reflexionen auf dem Blatt als auch dem Boden erzeugt und in diesem Fall die Blattkontur vorrangig errechnet werden soll.

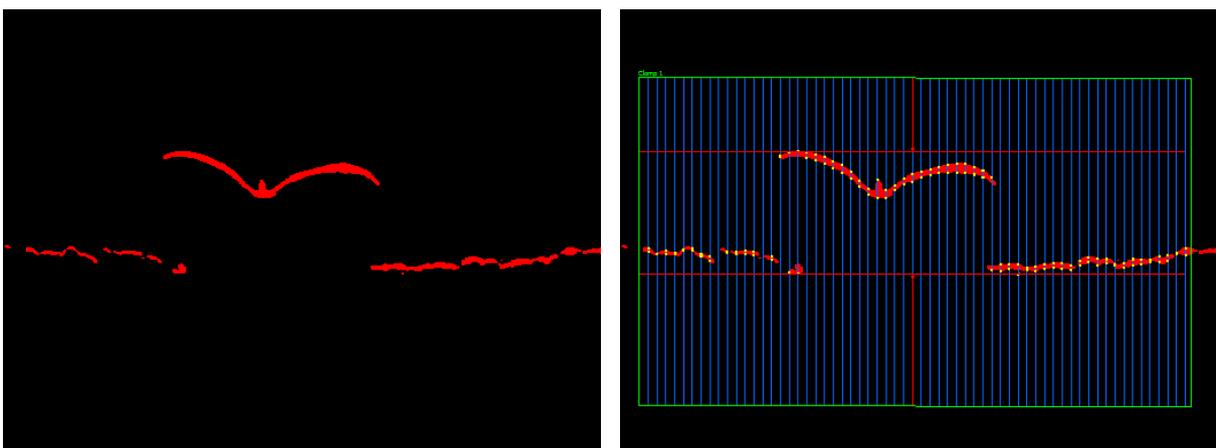


Bild 4.45: Verdeutlichte Darstellung der Laserreflexion nach Anwendung einer Dilatation (links) mit einer grün umrandeten ROI für die Ermittlung des Höhenprofils (rechts)

Das errechnete Höhenprofil weist trotz der Dilatation immer noch Lücken und Unstetigkeitsstellen auf. Um die Lücken zu füllen, werden diese Stellen gesondert betrachtet. Bei der Rake-Funktion wurden die Lücken bereits detektiert, da an diesen Stellen entlang der senkrechten Linien kein Farbwechsel festzustellen war. Bei jeder Lücke wird nach Gl. 4-21 die links der Lücke errechnete Höhe $z_{\text{Profil}}(y_l)$ mit der rechts errechneten Höhe $z_{\text{Profil}}(y_r)$ verglichen und für alle fehlenden Punkte dazwischen der niedrigste der beiden Werte als $z_{\text{Profil}}(y_{\text{Lücke}})$ festgelegt.

$$z_{\text{Profil}}(y_{\text{Lücke}}) = \begin{cases} z_{\text{Profil}}(y_l) & \text{falls } z_{\text{Profil}}(y_l) < z_{\text{Profil}}(y_r) \\ z_{\text{Profil}}(y_r) & \text{falls } z_{\text{Profil}}(y_l) > z_{\text{Profil}}(y_r) \end{cases} \quad (4-21)$$

Diese Vorgehensweise soll sicherstellen, dass im Übergangsbereich von Pflanze zu Boden die Profilhöhe des Bodens angenommen wird. Da die Reflexionen auf den Pflanzenblättern deutlicher und seltener verdeckt sind, ist es wahrscheinlicher, dass die betroffenen Lücken im Übergangsbereich dem Bodenprofil zuzuordnen sind.

Das so errechnete Profil wurde nicht als einzelnes betrachtet. Durch die getriggerte Aufnahme von Profilen in kurzen Abständen im mm-Bereich konnte ein dreidimensionales Profil errechnet werden, das als zusätzliche Informationsquelle neben Farb-, Infrarot oder Multispektralbildern diene.

4.3 Computersimulation

Vor der Entwicklung des Versuchsträgers für die Felderprobung konnte die Kinematik in Simulationen überprüft werden. Dazu wurde ein CAD-Modell mit der CAD-Software (engl.: computer-aided design; rechnerunterstütztes Konstruieren) Pro/ENGINEER Wildfire 5.0 erstellt. Neben reinen Kollisionsuntersuchungen erlaubt das CAD-Modell des Versuchsaufbaus die komplette Beschreibung der Position, Geschwindigkeit und Beschleunigung einzelner Punkte des Modells. Durch die vergleichende Messung des Lastmoments am realen Motor konnte die Simulation auch zur Bestimmung von kinetischen Größen, wie Kräften und Momenten, eingesetzt werden.

4.3.1 CAD-Modell der Bodenrinne für Laborversuche

Das CAD-Modell ist bezüglich der Abmessungen eine genaue Kopie der realen Bodenrinne, die für praktische Versuche im Labor aufgebaut wurde. Wie beim Original ist ein linear beweglicher Schlitten auf einem ortsfesten Körper, der den Boden ersetzt, positioniert. Die Pflanzenmodelle auf diesem Boden, wie auch der Boden selbst sind nicht beweglich. Der Schlitten wird durch einen simulierten Linearantrieb in Längsrichtung zur Bodenrinne bewegt. Der Schlitten selbst und der daran befestigte Motor für den Antrieb der Hackwerkzeuge werden in den Simulationen als ein Bauteil betrachtet. Die Hackwerkzeuge werden relativ zum Schlitten über einen simulierten Rotationsantrieb bewegt. Das Mehrkörpersystem kann nun bei einer Überlagerung der beiden Antriebe untersucht werden. In Bild 4.46 ist z. B. die Trajektorie eines Werkzeuges als blaue Bahnkurve grafisch dargestellt.

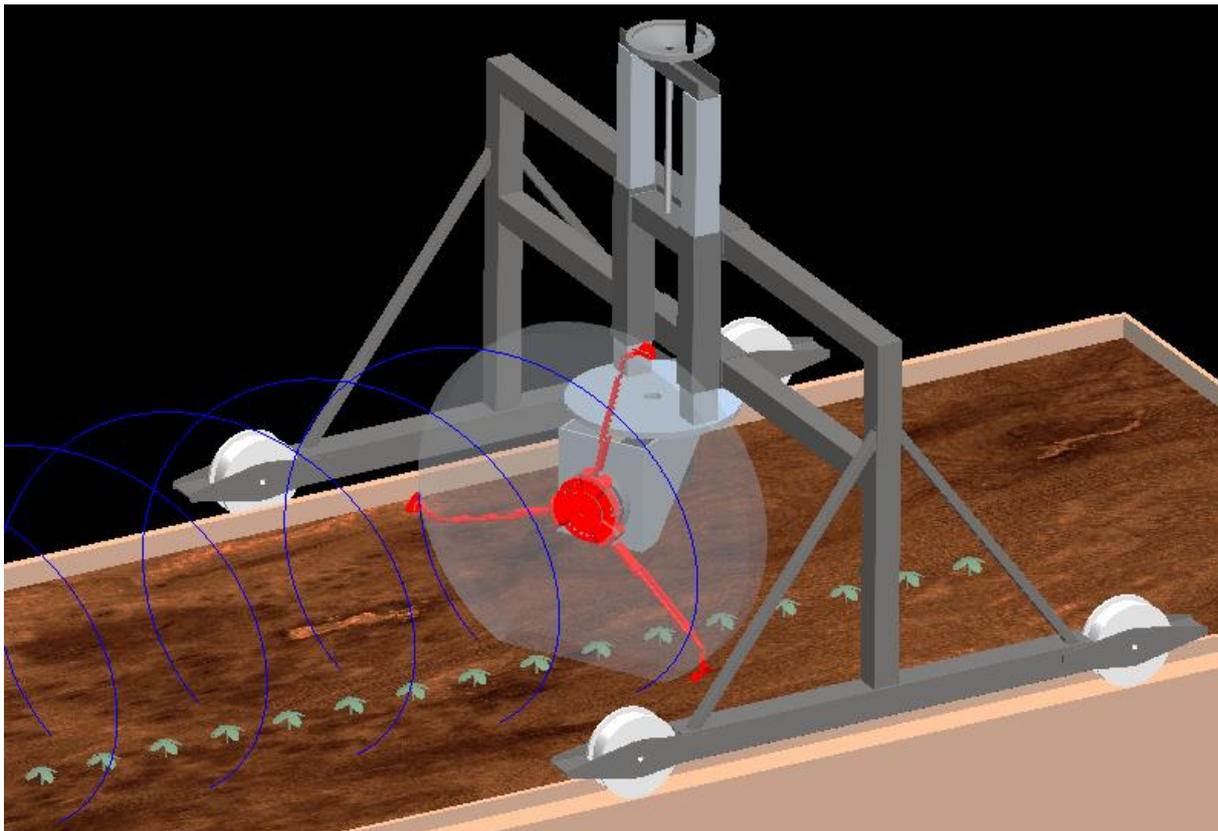


Bild 4.46: Pro/Engineer CAD-Modell der Bodenrinne mit dargestellter Trajektorie eines Hackwerkzeugs (blaue Bahnkurve)

4.3.2 CAD-Modell des Versuchsträgers für Feldversuche

Das CAD-Modell des traktorgebundenen Versuchsträgers baut auf dem CAD-Modell der Bodenrinne auf. Da die Trajektorie gegenüber dem Modell der Bodenrinne unverändert ist, wurden keine kinematischen Untersuchungen durchgeführt. Das Modell diente in erster Linie als Grundlage für Bauraumuntersuchungen. So war es möglich, verschiedene Werkzeugkonfigurationen und Baugruppenzusammenstellungen vor dem Bau des eigentlichen Versuchsträgers zu untersuchen.

In Bild 4.47 ist links das Gesamtmodell mit dem Traktor dargestellt. Wie im rechten Bild zu sehen ist, konnten für Bauraumuntersuchungen Schnittansichten erzeugt, oder ganze Baugruppen ausgeblendet werden. Bei bekanntem Bildwinkel α der Kameraobjektive konnte der Bildausschnitt bei verschiedenen Kamerapositionen bereits vor den Versuchen simuliert werden, so dass der optimale Abstand zwischen Boden und Kamera ermittelt werden konnte.

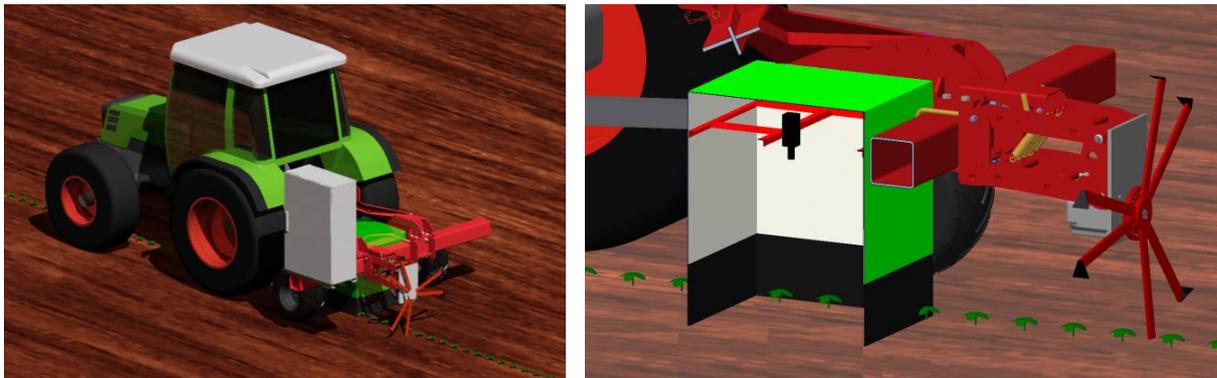


Bild 4.47: Pro/E CAD-Modell des Versuchsträgers (links), Schnittansicht (rechts)

4.4 Versuche

Um die Pflanzenerkennung zu entwickeln und das Zusammenspiel der Komponenten zu testen und zu bewerten, wurden Versuche mit unterschiedlichen Abstraktionsgraden durchgeführt. Dies erlaubte das schrittweise Annähern an die realen in der Landwirtschaft vorhandenen Umgebungsbedingungen auf dem Feld. Versuche mit der reinen Pflanzenerkennung bei Laborbedingungen bilden dabei den höchsten Abstraktionsgrad. Das gleiche gilt für die Versuche mit der Aktorik ohne Pflanzenerkennung. Pflanzenerkennungsversuche auf dem Feld bildeten die nächste Stufe bei der Verringerung

des Abstraktionsgrades. Die Versuche auf dem Feld mit dem Zusammenspiel von Pflanzenerkennung und Aktorik ermöglichten das Zusammentragen von Ergebnissen unter Realbedingungen.

4.4.1 Gewächshausversuche

Um unabhängig von der Witterung ganzjährig Bilderkennungsversuche durchzuführen, wurden Zuckerrüben in Pflanztöpfen angezogen. Durch die kontrollierte Versorgung mit Nährstoffen und Wasser sowie dem Schutz vor extremen Witterungsereignissen konnte ein gleichmäßiger Aufwuchs sichergestellt werden. In Bild 4.48 sind die Versuchspflanzen und der Aufbau für die Bildaufnahme der Pflanzen dargestellt. Die Abbildung zeigt einen einfachen Aufbau zur Aufnahme von Farbbildern mit einer CCD-Farbkamera. Die Kamera und eine Beleuchtung (Anhang 8.3.1.1) wurden in einer fest definierten Höhe über dem Boden an einem Stativ angebracht. Die Auswertung der Bilder erfolgte online mit einem Notebook. Zusätzlich wurden neben den Auswertungsdaten auch die Rohbilder für nachfolgende Untersuchungen gespeichert.

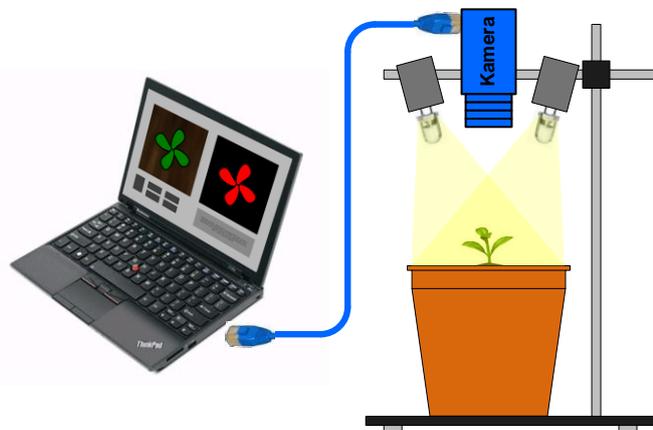


Bild 4.48: Pflanztopfversuche unter einem Wetterschutzdach (links), Versuchsaufbau mit Pflanze, Beleuchtung, CCD-Kamera und Notebook zur Bildakquisition (rechts)

Die Zuckerrüben wurden in den Entwicklungsstadien EC 10 bis EC 19 (Anhang 8.1) untersucht, da eine Unkrautregulierung in der Reihe in diesem Bereich stattfinden kann. Da die bei der Bildaufnahme erzeugten Daten den Anfang in der Datenverarbeitungskette darstellen, wird die Qualität der Pflanzenerkennung und Positionsbestimmung maßgeblich durch diesen Schritt bestimmt.

4.4.2 Versuche auf der Bodenrinne

Vor der Verwendung von echten Zuckerrüben wurden künstliche Pflanzen als Ersatz verwendet. Neben der Pflanzenerkennung wurden diese Versuche in erster Linie für die Untersuchung der Dynamik und Genauigkeit der Bildverarbeitungs-Servomotor-Kette und zur Verbesserung der Motorregelung durchgeführt. Diese Pflanzendummies bieten den Vorteil, dass sich ihr Aussehen nicht verändert und die Versuche somit jederzeit reproduzierbar sind.

In Bild 4.49 sind die beiden verwendeten Arten der Pflanzendummies dargestellt. Für die Versuche zur Optimierung der Motoralgorithmen, bei denen es nicht um die Pflanzenerkennung ging, wurden grüne Stäbe bzw. Punktmarker mit 5 mm Durchmesser verwendet. Da diese von oben betrachtet nur als grüner Punkt wahrgenommen werden, ist eine Mittelpunktbestimmung sicherer als bei pflanzenähnlichen Objekten. Die Simulation früher Entwicklungsstadien (EC 14, Anhang 8.1) wurde mit Kunststoffpflanzen erreicht, die von oben betrachtet eine Hüllkurve von ca. 40 mm aufweisen. Ein Versuch wurde für eine Versuchsparameter-Paarung zehnmal durchgeführt.

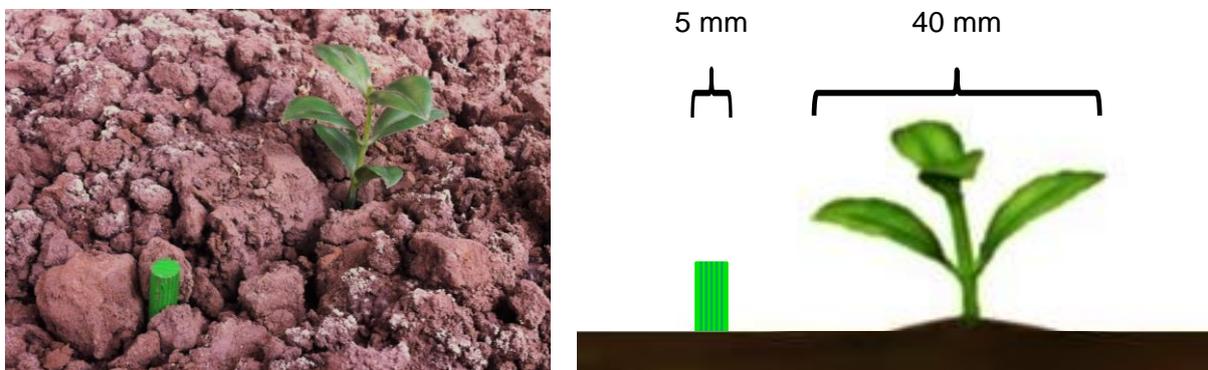


Bild 4.49: Pflanzendummies als einfache, grüne Punktmarker mit 5 mm Durchmesser oder als pflanzenähnliche Kunststoffnachbildungen mit ca. 40 mm Hüllkreisdurchmesser

4.4.3 Feldversuche

Die Feldversuche wurden zum Teil parallel zu den Laborversuchen durchgeführt. Die ersten Schritte waren Versuche zur Pflanzenerkennung mit verschiedenen Kameras. Hierzu wurden sechs Reihen Zuckerrüben mit einem Reihenabstand von 500 mm gesät. Die 50 m langen Parzellen wurden in 1,5 m breite Abschnitte geteilt, über die das Versuchsfahrzeug für die Bildaufnahmen oder Hackversuche fahren konnte (Bild 4.51, Bild 4.50).



Bild 4.50: Versuchsfläche mit dreireihigen Parzellen (links), Versuchsaufbau zur Bildaufnahme während der Fahrt (rechts)

Bild 4.51 veranschaulicht, dass die Bildaufnahmen und die Hackversuche jeweils in der zweiten und fünften Reihe der Parzellen durchgeführt wurden. Die relevante Messstrecke entsprach jeweils nur einem Teil der gesamten Parzellenlänge. Für die Bonitierung wurde nur der 100 mm breite intra-row-Bereich der Pflanzenreihe untersucht, da dieser Streifen von Hackgeräten für den inter-row-Bereich nicht bearbeitet werden kann (PETZOLD & KOLBE 1998). Die ersten Aufnahmen der Pflanzen dienten vor allem der Erstellung einer Bilddatenbank der Pflanzen in ihren verschiedenen Entwicklungsstadien. Im Gegensatz zu den Gewächshausversuchen wurden auf den auf dem Feld aufgenommenen Bildern auch die Auswirkungen von Wind und Wetter auf das Aussehen des Blattwerks deutlich.

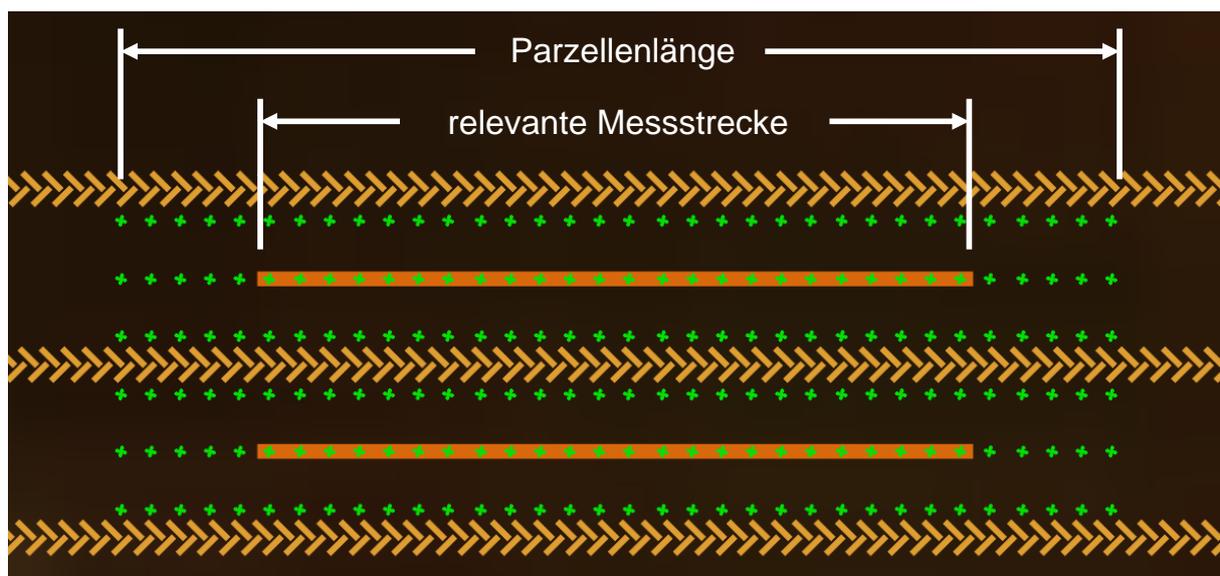


Bild 4.51: Versuchsfläche mit zweigeteilten, sechsreihigen Parzellen inklusive zwei kürzeren relevanten Messstrecken in der zweiten und fünften Reihe

Anders als im Labor wurden die Pflanzen nicht in fest definierten Abständen innerhalb der Reihe angeordnet. Die Aussaat erfolgte mit einer Serieneinzelkornsämaschine, so dass die Standorte durch die bei der Aussaat bekannten Probleme wie Verrollung oder fehlerhafte Vereinzlung der Rübenpille zu Abweichungen vom eingestellten Sollabstand (190/200 mm) führten. Die Standorte wurden, falls erforderlich für die Versuche, nach dem Feldaufgang gemessen.

Die Kamera speicherte während der Fahrt Farb- und/oder Nahinfrarotbilder der jeweiligen Parzellen. In diesem Fall wurde auf eine Beleuchtung verzichtet, so dass die Belichtungszeit der vorherrschenden Sonneneinstrahlung angepasst werden musste. Parallel zu den reinen Bildaufnahmen wurden auf denselben Flächen die Versuche mit dem angebauten Versuchsträger (Kapitel 4.1.2) sowie die eigentlichen Hackversuche durchgeführt. Neben der Untersuchung der Motordynamik wurde die Präzision der Pflanzenerkennung und der damit einhergehenden Genauigkeit der Hackwerkzeuge getestet (Bild 4.52).



Bild 4.52: Kontrolle der Positionsgenauigkeit der Hackwerkzeuge mit einem Anreißer anstelle der Hackwerkzeuge (links: Spur des Anreißers rot markiert) sowie bei den Hackversuchen (rechts: gehackte Fläche rot markiert)

Nach jedem Versuch konnten die Sichtkontrollen auf dem Feld oder die Analyse der Bild- und Positionsdaten ein Optimierungspotential der Algorithmen aufzeigen. Um die geänderte Software über einen längeren Zeitraum in den verschiedensten Entwicklungsstadien zu überprüfen, wurden die Versuchspflanzen im 3-wöchigen Abstand gesät. In Tabelle 4.3 ist ein Ausschnitt aus der Versuchsübersicht dargestellt, in der neben den Daten zum Entwicklungsstadium auch Einstellparameter der Kamera, Wetterbedingungen und

Ergebnisse zu den Hackversuchen eingetragen wurden. So konnten die Ergebnisse später mit den Umgebungsbedingungen verglichen und mögliche Ursachen für einen veränderten Habitus der Pflanzen ermittelt werden.

Tabelle 4.3: Ausschnitt aus der Versuchsübersicht

folder (date)	location	sector	species	generation	Temp.	cloudy	partly cloudy	open sky	time	camera distance to soil [mm]	Exposure time [µsec]		aperture	2 leaf	4 leaf	4-6 leaf	6 leaf	number of plants	correct detected plants	not detected plants	false detected plants	correct detected plants [%]	not detected plants [%]	false detected plants [%]
											RGB	IR												
2012-09-19-03	CKA	sb		07	16°C	<input checked="" type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	16.00	530	300	wide open	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	654	532	122	80	81,35	18,65	12,23
2012-09-19-04	CKA	sb		07	16°C	<input checked="" type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	16.00	530	300	wide open	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	45	41	4	7	91,11	8,89	15,56
2012-09-19-05	CKA	sb		07	16°C	<input checked="" type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	16.00	530	300	wide open	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	607	436	171	72	71,83	28,17	11,86
2012-09-23-01	CKA	sb		07	16°C	<input checked="" type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	16.00	530	300	wide open	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	114	114	0	14	100,00	0,00	12,28
2012-09-23-02	CKA	sb		07	16°C	<input checked="" type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	16.00	530	300	wide open	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	25	25	0	5	100,00	0,00	20,00
2012-09-23-03	CKA	sb		07	16°C	<input checked="" type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	16.00	530	300	wide open	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	48	48	0	13	100,00	0,00	27,08
2012-09-23-04	CKA	sb		07	16°C	<input checked="" type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	16.00	530	300	wide open	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	103	103	0	15	100,00	0,00	14,56
2012-09-23-05	CKA	sb		07	16°C	<input checked="" type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	16.00	530	300	wide open	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	63	63	0	7	100,00	0,00	11,11
2012-09-23-06	CKA	sb		07	16°C	<input checked="" type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	16.00	530	300	wide open	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	0				#DIV/0!	#DIV/0!	#DIV/0!
2012-09-23-07	CKA	sb		07	16°C	<input checked="" type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	16.00	530	300	wide open	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	0				#DIV/0!	#DIV/0!	#DIV/0!
2012-10-01-01	CKA	sb		07	18°C	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>	17.00	530	300	wide open	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	91	91	0	44	100,00	0,00	48,35
2012-10-01-02	CKA	sb		07	18°C	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>	17.00	530	300	wide open	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	36	36	0	27	100,00	0,00	75,00
2012-10-01-03	CKA	sb		07	18°C	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>	17.00	530	300	wide open	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	66	66	0	12	100,00	0,00	18,18
2012-10-01-04	CKA	sb		07	18°C	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>	17.00	530	300	wide open	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	27	27	0	10	100,00	0,00	37,04
2012-10-01-05	CKA	sb		07	18°C	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>	17.00	530	300	wide open	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	71	71	0	10	100,00	0,00	14,08
2012-10-01-06	CKA	sb		07	18°C	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>	17.00	530	300	wide open	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	79	79	0	13	100,00	0,00	16,46
2012-10-01-07	CKA	sb		07	18°C	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>	17.00	530	300	wide open	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	0				#DIV/0!	#DIV/0!	#DIV/0!
2012-10-01-08	CKA	sb		07	18°C	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>	17.00	530	300	wide open	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	0				#DIV/0!	#DIV/0!	#DIV/0!
2012-10-01-09	CKA	sb		07	18°C	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>	17.00	530	300	wide open	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	0				#DIV/0!	#DIV/0!	#DIV/0!
2012-10-19-01	CKA	sb		08	20°C	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>	12.00	530	300	wide open	<input checked="" type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	0				#DIV/0!	#DIV/0!	#DIV/0!
2012-10-19-02	CKA	sb		07	20°C	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>	12.00	530	300	wide open	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	0				#DIV/0!	#DIV/0!	#DIV/0!
2012-10-19-03	CKA	sb		08	20°C	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>	12.00	530	300	wide open	<input type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	0				#DIV/0!	#DIV/0!	#DIV/0!
2012-10-19-04	CKA	sb		08	20°C	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>	12.00	530	300	wide open	<input checked="" type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	0				#DIV/0!	#DIV/0!	#DIV/0!
2012-10-19-05	CKA	sb		08	20°C	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>	12.00	530	300	wide open	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	290	161	129	80	55,52	44,48	27,59
2012-10-19-06	CKA	sb		08	20°C	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>	12.00	530	300	wide open	<input checked="" type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	18	16	2	2	88,89	11,11	11,11
2012-10-19-07	CKA	sb		08	20°C	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>	12.00	530	300	wide open	<input checked="" type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	152	124	28	24	81,58	18,42	15,79
2012-10-19-08	CKA	silphie		02	20°C	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>	12.00	530	300	wide open	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	0				#DIV/0!	#DIV/0!	#DIV/0!

5. Ergebnisse und Diskussion

Die Ergebnisse teilen sich in die Bereiche Simulation, Laborversuche und Feldversuche auf. Bei den Labor- und Feldversuchen stand die Pflanzenerkennung mithilfe von Bildverarbeitungsmethoden im Vordergrund. Die Versuche zur online durchgeführten Pflanzenerkennung mit direkt nachfolgender Unkrautregulierung lieferten die abschließenden Ergebnisse.

5.1 Simulation

Um die Ergebnisse der Simulation zu visualisieren und zu bewerten, wird zunächst ein Koordinatensystem festgelegt. Das Koordinatensystem ist im Rahmen der Simulation ein globales ortsfestes System. Wie in Bild 5.1 zu sehen ist, zeigt die x-Achse in Fahrtrichtung. Da bei den Simulationen, im Gegensatz zu den Feldversuchen, kein Fahrtrichtungswechsel vorgenommen wird und die Reihen gerade sind, verändert sich auch die Orientierung des Koordinatensystems nicht. Die z-Achse ist orthogonal zum Boden ausgerichtet und die y-Achse markiert die seitliche Position neben der Reihe.

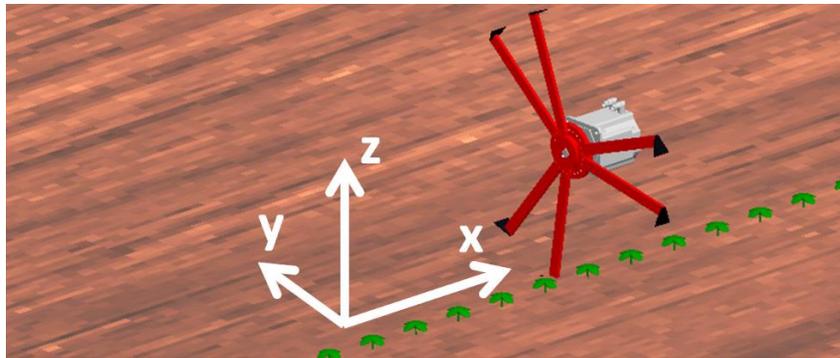


Bild 5.1: Koordinatensystem der CAD-Simulationsumgebung, wobei die x-Koordinate parallel zur Pflanzenreihe in Fahrtrichtung zeigt

5.1.1 Einfluss der Motorausrichtung auf die Kinematik

Bei Versuchen auf der Bodenrinne war zu erkennen, dass die Werkzeuge den Boden nicht orthogonal zur Fahrtrichtung bearbeiten. Die mit einer ProE-Simulation (Bild 5.2 links) aufgezeichneten Bahnkurven der Werkzeuge eines in Fahrtrichtung angeordneten Motors (Bild 5.2 Mitte) sind zur Veranschaulichung als zweidimensionale Projektion auf der x-y-Ebene in Bild 5.3 dargestellt.

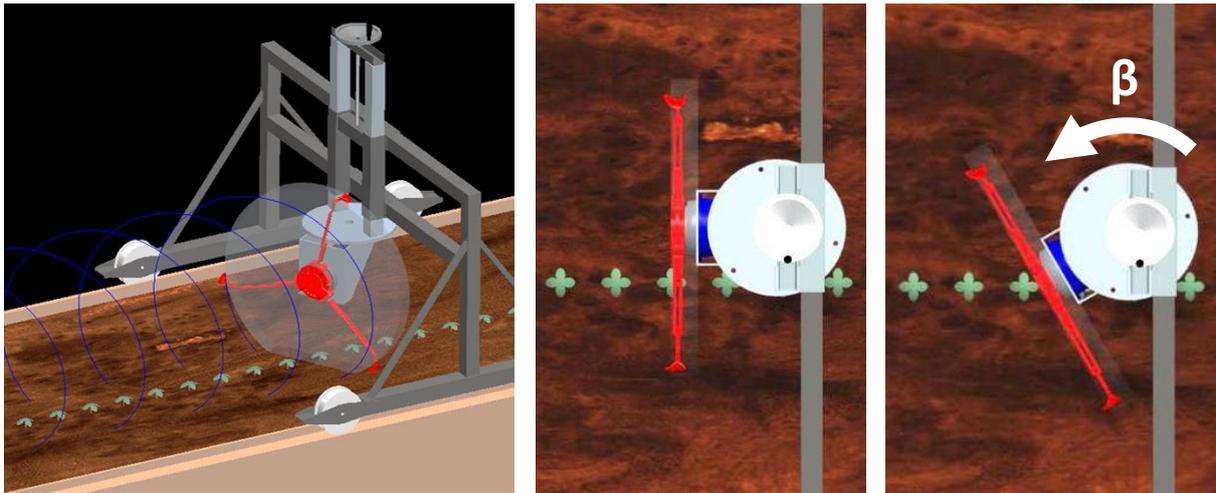


Bild 5.2: ProE-Modell mit Bahnkurve (links) und einem um den Winkel β gedrehten Motor (rechts) sowie einer Ansicht mit $\beta = 0^\circ$ (Mitte)

Die simulierte Fahrtrichtung führt von links nach rechts. Die roten Pfeile markieren den Bereich, in dem die Werkzeuge den Boden zwischen den grün dargestellten Kulturpflanzen bearbeiten. Hier wird deutlich, dass der Winkel zwischen Pfeilrichtung und Fahrtrichtung nicht rechtwinklig ist. Um dies zu korrigieren, muss der Antriebsmotor um den Winkel β in der Horizontalebene gedreht werden (Bild 5.2 rechts). Dies wurde sowohl im ProE-Modell, als auch auf der Bodenrinne durchgeführt. Der Drehwinkel β ist abhängig von der Anzahl der Hackwerkzeuge am Rotor, der Werkzeugarmlänge, dem Pflanzenabstand und der Anzahl der Hackbewegungen zwischen zwei Pflanzen.

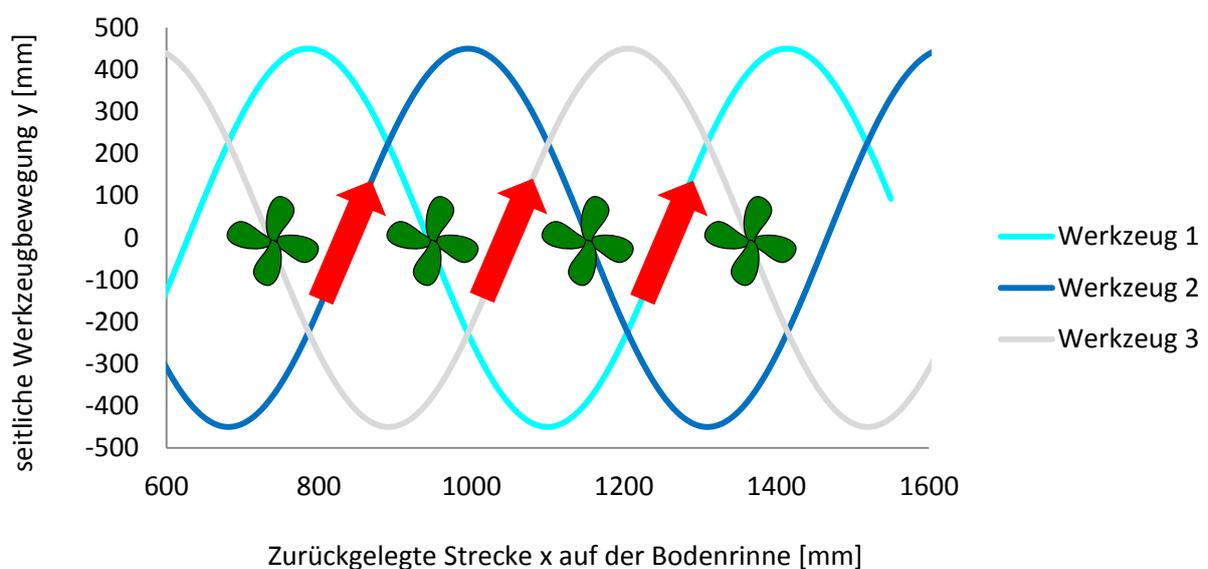


Bild 5.3: Bahnkurvenprojektion der Hackwerkzeuge bei 3 Hackarmen und einer zur Pflanzenreihe parallelen Motorachse zum Antrieb der Werkzeuge (Projektion auf der x-y-Ebene)

Bei den folgenden Ergebnissen wurde der äußerste Punkt des Werkzeuges mit einem Abstand von ca. 555 mm zur Rotationsachse eingestellt und der Pflanzenabstand betrug 200 mm. Es wurde nur eine Hackbewegung pro Pflanzenzwischenraum gewählt, so dass ein Werkzeug bei insgesamt 3 Armen jeden dritten Pflanzenzwischenraum bearbeitete. Die Einflüsse durch die zuvor genannten Faktoren wurden bereits durch GOBOR (2007) eingehend untersucht, weshalb nur auf die Änderung der Motorposition und die Anzahl der Werkzeuge eingegangen wird. Wird nur die Änderung des Drehwinkels β betrachtet, so ist in Bild 5.4 schon ein deutlicher Einfluss zu sehen.

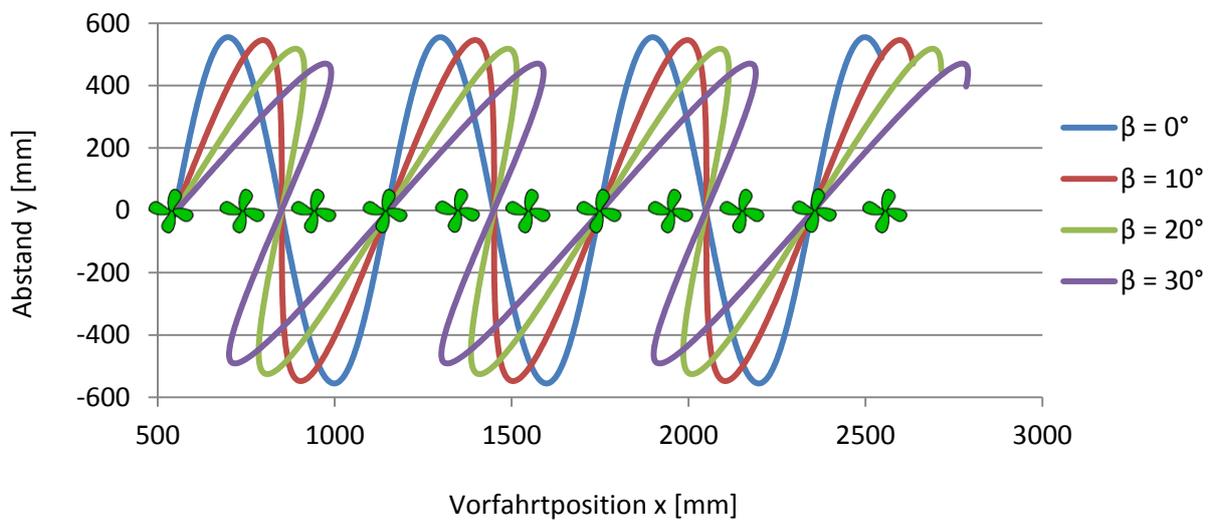


Bild 5.4: Bahnkurvenprojektion eines Hackwerkzeuges bei 3 Hackarmen und 4 Winkelpositionen des Motors zwischen Pflanzenreihe und Motorachse ($\beta = 0^\circ, 10^\circ, 20^\circ$ und 30°)

Bei Betrachtung der einzelnen Einstellungen sind die Auswirkungen besser zu untersuchen. Als Grundlage wird die Trajektorie eines einzelnen Werkzeuges betrachtet, bei dem die Antriebsachse des Motors parallel zur Pflanzenreihe ($\beta = 0^\circ$) liegt (Bild 5.5). Die Projektion auf der x-y-Ebene zeigt, dass ein Werkzeug die Pflanzenreihe bei der Vorfahrtsposition 700 mm nahezu geradlinig schneidet. Dementsprechend stark ist die Krümmung an den Totpunkten der Projektionskurve. Die auf der Projektion sichtbaren Schnittpunkte zwischen Bahnkurve und Pflanzenreihe sind nur zur Hälfte Punkte, an denen das Werkzeug in der Reihe hackt. In Bild 5.5 sind diese Punkte rot markiert. Auf den dazwischen liegenden Schnittpunkten befindet sich das Werkzeug am höchsten Punkt über der Pflanzenreihe. Das Werkzeug durchschneidet die Pflanzenreihe nicht orthogonal.

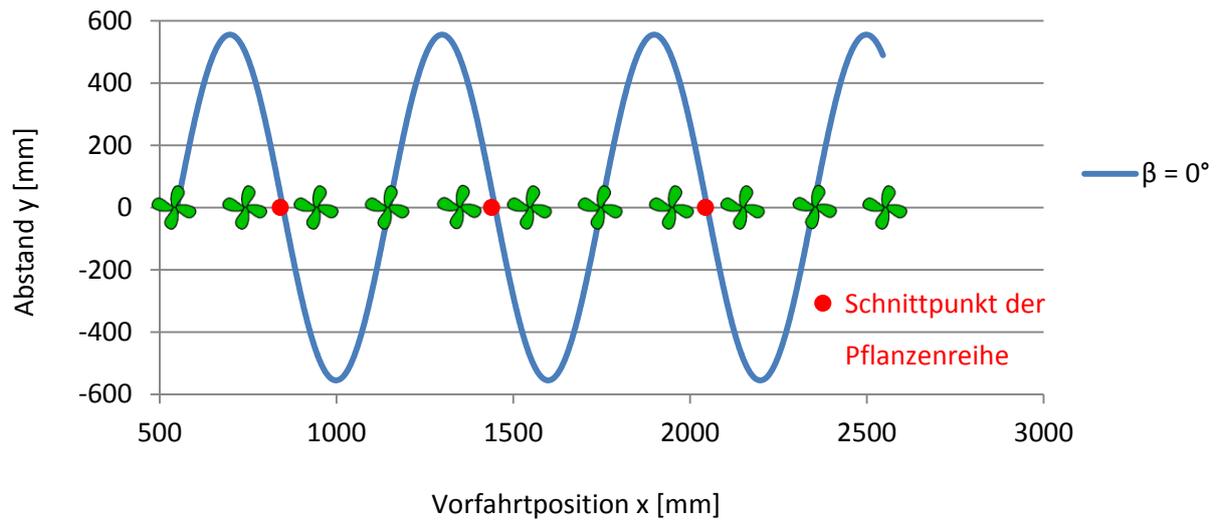


Bild 5.5: Bahnkurvenprojektion eines Hackwerkzeuges bei 3 Hackarmen und einem Winkel β von 0° zwischen Pflanzenreihe und Motorachse. Die Punkte, an denen das Werkzeug die Pflanzenreihe unterhalb des Bodenniveaus schneidet, sind rot markiert

Bei einer Drehung des Motors um den Winkel β verändert sich dieses Bild. In Bild 5.6 ist die Projektion bei einer Drehung um den Winkel $\beta = 10^\circ$, in Bild 5.7 um $\beta = 20^\circ$ und in Bild 5.8 um $\beta = 30^\circ$ dargestellt. Bei der dargestellten Konstellation für 3 Werkzeuge ist eine Drehung um $\beta = 10^\circ$ optimal, da die Reihe vom Werkzeug nahezu orthogonal geschnitten wird.

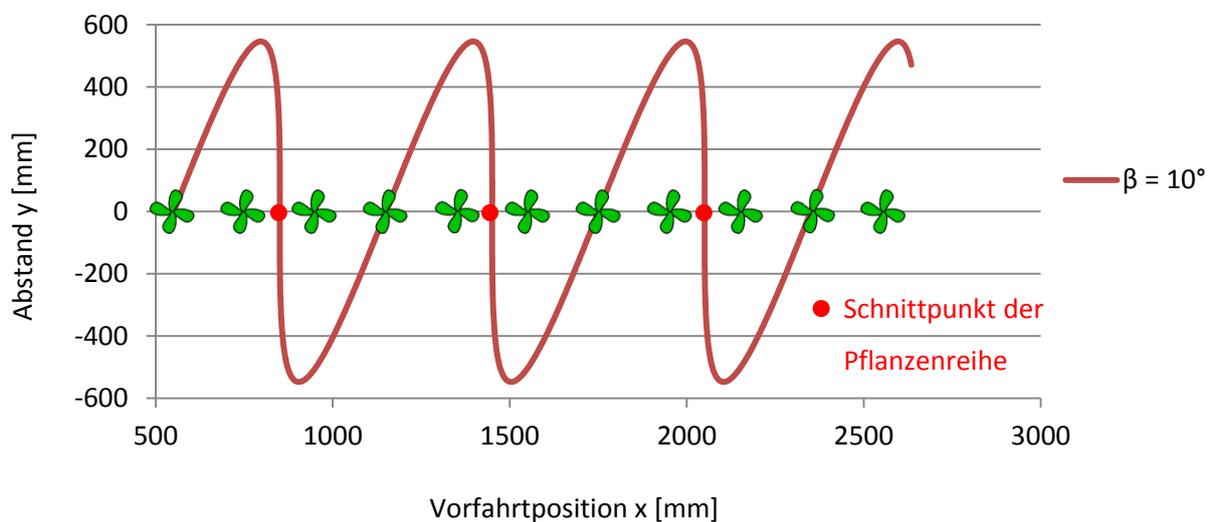


Bild 5.6: Bahnkurvenprojektion eines Hackwerkzeuges bei 3 Hackarmen und einem Winkel β von 10° zwischen Pflanzenreihe und Motorachse. Die Punkte, an denen das Werkzeug die Pflanzenreihe unterhalb des Bodenniveaus schneidet, sind rot markiert

Wie in Bild 5.6 zu erkennen ist, schneidet das Werkzeug die Pflanzenreihe in einem Winkel von 90° . Dies hat den Vorteil, dass die Hackwerkzeuge näher an die Pflanzen herangeführt werden können und somit eine größtmögliche Fläche gehackt wird. Wird der Motor noch weiter gedreht, entsteht wieder der gleiche Nachteil eines nicht orthogonalen Winkels zwischen der Werkzeug-Bahnkurve und der Pflanzenreihe, wie in Bild 5.7 und Bild 5.8 zu sehen ist.

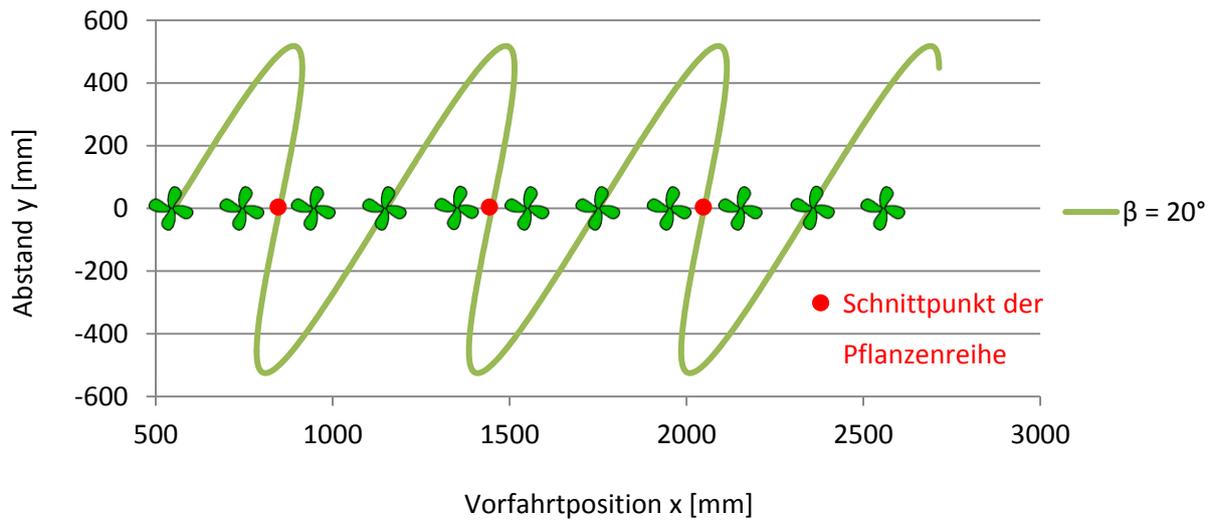


Bild 5.7: Bahnkurvenprojektion eines Hackwerkzeuges bei 3 Hackarmen und einem Winkel β von 20° zwischen Pflanzenreihe und Motorachse. Die Punkte, an denen das Werkzeug die Pflanzenreihe unterhalb des Bodenniveaus schneidet, sind rot markiert

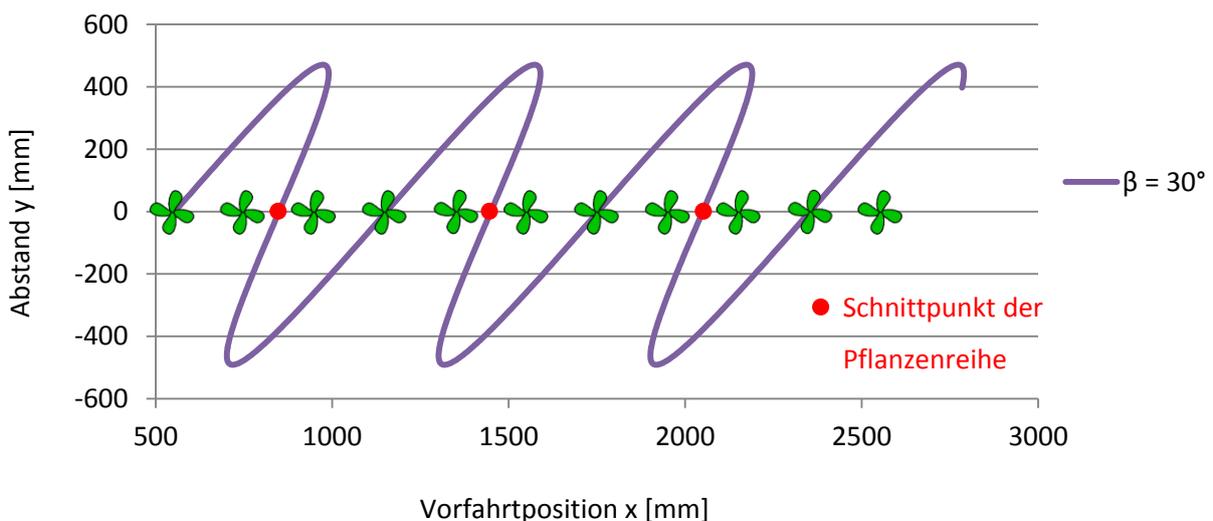


Bild 5.8: Bahnkurvenprojektion eines Hackwerkzeuges bei 3 Hackarmen und einem Winkel β von 30° zwischen Pflanzenreihe und Motorachse. Die Punkte, an denen das Werkzeug die Pflanzenreihe unterhalb des Bodenniveaus schneidet, sind rot markiert

Bei Betrachtung der Bahnkurve aus der Perspektive eines neben der Reihe stehenden Beobachters wird die Bewegung unterhalb der Bodenoberfläche sichtbar. In Bild 5.9 ist die gleiche Bahnkurve wie in Bild 5.5 dargestellt, nur dass hier eine Projektion auf der x-z-Ebene dargestellt ist.

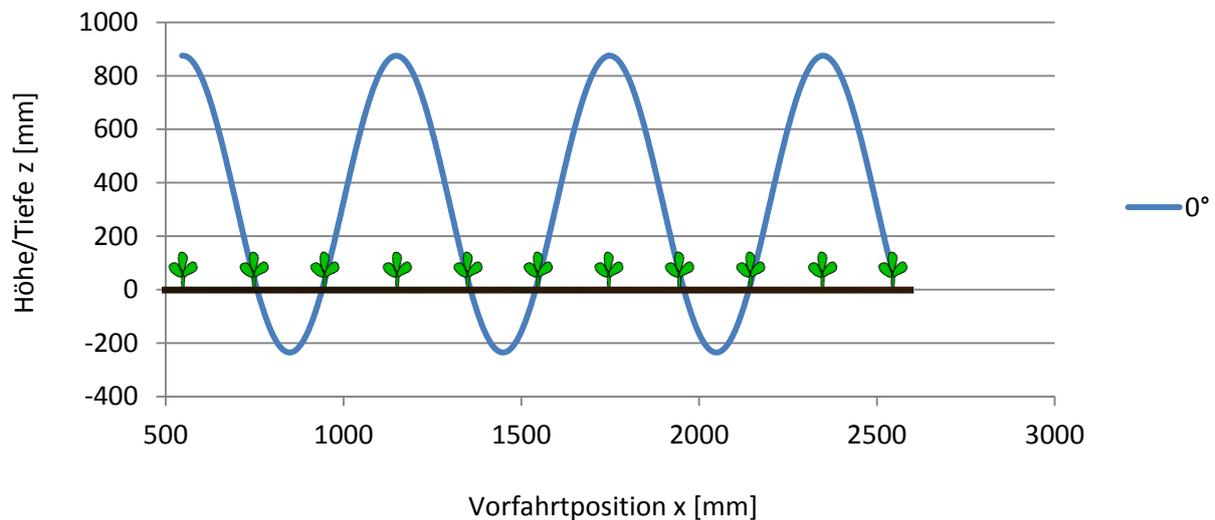


Bild 5.9: Bahnkurvenprojektion eines Hackwerkzeuges bei 3 Hackarmen und einem Winkel β von 0° zwischen Pflanzenreihe und Motorachse (Projektion auf der x-z-Ebene)

Wird nun die Motorachse wie in Bild 5.6 um $\beta = 10^\circ$ gedreht, verändert sich die Projektion auf der x-z-Ebene zu der in Bild 5.10 dargestellten Weise. Die dreidimensionale Bahnkurve bleibt trotz der Knickpunkte in der Projektion auf der gesamten Länge differenzierbar. Die Knickpunkte stellen dar, dass das Werkzeug in den jeweiligen Pflanzen-Zwischenräumen orthogonal zur Pflanzenreihe bewegt wird und der Abstand in x-Richtung zur vorherigen und zur nächsten Pflanze nahezu gleich bleibt. Dieser Bereich der Bahnkurve liegt unterhalb der Bodenoberfläche. Die Bereiche oberhalb davon zeigen die Bewegung zum jeweils nächsten Pflanzenzwischenraum, der bearbeitet werden soll.

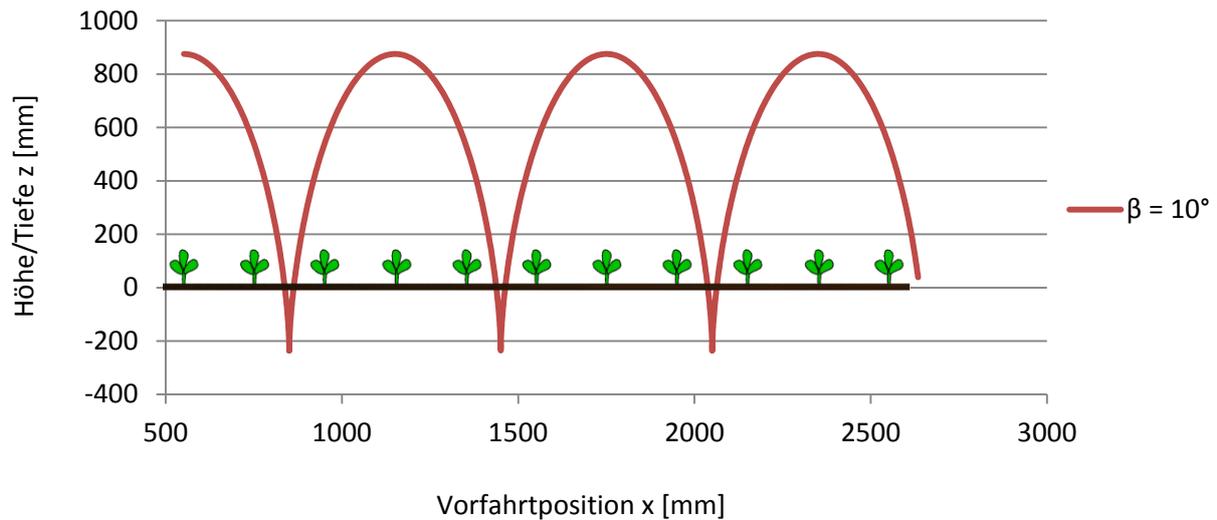


Bild 5.10: Bahnkurvenprojektion eines Hackwerkzeuges bei 3 Hackarmen und einem Winkel β von 10° zwischen Pflanzenreihe und Motorachse (Projektion auf der x-z-Ebene)

Durch diese Trajektorie wirken sich Lenkbewegungen des Fahrzeuges oder des ziehenden Traktors nicht negativ auf den Schutzraum um die Nutzpflanze aus. Bild 5.11 veranschaulicht, dass Abweichungen von 200 mm unabhängig von der Richtung der Lenkbewegung keine relevanten Auswirkungen auf die Bahnkurve im Bereich der Reihe haben.

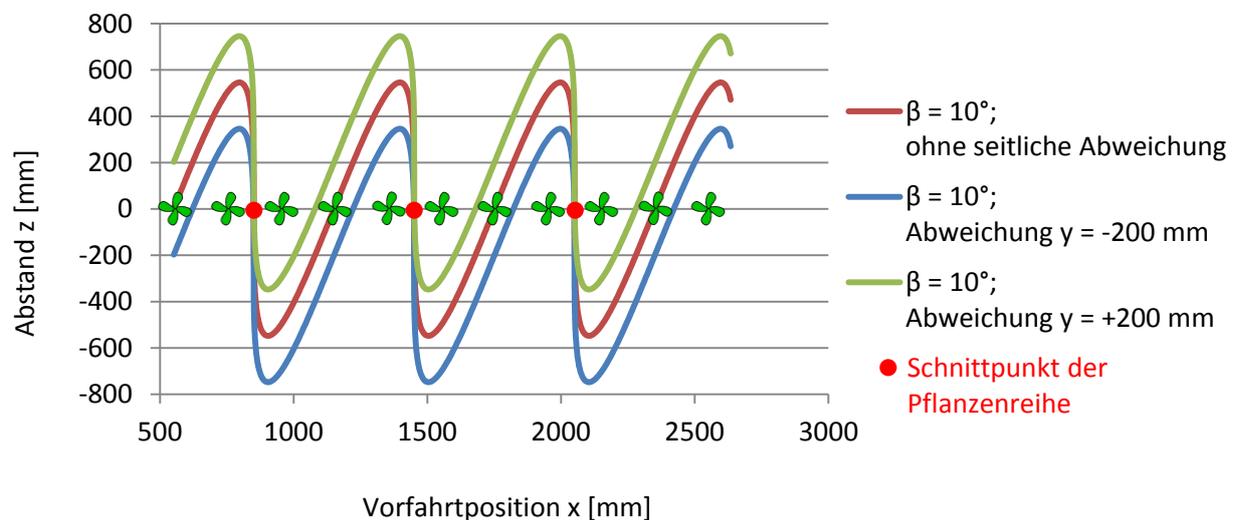


Bild 5.11: Bahnkurvenprojektion eines Hackwerkzeuges bei Überfahrt auf der Ideallinie und mit seitlichen Abweichungen von ± 200 mm (Projektion auf der x-y-Ebene)

Im Rahmen der Simulation wurden auch die Geschwindigkeiten eines Werkzeuges errechnet, die bei verschiedenen Motorpositionen auftreten. In Bild 5.12 ist die absolute Geschwindigkeit eines Werkzeuges bei einer Vorfahrtgeschwindigkeit von 2000 mm/s in x-Richtung dargestellt. Die optimale Einstellung der Motorposition im Bereich von $\beta = 10^\circ$ wird auch durch den Geschwindigkeitsverlauf bestätigt. Die Geschwindigkeit in x-Richtung fällt in den zu hackenden Pflanzen-Zwischenräumen auf 0 mm/s ab und steigt in den Zeitabschnitten dazwischen auf die doppelte Geschwindigkeit, verglichen mit der Einstellung $\beta = 0^\circ$, an.

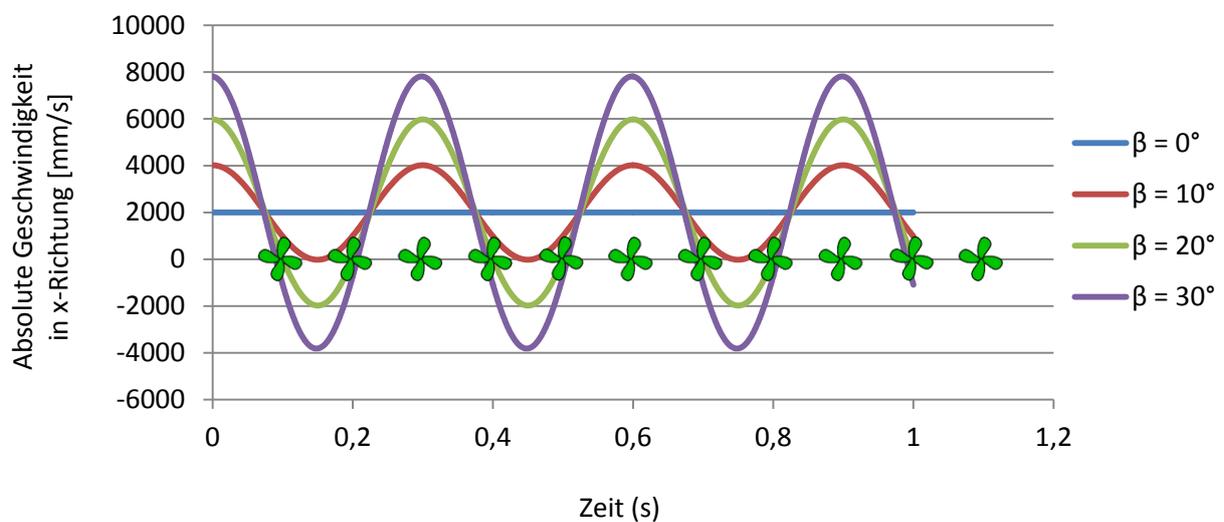


Bild 5.12: Absolute Geschwindigkeit eines Hackwerkzeuges in x-Richtung bei 3 Hackarmen und 4 Winkelpositionen des Motors ($\beta = 0^\circ, 10^\circ, 20^\circ$ und 30° zwischen Pflanzenreihe und Motorachse) (Vorfahrtgeschwindigkeit: 2 m/s)

Die Ergebnisse der Trajektorienimulation zeigen, dass eine Veränderung der Motorposition den Einsatz bei traktorgeführten Systemen in Bezug auf den Schutz der Kulturpflanzen sicherer gestalten kann. Neben den Simulationen wurden auch Tests auf der Bodenrinne zu verschiedenen Werten von β durchgeführt. Die durch die Werkzeuge erzeugten Spuren im Boden bestätigten die Ergebnisse der Simulation.

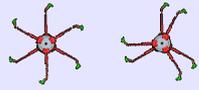
5.1.2 Einfluss der Werkzeuganzahl auf die Kinematik

Neben dem Winkel β der Motorposition hat auch die Anzahl der montierten Werkzeuge einen Einfluss auf die Kinematik. In Kapitel 5.1.1 wurde beispielhaft ein optimaler Winkel $\beta = 10^\circ$ simuliert, bei dem jedes Werkzeug die Pflanzenreihe orthogonal kreuzt. Genauso

kann für eine unterschiedliche Anzahl von Werkzeugen ein optimaler Winkel β angegeben werden. Mithilfe der Simulation wurden verschiedene Konstellationen errechnet.

Neben der Anzahl der Werkzeuge wurde auch die Anzahl der Hackbewegungen zwischen zwei aufeinanderfolgenden Kulturpflanzen variiert. In Tabelle 5.1 ist eine Übersicht der verschiedenen Kombinationen dargestellt. Hierbei wurde ein Pflanzenabstand von 200 mm angenommen. Tendenziell führt ein größerer Pflanzenabstand zu einem größeren, optimalen Winkel β . Untersuchungen zu unterschiedlichen Armlängen wurden bereits von GOBOR (2007) durchgeführt, so dass auf eine weitere Betrachtung des Aspektes verzichtet wird.

Tabelle 5.1: Übersicht verschiedener Hack-Kinematiken bei 200 mm Pflanzenabstand und 555 mm Armlänge sowie die dazu berechneten Winkel zwischen Motorachse und Pflanzenreihe, die zu einer optimalen Werkzeugbewegung im Boden führen.

Anzahl montierter Werkzeuge am Rotor	Anzahl der Hackbewegungen zwischen zwei Pflanzen	Winkel β zwischen Motorachse und Pflanzenreihe
3 	1	9,76°
	2	4,88°
	3	3,25°
6 	1	19,52°
	2	9,76°
	3	6,51°
9 	1	29,28°
	2	14,64°
	3	9,76°

Für die Versuche zur Unkrautregulierung auf dem Feld wurden nur zwei Varianten aufgebaut. Eine Versuchsreihe mit allen in der Tabelle aufgeführten Varianten hätte jeweils die Entwicklung einer angepassten Motorsteuerung und -regelung erfordert. Bei den Feldversuchen wurde deshalb der Schwerpunkt auf die Variante mit 6 Werkzeugen und jeweils 2 Hackbewegungen sowie 3 Werkzeuge mit 3 Hackbewegungen zwischen zwei aufeinanderfolgenden Kulturpflanzen gesetzt.

5.2 Bildverarbeitung und Pflanzenerkennung

Bei der Betrachtung der Ergebnisse der Bildverarbeitungsverfahren werden zunächst die Versuche mit der zweidimensionalen Kameratechnik analysiert. Darauf aufbauend zeigen erste Ergebnisse der dreidimensionalen Kameratechniken die Möglichkeiten, die Herausforderungen der zweidimensionalen Verfahren zu bewältigen.

5.2.1 Analyse der zweidimensionalen, kamerabasierten Pflanzenerkennung

Die Ergebnisse der Bildverarbeitung und damit der Pflanzenerkennung sind in zwei Kategorien aufteilbar. Zuerst steht die Erkennung der Pflanze im Vordergrund. Dies bedeutet die Abgrenzung der Pflanze von der Umgebung und die Erkennung als Nutzpflanze. Der zweite Teil bezieht sich auf die Genauigkeit der Standorterkennung bzw. Mittelpunktbestimmung.

5.2.1.1 Versuche mit Pflanzendummys

Die Versuche mit Punktmarkern und Kunststoffpflanzen boten die Möglichkeit, auch nach einigen Tagen oder später wiederholbare Umgebungsbedingungen zu nutzen. Da die Objekte den Nutzpflanzen nicht ähneln, wurden die Versuche in erster Linie für grundlegende Funktionsuntersuchungen einzelner Schritte der Bildverarbeitung und der Rotationshacke eingesetzt. Bild 5.13 zeigt ein Originalbild mit dem errechneten Binärbild bei der Verwendung von Dummypflanzen aus Kunststoff.

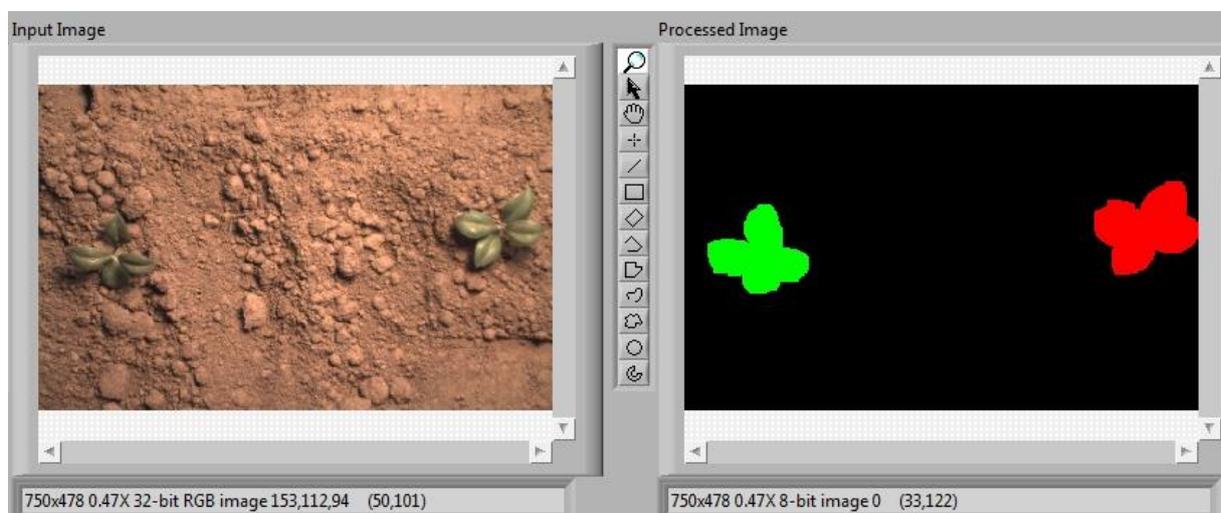


Bild 5.13: Original-Farbbild mit zwei Dummypflanzen aus Kunststoff (links) und das daraus berechnete Binärbild (rechts)

Die zu den Versuchen gehörenden Parameter sind in Tabelle 5.2 aufgelistet. Insgesamt wurden im Rahmen der Entwicklung deutlich mehr Versuche durchgeführt, um das System zu kalibrieren oder weiterzuentwickeln. In dieser Arbeit werden nur die letzten Versuche mit den Kunststoffobjekten dargestellt.

Tabelle 5.2: Übersicht der wichtigsten Parameter der Versuche mit Punktmarkern und Kunststoffpflanzen

Anzahl der Reihen	10
Länge der Messstrecken	6 m
Anzahl der Objekte	30
Abstand zwischen den Objekten	200 mm

In Bild 5.14 ist die Abweichung der vom Bilderkennungssystem errechneten Mittelpunktposition von der realen Position dargestellt. Der Median der Abweichung bei den Punktmarkern liegt bei 2,2 mm und der Median bei den Kunststoffpflanzen bei 2,6 mm. Die Bestimmung des Mittelpunktes bei den Punktmarkern sollte eigentlich genauer möglich sein, da die Stirnseite der Punktmarker auf den Bildern als Ellipse bzw. annähernd als Kreis dargestellt wurde. Das Arithmetische Mittel von 2,4 mm bzw. die Ausreißer von bis zu 7 mm sind durch Fehler bei der trigonometrischen Berechnung der Position oder durch Schlupf des Tastrades zu erklären.

Die trigonometrische Berechnung benötigt neben der Position im Bild den Höhenunterschied zwischen Kameraobjektiv und dem Punktmarker. Die Höhe variiert durch die unterschiedliche Bodenbeschaffenheit. Die Bodenbeschaffenheit ist auch für einen unterschiedlichen Schlupf verantwortlich, welcher die Genauigkeit der Vorfahrtposition beeinflusst und in Kapitel 5.3.1 genauer betrachtet wird.

Bei den Kunststoffpflanzen kommt der Fehler durch die stärker variierende Objektoberfläche hinzu. Im Gegensatz zu den Punktmarkern ist die Pflanzenoberfläche nicht punktsymmetrisch und die Verzerrungen im Randbereich der Bilder fallen durch die unterschiedliche Höhe der Blätter stärker ins Gewicht. Dadurch steigt die durchschnittliche Abweichung auf 3,2 mm und die maximale Abweichung auf 15 mm.

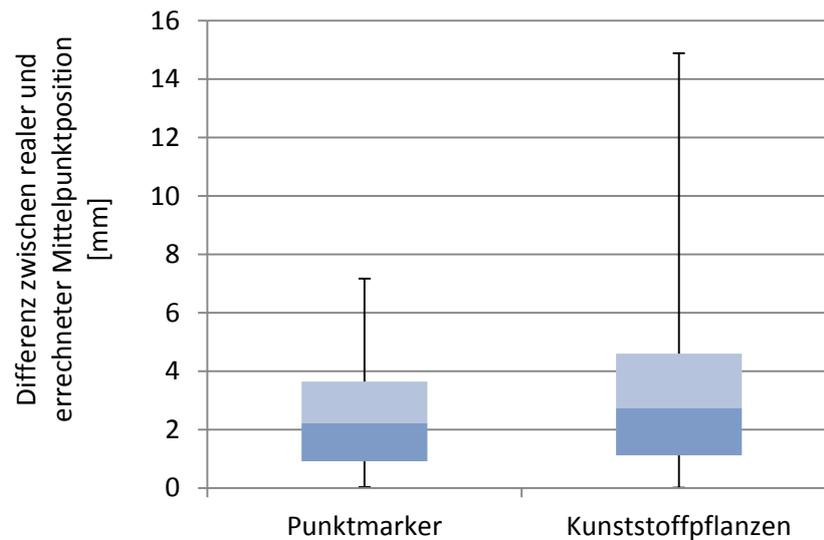


Bild 5.14: Abweichung der errechneten von der realen Mittelpunktposition bei Versuchen mit Punktmarkern und Kunststoffpflanzen (n = 300 bei 10 Reihen)

Eine Verringerung der Positionsabweichungen kann sowohl bei den Punktmarkern als auch bei den Kunststoffpflanzen in erster Linie durch eine Verringerung des Schlupfeinflusses durch das Tastrad herbeigeführt werden. Theoretisch wäre dazu ein geringerer Abstand zwischen der Kamera und der Rotationsebene der Hackwerkzeuge in Fahrtrichtung nötig (Kapitel 5.3.1). Der Einfluss des veränderlichen Tastrad-Schlupfes ist auch in den Ergebnissen der Versuche mit realen Nutzpflanzen enthalten.

5.2.1.2 Versuche mit Zuckerrüben im Zweiblattstadium

Da der erste Hacktermin nach DIEPENBROCK et al. (1999) bereits im Zweiblattstadium erfolgen kann, wurden die Versuche bei diesem Stadium beginnend bis kurz vor Pflanzenschluss in der Reihe durchgeführt. Die Unkräuter befinden sich in dieser Zeit durch die zuvor durchgeführte Bodenbearbeitung bei der Aussaat teilweise im selben Entwicklungsstadium und lassen sich aufgrund der Form kaum von den Zuckerrüben unterscheiden. Hinzu kommt der Umstand, dass die Pflanzen nicht gleichzeitig auflaufen und spät auflaufende Zuckerrüben deshalb nicht immer erkannt wurden, wie Bild 5.15 zeigt.



Bild 5.15: Original-Farbbild (links) und daraus errechnetes Binärbild (rechts) mit nicht erkannter Zuckerrübe (blau markiert), die bereits Keimblätter, aber keine sichtbaren Laubblätter aufweist

Auf der linken Seite ist das Original-Farbbild mit drei Zuckerrüben dargestellt. Die äußeren Zuckerrüben bilden bereits das erste Laubblattpaar aus und weisen eine deutlich sichtbare Blattoberfläche auf. Die Zuckerrübe in der Mitte des blauen Kreises bildet erst die Keimblätter aus und hat eine kleine Blattoberfläche, so dass die Pflanze bei der Berechnung des Binärbildes aus dem Berechnungsraster fiel. Deshalb wird die Pflanze im Binärbild auf der rechten Seite von Bild 5.15 nicht dargestellt.

Aus diesem Grund wurden die auszuwertenden Versuche zur Bildererkennung und zur Unkrautregulierung erst gestartet, als das erste Laubblattpaar deutlich ausgebildet war, so wie es in Bild 5.16 dargestellt ist. Links ist ein Original-Farbbild und in der Mitte das NIR-Originalbild mit dem identischen Bildausschnitt der Multispektralkamera dargestellt. Auf dem daraus errechneten Binärbild auf der rechten Seite sind einzelne Unkräuter und zwei rot eingefärbte Zuckerrüben mit einem deutlich ausgebildeten Laubblattpaar sichtbar.



Bild 5.16: Original-Farbbild (links); Original-NIR-Bild (Mitte); aus den Originalbildern errechnetes Binärbild mit zwei erkannten und rot markierten Zuckerrüben im Zweiblattstadium (rechts)

Bei der Betrachtung des NIR-Bildes sind die Umrisse der Pflanzen deutlich zu erkennen. Ein Nachteil der NIR-Bilder ist in Bild 5.17 zu sehen. Auf der linken Seite ist das aufgenommene Original-NIR-Bild mit drei Zuckerrüben und Strohresten dargestellt. Das daraus errechnete Binärbild in der Mitte zeigt neben den Pflanzen auch die Strohreste als dünne Linien. Ist der Strohanteil wie in diesem Bild gering, kann dieses herausgerechnet werden, wie das rechte Bild belegt.

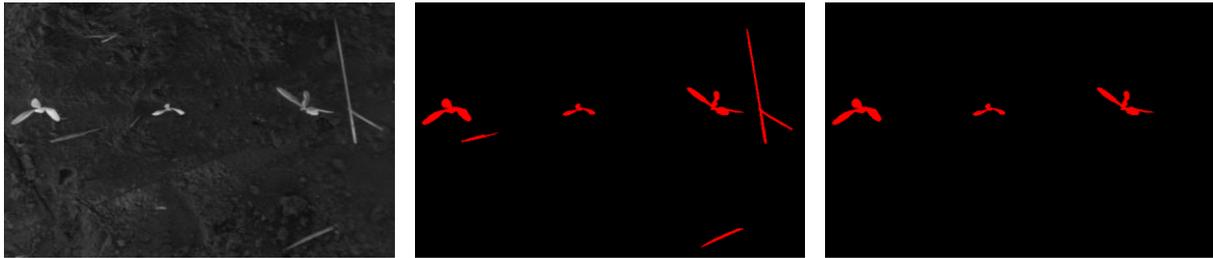


Bild 5.17: Original-NIR-Bild (links); aus dem NIR-Bild errechnetes Binärbild mit 3 erkannten Zuckerrüben sowie Strohresten; aus dem mittleren Binärbild errechnetes Binärbild ohne markierte Strohreste (rechts)

Neben organischen Bestandteilen waren auch Objekte mit hoher Reflexionsfähigkeit, wie Steine oder Kunststoffe, auf den NIR-Bildern als helle Objekte zu sehen. Dies konnte, musste aber nicht ein Problem bei den im Folgenden vorgestellten Versuchen darstellen. Die wichtigsten Versuchsparameter der Bilderkennungsversuche sind in Tabelle 5.3 zusammengefasst.

Tabelle 5.3: Übersicht der wichtigsten Versuchsparameter der Pflanzenerkennung im Zweiblattstadium

Anzahl der Reihen	11
Länge der einzelnen Reihen	50 m
Länge der Messstrecken	44 m
Anzahl der Zuckerrüben	2189
Aussaatjahr	2013
Eingestellter Abstand der Zuckerrüben	190 mm
Aussaat-Nr.	5

Neben der Erkennungsrate wurde auch die korrekte Berechnung des Mittelpunktes der Nutzpflanzen untersucht. Bei den Versuchen mit der Farbkamera wurden 88,5 % der Zuckerrüben im Zweiblattstadium erkannt und 3,2 % der Unkräuter fälschlicherweise als Nutzpflanze klassifiziert. Der Anteil der Unkräuter bezieht sich hier nicht auf die Anzahl der Gesamtunkräuter, sondern auf die reale Zahl der Zuckerrüben. Bei den Versuchen mit NIR-Bildern wurden mit 86,9 % etwas weniger Zuckerrüben im Zweiblattstadium erkannt. 3,4 % der Unkräuter wurden als Zuckerrüben eingestuft. Bei Verwendung der Multispektralkamera stieg die Anzahl der fehlerfrei erkannten Zuckerrüben auf 91,0 % und die Anzahl der fehlerhaft als Zuckerrüben eingestuften Unkräuter sank auf 3,0 %.

Ein ähnliches Bild zeigte sich bei der Berechnung des Mittelpunktes in Bild 5.18, in der der Median, die Verteilung und das Maximum der Differenz zwischen realer und errechneter Pflanzenposition dargestellt sind. Das nicht abgebildete arithmetische Mittel der Abweichung bei Verwendung der Farbbilder lag bei 3,4 mm. Mit 3,2 mm bzw. 2,7 mm waren die Abweichungen bei NIR-Bildern bzw. der Multispektralkamera etwas geringer. Auch die Streuung war bei der Farbkamera höher und führte zu Abweichungen von bis zu 23 mm und nur 12 mm bei der Multispektralkamera.

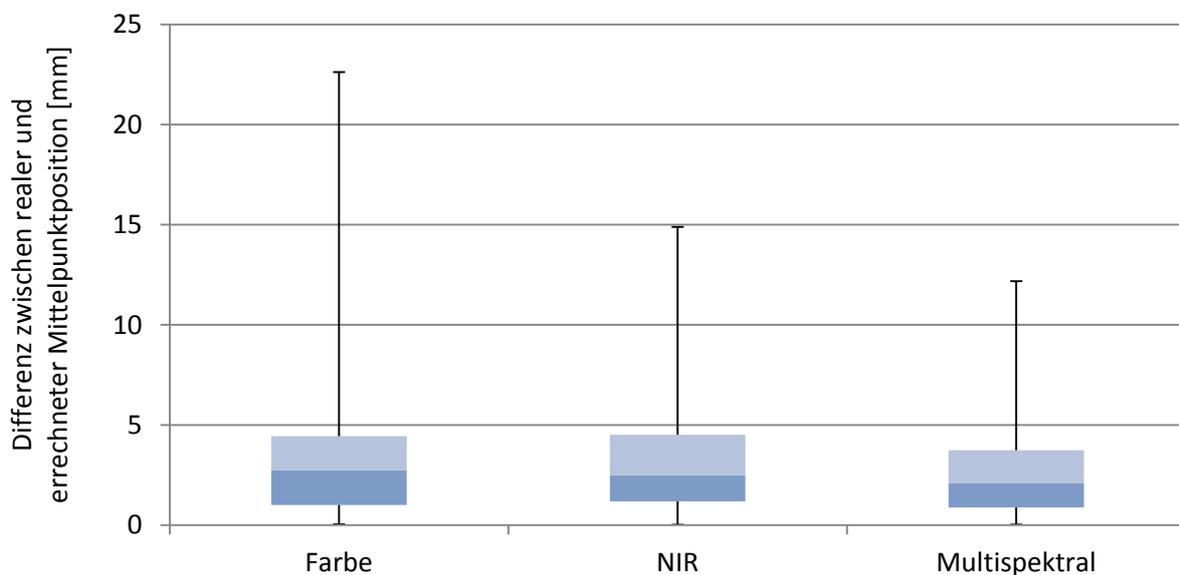


Bild 5.18: Abweichung der errechneten von der realen Mittelpunktposition in Fahrtrichtung bei Versuchen im Zweiblattstadium mit einer Farb-, einer NIR- und einer Multispektralkamera (n = 2189)

5.2.1.3 Versuche mit Zuckerrüben im Vierblattstadium

Die Versuche im Vierblattstadium (Bild 5.19) unterschieden sich von den Versuchen im Zweiblattstadium dadurch, dass die Unkräuter im Vergleich zu den Zuckerrüben häufig deutlich kleiner waren. Dies vereinfachte die Unterscheidung. Allerdings führten die größeren Blätter auch zu einer ungenaueren Bestimmung des Pflanzenmittelpunktes. Mit zunehmender Blattgröße wurde die Berechnung schwieriger, da die Blätter durch Wind und unterschiedliche Lichtverhältnisse nicht mehr symmetrisch wuchsen. Die wichtigsten Versuchsparameter der Bilderkennungsversuche sind in Tabelle 5.4 zusammengefasst.



Bild 5.19: Original-Farbbild (links); Original-NIR-Bild (Mitte); aus den Originalbildern errechnetes Binärbild mit zwei erkannten und rot markierten Zuckerrüben im Vierblattstadium (rechts)

Tabelle 5.4: Übersicht der wichtigsten Versuchsparameter der Pflanzenerkennung im Vierblattstadium

Anzahl der Reihen	11
Länge der einzelnen Reihen	50 m
Länge der Messstrecken	44 m
Anzahl der Zuckerrüben	2190
Aussaatjahr	2013
Eingestellter Abstand der Zuckerrüben	190 mm
Aussaat-Nr.	5

Bei den Versuchen zur Erkennung des Mittelpunktes mit der Farbkamera wurden 92,7 % der Zuckerrüben im Vierblattstadium erkannt und 0,5 % der Unkräuter als Nutzpflanze klassifiziert. Bei den Versuchen mit NIR-Bildern wurden mit 91,7 % etwas weniger

Zuckerrüben im Zweiblattstadium erkannt. 0,6 % der Unkräuter wurden als Zuckerrüben eingestuft. Bei Verwendung der Multispektralkamera stieg die Anzahl der fehlerfrei erkannten Zuckerrüben auf 95,4 % und die Anzahl der fehlerhaft als Zuckerrüben eingestuften Unkräuter sank auf 0,4 %.

Bei der Berechnung des Mittelpunktes (Bild 5.20) ergaben sich ähnliche, aber präzisere Ergebnisse als im Zweiblattstadium. Das arithmetische Mittel der Differenz zwischen realer und errechneter Pflanzenposition bei Verwendung der Farbbilder lag bei 5,4 mm. Mit 3,8 mm bzw. 3,6 mm waren die Abweichungen bei NIR-Bildern bzw. der Multispektralkamera deutlich geringer. Die maximale Abweichung von 34 mm ergab sich wieder bei den Farbbildern, wobei sich die geringste maximale Abweichung bei Verwendung der NIR-Bilder zeigte.

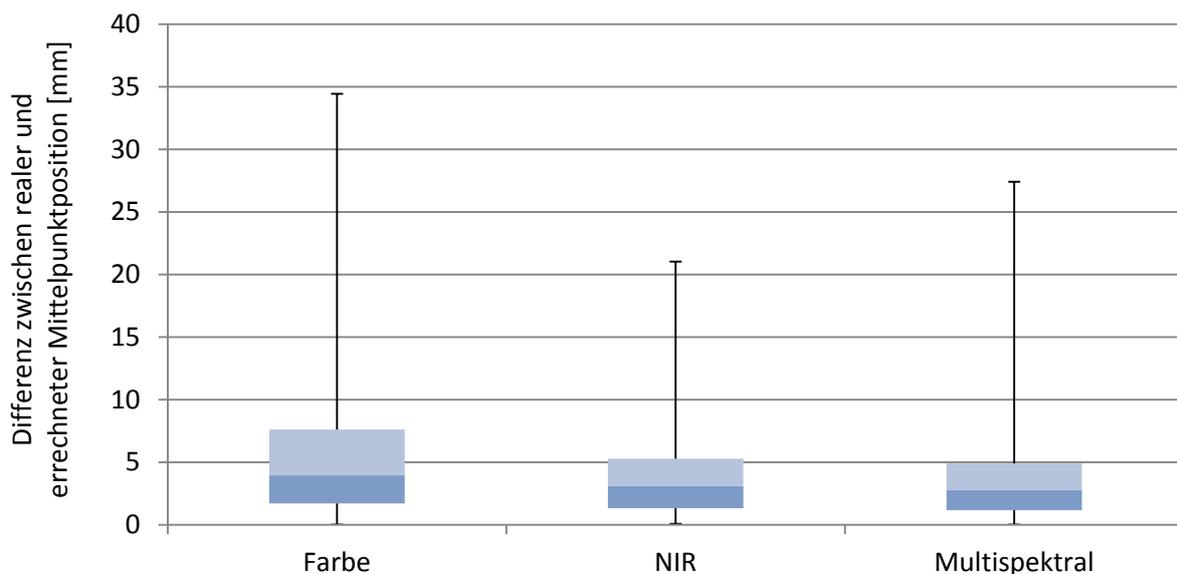


Bild 5.20: Abweichung der errechneten von der realen Mittelpunktposition in Fahrtrichtung bei Versuchen im Vierblattstadium mit einer Farb-, einer NIR- und einer Multispektralkamera (n = 2190)

5.2.1.4 Versuche mit Zuckerrüben im Sechsstadium

Mit Blick auf die Versuche der jüngeren Entwicklungsstadien wird der Trend bei den Erkennungsraten fortgesetzt. Beim Vergleich mit den vorherigen Versuchsreihen zeigte die Versuchsreihe der Zuckerrüben im Sechsstadium (Bild 5.21) die besten Ergebnisse. Die wichtigsten Parameter zu diesen Bilderkennungsversuchen sind in Tabelle 5.5 zusammengefasst.



Bild 5.21: Original-Farbbild (links); Original-NIR-Bild (Mitte); aus den Originalbildern errechnetes Binärbild mit zwei erkannten und rot markierten Zuckerrüben im Sechsstadium (rechts)

Tabelle 5.5: Übersicht der wichtigsten Versuchsparameter der Pflanzenerkennung im Sechsstadium

Anzahl der Reihen	11
Länge der einzelnen Reihen	50 m
Länge der Messstrecken	44 m
Anzahl der Zuckerrüben	2188
Aussaatjahr	2013
Eingestellter Abstand der Zuckerrüben	190 mm
Aussaat-Nr.	5

Bei den Versuchen mit Farbbildern wurden 95,1 % der Zuckerrüben im Sechsstadium erkannt und 0,4 % der Unkräuter als Nutzpflanze klassifiziert. Bei den Versuchen mit NIR-Bildern wurden mit 95,7 % etwas mehr Zuckerrüben erkannt. 0,4 % der Unkräuter wurden unzutreffend als Zuckerrüben eingestuft. Insgesamt wurden, wie im Vierblattstadium, durch die Nutzung der Multispektralkamera bessere Ergebnisse, also eine geringere Abweichung, erzielt. Bei Verwendung der Multispektralkamera stieg die Anzahl der fehlerfrei erkannten Zuckerrüben auf 97,7 % und die Anzahl der fehlerhaft als Zuckerrüben eingestuften Unkräuter sank auf 0,2 %. Bis zu diesem Entwicklungsstadium zeigte sich somit, dass ein größeres Entwicklungsstadium eine bessere Erkennung ermöglicht.

Bei der Erkennung des Mittelpunktes offenbarte sich ein ausgeglichenes, aber insgesamt etwas schlechteres Bild als bei den jüngeren Entwicklungsstadien, da die größeren übereinanderliegenden Blätter eine Mittelpunktbestimmung erschweren (Bild 5.22). Mit 5,9 mm bei Farbbildern, 5,8 mm bei NIR-Bildern und 5,8 mm bei der Multispektralkamera waren die Abweichungen zwischen errechnetem und realem Pflanzenmittelpunkt nahezu gleich. Lediglich die maximale Differenz war bei den NIR-Bildern mit 16 mm geringer als bei den Farb- (23 mm) bzw. Multispektralbildern (25 mm).

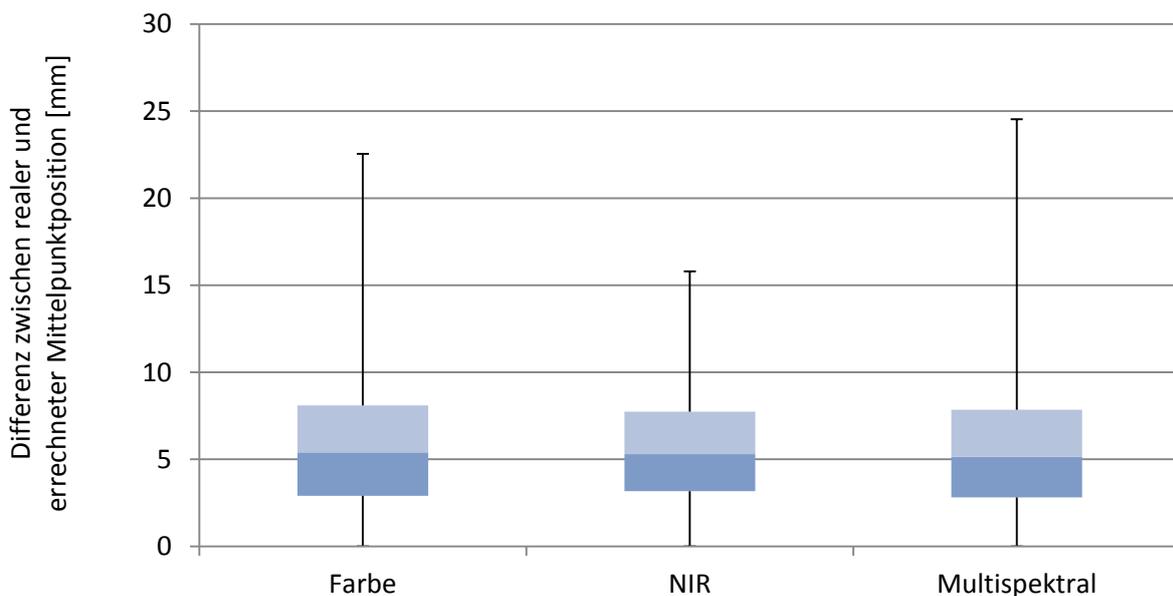


Bild 5.22: Abweichung der errechneten von der realen Mittelpunktposition in Fahrtrichtung bei Versuchen im Sechsstadium mit einer Farb-, einer NIR- und einer Multispektralkamera (n = 2188)

5.2.1.5 Versuche mit Zuckerrüben kurz vor Pflanzschluss in der Reihe

Um zu untersuchen, bis zu welcher Entwicklungsphase eine Erkennung und auch das Hacken möglich sind, wurden die Pflanzen bis kurz vor Pflanzschluss in der Reihe (Bild 5.23) bildverarbeitungstechnisch analysiert. Kurz vor Pflanzschluss traten dabei zwei Probleme auf. So war es aufgrund der sehr dicht nebeneinander liegenden Blätter kaum möglich, den intra-row-Bereich zu hacken, ohne mit den Armen des Hackrotors die Blätter zu beschädigen. Dies ließe sich nur durch einen anderen Hackmechanismus oder eine deutlich niedrigere Fahrgeschwindigkeit erreichen.



Bild 5.23: Original-Farbbild (links) und aus dem Originalbild errechnetes Binärbild mit zwei erkannten und rot markierten Zuckerrüben kurz vor Pflanzenschluss in der Reihe

Das zweite Problem war die Erkennung der Pflanzen. Zwar funktionierte die Erkennung teilweise sehr gut (Bild 5.23), allerdings hatte die Software Probleme mit Überlappungen (Bild 5.24). Da die Blätter der zwei benachbarten Zuckerrüben aus Sicht der Bildverarbeitungssoftware die gleiche Farbe haben und sich überlappen, erkennt die Software anstatt zwei Pflanzen eine einzelne. Die Grenze der Pflanzenerkennung, und damit auch einer geregelten Unkrautregulierung, ist somit der Übergang zum Pflanzenschluss innerhalb der Reihe.

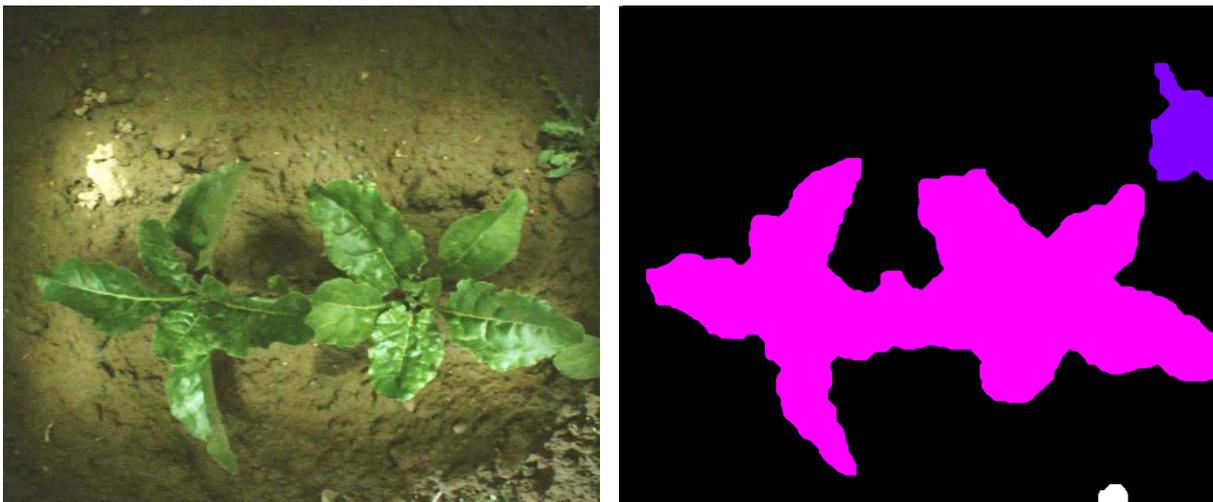


Bild 5.24: Original-Farbbild (links) und aus dem Originalbild errechnetes Binärbild (rechts) mit zwei Zuckerrüben kurz vor Pflanzenschluss, die nicht als Einzelobjekte erkannt wurden

Die wichtigsten Parameter zu den Bilderkennungsversuchen sind in Tabelle 5.6 zusammengefasst. Im Gegensatz zum Verlauf bei den bisherigen Versuchen der jüngeren Entwicklungsstadien waren die Ergebnisse der Pflanzenerkennung aufgrund der Problematik der Überlappung der Blätter kurz vor Pflanzenschluss schlechter. Bei den Versuchen mit der Farbkamera wurden 91,3 % der Zuckerrüben erkannt und 0,3 % der Unkräuter als Nutzpflanze klassifiziert. Bei den Versuchen mit NIR-Bildern wurden mit 91,9 % etwas mehr Zuckerrüben als im Zweiblattstadium erkannt. 0,2 % der Unkräuter wurden als Zuckerrüben eingestuft. Bei Verwendung der Multispektralkamera stieg die Anzahl der fehlerfrei erkannten Zuckerrüben auf 94,0 % und die Anzahl der fehlerhaft als Zuckerrüben eingestuften Unkräuter sank auf 0,1 %.

Tabelle 5.6: Übersicht der wichtigsten Versuchsparameter der Pflanzenerkennung kurz vor Pflanzenschluss in der Reihe

Anzahl der Reihen	11
Länge der einzelnen Reihen	50 m
Länge der Messstrecken	44 m
Anzahl der Zuckerrüben	2185
Aussaatjahr	2013
Eingestellter Abstand der Zuckerrüben	190 mm
Aussaat-Nr.	5

Auch bei der Berechnung der Pflanzenmittelpunkte waren die Ergebnisse schlechter als bei den jüngeren Entwicklungsstadien, wie in Bild 5.25 zu erkennen ist. Die mittlere Abweichung bei Farbbildern war mit 9,6 mm nahezu doppelt so groß wie im Sechsbblattstadium. Auch bei den NIR- und Multispektralbildern war die mittlere Abweichung mit 8,2 mm und 8,1 mm ähnlich groß. Zusätzlich fiel die maximale Abweichung von 45 mm bei den Farbbildern auf, so dass bei Betrachtung der gesamten Ergebnisse zusammengefasst werden kann, dass die Pflanzenerkennung kurz vor Pflanzenschluss an ihre Grenzen stößt.

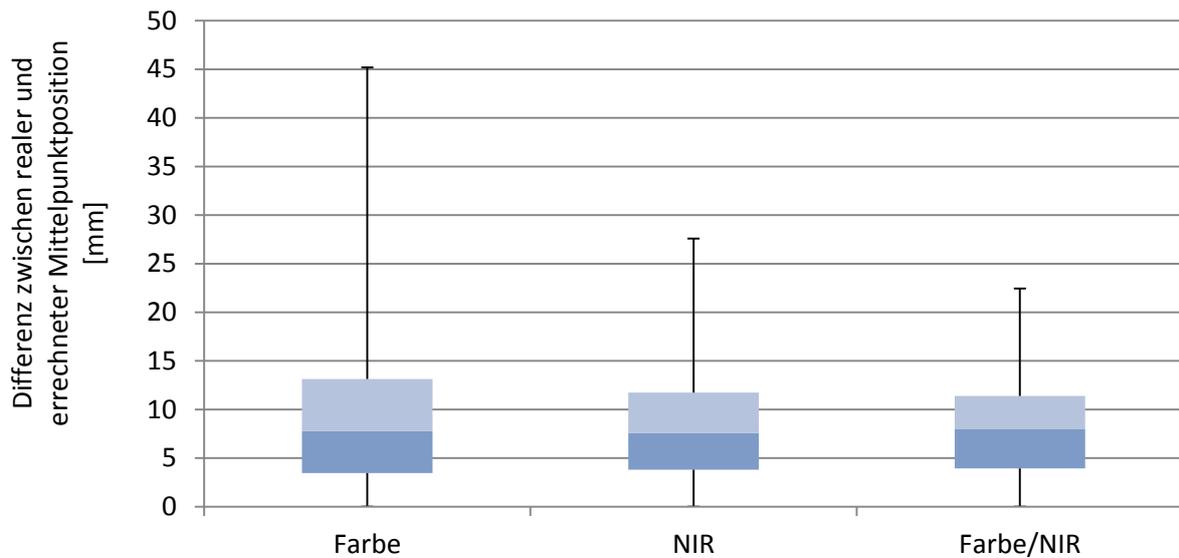


Bild 5.25: Abweichung der errechneten von der realen Mittelpunktposition in Fahrtrichtung bei Versuchen mit einer Farb-, einer NIR- und einer Multispektralkamera kurz vor Pflanzenschluss in der Reihe (n = 2185)

5.2.1.6 Versuche mit Durchwachsener Silphie

Neben Zuckerrüben wurden Versuche mit der Durchwachsenen Silphie (*Silphium Perfoliatum*) aus der Familie der Korbblütler durchgeführt, die derzeit als Energiepflanze untersucht wird. Da es bislang keine zugelassenen Pflanzenschutzmittel gibt und die Jungpflanzen relativ konkurrenzschwach sind, müssen die Unkräuter mit einer Maschinenhacke und von Hand gehackt werden. Erste Tests mit der Bilderkennungssoftware zeigten, dass eine Erkennung und Positionsbestimmung der Nutzpflanzen möglich ist. In Bild 5.26 ist die Erkennung im Dreiblattstadium und in Bild 5.27 im Sechsstadium dargestellt.

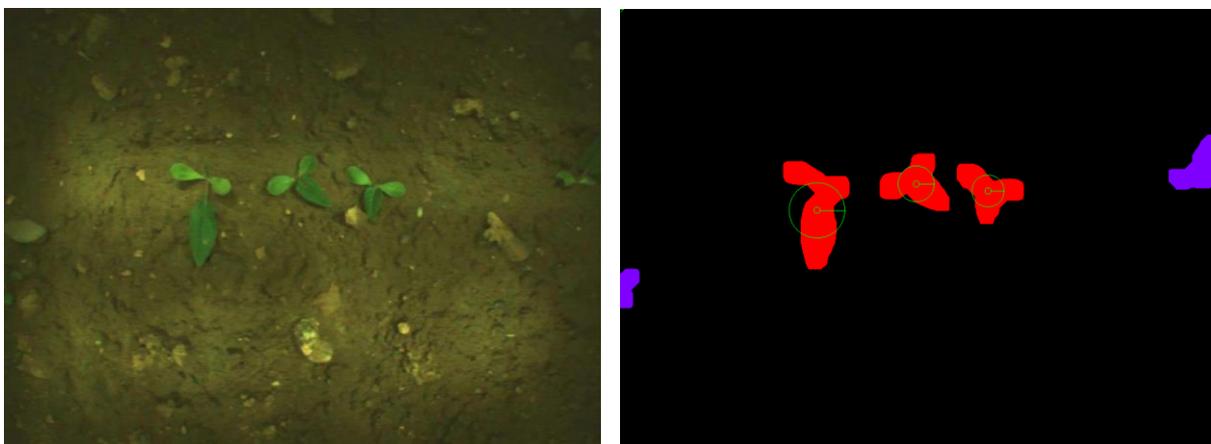


Bild 5.26: Original-Farbbild (links) und aus dem Originalbild errechnetes Binärbild (rechts) mit drei erkannten und rot markierten Pflanzen der Durchwachsenen Silphie im Dreiblattstadium

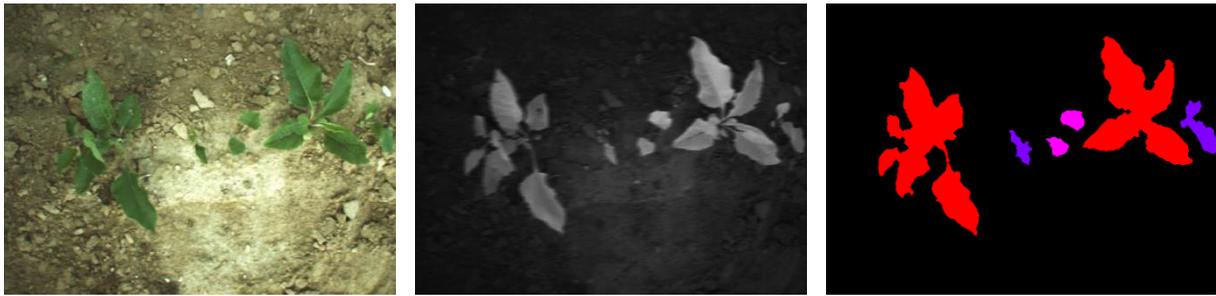


Bild 5.27: Original-Farbbild (links); Original-NIR-Bild (Mitte); aus den Originalbildern errechnetes Binärbild mit zwei erkannten und rot markierten Pflanzen der Durchwachsenen Silphie im Sechsstadium (rechts)

5.2.1.7 Ergebnisübersicht der Pflanzenerkennung

In den vorigen Abschnitten wurden die Ergebnisse der unterschiedlichen Entwicklungsstadien vorgestellt. Dazu gehörten sowohl die Erkennung und Klassifizierung der Pflanzen in Nutzpflanze oder Unkraut als auch die Bestimmung des Mittelpunktes jeder Nutzpflanze. In Bild 5.28 sind die Ergebnisse der Nutzpflanzenerkennung vom Zweiblattstadium bis kurz vor Pflanzenschluss bei Verwendung einer Farb-, NIR- und einer Multispektralkamera zusammengefasst.

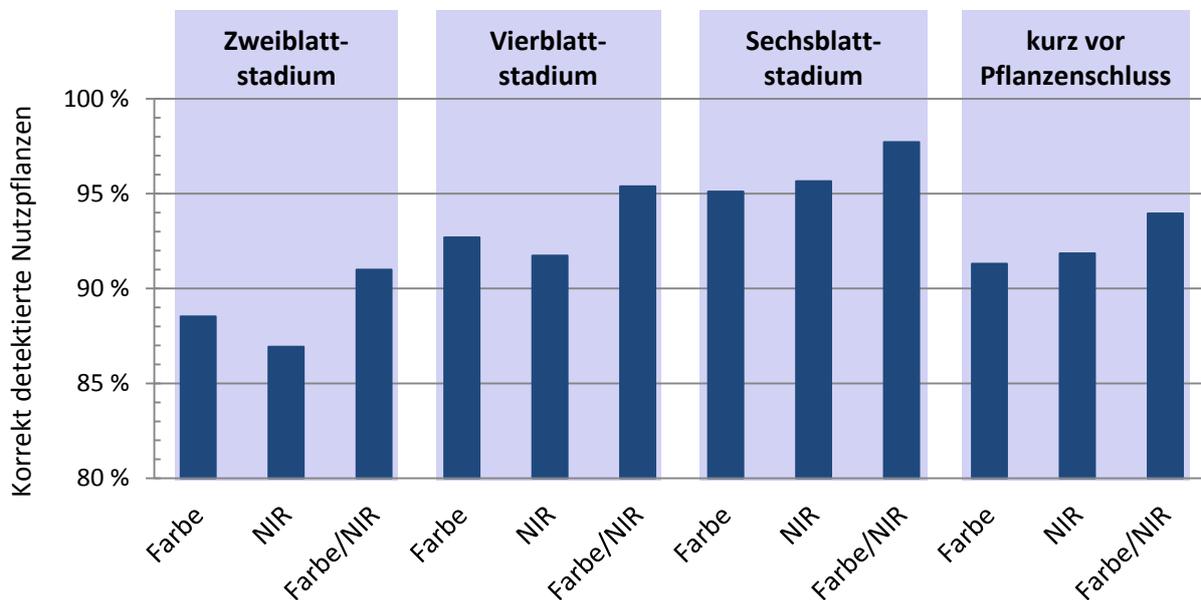


Bild 5.28: Korrekt detektierte Zuckerrüben (auf die Anzahl der realen Nutzpflanzen bezogen) in verschiedenen Entwicklungsstadien

In dem Diagramm ist zu erkennen, dass die Erkennungswahrscheinlichkeit unabhängig von der Kameraart mit dem Entwicklungsstadium bis zum Sechsstadium anstieg. Erst kurz vor Pflanzenschluss reduzierte sich die Erkennungsquote auf die Werte vom Vierblattstadium. Bei Betrachtung der Kameravariante zeigte die Multispektralkamera stets die besten Ergebnisse, wohingegen die Ergebnisse der NIR- und der Farbkamera in keine Reihenfolge gebracht werden können. In Bild 5.29 ist der prozentuale Anteil der Unkräuter dargestellt, die als Nutzpflanze klassifiziert wurden. Der prozentuale Wert bezieht sich auf die reale Anzahl der Nutzpflanzen auf der gleichen Messstrecke. Die Werte bei den Versuchen im Zweiblattstadium sind mit über 3 % noch relativ hoch und fallen bei allen weiteren Entwicklungsstadien unter 1 %. Zwar liefert die Multispektralkamera auch hier die besten Ergebnisse, und somit die geringste Anzahl an falsch klassifizierten Unkräutern, ein signifikanter Unterschied ist allerdings nicht feststellbar.

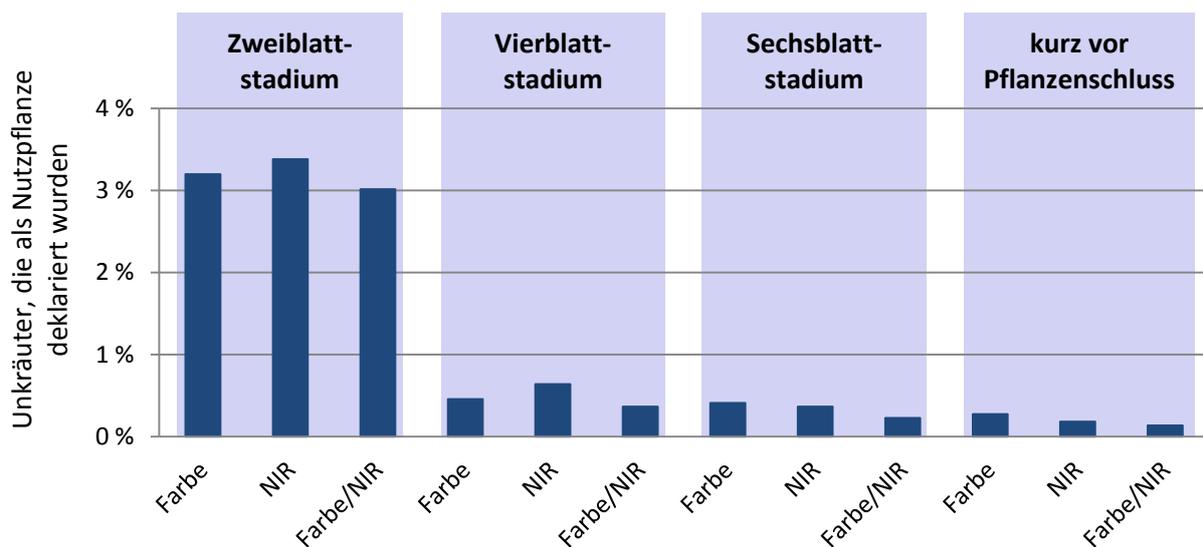


Bild 5.29: Unkräuter, die als Nutzpflanze deklariert wurden (auf die Anzahl der realen Nutzpflanzen bezogen)

Aufgrund der Ergebnisse kann bei den verwendeten Algorithmen der Einsatz der Multispektralkamera als vorteilhaft eingestuft werden. Weil dies nicht nur mit der Kameratechnik, sondern auch mit den Algorithmen zusammenhängt, können Versuche mit verbesserten Algorithmen im NIR- und Farbbereich andere Ergebnisse hervorbringen. Da bei der Multispektralkamera allerdings die optischen Eigenschaften und Vorteile im Farb- und im NIR-Bereich genutzt werden, würden verbesserte Algorithmen vermutlich auch zu einer Verbesserung der Multispektral-Ergebnisse führen.

5.2.1.8 Herausforderungen bei der Pflanzenerkennung

Trotz guter Ergebnisse bei der Pflanzenerkennung gab es Probleme, die mit der vorliegenden Bildverarbeitung nicht zufriedenstellend zu lösen waren. Idealerweise sahen die Originalbilder und die errechneten Binärbilder wie in Bild 5.30 aus.



Bild 5.30: Original-Farbbild (links); Original-NIR-Bild (Mitte); aus den Originalbildern errechnetes Binärbild mit zwei erkannten und rot markierten Zuckerrüben (rechts)

Die korrekte Berechnung wird durch die frei stehenden Zuckerrüben und vergleichsweise kleinen Unkräuter unterstützt. Probleme wurden unter anderem durch die Überlappung einzelner Blätter oder durch nah beieinander stehende Pflanzen ausgelöst. So ist in Bild 5.31 eine Zuckerrübe auf der linken Seite des Original-Farbbildes zu sehen, die in direkter Nachbarschaft zu monokotylen (einkeimblättrigen) und dikotylen (zweikeimblättrigen) Unkräutern steht.

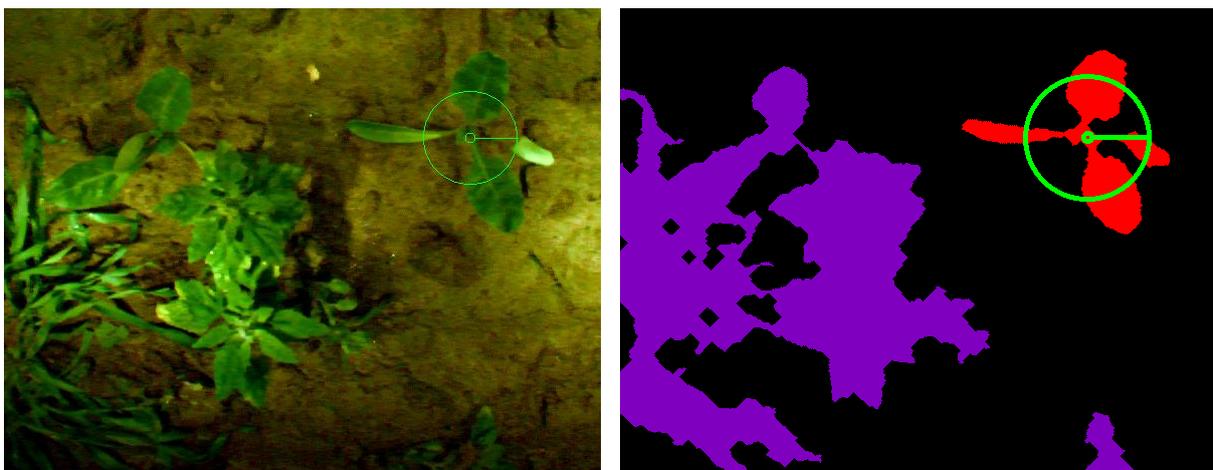


Bild 5.31: Original-Farbbild (links) und aus dem Originalbild errechnetes Binärbild (rechts) mit einer von Unkraut umgebenen und nicht erkannten Zuckerrübe und einer frei stehenden erkannten Zuckerrübe

Aufgrund der ähnlichen Farbe wurde ein Binärbild errechnet, in dem diese Zuckerrübe mit dem Unkraut zu einem Objekt vereint wird. Die frei stehende Zuckerrübe im rechten Teil des Bildes wurde hingegen korrekt erkannt.

Diese Problematik gab es sowohl bei Farb-, als auch bei NIR- und Multispektralbildern. Lediglich stärkere Farbunterschiede boten für die Farbbilder die Möglichkeit einer Selektierung. Bei den NIR-Bildern war eine Unterscheidung nur bei unterschiedlich starker Reflexion des NIR-Lichts umsetzbar. Auch wenn bei der Multispektralkamera beide Selektionskriterien zur Verfügung standen, waren immer noch viele Unkräuter nicht von den Zuckerrüben zu unterscheiden, wenn sie sich überlagerten. Aufgrund dieser Problematik musste an einer zusätzlichen Lösung gearbeitet werden, die die Bildverarbeitung unterstützt. Die ersten Ergebnisse von zwei möglichen Verfahren werden in den nächsten Kapiteln 5.2.2 und 5.2.3 dargestellt.

5.2.2 Analyse der Pflanzenerkennung mit einer Stereo-Kamera

Da die Versuche mit dem Stereokameraaufbau aufgrund unzureichender Prozessorleistung nur auf der Bodenrinne durchgeführt wurden, dienten diese lediglich dazu, eine grundsätzliche Eignung dieser Erkennungsmethode im Bereich der Pflanzenerkennung zu bewerten. Bild 5.32 zeigt die Perspektive, aus der die Pflanzen auf der Bodenrinne aufgenommen wurden. Auf dem Bild ist zu erkennen, dass der Boden nicht eben ist, sondern durch unterschiedlich große Bodenaggregate eine erkennbare Struktur aufweist.



Bild 5.32: Aufnahmeperspektive des Stereokameraaufbaus mit 4 Pflanzendummys

In Bild 5.33 ist die Benutzeroberfläche mit den beiden schwarzweißen Originalbildern der linken und rechten Kamera zu sehen. Als Ergebnis wird ein daraus errechnetes 3D-Tiefenbild unten links angezeigt. Die Bereiche auf Bodenniveau werden dabei in den Farben blau, grün und gelb dargestellt. Alle Gegenstände und Pflanzen, die höher sind, werden rot bis violett dargestellt. Die geometrischen Randbedingungen wie die stereoskopische Basis b und der Abstand der Kamera zum durchschnittlichen Bodenniveau wurden konstant gehalten.

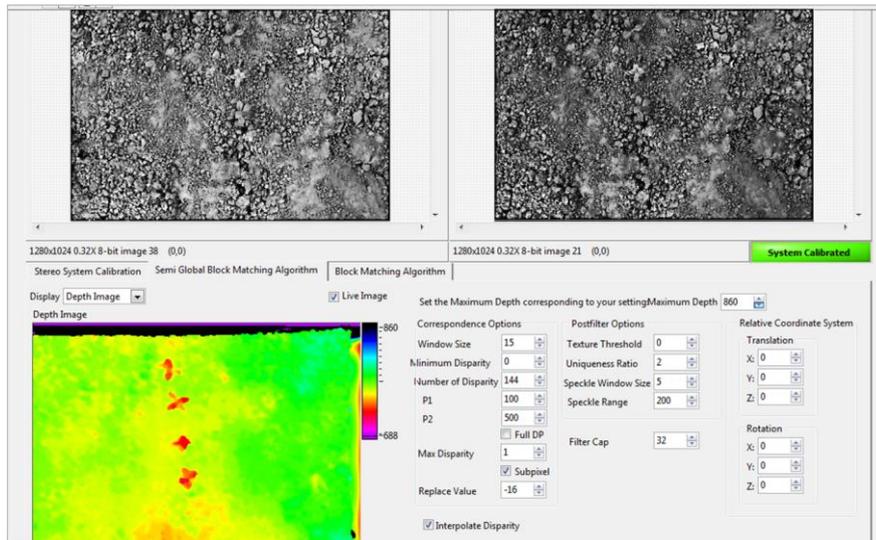


Bild 5.33: LabVIEW Benutzeroberfläche mit den Rohbildansichten der linken und rechten Kamera sowie dem errechneten Tiefenbild

Neben den Faktoren für die Berechnung der Disparität ist trotz konstanten Abstands zum Boden eine Verstellung des Beobachtungshorizontes möglich. In Bild 5.34 sind zwei unterschiedliche Einstellungen dargestellt. Auf der linken Seite ist ein Beobachtungshorizont eingestellt, der Pflanzen und Boden einschließt. Die Höhe des Bodens und einzelner Bodenaggregate, die auch in Bild 5.32 ersichtlich sind, werden in diesem Tiefenbild angezeigt. Die neben dem Bild angeordnete Farbskala ermöglicht die Zuordnung der einzelnen Farben zu den Abstandswerten. Die rot eingefärbten Pflanzenblätter haben einen Abstand von durchschnittlich 730 mm, während der gelb-grün eingefärbte Boden einen Abstand von 774 mm zur Kamera aufweist. Der Tiefenunterschied von 34 mm passt zu der Höhe der eingesetzten und in Bild 4.49 (Kapitel 4.4.2) dargestellten Pflanzendummies.

Auf der rechten Seite von Bild 5.34 ist ein näherer Beobachtungshorizont als auf der linken Seite dargestellt. Der Boden verschwindet hinter dem Beobachtungshorizont, so dass keine Tiefeninformationen bezüglich des Bodens ermittelt werden können. Ein Vorteil liegt in der

einfacheren Auswertung, da nur die Pflanzen betrachtet werden. Allerdings setzt dies eine konstante Höhenführung der Kamera über dem durchschnittlichen Bodenniveau voraus. Dies war auf der Bodenrinne durch den schienengeführten Schlitten zu gewährleisten, kann aber auf dem Feld zu Problemen führen.

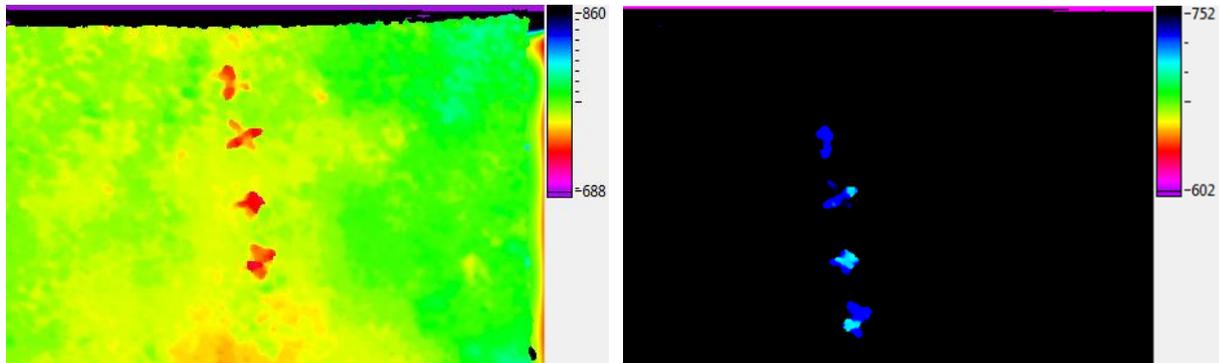


Bild 5.34: Tiefenbild mit einem fernen Beobachtungshorizont, welches die Tiefeninformationen der Pflanzen und des Bodens wiedergibt (links); Tiefenbild mit einem nahen Beobachtungshorizont, das die Tiefeninformationen des Bodens ausblendet (rechts)

Zu dem größten Nachteil dieses Verfahrens gehört die schon angesprochene lange Berechnungszeit der Tiefeninformationen. In Bild 5.35 sind die Berechnungszeiten pro Tiefenbildberechnung bei 10 Versuchsfahrten und je 40 Aufnahmen (Tabelle 5.7) auf der Bodenrinne dargestellt. Die Anzahl der Versuchsfahrten ist durch das sich wiederholende Muster aus Höhen und Tiefen im Diagramm ersichtlich. Da der Aufbau der Pflanzendummy zwischen den Versuchen nicht geändert wurde und auch die Bodenoberfläche unangetastet blieb, ist die Berechnungszeit kein Zufall, sondern hängt von den aufgenommenen Objekten ab.

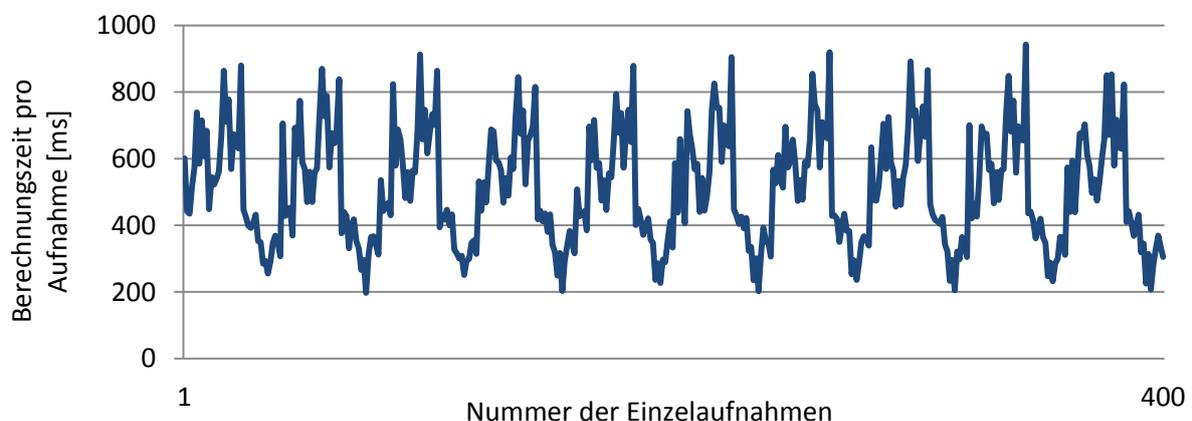


Bild 5.35: Berechnungsdauer der einzelnen Tiefenbilder

Die unterschiedliche Bodenstruktur sowie Pflanzenverteilung auf den Abschnitten der Messstrecke erzeugen die starken Unterschiede in den Berechnungszeiten. Auf dem ersten 4 m langen Abschnitt der Messstrecke waren die Pflanzen gleichmäßig verteilt. Dort waren die Berechnungszeiten höher als der arithmetische Mittelwert der Berechnungszeit von 515 ms. Im letzten Abschnitt gab es eine geringere Pflanzendichte, so dass die Kalkulationsdauer auf bis zu 197 ms abfällt. Maßgebend für einen Einsatz auf dem Feld ist allerdings die maximale Berechnungszeit, die bei diesen Versuchen bei 943 ms lag. Demensprechend müsste bei einer Vorfahrtgeschwindigkeit von max. 2 m/s ein Tiefenbild von einer mindestens 2 m langen Fläche aufgenommen werden, um 100 % der Pflanzen in einer Reihe aufzunehmen. Dies ist aufgrund der geometrischen Randbedingungen und der notwendigen minimalen Bildauflösung nicht realistisch.

Tabelle 5.7: Übersicht der wichtigsten Versuchsparameter und Ergebnisse zur Untersuchung der Berechnungszeit von Tiefenbildern aus stereoskopischen Aufnahmen

Anzahl der Reihen	10
Länge der Messstrecke	ca. 6 m
Aufnahmen pro Versuch und Messstrecke	40
Gesamte Anzahl der Aufnahmen	400
Arithmetisches Mittel der Berechnungsdauer	515 ms
Minimale Berechnungsdauer	197 ms
Maximale Berechnungsdauer	943 ms

Die Ergebnisse in Bild 5.35 sowie Tabelle 5.7 sind nicht repräsentativ, da sie von den eingesetzten Prozessoren und Algorithmen abhängen. Allerdings zeigen sie im Vergleich zu den anderen getesteten Bildverarbeitungsverfahren, die die gleichen Prozessoren nutzten, ein Vielfaches der Bearbeitungsdauer. Aufgrund dieser Ergebnisse wurde ein Fortsetzen der Versuche mit dem Ziel einer Nutzung in der Rotationshacke ausgeschlossen. Da stereoskopische Systeme seit einigen Jahren als Sensor für Fahrerassistenzsysteme in Kraftfahrzeugen zum Einsatz kommen (WINNER et al. 2015), kann eine Nutzung mit verbesserten Algorithmen und einer höheren Prozessorleistung bei nachfolgenden Forschungsarbeiten in Betracht gezogen werden.

5.2.3 Analyse der Pflanzenerkennung mit dem Laser-Lichtschnittverfahren

Ähnlich wie beim Stereokameraaufbau wurden die Versuche nicht in Verbindung mit dem Antrieb der Hacke eingesetzt. Im Gegensatz zur Stereokamera wurden die Versuche sowohl im Labor als auch mit dem Versuchsträger auf dem Feld durchgeführt. Das Ziel ist, wie in Bild 5.36 dargestellt, die Abbildung des dreidimensionalen Profils der Pflanzen und des Feldes.

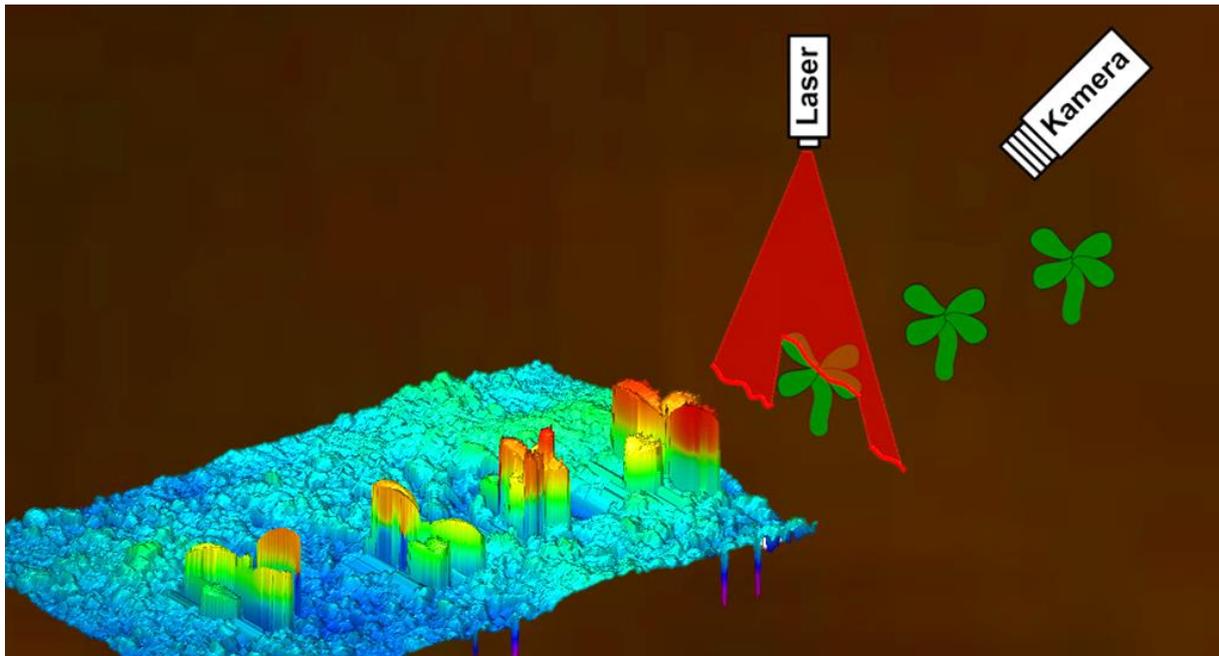


Bild 5.36: Berechnung eines dreidimensionalen Profils durch Anwendung des laserunterstützten Lichtschnittverfahrens

Die visuelle Darstellung dient dabei nur der Veranschaulichung, für die Pflanzenerkennung ist nur die errechnete Matrix mit den Höheninformationen entscheidend. Um die Laserreflexionen deutlich zu erkennen, ist es am einfachsten, das Objekt in der Dunkelheit zu untersuchen.

In Bild 5.37 sind zwei Momentaufnahmen eines Profils dargestellt. Für eine reine Profilberechnung ist dieser Weg am einfachsten, da sich die roten Reflexionen gut vom Hintergrund abheben und somit leicht zu extrahieren sind. Da dieses Verfahren allerdings als Unterstützung für Farb-, Infrarot- oder Multispektralkamera dienen soll und diese nur mit Hintergrundbeleuchtung arbeiten, wurde auch der Einsatz bei aktiver Beleuchtung untersucht.

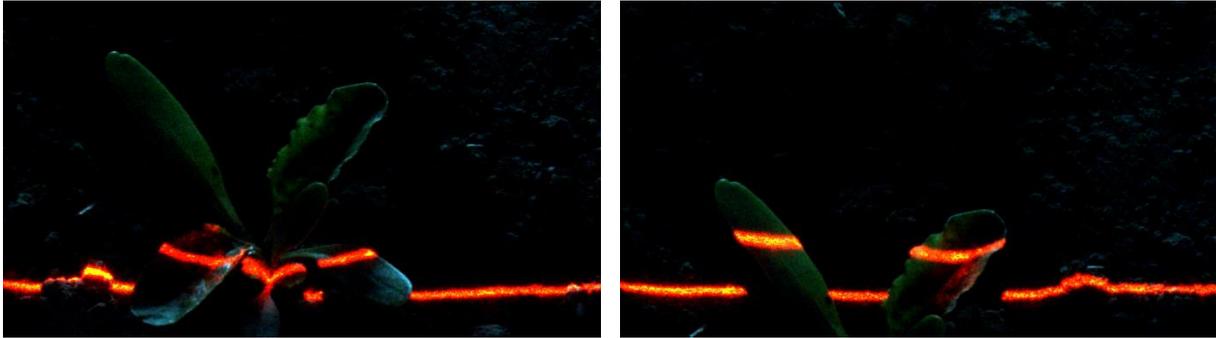


Bild 5.37: Reflexionen eines auf eine Zuckerrübe gerichteten Lasers mit Linienoptik in einem abgedunkelten Gehäuse

In Bild 5.38 ist ein Bild aus einem Pflanzenerkennungsprozess mit einer Farbkamera zu sehen, bei dem gleichzeitig mit einer weiteren Kamera ein Profil aufgenommen wurde. Zu sehen sind auch die grün markierten Pflanzen und die rote Laserlinie.



Bild 5.38: Pflanzenerkennung mit einer Farbkamera bei gleichzeitigem Laser-Lichtschnittverfahren zur Profilabtastung

Bild 5.39 zeigt zwei Ansichten der Kamera, die in Bild 5.38 am rechten Rand zu erkennen ist. Die Reflexionen des Laserlichts treten nicht mehr so deutlich wie in Bild 5.37 hervor, trotzdem sind diese in gleicher Weise herauszufiltern, wie Bild 5.40 beweist. Ein Schwachpunkt des Verfahrens wird im linken Bild von Bild 5.39 sowie Bild 5.40 deutlich. Ungünstig stehende Blätter oder andere Objekte wie größere Bodenaggregate oder Steine können die Reflexionen verdecken.

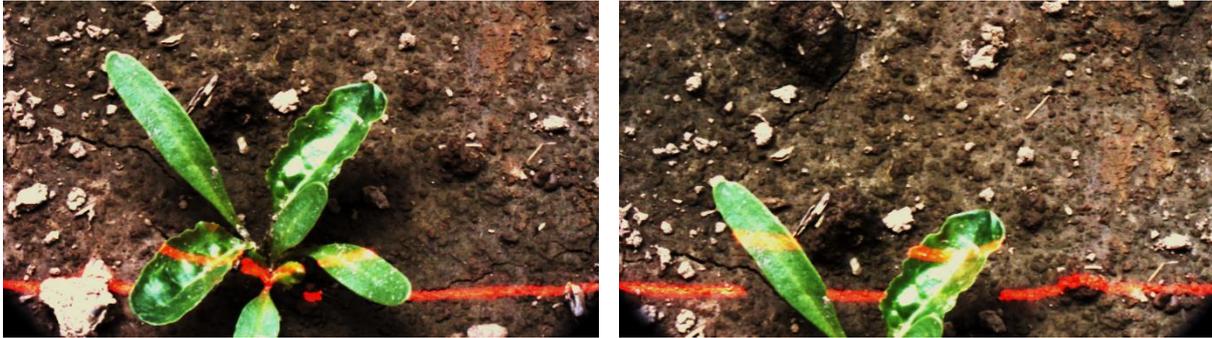


Bild 5.39: Reflexionen eines auf eine Zuckerrübe gerichteten Lasers mit Linienoptik in belichteter Umgebung

In diesem Fall ist es im linken Bereich der Bilder ein helles Bodenaggregat, welches sich hier nicht negativ auswirkt, da nur eine Reflexion des Erdbodens verdeckt wird, die über nachfolgende Algorithmen wieder kompensiert wird. Ein verdecktes Pflanzenprofil führt zu einem schwerwiegenderen Fehler, da der fehlende Abschnitt im ungünstigsten Fall dem Bodenniveau zugerechnet wird. Eine Lösung wäre eine zweite Kamera, die ein zweites Bild auf der gegenüber vom Laserlicht aufgespannten Fläche aufnehmen würde. Eine weitere Möglichkeit ist das Vertauschen der Positionen des Lasers und der Kamera. Dies würde allerdings eine Berechnung des Höhenprofils erschweren, da eine einfache Triangulation nicht ausreichen würde.

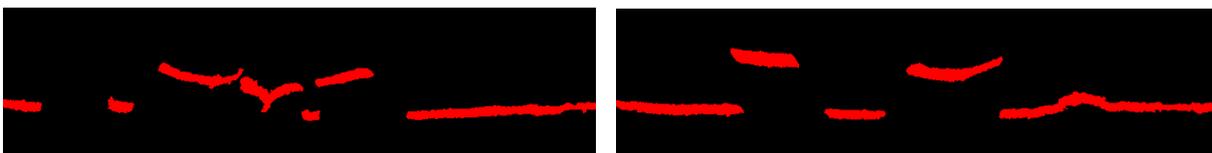


Bild 5.40: Aus Bild 5.39 berechnete Reflexionen des Linienlasers

Um den Aufwand für die ersten Machbarkeitsuntersuchungen gering zu halten, wurde der vorgestellte Aufbau mit dem erläuterten Nachteil beibehalten. Nachdem die einzelnen Vektoren für jedes zweidimensionale Bild berechnet wurden, konnte daraus eine Matrix erstellt werden, die eine Punktwolke des dreidimensionalen Profils repräsentiert.

Zur Visualisierung ist die Punktwolke in Bild 5.41 als Hüllfläche mit einzelnen Flächenelementen zwischen den Punkten dargestellt. Den einzelnen Höhen sind hierbei verschiedene Farben zugeordnet. Im Vergleich zu den Ergebnissen der Stereo-Kamera wurde eine deutlich bessere Auflösung in x- y- und z-Richtung erreicht. Die mögliche Vorfahrtgeschwindigkeit hängt beim Lichtschnittverfahren von der Bildrate der Kamera ab.

Die Bildrate konnte durch das Auslesen einer begrenzten ROI auf 240 FPS gesteigert werden, so dass bei einer Auflösung in x-Richtung von 1 mm nur 0,24 m/s Vorfahrtgeschwindigkeit möglich waren. Bei einer zehnfach schlechteren Auflösung von 10 mm stieg die Vorfahrtgeschwindigkeit auf 2,4 m/s. Beide Varianten sind nachteilig, da entweder die Geschwindigkeit zu niedrig oder die Auflösung begrenzt ist. Für weitergehende Versuche sollte deshalb eine Kamera eingesetzt werden, die es ermöglicht, bei 2 m/s eine Auflösung von 1 mm zu ermöglichen. Dies entspricht einer Bildrate von 2000 FPS, die nach STEMMER (2013) bei heutigen zur Verfügung stehenden Laser-Kamera-Kombinationen auch erreichbar ist.

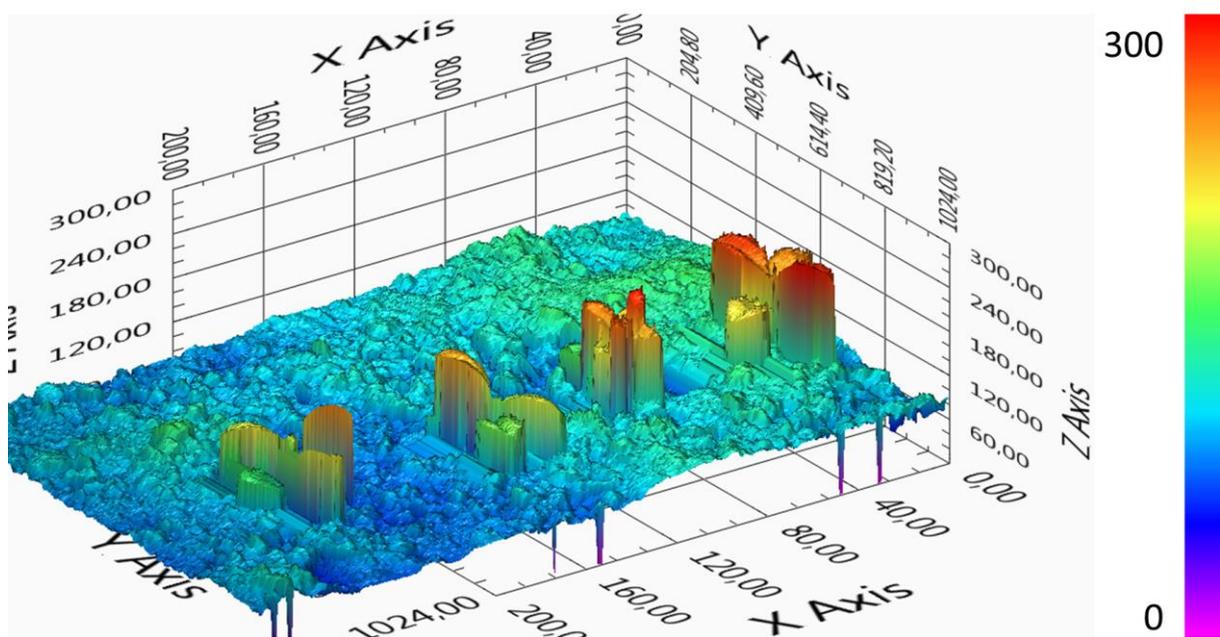


Bild 5.41: Dreidimensionales Höhenprofil einer Bodenoberfläche inklusive 4 Pflanzen mit Höhenwerten von 0–300 (dimensionslos)

Das vorrangige Ziel der Versuche mit dem Lichtschnittverfahren war die Erkennung der Nutzpflanze bei einem farblich ähnlichen Untergrund, wie er z. B. durch eine Vielzahl von Unkräutern in der Umgebung der Nutzpflanze entsteht. Auf der linken Seite von Bild 5.42 sind zwei Zuckerrüben mit diversen Unkräutern in der Draufsicht dargestellt. Auf der rechten Seite ist das dazugehörige nach Kapitel 4.2.2 erzeugte Binärbild zur Unterscheidung von pflanzlichen und nichtpflanzlichen Bestandteilen dargestellt. Die Umrisse der Zuckerrüben sind nur vereinzelt zu erkennen und lassen eine Bestimmung der Pflanzenmittelpunkte nicht zu.

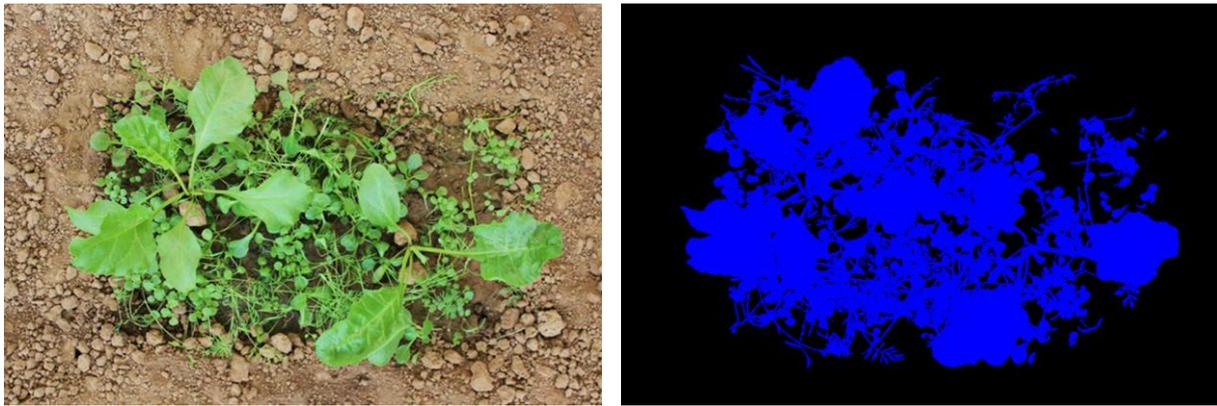


Bild 5.42: Zwei von Unkräutern umgebene Zuckerrüben im EC-Stadium 14–15 in der Draufsicht (links) mit dem nach Kapitel 4.2.2 erzeugten Binärbild zur Unterscheidung von pflanzlichen und nichtpflanzlichen Bestandteilen (rechts)

Auf der linken Seite von Bild 5.43 sind die gleichen Pflanzen wie in Bild 5.42 isometrisch dargestellt. Rechts ist das dazugehörige 3D-Profil abgebildet, welches mit dem Laser-Lichtschnittverfahren gemessen wurde. Die Höhe der einzelnen Profilpunkte ist farblich visualisiert (blau: Bodenniveau; grün, gelb, rot: über dem Bodenniveau).

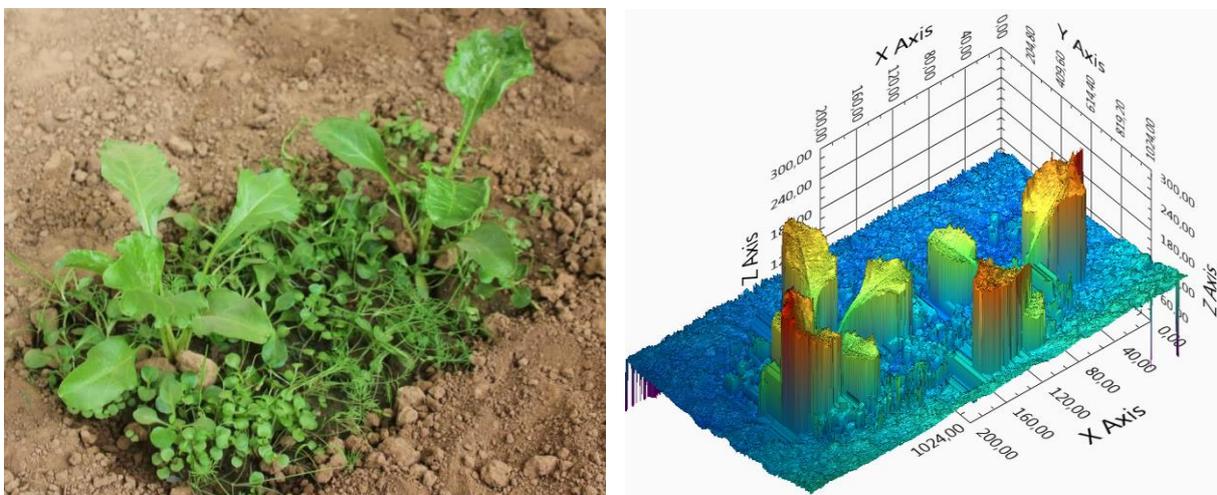


Bild 5.43: Zwei von Unkräutern umgebene Zuckerrüben (links) mit dem daraus erzeugten 3D-Profil (rechts), welches die Höhe der einzelnen Profilpunkte farblich visualisiert (blau: Bodenniveau; grün, gelb, rot: über dem Bodenniveau)

Bei Nutzung der Profilhöhenwerte aus dem Lichtschnittprofil (Bild 5.42 links) mit einer anschließenden Verwendung des Schwellwertverfahrens war es möglich, die Umrisse der Zuckerrüben herauszufiltern (Bild 5.42 rechts). Der Schwellwert wurde dabei auf eine Höhe eingestellt, die über der Höhe der Unkräuter lag. Die roten Flächen gehören ausnahmslos zu den Zuckerrüben, wie ein Abgleich mit der Farbaufnahme verdeutlicht.

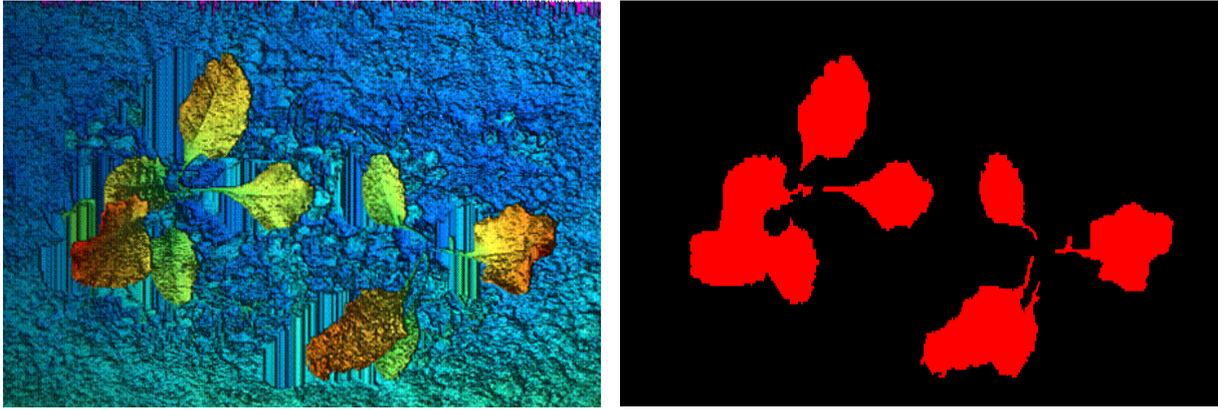


Bild 5.44: Farblich visualisiertes Höhenprofil (links) mit dem daraus per Schwellwertverfahren erzeugten Binärbild (rechts)

Lediglich übereinanderliegende Blätter sind mit dem einfachen Schwellwertverfahren nicht zu unterscheiden. Dazu muss ein Algorithmus zur Kantendetektion eingesetzt werden, der die Höhengsprünge von einem zum anderen Zuckerrübenblatt detektiert.

Beim Vergleich der zwei unterschiedlich erzeugten Binärbilder auf der linken Seite von Bild 5.45 wird der Unterschied deutlich. Auf dem rot eingefärbten Binärbild des 3D-Profiles sind die Zuckerrüben im Gesamtumfeld aus Zuckerrüben und Unkräutern deutlich zu erkennen, wohingegen das aus dem Farbbild erstellte Binärbild nur eine undefinierbare Gesamtfläche aller Pflanzen (blau) darstellt. Bei Verwendung der 3D-Daten ist abschließend auch die Bestimmung der Pflanzenmittelpunkte möglich. Diese wurden mit den gleichen Algorithmen wie in den Kapiteln 4.2.2 und 4.2.4.1 aus dem Binärbild berechnet.

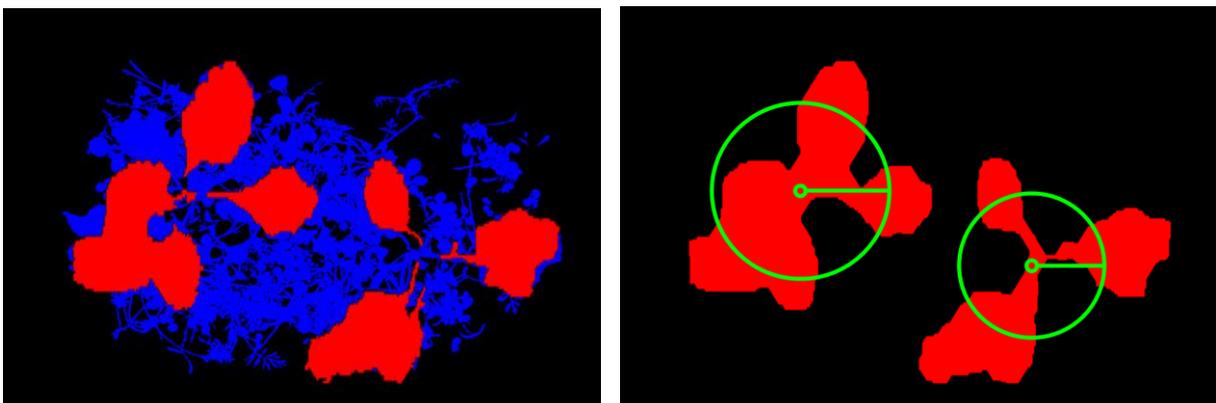


Bild 5.45: Überlagerte Binärbilder, die aus dem Farbbild (blau) und dem 3D-Profil (rot) erzeugt wurden (links); nach Kapitel 4.2.2 und 4.2.4.1 aus dem Binärbild des 3D-Profiles erzeugte Binärbilder der Zuckerrüben mit den berechneten und visualisierten Pflanzenmittelpunkten (rechts)

Die ersten Bildverarbeitungsergebnisse haben gezeigt, dass das Verfahren prinzipiell geeignet ist, um die Bilderkennung bei großem Unkrautbewuchs zu unterstützen. Um die Möglichkeiten besser abzuschätzen und das Verfahren auch bei höheren Vorfahrtgeschwindigkeiten einsetzen zu können, muss bei hierauf aufbauenden Arbeiten eine Kamera eingesetzt werden, die eine höhere Bildrate aufweist.

5.3 Ergebnisse zu den Feldversuchen mit der Rotationshacke

Die vorliegenden Ergebnisse zur Erkennungsgenauigkeit der Nutzpflanzen zeigen bereits die Möglichkeiten für die automatisierte Unkrautregulierung auf. Um das Potential in Verbindung mit einer Hacke untersuchen zu können, wurden deshalb zusätzliche Untersuchungen der Bildverarbeitung in Verbindung mit einer elektrisch angetrieben Rotationshacke vorgenommen.

5.3.1 Genauigkeit der Bildverarbeitungs-Servomotor-Kette

Im ersten Schritt wurden Stahlanreißer anstelle der Hackwerkzeuge genutzt, um die Stellen im Boden zu markieren, an denen ein Werkzeug den Boden bearbeiten würde. Anstelle von Nutzpflanzen wurden Punktmarker eingesetzt. Die Parameter zu diesen Versuchen sind in Tabelle 5.8 zusammengefasst.

Tabelle 5.8: Übersicht der wichtigsten Versuchsparameter bei den Versuchen mit der Rotationshacke und Anreißwerkzeugen

Anzahl der Reihen	10
Länge der einzelnen Reihen	16 m
Länge der Messstrecken	10 m
Anzahl der Punktmarker	45
Abstände zwischen den Punktmarkern	190–210 mm; 400 mm; 600 mm

Als übergeordnete Regelung für den Servomotor wurde eine Positionsregelung eingesetzt, die kontinuierlich die Ist- mit der Sollposition verglich. Die Genauigkeit der Pflanzenregulierung hängt somit von der gesamten Bildverarbeitungs-Servomotor-Kette aus Bildverarbeitung und Motorregelung ab. Bei genau ermittelten Pflanzenpositionen sollte der

Motor die Anreißer genau in der Mitte zwischen den Pflanzen durch den Boden bewegen. Um dies zu erreichen, errechnet LabVIEW Sollwerte für die zukünftigen Positionen der Motorachse. Eine große Abweichung (Schleppfehler) zwischen dem Soll- und dem Istwert der Motorachsenposition bedeutet daher, dass die Anreißer/Werkzeuge den Boden an einer nicht gewollten Position bearbeiten.

In Bild 5.46 a ist die Abweichung der gemessenen Bearbeitungsposition von der Sollposition in Fahrtrichtung dargestellt. Die arithmetisch mittlere Abweichung lag bei 4,6 mm. Die maximale Abweichung von 18 mm ist vermutlich nicht durch Fehler bei der Bildverarbeitung zu erklären, da Punktmarker als Testobjekte eingesetzt wurden. Eine Ursache kann ein kurzzeitiger großer Schlupf des Tastrades durch die Bodenbedingungen sein. In Bild 5.46 b ist der Schlupf-Faktor als Quotient aus der vom Tastrad gemessenen Vorfahrtposition und der realen Position dargestellt. Kurzzeitig kann dieser Faktor je nach Bodenbeschaffenheit und Feuchtigkeit deutlich höher sein, hier wurde die Gesamtabweichung auf einer 40 m langen Teststrecke gemessen.

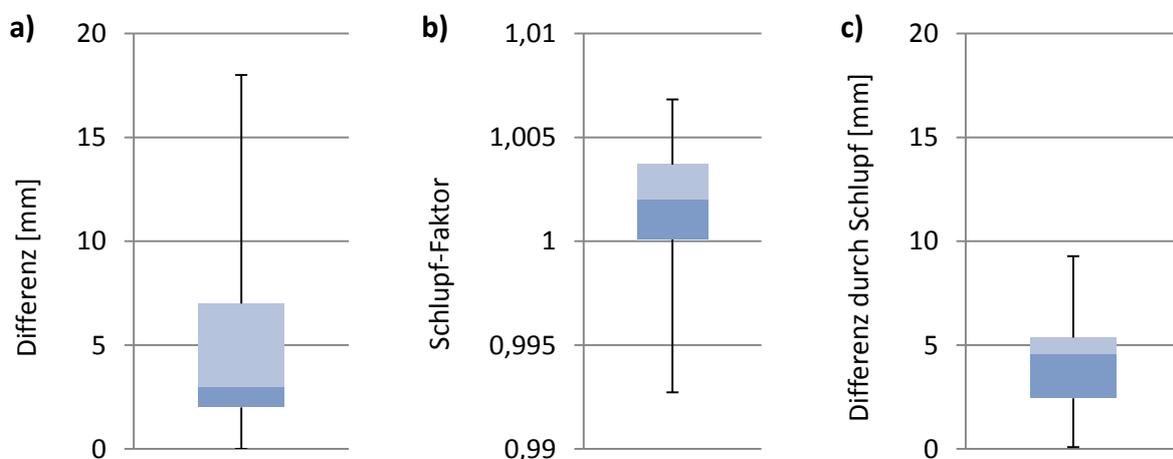


Bild 5.46: Abweichung der gemessenen Bearbeitungsposition von der Sollposition in Fahrtrichtung ($n = 450$ bei 10 Reihen) (Diagramm a); Schlupf-Faktor als Quotient aus der vom Tastrad gemessenen Vorfahrtposition und der realen Position ($n = 20$ bei 40 m Messstrecke) (Diagramm b); aus dem Schlupffaktor errechnete theoretische Abweichung der Werkzeug-Ist-Position von der Soll-Position bei einem Kamera-Werkzeug-Abstand in Fahrtrichtung von 1275 mm (Diagramm c)

Um die theoretisch mögliche Abweichung durch Schlupf besser zu beschreiben, ist in Bild 5.46 c die theoretische Abweichung in mm dargestellt. Die Abweichung ergibt sich durch den Schlupffaktor aus Bild 5.46 b und den Kamera-Werkzeug-Abstand in Fahrtrichtung von 1275 mm. Die durchschnittliche theoretische Abweichung betrug in den Versuchen 4,1 mm bzw. maximal 9,3 mm. Da der Schlupf an örtlich begrenzten Stellen höher sein kann, ist die größere Abweichung von maximal 18 mm in Bild 5.46 a zu erklären.

5.3.2 Versuche mit unkrautregulierenden Werkzeugen

Für die abschließenden Versuchsreihen wurde die Rotationshacke mit unkrautregulierenden Werkzeugen eingesetzt. Dabei werden hier nur die Ergebnisse bei Verwendung der Multispektralkamera gezeigt, da diese die besten Ergebnisse bei der Pflanzenerkennung lieferte. Im Folgenden werden Versuche im Vier- und Sechsstadium betrachtet.

5.3.2.1 Unkrautregulierung bei Zuckerrüben im Vierblattstadium

Die Versuche im Vierblattstadium (Tabelle 5.9) wurden auf Parzellen mit 50 m Länge durchgeführt. Wie bei den Bilderkennungsversuchen beschränkte sich die relevante Messstrecke nur auf einen Teilbereich von 30 m Länge.

Tabelle 5.9: Übersicht der wichtigsten Versuchsparameter der Hackversuche im Vierblattstadium

Anzahl der Reihen	9
Länge der einzelnen Reihen	50 m
Länge der Messstrecken	30 m
Anzahl der Pflanzen	1302
Vorfahrtgeschwindigkeit	2 m/s
Eingestellter Abstand der Zuckerrüben	190 mm
Sicherheitsabstand	35 mm
Aussaat-Nr.	6 - 2013

Zur Beurteilung der Ergebnisse in Bild 5.47 wurde vor und nach den Hackversuchen eine Bonitur der vorhandenen Zuckerrüben und Unkräuter im 100 mm breiten intra-row-Bereich vorgenommen. Die Unkräuter wurden dabei in dikotyle und monokotyle Pflanzen unterteilt. Eine Betrachtung der einzelnen Spezies war nicht erforderlich, da die Bilderkennung nicht zwischen den Unkräutern unterscheiden kann, wohl aber eine Differenzierung zwischen ein- und zweikeimblättrigen Pflanzen vornimmt. Bei der Annahme, dass zuvor 100 % der Unkräuter im Hackbereich standen, so teilen sich diese Unkräuter in 8,7 % monokotyle und 91,3 % dikotyle Pflanzen auf. Die Hackwerkzeuge konnten 91,7 % der Unkräuter entfernen. Die verbliebenen 8,3 % teilen sich auf in 2,2 % Monokotyle und 6,1 % Dikotyle. Diese Unkräuter fanden sich vor allem im Schutzbereich der Zuckerrüben, der bei den Versuchen im Vierblattstadium einen Radius von 35 mm hatte. Neben den Unkräutern wurden auch Zuckerrüben von den Hackwerkzeugen verletzt oder entfernt. Bei den Versuchen im Vierblattstadium wurden 2,7 % der Zuckerrüben von den Werkzeugen entfernt.

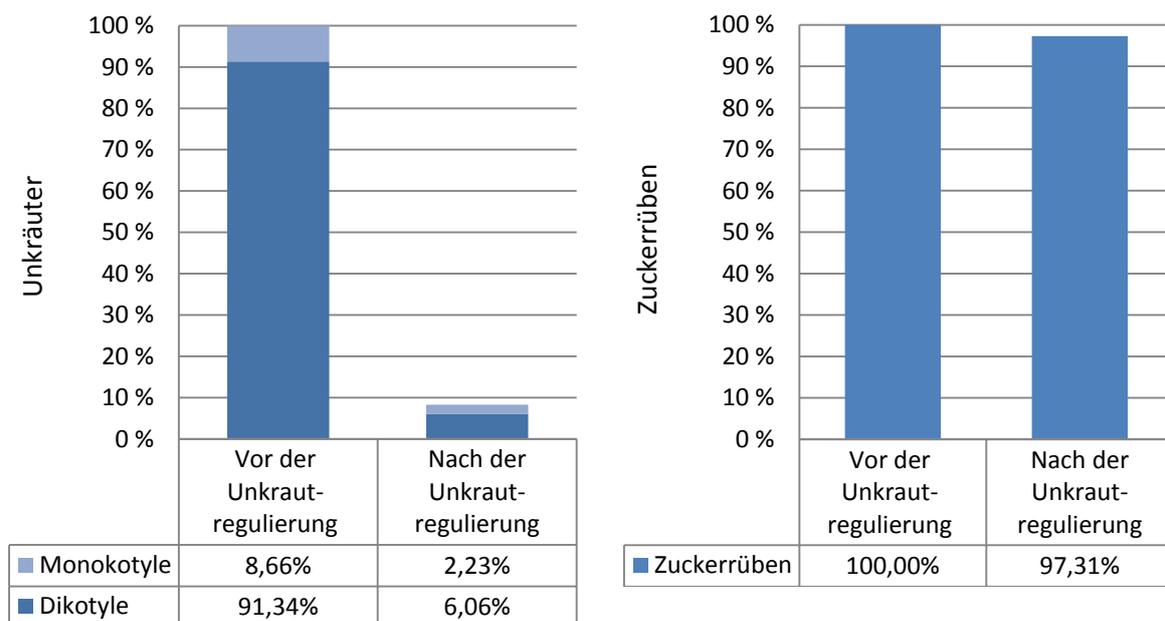


Bild 5.47: Anzahl der monokotylen bzw. dikotylen Unkräuter (links) sowie der Zuckerrüben (rechts) vor und nach der mechanischen Unkrautregulierung im Vierblattstadium der Zuckerrüben (n = 1302 bei 9 Reihen)

5.3.2.2 Unkrautregulierung bei Zuckerrüben im Sechsstadium

Die Versuche im Sechsstadium (Tabelle 5.10) wurden unter den gleichen Bedingungen wie im Vierblattstadium durchgeführt. Vor den Hackversuchen (Bild 5.48) standen 6,4 % Monokotyle und 93,6 % Dikotyle innerhalb der relevanten Messstrecke.

Tabelle 5.10: Übersicht der Versuchsparameter der Hackversuche im Sechsstadium

Anzahl der Reihen	9
Länge der einzelnen Reihen	50 m
Länge der Messstrecken	30 m
Anzahl der Pflanzen	1266
Vorfahrtgeschwindigkeit	2 m/s
Eingestellter Abstand der Zuckerrüben	190 mm
Sicherheitsabstand	35 mm
Aussaat-Nr.	6 - 2013

Die Hackwerkzeuge konnten 92,0 % der Unkräuter entfernen. Die verbliebenen 8,0 % teilen sich auf in 1,8 % Monokotyle und 6,2 % Dikotyle. Diese Unkräuter fanden sich wieder größtenteils im Schutzbereich der Zuckerrüben, der bei den Versuchen im Sechsstadium einen Radius von 35 mm hatte. Bei den Versuchen im Sechsstadium wurden 2,3 % der Zuckerrüben von den Werkzeugen entfernt.

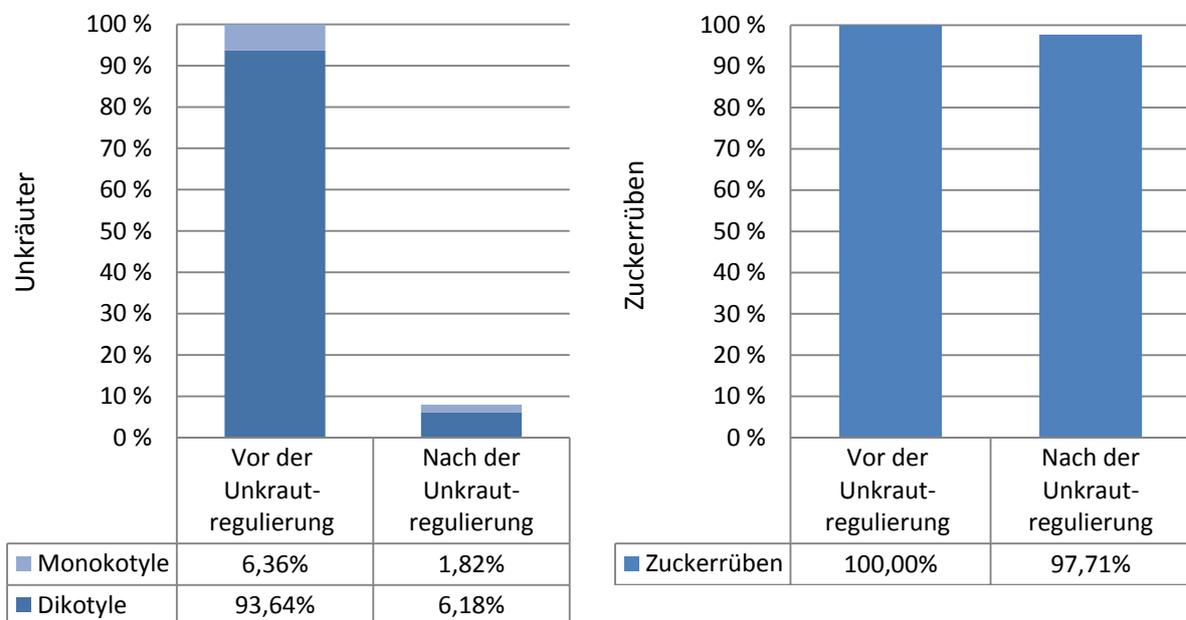


Bild 5.48: Anzahl der monokotylen bzw. dikotylen Unkräuter (links) sowie der Zuckerrüben (rechts) vor und nach der mechanischen Unkrautregulierung im Sechsstadium der Zuckerrüben (n = 1266 bei 9 Reihen)

Als Folge von Unkraut im Schutzbereich der Nutzpflanze wurde entweder die Zuckerrübe entfernt, oder es verblieben häufig auch beide Pflanzen auf dem Feld. So ist in Bild 5.49 eine Zuckerrübe auf der linken Seite des Original-Farbbildes zu sehen, die ein monokotyles Unkraut an der gleichen Position überdeckt. Aufgrund der ähnlichen Farbe wurde ein Binärbild errechnet, in dem diese Zuckerrübe mit dem Unkraut als ein Objekt dargestellt wird. Die frei stehende Zuckerrübe im rechten Teil des Bildes wurde hingegen korrekt erkannt.

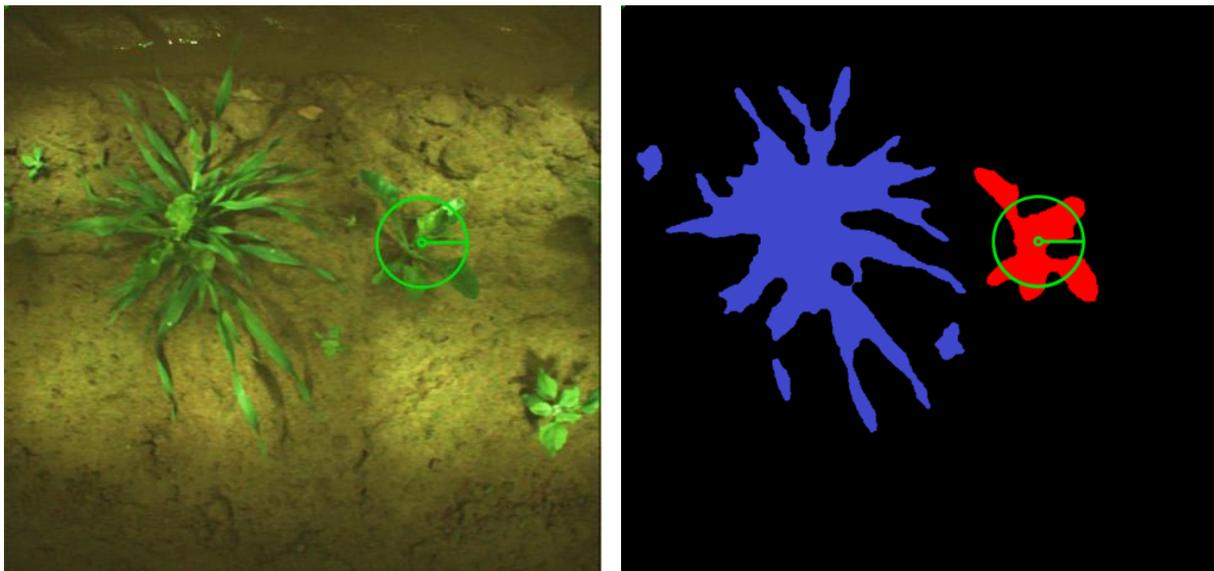


Bild 5.49: Original-Farbbild (links) und aus dem Originalbild errechnetes Binärbild (rechts) mit einer Zuckerrübenpflanze und überdecktem monokotylen Unkraut an der gleichen Position

Die Software errechnet in diesem Fall eine Zuckerrübenposition, die statistisch als wahrscheinlich gilt. Diese kann mit der Position von Unkraut und Zuckerrübe übereinstimmen, so dass beide Pflanzen nicht von der Unkrautregulierung erfasst werden. Genau dieser Fall führte dazu, dass die Anzahl der entfernten Zuckerrüben trotz bildverarbeitungstechnisch nicht erkannter Zuckerrüben nicht in der gleichen Größenordnung lag. Bei einer zu großen Differenz zwischen der Zuckerrübenposition und der statistisch errechneten Position wurden häufig sowohl Unkraut als auch Zuckerrübe entfernt. Eine andere selektive Möglichkeit steht mit diesem System nicht zur Verfügung und zeigt eine Grenze der mechanischen Unkrautregulierung, die auch bei korrekter Erkennung verbleibt.

6. Schlussfolgerungen und abschließende Diskussion

Das Ziel der Entwicklung war ein System zur automatisierten, mechanischen Unkrautregulierung in Reihenkulturen. Da die Unkrautbehandlung zwischen den Reihen mithilfe kamerabasierter Reihenerkennung und standardmäßiger Anbau-Hackrahmen bereits möglich ist, stand die Regulierung innerhalb der Reihe (intra-row) im Fokus der Arbeit. Die ersten Versuche mit einer Rotationshacke im Maschinenlabor (GOBOR 2007) haben gezeigt, dass der prinzipielle mechanische Aufbau für eine Hacke im Intra-row-Bereich geeignet ist. Die fortgeführten Versuche auf der Bodenrinne und die CAD-Simulationen hatten zum Ergebnis, dass die Drehung der Servomotoren um die Vertikalachse zu einer verbesserten Kinematik der Hackwerkzeuge führt. Aufgrund des aufwändigeren Aufbaus und der vorrangigen Tests zur Pflanzenerkennung wurde diese Möglichkeit zur Veränderung der Motorposition allerdings nicht auf dem Versuchsträger für die Feldversuche umgesetzt. Trotzdem zeigten die Tests mit dem Versuchsträger, dass die Rotationshacke auch auf dem Feld einsetzbar ist.

Die zwei wesentlichen Punkte zur Erreichung dieses Ziels waren die Echtzeitsteuerung, die in den ersten Versuchen auf der Bodenrinne (GOBOR 2007) noch nicht verwendet wurde, sowie der Einsatz einer kamerabasierter Pflanzenerkennungsmethoden. Um ein echtzeitfähiges System aufzubauen, musste für die Regelung ein Controller eingesetzt werden, auf dem ein solches System in Echtzeit arbeitet. Der bei den Versuchen eingesetzte CompactRIO-Controller bietet genau dies auf zwei Ebenen. Unterprogramme, die eine besonders hohe Verarbeitungsgeschwindigkeit benötigen und parallele Prozesse aufweisen, wurden auf einem deterministischen FPGA ausgeführt. Alle weiteren Echtzeit-Programme wurden auf dem integrierten Echtzeitprozessor ausgeführt. Damit auch die Kommunikation zwischen den elektronischen Komponenten in Echtzeit stattfinden konnte, basierten alle Bus-Verbindungen auf dem Ethernet-Standard. Das GigE-Ethernet stellte dabei die Verbindung zwischen Kamera, Echtzeitprozessor und Notebook her und erlaubte eine einfache Anbindung weiterer Komponenten, die diesen Standard beherrschen. Der Industriestandard EtherCAT gestattete nicht nur die echtzeitfähige Weitergabe der Befehle an den Motor, sondern bot aufgrund der hohen Datentransferrate auch eine sehr hohe Abtastrate des Motorencoders, so dass die Winkelposition bei einer interpolierten Auflösung von 2.621.440 Signalen pro Umdrehung ausreichend schnell ausgelesen werden konnte.

Der Einsatz des Versuchsträgers im Feld zeigte, dass die derzeitigen Algorithmen eine zuverlässige Bilderkennung sowie Ansteuerung der Servomotoren bei einer Arbeitsgeschwindigkeit von bis zu 7,2 km/h erlauben. Die Grenzen werden hier vor allem durch die Hackwerkzeuge gesetzt, da mit erhöhter Vorfahrtgeschwindigkeit die Drehzahl proportional ansteigt und sich damit der Erdaufwurf vergrößert. Die Bilderkennung und -verarbeitung funktionierte auch bei einer Vorfahrtgeschwindigkeit von 10 km/h und wäre bei angepasster Beleuchtung und kürzeren Kameraverschlusszeiten auch bei deutlich höheren Geschwindigkeiten möglich.

Insgesamt wurden bei den Versuchen über 275.250 Bilder aufgenommen und ca. 400.000 Zuckerrüben in verschiedenen Entwicklungsstadien dokumentiert. Beim Vergleich der Ergebnisse der Farb-, NIR- und Multispektralkamera zeigte sich unabhängig vom Entwicklungsstadium, dass die gemeinsame Verwendung der Farb- und NIR-Informationen zu den besten Ergebnissen führte. Die Erkennungsquote war bei der Multispektralkamera am höchsten und die Quote der falsch deklarierten Unkräuter am geringsten. Unabhängig vom Erkennungssystem zeigte sich bis zum Sechsstadium die Tendenz, dass die Erkennungsrate bei größeren Entwicklungsstadien anstieg. Erst kurz vor Pflanzenschluss brach dieser Trend ein, da die einzelnen Pflanzen durch die Überlagerung der Blätter teilweise nicht voneinander zu unterscheiden waren. Ein weiteres Problem, das im Grunde auf der gleichen technischen Schwierigkeit bei der Überlagerung von Blättern beruht, ist die Erkennung der Nutzpflanzen bei einer großen Anzahl von Unkräutern auf den Bildern. Der auf den Bildern dargestellte „grüne Teppich“ ist zwar für den menschlichen Betrachter problemlos in einzelne Pflanzen zu trennen, die Bildverarbeitungsalgorithmen konnten aber nur schwer einzelne Blätter voneinander unterscheiden oder gar die Blätter zu Einzelpflanzen gruppieren.

Deshalb war ein Lösungsansatz, eine signifikante technische Information, die die Blätter an den Überschneidungsbereichen voneinander unterscheidet, zusätzlich zu verwenden. Neben der Farb- und NIR-Reflexionseigenschaft hat jeder Punkt auf den Blättern eine definierte Höhe, die sich bei benachbarten Blättern im Überschneidungsbereich unterscheidet. Die Versuche zur Ermittlung dieser zusätzlichen Information wurden in Anlehnung an Verfahren aus der Automationsindustrie mit einem Stereokameraaufbau und einem Laser-Lichtschnittverfahren durchgeführt.

Der Stereokameraaufbau bot den Vorteil, dass die Kameras gleichzeitig für die Farberkennung eingesetzt werden konnten. Allerdings benötigte die Berechnung des Höhenprofils eine hohe Prozessorleistung, so dass die Berechnungsdauer eines Bildes bei bis zu einer Sekunde lag. Für die Berechnung wurde der gleiche Prozessor wie für die Farberkennung verwendet. Deshalb beschränkten sich die Versuche auf das Labor. Abgesehen von dieser Problematik bestätigten die Ergebnisse eine grundsätzliche Eignung des Verfahrens. Ein Einsatz auf dem Feld ist durchaus möglich, wenn die Algorithmen im Hinblick auf die Berechnungsdauer verbessert und ein Computer mit höherer Prozessorleistung eingesetzt werden. Der Einsatz dieser Kameraaufbauten in Fahrerassistenzsystemen in Kraftfahrzeugen belegt deren praktische Eignung bei hochdynamischen und zeitkritischen Regelsystemen.

Das auch im Feld genutzte Laser-Lichtschnittverfahren hatte den Vorteil, dass die benötigte Prozessorleistung geringer als beim Stereokameraaufbau war. Während der Versuche zeigten sich allerdings auch Nachteile. Ungünstig stehende Blätter oder Objekte konnten teilweise die Reflexionen verdecken, so dass nicht 100 % der Oberfläche analysiert werden konnte. Selbst eine zweite Kamera würde keine vollständige Abdeckung garantieren, allerdings den Überdeckungsgrad erhöhen. Im Vergleich zur Stereokamera wurde bei gleicher Auflösung der Kamerachips eine höhere Auflösung der Tiefenbilder erreicht. Diese entsprach der Auflösung des Kamerachips. Da die Bildrate für die angestrebte Geschwindigkeit und Auflösung in Fahrtrichtung nicht ausreichte, wurden keine Versuche in Verbindung mit der Rotationshacke durchgeführt.

Bei den Versuchen in Verbindung mit einer elektrisch angetriebenen Rotationshacke wurde vorrangig die Multispektralkamera eingesetzt, da diese die besten Ergebnisse lieferte. Bei der Untersuchung der Genauigkeit der Pflanzenerkennungs-Servomotor-Kette stellte sich heraus, dass die Hackwerkzeuge mit einer mittleren arithmetischen Abweichung von 4,6 mm geführt werden können. Diese Abweichung ist neben einem möglichen Bildverarbeitungsfehler durch den Schlupf des Tastrades zu erklären.

Zur Beurteilung der Ergebnisse bei der Nutzung unkrautregulierender Werkzeuge wurde vor und nach den Hackversuchen eine Bonitur der vorhandenen Zuckerrüben und Unkräuter vorgenommen. Die Hackversuche haben gezeigt, dass im Vier- und Sechsstadium ca. 92 % der Unkräuter entfernt werden konnten, wobei sich die Ergebnisse in den beiden

Entwicklungsstadien kaum voneinander unterschieden. Die verbleibenden 8 % befanden sich im Schutzbereich der Zuckerrüben. Der vorher festgelegte Schutzbereich rund um die Zuckerrüben schützt somit auch die Unkräuter in direkter Pflanzenumgebung. Dieser Bereich ist allerdings notwendig, damit die Zuckerrüben nicht beschädigt werden.

Um die Anzahl der entfernten Unkräuter zu erhöhen, muss der Schutzbereich verkleinert werden. Wie bei der konventionellen Reihenhacke steigt damit die Gefahr, die Zuckerrüben zu verletzen. Bei einem Sicherheitsradius von 35 mm wurde der Zuckerrübenbestand um 2,3–2,7 % dezimiert. Dies passt zu den Ergebnissen der Mittelpunktberechnung der Zuckerrüben (Kapitel 5.2.1.3 und 5.2.1.4), bei denen einzelne Abweichungen fast 35 mm erreichten. Der jeweilige Schutzbereich wird so weit verschoben, dass sich die Zuckerrübenpflanze nicht mehr im Zentrum, sondern am Rand des Schutzbereichs befindet. Somit wird ein Kontakt zu den Hackwerkzeugen wahrscheinlicher. Um die Nutzpflanzenverluste zu verringern, muss dementsprechend die Bilderkennungssoftware verbessert werden.

Die Versuche haben demonstriert, dass die anspruchsvolle Aufgabe des Hackens in der Reihe mit derzeit verfügbaren Komponenten und Standards aus der Automationsindustrie zu bewerkstelligen ist. Die umfangreichste Aufgabe bestand in der Bilderkennung, da es noch keine standardisierten Algorithmen für die Pflanzenerkennung gab und diese erst entwickelt werden mussten. Für eine Anwendung in der Praxis müssen diese Algorithmen noch anpassungsfähiger werden, um die Hacke auch bei unbekanntem Pflanzenarten einsetzen zu können, ohne dass der Bediener Parameter verändern oder die Algorithmen verändern muss.

7. Ausblick

Der Aufbau und die Ergebnisse zur Erkennung von Pflanzen sowie zur Regulierung von Unkräutern haben gezeigt, dass ein Hacken in der Reihe bei einer praxistauglichen Geschwindigkeit von 2 m/s möglich ist. Wie MÜTER (2013) bereits zusammengefasst hat, ist durch die Nutzung von Komponenten und Standards aus der Automationsindustrie eine Überführung in ein praxistaugliches Gerät möglich.

Dabei darf nicht vergessen werden, dass Anwender aus der Praxis ein Gerät mit einfacher Bedienung bevorzugen. Deshalb muss das derzeit genutzte Programm, welches in dieser Form zu viele Einstelloptionen für die unterschiedlichen Erkennungsparameter und Regelgrößen bietet, anwenderfreundlicher gestaltet werden. Als Einstellparameter dürfen nur die Pflanzenart und evtl. das Entwicklungsstadium eingegeben werden. Auf lange Sicht sollte es ein Ziel sein, dass die Maschine die Pflanzenart und das jeweilige Stadium automatisch erkennt. Um die Pflanzenerkennung zu verbessern, ist auch die Weiterentwicklung der Stereokamera- und Laser-Lichtschnittverfahren sinnvoll.

Eine Umsetzung in die Praxis ist auch von der Entwicklung der Traktoren abhängig. So wurde der Versuchsträger von einem zusätzlichen Aggregat mit Spannung versorgt, was als Übergangslösung angesehen wird. Traktoren wie der Fendt X Concept (Agco 2013) und der John Deere 6210RE (JOHN DEERE 2011), die mit leistungsfähigen Generatoren und Starkstromanschlüssen ausgestattet sind, bieten hier die Möglichkeit der Stromversorgung. Die Anforderungen der Agrartechnik an die elektrischen Antriebe sind vergleichbar mit denen der Automobilindustrie. Der Vorteil der besseren Regelbarkeit gegenüber anderen Antriebssystemen ist vor allem für regelungstechnische Aufgaben, die unter dem Stichwort Precision Farming (dt.: Präzisionsackerbau) immer stärker in den Vordergrund treten, entscheidend. Weitere Forschungsarbeiten in dieser Richtung sind dementsprechend voranzutreiben.

8. Anhang

8.1 EC Entwicklungsstadien der Zuckerrübe

Tabelle 8.1: Makroentwicklungsstadien 1–4 und EC-Entwicklungsstadien 1–49 der Zuckerrübe (BAYER 2015; LEIVERMANN 2012)

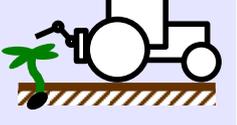
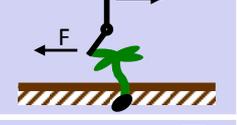
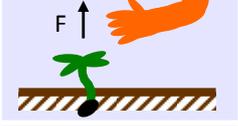
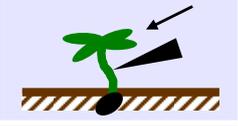
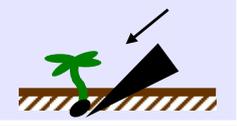
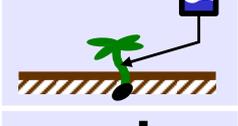
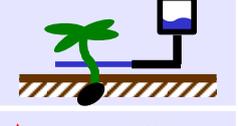
				
0	1	1	3	4
1-9	10-11	12-19	31-39	49
Keimung	Auflaufen	Blattausbildung	Schließen des Bestandes	Erntestadium
	Jugendentwicklung		Hauptentwicklung	

Tabelle 8.2: Beschreibung der EC-Entwicklungsstadien von Zuckerrüben (LEIVERMANN 2012)

Makrostadium	EC Stadium	Beschreibung
0 Keimung	0–9	Keimung bis Auflaufen
1 Blattentwicklung	10	Keimblattstadium: Keimblätter waagrecht entfaltet
	11	1. Laubblattpaar deutlich sichtbar; erbsengroß
	12	2 Laubblätter entfaltet (1. Blattpaar)
	14	4 Laubblätter entfaltet (2. Blattpaar)
	15–19	5 Laubblätter entfaltet, fortlaufend bis 9 und mehr Laubblätter entfaltet
3 Rosettenwachstum	31	Beginn Bestandesschluss: 10 % der Pflanzen benachbarter Reihen berühren sich
	33	30 % der Pflanzen benachbarter Reihen berühren sich
	39	Bestandesschluss: über 90 % der Pflanzen benachbarter Reihen berühren sich
4 Entwicklung des Rübenkörpers	49	Rübenkörper hat erntefähige Größe erreicht

8.2 Morphologischer Kasten zur Lösungsfindung

Tabelle 8.3: Morphologischer Kasten zur Lösungsfindung für das Problem der Unkrautregulierung in Pflanzenreihen

Fahrzeug				
Detektion der Pflanzen				
				
				
				
Art der Behandlung				
				
				
				

8.3 Technische Daten

8.3.1 Beleuchtung

8.3.1.1 Halogenscheinwerfer

Leistung	400 W
Leuchtmittel	Halogen
Lichtstrom	8550 lm
Spannung	230 V AC
Gehäuse	Aluminium
Schutzart	IP 44 (Spritzwassergeschützt)

8.3.1.2 LED-Modul Neutral-Weiß

Leistung	3 W
Lichtfarbe	Neutral-Weiß
Farbtemperatur	4300 K
Lichtstrom	112 lm
Min. Spannung	3,1 V DC
Max. Spannung	4,1 V DC
Sperrspannung	5 V DC
Betriebsstrom	700 mA
LED-Typ	Edison® Edixeon®
Abstrahlwinkel	30°
Gehäuse	Aluminium
Schutzart	IP 65 (wasserdicht)
Betriebstemperatur	-20°C bis +40°C

8.3.1.3 LED-Modul IR

Leistung (kontinuierlich)	950 mW
Max. Leistung	1250 mW
Wellenlängenbereich	Infrarot
Peak-Wellenlänge	850 nm
Min. Spannung	3 V
Max. Spannung	3,5 V
Sperrspannung	1 V
Betriebsstrom	1 A DC
Betriebsstrom	5 A DC gepulst
LED-Typ	Osram Dragon 1 IR PowerStar
Strahlungsintensität	1100 mW/sr
Abstrahlwinkel	120°
Betriebstemperatur	-20°C bis +75°C

8.3.1.4 LED Strobe Controller

Anzahl der Kanäle	6
Max. Spannung kontinuierlich	30 V
Max. Spannung im Triggerbetrieb	200 V
Max. Strom pro Kanal (kontinuierlich)	385 mA
Max. Strom pro Kanal (getriggert)	8 A
Max. Ausgangsleistung	84 W
Minimale Pulslänge	1 µs
Maximale Pulslänge	1 s
Steuerschnittstelle	RS232
Spannungsversorgung	24 V
Trigger Eingangsspannung	0–5 V
Betriebstemperatur	-20°C bis +40°C

8.3.1.5 Laser

Wellenlänge	660 nm
Klassifizierung	3B nach EN 60825-1 (ohne Linien-Optik)
Punktgenauigkeit	< 15 $\mu\text{rad}/^\circ\text{C}$
Projektion	Linie homogen/DOE Multilinien
Öffnungswinkel (Linie)	30°
Einstellbarer Fokus	ja
Fokusbereich	100 mm bis ∞
Strahldivergenz FWHM	< 1mrad (mit Punktoptik)
Spannungsversorgung	5–30 V DC
Ausgangsleistung	bis zu 160 mW
Gehäuse	Messing verchromt
Schutzart	IP 52
Betriebstemperatur	-10°C bis +50°C

8.3.2 Kameras**8.3.2.1 Farbkamera**

Schnittstelle	USB 2.0
Sensortyp	CCD
Format	1/3 “
Auflösung	1024 x 768 Pixel
Pixel-Größe	4,65 μm x 4,65 μm
Empfindlichkeit	0,15 lx
IR-Sperrfilter	ja
Belichtungszeit	1/10000 s bis 30 s
Verstärkung	0–36 dB
Offset	0–511

Weißabgleich	-2 dB bis +6 dB
Sättigung	0–200 %
Dynamikbereich	8 bit
Versorgungsspannung	4,5–5,5 V DC über USB
Stromaufnahme	Ca. 500 mA
Trigger	ja
Bildrate	30 FPS
Objektivanschluss	CS-Mount auf M12
Betriebstemperatur	-5°C bis +45°C

8.3.2.2 Farbkameras für 3D-Stereo-Vision

Schnittstelle	USB 3.0
Sensortyp	CMOS
Format	1/1.8 “
Auflösung	1280 x 1024 Pixel
Pixel-Größe	5,3 µm x 5,3 µm
Dynamikbereich	10 bit
Filter	HQ-IR
Versorgungsspannung	Über USB
Trigger	ja
Bildrate	60 FPS
Objektivanschluss	C-Mount
Gehäuse	Magnesium
Schutzart	IP30

Objektiv:

Bezeichnung	M118FM08
Brennweite	8 mm
Bildwinkel horizontal	50,8°
MOD (Minimale Objektdistanz)	0,1 m

Blendensteuerung	manuell
Blendenbereich F	1,4–16

8.3.2.3 Multispektralkamera

Schnittstelle	2 x GigE Vision Ethernet
Sensortyp	2 x CCD
Format	2 x 1/3 ″
Auflösung	1024 x 768 Pixel
Pixel-Größe	4,65 µm x 4,65 µm
Belichtungszeit	1/10000 s bis 1/30 s
Verstärkung	-3 dB bis +21 dB
Strahlteilung	Prisma mit dichromatischer Beschichtung
Wellenlängentrennung	bei 760 nm
Versorgungsspannung	12–24 V DC
Trigger	GigE/TTL-In
Bildrate	30 FPS (85 FPS bei Partial-Scan)
Objektivanschluss	C-Mount
Empfindlichkeit (Farb-Chip)	0,5 lx
Empfindlichkeit (IR-Chip)	1,0 µW/cm ² bei 800 nm
Dynamikbereich (Farb-Chip)	RGB 24 bit/RGB 30-bit/ Raw Bayer 10 bit oder 8 bit
Dynamikbereich (IR-Chip)	8/10/12 bit
Wellenlängenbereich (Farb-Chip)	400–700 nm
Wellenlängenbereich (IR-Chip)	750–900 nm
Filter (Farb-Chip)	BAYER
Weitere Eigenschaften	Multi-ROI, Partial Scan, Auto-Iris-Funktion, Knee-Kompensation, Shading-Korrektur, LUT
Betriebstemperatur	-5°C bis +45°C

Objektiv:

Bezeichnung	TF4-DA-8
-------------	----------

Brennweite	4 mm
Bildwinkel horizontal	61,56°
Bildwinkel vertikal	48,27°
Fokussierung	manuell
MOD (Minimale Objektdistanz)	0,1 m
Blendensteuerung	manuell
Blendenbereich F	2,2–16

8.3.3 Inkrementeller Drehgeber

Ausgangssignal	Gegentakt (Push-Pull)
Encoder-Technologie	Inkremental
Impulse pro Umdrehung	5000
Max. Drehzahl	10000 min ⁻¹
Schaltfrequenz	200 kHz
Schaltspannung	10 – 30 V DC
Gehäuse	Aluminium
Schutzart	IP64
Betriebstemperatur	-10°C bis +70°C

8.3.4 Echtzeit-Controller

CPU-Taktfrequenz	533 MHz
Betriebssystem	Echtzeit
Nichtflüchtiger Speicher	2 GB
Systemspeicher	256 MB
Ethernet-Anschlüsse	2 (10/100/1000 Mbit/s)
Eingangsspannung	9 – 35 V DC

Betriebstemperatur	-20 °C bis +55 °C
--------------------	-------------------

FPGA:

Field Programmable Gate Array	Virtex-5 LX 50
-------------------------------	----------------

FPGA-Taktfrequenz	40 MHz
-------------------	--------

Flip-Flops	28.800
------------	--------

LUTs	28.800
------	--------

Multiplizierer	48
----------------	----

FPGA Arbeitsspeicher (RAM)	1.728 kbit
----------------------------	------------

Bidirektionales Digital-I/O-Modul:

Kanäle	30
--------	----

Maximale Taktrate	140 kHz
-------------------	---------

Logikpegel	5 V TTL
------------	---------

Analogausgangsmodul:

Kanäle	4
--------	---

Auflösung	16 bit
-----------	--------

Spannungsbereich	-10 V bis +10 V
------------------	-----------------

Genauigkeit	0,11 V
-------------	--------

Abtastrate	100 kSa/s
------------	-----------

Ausgangsstromstärke (ein Kanal)	1 mA
---------------------------------	------

Ausgangsstromstärke (alle Kanäle)	4 mA
-----------------------------------	------

Schrittmotorsteuerungsmodul:

Anzahl der Achsen	1
-------------------	---

Motortyp	P-Command Schrittmotor
----------	------------------------

Betriebssystem	Echtzeit
----------------	----------

Positionserfassung	einfach
--------------------	---------

Stützstellen	Einfach periodisch
--------------	--------------------

PID-Regelung	ja
--------------	----

Maximale Ausgangsfrequenz	5 MHz
---------------------------	-------

Positionsrückmeldung	Kodierer
----------------------	----------

8.3.5 Notstromaggregat

Dauerleistung	7,6 kW
Standby-Leistung	8,3 kW
Drehzahl	3000 min ⁻¹
Spannung	400/230 V
Frequenz	50 Hz
Leistungsfaktor	0,8

Motordaten:

Kraftstoff	Diesel
Ausführung	Viertaktmotor
Einspritzung	direkt
Zylinder	1
Hubraum	667 cm ³
Kühlung	Luft
Mechanische Schutzart	IP 21

USV:

Leistung	1000 VA
Batterie-Typ	Blei-Gel

8.3.6 Antriebsmotor

Typ	Servomotor
Spannungsversorgung	400 V AC
Stromstärke	9,3 A
Leistung	3,943 kW
Drehmoment	29,7 Nm
Encoder	BiSS B Typ AD58 Multiturn absolut, optisch (2.048 Striche/Umdrehung; 4.096 Umdrehungen)

Auflösung	max. 22 bit (12 bit Multiturn)
-----------	--------------------------------

Verstärker:

Max. Stromstärke	12 A
Spannungsversorgung	240–480 V
Ansteuerung	EtherCAT
Auswertung	Echtzeit
Aktualisierungsrate	1,5 MHz
Stromregelkreis	
Aktualisierungsrate	16 kHz
Drehzahlregelung	
Aktualisierungsrate	4 kHz
Positionsregelung	

8.4 Einstellungen

8.4.1 Motorregelung

Lageregler:

P-Verstärkung	2,711 s ⁻¹
I-Verstärkung	0 Hz
Geschwindigkeitsvorsteuerung	1

Drehzahlregler:

P-Verstärkung	2,150 A/(rad/s)
I-Verstärkung	3,121 Hz

Geschwindigkeitsgrenzwerte:

Positiver Grenzwert	3.000 rpm
Negativer Grenzwert	-3.000 rpm
Grenzwert für Überdrehzahl	7.219 rpm

Beschleunigungsgrenzwerte:

Beschleunigung	10.000 rpm/s
Verzögerung	-10.000 rpm/s

Stromgrenzwerte:

Positiver effektiver Spitzenstrom	9 A
Negativer effektiver Spitzenstrom	9 A

8.4.2 Laser-LichtschnittverfahrenRGB-Schwellwerteinstellungen:

Minimum Rot	247 (255)
Maximum Rot	255 (255)
Minimum Grün	0 (255)
Maximum Grün	214 (255)
Minimum Blau	0 (255)
Maximum Blau	255 (255)

Rake-Einstellungen:

Linienabstand	1 Pixel
---------------	---------

9. Literaturverzeichnis

- AGCO (2013): Fendt X Concept. online verfügbar unter: <http://www.fendt.com/int/7710.asp>, zuletzt geprüft am 23.01.2014.
- AGRIOS, G. N. (1988): Plant pathology. 3. Auflage, San Diego, USA.
- ANDERSEN, H. J. (2001): Outdoor computer vision and weed control. Dissertation, Aarlborg University, Computer Vision & Media Technology Laboratory (CVMT).
- ANONYMUS (2007): Leistungsvergleich von Hackgeräten. Informationen für Praxis und Beratung im Ökologischen Landbau. Sächsische Landesanstalt für Landwirtschaft, Dresden.
- ÅSTRAND, B. (2005): Vision based perception for mechatronic weed control. Dissertation, Chalmers University of Technology, Göteborg, Schweden.
- ÅSTRAND, B. & BAERVELDT, A.-J. (2002): An agricultural mobile robot with vision-based perception for mechanical weed-control. In: Autonomous robots 13, S. 21–35.
- AUST, D. (1986): Bewertung des biologisch-dynamischen Anbaus von Obst und Gemüse aus betriebs- und arbeitswirtschaftlicher Sicht. In: Tagungsband zu den Forschungsvorhaben : alternative Erzeugung von Äpfeln und Gemüse, 09.07.1986, Landwirtschaftskammer Rheinland, Köln-Auweiler, S. 343–355.
- BAERTSCHI (2014): Pflorgetechnik und Dämpfen. Baertschi Agrartechnik AG, Hüswil, Schweiz, online verfügbar unter: <http://fobrokress.awis003.net/de/pflorgetechnik.html>, zuletzt geprüft am 01.06.2014.
- BAEUMER, K. (1992): Allgemeiner Pflanzenbau. 3. Auflage, Ulmer Verlag, Stuttgart.
- BAKKER, T.; ASSELT, C. v.; BONTSEMA, J.; MÜLLER, J. & STRATEN, G. v. (2006): Autonomous navigation with a weeding robot. In: Proceedings of the Automation Technology for Off-Road Equipment, 01.09.2006, Bonn, S. 51–57.
- BANNIK, C.; ENGELMANN, B.; FENDLER, R.; FRAUENSTEIN, J.; GINZKY, H.; HORNEMANN, C.; ILVONEN, O.; KIRSCHBAUM, B.; PENN-BRESSEL, G.; RECHENBERG, J.; RICHTER, S.; ROY, L. & WOLTER, R. (2008): Grundwasser in Deutschland. Bundesministerium für Umwelt, Naturschutz und Reaktorsicherheit (BMU), Bonn, online verfügbar unter <http://www.bvl.bund.de/>.
- BARTELS, G. (1994): Gewässer - Gefahr durch Abschwemmung. In: Der Pflanzenarzt - Fachzeitschrift für Pflanzenschutz, Vorratsschutz, Pflanzenernährung (47), S. 11–13.
- BAYER (2015): BBCH-Bestimmer (Mobile App). Unter Mitarbeit von: Schier, A.; Seebe, H.; Pilz, St.; Wilke, J.; Frommberger, M.; Gottschalk, Ch. et al., Bayer CropScience GmbH, Hochschule für Wirtschaft und Umwelt Nürtingen-Geislingen, zuletzt aktualisiert am 03.01.2015.

- BAYER, B. E. (1975): Color imaging array. Angemeldet durch Eastman Kodak Company am 05.03.1975, Anmeldenummer: US 05/555 477, Veröffentlichungsnummer: US3971065 A.
- BERTRAM, H.-H. (1966): Untersuchungen über die ganzflächige mechanische Unkrautbekämpfung in Zuckerrüben. Dissertation, Rheinische Friedrich-Wilhelms-Universität Bonn, Institut für Landtechnik.
- BMEL (2012): Statistisches Jahrbuch über Ernährung, Landwirtschaft und Forsten der Bundesrepublik Deutschland 2013. 1. Auflage, Bundesministerium für Ernährung und Landwirtschaft (BMEL), Landwirtschaftsverlag GmbH, Münster-Hiltrup.
- BMJV (2013): Trinkwasserverordnung in der Fassung der Bekanntmachung vom 2. August 2013 (BGBl. I S. 2977), die durch Artikel 4 Absatz 22 des Gesetzes vom 7. August 2013 (BGBl. I S. 3154) geändert worden ist - Anlage 2 (zu § 6 Absatz 2). Bundesministerium der Justiz und für Verbraucherschutz (BMJV).
- BÖHRNSEN, A. (2001): Kamera steuert Hackmaschine. In: Profi (8), S. 60–62.
- BOND, W. (1991): Crop losses due to weeds in field vegetables and the implications for reduced levels of weed control. In: Proceedings of the Brighton Crop Protection Conference – Weeds, 1991, Brighton, GB, S. 591–598.
- BOND, W.; TURNER, R. J. & GRUNDY, A. C. (2003): A review of non-chemical weed management. Teil des DEFRA-geförderten Organic Weed Management Projekts OF0315. online verfügbar unter: <http://www.organicweeds.org.uk>, zuletzt geprüft am 03.12.2014.
- BÖRNER, H. (1995): Unkrautbekämpfung. Gustav Fischer Verlag, Jena.
- BORREGAARD, T.; NIELSEN, H.; NØRGAARD, L. & HAVE, H. (2000): Crop-weed Discrimination by Line Imaging Spectroscopy. In: Journal of Agricultural Engineering Research 75 (4), S. 389–400.
- BRADSKI, G. R. & KAEHLER, A. (2008): Learning OpenCV. Computer vision with the OpenCV library. 1. Auflage, O'Reilly, Sebastopol.
- BREDIES, K. & LORENZ, D. (2011): Mathematische Bildverarbeitung. Einführung in Grundlagen und moderne Theorie. 1. Auflage, Vieweg + Teubner, Wiesbaden.
- BRINKMANN, W. (1964): Möglichkeiten zum mechanischen Vereinzeln von Zuckerrüben. In: Grundlagen der Landtechnik (21), S. 39–48.
- BROEK, W. v.D. (2009): Snelle Rosko-schoffel voor rtk-gps. In: LandbouwMechanisatie (November), S. 37.
- BRÜSER, C. & HARMS, H.-H. (2005): Alternative Schneidtechniken zum Trennen organischer Güter. In: Landtechnik 60 (5), S. 254–255.
- BVL (2009): Informationen zur EU-Wirkstoffprüfung. Bundesamt für Verbraucherschutz und Lebensmittelsicherheit (BVL). Braunschweig, online verfügbar unter <http://www.bvl.bund.de/>.

- BVL (2013): Absatz an Pflanzenschutzmitteln in der Bundesrepublik Deutschland. Bundesamt für Verbraucherschutz und Lebensmittelsicherheit (BVL), Braunschweig, online verfügbar unter <http://www.bvl.bund.de/>.
- CLAAS (2015): CLAAS Lenksysteme. CLAAS Vertriebsgesellschaft mbH, Harsewinkel.
- COENENBERG, H.-H.; HOMBURG, H. & ZIEMS, H. (1977): Tastvorrichtung zur Seitenführung einer Erntemaschine. Angemeldet durch Gebr. Claas Maschinenfabrik GmbH, D-4834 Harsewinkel am 10.02.1977, Anmeldenummer: DE19772705491, Veröffentlichungsnummer: DE2705491C2.
- DEDOUSIS, A. P. (2007): An investigation into the design of precision weeding mechanisms for inter and intra-row weed control. Dissertation, Universität Cranfield.
- DEDOUSIS, A. P.; GODWIN, R. J.; O'DOHERTY, M. J.; TILLET, N. D. & GRUNDY, A. C. (2007): Inter and intra-row mechanical weed control with rotating discs. In: Precision Agriculture 07, Herausgegeben von: Stafford, J. V., Wageningen Academic Publishers, Wageningen, Niederlande, S. 493–498.
- DEDOUSIS, A. P.; O'DOHERTY, M. J.; GODWIN, R. J.; TILLET, N. D. & BRIGHTON, J. L. (2006): A novel approach to precision mechanical weed control with a rotating disc for inter and intrarow weed hoeing. In: Proceedings of the 17th Triennial Conference of the International Soil Tillage Research Organisation, Kiel, S. 123–129.
- DIEPENBROCK, W.; FISCHBECK, G.; HEYLAND, K.-U. & KNAUER, N. (1999): Spezieller Pflanzenbau. 3. neubearbeitete und ergänzte Auflage, Ulmer Verlag, Stuttgart.
- DIETZ, M.; THATE, A.; PÖLITZ, B.; MEINLSCHMIDT, E. & KRAATZ, M. (2014): Resistenzen gegenüber Pflanzenschutzmitteln. Untersuchungen zu Pflanzenschutzmittelresistenzen wirtschaftlich bedeutsamer Schaderreger gegenüber Insektiziden, Fungiziden und Herbiziden (Schriftenreihe des Sächsischen Landesamtes für Umwelt, Landwirtschaft und Geologie, 5). Dresden.
- DIN 5031-7, (1984): Strahlungsphysik im optischen Bereich und Lichttechnik - Benennung der Wellenlängenbereiche. Deutsches Institut für Normung e.V., Beuth Verlag.
- DZINAJ, T.; KLEINE HÖRSTKAMP, S.; LINZ, A.; RUCKELSHAUSEN, A.; BÖTTGER, O.; KEMPER, M.; MARQUERING, J.; NAESCHER, J.; TRAUTZ, D. & WIßERODT, E. (1998): Multi-Sensor-System zur Unterscheidung von Nutzpflanzen und Beikräutern. In: Zeitschrift für Pflanzenkrankheiten und Pflanzenschutz (Sonderheft XVI), S. 233–242.
- EHLERT, D. (2005): Laser zum Messen von morphologischen Pflanzenparametern. In: Landtechnik (4), S. 204–205.
- EHLERT, D. & ADAMEK, R. (2007): Messeigenschaften von Laser-Abstandssensoren. In: Agricultural Engineering Research (13), S. 119–128.
- EICHHORN, H. (1999): Landtechnik. 7. völlig neu bearbeitete Auflage, Ulmer Verlag, Stuttgart.
- ERO (2015): Traubenvollernter - Automatische Lenkung. Produkthandbuch, ERO Gerätebau GmbH, Niederkumbd.

- EBER, C. (2014): Comeback der Rübenhacke. In: Zuckerrübenjournal (1), S. 21–23.
- ESTLER, M. (1993): Mechanische Unkrautbekämpfung - Möglichkeiten und Grenzen (DLG Arbeitsblatt). Frankfurt am Main.
- EUREAU (2001): Keeping raw drinking water resources safe from pesticides. Position paper EU1-01-56. Europäische Vereinigung der nationalen Verbände in der Wasserver- und Abwasserentsorgung (EUREAU), online verfügbar unter www.water.org.uk/, zuletzt geprüft am 05.01.2014.
- EU-VO (2002): EU – VERORDNUNG 2092/91 über den ökologischen Landbau und die entsprechende Kennzeichnung der landwirtschaftlichen Erzeugnisse und Lebensmittel. 39. ergänzte Auflage, EU-Ministerrat.
- FENDER, F.; HANNEKEN, M.; LINZ, A.; RUCKELSHAUSEN, A. & SPICER, M. W. (2005): Messende Lichtgitter und Multispektralkameras als bildgebende Systeme zur Pflanzenerkennung. In: Bornimer Agrartechnische Berichte 40, S. 7–16.
- FEYAERTS, F. & VAN GOOL, L. (2001): Multi-spectral vision system for weed detection. In: Pattern Recognition Letters 22 (6-7), S. 667–674.
- FISCHER, D.; STRÖBEL, M. & KÖLLER, K.-H. (2010): Kameragestütztes Regelkonzept einer mechanischen Hacke für Zuckerrüben. In: Landtechnik (2), S. 93–95.
- FOGELBERG, F. (2001): Research on pest control and pesticide reduction in Sweden, Denmark and the Netherlands. ongoing work and new ideas for the future. Swedish University of Agricultural Sciences, Department of Agricultural Engineering, Alnarp, Schweden.
- FOGELBERG, F. & KRITZ, G. (1998): Intra-row weeding with brushes on vertical axes - factors influencing in-row soil high. In: Soil & Tillage Research 50, S. 149–157.
- FOGELBERG, F. (1998): Physical weed control. Intra-row brush weeding and photocontrol in carrots (*Daucus carota* L.). In: Acta Universitatis Agriculturae Sueciae. Agraria, 108. Swedish University of Agricultural Sciences, Department of Agricultural Engineering, Alnarp, Schweden.
- FRANGENBERG, A. & REUß, H.-U. (2011): Die Pflanzen schützen, den Menschen nützen. Informationsserie Pflanzenschutz. Fonds der Chemischen Industrie e.V. (FCI), Industrieverband Agrar e.V., Frankfurt am Main.
- FRAUNHOFER (2007): Ausstellung: Geschichte der Bildverarbeitung. Unter Mitarbeit von Bauer, N.; Fischer, R. und Bongard., T. Fraunhofer Allianz Vision, Erlangen, online verfügbar unter <http://www.vision.fraunhofer.de>, zuletzt geprüft am 05.02.2014.
- FRIEBEN, B. (1990): Bedeutung des organischen Landbaus für den Erhalt von Ackerwildkräutern. In: Natur und Landschaft 65 (7/8), S. 379–382.
- FRIEBEN, B.; KÖPKE, U. (1994): Bedeutung des Organischen Landbaus für den Arten- und Biotopschutz in der Agrarlandschaft. 8. Wissenschaftliche Fachtagung - Integrative Extensivierung- und Naturschutzstrategien (Forschungsberichte, 15). Rheinische

- Friedrich-Wilhelms-Universität Bonn, Landwirtschaftliche Fakultät, 05.05.1994, S. 77-88.
- FRITZ, R. (1993): Pflanzenschutzmittel in der Atmosphäre. In: Pflanzenschutz Nachrichten Bayer (46 (3)), S. 229–264.
- GARFORD (2011): Robocrob - präzisionsgeführte Hochgeschwindigkeitshacken. (Produktinformation). Garford Farm Machinery Ltd., Peterborough, GB.
- 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 real-time. Dissertation, Rheinische Friedrich-Wilhelms-Universität Bonn, Institut für Landtechnik.
- GRAEBER, E. (1970): Control system for the direction of movement of agricultural machines. Angemeldet durch Maschinenfabrik FAHR AG, D-7702 Gottmadingen, Veröffentlichungsnummer: US3550362A, Prioritätsdaten: DE19671582237 19671221, DE19681800473 19681002.
- GRIEPENTROG, H. W.; NØRREMARK, M. & NIELSEN, J. (2006): Autonomous intra-row rotor weeding based on GPS. In: Proceedings of CIGR World Congress - Agricultural Engineering for a Better World, 03.-07.09.2006, Bonn.
- GRIEPENTROG, H. W. (2005): Weed Control by Autonomous Vehicle Systems. In: Workshop Proceedings Precision Farming - Sensing and Robotics, Universität Hohenheim, 18.10.2005, S. 6-9.
- GRIEPENTROG, H. W. & NØRREMARK, M. (2001): Bestandesführung mittels kartierter Pflanzenpositionen. In: Tagungsband VDI Tagung Landtechnik, Hannover, 09.-10.11.2001, VDI Verlag, Düsseldorf, S. 285-290.
- GUDE, J. (2012): Wirksamkeit der Unkrautbekämpfung mittels Laser in Abhängigkeit verschiedener biologischer und technisch-physikalischer Parameter. Dissertation, Rheinischen Friedrich-Wilhelms-Universität Bonn, Institut für Landtechnik.
- HARALSON, A. E.; MILES, G. E.; ERSOY, O. K.; JORDAN, T. N.; WELLER, S. C. & TURPIN, F. T. (1997): Site-Specific Sensor for Chemical Application: Hardware and Software for Multispectral Images (ASAE Paper No. 97-3056).
- HARTMANN, P. (1999): Berührungslose Höhen- und Seitenführung von Traktoranbaugeräten in Beetkulturen. Dissertation, Technische Universität München, Institut für Landtechnik.
- HATZENBICHLER (2013): Fingerhacke. Thomas Hatzenbichler Agro-Technik GmbH, St. Andrä, Österreich, online verfügbar unter <http://www.hatzenbichler.com>, zuletzt geprüft am 23.12.2013.
- HATZENBICHLER (2014): Der Originalstriegel. Thomas Hatzenbichler Agro-Technik GmbH. St. Andrä, Österreich, online verfügbar unter <http://www.hatzenbichler.com>, zuletzt geprüft am 03.04.2014.
- HERRMANN, K. (2002): Meilensteine der Landtechnik. In: Landtechnik (2), S. 112–113.

- HOFFMANN, M. (1990): Thermische Unkrautbekämpfung - Stand und Zukunftsperspektiven. In: Zeitschrift für Pflanzenkrankheiten und Pflanzenschutz (Sonderheft 12), S. 439–445.
- HOFFMANN, M. (1989): Abflammtchnik. 4. überarbeitete und erweiterte Auflage (KTBL-Schrift, 331). Kuratorium für Technik und Bauwesen in der Landwirtschaft e.V., Darmstadt.
- HOY, R.; ROHRER, R.; LISKA, A.; LUCK, J.; ISOM, L. & KESHWANI, D. (2014): Agricultural Industry Advanced Vehicle Technology. Benchmark Study for Reduction in Petroleum Use. Idaho National Laboratory, Idaho Falls, USA.
- HUITING, H.; WEIDE, R. v.D. & RIEMENS, M. (2014): Mechanical weed control. On possibilities within reduced tillage silage maize growing & recent machinery developments. 10th EWRS Workshop on Physical and Cultural Weed Control, European Weed Research Society (EWRS), 16.-19.03.2014, Alnarp, Schweden.
- IPS (1987): Pflanzenschutzwirkstoffe und Trinkwasser. Ergebnisse einer Untersuchungsreihe der Pflanzenschutzindustrie. Industrieverband Pflanzenschutz (IPS), Frankfurt am Main.
- IVA (2013): Landwirtschaft, Biodiversität und Pflanzenschutzmittel - passt das zusammen? Industrieverband Agrar e. V. (IVA), Frankfurt am Main.
- JÄHNE, B. (2012): Digitale Bildverarbeitung - Und Bildgewinnung. 7. neu bearbeitete Auflage, Springer Verlag, Berlin.
- JAI (2012): 2-CCD-Kameras (Produktinformation). JAI A/S, online verfügbar unter <http://www.jai.com/en/products/ad-080ge>, zuletzt geprüft am 03.05.2012.
- JKI (2014): Gesetzliche Aufgaben. Julius Kühn Institut (JKI), online verfügbar unter http://www.jki.bund.de/no_cache/de/startseite/ueber-das-jki/gesetzliche-aufgaben.html, zuletzt geprüft am 05.01.2014.
- JOHN DEERE (2011): John Deere Innovationen der Agritechnica. Pressemitteilungen. John Deere, online verfügbar unter <http://www.deere.co.uk>, zuletzt geprüft am 02.01.2012.
- KIELHORN, A.; DZINAJ, T.; GELZE, F.; GRIMM, J.; KLEINE-HARTLAGE, H.; KLEINE HÖRSTKAMP, S.; KUNTZE, W.; LINZ, A.; NAESCHER, J.; NARDMANN, M.; RUCKELSHAUSEN, A.; TRAUTZ, D. & WIERODT, E. (2000): Beikrautregulierung in Reihenkulturen - Sensorgesteuerte Querhacke im Mais. In: Zeitschrift für Pflanzenkrankheiten und Pflanzenschutz (Sonderheft 17), S. 207–215.
- KIMMEL, R. (1998): Demosaicing: Image reconstruction from color CCD samples. In: proceedings of 5th European Conference on Computer Vision (ECCV 98), 02.-06.06.1998, Freiburg, Springer Verlag, Berlin, S. 610–622.
- KLINGER, T. (2003): Image processing with LabVIEW and IMAQ vision. National Instruments virtual instrumentation series. Prentice Hall PTR, Upper Saddle River, USA.

- KNIPLING, E. B. (1970): Physical and physiological basis for the reflectance of visible and near-infrared radiation from vegetation. In: *Remote Sensing of Environment* 1 (3), S. 155–159.
- KOCH, W. (1959): Untersuchungen zur Unkrautbekämpfung durch Saatzpflege und Stoppelbearbeitungsmaßnahmen. Dissertation, Landwirtschaftliche Hochschule Hohenheim.
- KOLBE, W. (1987): Untersuchungen zur Verhinderung der Unkrautentwicklung im Acker- und Gartenbau. Rheinischer Landwirtschaftsverlag, Bonn.
- KÖNIG, H.-P.; MEYERCORDT, A. & KOCH, H.-J. (2005): Zuckerrüben ökologisch anbauen. Weender Druckerei, Göttingen.
- KOOLEN, A. J. & KUIPERS, H. (1983): *Agricultural soil mechanics (Advanced series in agricultural sciences, 13)*. Springer Verlag, Berlin.
- KRAUS, K. (1994): *Photogrammetrie. Grundlagen und Standardverfahren*. 5. Auflage, Dümmler Verlag, Bonn.
- KUDSK, P. & STREIBIG, J. C. (2003): Herbicides - a two-edged sword. In: *Weed Research* 43 (2), S. 90–102.
- KURSTJENS, D. A. G. (1998): Review of mechanical and physical weed control technology. Report 98-03. IMAG-DLO Institute of Agricultural and Environmental Engineering, Wageningen, Niederlande.
- LABER, H. (1999): Effizienz mechanischer Unkrautregulationsmaßnahmen im Freilandgemüsebau. Dissertation, Universität Hannover.
- LEIVERMANN, S. (2012): Entwicklungsstadien der Zuckerrüben. Landwirtschaftskammer Nordrhein-Westfalen, Münster.
- LINDNER, U. (1992): 13-jähriger Vergleichsversuch zwischen biologisch-dynamischem und konventionellem Gemüsebau: vergleichende Betrachtung von Kulturmaßnahmen bei verschiedenen Gemüsearten. Ergänzung zum Forschungsbericht "Alternativer Anbau von Äpfeln und Gemüse". Landwirtschaftskammer Rheinland, Bonn.
- LITWILLER, D. (2001): CCD vs. CMOS - Facts and Fiction. In: *Photonics Spectra* (1), S. 154–158.
- LIZ (2014): Kraut und Rüben. Informationen zum Herbizideinsatz. Landwirtschaftlicher Informationsdienst Zuckerrüben (LIZ), Elsdorf.
- LUCAS, K. (2007): *Thermodynamik. Die Grundgesetze der Energie- und Stoffumwandlungen*. 6. bearbeitete Auflage, Springer Verlag, Berlin.
- LUKASHYK, P.; BERG, M. & KÖPKE, U. (2004): Problemunkräuter im Organischen Landbau. Entwicklungen von Strategien zur nachhaltigen Kontrolle von Ackerkratzdistel *Cirsium Arvense* und Rauhaariger Wicke *Vicia Hirsuta*. Lehr- und Forschungsschwerpunkt Umweltverträgliche und Standort-gerechte Landwirtschaft (Forschungsbericht, 126), Rheinische Friedrich-Wilhelms-Universität Bonn, Landwirtschaftliche Fakultät.

- LÜTKEMEYER, L. (1993): Verfahren und Gerät zur Unkrautbekämpfung bei Kulturpflanzen, insbesondere Mais. Angemeldet durch Lütkemeyer, Lorenz, 33397 Rietberg am 27.01.1993, Veröffentlichungsnummer: DE 4302198 A1.
- MELANDER, B. (1997): Optimization of the Adjustment of a Vertical Axis Rotary Brush Weeder for Intra-Row Weed Control in Row Crops. In: Journal of Agricultural Engineering Research 68 (1), S. 39–50.
- MEYER, J. (1994): Optimierung der physikalischen Unkrautbekämpfung in Beetkulturen. In: Zeitschrift Pflanzenkrankheiten und Pflanzenschutz (14), S. 267–271.
- MILLER, P. C. H.; HAGUE, T.; TILLET, N. D. & MARCHANT, J. A. (1997): Approaches to the Detection of individual Plants in Horticultural Row Crops and the implications for Pesticide Application. In: Proceedings of Brighton Crop Protection Conference – Weeds. 17.-20.11.1997, Brighton, GB, S. 151–158.
- MÜCKE, M. (2012): Mechanische Unkrautregulierung in Sojabohnen. Sojatag, 18.12.2012, Frankfurt.
- MÜCKE, M. (2013): Innovationen: Mechanische Unkrautregulierung. In: Gartenbauprofi (4), S. 34–36.
- MÜTER, M. (2013): Development of an intra-row weeding system using electric servo drives and machine vision for plant detection. 71st International Conference on Agricultural Engineering Landtechnik AgEng 2013, Verein Deutscher Ingenieure, Hannover, 09.11.2013.
- NAWROTH, P. (2001): Mechanische Unkrautregulierung in landwirtschaftlichen Reihenkulturen ohne Eingriff in das Bodengefüge. Dissertation, Wissenschaftszentrum Weihenstephan für Ernährung, Landnutzung und Umwelt der Technischen Universität München, Technik im Pflanzenbau, Freising.
- NIEUWENHUIZEN, A. T. (2009): Automated detection and control of volunteer potato plants. Dissertation, Wageningen University, Niederlande.
- NØRREMARK, M. & GRIEPENTROG, H. W. (2004): Analysis and definition of the close-to-crop area in relation to robotic weeding. In: Proceedings of the 6th EWRS Workshop on Physical and Cultural Weed Control, European Weed Research Society (EWRS), 08.03.2004, Lillehammer, Norwegen.
- NØRREMARK, M.; GRIEPENTROG, H. W.; NIELSEN, J. & SØGAARD, H. T. (2008): The development and assessment of the accuracy of an autonomous GPS-based system for intra-row mechanical weed control in row crops. In: Biosystems Engineering 101 (4), S. 396–410.
- NØRREMARK, M.; GRIEPENTROG, H. W.; NIELSEN, J. & SØGAARD, H. T. (2012): Evaluation of an autonomous GPS-based system for intra-row weed control by assessing the tilled area. In: Precision Agriculture 13 (2), S. 149–162.
- OEBEL, H. (2006): Teilschlagspezifische Unkrautbekämpfung durch raumbezogene Bildverarbeitung im Offline- (und Online-) Verfahren (TURBO). Dissertation, Universität Hohenheim, Institut für Phytomedizin.

- OERKE, E.-Ch. & STEINER, U. (1996): Ertragsverluste und Pflanzenschutz. Die Anbausituation für die wirtschaftlich wichtigsten Kulturpflanzen (Schriftenreihe der Deutschen Phytomedizinischen Gesellschaft, 6). Ulmer Verlag, Stuttgart.
- PALTI, J. (1981): Cultural practices and infectious crop diseases. Springer Verlag, Berlin.
- PARISH, S. (1990): A review of Non-Chemical Weed Control Techniques. In: Biological Agriculture and Horticulture 7, S. 117–137.
- PETERSEN, J. (2004): A review on weed control in sugar beet: from tolerance zero to period threshold. In: Weed Biology and Management, Herausgegeben von: Inderjit, Kluwer Academic Publishers, Dordrecht, S. 467–483.
- PETZOLD, W. & KOLBE, H. (1998): Zuckerrüben im Ökologischen Landbau. In: Schriftenreihe der Sächsischen Landesanstalt für Landwirtschaft 3 (9), Sächsische Landesanstalt für Landwirtschaft (LfL), Dresden.
- PIERENKEMPER, T. (1989): Landwirtschaft und industrielle Entwicklung. Zur ökonomischen Bedeutung von Bauernbefreiung, Agrarreform und Agrarrevolution. Franz Steiner Verlag, Wiesbaden.
- PINGALI, P. L.; BIGOT, Y. & BINSWANGER-MKHIZE, H. P. (1987): Agricultural mechanization and the evolution of farming systems in sub-Saharan Africa. A World Bank Publication. Johns Hopkins University Press, Baltimore, USA.
- POULSEN, F. (2011): Robovator - Hacken in der Reihe (Produktinformation). F. Poulsen Engineering ApS., Hvalsø, Dänemark.
- PRIEBE, H. (1990): Ergebnisse ökologischer Wirtschaftsweisen. In: Lebendige Erde 41 (3), S. 162–167.
- PUIJKER, L. M.; BEERENDONK, E. F. & BEEK, C. VAN (2001): Door drinkwaterbedrijven gemaakte kosten als gevolg van bestrijdingsmiddelengebruik. Inventarisatie over de periode 1991-2000 (rapport KOA, 01.089). Kiwa N.V. Water Research, Nieuwegein, Niederlande.
- REMONDINO, F. & STOPPA, D. (2013): TOF Range-Imaging Cameras. Springer Verlag, Berlin.
- RUBIN, B.; YAACOBY, T. & SCHONFELD, M. (1985): Triazine resistant grass weeds. Cross resistance with wheat herbicide, a possible threat to cereal crops. Proceedings of the 1985 Brighton Crop Protection Conference – Weeds, 18.-21.11.1985, Brighton, GB, S.1171-1178.
- SCHANS, D. v.d.; BLEEKER, P.; MOLENDIJK, L.; PLENTINGER, M.; WEIDE, R. v.d.; LOTZ, B. et al. (2006): Practical weed control - in arable farming and outdoor vegetable cultivation without chemicals. Applied Plant Research (PPO publication no. 352), Lelystad: Wageningen UR, Niederlande.
- SCHLÜTER, C. (1985): Arbeits- und betriebswirtschaftliche Verhältnisse in Betrieben des alternativen Landbaus. Untersucht am Beispiel biologisch-dynamischer Betriebe (Agrar- und Umweltforschung in Baden-Württemberg, Band 10). Ulmer Verlag, Stuttgart.

- SCHULZE LAMMERS, P.; KAM, H. & SCHMITTMANN, O. (2010): Technical Approach for row crop seeding in square to improve mechanical weed control efficiency. Book of Abstracts XVIIth World Congress of the International Commission of Agricultural and Biosystems Engineering (CIGR). 13.-17.06.2010, Québec City, Kanada.
- SCHWARZKOPF, P. (2013): VDMA: Industrielle Bildverarbeitung auf dem Weg zu neuem Umsatzrekord. Verband Deutscher Maschinen- und Anlagenbau e.V. (VDMA), online verfügbar unter <http://www.vdma.org/article/-/articleview/1815012>, zuletzt aktualisiert am 27.06.2013, zuletzt geprüft am 05.02.2014.
- SEIPEL, H. (2007): Fachkunde für Gärtner. Verlag Handwerk und Technik, Hamburg.
- SLAUGHTER, D. C.; GILES, D. K. & DOWNEY, D. (2008): Autonomous robotic weed control systems: A review. In: Computers and Electronics in Agriculture 61 (1), S. 63–78.
- SØGAARD, H. T.; JØRGENSEN, M. H. & NIELSEN, P. S. (2002): Præcision ved automatisk styring af radrensere. In: Grøn Viden (Markbrug Nr. 268).
- SÖKEFELD, M. & GERHARDS, R. (2004): Automatic Weed Mapping using Digital Image Processing. In: Landtechnik (3), S. 154–155.
- STEINBERGER, S. (2014): Mechanische Unkrautbekämpfung. Beratung und Information für den Süddeutschen Zuckerrübenanbau. Ochsenfurt, online verfügbar unter <http://bisz.suedzucker.de/>, zuletzt aktualisiert am 19.09.2014.
- STEMMER (2013): Das Handbuch der Bildverarbeitung. STEMMER IMAGING GmbH, Puchheim.
- TILLET, N. D.; HAGUE, T.; GRUNDY, A. C. & DEDOUSIS, A. P. (2008): Mechanical within-row weed control for transplanted crops using computer vision. In: Biosystems Engineering (99), S. 171–178.
- UHLIG, T. (1987): Berührungsloser Nachweis natürlicher Leitlinien der Pflanzenproduktion mit Hilfe von Ultraschall. In: Agrartechnik, landtechnische Zeitschrift der DDR (12), S. 563–565.
- WAIBEL, H. & FLEISCHER, G. (1998): Kosten und Nutzen des chemischen Pflanzenschutzes in der deutschen Landwirtschaft aus gesamtwirtschaftlicher Sicht. Wissenschafts-Verlag Vauk, Kiel.
- WATTSON, M. & LOWENBERG-DEBOER, J. (2004): Who will benefit from GPS Auto Guidance in the Corn Belt? In: Purdue Agricultural Economics Report (2), S. 13–16.
- WEBER, H. (1997): Geräte- und verfahrenstechnische Optimierung der mechanischen Unkrautregulierung in Beetkulturen. Dissertation, Technische Universität München, Institut für Landtechnik, Weihenstephan.
- WEIDE, R. V.D.; BLEEKER, P.; ACHTEN, V. T. J. M.; LOTZ, L. A. P.; FOGELBERG, F. & MELANDER, B. (2008): Innovation in mechanical weed control in crop rows. In: Weed Research 48 (3), S. 215–224.
- WEISSLER, G. A. & HOLST, K. (2007): Einführung in die industrielle Bildverarbeitung (Elektronik- & Elektrotechnik Bibliothek, Band 1). Francis Verlag, Poing.

- WILHELM, B. (2011): Landtechnische Lösungen zur Beikrautregulierung im Ökolandbau. Berichte aus Forschung und Praxis. Herausgegeben von: Wilhelm, B. & Hensel, O. Deutsches Institut für Tropische und Subtropische Landwirtschaft (DITSL) GmbH, Witzenhausen.
- WILLIAMS, T. A. (1985): Sensing unit for row crop harvester guidance system. Angemeldet durch Deere & Company am 16.07.1985, Anmeldenummer: US 06/529,428, Veröffentlichungsnummer: US4528804 A.
- WILSON, J. (2000): Guidance of agricultural vehicles — a historical perspective. In: Computers and Electronics in Agriculture 25 (1-2), S. 3–9.
- WINNER, H.; HAKULI, St.; LOTZ, F. & SINGER, Ch. (2015): Handbuch Fahrerassistenzsysteme. Grundlagen, Komponenten und Systeme für aktive Sicherheit und Komfort. 3. überarbeitete und ergänzte Auflage (ATZ/MTZ-Fachbuch), Springer Verlag, Wiesbaden.
- WUCHERPFENNIG, C. (2011): Neue Maschinenhacke erfasst auch Unkraut in der Reihe. In: Landwirtschaftliche Zeitschrift Rheinland (27), S. 20–21.
- WUNDER, E.; KIELHORN, A.; KLOSE, R.; THIEL, M. & RUCKELSHAUSEN, A. (2012): GIS- und Sensortechnologien zur einzelpflanzenbezogenen Landwirtschaft. In: Landtechnik (1), S. 37–41.
- ZHANG, Z. (1998): Determining the Epipolar Geometry and its Uncertainty: A Review. In: International Journal of Computer Vision 27 (2), S. 161–195.