

Universität Hohenheim
Institut für Phytomedizin
Fachgebiet Herbologie
Prof. Dr. Roland Gerhards

Teilschlagspezifische Unkrautbekämpfung
durch **raumbezogene Bildverarbeitung**
im **Offline-** (und **Online-**) Verfahren
(**TURBO**)

Dissertation
zur Erlangung des Grades eines Doktors
der Agrarwissenschaften
der Universität Hohenheim

von
Dipl. -Ing. agr.
Horst Oebel
aus Odendorf

2006

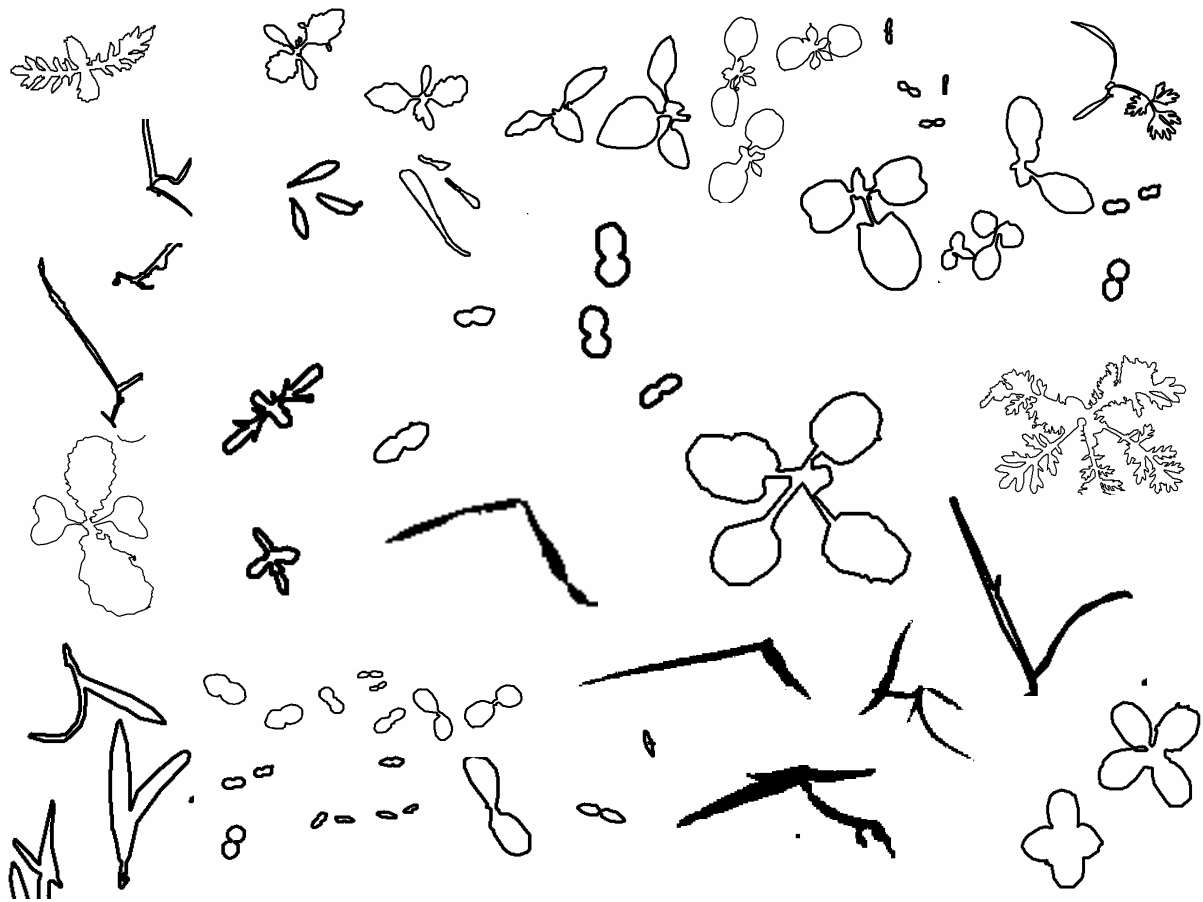
Die vorliegende Arbeit wurde am 11.05.2006 von der Fakultät Agrarwissenschaften der Universität Hohenheim als *Dissertation zur Erlangung des Grades eines Doktors* angenommen.

Tag der mündlichen Prüfung: 12.05.2006

Dekan:	Prof. Dr. K. Stahr
Berichterstatter, 1. Prüfer:	Prof. Dr. R. Gerhards
Berichterstatter, 2. Prüfer:	Prof. Dr. S. Böttinger
3. Prüfer:	Prof. Dr. W. Claupein

**„Alle Gestalten sind ähnlich, und keine gleicht der andern;
und so deutet das Chor auf ein geheimes Gesetz,
auf ein heiliges Rätsel. O könnt' ich dir, liebliche Freundin,
überliefern sogleich glücklich das lösende Wort!**

Aus: *Die Metamorphose der Pflanzen* von Johann Wolfgang von Goethe (1798)



Für Bianca und unsere Kinder

Paul, Yasmine und Moritz

A	Inhaltsverzeichnis	
A	Inhaltsverzeichnis	1
B	Verzeichnis der Abbildungen	3
C	Verzeichnis der Tabellen	7
D	Verzeichnis der Abkürzungen	9
1	Einleitung	10
2	Problemstellung und Zielsetzung	13
3	Bildaufnahme von Unkräutern in Kulturpflanzenbeständen	16
3.1	Stand des Wissens.....	16
3.2	Ziele.....	23
3.3	Material und Methoden.....	24
3.4	Ergebnisse.....	29
3.5	Diskussion.....	34
4	Automatische Klassifizierung von Unkrautarten	39
4.1	Stand des Wissens	39
4.2	Ziele.....	42
4.3	Material und Methoden.....	43
4.4	Ergebnisse.....	55
4.4.1	Aufbau von Wissensbasen zur Klassifikation von Pflanzenarten.....	55
4.4.2	Klassifikation unbekannter Pflanzen.....	65
4.5	Diskussion.....	77
5	Teilschlagspezifische Herbizidapplikation	82
5.1	Stand des Wissens.....	82
5.2	Ziele.....	86
5.3	Material und Methoden.....	87
5.4	Ergebnisse.....	95
5.5	Diskussion.....	105

6	Ökonomie der teilschlagspezifischen Unkrautbekämpfung.....	110
6.1	Stand des Wissens.....	110
6.2	Ziele.....	111
6.3	Material und Methoden.....	112
6.4	Ergebnisse.....	113
6.5	Diskussion.....	119
7	Diskussion und Ausblick.....	123
8	Zusammenfassung.....	130
9	Summary.....	133
10	Literaturverzeichnis.....	136
11	Anhang.....	148
11.1	Verzeichnis der Anhangstabellen.....	148
11.2	Verzeichnis der Anhangsabbildungen.....	150

B Verzeichnis der Abbildungen

Abb. 1.1	Informationsgewinnung, Dateninterpretation und Anwendungsbereiche für Precision Farming.....	10
Abb. 2.1	Verfahrensschritte der teilschlagspezifischen Unkrautbekämpfung TURBO	14
Abb. 3.1	Schematischer Aufbau eines optoelektronischen Sensors zur Messung des Unkrautdeckungsgrades in den Fahrspuren (verändert nach EHLERT 2000).....	19
Abb. 3.2	Reflexionseigenschaften von Pflanzen, Boden, Stroh und abgestorbenen Pflanzenresten (verändert nach BILLER 1998).....	23
Abb. 3.3	Schematischer Aufbau einer Bispektralkamera zur pixelsynchronen Aufnahme von zwei Bildern mit identischem Bildausschnitt in zwei unterschiedlichen Spektralkanälen (nach SÖKEFELD und GERHARDS 2004).....	25
Abb. 3.4	Drei Bispektralaufnahmen in Mais bei einer Fahrgeschwindigkeit von ca. 8 km/h.	26
Abb. 3.5	Trägerfahrzeug für die geokodierte Bildaufnahme, bestehend aus drei Bispektralkameras (1), GPS-Empfänger (2) und Bordrechner (3).....	27
Abb. 3.6	Graphische Darstellung der Navigationsparameter (links) und der GPS-Route (rechts) auf dem Schlag Eisenmustal (Braugerste).....	29
Abb. 3.7	Videospektrometeruntersuchungen von Boden, Steinen, Mulch und Pflanzen (verändert nach GERHARDS und OEBEL 2006).....	30
Abb. 3.8	Beispiel für die Bildverbesserung durch die Verwendung einer Bispektralkamera. 1. Spalte: Bilder der beiden Kameraköpfe, 2. Spalte: berechnetes Differenzbild, 3. Spalte: Binärbild aus Differenzbild und aus Infrarotbild.....	30
Abb. 3.9	Bispektralbilder (links) und Infrarotbilder (rechts) bei Bewölkung (oben) und direkter Sonneneinstrahlung (unten).....	31
Abb. 3.10	Bispektralbilder von Unkräutern in Zuckerrüben, Mais und Braugerste.....	34
Abb. 3.11	Möglicher Systemaufbau für die Anbringung von Bispektralkameras (1) im Online-Verfahren (Bildquelle: AgriCon/Kverneland).....	38
Abb. 4.1	Möglichkeiten der Erfassung, Segmentierung und Klassifizierung von Pflanzenarten in der digitalen Bildverarbeitung.....	39
Abb. 4.2	Infrarotbild und Konturbild von <i>Anthemis arvensis</i> (ANTAR) und <i>Echinochloa crus-galli</i> (ECHCG).....	44
Abb. 4.3	Bildverbesserungen der Grauwertbilder durch Erosions- und Dilatationsschritte (A), Konturlängen- und Kantenfilter (B) sowie Eckenfilter (C).....	45

Abb. 4.4	Funktionsprinzip der Berechnung des Formfaktors und der Spannweite (verändert nach SÖKEFELD 1997).....	46
Abb. 4.5	Beispiele von Pflanzenformen der untersuchten Unkrautklassen in der Wissensbasis zur Auswertung der Bispektralbilder einer Überfahrt in Sommergerste (Aufnahmedatum 18.4.2005).....	47
Abb. 4.6	Beispiele von Pflanzenformen der untersuchten Unkrautklassen in der Wissensbasis zur Auswertung der Bispektralbilder einer Überfahrt in Mais (Aufnahmedatum 21.5.2004).....	47
Abb. 4.7	Funktionsprinzip der Erkennung nach dem Prinzip der minimalen Distanz (verändert nach SÖKEFELD 1997).....	48
Abb. 4.8	Prinzip der Klassifizierung mit Hilfe der Fuzzy Logic am Beispiel von vier Formparametern und einer aus 2 Klassen bestehenden Wissensbasis (verändert nach SÖKEFELD 1997).....	49
Abb. 4.9	Schritte der Bildverarbeitung für die teilschlagspezifische Unkrautkontrolle im Online- und Offline-Verfahren.....	50
Abb. 4.10	Formel der Diskriminanzfunktion und Beispiel einer Verteilung von Merkmalen zweier Gruppen (A, B) und ihrer Projektionen auf der Diskriminanzachse (verändert nach KRAFT 2000).....	52
Abb. 4.11	Formeln für die Bewertung des Diskriminanzkriteriums (verändert nach KRAFT 2000).....	53
Abb. 4.12	Veränderung der Formparameter Umfang (CF), minimale (Dmin) und maximale Kantenlänge (Dmax) bei <i>Papaver rhoeas</i> (PAPRH) und <i>Apera spica-venti</i> (APESV) für die Entwicklungsstadien BBCH 10 bis BBCH 14..	55
Abb. 4.13	Grafische Darstellung der Diskriminanzwerte der ersten drei Diskriminanzfunktionen von Pflanzenarten der Datenbank <i>Unkrautarten (BBCH 10) in Braugerste</i>	58
Abb. 4.14	Grafische Darstellung der Diskriminanzwerte der ersten drei Diskriminanzfunktionen der Datenbank <i>Unkrautklassen (BBCH 10) in Braugerste</i>	60
Abb. 4.15	Richtige Klassifizierungsrate in % für Unkrautarten und Unkrautklassen in Braugerste, Mais und Zuckerrüben in verschiedenen Entwicklungsstadien.....	65
Abb. 4.16	Grafische Darstellung der Diskriminanzwerte der drei Diskriminanzfunktionen der Datenbank <i>Zuckerrüben</i>	68
Abb. 4.17	Richtige Klassifizierungsrate in % für Überfahrten in Zuckerrüben, Körnererbsen, Körnermais, Sommergerste und Winterraps über Fuzzy Logic/minimale Distanz und über Diskriminanzfunktionen.....	76
Abb. 5.1	Schritte der GPS-gestützten Unkrautbonitur mit einem mobilen GIS (MiniGIS).....	88
Abb. 5.2	Boniturraster für das manuelle Boniturverfahren, die MiniGIS Bonitur und eine Kamerabonitur auf dem Schlag Eisenmustal (3,46 ha).....	89

Abb. 5.3	Softwareoberfläche zur Erstellung von Applikationskarten und Ansteuerung der Pflanzenschutzspritze.....	90
Abb. 5.4	Dreikammerspritze mit Teilbreitenschaltung (1), zentraler Befüllung für drei Tanks, dGPS Empfänger (3), zentrale Steuerungseinheit (4) Laptop mit Software zur Steuerung der Spritze über Applikationskarten (5) und Air Mix Düsen (6).....	91
Abb. 5.5	Manuelle Bonitur (links) und Praxisbonitur (rechts) durch MiniGIS für dikotyle Unkräuter in Winterweizen (7,67 ha).....	95
Abb. 5.6	Bodenkarte und Schlaghistorie (links), manuelle Bonitur (Mitte) und Praxisbonitur (rechts) durch MiniGIS für dikotyle Unkräuter in Braugerste (Schlag Breidel, 4,65 ha).....	96
Abb. 5.7	Manuelle Bonitur (links) und MiniGIS Bonitur (rechts) für Ungräser in Braugerste (Schlag An der Barth, Breidel, 8,43 ha).....	96
Abb. 5.8	Bodenkarte und Schlaghistorie (links), Verteilung für dikotyle Unkräuter (Mitte) und Galium aparine (rechts) in Winterweizen (Schlag Hürth, 2,79 ha).....	97
Abb. 5.9	Verteilung und Ausbreitung von Ungräsern in Zuckerrüben (Schlag 6, Dikopshof) an verschiedenen Boniturdaten	98
Abb. 5.10	Verteilungskarten für Unkräuter in Wintergerste (2001 und 2005) und Winterweizen (2000 und 2004) auf dem Dikopshof (Schlag 9, 5,8 ha).....	99
Abb. 5.11	Verteilungskarten für Unkräuter und Ungräser in Braugerste (2,4 ha) aus manuellen Bonituren und digitaler Bildanalyse.....	100
Abb. 5.12	Verteilungskarten für Unkräuter und Ungräser in Zuckerrüben (5,3 ha) aus manuellen Bonituren und digitaler Bildanalyse.....	100
Abb. 5.13	Verteilungskarten für dikotyle Unkräuter in Körnererbsen (3,93 ha) aus manuellen Bonituren und digitaler Bildanalyse.....	101
Abb. 5.14	Durchschnittliche Unkrautdichte nach Klassen vor (V) und nach (N) der Herbizidbehandlung in verschiedenen Kulturen in 2004.....	102
Abb. 5.15	Durchschnittliche Unkrautdichte nach Klassen vor (V) und nach (N) der Herbizidbehandlung in verschiedenen Kulturen in 2005.....	103
Abb. 5.16	Verteilungskarten von dikotylen Unkräutern in Körnermais (2,40 ha) aus manuellen Bonituren (links), digitaler Bildanalyse (Mitte) und aus der Erfolgsbonitur (rechts).....	103
Abb. 5.17	Ertragskarte, Fahrgassen, angewendete Schadensschwellen für Ungräser und Erfolgskontrolle über Unkrautmarkierung über Ertragskartierung auf dem Schlag Eisenmustal (3,46 ha) in Braugerste.....	104
Abb. 5.18	Schematische Darstellung der Dreikammerspritze mit Teilbreitenschaltung, GPS Empfänger und zentraler Steuerungseinheit.....	108

Abb. 6.1	Herbizideinsparungen für die Unkrautklassen mono- und dikotyle Unkräuter sowie <i>Galium aparine</i> oder <i>Cirsium arvense</i> in den Jahren 2004 und 2005 auf dem Betrieb Hurtz und auf dem Dikopshof.....	114
Abb. 6.2	Herbizidkosten nach Kulturart und Jahr für eine konventionelle Unkrautbehandlung auf dem Betrieb Hurtz und auf dem Versuchsgut Dikopshof ..	115
Abb. 6.3	Applikationskarten für eine schadschwellenorientierte, selektive Ausbringung von Wirkstoffen und Applikationskarte zur Behandlung mit einem Wirkstoffgemisch (rechts) für den Schlag Heistern (Winterweizen, 7,67 ha).....	117
Abb. 6.4	Applikationskarten für eine schadschwellenorientierte, selektive Ausbringung von Wirkstoffen (a, b), Applikationskarte für dikotyle Unkräuter ohne Raps (c) und Applikationskarte zur Behandlung mit einem Wirkstoffgemisch (d) für den Schlag Barth (Sommergerste 8,43 ha).....	117
Abb. 6.5	Kosten verschiedener Boniturverfahren und Kosten der Applikationstechnik.....	118
Abb. 7.1	Farbbild und über einen Farbbildverarbeitungsalgorithmus entstandenes Grauwertbild.....	123
Abb. 7.2	Bilder der neuen Bisppektralkamera mit einer Auflösung von 1024 * 766 Pixel1. Spalte: Bilder der beiden Kameraköpfe 2. Spalte: berechnetes Differenzbild	124
Abb. 7.3	Senkrechte (links) und abgewinkelte (rechts) Aufnahme von Ungräsern im Keimblattstadium	126
Abb. 7.4	Schematischer Aufbau eines Direkteinspeisungssystems (verändert nach SÖKEFELD <i>et al.</i> 2004).....	127

C Verzeichnis der Tabellen

Tab. 3.1	Ausgewählte Versuchsschläge, Aufnahmebedingungen und Entwicklungsstadien von Kulturpflanze und Unkräutern.....	27
Tab. 3.2	Kameraeinstellungen, aufgenommene Bildfläche und Boniturfläche/ha von ausgewählten Versuchsflächen	32
Tab. 3.3	Potentielle Flächenleistung und Boniturfläche eines kameragesteuerten Bildaufnahmeverfahrens.....	33
Tab. 4.1	Untersuchte Unkrautarten in Getreide, Mais und Zuckerrüben.....	52
Tab. 4.2	Ergebnisse des Gleichheitstests der Gruppenmittelwerte für die Datenbank <i>Unkrautarten (BBCH 10) in Braugerste</i>	56
Tab. 4.3	SPSS Ausgabe für die Gütekriterien Eigenwert und Wilks Lambda der Datenbank <i>Unkrautarten (BBCH 10) in Braugerste</i>	57
Tab. 4.4	Konfusionsmatrix für die Trennung von <i>Unkrautarten (BBCH 10) in Braugerste</i> über Diskriminanzfunktionen.....	59
Tab. 4.5	Richtige Klassifizierungsrate in % für <i>Unkrautklassen (BBCH 10) in Braugerste</i>	59
Tab. 4.6	Konfusionsmatrix für die Trennung von <i>Unkrautarten (BBCH 10) in Mais</i> über Diskriminanzfunktionen.....	61
Tab. 4.7	Richtige Klassifizierungsrate in % für <i>Unkrautklassen (BBCH 10) in Mais</i> ..	61
Tab. 4.8	Konfusionsmatrix für die Trennung von <i>Unkrautarten (BBCH 10) in Zuckerrüben</i> über Diskriminanzfunktionen.....	62
Tab. 4.9	Richtige Klassifizierungsrate in % für <i>Unkrautklassen (BBCH 10) in Zuckerrüben</i>	62
Tab. 4.10	Richtige Klassifizierungsrate in % für Unkrautklassen (BBCH 10 bis 12) in Braugerste.....	63
Tab. 4.11	Richtige Klassifizierungsrate in % für Unkrautklassen (BBCH 10 bis 12) in Zuckerrüben.....	64
Tab. 4.12	Richtige Klassifizierungsrate in % für Unkrautklassen (BBCH 10 bis 12) in Mais.....	64
Tab. 4.13	Richtige Klassifizierungsrate in % für <i>Chenopodium album</i> (CHEAL), <i>Echinochloa crus-galli</i> (ECHCG), <i>Lamium amplexicaule</i> (LAMAM) und <i>Solanum nigrum</i> (SOLNI) im Entwicklungsstadium BBCH 10.....	66
Tab. 4.14	Standardisierte kanonische Korrelationskoeffizienten, Eigenwerte und Wilks Lambda der Diskriminanzfunktionen für die Wissensbasis Zuckerrüben.....	67
Tab. 4.15	Ergebnisse der schrittweisen Diskriminanzanalyse der Datenbank Zuckerrübe.....	69

Tab. 4.16	Reihenfolge, aufgenommene Formparameter und Gewichtung der Erkennungsstrategie mit der Wissensbasis Zuckerrüben.....	69
Tab. 4.17	Richtige Klassifizierungsrate in % für Zuckerrüben Schlag 6 (Aufnahmedatum 27.4.2004, 5,30 ha, 20820 Bilder) über Fuzzy Logic.....	70
Tab. 4.18	Richtige Klassifizierungsrate in % für die Wissensbasis Zuckerrüben (weiß) und neuen Pflanzen (grau) über die Diskriminanzanalyse.....	71
Tab. 4.19	Richtige Klassifizierungsrate in % für Körnererbsen, Pützen (Aufnahmedatum 13.4.2004, 3,95 ha, 8253 Bilder) über das Prinzip der minimalen Distanz.....	71
Tab. 4.20	Richtige Klassifizierungsrate in % für die Wissensbasis Körnererbsen (weiß) und neuen Pflanzen (grau) über die Diskriminanzanalyse.....	72
Tab. 4.21	Richtige Klassifizierungsrate in % für Mais Schlag 8 (Aufnahmedatum 21.5.2004, 3,55 ha, 14508 Bilder) über Fuzzy Logic.....	73
Tab. 4.22	Richtige Klassifizierungsrate in % für die Wissensbasis Mais (weiß) und neuen Pflanzen (grau) über die Diskriminanzanalyse.....	73
Tab. 4.23	Richtige Klassifizierungsrate in % für Sommergerste Schlag 8 (Aufnahmedatum 18.4.2005, 3,55 ha, 17004 Bilder) über Fuzzy Logic.....	74
Tab. 4.24	Richtige Klassifizierungsrate in % für die Wissensbasis Sommergerste (weiß) und neuen Pflanzen (grau) über die Diskriminanzanalyse.....	74
Tab. 4.25	Richtige Klassifizierungsrate in % für Winterraps, Eisenmustal (Aufnahmedatum 15.9.2004, 3,46 ha, 17004 Bilder) über das Prinzip der minimalen Distanz.....	75
Tab. 4.26	Richtige Klassifizierungsrate in % für die Wissensbasis Winterraps (weiß) und neuen Pflanzen (grau) über die Diskriminanzanalyse.....	75
Tab. 4.27	Auswertungsgeschwindigkeit der Bildverarbeitungssoftware IMPAS-AGRI in Abhängigkeit von der Anzahl der Datensätze in der Wissensbasis, der Erkennungsstrategie und dem gewählten Klassifikationsverfahren.....	77
Tab. 5.1	Boden- und Standortverhältnisse sowie Fruchtfolge des Betriebes Hurtz und des Dikopshofes.....	87
Tab. 5.2	Angewendete Herbiziddosis (unbehandelt 0 %, 70 %, 85 %, 100%) in Abhängigkeit von Unkrautart und -dichte (Pflanzen pro m ²) in verschiedenen Kulturen, 100 % = 290 l Aufwandmenge/ha.....	92
Tab. 5.3	Unkrautarten, Herbizide und Aufwandmengen für ausgewählte Schläge in verschiedenen Kulturen.....	94
Tab. 6.1	Herbizideinsparungen in €/ha in verschiedenen Kulturen auf dem Betrieb Hurtz (1) und auf dem Versuchsgut Dikopshof (2) in den Jahren 2004 und 2005.....	116

D Verzeichnis der Abkürzungen

Abb.	Abbildung
AKh	Arbeitskraftstunde
bzw.	beziehungsweise
ca.	circa
CCD	charged coupled device
dGPS	differentielles Globales Positionierungssystem
EPROM	löschen- und programmierbarer Festwertspeicher
<i>et al.</i>	und andere (et alii)
GHz	Gigahertz
GPS	Global Positioning System
ha	Hektar
km/h	Kilometer pro Stunde
l	Liter
m	Meter
mm	Millimeter
ms	Millisekunde
nm	Nanometer
PC	Personal Computer
Pfl./m ²	Pflanzen je Quadratmeter
spp.	Bezeichnung aller Arten innerhalb einer Gattung
t	Tonne
Tab.	Tabelle
u.a.	unter anderem
z.B.	zum Beispiel
µm	Micrometer

Precision Farming is managing agricultural fields with respect to the spatial and temporal variability rather than overcoming heterogeneity. D. A. Mortensen, 1998

1 Einleitung

Precision Farming erlaubt die Anpassung der Landbewirtschaftungsmaßnahmen an die Variabilität der Standort- und Bestandsparameter, indem diese mit Hilfe von Sensoren oder Expertenwissen erfasst und über das *Global Positioning System* (GPS) ortskodiert werden (AUERNHAMMER 1999). Durch den Einsatz von geographischen Informationssystemen (GIS) können diese Daten verknüpft und bewertet werden. Die daraus gewonnenen Erkenntnisse über den Einfluss von Standort und Bewirtschaftung auf das Wachstum der Kulturpflanzen werden über eine geeignete Applikationstechnik für gezielte Bewirtschaftungsmaßnahmen genutzt. Abbildung 1.1 zeigt schematisch Methoden der Informationsgewinnung, der Dateninterpretation und Anwendungsbereiche für Precision Farming.

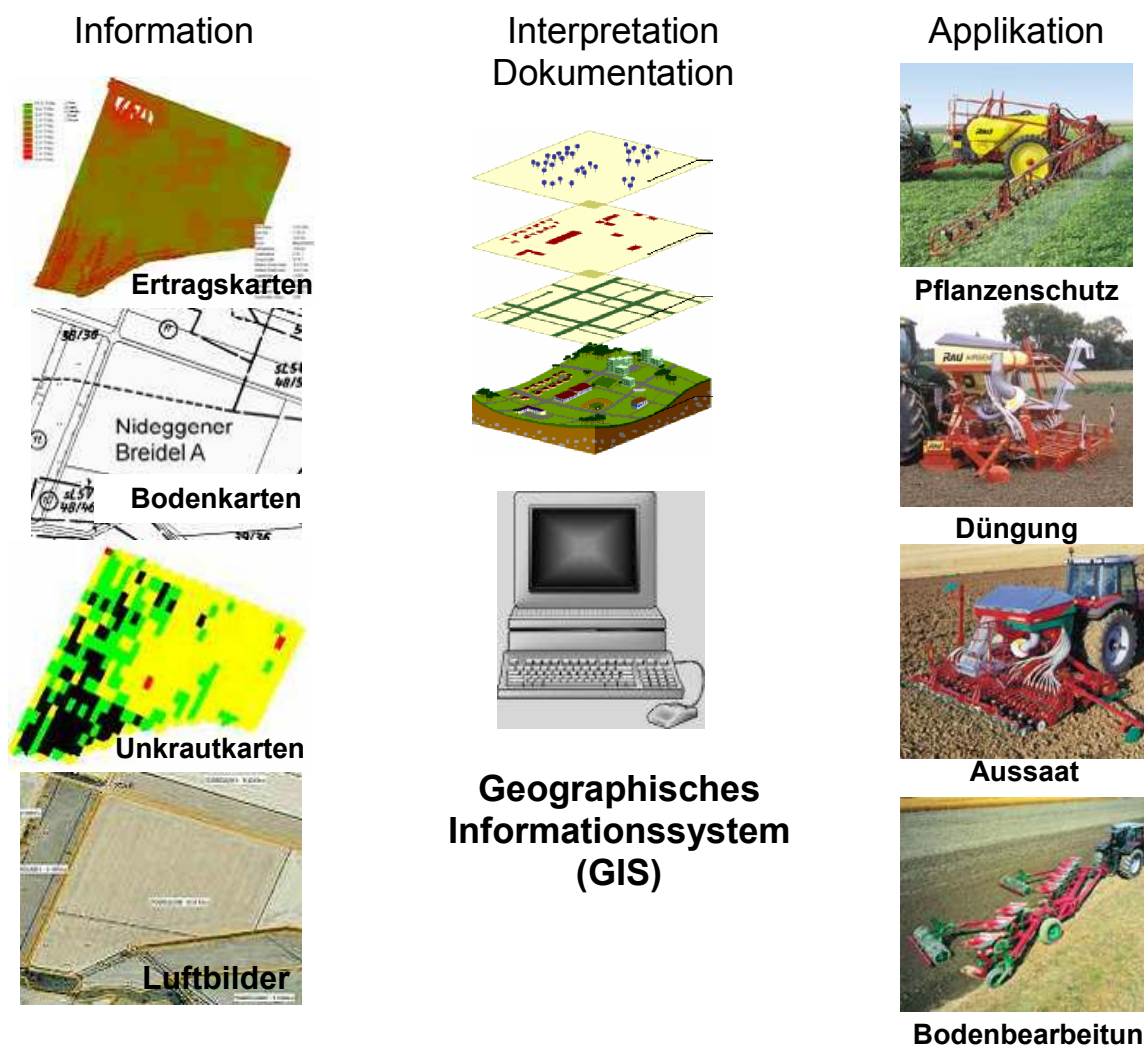


Abb. 1.1: Informationsgewinnung, Dateninterpretation und Anwendungsbereiche für Precision Farming

Über georeferenzierte Ertrags- und Bodenkarten können Informationen zur Ertragsverteilung und kleinräumigen Veränderungen der Bodeneigenschaften mit geeignetem Expertenwissen in eine Applikationskarte zur gezielten teilschlagspezifischen Grunddüngung transformiert werden (*mapping approach*). Bodeneigenschaften und Nährstoffverfügbarkeit können z.B. über Bodenproben, historische Bodenkarten oder Onlinemessung mit Sensoren (SHIBUSAWA *et al.* 2005) bestimmt werden. Durch die Messung der elektrischen Leitfähigkeit des Bodens über elektromagnetische Sensoren werden Bodeneigenschaften wie Textur, Humusgehalt und Bodenwasser gemessen und in Verbindung mit dem GPS georeferenziert dargestellt (ADAMCHUK *et al.* 2004). Für die N-Düngung verwendet man Sensoren, welche die Reflexion der Pflanzenbestände messen. Aus dem Verhältnis der Reflexion in unterschiedlichen spektralen Bändern lassen sich Aussagen über die Chlorophyll-dichte und den Versorgungszustand der Pflanzen ableiten (GUYOT 1990). Durch die Veränderung der Chlorophyll- und Biomassedichte sind Rückschlüsse auf den N-Versorgungszustand der Pflanzen möglich. Wird ein elektronisch regelbarer Düngerstreuer oder eine Pflanzenschutzspritze mit dem Sensor gekoppelt, ist eine teilschlagspezifische N-Düngung im Online-Verfahren (*real-time approach*) möglich (RECKLEBEN und ISENSEE 2005). Werden die Informationen aus Applikationskarten mit Online-Sensorik verbunden, spricht man von einem Echtzeitverfahren mit Kartenüberlagerung (*real-time approach with map-overlay*).

Landwirte in Deutschland setzen heute Precision Farming Methoden hauptsächlich zur Flächenvermessung, Bodenbeprobung und Ertragskartierung ein (JÜRGENS 2006). Durch die präzise Bewertung und Umsetzung von ackerbaulichen Maßnahmen auf die Bedürfnisse des Teilschlages können Betriebsmittel bedarfsgerecht eingesetzt und Erträge gesteigert werden (AUERNHAMMER 2001).

Gleichzeitig bieten sich dem Landwirt durch den Einsatz dieser neuen Informationstechnologien auch Möglichkeiten einer umfangreichen Dokumentation der pflanzenbaulichen Produktion (AHLERS 2003). Aspekte der Betriebs- und Produktionszertifizierung, der Einhaltung von Bewirtschaftungssauflagen in Wasserschutzgebieten, des Verbraucherschutzes und der Naturschutzgesetzgebung setzen eine transparente und ortsbezogene Dokumentation der Produktionsabläufe voraus. Dies gilt insbesondere für die mineralische Düngung und den chemischen Pflanzenschutz.

In Deutschland wurden 2002 über 34.000 t Pflanzenschutzmittelwirkstoffe verkauft. Davon waren über 14.000 t Herbizide (BMVEL 2005). Da der Einsatz von Pflanzenschutzmitteln in unserer Gesellschaft zunehmend kritisch gesehen wird, gibt es in vielen europäischen Ländern seitens der Politik Bemühungen, eine Reduzierung von Pflanzenschutzmitteln

durchzusetzen (FALCONER 1998, JENSEN 2004). Auch in Deutschland soll dies u.a. durch das *Reduktionsprogramm chemischer Pflanzenschutz* erreicht werden. Hauptziel dieses Programms ist es, Pflanzenschutzmaßnahmen in der Landwirtschaft auf ein *notwendiges Maß* zu reduzieren (BMVEL 2005). Technologien zur gezielten Anwendung von Pflanzenschutzmitteln werden ausdrücklich gefordert und sollen unterstützt werden. Neue Verfahrenstechniken, die sowohl eine gesicherte Nahrungsmittelversorgung der Bevölkerung gewährleisten als auch der ökologischen Zielsetzung einer nachhaltigen und umweltschonenden Landwirtschaft gerecht werden, gewinnen in Zukunft weiter an Bedeutung (ZWERGER *et al.* 2004).

2 Problemstellung und Zielsetzung

In der Unkrautbekämpfung gehört die Anwendung des Schadschwellenprinzips zur *guten fachlichen Praxis*. Hierbei werden nur dann Herbizide auf einem Schlag ausgebracht, wenn die Kosten einer Unkrautbekämpfung niedriger sind als der zu erwartende Ertragsverlust durch Unkrautkonkurrenz (NIEMANN 1981), wobei die Entscheidung sich in der Praxis in der Regel auf den ganzen Schlag bezieht.

Zahlreiche Untersuchungen haben allerdings gezeigt, dass Unkräuter auf dem Schlag heterogen verteilt sind (MARSHALL 1988, THORNTON *et al.* 1990, CHRISTENSEN und HEISEL 1998). Durch Rasterkartierungen von Unkräutern und geostatistische Auswertungen wurde die Variabilität von Unkrautarten und deren Abundanz auf dem Schlag erfasst und kartiert. Insbesondere bei einem Abstand der Messpunkte von nur wenigen Metern ist der Zeitaufwand für die Erstellung von Unkrautkarten aus betriebswirtschaftlichen Gesichtspunkten zu hoch (SCHWARZ und WARTENBERG 1999). Solche Verfahren scheiden damit für einen praktischen Einsatz im Ackerbau aus.

Laut KUNISCH (2002) konnten sich Verfahren der teilschlagspezifischen Unkrautbekämpfung im Ackerbau bisher nicht durchsetzen, da es an automatisierten und praxisreifen Verfahren der Unkrauterfassung und -erkennung fehlt. Sensorsysteme wie *DetectSpray* (FELTON und MCCLOY 1992, BILLER 1998) oder *WeedSeeker* (DOHMEN 1996) können grüne Pflanzen vom Boden und toter organischer Substanz unterscheiden und damit Applikationsentscheidungen im Obst- und Weinbau, auf Bracheflächen, Bahndämmen oder im Reihenzwischenraum von Kulturpflanzen mit nicht-selektiven Herbiziden unterstützen.

Um jedoch die Einsparpotenziale der teilschlagspezifischen Unkrautbekämpfung in landwirtschaftlichen Kulturpflanzen zu nutzen, muss zwischen Unkraut und Kulturpflanze unterschieden werden. Die zusätzliche Erkennung von einzelnen Unkrautarten wie *Galium aparine* L. und *Cirsium arvense* L. ist für die selektive Bekämpfung notwendig (SÖKEFELD und GERHARDS 2004).

Arbeiten von PÉREZ *et al.* (2000), SOGAARD und HEISEL (2002) und YANG *et al.* (2003) zeigten, dass durch bildanalytische Verfahren eine Erkennung von Unkrautarten und Bewertung der Unkrautdichte in verschiedenen Kulturpflanzen möglich ist. Verfahren der Bildaufnahme und -auswertung sind allerdings häufig nicht automatisiert oder befinden sich noch in der Entwicklung. Mit Unkrautverteilungskarten, die über bildanalytische Verfahren erstellt wurden, können in Verbindung mit einer geeigneten Applikationstechnik

Unkrautnester gezielt nur dort bekämpft werden, wo die Schadensschwelle für die jeweilige Unkrautart oder Unkrautklasse überschritten ist. Um Wirkstoffe selektiv an den Stellen zu applizieren, wo die entsprechenden Unkrautarten auftreten, sollte die technische Ausstattung einer Pflanzenschutzspritze neben der Abschaltung der Teilbreiten und einer Regulierung der Herbiziddosis auch einen Wechsel des Wirkstoffes zulassen.

Ein kameragesteuertes Verfahren zur teilschlagspezifischen Unkrautbekämpfung (Abbildung 2.1) wird seit 2004 im Rahmen des vom Bundesministerium für Verbraucherschutz, Ernährung und Landwirtschaft (BMVEL) geförderten Projektes *Teilschlagspezifische Unkrautbekämpfung durch raumbezogene Bildverarbeitung im Offline- und (Online-) Verfahren (TURBO)* auf dem Betrieb Manfred Hurtz in Nideggen-Berg und auf Flächen der Lehr- und Forschungsanstalt Dikopshof der Universität Bonn entwickelt und eingesetzt.



Abb. 2.1: Verfahrensschritte der teilschlagspezifischen Unkrautbekämpfung TURBO

Dazu sollten drei Verfahrenstechniken entwickelt werden:

- ❖ Online-Bildaufnahme von Unkräutern und Kulturpflanzen mit Digitalkameras und automatischer Ortskodierung der Bilder über GPS.
- ❖ automatisierte Bildverarbeitung (Einlesen der Binärbilder, Konturextraktion, Erkennung von Pflanzenarten durch den wissensbasierten Vergleich der Konturmerkmale) und Erstellung von Applikationskarten für drei Herbizidklassen anhand von Bekämpfungsschwellen.
- ❖ Online-Steuerung einer Herbizidspritze mit drei getrennten Flüssigkeitssystemen (Dreikammerspritze) und teilschlagspezifische Ausbringung von drei verschiedenen Herbizidmischungen auf der Grundlage georeferenzierter Applikationskarten und Unkrautschadensschwellen.

Da es sich bei den eingesetzten Techniken um Prototypen handelt, liegen für den Einsatz auf Praxisflächen noch wenige Daten hinsichtlich der ökonomischen und ökologischen Effizienz vor. Die Verfahrensschritte Bildaufnahme, Bildverarbeitung und Herbizidapplikation werden noch getrennt durchgeführt (Offline-Verfahren).

Weitere Ziele der Arbeit sind die Bewertung der Bildaufnahme, Bildauswertung und Applikationstechnik im Feldeinsatz. Die Ergebnisse zur Effizienz der Bildaufnahme und Erkennungsgenauigkeit der Algorithmen zur Unkrautklassifikation im Offline-Verfahren sollen die Grundlage für eine kameragesteuerte Herbizidapplikation im Online-Verfahren bilden.

Das Wissen über die Populationsdynamik von Unkrautarten und deren Interaktion mit den Kulturpflanzen ist Voraussetzung für ein erfolgreiches Unkrautmanagementsystem (KROPF *et al.* 1996). Um zukünftige Managementsysteme der teilschlagspezifischen Unkrautbekämpfung zu unterstützen, werden Unkrautverteilungskarten aus verschiedenen Boniturverfahren bewertet. Ein Vergleich dieser Karten mit Boden- und Ertragskarten soll Kausalitäten zwischen Unkrautverteilung, Ertragsverteilung und Bodenvariabilität aufdecken. Die Ergebnisse von Schadschwellenversuchen und Untersuchungen zur zeitlichen und räumlichen Variabilität einiger bedeutender Unkrautarten sollen helfen, die Herleitung von Bekämpfungsentscheidungen zu präzisieren.

Das Potenzial der Herbizideinsparung und die Wirkung der Herbizidmaßnahmen durch TURBO in Getreide, Mais, Zuckerrüben, Winterraps und Erbsen sollen dargestellt und diskutiert werden. Im Weiteren wird anhand der Erfahrungen aus zwei Jahren Praxiseinsatz eine ökonomische Bewertung der eingesetzten Boniturverfahren sowie der eingesetzten Applikationstechnik vorgestellt.

3 Bildaufnahme von Unkräutern in Kulturpflanzenbeständen

3.1 Stand des Wissens

Eine effiziente Erfassung der Unkrautverteilung im Feld ist nur mit Hilfe von automatischen, sensorgesteuerten Verfahren zu erzielen. BROWN und NOBLE (2005) gehen davon aus, dass das Fehlen von automatisierten Verfahren der Bildaufnahme und Bildauswertung das Haupthindernis für die Einführung von teilschlagspezifischen Unkrautbekämpfungsmaßnahmen in die Praxis ist. Bei der sensorgestützten Unkrautkartierung unterscheidet man zwischen Fernerkundungsaufnahmen und Verfahren zur Unkrauterkenntnis im Nahbereich mit Sensoren, die an einem Fahrzeug angebracht sind.

Fernerkundungsdaten für die Unkrautkartierung stammen in der Regel aus Luftbildaufnahmen. LAMB und BROWN (2001) waren in der Lage, mit multispektralen Bildern bei einer geometrischen Auflösung von 0,5 m Populationen von *Avena* spp. mit einer Pflanzendichte von über 17 Pflanzen/m² in einem Triticalefeld zu erkennen. Bei einer Bildauflösung von 2 m waren nur noch Populationen zu erkennen, die eine Dichte von über 23 Pflanzen/m² aufwiesen. Kulturpflanzen und Ungräser waren zum Zeitpunkt der Aufnahmen im Entwicklungsstadium BBCH 10 bis 15. Die Unkrauterkenntnis war mit dieser Methode der Kartierung infolge der geringen Bildauflösung nur eingeschränkt möglich. In den Arbeiten von LAMB und BROWN (2001) wurden die vorkommenden Unkrautarten nicht aus den Informationen der Luftbilder sondern vorher manuell bestimmt. Dabei stellte sich *Avena fatua* L. als die dominierende Unkrautart heraus. Eine Unterscheidung von Teilflächen mit verschiedenen hohen Unkrautdichten war in Einzelfällen möglich über die Bestimmung des Gesamtdeckungsgrades. Dieser wurde korreliert zu der Populationsdichte von *Avena fatua*.

Luftbildaufnahmen, die mit einer CCD-Kamera in vier Spektralbereichen mit einer geometrischen Auflösung von 1 m in Sojabohnen (BBCH 14 bis 18) gemacht wurden, dienten MEDLIN *et al.* (2000) zur Kartierung von Unkrautarten. Die Unkräuter waren zum Zeitpunkt der Kartierung etwa 5 cm bis 10 cm groß und hatten 1 bis 6 Laubblätter. Dieser Kartierungstermin war der spätest mögliche für eine wirksame Bekämpfung der Unkräuter mit Herbiziden. Trotz der Größe der Unkrautpflanzen gelang eine Identifizierung der *Unkrautnester* erst ab einer Pflanzendichte von mehr als 10 Pflanzen/m². Da die Bekämpfungsschwelle bei 1 Pflanze/m² lag, reichten die Kartierungsergebnisse nicht aus, um eine Behandlungsentscheidung für eine teilflächenspezifische Unkrautbekämpfung zu treffen. VIOIX *et al.* (2001) überflogen im Frühjahr Felder mit Zuckerrüben, Mais, Zwiebeln, Sommergerste und Raps mit einer Drohne. Aufnahmen mit einer Farbkamera aus einer

Höhe von 10 bis 100 Metern wurden später digitalisiert (1702 * 1136 Pixel pro Bild) und über vorher auf dem Feld mit dGPS markierten Fixpunkten georeferenziert. Dabei wurden, um eine hohe geometrische Auflösung zu erreichen, nur Aufnahmen in den Bildverarbeitungsprozess übernommen, die in geringer Flughöhe gemacht worden waren. Für die Trennung von Kulturpflanze und Unkraut wurde auch das Verteilungsmuster der Kulturpflanzen in die Analyse einbezogen. In Sommergerste und Raps konnten mit diesem Verfahren keine präzisen Informationen über die Unkrautverteilung gewonnen werden, da durch den frühen Reihenschluss der Kulturpflanze Unkräuter rasch überdeckt wurden. Auch war die Bildqualität durch die variablen Lichtbedingungen schlecht. Eine Unterscheidung von Unkrautarten war nicht möglich. In den Reihenkulturen Mais, Zuckerrüben und Zwiebeln konnten *Unkrautnester* lokalisiert, Unkrautarten aber nicht differenziert werden.

REW und MAXWELL (2002) analysierten gemeinsam mit Landwirten Satelliten- und Luftbilder mit dem Ziel, teilschlagspezifische Entscheidungen zur Unkrautbekämpfung abzuleiten. Für die Erstellung von Unkrautkarten wurden zusätzlich eigene Feldbonituren und Unkrautdaten aus der Ertragskartierung genutzt. Die überaus zeitaufwendige Interpretation der Daten setzte sehr gute Kenntnisse bei der Datenauswertung mit einem geographischen Informationssystem voraus. Die Ergebnisse halfen den Landwirten, Entscheidungen zur Bewässerung und Unkrautbekämpfung für das Folgejahr zu präzisieren. Eine automatische Einteilung von Managementzonen für teilschlagspezifische Düngungs- oder Unkrautbekämpfungsmaßnahmen konnte aufgrund fehlender Auswertungsalgorithmen für Luft- und Satellitenbilder nicht erfolgen.

HÄUSLER und NORDMEYER (2003) haben über 4 Jahre die Unkrautverteilung auf 4 Feldern (Zuckerrüben, Winterweizen) anhand von Farb- und Farb-Infrarotluftbildern untersucht. Die Bilder wurden dabei in einem frühen Wachstumsstadium von Kulturpflanzen und Unkräutern und wenige Wochen vor der Ernte aufgenommen. Je nach Flughöhe betrug die räumliche Auflösung der digitalisierten Bilder 0,18 bis 0,85 m pro Pixel. Eine Differenzierung von Unkrautnestern in Winterweizen konnte aufgrund des schnellen Wachstums der Kulturpflanze zu diesem Zeitpunkt sowie geringen Unkrautdichten und wegen ähnlicher Reflexionseigenschaften von Unkräutern und Weizen nicht vorgenommen werden. Für eine Erkennung von *Alopecurus myosuroides* Huds. Nestern in Zuckerrüben war je nach Entwicklungsstadium eine minimale Abundanz von 80 (BBCH 21 bis 32) bis 200 (BBCH 12 bis 16) Pflanzen/m² erforderlich. Eine Klassifizierung von *Agropyron repens* (L.) Pal. Beauv. war ab 40 (BBCH 13 bis 32) bis 160 (BBCH 13 bis 16) Pflanzen/m² möglich. Im frühen Entwicklungsstadium wurde *Cirsium arvense* (L.) Scop. (BBCH 11 bis 32) je nach Aufnahmedatum ab 50 bis 100 Pflanzen/m² erkannt. Überraschten die Unkräuter vor der Ernte

die Kulturpflanze, waren *Galium aparine* L. (BBCH 79 bis 83) ab 100 Pflanzen/m², *Cirsium arvense* (BBCH 89 bis 90) ab 40 Pflanzen/m² und *Apera spica-venti* (L.) Pal. Beauv. (BBCH 89 bis 90) ab 70 Pflanzen/m² zu detektieren. Der Vergleich einer über Luftbilder generierten Karte für *Cirsium arvense* mit der Karte aus einer visuellen Rasterbonitur (*ground truth*) ergab eine durchschnittliche korrekte Klassifizierung von nur 61,2 %.

Auch PENA-BARRAGAN *et al.* (2005) nutzten Farb- und Farb-Infrarot Luftbilder und kartierten *Ridolfia segetum* Moris in Sonnenblumen. Eine präzise Differenzierung zwischen *Ridolfia segetum* und Sonnenblumen war erst ab Mitte Juni möglich. Die so gewonnenen Informationen sind dann frühestens im Folgejahr unter der Annahme, dass die Nester der Unkräuter räumlich stabil bleiben, für eine teilschlagspezifische Unkrautbekämpfung verwertbar.

Laut KÜHBAUCH (2002) sind Satelliten- und Luftbilder aufgrund der geringen Auflösung, der zeitlichen Verzögerung zwischen Beschaffung und Auswertung der Bilddaten und nicht zuletzt durch die durch das Wetter eingeschränkten Aufnahmebedingungen nur bedingt für eine zeitnahe und präzise Kartierung von Unkräutern in Kulturpflanzen nutzbar.

Vielversprechender sind Sensoren aus der **Naherkundung**. Optoelektronische Systeme ermöglichen durch die Messung der spektralen Reflexion eine Unterscheidung zwischen Boden und Pflanze sowie bedingt eine Differenzierung von Pflanzenarten.

VRINDTS und DE BAERDEMAEKER (1997), BILLER *et al.* (1997) und MOSHOU *et al.* (1998) nutzten optoelektronische Sensoren, um die Reflektion von Boden und Pflanzen im grünen, roten und nah-infraroten Wellenbereich zu messen. Da grüne Pflanzen in der Regel im roten Spektralband schwächer reflektieren als Boden und Mulch und im nah-infraroten Spektrum wesentlich stärker reflektieren, ist die Erkennung von grünen Pflanzen vor dem Hintergrund des Bodens möglich. FELTON und McCLOY (1992) beschreiben ein auf dieser Basis entwickeltes Verfahren zur nicht selektiven Unkrautbekämpfung auf Bracheflächen, Bahndämmen und im Zwischenraum von Reihenkulturen. Die verschiedenen Pflanzenarten hatten ebenfalls leicht voneinander abweichende Reflektionsspektren, was zur Artenerkennung genutzt wurde (BILLER und IHLE 2000). Im Praxiseinsatz musste ein solches System vor jeder Überfahrt geeicht werden, da sich das Reflektionsverhalten der Pflanzen in Abhängigkeit von Einflussgrößen, wie z.B. Wasserversorgung oder Ernährungszustand änderte.

WARTENBERG und DAMMER (2002) arbeiteten mit einem optoelektronischen Unkrautsensor (Abbildung 3.1, nach EHLERT 2000), der über Fotodioden den reflektierten Rot- und Infrarotanteil des Lichts in der Fahrspur von Getreide und Leguminosen misst. Durch Quotientenbildung aus den beiden Reflexionsspektren ließ sich eine relativ sichere Trennung von Boden und grünen Pflanzen erreichen. Für den Nachweis von grünen Pflanzen tasteten die Fotodioden (8 parallele Reihen mit 2,5 cm Gesamtbreite) in der Fahrspur eine Länge von 5,18 m ab. Da im Keimblattstadium die Anzahl der Sensorsignale mit der Anzahl der Unkräuter korrelierte, war eine Umrechnung in die Anzahl der Unkräuter/m² möglich. Mit zunehmender Größe der Unkräuter entsprach das gemessene Signal dem Grad der Bodenbedeckung (Unkrautdeckungsgrad). Durch ein Steuerungssignal an die Pflanzenschutzspritze wurde bei Unterschreiten der spezifischen ökonomischen Schadschwelle eine Reduzierung der Herbizidmenge von 100 auf 50 % veranlasst. Eine Kalibrierung des Sensors auf dem Acker ist bei wechselnder Unkrautartenzusammensetzung und unterschiedlichen Entwicklungsstadien der Unkräuter notwendig. Unkrautarten konnten mit diesem Verfahren nicht unterschieden werden.

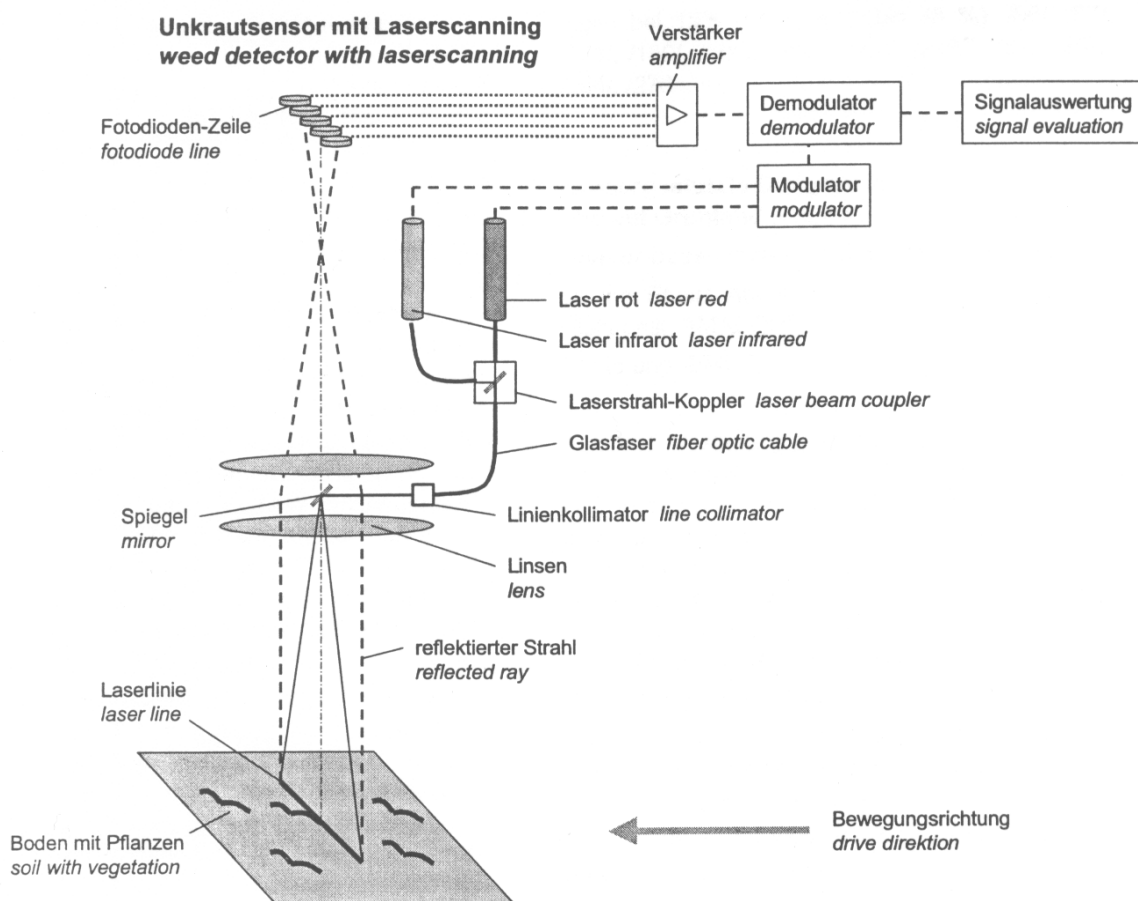


Abb. 3.1: Schematischer Aufbau eines optoelektronischen Sensors zur Messung des Unkrautdeckungsgrades in den Fahrspuren (nach EHLERT 2000)

Reflexionsmessungen im Spektralbereich von 500 bis 900 nm dienten BOSSU *et al.* (2005) zur Differenzierung von *Cirsium arvense*, *Veronica persica* Poir., *Sinapis arvensis* L. und *Avena fatua*. Dabei wurden die Reflexionsspektren von einzelnen Blättern unter Laborbedingungen und im Freiland unter kontrollierten Lichtverhältnissen gemessen. Die Auswertung von 18 Spektralbändern führte zu einer sehr guten Differenzierung (97 bis 100 %) von mono- und dikotylen Pflanzen. Eine Artendifferenzierung gelang unter Laborbedingungen zu 86 %, unter Freilandbedingungen zu 65 %.

DZINAJ *et al.* (1998) beschreiben ein Multi-Sensor Verfahren (Zeilensensor, Laserdioden, Druckluftsensor, Hözensensor, Boden-Pflanze-Sensor) zur Online-Erkennung von Unkräutern in Mais sowie die notwendige Systemtechnik für den Einsatz einer onlinegesteuerten Hacke. Unter Laborbedingungen ergaben sich bei Verwendung von 23 Eingangsparametern für die Merkmale Mais, Boden und Unkräuter Erkennungsquoten von 94 bis 99 %. Das wichtigste Merkmal zur Unterscheidung von Mais und Unkräutern war die Wuchshöhe, die mit Hilfe von Infrarot-Fotodioden (Lichtschrankenprinzip) gemessen wurde.

In jüngerer Zeit werden auch die Möglichkeiten der Differenzierung von Pflanzenarten durch die Messung der Chlorophyllfluoreszenz intensiv untersucht. Da intakte Pflanzen die Energie, die sie bei der Lichtabsorption von Chlorophyll aufnehmen, auch photosynthetisch nutzen können, kann man aus der Höhe der Fluoreszenz auf die Intensität der Photosynthese schließen. Der reziproke Zusammenhang zwischen Chlorophyllfluoreszenz und Photosynthese (KAUTSKY und HIRSCH 1931) einerseits und der Änderung der Chlorophyllfluoreszenz eines Blattes beim Übergang vom Dunkeln ins Licht (*Kautsky-Effekt*) andererseits, vermittelt Informationen über die Photosyntheseaktivität. Wird die Fluoreszenz spektral aufgelöst, lässt sich aus dem gemessenen Fluoreszenz-Emissionsspektrum ein Rückschluss auf die Farbstoffzusammensetzung einer Pflanze ziehen. Die Fluoreszenz des Chlorophylls liegt zwischen 650 und 800 nm mit Maxima bei 690 nm (dunkelrot) und 740 nm (nahes infrarot). Die Fluoreszenz von phenolischen Substanzen liegt zwischen 350 und 600 nm mit Maxima bei 440 nm (blau) und 540 nm (grün). Phenolische Substanzen werden von Pflanzen ausgeschieden, wenn sie beispielsweise von einem Pathogen befallen werden. Das messbare Fluoreszenzemissionsspektrum eines Blattes wird wesentlich beeinflusst durch die Absorption der Farbstoffe, die ein Teil des innerhalb des Blattes emittierten Fluoreszenzlichtes reabsorbieren. Aus der Reabsorption kann man zudem auf die Farbstoffkonzentration schließen (BUSCHMANN und SCHREY 1981). In der Fluoreszenzbildanalyse wird die Fluoreszenz von Pflanzen mit hochempfindlichen Kameras aufgezeichnet. Aus der Verteilung der Fluoreszenzintensität kann man auf Farbstoffzusammensetzung und Photosyntheseaktivität schließen. Die Eignung des Fluoreszenzmessverfahrens wird auch für eine Diskriminierung von Unkrautarten untersucht (KERÄNEN *et al.* 2003). Da bei Blättern

die Reflexion insbesondere von den Farbstoffen und der Epidermisaufgabe bestimmt wird, und hieraus wiederum Reflexionsspektren abgeleitet werden können, wird versucht, anhand der unterschiedlichen Blattmorphologie von Pflanzen eine Artendifferenzierung zu erzielen.

AULICH und NORDMEYER (2004) untersuchten die Chlorophyllfluoreszenzmuster der dikotylen Pflanzenarten *Galium aparine* und *Veronica hederifolia* L. sowie der Gräser *Alopecurus myosuroides* und *Apera spica-venti* im Keim- und Laubblattstadium. Die Messungen wurden mit einem Fluoreszenzbildanalyse-System, bestehend aus Leucht-Dioden (620 nm), Halogenlampe (250 Watt), einer CCD Kamera und einer Steuereinheit durchgeführt. Im Keimblattstadium war bei Blattproben aus dem Gewächshaus, dem Freiland und von Ackerschlägen ein signifikanter Unterschied zwischen mono- und dikotylen Arten feststellbar. Die Auswertung der Chlorophyllfluoreszenz der Laubblätter ergab allerdings keine signifikanten Unterschiede. TARTACHNYK und KÜHBAUCH (2005) verglichen die Fluoreszenzmuster von Blattober- und -unterseiten von Zuckerrüben, Winterweizen und drei Gruppen verschiedener Unkrautarten (Gruppe A: *Stellaria media* (L.) Vill., *Viola arvensis* Murr., Gruppe B: *Cirsium arvense*, *Galium aparine*, Gruppe C: *Poa annua* L., *Alopecurus myosuroides*, *Apera spica-venti*). Unter Laborbedingungen wurden bei dem Verfahren der Laser-Induzierten-Fluoreszenz (LIF) für die Anregung der Fluoreszenz zwei LEDs (408 nm) eingesetzt. Die Fluoreszenzintensitäten sowie die Reflexion des Laserstrahls wurden mit einem Spektrometer erfasst. Dabei wurde festgestellt, dass die Fluoreszenzspektren von Blattober- und Blattunterseiten der dikotylen Pflanzen stark variierten. Mono- und dikotyle Arten im Keim- und Laubblattstadium konnten sich anhand der gemessenen Parameter der Blattunterseite vollständig differenzieren lassen. Eine Unterscheidung anhand der Messwerte der Blattoberseite führte im Laubblattstadium zu schlechteren Ergebnissen.

Kameraaufnahmen können mit Hilfe der digitalen Bildanalyse zur Segmentierung von Boden und Pflanze sowie zur Erkennung von Unkrautarten und Kulturpflanzen anhand von Form-, Textur- und Farbmerkmalen verwendet werden. Dabei können nicht nur Unkräuter von Kulturpflanzen unterschieden, sondern auch einzelne Unkrautarten erkannt werden (WOEBBECKE *et al.* 1995a, GERHARDS *et al.* 1998, CHAPRON *et al.* 1999, SÖKEFELD *et al.* 2000, PÉREZ *et al.* 2000, SOGAARD und HEISEL 2002, YANG *et al.* 2003). Für die teilflächenspezifische Unkrautbekämpfung sollte dies dazu genutzt werden, um Unkrautarten oder -klassen selektiv zu bekämpfen. Besonders konkurrenzstarke Unkräuter wie *Galium aparine* und *Cirsium arvense* sollten auch auf kleinen Teilflächen und mit einer geringen Dichte sicher erfasst werden. In den meisten Fällen wurden die Bilder an bestimmten Boniturspunkten manuell ausgelöst. Handelsübliche digitale Farbkameras haben dabei den Vorteil, dass sie einfach bedienbar und preiswert sind. Sie haben meist eine hohe Auflösung

und es können sowohl Farb- als auch Formparameter für eine spätere Bildauswertung genutzt werden.

PETERSEN *et al.* (2002) nahmen manuell an 135 Boniturstellen Unkräuter in einem Braugerstenfeld mit einer digitalen Farbkamera (**Rot-Grün-Blau**) auf. Der Bildausschnitt betrug 50 cm * 44 cm (0,22 m²) pro Bild. Für die spätere Formanalyse wurden die Bilder in Grauwertbilder konvertiert und dann binarisiert. YANG *et al.* (2003) nutzten zur Bestimmung der Unkrautdichte in Mais (11,7 ha) Farbbilder, die zwischen den Reihen an 242 Messpunkten manuell aufgenommen wurden. Unter natürlichen Lichtbedingungen wurden Bilder mit einer Auflösung von 512 * 768 Pixel bei einer Bildfläche von 0,7 m² pro Bild (1,78 mm²/Pixel) aufgenommen. Die Untersuchung der Unkrautdichte wurde über die Analyse von „grünen“ Bildpunkten geführt, wobei neben Pflanzen auch Boden und Störelemente im grünen Kanal reflektieren.

Ein leistungsfähiges Verfahren zur Bildaufnahme sollte allerdings in der Lage sein, auch bei hohen Fahrgeschwindigkeiten kontrastreiche Bilder zu erzeugen. Durch das Anbringen mehrerer Kameras an einem Trägerfahrzeug und schnellen Bildaufnahmesequenzen entsteht so ein enges Raster für die Unkrautbonitur. SÖKEFELD *et al.* (2000) beschreiben ein Online-Bildaufnahmeverfahren mit drei CCD-Shutter-Kameras, die an einem Trägerfahrzeug montiert und in Bewegung konturscharfe Bilder in hoher geometrischer Auflösung (1024 * 1024 Pixel) erzeugen. Durch einen Infrarot-Sperrfilter wurde sichtbares Licht unterhalb von 760 nm abgeschirmt und bei kurzen Belichtungszeiten von ca. 0,1 ms konnte ein intensiver Kontrast zwischen Boden und Pflanze erzielt werden. Als problematisch für eine spätere Auswertung über Formparameter zeigten sich Aufnahmen mit Schattenbildung durch die Nutzpflanzen oder das Trägerfahrzeug. Bei sonnigem Wetter mit trockenem Boden ergab sich nur ein sehr schwacher Kontrast zwischen Pflanzen und Boden. Steine und Mulch wurden mit der vorhandenen Aufnahmetechnik abgebildet und führten mit dem angewandten Bildauswertungsverfahren über Konturextraktion und Formparameteranalyse zu Fehlinterpretationen.

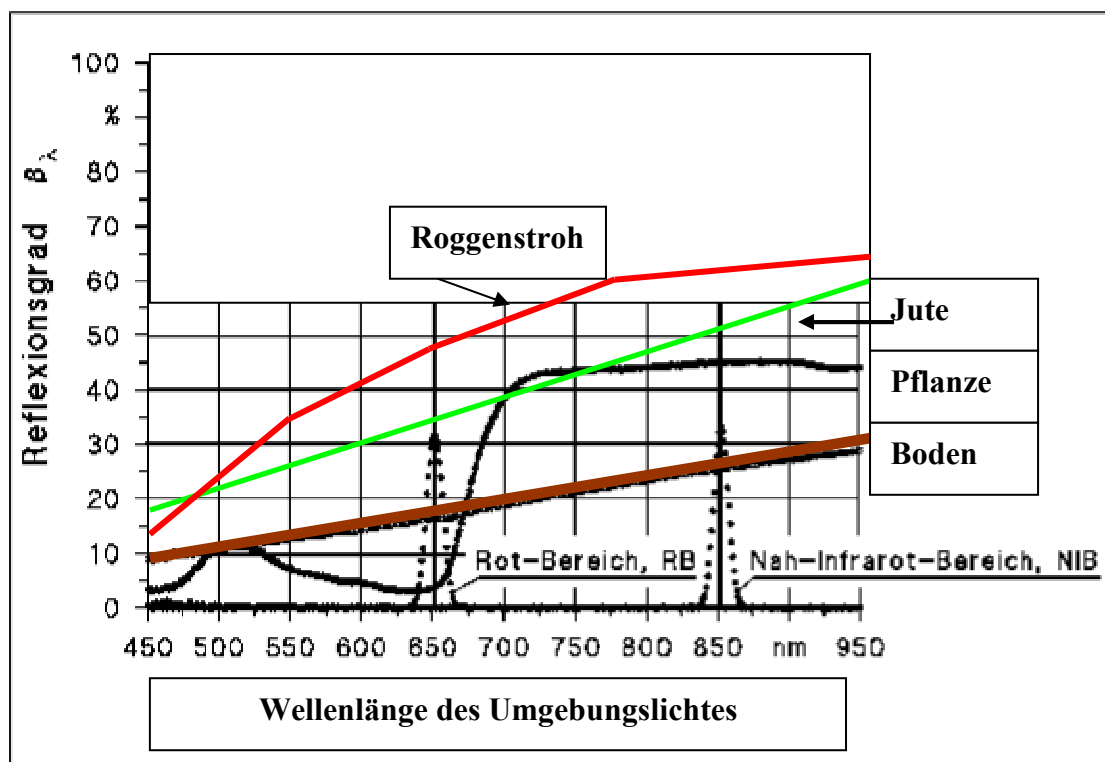


Abb. 3.2: Reflexionseigenschaften von Pflanzen, Boden, Stroh und abgestorbenen Pflanzenresten (verändert nach BILLER 1998)

Pflanzen, Boden, abgestorbenes Pflanzenmaterial und Steine haben unterschiedliche Reflexionseigenschaften (Abbildung 3.2). Durch eine normierte Differenzbildung zwischen Bildern, die in unterschiedlichen Spektralbereichen aufgenommen werden, kann eine bessere Kontrastbildung zwischen grünen Pflanzen und Boden, Steinen und Mulch erreicht werden.

3.2 Ziele

In diesem Kapitel wird eine Weiterentwicklung des bei SÖKEFELD *et al.* (2000) beschriebenen Bildaufnahmeverfahrens vorgestellt. Durch eine bispektrale Kameratechnik wurden Bilder von Unkräutern in Kulturpflanzenbeständen aufgenommen. Die Qualität der Bispektralbilder unter wechselnden Aufnahmebedingungen und die Effizienz des Bildaufnahmeverfahrens wurden untersucht und im Zusammenhang mit Alternativen in der Aufnahmetechnik diskutiert.

3.3 Material und Methoden

Um Grauwertbilder mit hohem Kontrast zwischen grünen Pflanzen und Boden sowie Steinen und Mulch für eine spätere Binarisierung zu erstellen, wurde ein bispektrales Kamerasystem entwickelt. Zur Vorbereitung wurden sechs Pflanzschalen mit unterschiedlichen Bodenarten, Bodenfeuchtigkeit und Pflanzenarten sowie Entwicklungsstadien zu Messungen im Gewächshaus hergerichtet. Ziel war die spektrale Untersuchung im Hinblick auf eine Kontrastoptimierung zwischen Pflanzen und Hintergrund. Drei Bodenarten (humoser Boden mit geringem Sandanteil, mit hohem Sandanteil und mit hohem Sand- und Steinanteil) wurden in trockenem Zustand untersucht. Die Spektralmessungen wurden mit einem Videospektrometer durchgeführt, das an 564 Punkten im Sichtfeld des Sensors (nebeneinanderliegende Pixel im Raster 0,1 mm) gleichzeitig das Reflektionsspektrum im Bereich von 340 bis 925 nm separat für jeden Ort aufzeichnete. Die Spektraleichung erfolgte vorab mit einer Laserlinie bei 635 nm.

Helle Steine zeigten ein starkes Reflektionsverhalten im gesamten Spektralbereich. Abgestorbenes Pflanzenmaterial verhielt sich wie ein heller Stein mit ebenfalls homogenem, starkem Reflektionsverhalten. Alle Pflanzen reflektierten mäßig unterhalb von 570 nm und stark oberhalb von 690 nm. Charakteristisch war ein Einbruch im Bereich 610 - 690 nm. In diesem Bereich reflektierten vitale Pflanzen kaum. Aus spektraler Sicht ist damit eine wirkungsvolle Kontrastanhebung zwischen Pflanzen und Boden, abgestorbenem Pflanzenmaterial und Steinen durch eine normierte Differenzbildung zwischen Bildern, die in einem Spektralbereich oberhalb von 700 nm aufgenommen werden, und Bildern, die im Band 610 - 690 nm aufgenommen werden, möglich. Beide spektralen Aufnahmebereiche lassen sich mit CCD-Kameras und passenden Filtern abdecken.

Hierzu wurde ein bispektrales Kamerasystem entwickelt, welches in einem schock- und vibrationsunempfindlichen Gehäuse zwei Kameraköpfe vereinigt. Die bispektrale Kamera kombiniert eine CCD-Schwarz-Weiß-Kamera für den visuellen (VIS) Spektralbereich zwischen 610 - 690 nm mit einer CCD-Schwarz-Weiß-Kamera für den nah-infraroten (IR) Spektralbereich oberhalb 700 nm. Auf einem Standard-Photoobjektiv ist ein Kaltlichtspiegel angebracht, welcher den IR-Bereich des Spektrums zu der ersten IR-Kamera reflektiert. Der von dem Spiegel durchgelassene, sichtbare Bereich (VIS) des Spektrums wird mit einem austauschbaren Schmalbandfilter auf den Bereich 610 – 690 nm begrenzt und zur zweiten CCD-Kamera weitergeleitet. Die beiden Kanäle werden normiert (gleiche Grauwertintensität) und in ein EPROM differenziert ausgegeben (Abbildung 3.3). Der Verstärkungsfaktor für den sichtbaren Bereich wird automatisch aus den Helligkeitshistogrammen beider Kanäle ermittelt.

Die Differenzbildung (IR–VIS) von zwei gleichzeitig aufgenommenen Bildern erlaubt eine wirkungsvolle Unterdrückung von hell reflektierenden Böden, Steinen und Mulch. Durch eine mechanische Verstellung über eine Justageeinheit zur Verschiebung und Drehung einer Kamera ist eine pixelsynchrone Bildüberlagerung im 10 µm Bereich möglich. Das Bispektralbild wird an den Framegrabber des PCs (P-III 1 GHz) weitergeleitet und auf der Festplatte gespeichert (Offline-Verfahren). Die Bildausgabe erfolgt als Differenzbild mit einer 8 Bit Grauwertaufösung. Bei einer Auflösung von 636 * 480 Pixel werden pro Bild 300 Kb Festplattenspeicher benötigt.

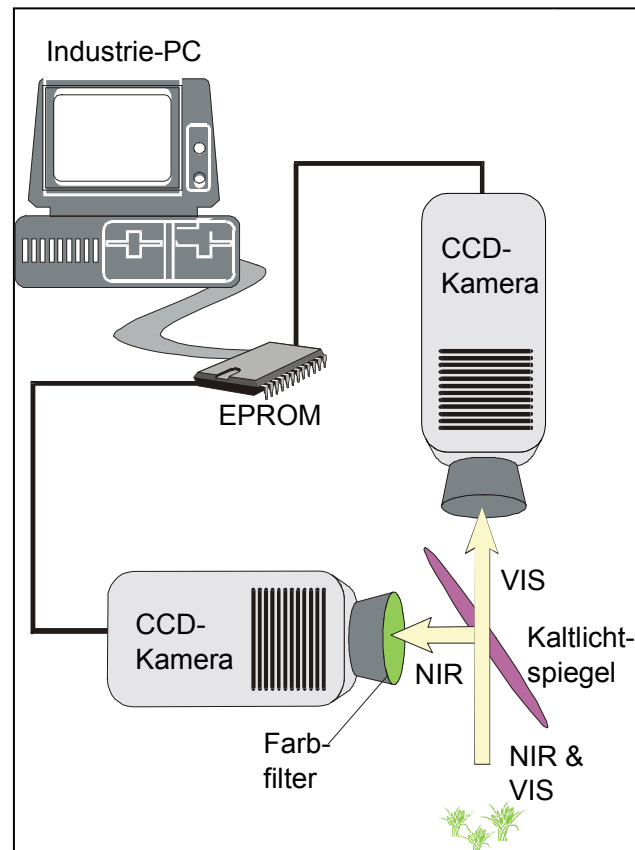


Abb. 3.3: Schematischer Aufbau einer Bispektralkamera zur pixelsynchronen Aufnahme von zwei Bildern mit identischem Bildausschnitt in zwei unterschiedlichen Spektralkanälen (nach SÖKEFELD und GERHARDS 2004)

Die Kamerasteuerung wird, wie auch die Visualisierung der Bilder, über eine speziell programmierte Toolbox zur Bildverarbeitung der Software MATLAB Version 6.5 von *MathWorks* ermöglicht. Auf einem Bildschirm (Abbildung 3.4) werden fortlaufend die während der Fahrt aufgenommenen Bilder gemeinsam mit Parametern der Kamerasteuerung und der GPS-Positionierung dargestellt. So ist eine Kontrolle von eventuellen Fehlfunktionen möglich.

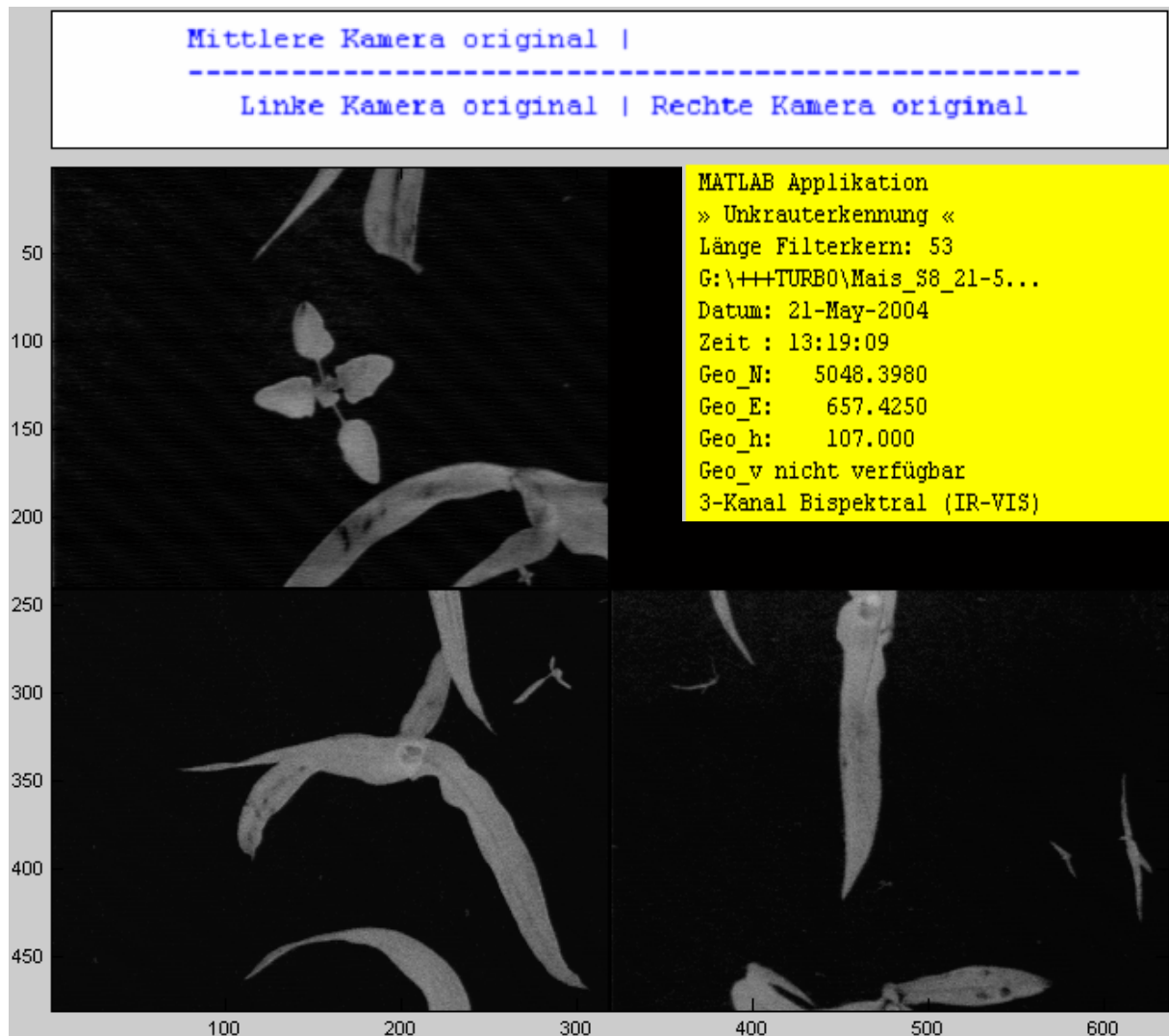
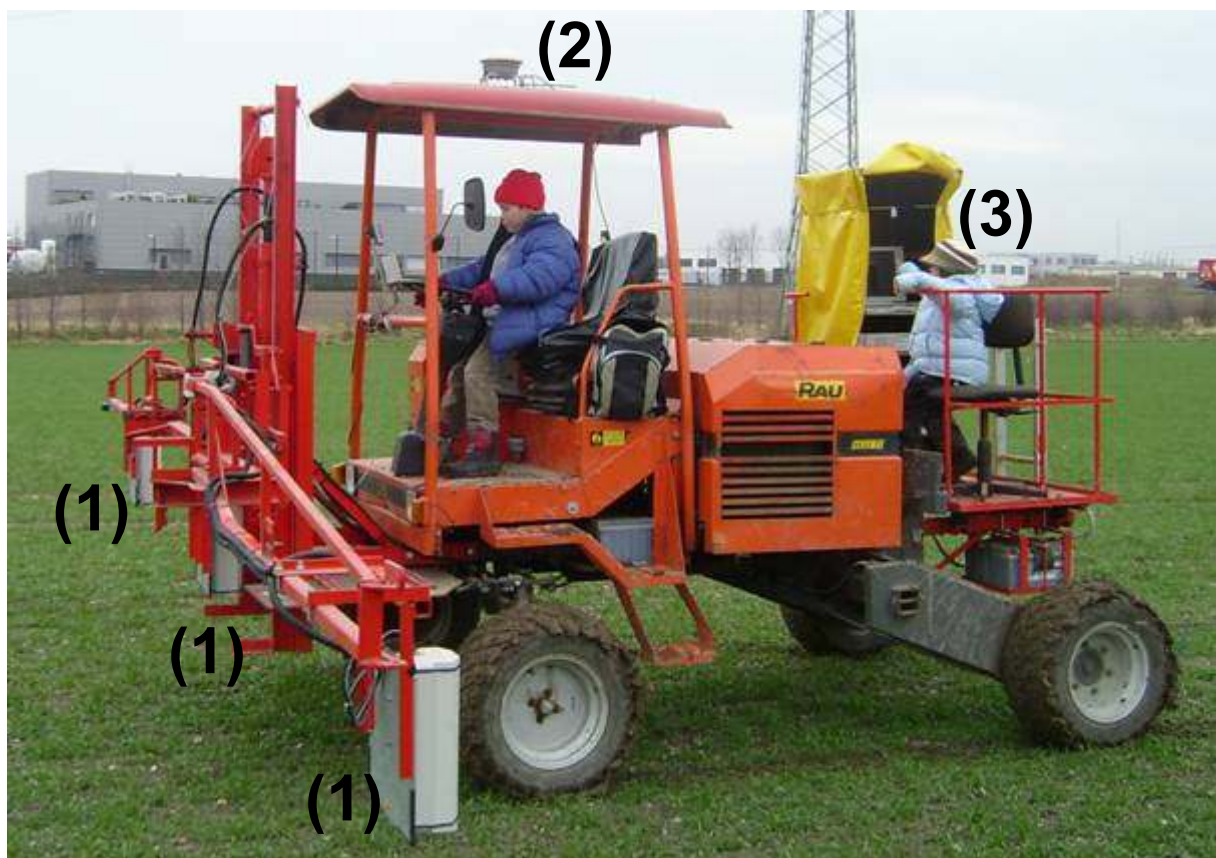


Abb. 3.4: Drei Bispektralaufnahmen in Mais bei einer Fahrgeschwindigkeit von ca. 8 km/h.

Von März 2003 bis Mai 2005 wurden auf über 100 ha in Getreide, Mais, Zuckerrüben, Erbsen und Raps Bilder von Unkräutern und Kulturpflanzen in verschiedenen Entwicklungsstadien mit einem Trägerfahrzeug aufgenommen. Die Versuchsschläge befanden sich auf der Lehr- und Forschungsanstalt Dikopshof in Wesseling bei Köln und auf dem Betrieb Manfred Hurtz in Nideggen-Berg in der Voreifel. Tabelle 3.1 gibt beispielhaft einen Überblick über einige Versuchsschläge, Aufnahmebedingungen und Entwicklungsstadien von Kulturpflanzen sowie Unkrautarten zum Zeitpunkt der Aufnahme.

Tab. 3.1: Ausgewählte Versuchsschläge, Aufnahmebedingungen und Entwicklungsstadien von Kulturpflanze und Unkräutern

Schlag (ha) Kulturpflanze Datum	Aufnahme- bedingungen	Entwicklungsstadien (BBCH) Kulturpflanze und Unkräuter			
		Kulturpflanze	Dikotyle	Ungräser	Problem- unkräuter
Schlag 8 (3,55) Sommergerste 18-4-2005	heiter/wolkig Boden feucht	Sgerste_12 Sgerste_14	Diko_10 Diko_12	Gras_10 Gras_12	GALAP_10
Eisenmus (3,46) Winterraps 15-9-04	Mulchsaat heiter/wolkig	Raps_10 Raps_11	Diko_10 Diko_12	Gras_10	Sgerste_12
Schlag 8 (3,55) Körnermais 21-5-04	bewölkt Boden feucht	Mais_12 Mais_14	Diko_10 Diko_12	Gras_10 Gras_12	CHEAL_12 CHEAL_14
Schlag 6 (5,3) Zuckerrüben 28-4-04	heiter/wolkig Boden trocken	Ruebe_12	Diko_10 Diko_12	Gras_10 Gras_12	GALAP_10
Pützen (3,95) Körnererbse 13-4-05	Mulchsaat heiter/wolkig	Erbse_11 Erbse_12	Diko_10	Sgerste12	Raps_10

**Abb. 3.5:** Trägerfahrzeug für die geokodierte Bildaufnahme, bestehend aus drei Bispektralkameras (1), GPS-Empfänger (2) und Bordrechner (3)

Für den Feldeinsatz wurden drei Bispektralkameras im Abstand von 3 m an einem Trägerfahrzeug der Firma Hege im Frontanbau auf ein 9 m breites Spritzgestänge befestigt (Abbildung 3.5). Durch einen Hydraulikzylinder waren so die Kameras in der Höhe variabel einstellbar. Blendeneinstellung und Fokussierung des Objektivs mussten manuell angepasst werden. An den äußeren Kameras ist ein Ultraschallsensor angeschlossen, der die Aufnahmehöhe erfasste. Scharfe Bildaufnahmen bei hohen Fahrgeschwindigkeiten von bis zu 10 km/h konnten durch den Einsatz eines elektronischen Shutters realisiert werden, der Verschlusszeiten von weniger als 0,1 ms zulässt.

Fast alle Aufnahmen erfolgten mit einem festen Kameraabstand von 3 Metern und in einer Spurweite von 9 Metern. Auf den Flächen des Betriebes Hurtz wurde die Überfahrt in Winterraps und Erbsen im Abstand von 21 Metern (Fahrspuren) durchgeführt, um eine Beschädigung der Kulturpflanzen durch das Trägerfahrzeug zu vermeiden. Durch eine Softwareveränderung wurden die GPS Daten dieser Überfahrten verrechnet.

Pro Sekunde wurden 2 Differenzbilder/Kamera aufgenommen. Das entspricht bei einer Fahrgeschwindigkeit von 7 km/h einem Bildaufnahmeraster von ca. 1 m * 3 m. Die Höhe der Kameras und die sich daraus ergebende Größe des Bildausschnittes wurden in Abhängigkeit von der Kulturart und dem Entwicklungsstadium der Unkräuter gewählt. Durch die geringe Bildauflösung der Kameras wurden Unkräuter im Keimblattstadium mit einem Bildausschnitt von 135 mm * 102 mm (0,014 m²) bei einer Kamerahöhe von 65 cm in Getreide, Raps und Zuckerrüben aufgenommen. So konnten auch sehr kleine Unkräuter mit einer Darstellung von ca. 28 Pixel pro mm² konturscharf wiedergegeben werden. Waren Kulturpflanze und Unkräuter schon im Laubblattstadium, wurde ein Bildausschnitt von 185 mm * 140 mm (0,026 m²) bei einer Kamerahöhe von 85 cm (Mais) gewählt. Eine Pflanzendarstellung von ca. 12 Pixel pro mm² war für die später in der Bildauswertung vorgenommene Konturextraktion ausreichend.

Eine **Geokodierung** der Bilder erfolgt über einen am Trägerfahrzeug angebrachten GPS-Empfänger. Neben den Geokoordinaten des Bildes der mittleren Kamera werden auch die Navigationsparameter Fahrtrichtung, Zeitpunkt der Überfahrt, Fahrgeschwindigkeit sowie Parameter der Kameraeinstellung in einer Datei abgespeichert. Aus diesen Daten erfolgen am Ende der Überfahrt die Berechnung der Navigationsparameter und der GPS-Route sowie deren graphische Ausgabe für den ganzen Schlag (Abbildung 3.6). Eine Korrektur der Navigationsroute wurde über einen Kalman-Filter automatisch durchgeführt.

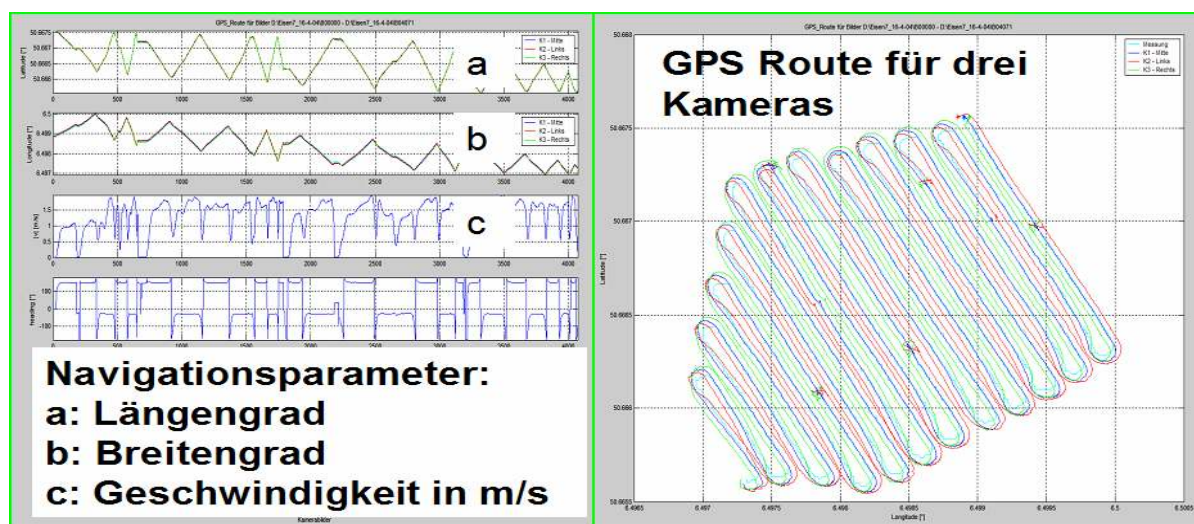


Abb. 3.6: Graphische Darstellung der Navigationsparameter (links) und der GPS-Route (rechts) auf dem Schlag Eisenmustal (Braugerste)

3.4 Ergebnisse

Durch Spektraluntersuchungen von Pflanzen, Mulch, Stroh, Steinen und unterschiedlichen Bodentypen mit einem Videospektrometer (Abbildung 3.7) wurde gezeigt, dass der Boden als Bildhintergrund im betrachteten Spektralbereich ein gleichmäßiges, aber bodenabhängig unterschiedlich helles Spektrum liefert (GERHARDS und OEBEL 2006).

Durch die Differenzbildung von zwei gleichzeitig aufgenommenen Bildern war eine wirkungsvolle Kompensierung von hell reflektierenden Böden möglich. Zugleich wurde die Darstellung von Steinen, Stroh und Mulch durch die Überlagerung der zwei Spektralkanäle im Differenzbild unterdrückt (Abbildung 3.8). Der Einsatz eines Elektronikboards zur pixelweisen Bildverschiebung und Bildüberlagerung im Kamerakopf erlaubte es, verschiedene Funktionen (IR, VIS, IR-VIS, IR-2*VIS, (IR-VIS)*2) zur Verknüpfung der beiden Basiskanäle IR und VIS auszuwählen. Der Vorteil dieser Lösung bestand darin, dass keine Rechnerzeit für die Bildtransformation und Bildüberlagerung benötigt wurde. Im Praxiseinsatz wurde vorwiegend die Funktion IR-VIS eingesetzt. Testreihen mit anderen Einstellungen verbesserten die Bildqualität nur sehr geringfügig. Korrekturen an der Blendeneinstellung des Objektivs sowie an der Schärfeneinstellung verbesserten insbesondere Aufnahmen von Unkräutern im Keimblattstadium.

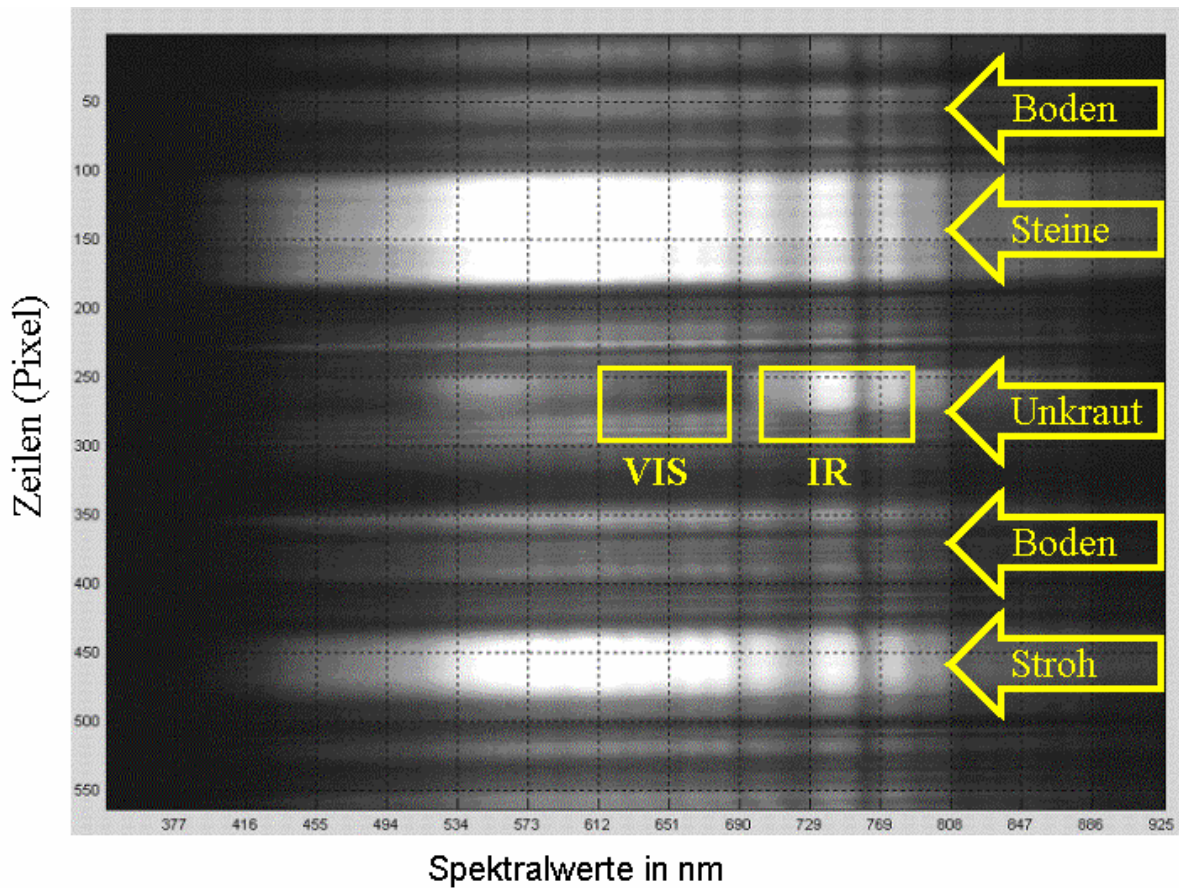


Abb. 3.7: Videospektrometeruntersuchungen von Boden, Steinen, Mulch und Pflanzen (verändert nach GERHARDS und OEBEL 2006)

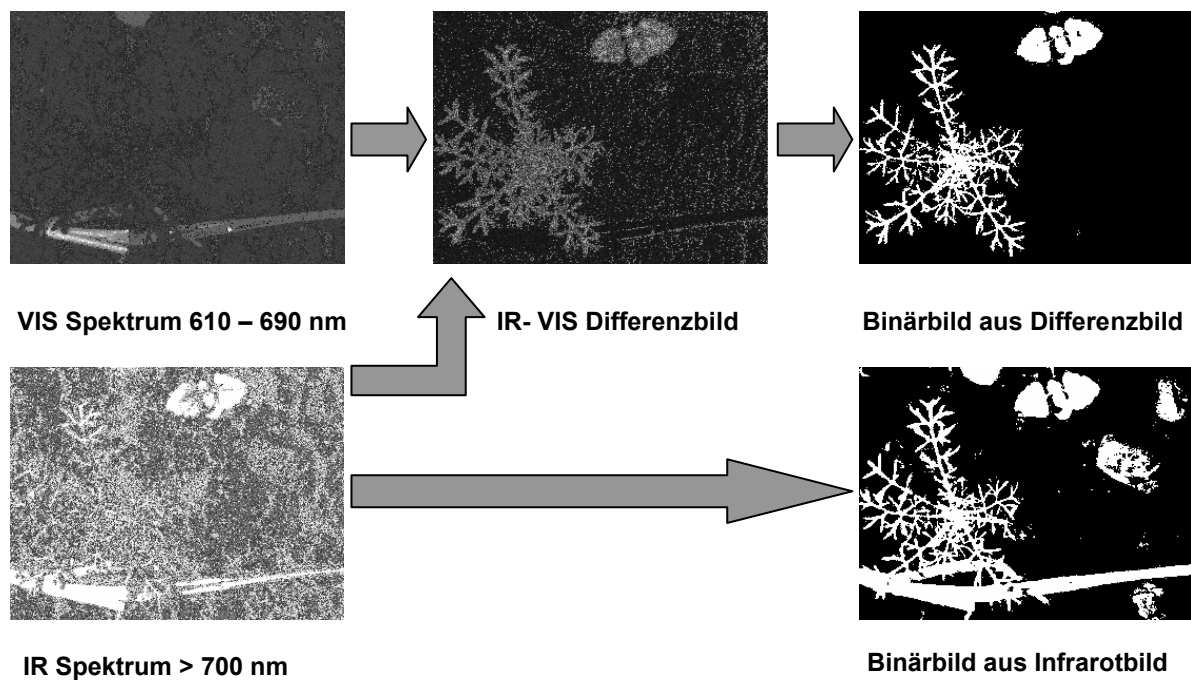


Abb. 3.8: Beispiel für die Bildverbesserung durch die Verwendung einer Bispektralkamera
 1. Spalte: Bilder der beiden Kameraköpfe, 2. Spalte: berechnetes Differenzbild, 3. Spalte: Binärbild aus Differenzbild und aus Infrarotbild

Durch eine an die Aufnahmebedingungen angepasste, automatische Shutterregelung konnten auch bei hohen Fahrgeschwindigkeiten sehr gute, kontrastreiche Grauwertbilder aufgenommen werden (OEBEL *et al.* 2004). Bei stark wechselnden Lichtverhältnissen, hervorgerufen durch eine schnelle Änderung der Sonneneinstrahlung oder den Schattenwurf des Trägerfahrzeuges beim Richtungswechsel, musste die Fahrgeschwindigkeit reduziert werden, da der Zeitaufwand für die softwaregesteuerte Einstellung des Shutters von der Leistung des eingesetzten PCs abhängig ist und teilweise mehrere Sekunden benötigte.

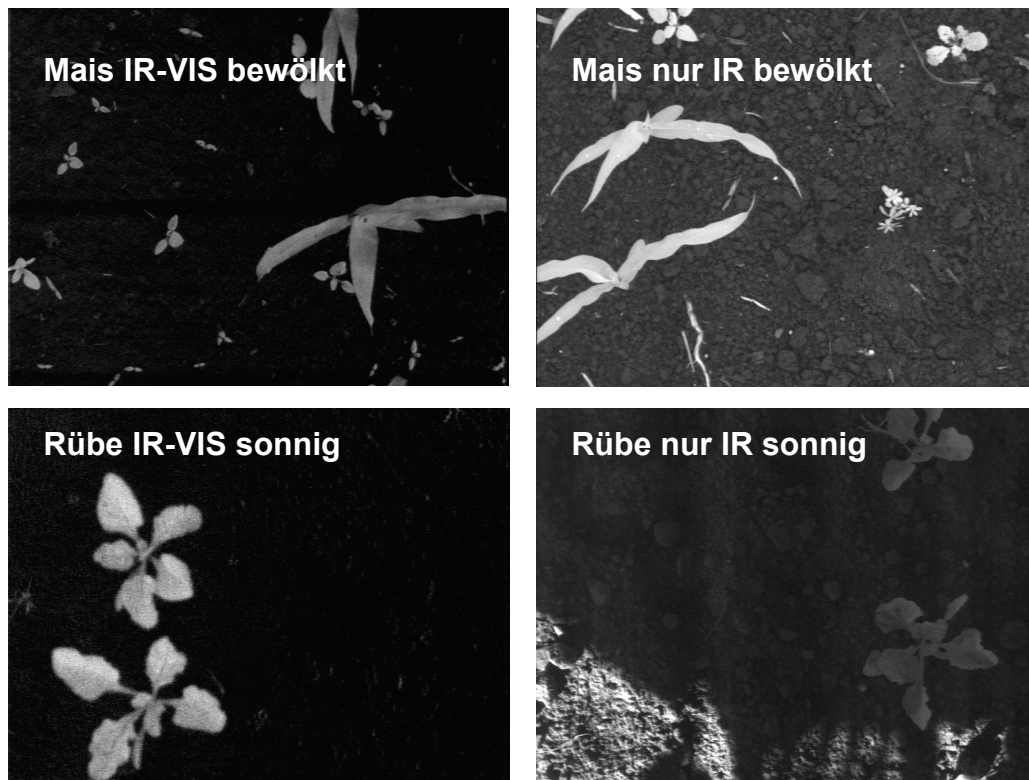


Abb. 3.9: Bispektralbilder (links) und Infrarotbilder (rechts) bei Bewölkung (oben) und direkter Sonneneinstrahlung (unten)

Dennoch zeigte sich auch hier die Überlegenheit der Bispektralkamera gegenüber einer monospektralen Infrarotkamera. Abbildung 3.9 verdeutlicht beispielhaft die Qualität von Bispektralaufnahmen und Infrarotbildern bei unterschiedlichen natürlichen Beleuchtungsverhältnissen. Bei suboptimalen Aufnahmebedingungen (direkter, gerichteter Lichteinfall mit Schattenbildung) kann durch die softwaregesteuerte Regelung des Shutters bei den Bispektralbildern eine wirkungsvolle Unterdrückung von hell reflektierenden Böden erzielt werden, während bei den Infrarotbildern nur eine geringe Kontrastbildung zwischen Boden und Pflanze erzielt wurde. Bispektralbilder erzeugen auch bei voller Sonneneinstrahlung ausreichende Kontraste für eine anschließende Binarisierung und Segmentierung von Boden und Pflanze. Neben einer schnelleren Softwaresteuerung des Shutters kann auch der Einsatz einer künstlichen Lichtquelle das Problem schnell wechselnder Lichtverhältnisse bei

Freilandaufnahmen lösen. Somit wären auch Bildaufnahmen bei Nacht möglich. Ebenfalls erhöhte sich die Qualität der Grauwertbilder, wenn Pflanzen im Bildausschnitt abgebildet wurden. Der geringe Bildausschnitt hatte zur Folge, dass viele Pflanzen am Bildrand abgeschnitten wurden und die Darstellung von ganzen Pflanzen bei geringer Unkrautdichte begrenzt war. Tabelle 3.2 zeigt beispielhaft die Kameraeinstellungen, die aufgenommene Bildfläche und die Boniturfläche pro Hektar ausgewählter Versuchsflächen. Durchschnittlich wurden je nach Bildausschnitt an ca. 3500 Bonitурpunkten zwischen 20 und 96 m²/ha abgebildet.

Tab. 3.2: Kameraeinstellungen, aufgenommene Bildfläche und Boniturfläche/ha von ausgewählten Versuchsflächen

Fläche Kulturpflanze	Kameraeinstellung Geschwindigkeit	Bildfläche Bilder/ha	Aufnahme m ² /ha
Schlag 8 Sommergerste	IR-VIS 6 km/h	0,020 m ² 4790	96
Eisenmus Winterraps	IR-VIS 7 km/h	0,015 m ² 1366	20
Schlag 8 Körnermais	(IR-VIS)*2 8 km/h	0,020 m ² 4087	82
Schlag 6 Zuckerrüben	IR-VIS 7 km/h	0,015 m ² 5747	86
Pützen Körnererbsen	IR-VIS 6 km/h	0,015 m ² 2095	31

Der durch die Chipauflösung bedingte geringe Bildausschnitt hatte auch Konsequenzen für die Bildaufnahme in Getreide. Damit Unkräuter und vor allem später auflaufende Ungräser im Keimblattstadium in den auf 12 cm Reihenabstand gesäten Getreidebeständen auch noch nach dem Entwicklungsstadium BBCH 13 bis 15 der Kulturpflanze ohne Überlappung und/oder Bedeckung der Getreidepflanze aufgenommen werden konnten, wurde für die Bildaufnahme eine Kameraspur eingerichtet (Bild im Anhang). Für die Aufnahme mit dem Trägerfahrzeug (Kameraabstand 3 m) wurden bei der Aussaat alle 3 m ein 36 cm (2 Saatreihen) getreidefreier Streifen hinterlassen. Dadurch wurden weitgehend überlappungsfreie Aufnahmen von Unkräutern und Ungräsern in Getreidebeständen bis zur Bestockung (BBCH 21) ermöglicht. Dies deckt sich mit den Ergebnissen von PETERSEN *et al.* (2002), die eine Reihenweite von 36 cm für die Bildaufnahme von Unkräutern in Getreidebeständen bis zum Entwicklungsstadium BBCH 22 als optimal ansehen.

Der Kameraabstand von drei Metern wurde auch in den Reihenkulturen Mais und Zuckerrüben beibehalten, so dass je nach Reihenweite nicht nur die Unkräuter zwischen den

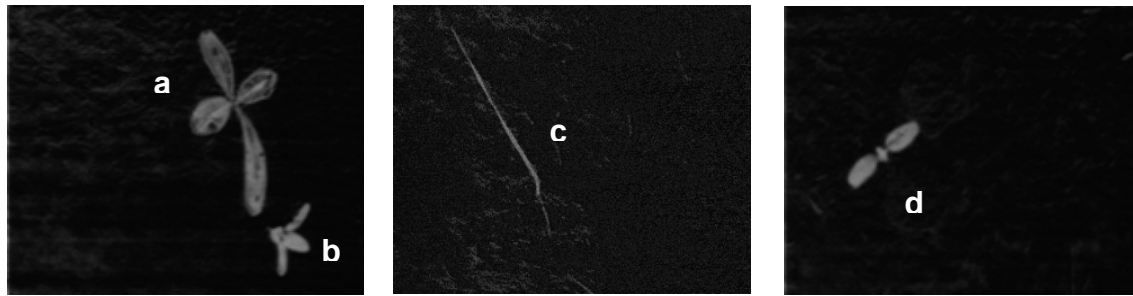
Reihen, sondern auch Kulturpflanze und Unkraut in der Reihe aufgenommen wurden. Eine Überlappung der Unkräuter durch die Kulturpflanze wurde in Kauf genommen, da die Bildaufnahmen auch dem Ausbau einer Datenbank für die wissensbasierte Erkennung von Unkräutern in den jeweiligen Kulturen dienen.

Zu Versuchszwecken aufgenommene Farbbilder mit einer Digitalkamera (2272 * 1504 Pixel) erreichten bei einem Bildausschnitt von 400 mm * 265 mm (0,1 m²) eine Pflanzendarstellung von 32 Pixel pro mm². Übertragen auf eine Bispektralkamera erlaubt es eine solche Auflösung, auch Unkräuter und Ungräser im Keimblattstadium ausreichend darzustellen. Dabei wird je nach Fahrgeschwindigkeit und Kameraabstand eine Boniturfläche von 100 m² bis 480 m² pro Hektar erfasst.

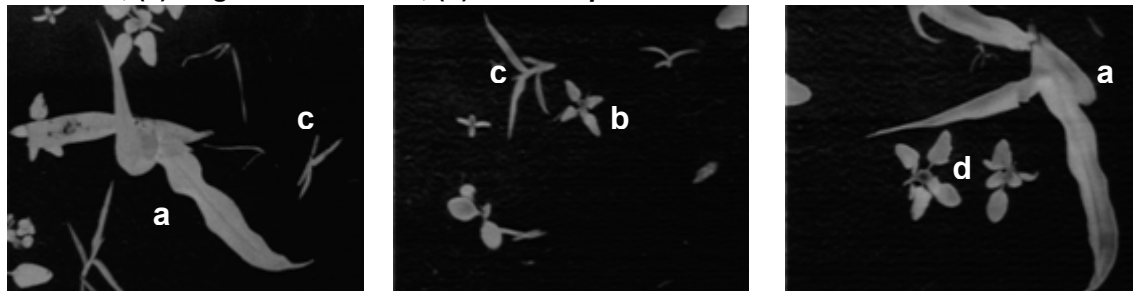
Da es sich sowohl bei dem Trägerfahrzeug als auch bei den Kameras um Prototypen handelt, welche sich in der Weiterentwicklung befinden, zeigt Tabelle 3.3 die theoretische Flächenleistung und Boniturfläche durch ein kameragesteuertes Bildaufnahmeverfahren bei unterschiedlichen Fahrgeschwindigkeiten, Bildausschnitten und Arbeitsbreiten.

Tab. 3.3: Potentielle Flächenleistung und Boniturfläche eines kameragesteuerten Bildaufnahmeverfahrens

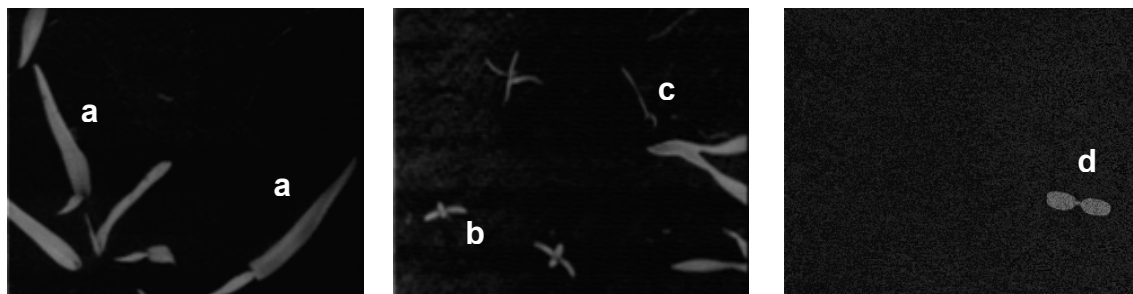
Fahrgeschwindigkeit	Flächenleistung ha/h		Boniturfläche in m ² /ha (Bildausschnitt 0,02 m ²)		Boniturfläche in m ² /ha (Bildausschnitt 0,1 m ²)	
	1	2	1	2	1	2
5 km/h	4,5	10,5	96	41	480	206
8 km/h	7,2	16,8	60	26	300	129
10 km/h	9,0	21,0	48	21	240	103
Arbeitsbreite (3 Kameras)	9 m	21 m	9 m	21 m	9 m	21 m



Aufnahmen in Zuckerrüben am 27.4.2004: (a) Kulturpflanze in BBCH 12, (b) Unkraut in BBCH 10, (c) Ungras in BBCH 10, (d) *Galium aparine* in BBCH 10



Aufnahmen in Mais am 21.5.2004: (a) Kulturpflanze in BBCH 12 bis BBCH 14, (b) Unkräuter in BBCH 10 bis BBCH 12, (c) Hirsen in BBCH 12 bis BBCH 14, (d) *Chenopodium album* in BBCH 12 bis BBCH 14



Aufnahmen in Braugerste am 18.4.2005: (a) Kulturpflanze in BBCH 10 bis BBCH 12, (b) Unkräuter in BBCH 10 bis BBCH 12, (c) Ungräser in BBCH 10 bis BBCH 12, (d) *Galium aparine* in BBCH 10

Abb. 3.10: Bispektralbilder von Unkräutern in Zuckerrüben, Mais und Braugerste.

Abbildung 3.10 zeigt Bilder von Unkräutern in verschiedenen Kulturen. Auch Unkräuter im Keimblattstadium konnten über die flexible Anpassung des Bildausschnittes kontrastreich und konturscharf wiedergegeben werden.

Die Aufnahmen mit Bispektralkameras in den verschiedenen Kulturen wurden für die wissenschaftliche Erkennung von Unkrautarten und Unkrautklassen über Formparameter (Kapitel 4) genutzt.

3.5 Diskussion

Fernerkundungsverfahren sind für die Erkennung und Kartierung von Unkrautarten nur bedingt einsetzbar. HÄUSLER und NORDMEYER (2003) vertreten die Ansicht, dass nur

Luftbilder mit einer hohen räumlichen Auflösung, die in einem kleinen Zeitfenster zu Beginn der Vegetationsperiode aufgenommen wurden, für Applikationsentscheidungen im selben Jahr verwendet werden können. Da selbst dann eine Erkennung der Unkrautarten nur bei einer Abundanz möglich ist, die weit über den in Deutschland derzeit angewendeten Schadensschwellen liegt, ist die Auswertung von Luftbildern für eine Unkrautartendifferenzierung und die Detektion von Unkrautnestern als Basis für Applikationskarten für eine teilschlagspezifische Unkrautbekämpfung nicht ausreichend.

Bei dem Verfahren der sensorgesteuerten Herbizidanwendung nach WARTENBERG und DAMMER (2002) wird die Information über die Unkrautdichte durch eine Sensorabtastung in einer Fahrspur ermittelt und dient dann zur Dosierung der Herbizidmenge über eine Breite von 18 Metern. Zur Wirkungssicherheit werden in diesem Verfahren aber auch Flächen mit Unkrautdichten unterhalb der Schadensschwellen mit 50 % der Herbiziddosis gespritzt. Es bleibt nach LEMIEUX *et al.* (2002) zu klären, ob der Unkrautdeckungsgrad als einziger Parameter Ertragsverluste hinreichend vorhersagen kann. Auch bleibt fraglich, ob die räumliche Auflösung dieses Sensors mit 18 m quer zur Fahrtrichtung ausreicht, um die Unkrautverteilung präzise zu erfassen. BACKES *et al.* (2005) zeigten über eine Computersimulation, dass die Verteilung von *Galium aparine* schon bei einer Erhöhung des Boniturrasters von 2 m * 3 m auf 7 m * 7 m nur fehlerhaft wiedergegeben wurde.

Auch wenn die Bekämpfung von Unkräutern über den Unkrautdeckungsgrad zu Herbizideinsparungen führen kann, wird das Potential einer teilschlagspezifischen Unkrautbekämpfung nicht ausgeschöpft. Eine Erkennung von Unkrautarten oder -gruppen erlaubt es, Unkräuter nur dort mit dem entsprechenden Wirkstoff zu bekämpfen, wo deren Schadensschwelle überschritten wird. Die kleinräumige, automatische Erfassung und Erkennung von Unkrautarten bleibt bislang der digitalen Bildanalyse vorbehalten. Allerdings waren Verfahren zur Aufnahme von Unkräutern in Kulturpflanzen mit Kameras entweder nicht automatisiert (YANG *et al.* 2003) oder die Qualität der unter natürlichen Lichtverhältnissen aufgenommenen Bilder führte bei der Bildanalyse zu Fehlklassifikationen (SÖKEFELD *et al.* 2000).

Durch den starken Kontrast der bispektralen Aufnahmetechnik weisen die Grauwerte der Bilder klare lokale Maxima auf. Die Analyse des Grauwertistogrammes und der darauf beruhenden automatischen Schwellwertoperation ergab, dass Pflanzen sicher von Boden, Steinen und Mulch getrennt werden können. Eine zusätzliche Verbesserung der Binärbilder ist durch verschiedene Filter möglich. Dabei können Pflanzenteile über Erosions- und Dilatationsschritte miteinander verbunden und Objekte am Bildrand wie auch Störungen über

Ecken- bzw. Konturlängenfilter automatisch entfernt werden. GERHARDS und SÖKEFELD (2001) führen aus, dass monochrome Infrarotbilder nicht für eine Segmentierung von Pflanzen und Boden, Boden und Mulch geeignet sind, da durch trockenen Boden oder wechselnde Sonneneinstrahlung keine ausreichende Kontrastbildung für eine Segmentierung gegeben ist. Daher war eine manuelle Schwellwertoperation zur Segmentierung von Pflanzen und Boden notwendig. Auch Verfahren der Segmentierung von Boden und Pflanzen über Farbbilder sind derzeit nicht für einen Praxiseinsatz geeignet. PHILIPP und RATH (2002) nutzten Farbbilder, um diese über eine Farbraumtransformation in Grauwertbilder umzuwandeln. Zur Segmentierung von Boden und Pflanze wurde eine Schwellwertoperation durchgeführt. Da für die Bildtransformation jedes Pixel im Bild untersucht und anhand von Zugehörigkeitsgraden klassifiziert werden muss, benötigte die Bildverarbeitungssoftware für die Erzeugung eines Binärbildes 10 Minuten pro Farbbild. MEYER *et al.* (2004) untersuchten verschiedene Algorithmen, um Pflanzen, dunklen Boden und Mulch über im Gewächshaus aufgenommene Farbbilder zu segmentieren. Kein Bildverarbeitungsalgorithmus führte zu einer zufriedenstellenden Trennung von allen im Bild abgebildeten Objekten. Die Variabilität der Bodentypen und Bodenverhältnisse (feucht/trocken, verschiedene Mulcharten, Steine) sowie wechselnde Lichtverhältnisse im Freiland machten es schwer, einen für die Bildverarbeitung von Farbbildern geeigneten Algorithmus zu finden.

Mit der Entwicklung von Bispektralkameras konnte eine praxistaugliche Lösung realisiert werden, die es erlaubt, auch bei hohen Fahrgeschwindigkeiten digitale Bilder von Boden und Pflanzen aufzunehmen. Die kontrastreichen Grauwertbilder waren weitgehend frei von Störungen. Steine, Mulch und Stroh wurden durch die verwendete Aufnahmetechnik in den Bildern nicht abgebildet. Selbst bei Fahrgeschwindigkeiten von bis zu 10 km/h konnten durch die automatische Shuttersteuerung konturscharfe Grauwertbilder von Pflanzen aufgenommen werden.

Für die vorliegende Untersuchung wurde ein Kameraabstand von 3 Metern entsprechend der Teilbreite der später eingesetzten Pflanzenschutzspritze gewählt. Das damit erzielte Boniturraster von 3 m * 1 m bei ca. 3500 Boniturrasterpunkten/Hektar war auch für die Aufnahme von Problemunkräutern mit einer niedrigen Schadensschwelle wie für *Galium aparine*, *Chenopodium album* L. oder *Cirsium arvense* ausreichend. Da die Anzahl der eingesetzten Kameras in der Praxis wesentlich vom Preis abhängt, bleibt zu klären, inwieweit diese Problemunkräuter auch noch mit einem weiteren Kameraabstand zuverlässig aufgenommen werden können. Bisherige Arbeiten zur teilschlagspezifischen Unkrautbekämpfung über Applikationskarten wurden in sehr unterschiedlichen Boniturrastern durchgeführt. GERHARDS

et al. (2000) nutzten ein Raster von 15 m * 7,5 m und erzielten in einem sechsjährigen Experiment einen hohen Bekämpfungserfolg und hohe Herbizideinsparungen bei der teilschlagspezifischen Herbizidapplikation von Unkrautnestern. NORDMEYER und HÄUSLER (2000) bonitierten die Leitunkräuter in einem Raster von 25 m * 36 m. Das Auftreten von *Galium aparine* wurde jedoch zusätzlich auf einer Fläche von 4 bis 6 m² im direkten Umgebungsbereich des Rasterpunktes beobachtet.

Eine Weiterentwicklung der bispektralen Kameratechnik sollte eine größere Dynamik der automatischen Kameraregelung und eine höhere Pixelauflösung zur präziseren Blattformerkenung realisieren. Eine größere Dynamik der automatischen Kameraregelung bei schnell wechselnden Lichtverhältnissen und/oder eine künstliche Beleuchtung erlauben zukünftig auch Aufnahmen mit noch höheren Fahrgeschwindigkeiten. Eine synchron mit der Kamerasteuerung verbundene künstliche Beleuchtung über Blitzlicht würde dabei einen Einsatz des Bildaufnahmesystems bei Nacht ermöglichen. Damit würde die Schlagkraft dieses Systems für den Einsatz im Lohnunternehmen für die Erstellung von Applikationskarten wesentlich erhöht. Im Hinblick auf einen wartungsfreien Betrieb ist die Fertigung einer bispektralen Einkameratechnik ohne justierbare Optomechanik zu bevorzugen.

Die Auflösung der Kameras war für den Einsatz im Offline-Verfahren ausreichend. Mit einem Bildausschnitt von 0,014 m²/Bild konnten auch Unkräuter im Keimlingsstadium hinreichend dargestellt werden. Durch den kleinen Bildausschnitt wird jedoch die genaue Erfassung von Unkräutern in geringer Dichte problematisch, da viele Pflanzen am Bildrand nur unvollständig dargestellt werden. Diese werden bei der späteren Bildauswertung nicht berücksichtigt. Eine höhere Kameraauflösung kann zu einer präziseren Blattformerkenung insbesondere bei der Darstellung von Gräsern im Keimblattstadium führen. Im Online-Verfahren würde eine höhere Pixelauflösung in Verbindung mit einem größeren Bildausschnitt zu einer präziseren Aufnahme von Unkräutern führen und die Boniturfläche pro Hektar erheblich erhöhen. Inwieweit hochauflösendere Bilder zu einer Verminderung der Leistungsfähigkeit (Speichervolumen, Bildaufnahmefrequenzen) des Aufnahmesystems führen, bleibt noch zu klären. Im Praxiseinsatz in Reihenkulturen wie Mais und Zuckerrüben ist eine Aufnahme zwischen den Reihen zu bevorzugen, um eine Überlappung von Unkräutern durch die Kulturpflanzen zu vermeiden. Für die Aufnahme von Unkräutern in bestockten Getreidebeständen, insbesondere von später auflaufenden Gräsern, sollte wegen des engen Reihenabstandes eine Kameraspur von 30 bis 40 cm freigelassen werden. Dadurch wird die Aufnahme von Unkräutern, die sonst während des Wachstums der Getreidepflanzen bedeckt werden, verbessert (PETERSEN *et al.* 2002). Diese kulturtechnische Veränderung im

Getreideanbau muss in der Praxis allerdings auch vom Landwirt akzeptiert werden. In diesem Zusammenhang wären zusätzliche Untersuchungen zu möglichen Ertragsverlusten dieser Maßnahme hilfreich.

Im Online-Verfahren könnten die Kameras im Frontanbau des Schleppers bzw. vor den Teilbreiten der Pflanzenschutzspritze (Abbildung 3.11) angebracht werden. Ob dieser Systemaufbau realisierbar ist, hängt von der Auswertungsgeschwindigkeit sowie Anwendungssicherheit des Bildverarbeitungssystems und von den Reaktionszeiten der eingesetzten Pflanzenschutzspritze ab (SÖKEFELD *et al.* 2004).

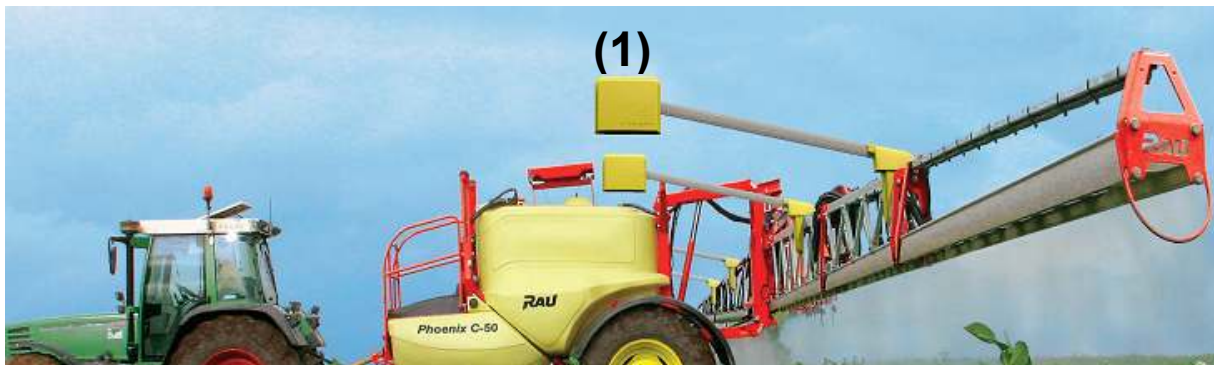


Abb. 3.11: Möglicher Systemaufbau für die Anbringung von Bispektralkameras (1) im Online-Verfahren (Bildquelle: AgriCon/Kverneland)

4 Automatische Klassifizierung von Unkrautarten

4.1 Stand des Wissens

Mustererkennungsprozesse mit Hilfe der digitalen Bildanalyse sind heute fester Bestandteil der industriellen Produktfertigung und -kontrolle. Schnelle Prozessoren und Fortschritte in der Bildverarbeitungssoftware ermöglichen die Erfassung, Segmentierung und Klassifikation von Objekten innerhalb von Millisekunden. Auch komplexe Bildverarbeitungsverfahren können inzwischen mit einem normalen PC realisiert werden.

In Bildverarbeitungsverfahren zur Pflanzenerkennung werden verschiedene Bildtypen, Techniken zur Segmentierung von Boden und Pflanze und Entscheidungsmodelle zur Differenzierung von Pflanzenarten verwendet. Abbildung 4.1 zeigt Beispiele für die Möglichkeiten der Erfassung, Segmentierung und Klassifizierung von Pflanzenarten.

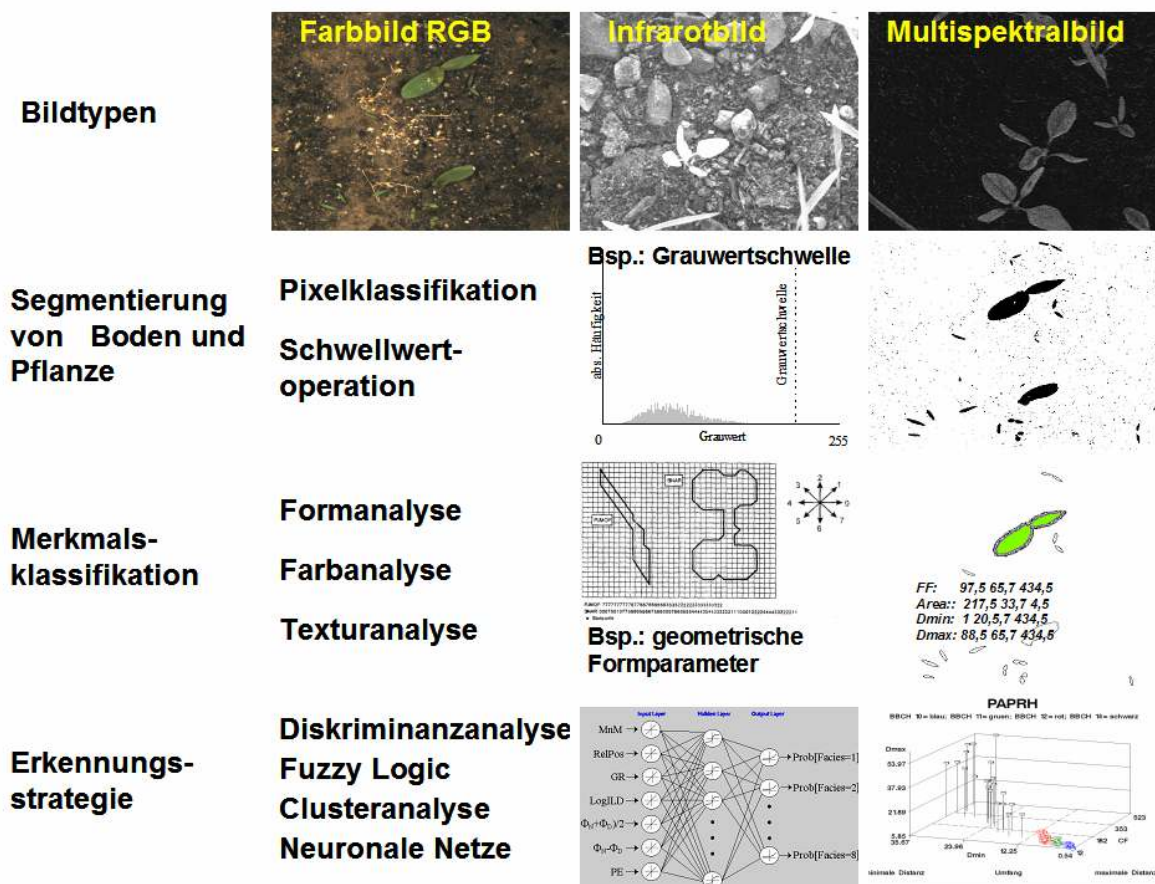


Abb. 4.1: Möglichkeiten der Erfassung, Segmentierung und Klassifizierung von Pflanzenarten in der digitalen Bildverarbeitung

KÜHBAUCH (1985) beschreibt schon früh den Nutzen der quantitativen Bildanalyse für die Landwirtschaft. Mit der digitalen Bildanalyse werden Form-, Farb- oder Texturmerkmale zur Differenzierung von Unkrautarten extrahiert. Zur Formanalyse von Unkrautarten wurden Farb- und Grauwertbilder verwendet.

PETRY und KÜHBAUCH (1989) erstellten Binärbilder von Unkräutern aus Farbdias, um die Differenzierung von Unkrautarten über Formparameter zu untersuchen. Sechs Unkrautarten wurden über die Formmerkmale Fläche, Umfang, minimaler und maximaler Durchmesser sowie durch Quotientenbildung der Formparameter über deren Transformation in dimensionslose, kanonische Variablen untersucht. Dadurch wurde eine Wiedererkennungsrate von 82 % erreicht.

WOEBBEKE *et al.* (1995b) digitalisierten Farbdias von drei monokotylen und neun dikotylen Pflanzenarten mit einer Auflösung von 2 bis 20 Pixel pro mm. Eine Segmentierung von Boden und Pflanzen wurde durch eine Grauwertschwellenoperation erreicht. Fünf geometrische Formparameter wurden in verschiedenen Entwicklungsstadien (BBCH 10 bis BBCH 19) der Pflanzen ermittelt und über eine Varianzanalyse verglichen. Dabei wurde festgestellt, dass keiner der Formparameter über die gesamte morphologische Entwicklung eine Differenzierung gewährleisten kann. SÖKEFELD (1997) untersuchte 22 Unkrautarten in Zuckerrüben im Keim- und Laubblattstadium anhand geometrischer Formmerkmale und Konturparameter über Fourieranalyse. Boden und Pflanze wurden bei den verwendeten Infrarotbildern durch eine Schwellwertoperation anhand der Grauwertverteilung segmentiert. Ein wissenschaftlicher Vergleich wurde mit den statistischen Verfahren der Fuzzy Logic und einer Zuordnung nach dem Prinzip der minimalen Distanz durchgeführt. Die Erkennungsrate für Unkrautarten variierte je nach gewählter Erkennungsstrategie und ausgewähltem Entwicklungsstadium der Unkräuter zwischen 69 % und 75 %. Wurden die Arten anhand ihrer Herbizidempfindlichkeit in Gruppen eingeteilt, konnte das Klassifikationsergebnis auf 80 % gesteigert werden.

TANG *et al.* (1999) nutzten eine texturbasierte Klassifikationsmethode für eine Differenzierung von mono- und dikotylen Unkräutern. Je 40 Farbbilder wurden von 3 dikotylen Unkräutern und 2 monokotylen Unkräutern mit einer digitalen Videokamera (Auflösung 640 * 480 Pixel) und einer Bildfläche von 1,1 m * 0,8 m aufgenommen. Nach Segmentierung von Boden und Pflanzen wurden die Konturen der Unkräuter extrahiert und die Daten abgespeichert. Mit den Datensätzen von je 20 Bildern wurde ein künstliches neuronales Netz trainiert. Das Überprüfen mit neuen Datensätzen ergab eine korrekte Klassifizierung von 100 %.

HEMMING und RATH (2001) nutzten 8 Formparameter und 3 Farbparameter des HSI (*Hue, Saturation, Intensity*) Farbraumes für die Identifikation von Kohl- und Karottenpflanzen unter Freilandbedingungen. Über eine Fuzzy Logic Klassifikation gelang ihnen eine Wiedererkennungsrates von 69 % (Karotten) bis 87 % (Kohl) in verschiedenen Entwicklungsstadien. Alle übrigen Pflanzen wurden als Unkräuter klassifiziert. CHAPRON *et al.* (2002) analysierten hochaufgelöste Farbbilder und nutzen die Farbunterschiede zur Extraktion von Boden und Pflanzen. Dem Problem von überlappenden Konturen begegneten sie durch eine Skelettierung der Blätter aller im Bild erscheinender Pflanzen. Durch Messung der Distanz des äußeren Blattrandes zur Mittelrippe konnten über einen Schwellenwert Überlappungen aufgelöst und somit zwischen Gräsern mit meist länglichen Blättern und dikotylen Pflanzen mit häufig rundlichen Blättern auch bei einer Überlappung unterschieden werden.

PHILIPP und RATH (2002) beschreiben die Möglichkeiten der Trennung von Boden und Pflanze über verschiedene Verfahren. Dabei wurden 50 Farbbilder (Auflösung 2048 * 1536 Pixel) in Zuckerrüben unter natürlichen Lichtverhältnissen aufgenommen. Die Bilder lagen als 3-Kanal Bilder im Rot-Grün-Blau (RGB) Farbraum als Bitmap Datei vor. Für die Binarisierung der Bilder wurden die RGB-Werte transformiert und danach Boden und Pflanze über manuelle oder automatisierte Schwellwertverfahren (HEMMING 2000) anhand der Verteilung der Farbwerte segmentiert. Nach der Binarisierung konnten über Konturlängenfilter Fehlklassifizierungen aus dem Bild entfernt werden. Das beste Ergebnis wurde über ein Verfahren der Farbraumtransformation und Binarisierung durch lineare und logarithmische Diskriminanzfunktionen erzielt. Dabei wurde im Vergleich mit den Daten eines Trainingssets die Zugehörigkeitswahrscheinlichkeit eines jeden Pixels zu der Gruppe Boden oder Pflanze untersucht. Die Ergebnisse wurden automatisch in ein Binärbild umgewandelt. Vorteil dieser Methode war die direkte Konvertierung eines Farbbildes in ein Binärbild und die geringen Fehlklassifikationen von nur 2 %. Allerdings wurden am PC (350 MHz) für die Berechnung der Zugehörigkeitsgrade pro Pixel 10 Minuten pro Bild benötigt.

Mit einer Multispektralkamera (Grün-Rot-NIR) nahmen NAGY *et al.* (2004) 43 Bilder (Bildausschnitt 2 * 2 m) in einem Weizenstoppelfeld auf. Durch getrennte Analyse der verschiedenen Farbkanäle und Bildung von Vegetationsindizes wurde so der Unkrautdeckungsgrad gemessen. Der Vergleich mit einer visuellen Schätzung des Unkrautdeckungsgrades ergab hohe Korrelationen mit den ermittelten Werten aus der bildanalytischen Erfassung.

MEYER *et al.* 2004 untersuchten anhand von Farbbildern (Auflösung 1280 * 960 Pixel) verschiedene Bildverarbeitungsalgorithmen für eine Segmentierung von Pflanzen (*Helianthus pumilus* L., *Abutilon theophrasti* Medik., *Amaranthus retroflexus* L. und *Glycine max* (L.) Merrill und Boden sowie von Pflanzen und Boden mit Mulch (Weizenstroh, Maisstängel). Nur ein Algorithmus, basierend auf einer Clusterbildung von Pixel, ergab zufriedenstellende Ergebnisse, wenn grüne Pflanzen in mehr als 10 % der Bildfläche abgebildet waren.

YANG *et al.* 2003 nahmen unter natürlichen Lichtverhältnissen Farbbilder (Auflösung 512 * 768 Pixel) von Unkräutern in den Zwischenreihen eines 11,7 ha großen Maisfeldes auf. Insgesamt 242 Bilder mit einer aufgenommenen Fläche von 0,7 m² pro Bild wurden ausgewertet. Für eine Segmentierung von Boden und Unkräutern wurde die Intensität der drei Grundfarben Rot-Grün-Blau jedes Pixels miteinander verglichen. War die Intensität von Grün größer als Rot und Blau zusammen, wurde der Pixel als Teil eines Unkrautes klassifiziert. Über die Anzahl der *grünen* Pixel wurde auf den Unkrautdeckungsgrad geschlossen. Aus diesen Ergebnissen wurden dann Applikationskarten für eine teilschlagspezifische Unkrautbekämpfung generiert.

PHILIPP *et al.* (2002) werteten Farbbilder (Auflösung 2048 * 1536) aus, die im Raster von 25 m * 36 m in Zuckerrüben (BBCH 12) aufgenommen wurden. Die Trennung von Pflanzenobjekten und Hintergrund wurde durch eine Farbraumtransformation (RGB in i1i2i3-Farbraum) erreicht. Die Binärbilder wurden bildanalytisch aufgearbeitet und geometrische Formparameter der Pflanzenregionen berechnet. Zur Unterscheidung von mono- und dikotylen Pflanzenregionen wurden die Parameter Rundheit, Kreisförmigkeit, Konvexität, Kompaktheit sowie geometrische Momente als Differenzierungsparameter in einer Gleichung verbunden. Da der Unterschied zwischen mono- und dikotylen Pflanzenregionen signifikant war, wurde ein Schwellwert berechnet, anhand dessen die Pflanzenregionen von neuen Bildern klassifiziert wurden. Dabei wurde eine korrekte Klassifikation von mono- und dikotylen Pflanzen von 77 % erzielt.

4.2 Ziele

Untersuchungen zur Unkrauterkenntnis beziehen sich meist auf die Differenzierung von mono- und dikotylen Unkräutern oder auf die Erkennung von einigen wenigen Arten im gleichen Entwicklungsstadium in einem Kulturpflanzenbestand. Neben einer automatisierten Bildaufnahme sind auch eine effektive, automatisierte Bildauswertung zur Trennung von

Pflanze und Boden sowie eine korrekte Klassifikation von Kulturpflanze und Unkrautarten oder –klassen Voraussetzung für den Einsatz von Bildverarbeitungsverfahren in der Unkrautbekämpfung. Mit den so gewonnenen Daten können dann zeitnah Applikationskarten (Offline) generiert werden oder die Daten werden zur direkten Ansteuerung einer Pflanzenschutzspritze (Online) in der teilschlagspezifischen Unkrautbekämpfung genutzt.

Im folgenden Kapitel werden daher die Differenzierungsmöglichkeiten über Formparameter von Unkrautarten in verschiedenen Entwicklungsstadien untersucht. Zusätzlich zu den Bispektralbildern wurden Bilder von 45 Unkrautarten in Mais, Zuckerrüben und Getreide aufgenommen. Diese erlaubten den Aufbau von Datenbanken mit den Formparametern einzelner Unkrautarten und deren Differenzierung mit Hilfe der Diskriminanzanalyse. Dabei wird diese als ein multivariates Verfahren zur Analyse von Gruppenunterschieden (BACKHAUS *et al.* 2003) verwendet, um die Unterschiedlichkeit von mehreren Gruppen (Unkrautarten oder –klassen) hinsichtlich einer Mehrzahl von Variablen zu untersuchen. Im vorliegenden Fall sollen dabei die Fragen beantwortet werden:

- ❖ ob sich die Formparameter (Variablen) von Unkrautarten oder Unkrautklassen (Gruppen) signifikant voneinander unterscheiden
- ❖ welche Bedeutung die untersuchten Formparameter für die Unterscheidung haben
- ❖ in welche Gruppe ein neues Objekt (Unkrautart oder –klasse) aufgrund seiner Merkmalsausprägung eingruppiert werden kann.

Das für die Segmentierung von Boden und Pflanzen sowie für die Merkmalsextraktion und Klassifizierung anhand von Formparametern benutzte Bildverarbeitungssystem wird beschrieben und im Zusammenhang mit einer Online-Auswertung der in Kapitel 3 beschriebenen Bildaufnahmen mit Bispektralkameras auf Praxisschlägen untersucht. Die Ergebnisse verschiedener Klassifikationsverfahren werden im Hinblick auf einen Praxiseinsatz des Bildverarbeitungssystems im Offline- und Online-Verfahren diskutiert.

4.3 Material und Methoden

Im Gewächshaus wurden 45 Unkrautarten und 6 Kulturpflanzen in Pflanzschalen an zwei Terminen (November 2003 und April 2004) in je 2 Schalen pro Art angezogen. Die Liste der verwendeten Arten mit deutschem und lateinischem Namen sowie ihrem EPPO Code befindet sich im Anhang. Die Pflanzen wurden während des Wachstums fortlaufend pikiert.

Vom frühen Keimblattstadium (BBCH 10) bis zum 4 bis 6-Blattstadium (BBCH 14) wurden von allen Pflanzenarten regelmäßig Aufnahmen mit einer CCD-Shutter Kamera (Auflösung 1024 * 1024 Pixel) gemacht. Vor die Optik der Kamera wurde ein Filter gesetzt, der Licht unterhalb von 760 nm absperrt. Hierdurch wurde für die Aufnahme ein Spektralbereich zwischen 760 und 950 nm verwendet; in diesem Spektralbereich ist die Reflexion von grünem Pflanzenmaterial wesentlich größer als die des Bodens. Bei einer Aufnahmefläche von 14 cm * 14 cm pro Bild wurde so 1 mm² durch 53 Pixel dargestellt und übertraf damit die Auflösung der Bispektralbilder (Abbildung 4.2).

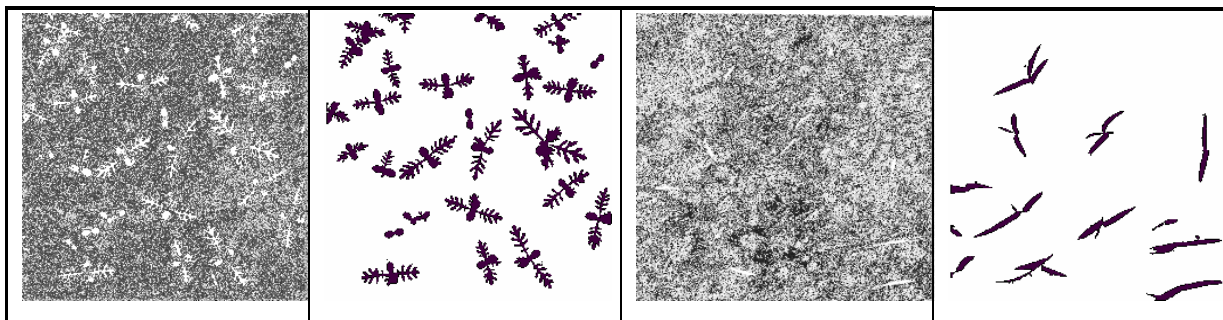


Abb. 4.2: Infrarotbild und Konturbild von *Anthemis arvensis* (ANTAR) und *Echinochloa crus-galli* (ECHCG)

Die Bildauswertung wurde mit einer wissensbasierten Mustererkennungssoftware (IMPAS-AGRI) durchgeführt. Die Softwareauswertung ist in mehrere Verarbeitungsschritte unterteilt. Eine **Kalibrierung** der Software muss vor der Auswertung durchgeführt werden, da je nach Höheneinstellung der Kameras die abgebildete Bildfläche variiert und für eine Auswertung die Fläche und der Umfang der Pflanzen exakt ermittelt werden müssen.

Bei der **Binarisierung** des Grauwertbildes wird durch eine einfache Schwellwertoperation das Minimum zwischen den beiden Grauwertmaxima eines bimodalen Histogramms zur Segmentierung von Pflanze und Bildhintergrund (Boden) verwendet. In diesem Schritt können über einfache Dilatations- und Erosionsschritte einzelne Blätter, die nicht zusammengefügt sind, im Binärbild verbunden werden (Abbildung 4.3).

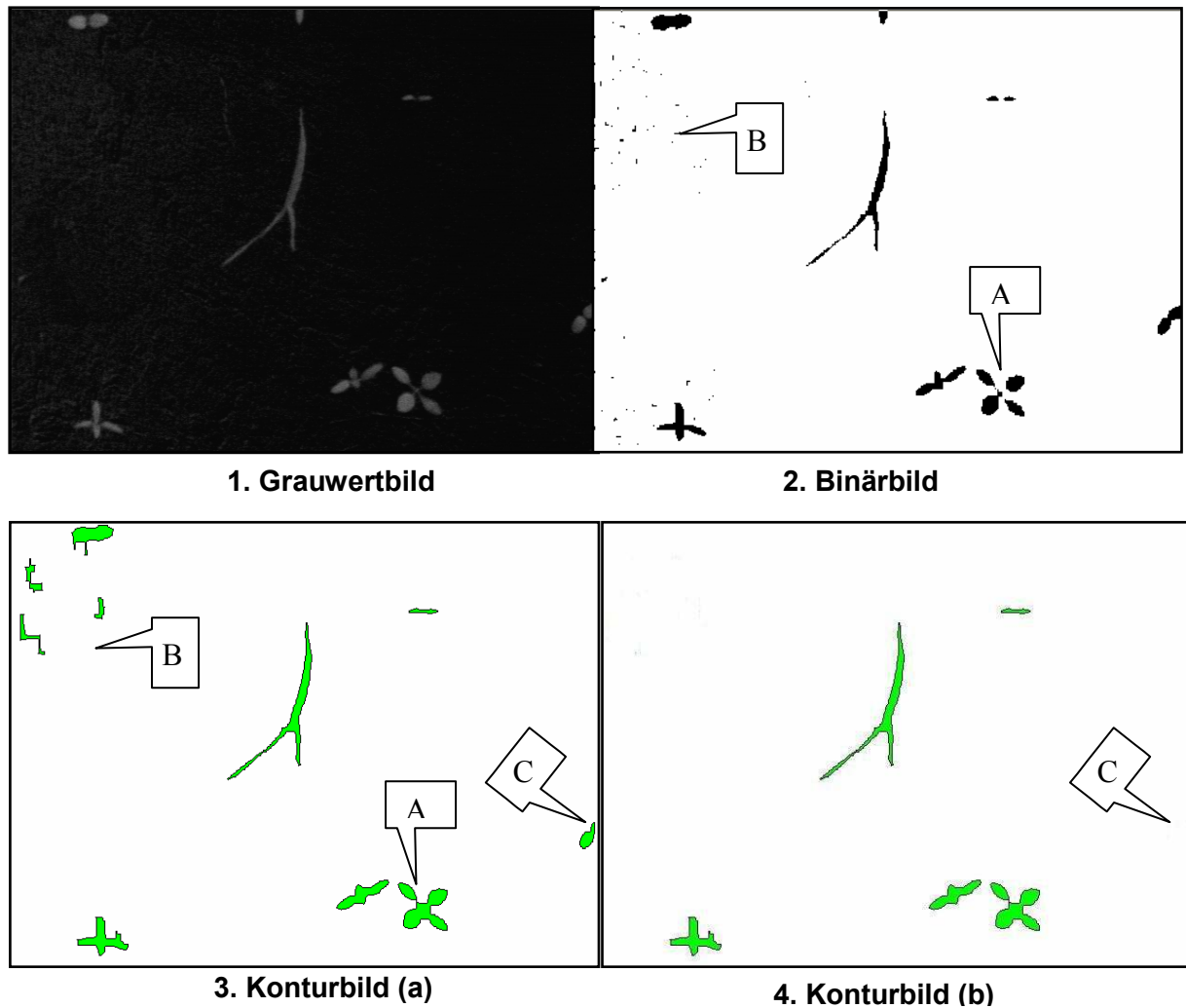


Abb. 4.3: Bildverbesserungen der Grauwert-, Binär- sowie Konturbilder durch Erosions- und Dilatationschritte (A), Konturlängen- und Kantenfilter (B) sowie Eckenfilter (C)

Im Weiteren kann eine Verbesserung des Binärbildes durch eine Veränderung der Grauwertschwelle sowie durch Filterung von Objekten, deren Konturlänge kleiner oder größer als die der abgebildeten Pflanzen ist, erreicht werden. Ebenso ist eine Filterung von Objekten möglich, die durch den Bildrand abgeschnitten werden.

Das Verfahren der **Konturextraktion** wird bei SÖKEFELD und GERHARDS (2004) detailliert beschrieben. Hierbei wird der äußere Konturverlauf der Pflanze über einen Kettencode als Winkelfunktion dargestellt. Die normierte Winkelfunktion wird einer Fourierreihenentwicklung unterworfen, bei der die Amplitudenwerte der Sinus- und Kosinusfunktionen durch sogenannte Fourierdeskriptoren beschrieben werden. Der Konturverlauf der Pflanze wird somit größen- und lageinvariant beschrieben. Neben 20 Fourierdeskriptoren (FD 1 bis FD 20) wurden auch geometrische Pflanzenparameter berechnet. Von den Musterpflanzen jeder Art ($n \geq 20$) wurden die **Formparameter** (Abbildung 4.4) Fläche (A = Area), der Formfaktor (FF = Verhältnis Umfang zur Fläche), die minimale Kantenlänge ($D_{min} =$

minimale Kantenlänge des kleinsten Rechtecks), die maximale Kantenlänge (D_{\max} = maximale Kantenlänge des größten Rechtecks), die Spannweite (SPW = Verhältnis minimaler zur maximaler Kantenlänge) und der Umfang (CF = Circumference) berechnet und in einer Datenbank (Wissensbasis) gespeichert.

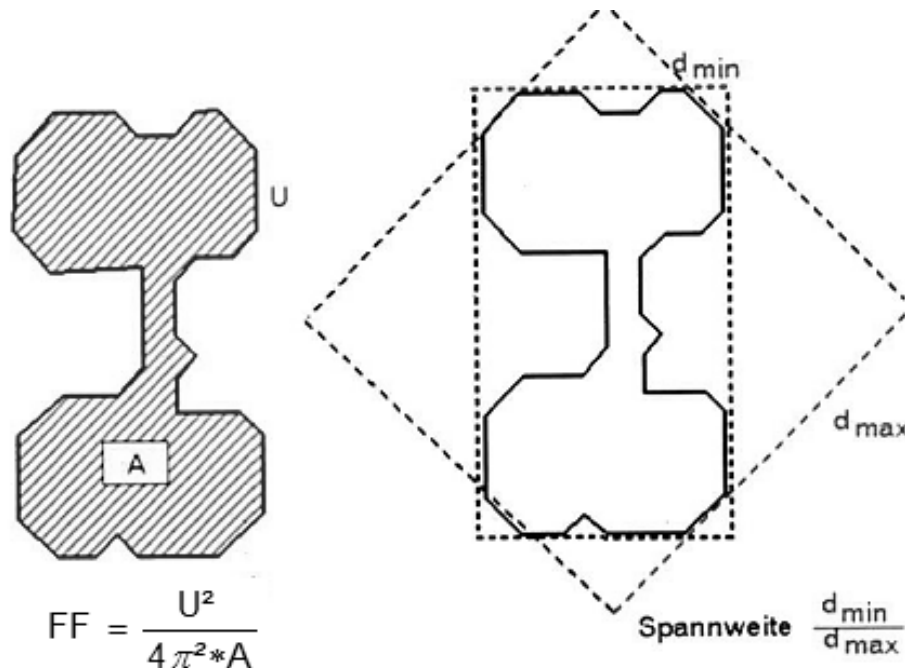


Abb. 4.4: Funktionsprinzip der Berechnung des Formfaktors und der Spannweite (verändert nach SÖKEFELD 1997)

Für die Auswertung mit der Statistiksoftware SPSS wurden jeweils eine Datenbank von Unkrautarten in Getreide (Braugerste), Mais und Zuckerrüben für das *Keimblattstadium* (BBCH 10) und als *Mischverunkrautung* mit den Entwicklungsstadien BBCH 10, BBCH 11 und BBCH 12 untersucht. In die Datenbank *Mischverunkrautung* wurden dabei zusätzliche Arten aufgenommen. Die Ergebnisse mit einer Datenbank *Mischverunkrautung* bis zum Entwicklungsstadium BBCH 14 werden nur zusammenfassend dargestellt.

Für die Datenbanken zur Auswertung der Bispektralbilder wurden Formmerkmale von Pflanzen in Unkrautklassen gruppiert. Dabei wurden neben der Klasse *Kulturpflanze* drei weitere Unkrautklassen gebildet. Eine differenzierte Aufnahme von Pflanzen einer Unkrautklasse entsprechend ihres Entwicklungsstadiums erlaubte eine flexible Anpassung der Wissensbasis an die auf dem Feld vorgefundene Variation von Unkrautarten und ihrer Entwicklungsstadien. Abbildung 4.5 und Abbildung 4.6 zeigen Beispielbilder von Pflanzenkonturen, die in die Wissensbasen für die Auswertung von Bispektralbildern in Mais und Braugerste aufgenommen wurden.

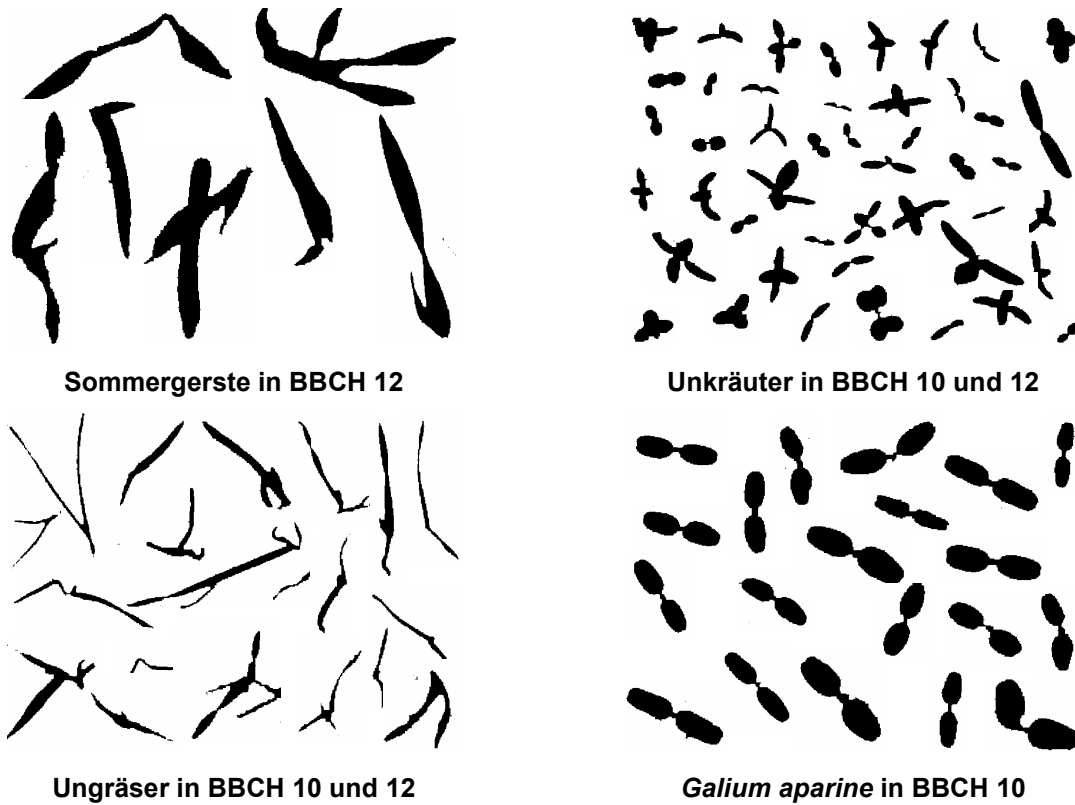


Abb. 4.5: Beispiele von Pflanzenformen der untersuchten Unkrautklassen in der Wissensbasis zur Auswertung der Bispektralbilder einer Überfahrt in Sommergerste (Aufnahmedatum 18.4.2005)

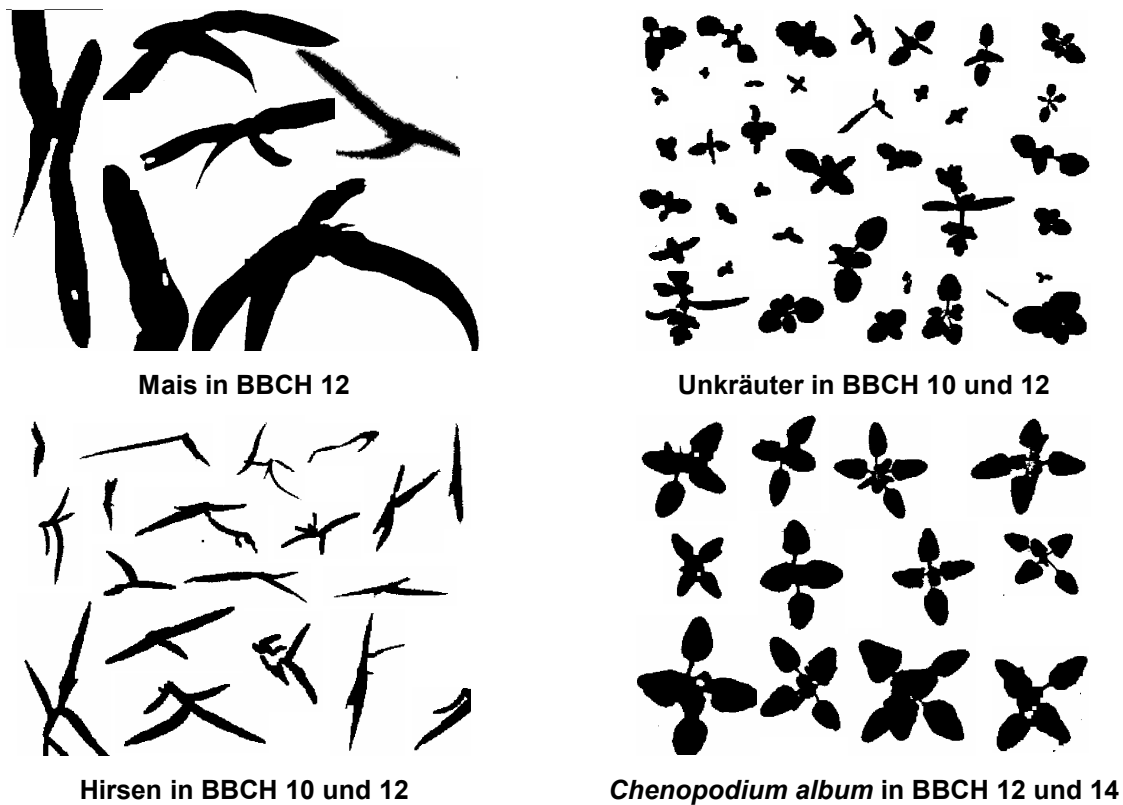


Abb. 4.6: Beispiele von Pflanzenformen der untersuchten Unkrautklassen in der Wissensbasis zur Auswertung der Bispektralbilder einer Überfahrt in Mais (Aufnahmedatum 21.5.2004)

Bei der Auswahl der Unkrautklassen wurden auch Pflanzen untersucht, für die keine selektiven Wirkstoffe in der Kultur zur Verfügung standen. So wurde die Klasse CHEAL (*Chenopodium album*) in Mais nur untersucht, um die Möglichkeiten einer Differenzierung von Problemunkräutern zu ermitteln.

Für die Unterscheidung und Erkennung von neuen Pflanzen wurden verschiedene statistische Verfahren angewandt. Derzeit ist mit der Software *IMPAS-AGRI* ein wissensbasierter Vergleich sowohl anhand der Fuzzy Logic und als auch über das Prinzip der minimalen Distanz möglich. Bei der Erkennung nach dem Prinzip der minimalen Distanz wird jeder der in die Analyse einbezogenen Formparameter mit den Merkmalswerten der Pflanzen in der Wissensbasis verglichen und die Abweichungsquadrate berechnet und aufsummiert. Anschließend werden die Distanzen der zu klassifizierenden Pflanzen zu allen Objekten in der Wissensbasis auf einem Zahlenstrahl dargestellt und relativiert (Abbildung 4.7). Für die Erkennung kann jedem Merkmal eine Prozentzahl zugeordnet werden, die angibt, welche Distanz eine Objektklasse der Wissensbasis zu der unbekanntem Pflanze haben darf, damit dieses Objekt noch im nächsten Erkennungsschritt berücksichtigt wird.

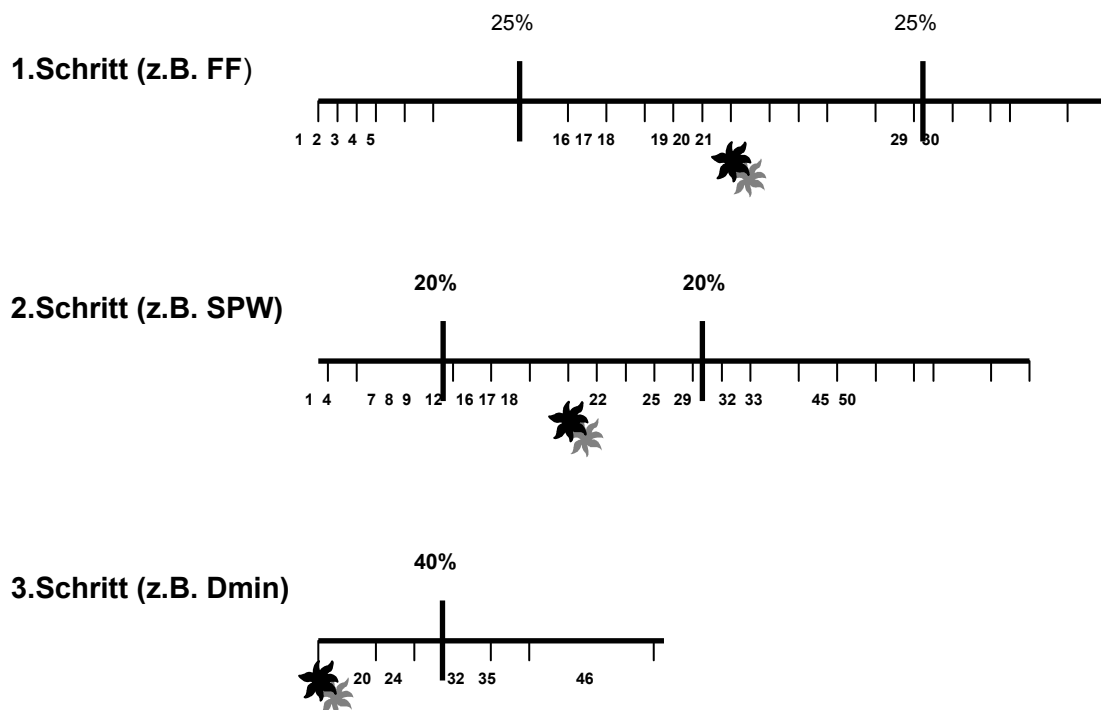


Abb. 4.7: Funktionsprinzip der Erkennung nach dem Prinzip der minimalen Distanz (verändert nach SÖKEFELD 1997)

Beispielsweise bei einer Gewichtung von 25 % werden alle Pflanzen der Wissensbasis, die ausgehend vom Merkmal des unbekanntem Objektes im Bereich von $\pm 25\%$ der Länge des Zahlenstrahls liegen, in den nächsten Erkennungsschritt übernommen. Die prozentuale Spanne ist für jedes Merkmal variabel einzusetzen, ebenso wie die Anzahl der Erkennungs-

schritte. Im letzten Erkennungsschritt erfolgt die Zuordnung zu einer Pflanze in der Wissensbasis, deren Merkmalswert auf dem Zahlenstrahl dem Wert der unbekanntes Pflanze am nächsten liegt.

Im Verfahren der Fuzzy Logic werden nicht die Distanzen einzelner Pflanzenarten mit den unbekanntes Pflanzen verglichen, sondern die relative Zugehörigkeit zu einer Unkrautklasse für jedes Merkmal ermittelt. Für einen wissensbasierten Vergleich der Formparameter werden die Mittelwerte der Parameter und deren Varianzen beschrieben. Abbildung 4.8 zeigt die Darstellung dieser Parameter als Verteilungsfunktion. Für die Zugehörigkeit neuer Pflanzen in die jeweilige Unkrautklasse werden Wahrscheinlichkeiten berechnet. Je näher der Schnittpunkt am Mittelwert des betrachteten Parameters liegt, desto höher ist der Zugehörigkeitsgrad. Bei einer schrittweisen Vorgehensweise können dabei Klassen anhand ihres geringen Zugehörigkeitsgrades bei einem Merkmal ausgeschlossen werden oder andernfalls wird der Mittelwert der Zugehörigkeitsgrade für die Klassifizierung in eine Klasse verwendet. Eine Pflanze der Wissensbasis, die für ein Merkmal die Zugehörigkeit von 0 % hat, kann nicht mehr für die Klassifikation verwendet werden, auch wenn die Zugehörigkeit für alle anderen Merkmale sehr hoch ist.

Der Anwender hat die Möglichkeit, die Reihenfolge und Gewichtung der Formmerkmale frei zu wählen. Diese Erkennungsstrategien haben entscheidenden Einfluss auf die Erkennungsgenauigkeit. Ebenso kann bei diesem Verfahren eine Mindestzugehörigkeit angegeben werden. Pflanzen, die dieser Zugehörigkeit nicht entsprechen, werden als *unbekannt* klassifiziert.

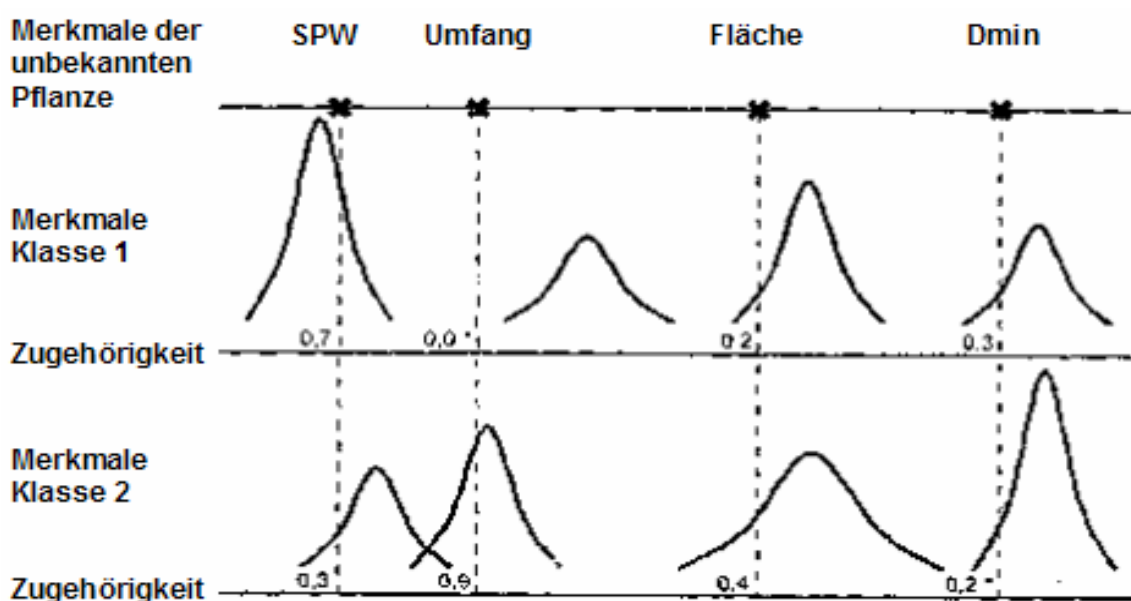


Abb. 4.8: Prinzip der Klassifizierung mit Hilfe der Fuzzy Logic am Beispiel von vier Formparametern und einer aus 2 Klassen bestehenden Wissensbasis (verändert nach SÖKEFELD 1997)

Die Evaluierung der Erkennungsgenauigkeit kann mit der Software *IMPAS-AGRI* derzeit nur manuell vorgenommen werden. Die Software bietet die Möglichkeit, alle Schritte der Bildauswertung zu visualisieren (Abbildungen im Anhang). Dabei können für jedes Objekt im Bild die berechneten Ergebnisse schrittweise mit den Daten der Wissensbasis nachvollzogen werden. Ebenso ist eine Kontrolle der Ergebnisse über die Ausgabedatei möglich, die für jedes Bild die Anzahl der klassifizierten Kulturpflanzen und Unkräuter (pro Klasse) sowie deren Fläche wiedergibt. Anhand der abgebildeten Fläche (Deckungsgrad) können, wie auch durch die Angabe der Anzahl der Pflanzen pro Unkrautklasse, in der Online-Auswertung Schwellenwerte (Pflanzen pro m²) angegeben werden, die eine direkte Ansteuerung der Pflanzenschutzspritze ermöglichen. In der vorliegenden Arbeit wurden die Ergebnisse der Online-Auswertung der Bispektralbilder zur Erstellung von Applikationskarten für teilschlagspezifische Unkrautbekämpfungsmaßnahmen genutzt. Abbildung 4.9 visualisiert beispielhaft alle Schritte der Bildauswertung für die teilschlagspezifische Unkrautkontrolle im Online- und Offline-Verfahren.

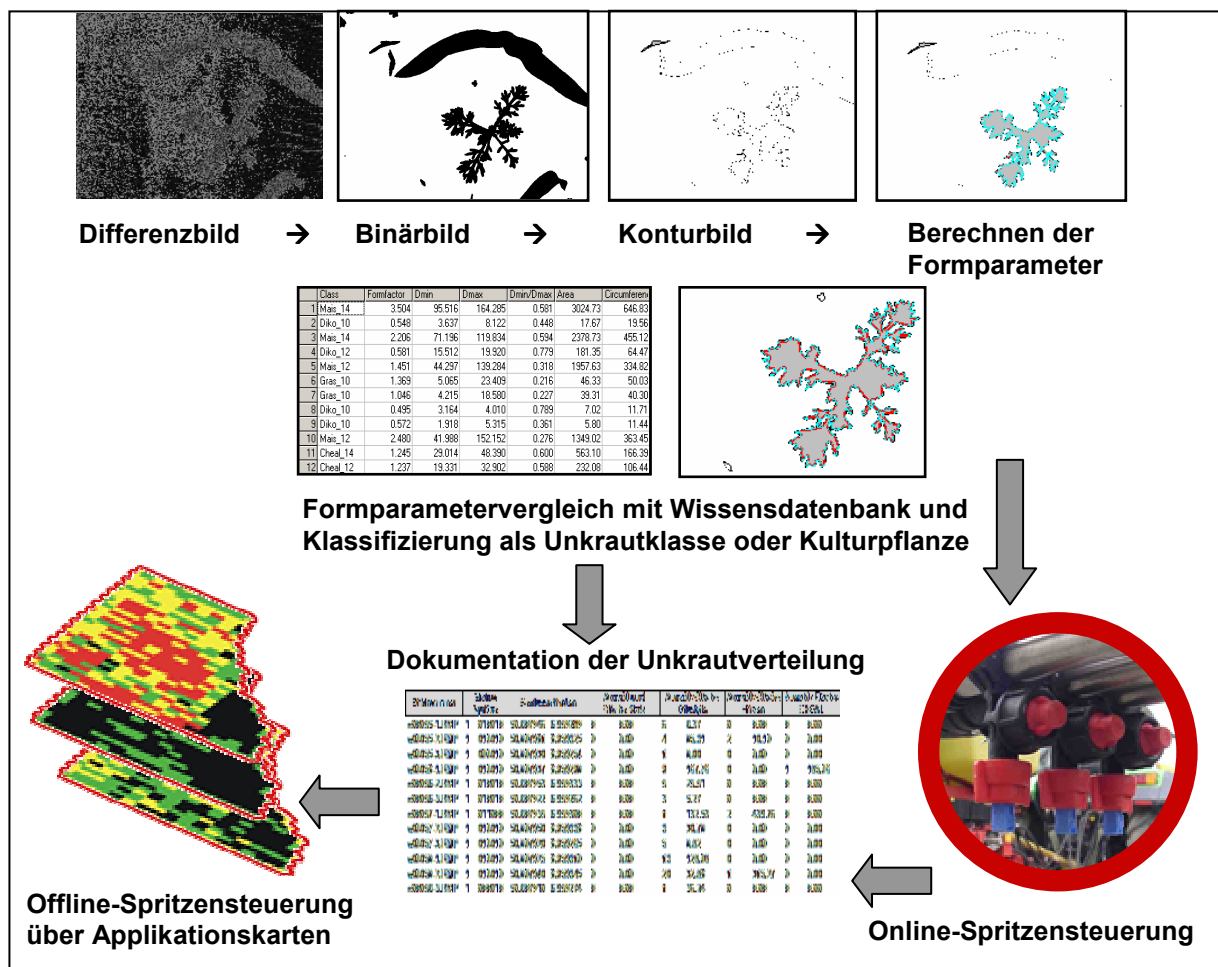


Abb. 4.9: Schritte der Bildverarbeitung für die teilschlagspezifische Unkrautkontrolle im Online- und Offline-Verfahren

Die Erkennungsqualität der verwendeten Wissensbasis und der Erkennungsstrategien wurde durch die Auswertung von zufällig ausgewählten Bispektralbildern pro Klasse ($n > 100$) aus den Überfahrten geprüft.

Zwecks Verbesserung der Differenzierung von Unkrautarten und –klassen anhand von Formparametern wurden die Daten einer Diskriminanzanalyse mit der Statistiksoftware SPSS (Version 12.0.1) unterzogen. Da mit Hilfe der Diskriminanzanalyse auch ermittelt werden kann, welche Trennschärfe die untersuchten Formparameter für die Unterscheidung haben, wurden die Ergebnisse für die Optimierung der Erkennungsstrategie nach den oben beschriebenen Verfahren benutzt.

Dazu wurden folgende Verfahrensschritte der Diskriminanzanalyse näher untersucht:

- Definition der Gruppen und Variablen
- Formulierung der Diskriminanzfunktionen (Trennfunktionen)
- Schätzung der Diskriminanzfunktionen
- Prüfung der Diskriminanzfunktionen
- Prüfung der Merkmalsvariablen
- Klassifizierung von unbekanntem Objekten

Für die Auswertung der Standbilder von Einzelpflanzen wurden die Formparameter von häufig vorkommenden Unkräutern in Getreide (ZWERGER *et al.* 2004), Zuckerrüben (MERKES *et al.* 2003) und Mais (MEHRTENS *et al.* 2003) in Datenbanken zusammengefasst. Für jede Kulturart wurden Unkräuter sowohl im Keimblattstadium (BBCH 10) als auch in einer Datenbank mit Arten vom Keimblattstadium bis zum Laubblattstadium (BBCH 12) untersucht. Da in der Unkrautbekämpfung Wirkstoffe zum Einsatz kommen, die ein breites Artenspektrum erfassen, wurden die Pflanzen in die Wirkstoffgruppen *dikotyle Unkräuter* und *Ungräser* sowie *Problemunkräuter* zusammengefasst.

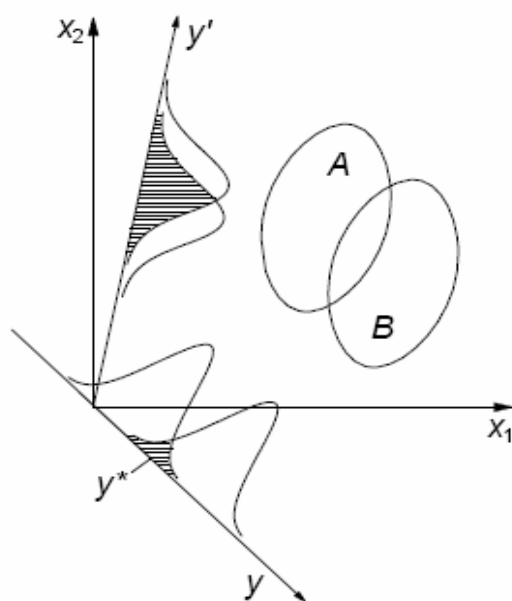
In Getreide wurden *Galium aparine* (GALAP) sowie die Trespenarten *Bromus secalinus* (BROSE) und *Bromus sterilis* (BROST); in Mais *Chenopodium album* L. (CHEAL) sowie die Hirsearten *Echinochloa crus-galli* (L.) Pal. Beauv. (ECHCG) und *Setaria viridis* (SETVI) und in Zuckerrüben *Galium aparine* (GALAP) und *Abutilon theophrasti* (ABUTH) als separate Klasse *Problemunkräuter* untersucht (Tabelle 4.1).

Für die Diskriminanzanalyse mit mehr als zwei Gruppen (G) werden maximal $G-1$ Diskriminanzfunktionen berechnet. Bei der *Formulierung der Diskriminanzfunktionen* soll ein Diskriminanzwert (y) gefunden werden, der eine optimale Trennung der Gruppen (Unkrautarten oder –klassen) erlaubt. Abbildung 4.10 zeigt beispielhaft, dass der Diskriminanzwert y einen geringeren Überschneidungsbereich als der Diskriminanzwert y'

besitzt. Folglich trennt die Diskriminanzfunktion y die Gruppen A und B besser als die Funktion y' . Weist die Diskriminanzfunktion keine Überschneidung auf, so werden die Gruppen optimal getrennt.

Tab. 4.1: Untersuchte Unkrautarten in Getreide, Mais und Zuckerrüben

	dikotyle Unkräuter	Ungräser	Problemunkraut 1	Problemunkraut 2
Getreide	ANTAR, ANGAR, CIRAR, LAMAM, LAMPU, MYOAR, PAPRH, SINAR, STEME, VIOAR	ALOMY, AGREE, APESV, AVEFA, POAAN	GALAP	BROSE, BROST
Zuckerrüben	AETYC, AMARE, ANGAR, ANTA, CHEAL, CIRAR, CONAR, DAUCA, EPPHE, LAMAM, LAMPU, LAPCO, SINAR, SOLNI, STEME, URTUR	AGREE, POAAN	GALAP	ABUTH
Mais	AMARE, CIRAR, CONAR, EPPHE, GALAP, GASP, LAMAM, LAPCO, MATIN, SINAR, SOLNI, STEME, URTUR,	AGREE, POAAN	CHEAL,	ECHCG, SETVI



$$y = b_0 + b_1x_1 + b_2x_2 + \dots + b_jx_j$$

y = Diskriminanzwert x_j = Merkmalsvariable (Formparameter)
 b_i = Diskriminanzkoeffizient b_0 = Konstante

Abb. 4.10: Formel der Diskriminanzfunktion und Beispiel einer Verteilung von Merkmalen zweier Gruppen (A, B) und ihrer Projektionen auf der Diskriminanzachse (verändert nach KRAFT 2000)

Bei der *Schätzung der Diskriminanzfunktion* soll die Frage beantwortet werden, bei welchem b -Wert ein y -Wert entsteht, der eine möglichst optimale Trennung der Gruppen erlaubt. Diese Werte werden durch das Softwareprogramm durch die Optimierung der Kriterien *Maximierung der Streuung zwischen den Gruppen* und *Minimierung der Streuung innerhalb*

der Gruppen berechnet. Durch die Maximierung dieses Diskriminanzkriteriums, d.h. durch die Maximierung des Abstandes zwischen den Gruppen und die Minimierung der Abstände innerhalb der Gruppen sind die Bedingungen für einen möglichst kleinen Überschneidungsbereich erfüllt.

Bei der Prüfung der Diskriminanzfunktion wird deren Güte bzw. Trennkraft hinsichtlich der verschiedenen Gruppen untersucht. Dies kann über die Gütekriterien *Eigenwert* (Verhältnis zwischen erklärter und nicht erklärter Streuung), *Kanonischer Korrelationskoeffizient* (Wurzel aus erklärter Streuung und Gesamtstreuung) und *Wilks Lambda* (Verhältnis zwischen nicht erklärter Streuung und Gesamtstreuung) analysiert werden (Abbildung 4.11).

Eigenwert

→ sollte möglichst hoch

$$\gamma = \frac{SS_b}{SS_w}$$

Diagramm zur Darstellung des Eigenwertes γ . Die Formel zeigt das Verhältnis von erklärter Streuung (SS_b) zu nicht erklärter Streuung (SS_w). Pfeile weisen von den Texten 'Eigenwert', 'erklärte Streuung' und 'nicht erklärte Streuung' auf die entsprechenden Teile der Formel.

Kanonischer Korrelationskoeffizient

→ sollte möglichst groß sein

$$c = \sqrt{\frac{\gamma}{1 + \gamma}} = \sqrt{\frac{SS_b}{SS_b + SS_w}}$$

Diagramm zur Darstellung des kanonischen Korrelationskoeffizienten c . Die Formel zeigt die Wurzel aus dem Verhältnis von erklärter Streuung (SS_b) zu Gesamtstreuung ($SS_b + SS_w$). Pfeile weisen von den Texten 'Erklärte Streuung' und 'Gesamtstreuung' auf die entsprechenden Teile der Formel.

Wilks Lambda

→ sollte möglichst klein sein

$$\Delta = \frac{1}{1 + \gamma} = \frac{SS_w}{SS_b + SS_w}$$

Diagramm zur Darstellung von Wilks Lambda Δ . Die Formel zeigt das Verhältnis von nicht erklärter Streuung (SS_w) zu Gesamtstreuung ($SS_b + SS_w$). Pfeile weisen von den Texten 'nicht erklärte Streuung' und 'Gesamtstreuung' auf die entsprechenden Teile der Formel.

Abb. 4.11: Formeln für die Bewertung des Diskriminanzkriteriums (verändert nach KRAFT 2000)

Da der Eigenwert nicht auf Werte zwischen null und eins normiert ist, wird bei der Diskriminanzanalyse auch der kanonische Korrelationskoeffizient als Gütemaß verwendet. Dabei ist zu beachten, dass je größer der kanonische Korrelationskoeffizient ist, desto höher

die Trennkraft der Diskriminanzfunktion ausfällt. Eine zweite Möglichkeit für die Berechnung von normierten Werten zwischen null und eins ist Wilks Lambda. Im Gegensatz zum kanonischen Korrelationskoeffizienten handelt es sich hierbei um ein inverses Gütemaß, d.h. je kleinere Werte Wilks Lambda annimmt, desto größer ist die Trennkraft einer Diskriminanzfunktion.

Bei der *Prüfung der Merkmalsvariablen* wird untersucht, welche Variablen (Formparameter) eine größere diskriminatorische Bedeutung haben. Die Basis für die Beurteilung der Trennkraft der Variablen bilden die Diskriminanzkoeffizienten (\mathbf{b}_j), da sie den Einfluss einer Merkmalsvariablen auf den Diskriminanzwert repräsentieren. Da diese jedoch von der Maßeinheit der Ausgangsvariablen beeinflusst werden, wird der Diskriminanzkoeffizient mit der Standardabweichung der entsprechenden Variablen multipliziert. Diese standardisierten Diskriminanzkoeffizienten können nun für einen Vergleich herangezogen werden. Dabei gilt: Je größer der Wert des Koeffizienten ist, desto größer ist die Trennkraft der Merkmalsvariable. Unterschiede zwischen den einzelnen Werten lassen darauf schließen, wie ausgeprägt die Einflussnahme der Merkmalsvariablen für eine Trennung ist.

Darüber hinaus ist mit der Diskriminanzanalyse eine *Klassifizierung von unbekanntem Objekten* möglich. Dabei werden Formparameter von neuen Pflanzen aufgrund ihrer Merkmalsausprägung in Gruppen eingeordnet. Die für die Trennung der Unkrautarten oder -klassen berechneten Diskriminanzfunktionen werden hierbei für die Klassifizierung unbekannter Pflanzen herangezogen. Da beim Vergleich mehrerer Gruppen (G) mit mehreren Variablen maximal $(G - 1)$ Diskriminanzfunktionen berechnet werden, wird für die Beurteilung der Bedeutung der einzelnen Diskriminanzfunktionen für das Trennverfahren ein Eigenwert berechnet, wobei die erste Funktion den größten Teil der Varianz erklären soll, also den höchsten Eigenwert besitzt.

Die Wissensbasen für die Online-Auswertung der Bispektralbilder wurden daher ebenfalls einer Diskriminanzanalyse unterzogen. Dabei wurden die Klassifizierungsergebnisse der ermittelten Diskriminanzfunktionen anhand einer Testdatenbank aus zufällig ausgewählten Bildern der Überfahrt überprüft.

4.4 Ergebnisse

4.4.1 Aufbau von Wissensbasen zur Klassifikation von Pflanzenarten

Da alle untersuchten Pflanzen im Laufe ihrer phänologischen Entwicklung eine starke Veränderung ihrer Formparameter aufwiesen (OEBEL und GERHARDS, 2005b), wurden sie entsprechend ihrer Entwicklungsstadien getrennt voneinander in die Datenbank aufgenommen. Abbildung 4.12 zeigt beispielhaft Veränderungen der Formparameter Umfang, Fläche und maximale Kantenlänge der Unkrautarten *Papaver rhoeas* L. und *Apera spica-venti* in den Entwicklungsstadien BBCH 10 bis 14.

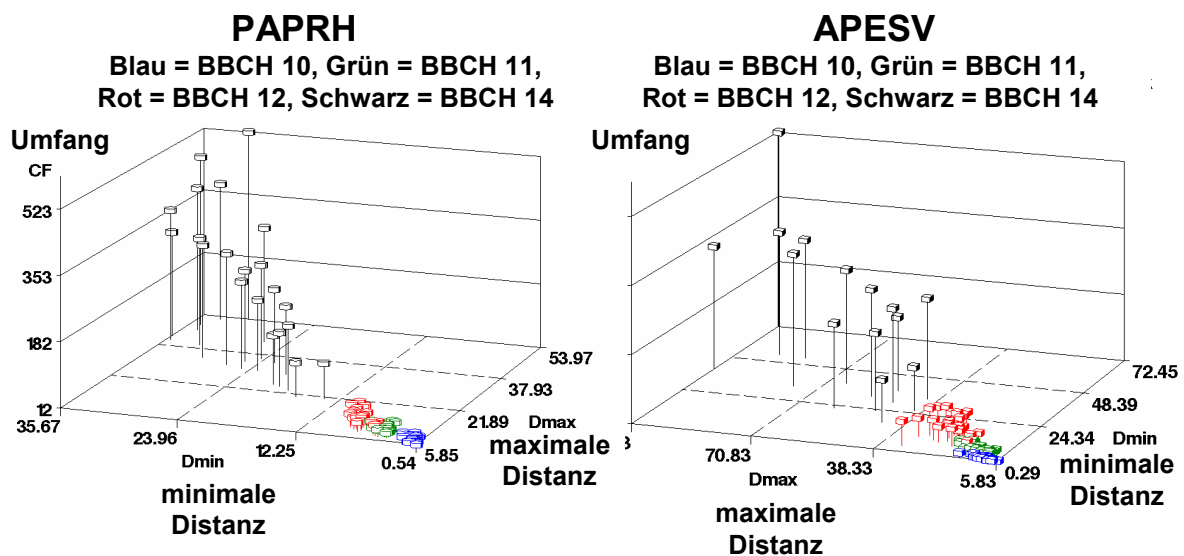


Abb. 4.12: Veränderung der Formparameter Umfang (CF), minimale (Dmin) und maximale Kantenlänge (Dmax) bei *Papaver rhoeas* (PAPRH) und *Apera spica-venti* (APESV) für die Entwicklungsstadien BBCH 10 bis BBCH 14

Die Ergebnisse der verschiedenen Schritte der statistischen Auswertung zur Differenzierung von Unkrautarten über die Diskriminanzanalyse werden am Beispiel der Datenbank *Unkrautarten (BBCH 10) in Braugerste* erläutert. Bei der *Definition der Klassen* wurden die Formparameter von Braugerste (HORSV) mit den Formparametern der Ungräser ALOMY, APESV, AVEFA sowie BROSE, BROST (*Problemunkraut 2*) und der Unkräuter ANTAR, CIRAR, LAMAM, MYOAR, PAPRH, STEME sowie GALAP (*Problemunkraut 1*) sowohl getrennt als Pflanzenart als auch zusammengefasst in Wirkstoffgruppen (*dikotyle Unkräuter, Ungräser, Galium aparine*) untersucht. Der Stichprobenumfang der in die Datenbank aufgenommenen Pflanzen betrug $n = 327$. Durch den Gleichheitstest der Gruppenmittelwerte wird das Signifikanzniveau der einzelnen Formparameter ermittelt. Für alle geometrischen Formparameter sowie die meisten Fourierdeskriptoren (FDs) wurde ein hohes Signifikanzniveau berechnet (Tabelle 4.2).

Tab. 4.2: Ergebnisse des Gleichheitstests der Gruppenmittelwerte für die Datenbank *Unkrautarten (BBCH 10) in Braugerste*

Gleichheitstest der Gruppenmittelwerte					
	Wilks-Lambda	F	df1	df2	Signifikanz
FD1	,732	9,573	12	314	,000
FD2	,728	9,755	12	314	,000
FD3	,459	30,828	12	314	,000
FD4	,525	23,667	12	314	,000
FD5	,812	6,039	12	314	,000
FD6	,793	6,810	12	314	,000
FD7	,830	5,342	12	314	,000
FD8	,897	2,999	12	314	,001
FD9	,908	2,651	12	314	,002
FD10	,883	3,483	12	314	,000
FD11	,909	2,611	12	314	,002
FD12	,916	2,402	12	314	,006
FD13	,870	3,927	12	314	,000
FD14	,906	2,708	12	314	,002
FD15	,854	4,488	12	314	,000
FD16	,893	3,149	12	314	,000
FD17	,874	3,782	12	314	,000
FD18	,889	3,277	12	314	,000
FD19	,873	3,812	12	314	,000
FD20	,939	1,691	12	314	,068
FF	,199	105,235	12	314	,000
Dmin	,146	153,336	12	314	,000
Dmax	,128	178,173	12	314	,000
SPW	,185	115,004	12	314	,000
Area	,159	138,394	12	314	,000
CF	,149	149,508	12	314	,000

Für die Trennung der insgesamt 13 Pflanzenarten wurden 9 Diskriminanzfunktionen berechnet. Dabei wurden die Variablen Dmax, FF, SPW, FD4, Dmin, FD3, A, U und FD2 in die Analyse aufgenommen, weil diese Formparameter sich zwischen den Arten am deutlichsten unterscheiden.

Die für die *Schätzung der Diskriminanzfunktionen* notwendige Berechnung der Trennschärfe (Maximierung des Abstandes zwischen den Gruppen) und für eine Repräsentanz (Minimierung der Abstände innerhalb der Gruppen) wird durch die Statistiksoftware durchgeführt und optimiert.

Die zur *Prüfung der Diskriminanzfunktionen* berechneten Gütekriterien Eigenwerte und Wilks` Lambda (Tabelle 4.3) zeigen, dass insbesondere die Funktionen 1 bis 3 für die Trennung der Unkrautarten verantwortlich sind und 95,8 % der Varianz erklären.

Tab. 4.3: SPSS Ausgabe für die Gütekriterien Eigenwert und Wilks Lambda der Datenbank *Unkrautarten (BBCH 10) in Braugerste*

Eigenwerte					Wilks' Lambda				
Funktion	Eigenwert	% der Varianz	Kumulierte %	Kanonische Korrelation	Test der Funktion(en)	Wilks-Lambda	Chi-Quadrat	df	Signifikanz
1	15,661(a)	57,9	57,9	0,97	1 bis 9	0,001	2230,537	108	0,000
2	8,302(a)	30,7	88,6	0,945	2 bis 9	0,014	1344,424	88	0,000
3	1,944(a)	7,2	95,8	0,813	3 bis 9	0,13	641,909	70	0,000
4	,583(a)	2,2	98	0,607	4 bis 9	0,384	301,828	54	0,000
5	,237(a)	0,9	98,9	0,438	5 bis 9	0,607	157,23	40	0,000
6	,203(a)	0,8	99,6	0,411	6 bis 9	0,751	90,242	28	0,000
7	,097(a)	0,4	100	0,297	7 bis 9	0,904	31,959	18	0,022
8	,007(a)	0	100	0,085	8 bis 9	0,991	2,855	10	0,985
9	,002(a)	0	100	0,043	9	0,998	0,595	4	0,964

a Die ersten 9 kanonischen Diskriminanzfunktionen werden in dieser Analyse verwendet.

Bei der *Prüfung der Merkmalsvariablen* wurde bei der Berechnung der Diskriminanzfunktionen für die verschiedenen Datenbanken festgestellt, dass vor allem die geometrischen Formparameter für eine Trennung der Arten oder Klassen verantwortlich waren. Die Fourierdeskriptoren hatten eine geringere diskriminatorische Bedeutung. Durchschnittlich wurden 10 Formmerkmale in die Berechnung der Diskriminanzfunktionen einbezogen. Für die Trennung von Unkrautklassen erwiesen sich die Formparameter maximale Kantenlänge (Dmax), Formfaktor (FF) und Fläche (A) von größter Bedeutung.

Abbildung 4.13 visualisiert, dass für eine Trennung von Kulturpflanze (HORSV) und Unkräutern schon die ersten drei kanonischen Diskriminanzfunktionen ausreichen würden. Auch die ausgewählten dikotylen Unkräuter (blau), Ungräser (grün) und GALAP (rot) werden über die ersten Funktionen gut differenziert.

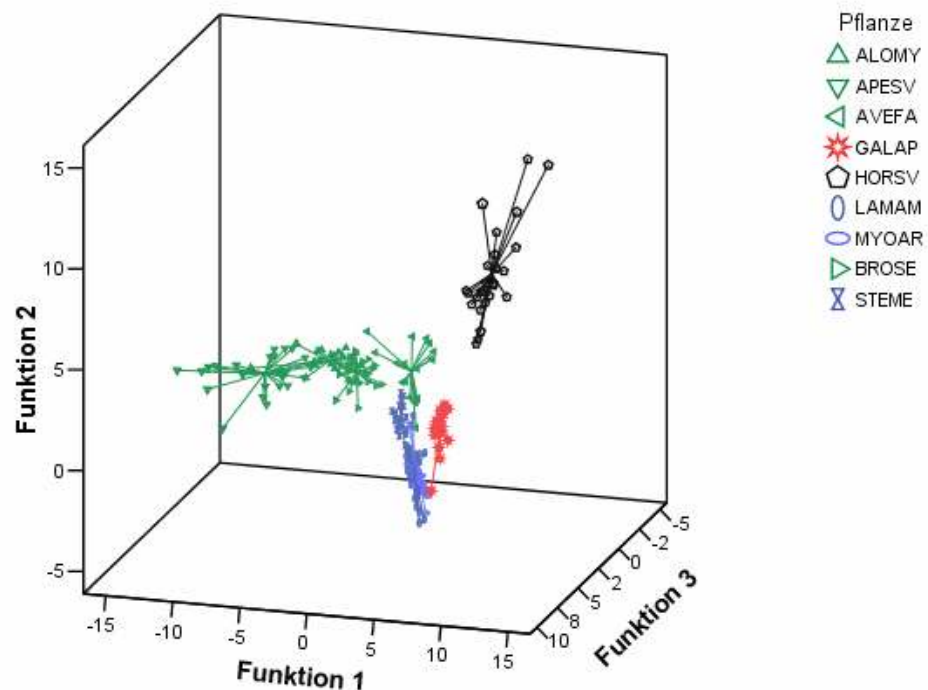


Abb. 4.13: Grafische Darstellung der Diskriminanzwerte der ersten drei Diskriminanzfunktionen von Pflanzenarten der Datenbank *Unkrautarten (BBCH 10) in Braugerste*

Tabelle 4.4 zeigt die Klassifizierungsergebnisse für die Datenbank *Unkrautarten (BBCH 10) in Braugerste* anhand der berechneten Diskriminanzfunktionen. Durchschnittlich 71,9 % der Pflanzenarten wurden korrekt klassifiziert. Braugerste (HORSV) und Unkräuter lassen sich zu 100 % unterscheiden. Auch die Trennung von mono- und dikotylen Unkräutern gelingt, da Verwechslungen meist nur mit artverwandten Pflanzen auftreten. So kam es bei *Apera spica-venti* (APESV) nur zu Verwechslungen mit *Alopecurus myosuroides* (ALOMY). Selbst die Trespensarten *Bromus secalinus* (BROSE) und *Bromus sterilis* (BROST) können zu über 60 % über die Diskriminanzfunktionen getrennt werden. Verwechslungen kamen hauptsächlich zwischen den beiden Arten vor. Auch bei den dikotylen Arten *Lamium amplexicaule* L. (LAMAM) und *Myosotis arvensis* (L.) Hill (MYOAR) waren Fehlklassifikationen größtenteils innerhalb der beiden Arten zu beobachten. *Avena fatua* (AVEFA) konnte nur zu 50 % richtig klassifiziert werden, wobei 45 % der Fehlklassifikationen mit BROST, ALOMY, BROSE dennoch eine Klassifizierung als Ungras ergaben. Eine Differenzierung von 95 % wird bei dem Problemunkraut *Galium aparine* (GALAP) erreicht. *Cirsium arvense* (CIRAR) konnte im Keimblattstadium zu 73,9 % von anderen Unkrautarten unterschieden werden. Entscheidend für die Unkrautbekämpfung ist, dass Fehlklassifikationen in vielen Fällen nicht zu falschen Applikationsentscheidungen geführt hätten.

Tab. 4.4: Konfusionsmatrix für die Trennung von *Unkrautarten (BBCH 10) in Braugerste* über Diskriminanzfunktionen.

Klassifizierungsrate (%) Unkrautarten (BBCH 10) in Braugerste													
Pflanze	ALOMY	ANTAR	APESV	AVEFA	BROSE	BROST	CIRAR	GALAP	HORSV	LAMAM	MYOAR	PAPRH	STEME
ALOMY	65,0	0,0	10,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	25,0	0,0
ANTAR	0,0	82,4	0,0	0,0	0,0	0,0	2,9	0,0	0,0	14,7	0,0	0,0	0,0
APESV	18,5	0,0	81,5	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0
AVEFA	5,0	0,0	0,0	50,0	5,0	35,0	0,0	0,0	0,0	5,0	0,0	0,0	0,0
BROSE	0,0	0,0	0,0	0,0	63,6	27,3	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	9,1	0,0
BROST	0,0	0,0	0,0	8,7	13,0	60,9	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	4,3	13,0
CIRAR	0,0	13,0	0,0	0,0	0,0	4,3	73,9	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	8,7
GALAP	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	95,0	0,0	0,0	5,0	0,0	0,0
HORSV	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	100,0	0,0	0,0	0,0	0,0
LAMAM	0,0	25,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	44,4	30,6	0,0	0,0
MYOAR	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	41,4	58,6	0,0	0,0
PAPRH	0,0	0,0	0,0	0,0	11,5	3,8	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	84,6	0,0
STEME	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	4,8	9,5	0,0	0,0	4,8	0,0	0,0	81,0

Da in der Praxis Unkräuter anhand von Wirkstoffklassen bekämpft werden, wurden die Arten in die Unkrautklassen *dikotyle Unkräuter*, *Ungräser*, *GALAP* und *BROMUS* zusammengefasst. Hierbei gelang über die Diskriminanzanalyse eine korrekte Klassifizierung von 83,2 % zwischen den 5 ausgewählten Gruppen (Tabelle 4.5). Es zeigt sich, dass Fehlklassifikationen häufig innerhalb der mono- bzw. dikotylen Unkrautklassen vorkommen. So wird GALAP zu 75 % differenziert, zu Fehlklassifikationen kommt es nur innerhalb der dikotylen Unkrautklasse. Auch hier tragen die ersten drei kanonischen Diskriminanzfunktionen wesentlich zur Trennung der Unkrautklassen bei (Abbildung 4.14).

Tab. 4.5: Richtige Klassifizierungsrate in % für *Unkrautklassen (BBCH 10) in Braugerste*

Klassifizierungsrate (%) Unkrautklassen (BBCH 10) in Braugerste					
	Braugerste	Dikotyle	Ungräser	GALAP	BROMUS
Braugerste	100,0	0,0	0,0	0,0	0,0
Dikotyle	0,0	86,4	1,8	0,0	11,8
Ungräser	0,0	9,0	73,1	1,5	16,4
GALAP	0,0	25,0	0,0	75,0	0,0
BROMUS	0,0	17,8	2,2	0,0	80,0

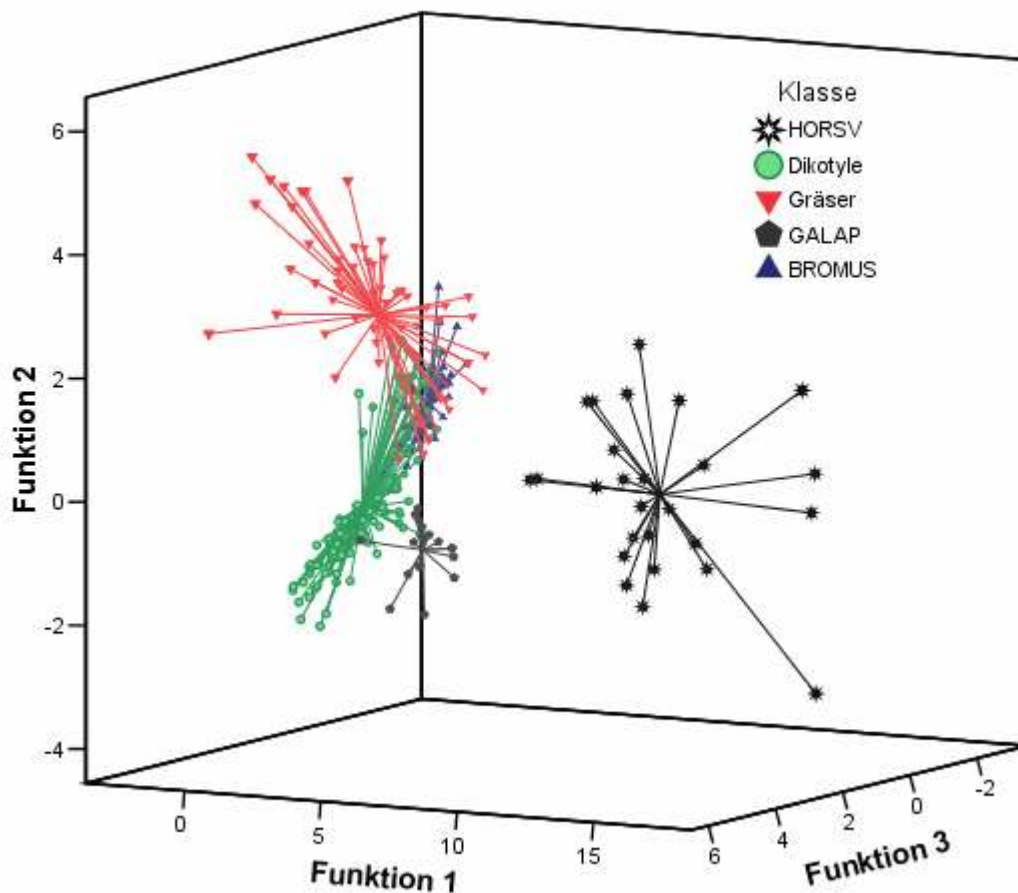


Abb. 4.14: Grafische Darstellung der Diskriminanzwerte der ersten drei Diskriminanzfunktionen der Datenbank *Unkrautklassen (BBCH 10) in Braugerste*

In Mais (ZEAMX) wurden 13 Unkrautarten im Entwicklungsstadium BBCH 10 untersucht und eine durchschnittliche, korrekte Klassifikation von 71,7 % erreicht (Tabelle 4.6). Mais konnte dabei zu 95 % von den Unkräutern differenziert werden. Bei einem Stichprobenumfang von $n = 350$ gelang eine Differenzierung von *Galium aparine* (GALAP) zu 70 %, Fehlklassifikationen (20 %) gab es mit dem im Keimblattstadium morphologisch ähnlichen *Convolvulus arvensis* L. (CONAR). Die Hirsearten *Echinochloa crus-galli* (ECHCG) und *Setaria viridis* (SETVI) wurden zu 76,7 % bzw. 85,7 % richtig klassifiziert. Auch hier waren Fehlklassifikationen innerhalb dieser beiden Pflanzenarten zu beobachten. Die Erkennungsgenauigkeit von Hirsen gegenüber anderen Unkrautarten lag bei über 90 %. *Agropyron repens* (AGREE) konnte zu 81,8 % richtig klassifiziert werden. Auch die Fehlklassifikationen der dikotylen Unkrautarten waren meist innerhalb der dikotylen Pflanzengruppe zu beobachten, so dass eine Erkennungsgenauigkeit der dikotylen Gruppe von über 90 % erreicht wurde. *Cirsium arvense* (CIRAR) konnte hier nur zu 47,8 % richtig klassifiziert werden, da es zu Verwechslungen mit den dikotylen Arten *Euphorbia helioscopia* L. (EPPHE) und *Sinapis arvensis* L. (SINAR) kam.

Tab. 4.6: Konfusionsmatrix für die Trennung von *Unkrautarten (BBCH 10) in Mais* über Diskriminanzfunktionen.

Klassifizierungsrate (%) Unkrautarten (BBCH 10) in Mais														
Pflanze	AGREE	AMARE	CHEAL	CIRAR	CONAR	ECHCG	EPHHE	GALAP	LAMAM	SETVI	SINAR	STEME	URTUR	ZEAMX
AGREE	81,8	3,0	15,2	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0
AMARE	0,0	50,0	40,0	0,0	0,0	0,0	5,0	0,0	0,0	0,0	5,0	0,0	0,0	0,0
CHEAL	0,0	7,4	81,5	0,0	0,0	0,0	3,7	0,0	0,0	3,7	3,7	0,0	0,0	0,0
CIRAR	0,0	0,0	0,0	47,8	0,0	4,3	17,4	0,0	0,0	0,0	17,4	8,7	4,3	0,0
CONAR	0,0	0,0	0,0	0,0	90,0	0,0	5,0	5,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0
ECHCG	0,0	0,0	0,0	3,3	0,0	76,7	3,3	0,0	0,0	13,3	3,3	0,0	0,0	0,0
EPHHE	0,0	0,0	0,0	21,7	8,7	0,0	43,5	0,0	13,0	0,0	8,7	4,3	0,0	0,0
GALAP	0,0	0,0	0,0	0,0	20,0	0,0	0,0	70,0	10,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0
LAMAM	0,0	0,0	0,0	0,0	2,8	0,0	0,0	0,0	91,7	2,8	0,0	0,0	2,8	0,0
SETVI	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	11,4	0,0	0,0	0,0	85,7	0,0	0,0	2,9	0,0
SINAR	0,0	15,0	0,0	15,0	0,0	5,0	0,0	0,0	0,0	0,0	65,0	0,0	0,0	0,0
STEME	0,0	9,5	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	4,8	0,0	4,8	81,0	0,0	0,0
URTUR	0,0	0,0	0,0	9,1	0,0	0,0	4,5	0,0	68,2	0,0	0,0	0,0	18,2	0,0
ZEAMX	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	5,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	95,0

Die Klassifizierungsergebnisse der Unkrautarten konnten durch eine Einteilung in die Unkrautklassen *dikotyle Unkräuter*, *Ungräser* und *Hirsen* auf 96,3 % gesteigert werden (Tabelle 4.7).

Tab. 4.7: Richtige Klassifizierungsrate in % für *Unkrautklassen (BBCH 10) in Mais*

Klassifizierungsrate (%) Unkrautklassen (BBCH 10) in Mais				
	Mais	Dikotyle	Ungräser	Hirsen
Mais	95,0	5,0	0,0	0,0
Dikotyle	0,0	99,1	0,0	0,9
Ungräser	0,0	15,2	84,8	0,0
Hirsen	0,0	7,7	0,0	92,3

In Zuckerrüben (BEAVA) wurden 14 Unkrautarten im Entwicklungsstadium BBCH 10 untersucht und eine durchschnittliche Trennung der Arten von 71,3 % erreicht (Tabelle 4.8). Zuckerrüben konnten dabei zu 91,3 % von den Unkräutern differenziert werden. Bei einem Stichprobenumfang von $n = 366$ gelang eine zufriedenstellende Differenzierung des Problemunkraut GALAP (65 %). Auch hier war CONAR mit 30 % an den Fehlklassifikationen

beteiligt. AGREE wurde zu 76,5 % richtig klassifiziert. Eine gute Differenzierung gelang auch von CONAR (80 %), CHEAL (88,9 %) und ABUTH (90 %). Durch eine Einteilung in die Unkrautklassen *dikotyle Unkräuter*, *Ungräser*, GALAP und ABUTH konnten 91,2 % der gruppierten Fälle korrekt klassifiziert werden (Tabelle 4.9).

Tab. 4.8: Konfusionsmatrix für die Trennung von *Unkrautarten (BBCH 10) in Zuckerrüben* über Diskriminanzfunktionen.

Klassifizierungsrate (%) Unkräuter (BBCH 10) in Zuckerrüben															
Pflanze	ABUTH	AGREE	AMARE	ANTAR	BEAVA	CHEAL	CIRAR	CONAR	DAUCA	EPPHE	GALAP	LAMAM	LAPCO	SINAR	STEME
ABUTH	90,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	5,0	0,0	0,0	5,0	0,0	0,0	0,0	0,0
AGREE	0,0	76,5	0,0	0,0	0,0	2,9	0,0	0,0	20,6	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0
AMARE	0,0	0,0	50,0	0,0	0,0	40,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	10,0	0,0
ANTAR	0,0	0,0	0,0	79,4	0,0	0,0	5,9	0,0	0,0	0,0	0,0	14,7	0,0	0,0	0,0
BEAVA	0,0	0,0	0,0	0,0	91,3	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	8,7	0,0
CHEAL	0,0	0,0	7,4	0,0	0,0	88,9	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	3,7	0,0
CIRAR	0,0	0,0	4,3	8,7	0,0	0,0	65,2	0,0	0,0	4,3	0,0	0,0	0,0	4,3	13,0
CONAR	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	80,0	0,0	15,0	5,0	0,0	0,0	0,0	0,0
DAUCA	0,0	8,7	0,0	0,0	0,0	13,0	0,0	0,0	78,3	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0
EPPHE	0,0	0,0	0,0	4,3	0,0	0,0	21,7	4,3	0,0	43,5	0,0	13,0	8,7	0,0	4,3
GALAP	5,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	30,0	0,0	0,0	65,0	0,0	0,0	0,0	0,0
LAMAM	0,0	0,0	2,8	22,2	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	2,8	0,0	58,3	13,9	0,0	0,0
LAPCO	0,0	0,0	0,0	15,0	0,0	0,0	5,0	0,0	0,0	5,0	0,0	5,0	65,0	0,0	5,0
SINAR	0,0	0,0	5,3	0,0	0,0	5,3	10,5	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	73,7	5,3
STEME	0,0	0,0	14,3	0,0	0,0	0,0	9,5	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	4,8	9,5	61,9

Tab. 4.9: Richtige Klassifizierungsrate in % für *Unkrautklassen (BBCH 10) in Zuckerrüben*

Klassifizierungsrate Unkrautklassen (BBCH 10) Zuckerrüben					
	Zuckerrübe	Dikotyle	Ungräser	GALAP	ABUTH
Zuckerrübe	91,3	8,7	0,0	0,0	0,0
Dikotyle	0,0	95,1	2,3	2,6	0,0
Ungräser	0,0	23,5	76,5	0,0	0,0
GALAP	0,0	25,0	0,0	65,0	10,0
ABUTH	0,0	0,0	0,0	10,0	90,0

Da Unkräuter zum Zeitpunkt der Bekämpfung meistens im Keim- und Laubblattstadium sind, wurden die Möglichkeiten einer Artendifferenzierung in beiden Entwicklungsstadien (*Mischverunkrautung*) untersucht.

In einer Datenbank wurden die Formparameter der von 19 Unkrautarten in den Entwicklungsstadien BBCH 10 bis 12 (*Mischverunkrautung in Braugerste*) mit einem Stichprobenumfang von $n = 1093$ zusammengefasst. Mit Hilfe der Diskriminanzanalyse konnte eine durchschnittliche Erkennungsrate von 45,6 % erreicht werden. Detaillierte Ergebnisse dieser Auswertungen befinden sich im Anhang. Getreide (HORSV) konnte in dieser Mischverunkrautung immer noch zu 76,9 % von den Unkräutern unterschieden werden. Die Differenzierung von einzelnen Unkrautarten in diesen Entwicklungsstadien variierte zwischen 12,5 % und 80 % und ist damit unzureichend. Allerdings kamen auch hier Fehlklassifikationen häufig mit ähnlichen Pflanzenarten vor.

Eine Zusammenfassung der Unkrautarten in Unkrautklassen führte daher zu besseren Ergebnissen. Durch die Einteilung in Klassen konnten durchschnittlich 79 % der Pflanzen unterschieden werden (Tabelle 4.10). Dabei kam es bei *Braugerste* (84,6 %), *dikotylen Unkräutern* (93,9) und *Ungräsern* (69,9 %) zu guten Ergebnissen. Aber auch wenn *Galium aparine* nur zu 34,3 % als Unkrautart richtig klassifiziert wurde, so geschah eine Fehlklassifikation fast ausschließlich innerhalb der dikotylen Unkrautgruppe.

Tab. 4.10: Richtige Klassifizierungsrate in % für Unkrautklassen (BBCH 10 bis 12) in Braugerste

	Klassifizierungsrate (%) Unkrautklassen (BBCH 10-12) Braugerste				
	Braugerste	Dikotyle	Ungräser	GALAP	BROMUS
Braugerste	84,6	0,0	0,0	3,8	11,5
Dikotyle	1,6	93,9	1,3	0,7	2,5
Ungräser	1,6	9,6	69,9	0,0	18,9
GALAP	2,9	62,9	0,0	34,3	0,0
BROMUS	0,0	33,8	12,5	0,0	53,8

20 Unkrautarten in Zuckerrüben konnten bei einem Stichprobenumfang von $n = 1012$ durchschnittlich zu 40,7 % korrekt klassifiziert werden (Tabelle im Anhang). Eine Differenzierung zwischen Zuckerrüben und Unkräutern gelang dabei zu 83 %. Einzelne Unkrautarten konnten maximal zu 71,0 % (AGREE) von anderen Arten richtig unterschieden werden. Ansonsten war eine Trennung von Unkrautarten in verschiedenen Entwicklungsstadien bei richtigen Klassifizierungen von 2 % bis 59 % eher unzureichend. Durch ein Zusammenfassen von Unkrautarten in Unkrautklassen (Tabelle 4.11) wurde ein besseres Ergebnis erzielt. Auch wenn eine Artenerkennung der Problemunkräuter *Galium*

aparine (GALAP) und *Abutilon theophrasti* (ABUTH) in diesen Entwicklungsstadien nicht mehr möglich ist, werden die Pflanzen der dikotylen Unkrautklasse zugeordnet.

Tab. 4.11: Richtige Klassifizierungsrate in % für Unkrautklassen (BBCH 10 bis 12) in Zuckerrüben

	Klassifizierungsrate (%) Unkrautklassen (BBCH 10-12) Zuckerrüben				
	Zuckerrübe	Dikotyle	Ungräser	GALAP	ABUTH
Zuckerrübe	83,0	17,0	0,0	0,0	0,0
Dikotyle	1,0	95,7	1,8	0,5	1,0
Ungräser	1,0	31,6	67,3	0,0	0,0
GALAP	2,9	85,7	0,0	8,6	2,9
ABUTH	0,0	82,9	0,0	0,0	17,1

In Mais (ZEAMX) wurden 18 Unkrautarten (n = 973) untersucht und eine Differenzierung von 41,6 % zwischen den Arten erreicht (Tabelle im Anhang). Mais konnte dabei zu 85 % von den Unkräutern richtig unterschieden werden. Ansonsten war die Differenzierung zwischen den einzelnen Unkrautarten mit 0 % (*Amaranthus retroflexus* L.) bis 63 % (*Galinsoga parviflora* Cav.) unbefriedigend. Aber auch hier waren meist Fehlklassifikationen innerhalb einer Unkrautklasse zu beobachten. Die Klassifizierung dieser Pflanzen in die Unkrautklassen dikotyle Unkräuter, Ungräser und Hirsen ergab eine durchschnittliche Erkennungsrate von 88,2 %. Tabelle 4.12 zeigt, dass sich Mais, dikotyle Unkräuter und Ungräser gut voneinander unterscheiden lassen. Die Differenzierung von Hirsen (54,7 %) ist eher unbefriedigend.

Tab. 4.12: Richtige Klassifizierungsrate in % für Unkrautklassen (BBCH 10 bis 12) in Mais

	Klassifizierungsrate (%) Unkrautklassen (BBCH 10-12) Mais			
	Mais	Dikotyle	Ungräser	Hirsen
Mais	90,0	5,0	0,0	5,0
Dikotyle	0,6	97,8	0,1	1,5
Ungräser	0,0	16,3	77,6	6,1
Hirsen	0,0	44,7	0,6	54,7

Da für alle Unkrautarten Aufnahmen bis ins Entwicklungsstadium BBCH 14 gemacht worden sind, wurden auch Datenbanken von Unkräutern mit ihren Formmerkmalen in den unterschiedlichen Entwicklungsstadien für Mais (n = 1243), Zuckerrüben (n = 1238) und Braugerste (n = 1330) erstellt. Die statistische Untersuchung dieser Datenbanken ergab für Mais eine korrekte Klassifizierung von 36,4 % innerhalb der Arten und von 87 % innerhalb von Unkrautklassen. Für Zuckerrüben konnte eine korrekte Klassifizierung von 37,4 % (Unkrautarten) bzw. 84,2 % (Unkrautklassen), für Braugerste eine solche von 36,9 % (Unkrautarten) bzw. 75,8 % (Unkrautklassen) erzielt werden. Detaillierte Ergebnisse dieser

Auswertungen befinden sich im Anhang. Abbildung 4.15 zeigt zusammenfassend die Ergebnisse für die Klassifikation von Unkrautarten und –klassen in Braugerste, Mais und Zuckerrüben in den verschiedenen Entwicklungsstadien.

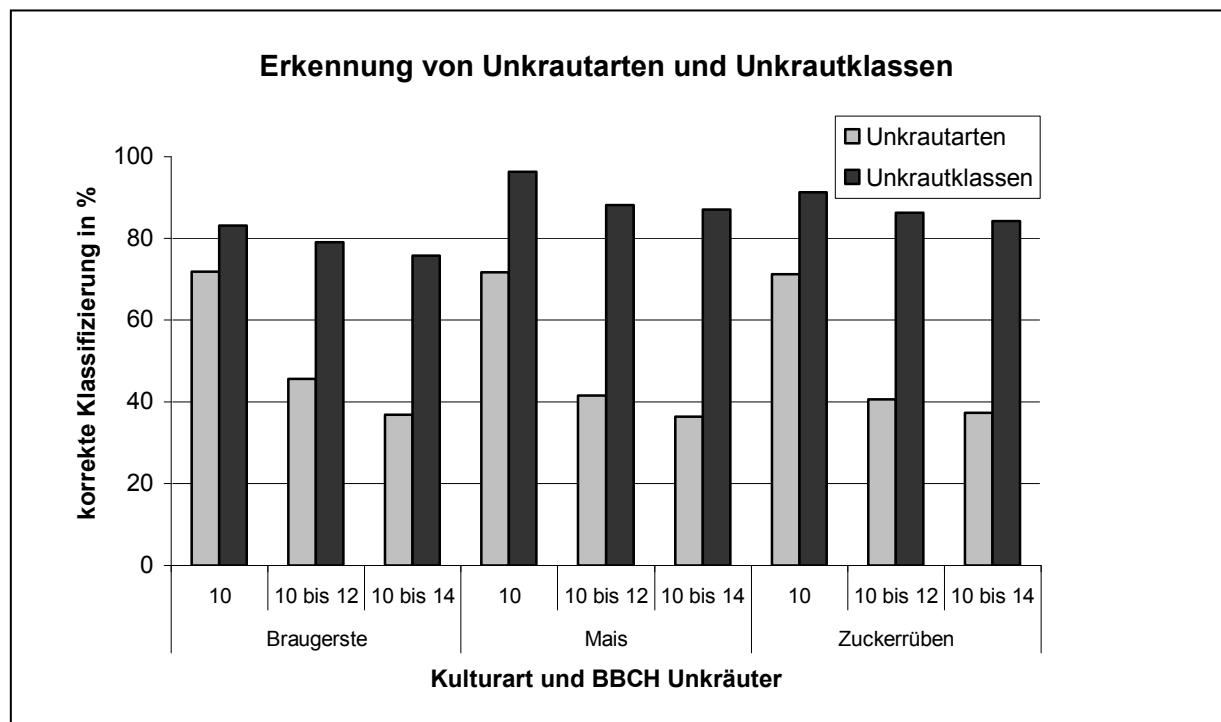


Abb. 4.15: Richtige Klassifizierungsrate in % für Unkrautarten und Unkrautklassen in Braugerste, Mais und Zuckerrüben in verschiedenen Entwicklungsstadien

4.4.2 Klassifikation unbekannter Pflanzen

Um zu testen, ob über die Formparameter der aufgenommenen Unkrautarten und den daraus resultierenden Diskriminanzfunktionen auch unbekannte Pflanzen korrekt klassifizieren, wurden beispielhaft die Formparameter der Unkrautarten *Chenopodium album* (CHEAL), *Echinochloa crus-galli* (ECHCG), *Lamium amplexicaule* (LAMAM) und *Solanum nigrum* L. (SOLNI) im Entwicklungsstadium BBCH 10 mit unbekanntem Pflanzen (PFLUGFELDER 2005) verglichen. Über die Diskriminanzanalyse ist eine *Klassifizierung von unbekanntem Objekten* möglich. Dabei werden unbekannte Pflanzen aufgrund ihrer Merkmalsausprägung eingruppiert. Die für die Trennung der Unkrautarten berechneten Diskriminanzfunktionen aus der Datenbank *Unkrautarten (BBCH 10) in Mais* (n = 113) wurden für die Klassifizierung unbekannter Pflanzen (n = 853) herangezogen. Die Ergebnisse aus Tabelle 4.13 zeigen, dass die berechneten Diskriminanzfunktionen zu einer Trennung von 94 % für die Arten in der Datenbank *Unkrautarten (BBCH 10) in Mais* führte. Die unbekanntem Pflanzen (grau) wurden zu 88 % richtig eingeordnet. Bei der Aufstellung der Diskriminanzfunktionen waren auch hier, wie schon bei der Auswertung der

Datenbanken Unkrautarten und Unkrautklassen, besonders die geometrischen Formparameter für die Trennung der Arten verantwortlich.

Tab. 4.13: Richtige Klassifizierungsrate in % für *Chenopodium album* (CHEAL), *Echinochloa crus-galli* (ECHCG), *Lamium amplexicaule* (LAMAM) und *Solanum nigrum* (SOLNI) im Entwicklungsstadium BBCH 10

	CHEAL	ECHCG	LAMAM	SOLNI
CHEAL	92,6	7,4	0,0	0,0
ECHCG	0,0	93,3	0,0	6,7
LAMAM	0,0	0,0	100,0	0,0
SOLNI	5,0	5,0	0,0	90,0
CHEAL	89,2	2,2	0,0	8,6
ECHCG	24,7	70,7	1,2	3,4
LAMAM	0,0	0,0	100,0	0,0
SOLNI	2,4	2,4	3,2	92,0

Die Auswertung der im Freiland aufgenommenen Bispektralbilder erfolgte mit der Software *IMPAS-AGRI*. Für alle Kulturarten wurden Wissensbasen entsprechend der auf dem Feld vorkommenden Unkrautarten und deren Entwicklungsstadium erstellt (OEBEL und GERHARDS 2005a). Die Wissensbasen enthielten die Formmerkmale der jeweiligen Kulturpflanze und die Formmerkmale von Unkrautarten, die entsprechend ihrer Herbizidempfindlichkeit in drei Klassen (z.B. *dikotyle Unkräuter*, *Ungräser*, *Galium aparine*) eingeteilt wurden. Diese wurden mit der Diskriminanzanalyse untersucht, wobei die Ergebnisse zur Prüfung der Merkmalsvariablen zur Formulierung einer Erkennungsstrategie nach dem Prinzip der minimalen Distanz oder Fuzzy Logic genutzt wurden. Für alle Wissensbasen waren sowohl die geometrischen Formparameter als auch einige Fourierdeskriptoren für eine Trennung von Kulturpflanzen und Unkrautklassen signifikant. Die Ergebnisse der Diskriminanzanalyse und die daraus abgeleitete Entscheidungsstrategie werden am Beispiel der Wissensbasis *Zuckerrüben* mit Formparametern der Pflanzenarten aus den Bildern *Zuckerrüben* (Schlag 6, Aufnahmedatum 27.4.2004) erläutert.

Die Diskriminanzanalyse für die Formparameter der Klassen *Zuckerrübe* (BBCH 12), *dikotyle Unkräuter* (BBCH 10 und BBCH 12), *Ungräser* (BBCH 10 und BBCH 12) und *Galium aparine* (BBCH 10) ergab drei Diskriminanzfunktionen. Diese stellten Linearkombinationen der Formparameter Fläche, Spannweite, minimale und maximale Kantenlänge, Formfaktor sowie der Fourierdeskriptoren FD4, FD5, FD6, FD11 und FD20 dar. Tabelle 4.14 zeigt die standardisierten kanonischen Diskriminanzkoeffizienten und die Gütekriterien *Eigenwert* und *Wilks Lambda* der berechneten Diskriminanzfunktionen.

Tab. 4.14: Standardisierte kanonische Korrelationskoeffizienten, Eigenwerte und Wilks Lambda der Diskriminanzfunktionen für die Wissensbasis *Zuckerrüben*

Standardisierte kanonische Diskriminanzfunktionskoeffizienten				
	Funktion			
	1	2	3	
FD4	,310	-,149	1,014	
FD5	,207	-,282	,297	
FD6	,399	-,133	-,042	
FD11	,047	,411	,011	
FD20	-,140	,402	-,251	
FF	-,394	-,904	,074	
Dmin	2,197	-,929	-,049	
Dmax	-,573	,251	-,078	
SPW	-1,889	1,244	,152	
Area	,263	,544	-,490	

Funktion	Eigenwerte				Wilks' Lambda				
	Eigenwert	% der Varianz	Kumulierte %	Kanonische Korrelation	Test der Funktion	Wilks-Lambda	Chi-Quadrat	df	Signifikanz
1	6,282	56,9	56,9	0,929	1 bis 3	0,014	562,552	30	0,000
2	3,661	33,2	90,1	0,886	2 bis 3	0,103	300,483	18	0,000
3	1,090	9,9	100	0,722	3	0,478	97,307	8	0,000

Da hohe Werte des kanonischen Diskriminanzkoeffizienten eine hohe Trennkraft der Variablen bedeuten, haben Dmin, SPW und Dmax (Funktion 1), aber auch FF (Funktion 2) sowie Fläche und FD4 (Funktion 3) eine sehr starke Trennkraft für die Differenzierung der Unkrautklassen. Die Eigenwerte der Diskriminanzfunktionen zeigen, dass mit den ersten beiden Funktionen schon über 90 % der Varianz erklärt werden können. Über *Wilks Lambda* wird getestet, ob sich die mittleren Werte der Diskriminanzfunktionen in den Klassen signifikant unterscheiden. Dies ist in der Wissensbasis *Zuckerrüben* bei einer Irrtumswahrscheinlichkeit von $p < 0,001$ in höchst signifikanter Weise der Fall.

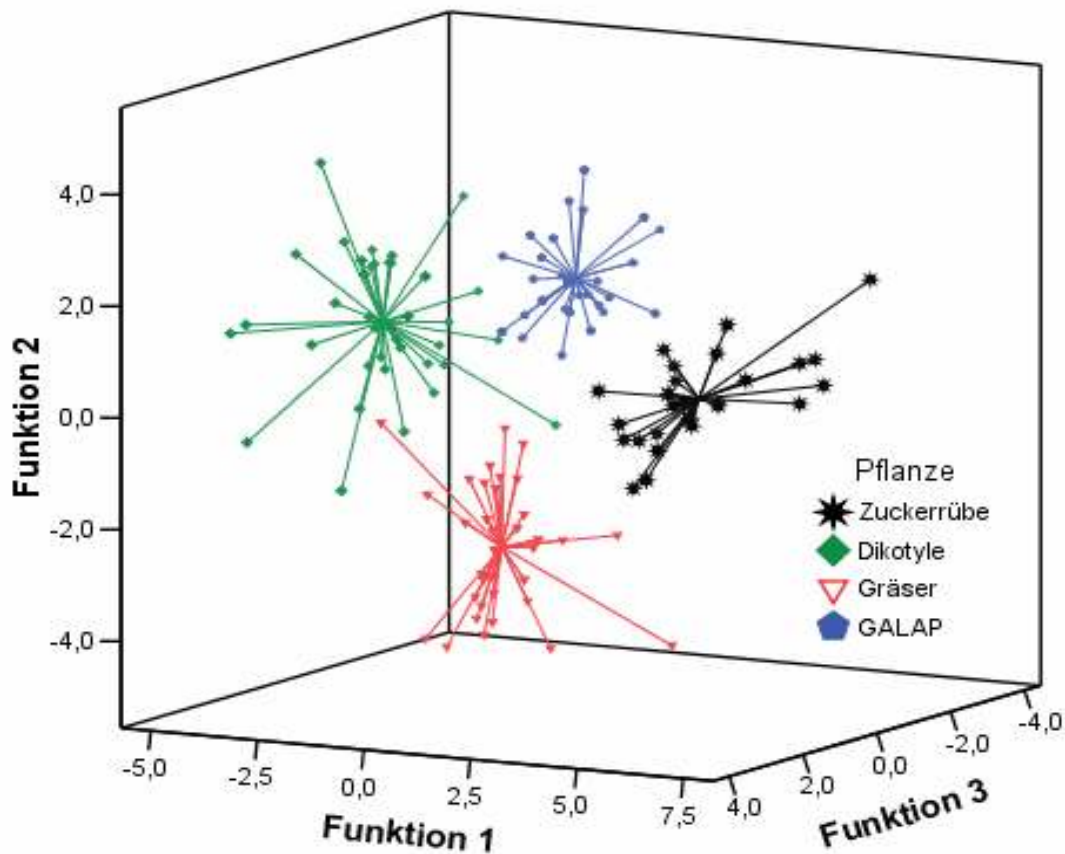


Abb. 4.16: Grafische Darstellung der Diskriminanzwerte der drei Diskriminanzfunktionen der Datenbank *Zuckerrüben*

Wie gut Kulturpflanze und die drei Unkrautklassen über die drei Diskriminanzfunktionen differenziert werden, visualisiert Abbildung 4.16. Da die Erkennung und Klassifizierung mit der Software *IMPAS-AGRI* derzeit nur über Fuzzy Logic bzw. das Verfahren der minimalen Distanz möglich ist, ist für die Optimierung der Klassifizierungsalgorithmen die Reihenfolge und Gewichtung der in die Erkennungsstrategie aufgenommenen Formparameter von großer Bedeutung. Die Variablen mit der größten diskriminatorischen Bedeutung in den Diskriminanzfunktionen können in der Software SPSS über die schrittweise Diskriminanzanalyse ermittelt werden (Tabelle 4.15).

Tab. 4.15: Ergebnisse der schrittweisen Diskriminanzanalyse der Datenbank Zuckerrübe

Aufgenommene Variablen													
Schritt	Aufgenommen	Wilks-Lambda											
		Statistik	df1	df2	df3	Exaktes F				Näherungsweise F			
						Statistik	df1	df2	Signifikanz	Statistik	df1	df2	Signifikanz
1	Area	,227	1	3	136,000	154,595	3	136,000	,000				
2	FF	,093	2	3	136,000	102,433	6	270,000	,000				
3	FD4	,048	3	3	136,000					89,842	9	326,271	,000
4	SPW	,035	4	3	136,000					75,205	12	352,176	,000
5	Dmin	,026	5	3	136,000					67,366	15	364,795	,000
6	FD20	,021	6	3	136,000					59,503	18	371,009	,000
7	FD6	,019	7	3	136,000					53,127	21	373,840	,000
8	FD11	,017	8	3	136,000					47,821	24	374,740	,000
9	FD5	,015	9	3	136,000					43,975	27	374,468	,000
10	Dmax	,014	10	3	136,000					40,723	30	373,446	,000
Minimaler partieller F-Wert für die Aufnahme ist 3,84.													
Maximaler partieller F-Wert für den Ausschluss ist 2,71.													

Für die Formulierung der Erkennungsstrategie über Fuzzy Logic bzw. nach dem Prinzip der minimalen Distanz wurden die Ergebnisse der schrittweisen Diskriminanzanalyse ausgewertet. Die Reihenfolge und Gewichtung der Formparameter wurde beibehalten. Tabelle 4.16 zeigt die Reihenfolge, die aufgenommenen Formparameter und die Gewichtung der Parameter in der Erkennungsstrategie über Fuzzy Logic für die Auswertung von Bispektralbildern in Zuckerrüben. Bei einem Test mit 20 Beispielbildern konnten durch die Reduzierung der Erkennungsstrategie auf die ersten 6 Formparameter keine Reduzierung der Erkennungsgenauigkeit festgestellt werden.

Tab. 4.16: Reihenfolge, aufgenommene Formparameter und Gewichtung der Erkennungsstrategie mit der Wissensbasis Zuckerrüben

Schritt	Variable	Statistik	Gewichtung in %
1	Area	0,227	44
2	FF	0,093	18
3	FD4	0,048	9
4	SPW	0,035	7
5	Dmin	0,026	5
6	FD20	0,021	4
7	FD6	0,019	4
8	FD11	0,017	3
9	FD5	0,015	3
10	Dmax	0,014	3
			100

Eine Bewertung der Klassifizierungsergebnisse erfolgte über die visuelle Kontrolle von ausgewählten Bildern ($n > 400$) der Überfahrt mit den Resultaten der Ausgabedatei. Tabelle 4.17 zeigt die Klassifizierungsergebnisse für die Bispektralbilder eines Zuckerrübenschlages für die Unkrautklassen *dikotyle Unkräuter*, *Ungräser* und *Galium aparine* (GALAP).

Tab. 4.17: Richtige Klassifizierungsrate in % für Zuckerrüben Schlag 6 (Aufnahmedatum 27.4.2004, 5,30 ha, 20820 Bilder) über Fuzzy Logic

Erkennungsrate Zuckerrüben in %	<i>Beta vulgaris</i>	dikotyle Unkräuter	Ungräser	GALAP
<i>Beta vulgaris</i>	80	9	8	3
dikotyle Unkräuter	7	79	8	5
Ungräser	8	8	69	14
GALAP	5	4	14	77
Total				77

Die gewählte Erkennungsstrategie führte zu einer durchschnittlichen Erkennung von 77 %. Dabei konnten *Zuckerrübe* zu 80 %, *dikotyle Unkräuter* zu 79 % in den Entwicklungsstadien BBCH 10 und 12 sowie *Galium aparine* zu 77 % im Entwicklungsstadium BBCH 10 erkannt werden. Eine richtige Klassifizierungsrate von 69 % gelang in der Unkrautklasse *Ungräser* (BBCH 10 und 12).

Die Klassifizierungsergebnisse anhand der Diskriminanzanalyse (Tabelle 4.18) für die Wissensbasis *Zuckerrüben* (weiß) sowie für ein Testset ($n = 265$) mit den Formparametern aus unbekanntem Pflanzen (grau) werden in Tabelle 4.18 dargestellt. Dabei wird deutlich, dass sich die Formparameter von *Zuckerrüben* (BBCH 12) und *Galium aparine* (BBCH 10), wie schon in Abbildung 4.16 visualisiert, sehr gut über die berechneten Diskriminanzfunktionen von den anderen Klassen trennen lassen. Auch die Formmerkmale der Unkrautklassen *dikotyle Unkräuter* und *Ungräser*, in denen je zwei Entwicklungsstadien (BBCH 10 und 12) zusammengefasst wurden, lassen sich über diese Funktionen gut trennen. Durchschnittlich können in der Wissensbasis 97 % aller Pflanzen in die richtige Klasse eingruppiert werden. Die Klassifizierung unbekannter Pflanzen führt ebenfalls zu einem sehr guten Ergebnis. Insgesamt konnten 88,4 % der Pflanzen in die richtige Klasse eingeteilt werden. *Ungräser* konnten zu 100 % differenziert werden, *Zuckerrüben* und *Galium aparine* zu über 90 %. *Dikotyle Unkräuter* wurden zu 71,8 % richtig klassifiziert, wobei 11,3 % der Fehlklassifikationen mit der Unkrautklasse *Galium aparine* nur zu einer Verwechslung mit einer dikotylen Pflanzenart führte. Verglichen mit den Auswertungsergebnissen über Fuzzy Logic konnte durch die Klassifizierung über Diskriminanzfunktionen eine Steigerung der Erkennungsqualität von 11,4 % erreicht werden.

Tab. 4.18: Richtige Klassifizierungsrate in % für die Wissensbasis Zuckerrüben (weiß) und unbekanntem Pflanzen (grau) über die Diskriminanzanalyse

Zuckerrüben 2004				
	<i>Beta vulgaris</i>	dikotyle Unkräuter	Ungräser	<i>Galium aparine</i>
<i>Beta vulgaris</i>	100,0	0,0	0,0	0,0
dikotyle Unkräuter	0,0	89,5	2,6	7,9
Ungräser	0,0	2,5	97,5	0,0
<i>Galium aparine</i>	0,0	0,0	0,0	100,0
<i>Beta vulgaris</i>	90,4	0,0	1,9	7,7
dikotyle Unkräuter	0,8	71,8	16,1	11,3
Ungräser	0,0	0,0	100,0	0,0
<i>Galium aparine</i>	8,6	0,0	0,0	91,4

Wissensbasis Zuckerrübe (n = 140), Testset (n = 265)

Ähnlich deutliche Unterschiede bei den Klassifizierungsergebnissen zwischen dem Verfahren der statistischen Auswertung über Fuzzy Logic und der Diskriminanzanalyse konnten auch in anderen Kulturen beobachtet werden. Die Auswertungen über das Prinzip der minimalen Distanz führten zu ähnlichen Ergebnissen wie über Fuzzy Logic. Am Beispiel der Wissensbasis *Körnererbsen* (n = 126) mit den Klassen *Pisa sativa* (BBCH 11 und 12), *dikotyle Unkräuter* (BBCH 10), *Ungräser* (zum Aufnahmezeitpunkt war nur Sommergerste im Entwicklungsstadium BBCH 12 auf dem Feld aufgelaufen) und *Brassica napus* (Ausfallraps über Vorfrucht in BBCH 10) wird gezeigt, dass in diesem Fall über das Prinzip der minimalen Distanz zwar ein gutes Erkennungsergebnis erreicht wird, die Klassifizierung von unbekanntem Pflanzen über die berechneten Diskriminanzfunktionen aber auch hier zu einem besseren Ergebnis führte. Tabelle 4.19 zeigt die Ergebnisse der Auswertung für den Schlag Pützen (3,95 ha, Aufnahmedatum 13.4.2005) auf dem Betrieb Hurtz.

Tab. 4.19: Richtige Klassifizierungsrate in % für *Körnererbsen*, Pützen (Aufnahmedatum 13.4.2004, 3,95 ha, 8253 Bilder) über das Prinzip der minimalen Distanz

Erkennungsrate Körnererbsen in %	<i>Pisa sativa</i>	dikotyle Unkräuter	Ungräser	<i>Brassica napus</i>
<i>Pisa sativa</i>	85	6	3	6
dikotyle Unkräuter	7	78	3	12
Ungräser	10	11	75	4
<i>Brassica napus</i>	5	9	2	84
Total				81

Die guten Klassifizierungsergebnisse für *Pisa sativa* (85 %) und *Brassica napus* (84 %) sowie für die Klasse der *dikotylen Unkräuter* (78 %) und für *Ungräser* (75 %) lassen den Schluss zu, dass analog zu den Ergebnissen für Unkrautarten die Qualität einer Erkennung von Unkrautklassen steigt, je weniger Entwicklungsstadien der jeweiligen Unkrautklassen in

den Wissensbasen vertreten sind. Eine Klassifizierung von Bildern, in denen alle Pflanzen der Unkrautklassen im Keimblattstadium und die Kulturpflanze eventuell schon weiter entwickelt ist, wird demnach zu besseren Ergebnissen führen, als die Auswertung von Bildern, in denen alle Unkrautklassen mit Pflanzen unterschiedlicher Entwicklungsstadien vertreten sind.

Tabelle 4.20 zeigt die Klassifizierungsergebnisse für die Wissensbasis *Körnererbsen* (n = 126) und einem Testset aus den Formparametern von 371 Pflanzen. Die Diskriminanzfunktionen erlauben eine korrekte Zuordnung von 97 % aller Pflanzen der Wissensbasis (weiß). Die Pflanzen des Testsets werden zu 98 % richtig klassifiziert. Auch hier wird über die Diskriminanzanalyse eine Verbesserung der Erkennungsqualität von 17 % erzielt.

Tab. 4.20: Richtige Klassifizierungsrate in % für die Wissensbasis *Körnererbsen* (weiß) und unbekanntes Pflanzen (grau) über die Diskriminanzanalyse

Erkennungsrate Körnererbsen in %	<i>Pisa sativa</i>	dikotyle Unkräuter	Ungräser	<i>Brassica napus</i>
<i>Pisa sativa</i>	100,0	0,0	0,0	0,0
dikotyle Unkräuter	0,0	94,3	0,0	5,7
Ungräser	6,5	0,0	93,5	0,0
<i>Brassica napus</i>	0,0	0,0	0,0	100,0
<i>Pisa spp.</i>	96,5	0,0	3,5	0,0
dikotyle Unkräuter	0,0	100,0	0,0	0,0
Ungräser	4,0	0,0	96,0	0,0
<i>Brassica napus</i>	0,0	0,0	0,0	100,0

Wissensbasis Körnererbsen (n = 126), Testset (n = 371)

Auch in den anderen Kulturarten wurden beispielhaft die Klassifikationsergebnisse für die Klasse Kulturpflanze und drei Unkrautklassen untersucht. Die Wissensbasis für *Körnermais* (Schlag 8, 3,55 ha, Aufnahmedatum 21.5.2004) bestand aus den Klassen *Mais* (BBCH 12 und 14), *dikotyle Unkräuter* (BBCH 10 und 12), *Ungräser* (BBCH 10 und 12) sowie *Chenopodium album* (BBCH 12 und 14). Die Klassen konnten zu 74 % voneinander unterschieden werden (Tabelle 4.21). *Mais* (81 %) war dabei gut von den Pflanzen der Unkrautklassen zu differenzieren, *dikotyle Unkräuter* (73 %) und *Chenopodium album* (70 %) wurden als Klassen zufriedenstellend klassifiziert. Dabei ist zu bemerken, dass die Fehlklassifizierungen von *dikotylen Unkräutern* zu 14 % der Klasse *Chenopodium album* und 13 % der Fehlklassifikationen der Klasse *Chenopodium album* der Klasse der *dikotylen Unkräuter* zugeordnet wurden. Da beide Klassen in der Praxis mit den gleichen Wirkstoffen behandelt wurden, führte in diesem Fall eine Fehlklassifikation nicht automatisch zu einer falschen Applikationsentscheidung.

Tab. 4.21: Richtige Klassifizierungsrate in % für *Mais* Schlag 8 (Aufnahmedatum 21.5.2004, 3,55 ha, 14508 Bilder) über Fuzzy Logic

Erkennungsrate Mais in %	<i>Zea mays</i>	dikotyle Unkräuter	Ungräser	<i>Chenopodium album</i>
<i>Zea mays</i>	81	5	7	6
dikotyle Unkräuter	10	73	4	14
Ungräser	7	9	74	10
<i>Chenopodium album</i>	2	13	15	70
Total				74

Tab. 4.22: Richtige Klassifizierungsrate in % für die Wissensbasis *Mais* (weiß) und unbekanntem Pflanzen (grau) über die Diskriminanzanalyse

Erkennungsrate Mais in %	<i>Zea mays</i>	dikotyle Unkräuter	Ungräser	<i>Chenopodium album</i>
<i>Zea mays</i>	100,0	0,0	0,0	0,0
dikotyle Unkräuter	0,0	96,8	3,2	0,0
Ungräser	0,0	2,1	97,9	0,0
<i>Chenopodium album</i>	0,0	8,3	0,0	91,7
<i>Zea mays</i>	100,0	0,0	0,0	0,0
dikotyle Unkräuter	0,0	97,9	1,3	0,8
Ungräser	0,0	6,2	90,0	3,8
<i>Chenopodium album</i>	0,0	10,8	0,0	89,2

Wissensbasis Mais (n = 232), Testset (n = 519)

Tabelle 4.22 zeigt die Erkennungsqualität der Diskriminanzfunktionen für die Wissensbasis *Körnermais* (n = 232) und dem Testset (519 Pflanzen). Die Klassen der Wissensbasis konnten zu 96,6 % richtig zugeordnet werden, die Pflanzen des Testsets zu 94,3 %. Eine Verbesserung der Erkennungsqualität von 20,4 % wurde anhand der Diskriminanzanalyse erzielt.

Für Sommergerste wurde eine Wissensbasis für die Klassen *Sommergerste* (BBCH 12 und 14), *dikotyle Unkräuter* (BBCH 10 und 12), *Ungräser* (BBCH 10 und 12) und *Galium aparine* (BBCH 10) erstellt; hierbei wurden die Bilder der Überfahrt *Sommergerste* (Schlag 8, 3,55 ha, Aufnahmedatum 18.4.2005) über das Verfahren der Fuzzy Logic ausgewertet (Tabelle 4.23). Die visuelle Prüfung der Testbilder mit den Daten der Auswertungsdatei ergab eine durchschnittliche korrekte Klassifizierung von 73 %. Dabei konnten Pflanzen der Klasse *Galium aparine* (78 %), deren Formmerkmale mit nur einem Entwicklungsstadium in die Wissensbasis aufgenommen wurde, genauer klassifiziert werden als *Sommergerste* (69 %), *dikotyle Unkräuter* (74 %) und *Ungräser* (72 %).

Tab. 4.23: Richtige Klassifizierungsrate in % für *Sommergerste* Schlag 8 (Aufnahmedatum 18.4.2005, 3,55 ha, 17004 Bilder) über Fuzzy Logic

Erkennungsrate Sommergerste in %	<i>Hordeum</i> <i>spp.</i>	dikotyle Unkräuter	Ungräser	<i>Galium</i> <i>aparine</i>
<i>Hordeum spp.</i>	69	10	12	9
dikotyle Unkräuter	9	74	9	8
Ungräser	13	10	72	5
<i>Galium aparine</i>	9	6	7	78
Total				73

Auch für *Sommergerste* konnte die Erkennungsqualität über eine Auswertung anhand der Diskriminanzfunktionen verbessert werden (Tabelle 4.24). Für die Wissensbasis *Sommergerste* (n = 145) konnte eine durchschnittliche Erkennung von 96,9 % erzielt werden. Das Testset (542 Pflanzen) konnte durchschnittlich zu 94 % richtig klassifiziert werden.

Tab. 4.24: Richtige Klassifizierungsrate in % für die Wissensbasis *Sommergerste* (weiß) und unbekanntes Pflanzen (grau) über die Diskriminanzanalyse

Erkennungsrate Sommergerste in %	<i>Hordeum</i> <i>spp.</i>	dikotyle Unkräuter	Ungräser	<i>Galium</i> <i>aparine</i>
<i>Hordeum spp.</i>	100,0	0,0	0,0	0,0
dikotyle Unkräuter	0,0	95,0	5,0	0,0
Ungräser	0,0	2,1	97,9	0,0
<i>Galium aparine</i>	0,0	0,0	5,3	94,7
<i>Hordeum spp.</i>	96,5	3,6	3,6	3,6
dikotyle Unkräuter	0,0	86,6	8,7	4,7
Ungräser	0,0	4,4	92,9	2,7
<i>Galium aparine</i>	0,0	0,0	0,0	100,0

Wissensbasis Sommergerste (n = 145) Testset (n = 542)

Für Winterraps (Eisenmustal, 3,46 ha, Aufnahmedatum 15.9.2004) bestand die Wissensbasis aus den Klassen *Brassica napus* (BBCH 10 und 11), *dikotyle Unkräuter* (BBCH 10 und 12), *Ungräser* (BBCH 10) sowie *Hordeum spp.* (BBCH 12). Die visuelle Überprüfung der Testbilder mit den Daten der Auswertungsdatei ergab eine durchschnittliche korrekte Klassifizierung von 85 % (Tabelle 4.25) über das Prinzip der minimalen Distanz. Da sich die von der Vorfrucht aufgelaufene *Sommergerste* im Entwicklungsstadium BBCH 12 deutlich von den gerade auflaufenden *Ungräsern* (BBCH 10) unterschied, konnten hier sehr gute Klassifizierungsergebnisse erzielt werden. Auch *Brassica napus* (85 %) ließ sich in diesem Fall sehr gut von den Pflanzen der *dikotylen Unkrautklasse* (82 %) unterscheiden.

Tab. 4.25: Richtige Klassifizierungsrate in % für *Winterraps*, Eisenmustal (Aufnahmedatum 15.9.2004, 3,46 ha, 17004 Bilder) über das Prinzip der minimalen Distanz

Erkennungsrate Winterraps in %	<i>Brassica napus</i>	dikotyle Unkräuter	Ungräser	<i>Hordeum spp.</i>
<i>Brassica napus</i>	85	5	2	8
dikotyle Unkräuter	7	82	11	0
Ungräser	6	5	85	4
<i>Hordeum spp.</i>	2	8	2	88
Total				85

Aufgrund der starken morphologischen Unterschiede der in der Wissensbasis aufgenommenen Pflanzen der verschiedenen Klassen, aber auch bedingt durch die Homogenität der Formparameter innerhalb der Klassen, konnte für die Wissensbasis Winterraps eine vollständige (100 %) Trennung über die Diskriminanzfunktionen erzielt werden. Auch das Testset (n = 279) konnte zu 99 % richtig klassifiziert werden (Tabelle 4.26).

Tab. 4.26: Richtige Klassifizierungsrate in % für die Wissensbasis *Winterraps* (weiß) und unbekanntes Pflanzen (grau) über die Diskriminanzanalyse

Erkennungsrate Winterraps in %	<i>Brassica spp.</i>	dikotyle Unkräuter	Ungräser	<i>Hordeum spp.</i>
<i>Brassica spp.</i>	100,0	0,0	0,0	0,0
dikotyle Unkräuter	0,0	100,0	0,0	0,0
Ungräser	0,0	0,0	100,0	0,0
<i>Hordeum spp.</i>	0,0	0,0	0,0	100,0
<i>Brassica spp.</i>	99,2	0,8	0,0	0,0
dikotyle Unkräuter	0,0	100,0	0,0	0,0
Ungräser	0,0	0,0	100,0	0,0
<i>Hordeum spp.</i>	3,0	0,0	0,0	97,0

Wissensbasis Winterraps (n = 147), Testset (n = 279)

Die in den Wissensbasen zusammengefassten Formparameter waren in der Lage, anhand der jeweiligen Klassifikationsverfahren richtige Klassifikationsraten von 73 % bis 99 % bei der Erkennung von unbekanntes Pflanzen zu erzielen. Abbildung 4.17 fasst die Klassifizierungsergebnisse der Überfahrten in den verschiedenen Kulturarten über Fuzzy Logic bzw. minimale Distanz sowie über Diskriminanzfunktionen zusammen.

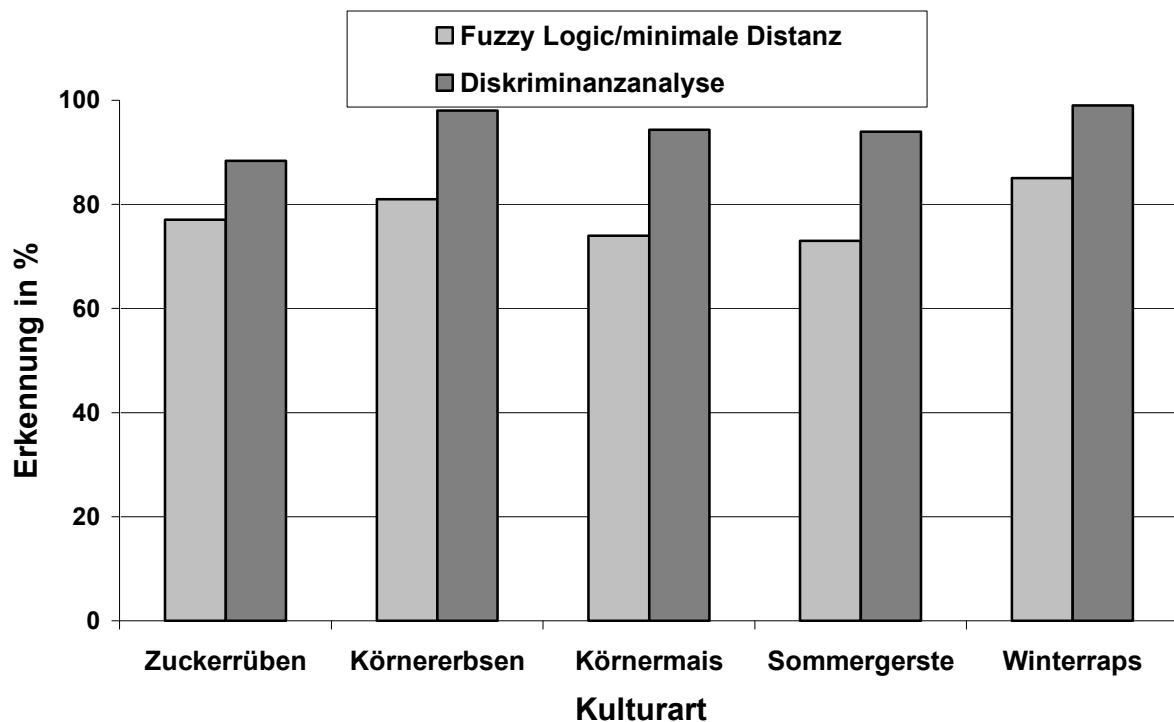


Abb. 4.17: Richtige Klassifizierungsrate in % für Überfahrten in Zuckerrüben, Körnererbsen, Körnermais, Sommergerste und Winterraps über Fuzzy Logic/minimale Distanz und über Diskriminanzfunktionen

Dabei wird deutlich, dass eine Klassifizierung von unbekanntem Pflanzen über die vorher zur Trennung der Klassen in einer Wissensbasis berechneten Diskriminanzfunktionen die Erkennungsergebnisse erheblich verbessern kann. In den untersuchten Fällen wurde eine Steigerung der durchschnittlichen richtigen Klassifikationsrate von 11 % (Zuckerrüben) bis 21 % (Sommergerste) erreicht.

Neben der Qualität (Erkennungsgenauigkeit) eines Bildverarbeitungsverfahrens zur Pflanzenerkennung ist auch die Geschwindigkeit der Bildauswertung, insbesondere für einen möglichen Einsatz im Online-Verfahren, zur direkten Ansteuerung einer Pflanzenschutzspritze von Bedeutung. Die Geschwindigkeit der Bildverarbeitungssoftware ist u.a. abhängig von der Anzahl der im Bild zu klassifizierenden Objekte, der Anzahl der Datensätze in der Wissensbasis, der Erkennungsstrategie und dem gewählten Klassifikationsverfahren. Alle Bilder wurden mit einem Standard PC (Pentium IV, 3 GHz) ausgewertet. Tabelle 4.27 zeigt die Auswertungsgeschwindigkeit (Bilder pro Sekunde) ausgewählter Überfahrten in Abhängigkeit von der Anzahl der Datensätze in der Wissensbasis, der Erkennungsstrategie und dem gewählten Klassifikationsverfahren. Dabei wurde eine Auswertungsgeschwindigkeit von 18 bis 20 Bildern pro Sekunde erreicht.

Tab. 4.27: Auswertungsgeschwindigkeit der Bildverarbeitungssoftware *IMPAS-AGRI* in Abhängigkeit von der Anzahl der Datensätze in der Wissensbasis, der Erkennungsstrategie und dem gewählten Klassifikationsverfahren

	Zucker- rüben	Körner- erbsen	Körner- mais	Sommer- gerste	Winter- raps	Durch- schnitt
Anzahl Bilder	20820	8253	14508	17004	7053	
Datensätze in der Wissensbasis	140	126	232	145	147	158
Formparameter in der Erkennungsstrategie	10	15	12	11	11	12
Bilder/Sekunde Fuzzy Logic	17	18	12	30	22	20
Bilder/Sekunde minimale Distanz	15	16	10	26	22	18

4.5 Diskussion

Die verwendete Mustererkennungssoftware ermöglicht einen flexiblen und effektiven Aufbau von Datenbanken mit Formparametern von Pflanzenarten. Die Erkennung von Pflanzenarten über Formparameter hat den Vorteil, dass sowohl die geometrischen Formmerkmale als auch die Fourierdeskriptoren, die den Konturverlauf der Pflanze größen- und lageinvariant beschreiben, für die Klassifizierung von neuen Pflanzen beliebig eingesetzt werden können. Auch wenn sich die Formmerkmale von Pflanzenarten im Laufe des Wachstums ändern, so sind sie relativ homogen innerhalb eines Entwicklungsstadiums.

Formmerkmale von Pflanzen bilden einen *digitalen Fingerabdruck* der jeweiligen Art. Dies macht eine Übertragbarkeit der Datenbanken für Testpflanzen anderer Regionen möglich, bei der die Wissensbasis flexibel den jeweils vorgefundenen Pflanzenarten angepasst werden kann.

Die Differenzierung von Pflanzenarten über Farbmerkmale gestaltet sich bei der digitalen Bildanalyse schwierig, da Unterschiede im Spektralverhalten von verschiedenen Pflanzen allgemein schwach ausgeprägt sind (STAFFORD und BENNLOCH 1997) und von herkömmlichen digitalen Farbkameras nicht ausreichend aufgelöst werden können. Faktoren wie Nährstoffversorgung, Alter der Pflanzen, Wasserversorgung, Krankheitsstress und Intensität der Beleuchtung verändern die farbliche Darstellung von Pflanzen (VRINDTS und

DE BAERDEMAEKER 1997) und machen eine Erkennung gleicher Pflanzenarten unter variablen Umweltbedingungen häufig unmöglich (EL-FAKI *et al.* 2000).

Die Klassifizierung von Unkrautarten oder Unkrautklassen über Formparameter mit Hilfe der Diskriminanzanalyse führte zu sehr hohen Erkennungsraten. Die geometrischen Formmerkmale tragen bei den ermittelten Diskriminanzfunktionen wesentlich zu einer Differenzierung der Arten bei. Aber auch einzelne Fourierdeskriptoren verbessern den Erkennungsprozess. Durchschnittliche Klassifizierungsergebnisse für Unkrautarten von über 70 % (BBCH 10) in Getreide, Mais und Zuckerrüben zeigten, dass sich Kulturpflanzen und Unkräuter sehr gut unterscheiden lassen. Für das Unkrautartenspektrum in Braugerste konnte die Kulturpflanze exakt von den Unkräutern differenziert werden. Eine sehr gute Trennung gelang auch bei *Galium aparine* (GALAP). Die Trennung von Ungräsern nach Arten gelang nur bedingt. Allerdings waren Fehlinterpretationen meist nur innerhalb der Klasse der monokotylen Pflanzenarten zu beobachten. Auch in Zuckerrüben und Mais lassen sich die Kulturpflanzen von den Unkräutern und Ungräsern im Keimlingsstadium sehr gut unterscheiden. Problemunkräuter wie *Abutilon theophrasti* (ABUTH) und *Galium aparine* (GALAP) können im Keimblattstadium sehr gut von anderen Unkrautarten in Zuckerrüben unterschieden werden und könnten somit für die Unkrautbekämpfung auch selektiv erfasst und behandelt werden. In Mais können Hirsearten wie *Echinochloa crus-galli* (ECHCG) und *Setaria viridis* (SETVI) sehr gut von anderen Gräsern wie *Agropyron repens* (AGREE) und den dikotylen Unkräutern unterschieden werden. Ebenfalls lassen sich Problemunkräuter wie *Chenopodium album* (CHEAL) und *Convolvulus arvensis* (CONAR) im Keimblattstadium sehr gut differenzieren. Auch hier wären durch die bildanalytische Erfassung von Unkrautarten Möglichkeiten einer gezielteren Unkrautbekämpfung im Keimblattstadium gegeben.

Die Ergebnisse für die Differenzierung von Unkrautarten im Keimblattstadium über Formparameter werden durch Arbeiten von SÖKEFELD *et al.* (1994), SOGAARD und HEISEL (2002) sowie SÖKEFELD und GERHARDS (2004) bestätigt. Auch hier konnten Unkrautarten anhand von Formparametern je nach Entwicklungsstadium und untersuchten Arten zu 75 bis 90 % differenziert werden. SÖKEFELD *et al.* (2002) und GERHARDS *et al.* (2000) weisen darauf hin, dass die Erkennung von Unkrautarten mit Hilfe von Bildverarbeitungsverfahren in der Unkrautbekämpfung zu einer gezielteren Auswahl von Herbiziden führen kann.

Durch die phänologischen Veränderungen während des Wachstums der Pflanzen steigt auch die Variabilität der Formparameter der einzelnen Arten. Eine Differenzierung von Arten innerhalb einer Mischverunkrautung von Pflanzen in verschiedenen Entwicklungsstadien

wird dadurch erschwert. Durchschnittliche Erkennungsraten von 40,7 % bis 45,6 % (Unkrautarten in BBCH 10 bis 12) lassen darauf schließen, dass eine artenspezifische Erkennung über das Keimblattstadium hinaus in der Praxis nicht sinnvoll ist. Um auch Pflanzenarten in fortgeschrittenem Entwicklungsstadium differenzieren zu können, sollte geprüft werden, ob durch zusätzliche Formparameter eine bessere Differenzierung von Pflanzenarten innerhalb einer Mischverunkrautung möglich ist. Verschiedene Arbeiten lassen darauf schließen, dass die Erkennungsqualität von der Anzahl und Auswahl der benutzten Formparameter abhängig ist. So konnten AITKENHEAD *et al.* (2003) für die Differenzierung von *Daucus carota* und den Unkräutern *Lolium perenne* und *Chenopodium album* über das Formmerkmal *Verhältnis Umfang zu Fläche* nur 52 % bis 74 % korrekte Klassifizierungen erzielen. PHILIPP *et al.* (2002) nahmen zur Unterscheidung von mono- und dikotylen Pflanzenregionen Rundheit, Kreisförmigkeit, Konvexität, Kompaktheit sowie geometrische Momente als Differenzierungsparameter in die Entscheidungsstrategie auf und konnten ein Ergebnis von 77 % erreichen. Da bei den Untersuchungen festgestellt wurde, dass Fehlklassifikationen von Arten meist innerhalb der mono- bzw. dikotylen Pflanzengruppe stattfanden, sind Verwechslungen innerhalb einer Unkrautklasse für den praktischen Einsatz in der Unkrautbekämpfung von geringer Bedeutung. Es reicht, Pflanzenarten mit ähnlicher Herbizidempfindlichkeit in Unkrautklassen zusammenzufassen und eine möglichst hohe Differenzierung zwischen den Klassen zu erzielen. Die Möglichkeit, nicht nur zwischen mono- und dikotylen Unkräutern zu unterscheiden, sondern auch Problemunkräuter wie *Galium aparine* und *Abutilon theophrasti* in Zuckerrüben oder Bromusarten und andere Gräser in Getreide getrennt zu erfassen, kann dazu führen, dass durch den Einsatz von selektiven Wirkstoffen in der teilflächenspezifischen Unkrautbekämpfung zusätzliche Herbizideinsparungen realisiert werden können (OEBEL und GERHARDS 2005a).

Die Auswertung der Bispektralbilder aus Zuckerrüben, Mais, Erbsen, Sommergerste und Winterraps haben gezeigt, dass die Erkennungsqualität auch mit der gewählten Erkennungsstrategie und dem Klassifikationsverfahren zusammenhängt. Die Trennung von Unkrautklassen über Diskriminanzfunktionen war in allen Kulturen der Klassifikation über Fuzzy Logic oder dem Prinzip der minimalen Distanz überlegen. Eine Veränderung des Klassifikationsverfahrens in der Bildauswertungssoftware würde daher die Auswertungsqualität steigern. Auch wird dem Anwender über die Diskriminanzanalyse ein automatisiertes Werkzeug zur Evaluierung der Trennschärfe der von ihm eingesetzten Wissensbasis an die Hand gegeben. Die Zusammensetzung der Wissensbasis könnte dann je nach Unkrautart und Entwicklungsstadium der Pflanzen anhand einer auf dem PC hinterlegten Datenbank individuell für jeden Schlag definiert werden. Die Klassifizierungsergebnisse der von ihm benutzten Formparameter können dann situationsbezogen Rückschlüsse auf die zu

erwartende Erkennungsqualität geben. Im Online-Verfahren kann über sporadisch gespeicherte Bilder auch nach der Herbizidbehandlung noch eine Qualitätskontrolle der Bildauswertung gewährleistet werden.

Fehlklassifikationen können im Offline- und Online-Verfahren zu falschen Bekämpfungsentscheidungen führen. Es ist daher zu überlegen, ob für die Klassifizierung von Unkrautarten oder –klassen nicht eine Mindestzugehörigkeit zu der jeweiligen Gruppe angegeben werden sollte. Pflanzen, die diesen Zugehörigkeitsgrad nicht erreichen, sollten als unbekannt klassifiziert werden. Mit dem verwendeten Mustererkennungsprogramm kann es durch überlappende Konturen von Pflanzen zu Fehlklassifikationen oder zu einer Klassifizierung als unbekannte Pflanze kommen. Im Feldeinsatz wiesen überlappende Konturen meist auf eine hohe Unkrautdichte oder ein fortgeschrittenes Entwicklungsstadium der Unkräuter hin. Durch die Berechnung des Deckungsgrades von Pflanzen pro Bild als Entscheidungsmerkmal konnte so auch bei einer geringen Anzahl klassifizierter Unkräuter eine Bekämpfungsentscheidung herbeigeführt werden.

Durch die bei der Online-Bildaufnahme erreichte Dichte der Bonitурpunkte und die Vergrößerung des Bildausschnittes müssen nicht alle Pflanzen eines Bildes erkannt werden. Allerdings sollten weitere Untersuchungen darüber Aufschluss geben, welches die Mindestanforderungen an die Qualität einer bildanalytischen Auswertung von Unkrautarten und –klassen sind. Inwieweit Fehlklassifikationen bei der Bildauswertung zu falschen Bekämpfungsentscheidungen geführt haben, konnte im Rahmen dieser Arbeit nicht untersucht werden. PFLUGFELDER (2005) hat in einem Gewächshausversuch Pflanzschalen mit Unkräutern und Mais angezogen. Die mit einer Infrarotkamera aufgenommenen Bilder wurden zum Aufbau einer Datenbank mit der Software *IMPAS-AGRI* genutzt. Ein Vergleich der über die Bildverarbeitung berechneten Erkennungsraten für Unkräuter und Mais in neuen Pflanzschalen mit der tatsächlichen Pflanzenzahl ergab eine durchschnittliche Erkennung von 81 % pro Bild. Die Applikationsentscheidung wurde allerdings für 28 von 29 Pflanzschalen (97 %) richtig getroffen. RISSER (2005) führte mit derselben Software Versuche für Unkräuter in Zuckerrüben durch. Anhand vorher festgelegter Schwellenwerte führte die Online-Erkennung in 67 % der Fälle zu einer richtigen Applikationsentscheidung. In 11 % der Fälle war die Pflanzenschutzspritze ausgeschaltet, obwohl die Schadensschwelle überschritten war. Zusätzliche Untersuchungen zur Erkennungsqualität von Bildverarbeitungsverfahren in der Unkrauterkenung könnten dazu führen, dass Mindeststandards für das Verfahren erarbeitet werden. Eine objektive Qualitätsprüfung würde es Lohnunternehmern in Zukunft ermöglichen, zertifizierte Daten für eine teilschlagspezifische Unkrautbekämpfung über Applikationskarten anzubieten.

Die Forschungen im Bereich der Sensorentwicklung lassen erwarten, dass in Zukunft auch Informationen anderer Sensortypen für die Klassifizierung von Pflanzenarten zur Verfügung stehen. KIELHORN *et al.* (2000) nutzten bei der Entwicklung einer sensorgesteuerten Hacke in Mais die Pflanzenhöhe als Merkmal zur Klassifizierung von Kulturpflanze und Unkraut. Über einen Höhenprofilsensor (24 Lichtschranken) wird das Seitenprofil des Pflanzenbestandes abgetastet. Da Mais unter normalen Feldbedingungen immer die größere Pflanze darstellt, können über Quotientenbildung nicht nur Mais von Unkräutern, sondern auch mono- und dikotyle Unkräuter unterschieden werden. Eine weitere Information zur Pflanzenbestimmung in Reihenkulturen kann die Position der Pflanze sein. SOGAARD und OLSEN (2003) stellten ein computergesteuertes Verfahren zur Lokalisierung von Kulturpflanzenreihen für automatische Lenksysteme vor. Über die Auswertung von Bildern einer Videokamera wurde die Position und Richtung der Kulturpflanzenreihe mit einer Genauigkeit von 6 bis 12 mm berechnet. Über exakte Verfahren der Lokalisation von Kulturpflanzen können durch die georeferenzierte Bildaufnahme Klassifikationsmodelle zur Trennung von Kulturpflanze und Unkräutern einbezogen werden.

GERHARDS *et al.* (2002) führten aus, dass eine Vorgängerversion des hier benutzten Bildverarbeitungssystems für die Auswertung von drei Infrarotbildern mit einem PC (500 MHz) eine Sekunde benötigte. Die derzeit ermittelte Auswertungsgeschwindigkeit von 20 Bildern pro Sekunde macht die Aufnahme und Auswertung von Bildern für die Pflanzenerkennung nicht mehr zu einem limitierenden Faktor für die Online-Applikation von Herbiziden über Bildverarbeitungsverfahren. Die Entwicklung bei der Leistungsfähigkeit von Computerchips wird in Zukunft auch komplizierte Bildverarbeitungsschritte und größere Bilddaten im Millisekundenbereich auswerten können.

Bei der vorgestellten Mustererkennungssoftware handelt es sich um ein lernfähiges System, dass auch zum Schutz von Wildpflanzen eingesetzt werden kann. Der Aufbau und die Pflege einer artspezifischen Datenbank für vom Aussterben bedrohte Pflanzenarten könnten dazu führen, dass in Zukunft pflanzenkundliche Kartierungen über Bildverarbeitungsverfahren zu einem effektiven und kostengünstigen Werkzeug im Naturschutz werden. Auch kann durch das Erkennen von Unkrautarten die Biodiversität eines Ackers ermittelt werden. Dies könnte dazu führen, dass auf floristisch wertvollen Teilflächen keine chemische Unkrautbekämpfung durchgeführt wird. Auch lässt sich der Wirkungsgrad von Herbiziden durch den Einsatz von Bildaufnahme und –auswertungsverfahren nach der Herbizidbehandlung genauer bestimmen, indem die auf dem Acker verbliebenen Unkrautarten kartiert und mit der Anzahl der Unkräuter vor der Applikation verglichen werden.

5 Teilschlagspezifische Herbizidapplikation

5.1 Stand des Wissens

Die Kenntnisse über die auf dem Schlag (oder Teilschlag) vorkommenden Unkrautarten, deren räumliche und zeitliche Dynamik und deren Lebenszyklus sowie die Interaktionen mit der Kulturpflanze sind wichtige Voraussetzungen für gezielte Unkrautmanagementstrategien im Rahmen des integrierten Pflanzenschutzes (KROPF *et al.* 1996). Der ganzflächige Einsatz von Herbiziden bei sich rasch verändernden ökonomischen Rahmenbedingungen drängte die Unkrautregulierung durch Fruchtfolgegestaltung und Bodenbearbeitungsmaßnahmen stark in den Hintergrund. Die Erfahrungen über die auf dem Schlag vorhandenen Unkrautarten und deren Lebenszyklus wurden durch den Einsatz von Voraufbauherbiziden eingeschränkt. Eine erfolgreiche Managementstrategie für die Umsetzung der teilschlagspezifischen Unkrautbekämpfung beruht aber auf dem Wissen über die räumliche Verteilung von Unkrautarten und deren zeitlich differenzierter Interaktion mit der Kulturpflanze.

Populationsdynamische Studien erlauben das Erkennen und Identifizieren der Größen, über die sich die Verunkrautung beeinflussen und lenken lässt. Sie bilden die Grundlage für die Entwicklung geeigneter Managementstrategien unter Einbeziehung aller pflanzenbaulichen Maßnahmen. GRUNDY (2002) gibt einen Überblick über derzeitige Ansätze populationsdynamischer Studien zur Vorhersage des Unkrautvorkommens. Empirische Modelle können beispielsweise anhand der auf Teilflächen des Ackers vorgefundenen Samenbank einer Unkrautart Vorhersagen über die potentielle Ausbreitung in den Folgejahren treffen. Auch das Wissen über den Lebenszyklus von Unkrautarten (Dormanzzyklus, vegetatives Wachstum, Samenproduktion, Mortalität, Konkurrenz) kann Aufschluss über die räumliche und zeitliche Dynamik von Unkrautpopulationen geben. DICKE (2005) hat die räumliche und zeitliche Dynamik von *Chenopodium album* unter dem Einfluss von teilschlagspezifischer Unkrautkontrolle untersucht. Der Vergleich von erhobenen und anhand eines Prognosemodells berechneten Werten ergab, dass in 4 von 5 Jahren in einer Monokultur Mais die Verteilung dieser Unkrautart im Vergleich mit den manuell erhobenen Daten relativ genau vorhergesagt werden konnte. In einer Fruchtfolge aus Mais, Zuckerrüben, Winterweizen und Wintergerste gelang dies nicht, DUNKER *et al.* (2002) stellen ein Modell zur Populationsdynamik von *Alopecurus myosuroides* vor. Über einen zellulären Automaten wurde die räumliche Ausbreitung der Art unter Berücksichtigung von Bodeneigenschaften und pH-Wert modelliert. Auf der Basis einer Bekämpfungsschwelle von 20 Pflanzen/m² wurde prognostiziert, dass durch eine teilschlagspezifische Unkrautbekämpfung mittelfristig eine Ausbreitung der Unkrautnester über die gesamte

Fläche zu erwarten ist, was darauf schließen lässt, dass die Bekämpfungsschwelle zu hoch angesetzt war. WHEELER *et al.* (2001) untersuchten die Stabilität von Unkrautnestern der Arten *Avena fatua* und *Galium aparine* nach teilflächenspezifischer Herbizidbehandlung. Dabei wurde eine Ausbreitung der Nester von 3 Metern in Bearbeitungsrichtung über drei Jahre beobachtet. Diese Erfahrungen können zur Erstellung von Applikationskarten aus Unkrautverteilungskarten aus Vorjahren verwendet werden, indem *Pufferzonen* bei der teilschlagspezifischen Unkrautbekämpfung um die kartierten Unkrautnester aufgenommen werden. HAMOUZ *et al.* (2005) kartierten Unkrautarten über 3 Jahre auf insgesamt 188 ha Ackerfläche. Der Grad der Aggregation wurde über den Patchiness-Index nach LLOYD (1967) bestimmt. Dabei wurde eine hohe Ortstabilität von *Galium aparine* und *Viola arvensis* festgestellt. KROHMANN *et al.* (2002) bestätigten in mehrjährigen Feldversuchen die Ortstabilität verschiedener Unkrautarten. In einer Fruchtfolge mit Zuckerrüben, Winterweizen, Wintergerste und Mais konnten stabile Verteilungsmuster von *Alopecurus myosuroides*, *Viola arvensis* und *Chenopodium album* nachgewiesen werden. Aus einer Verteilungskarte für Ungräser wurden erfolgreich Applikationsentscheidungen für die Folgejahre abgeleitet.

Um zuverlässige Ergebnisse über die Verteilung von Unkräutern und das Artenspektrum der Unkrautpopulation im Feld zu erhalten, werden verschiedene Verfahren der Kartierung eingesetzt (CHAUVEL *et al.* 1998). REW und COUSENS (2001) unterscheiden zwischen diskreten und stetigen Kartierungsverfahren. Bei der diskreten Kartierung werden Unkräuter in einem vorher definierten Raster gezählt und die Daten für die nicht kartierten Flächen mit Hilfe von Interpolationsmethoden geschätzt. Dabei finden sich in der Literatur große Unterschiede hinsichtlich der benutzten Rasterweite. GERHARDS *et al.* (1997) untersuchten die Stabilität von Unkrautnestern in Mais und Soja durch eine Bonitur im Raster von 7 m * 7 m. Pro Boniturstichpunkt wurden die Pflanzenarten in einem Rahmen von 0,38 m² gezählt. Auch wenn über dieses Verfahren nur 0,8 % der Fläche untersucht wurde, konnte durch die Auswertung der Verteilungskarten mehrerer Jahre gezeigt werden, dass breitblättrige Arten wie *Helianthus annuus* L. und *Abutilon theophrasti* relativ ortsstabil waren. HÄUSLER *et al.* (1998) nutzten ein Raster von 50 m * 50 m, um die Verteilung mono- und dikotyle Arten zu erfassen. Je Rasterpunkt wurde auf einer Fläche von 0,1 m² die Art und Anzahl der aufgelaufenen Unkräuter ermittelt. Um auch die Abundanz von Unkräutern mit einer niedrigen Schadensschwelle (*Galium aparine*) sicher zu erfassen, wurde zusätzlich eine Fläche von 4 bis 6 m im direkten Umgebungsbereich des Rasterpunktes untersucht. NORDMEYER (2002) kartierte drei Unkrautklassen (dikotyle Unkräuter, Ungräser, *Galium aparine*) in Winterweizen in einem 25 m * 36 m Raster entlang der Fahrspuren. Eine selektive Bekämpfung erfolgte mit an den unterschiedlichen Klassen angepassten Schadensschwellen.

Um die Verteilung von Unkräutern anhand einer Rasterbonitur zu visualisieren, werden für die Darstellung verschiedene Interpolationsverfahren genutzt. Grundsätzlich werden dabei deterministische und geostatistische Verfahren unterschieden. Deterministische Interpolationsverfahren wie die *lineare Triangulation* (GERHARDS *et al.* 1997) oder die *Natural Neighbors Interpolation* (BACKES und PLÜMER 2003) benötigen neben den Messdaten keine weiteren Eingangsparameter und sind daher einfach zu handhaben. Beide Verfahren erzeugen eindeutige Unkrautdichteklassen anhand der eingegebenen Daten und extrapolieren nicht außerhalb des Stichprobenbereiches einer Ackerfläche. Als Beispiel für ein geostatistisches Verfahren für die Darstellung von Unkrautverteilungskarten ist das *Kriging* bekannt (HEISEL *et al.* 1996). Hierbei wird vor der Interpolation mit Hilfe von Semivariogrammen ein räumlicher Zusammenhang zwischen den Datenpunkten modelliert und bei der Visualisierung der Unkrautverteilung berücksichtigt.

Bei einer stetigen Kartierung wird die gesamte Fläche zur Abschätzung der auf dem Schlag vorkommenden Unkrautpopulationen untersucht. Bei der automatischen Unkrauterfassung können dabei die Boniturspunkte so nahe beieinander liegen, dass eine Interpolation nicht erforderlich ist. Dies kann über sensorgestützte Systeme oder über eine GPS-gestützte, visuelle Bewertung der Unkrautverteilung erfolgen. BARROSO *et al.* (2004) kartierten *Avena sterilis* während der Ernte mit einem Mähdrescher, indem sie die bei der Ernte überstehenden Rispen über die Ertragskartierung erfassten. PERRY *et al.* (2001) überfuhren Felder mit einem Geländefahrzeug (Quad), um die Arten *Alopecurus myosuroides* und *Avena fatua* zu kartieren. Dabei konnten über einen Touchscreenmonitor in Verbindung mit einem dGPS sowohl die Art als auch die Anzahl und die Position der Unkräuter aufgezeichnet werden. Ebenso wurde eine Bonitur über eine Spracherkennungssoftware, bei der Name und Dichte des Unkrautes über ein Mikrofon durch die Software gespeichert und gleichzeitig die Position erfasst wird, getestet. Die Daten konnten später in eine Applikationskarte zur teilschlagspezifischen Bekämpfung konvertiert werden, die zu einer Reduzierung der Herbizidmenge von 9 bis 42 % führte. Nachteilig war, dass durch die hohen Fahrgeschwindigkeiten die visuelle Differenzierung von Grasarten zu Fehlkartierungen führte. NAGY *et al.* (2004) kartierten die mehrjährigen Unkräuter *Cirsium arvense*, *Convolvulus arvensis*, *Polygonum amphibium* L. und *Asclepias syriaca* in einem Maisfeld durch das Umgehen der Unkrautnester, deren Positionen über ein dGPS aufgezeichnet wurden. Die so entstandenen Unkrautkarten wurden für eine Stoppelbehandlung der Unkrautnester mit nicht selektiven Herbiziden benutzt.

Eine teilschlagspezifische Herbizidapplikation sollte dazu führen, nur dort Wirkstoffe auszubringen, wo es aufgrund der Artenzusammensetzung und Unkrautdichte (Schadensschwelle) notwendig ist.

Für die Erstellung von Applikationskarten im Offline-Verfahren sind wie auch für die Unkrautbekämpfung im Online-Verfahren, Entscheidungsalgorithmen erforderlich, die dies berücksichtigen. Die gängigen Modelle einer ökonomischen Schadensschwelle für eine ganzflächige Herbizidbringung (COUSENS 1987, GEROWITT und HEITEFUSS 1990, BLACK und DYSON 1993, NORRIS 1999) gehen von der Annahme einer gleichmäßigen Unkrautdichte über die gesamte Fläche aus. Die Entscheidung über eine Behandlung wird anhand weniger Boniturwerte getroffen, die aus zufällig auf dem Feld angeordneten Zählungen stammen. Die ökonomische Schadensschwelle ist der Grenzwert der Unkrautdichte, oberhalb dessen eine Bekämpfung ökonomisch sinnvoll ist, weil der Ertragsverlust durch Unkrautkonkurrenz höher ist als die Bekämpfungskosten (KUNISCH 2002). Für die Umsetzung in der landwirtschaftlichen Praxis liegen hierfür durchschnittliche Angaben über Applikationskosten, Wirkungsgrad von Herbiziden und den zu erwartenden Ertragsverlusten vor. Bei der Anwendung der *guten fachlichen Praxis* im Pflanzenschutz (FREIER *et al.* 1999) wird implizit gefordert, nach den gegebenen technischen Möglichkeiten Befallsgrade ortsbezogen bis weit unterhalb der Schlaggrößen aufzulösen. In die Schadensschwelle für eine teilschlagspezifische Unkrautbekämpfung gehen außer der Unkrautdichte noch weitere Parameter ein, die räumlich variabel sind. Bei CHRISTENSEN *et al.* (2003) wurde als entscheidender Parameter die über das Feld variable Ertragshöhe in das Modell zur Entscheidung über die Notwendigkeit des Herbizideinsatzes in Weizen integriert. Prognosen über den Ertrag konnten mit Hilfe mehrjähriger Ertragskarten erstellt werden. Ebenfalls wurden die Konkurrenzindizes der Unkrautarten in Getreide mit einbezogen, die sich nach PALLUTT und FLATTER (1998) mit wechselnden Bodenverhältnissen ändern und damit auch teilschlagspezifisch bewertet werden können. Durch die Verarbeitung der verschiedenen Informationsebenen konnten Weizenschläge für die teilschlagspezifische Unkrautkontrolle in Unkrautmanagementzonen aufgeteilt werden, in denen unterschiedliche Bekämpfungsstrategien umgesetzt wurden (CHRISTENSEN *et al.* 1999). Durch den Einsatz von geografischen Informationssystemen ist dem Landwirt heute die Möglichkeit gegeben, georeferenzierte Ertrags- und Bodenkarten mit Informationen zu Ertragspotentialen und kleinräumigen Veränderungen der Bodeneigenschaften mit Daten über die Verteilung von Unkrautarten zu verknüpfen. Durch eine kleinräumige Erfassung sollte die Heterogenität des Unkraut- und Kulturpflanzenbestandes berücksichtigt werden. Anhand von ortspezifischen Schadensschwellen können so Applikationskarten entstehen, die Informationen darüber enthalten, welche Herbiziddosis (abhängig von Anzahl und Entwicklungsstadium der

Unkräuter) und welcher Wirkstoff (abhängig von der Unkrautart) auf der jeweiligen Teilfläche appliziert werden soll. Reduzierte Aufwandmengen führten in der Regel zu geringeren Bekämpfungserfolgen. Allerdings reichen geringe Aufwandmengen häufig aus, um unkrautbedingte Ertragsverluste zu vermeiden. In Entscheidungen über die Bemessung von Herbizidaufwandmengen sollten daher Kenntnisse über die Dosis-Wirkungsbeziehung von Herbiziden sowie des Unkraut- und Kulturpflanzenbestandes einfließen (PALLUTT 2002).

Die Umsetzung der teilschlagspezifischen Unkrautbekämpfung über Applikationskarten erfordert, dass die Pflanzenschutzspritze ein separates Aus- und Einschalten von Teilbreiten erlaubt. Im Weiteren muss sie über eine technische Ausstattung zur Regulierung der Herbiziddosis und der Steuerung über GPS verfügen (STAFFORD und MILLER 1993). Um eine Variation des Wirkstoffes während der Fahrt zuzulassen, haben in der Vergangenheit zahlreiche Hersteller an der Entwicklung eines Direkteinspeisungssystems gearbeitet (AUDENAERT 2001). Hierbei werden die hochkonzentrierten Pflanzenschutzmittel über eine Dosierpumpe in den Flüssigkeitsstrom eingespeist. Probleme bei der Direkteinspeisung unterschiedlicher Herbizide ergeben sich zum einen aus den verschiedenen Formulierungen (Viskosität, Löslichkeit) der Mittel, zum anderen aus der Reaktionszeit des Systems (SÖKEFELD *et al.* 2004). Je nach Fahrgeschwindigkeit entstehen Reaktionswege von mehr als 50 m, ehe das eingespeiste Mittel in der richtigen Konzentration aus den Düsen austritt. Im Offline-Verfahren wäre es möglich, die Reaktionswege über GPS zu berücksichtigen. Eine andere Möglichkeit, verschiedene Wirkstoffe während einer Überfahrt auszubringen, besteht durch die Integration von mehreren Applikationssystemen (Tank, Pumpe, Druckregler, Leitungssystemen, Teilbreitenschaltungen) auf einer Feldspritze (KTBL 2001).

5.2 Ziele

Das Projekt *Teilschlagspezifische Unkrautbekämpfung durch raumbezogene Bildverarbeitung im Offline- (und Online)-Verfahren (TURBO)* hat das Ziel, den Herbizideinsatz in den Fruchtarten Getreide, Raps, Erbsen, Mais und Zuckerrüben zu vermindern und nur dann Herbizide auszubringen, wenn die ökonomische Schadensschwelle, getrennt für alle vorkommenden Unkrautarten, überschritten ist. Über verschiedene Verfahren der Unkrautbonitur sollen Applikationskarten für eine selektive, an das Unkrautartenspektrum angepasste Herbizidbehandlung erzeugt werden. Die Umsetzung dieser Applikationskarten soll über eine neu zu entwickelnde Dreikammerspritze erfolgen. In diesem Kapitel sollen die verschiedenen Boniturverfahren und die Entwicklung und Umsetzung der daraus entstandenen Applikationsentscheidungen mit einer Dreikammer-

spritze bewertet werden. Da das Wissen über die Populationsdynamik von Unkräutern als Grundlage für die Entwicklung von Managementstrategien in der teilschlagspezifischen Unkrautbekämpfung dient, werden die Möglichkeiten einer Analyse der räumlichen und zeitlichen Dynamik von Unkrautarten und –klassen durch Unkrautverteilungskarten und andere ortskodierte Daten beispielhaft dargestellt. Die verwendeten Schadensschwellen und Entscheidungshilfen zur Lenkung von Herbizidapplikationen sollen untersucht und unter Berücksichtigung der Dosis-Wirkungsbeziehungen verschiedener Herbizidgruppen bewertet werden.

5.3 Material und Methoden

Eine teilschlagspezifische Unkrautbekämpfung über Applikationskarten wurde auf dem Betrieb Hurtz in Nideggen-Berg und auf der Lehr- und Forschungsanstalt Dikopshof der Universität Bonn bei Wesseling durchgeführt. Im Rahmen des Erosionsschutzprogramms führt der Betrieb Hurtz auf allen Flächen die reduzierte Bodenbearbeitung mit einer Scheibenegge durch. Auf dem Dikopshof wird der Pflug zur Grundbodenbearbeitung eingesetzt. Tabelle 5.1 gibt Auskunft über die Standort- und Bodenverhältnisse sowie Fruchtfolgen der beiden Betriebe.

Tab. 5.1: Boden- und Standortverhältnisse sowie Fruchtfolge des Betriebes Hurtz und des Dikopshofes.

Betrieb	Standortverhältnisse	Bodenverhältnisse	Fruchtfolge
Hurtz, Nideggen- Berg 15 Schläge (58,5 ha)	Kalk- und Sandstein- verwitterungsböden; 300 m über NN mit 600 mm durchschnittlichen Jahresniederschlägen; 7°C mittlere Jahrestemperatur	sandiger Lehm und Lehm mit 31 bis 64 Bodenwertzahlen	Winterraps (WR), Winterweizen (WW), Wintergerste (WG), Körnererbsen (KE), Winterweizen (WW), Sommergerste (SG)
Dikopshof, Wesseling 5 Schläge (21,2 ha)	Parabraunerde aus umlagertem Löß; 62 m über NN mit 630 mm durchschnittlichen Jahresniederschlägen; 9,7°C mittlere Jahrestemperatur	humoser, fein-sandiger Lehm mit 77 bis 83 Bodenwertzahlen	Zuckerrüben (ZR), Winterweizen (WW), Wintergerste (WG), Körnermais (KM) oder Sommergerste (SG)

Für die Erstellung von Applikationskarten wurde neben der kameragesteuerten Unkrautbonitur auch ein manuelles Boniturverfahren (Gerhards *et al.* 2005) verwendet. In einem Raster von 15 m * 7,5 m wurden pro Boniturstich Unkräuter in einem Rahmen von 0,25 m² gezählt. Auf den Parzellen des Dikopshofes wurde dabei zusätzlich eine Differenzierung nach Unkrautarten vorgenommen und erst in der Applikationskarte eine Zusammenfassung in Klassen entsprechend ihrer Herbizidempfindlichkeit und Konkurrenz-kraft durchgeführt. *Galium aparine* wurde dabei auch durch Zählung in der Umgebung der

Bonitурpunkte beobachtet und gezählt (NORDMEYER *et al.* 2003). Durch die Georeferenzierung eines Referenzpunktes (0/0) in einem projizierten Koordinatenkreuz und eines zweiten Punktes entlang der Schlaggrenze waren die Bonitурdaten später in einen für das Applikationsprogramm der Pflanzenschutzspritze lesbaren Standard-Textfile konvertierbar. Dieses Verfahren wurde auch für die Erfolgsbonitур nach der Herbizidbehandlung eingesetzt. Bei dem eingesetzten Boniturraster wurde an ca. 90 Bonitурpunkten/ha eine Fläche von 22,5 m² für die Beurteilung der Unkrautverteilung herangezogen.

Weiterhin wurden Applikationskarten über ein mobiles Geoinformationssystem (*MiniGis*) für Flächen des Betriebes Hurtz erstellt. Dabei werden in einem Handheld PDA mit GPS Antenne die georeferenzierten Schlagdaten in die GIS-Software *ArcPad* geladen. Über eine spezielle Attributtabelle konnte der Landwirt während einer Feldbonitур (Online) auf dem Schlag die GPS Koordinaten, die Unkrautart und -dichte und den Radius eines Unkrautnestes eingeben (Abbildung 5.1).

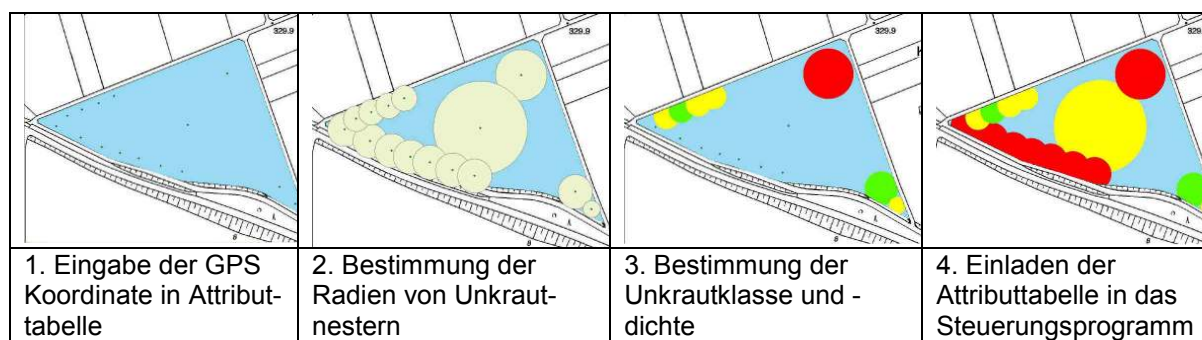


Abb. 5.1: Schritte der GPS-gestützten Unkrautbonitур mit einem mobilen GIS (MiniGIS).

Durchschnittlich 3 bis 4 Bonitурpunkte pro Hektar mit einer Fläche von 1 bis 2 m², verteilt um den Bonitурpunkt, wurden in die Bewertung aufgenommen. Die Attributtabelle erlaubte eine Datenaufnahme von bis zu drei Unkrautklassen und kann ohne Konvertierung vom Steuerungsprogramm der Dreikammerspritze direkt eingelesen werden.

Mit der Software *ArcMap* von ESRI wurden die so entstanden Karten am PC nachbearbeitet (Offline) und mit Erfahrungswerten des Landwirtes über schlagspezifische Unkrautverteilungen (Praxiswissen) verglichen. Informationen aus Luftbildern, Ertragskarten, alten Unkrautverteilungskarten oder Bodenkarten haben diese Informationen vervollständigt. Der Anwender kann hierbei interaktiv anhand von Erfahrungswerten oder Karteninformationen Unkrautnester hinzufügen oder deren Lage verändern.

Die verschiedenen Verfahren der Unkrautbonitur unterscheiden sich hinsichtlich des Informationsgehaltes, der aufgewendeten Zeit und des Boniturrasters. Abbildung 5.2 zeigt beispielhaft die räumliche Verteilung des Boniturraster für das manuelle Boniturverfahren, eine MiniGIS Bonitur und eine Kamerabonitur im 3 m * 1 m Raster.

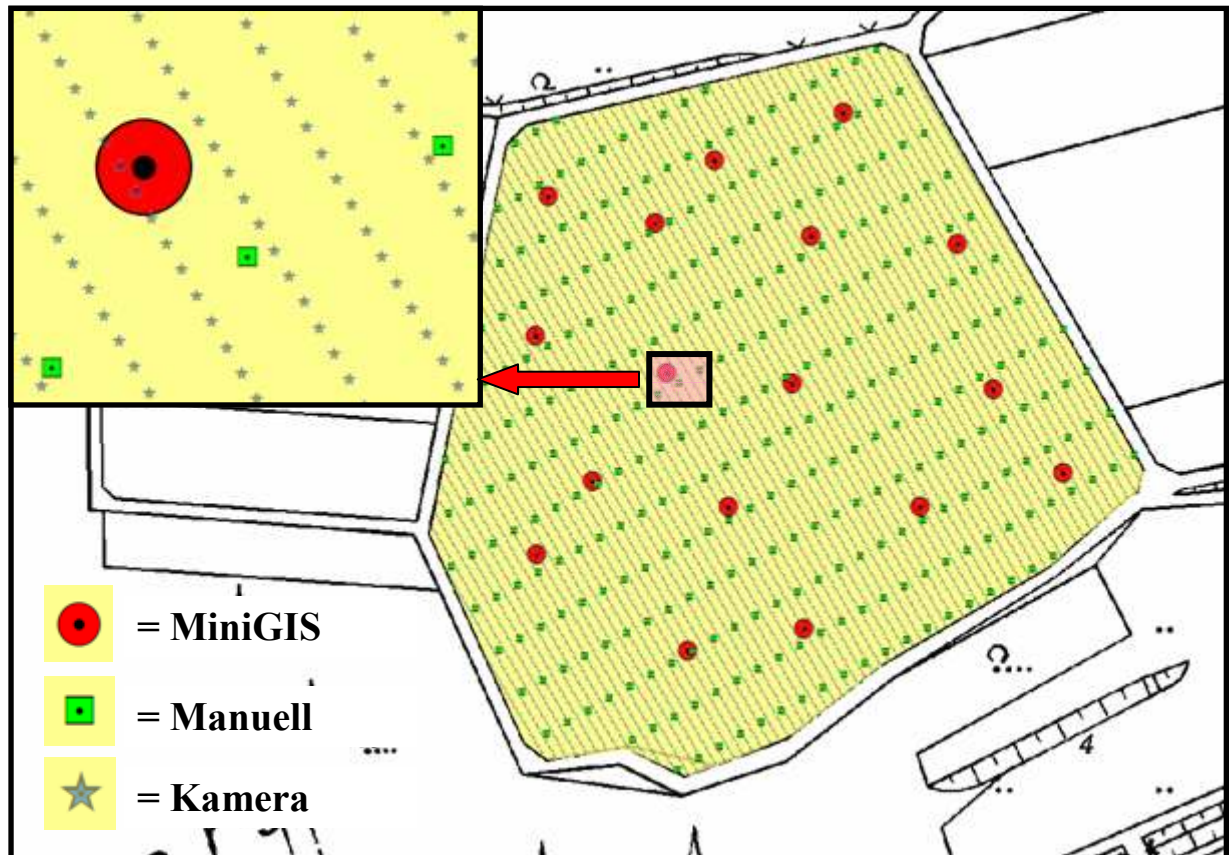


Abb. 5.2: Boniturraster für das manuelle Boniturverfahren, die MiniGIS Bonitur und eine Kamerabonitur auf dem Schlag Eisenmustal (3,46 ha).

Für die Untersuchungen zur räumlichen und zeitlichen Variabilität der Unkrautpopulationen standen für den Betrieb Hurtz neben den Unkrautverteilungskarten Bodenkarten der Reichsbodenschätzung im Maßstab 1:5000 sowie georeferenzierte Daten der deutschen Grundkarte (1:5000) zur Verfügung. Zusätzliche Informationen zur Schlaghistorie lieferte der Betriebsleiter. Für einzelne Schläge standen auch Luftbilder sowie die Daten der Feldblöcke des Betriebes Hurtz zur Verfügung. Ertragskartierungen für Getreide, Raps, Erbsen und Körnermais wurden mit einem Claas-Dominator Mährescher mit 3 m Schnittbreite durchgeführt, der über das Ertragsfassungssystem *CERES 2* der Firma RDS[®] verfügte. Bei diesem System wird der Volumenstrom des Erntegutes indirekt über eine Lichtschranke im Elevator gemessen. Eine Auswertung der Ertragsergebnisse wurde mit der Software *RDS Precision Farming* durchgeführt. Bodenkarten, Luftbilder, Schlagdaten sowie die Ergebnisse der MiniGIS Bonituren wurden mit der Software *ArcMap* von ESRI (Version 8.2) analysiert. Eine Integration aller im TURBO-Verfahren verwendeten georeferenzierten Daten in ein

einheitliches, für handelsübliche GIS-Software lesbares Format (shapefiles) wurde im Rahmen dieser Arbeit vorbereitet.

Die Berechnung der Applikationskarten wurde ebenso wie die Ansteuerung der Pflanzenschutzspritze mit der Software ©*SprayControl* (R. Lock, Lehrstuhl für Allgemeinen Pflanzenbau, Universität Bonn) durchgeführt. Aus den georeferenzierten Ergebnistabellen verschiedener Boniturverfahren können durch interaktiv einstellbare Schwellenwerte (Pflanzen pro m²) Bereiche mit geringer (grün), mittlerer (gelb) und hoher (rot) Unkrautdichte für drei Unkrautarten bzw. -klassen visualisiert werden. Durch die Eingabe differenzierter Flüssigkeitsmengen (Sollmengen) wird so in Abhängigkeit von der jeweiligen Unkrautdichte die Dosierung des Herbizides gesteuert. Abbildung 5.3 zeigt die Softwareoberfläche von *SprayControl* zur Erstellung von Applikationskarten sowie der Ansteuerung der Pflanzenschutzspritze.

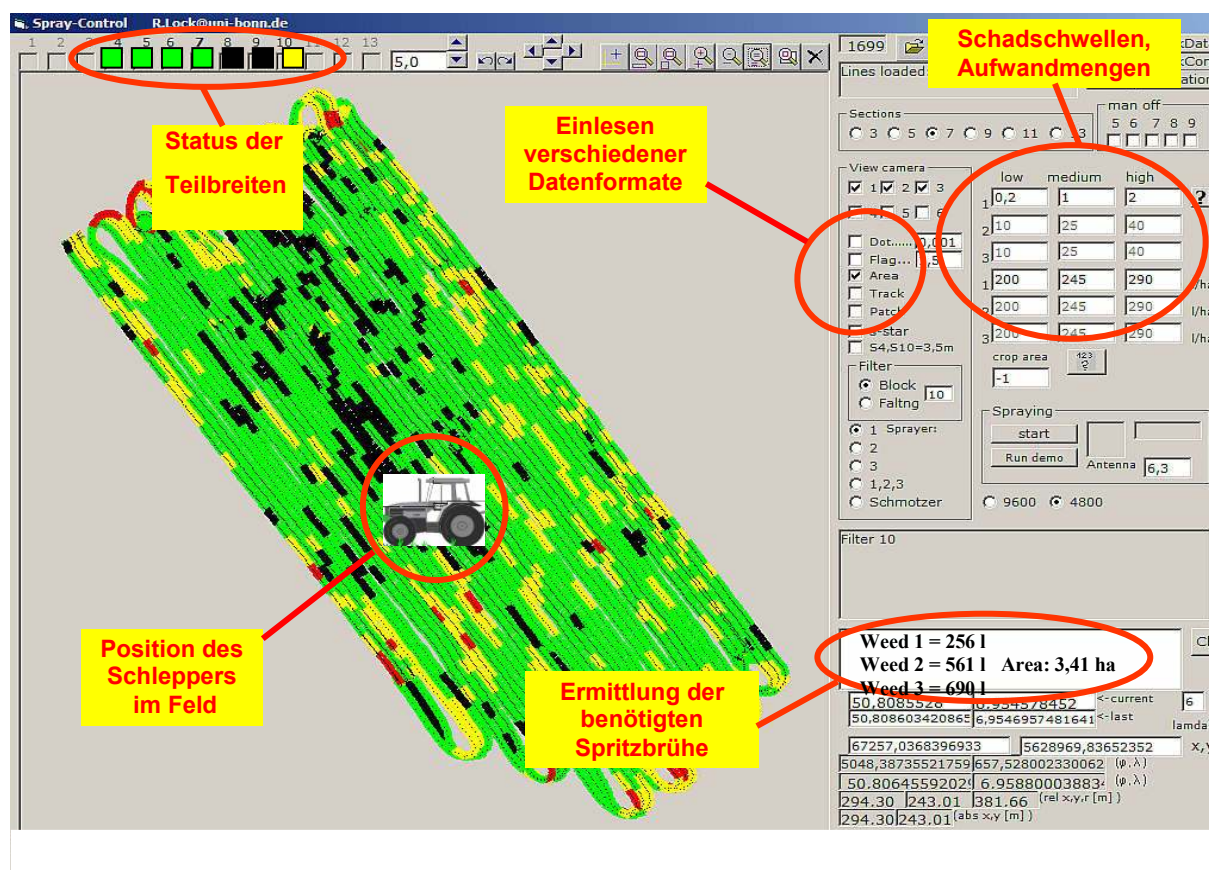


Abb. 5.3: Softwareoberfläche zur Erstellung von Applikationskarten und Ansteuerung der Pflanzenschutzspritze

Durch Einstellen der Schwellenwerte und der Sollwerte für die Aufwandmenge berechnete das Programm die benötigte Spritzbrühe, so dass keine Restmengen im Tank verblieben. Die Software bietet außerdem die Möglichkeit einer Transformation von Geodaten, wodurch eine Kompatibilität mit unterschiedlichen GPS Empfängern gewährleistet ist. Durch Eingabe

der gewünschten Anzahl der Teilbreiten ist die Software auch für andere Spritzentypen geeignet. Nach dem Start des Spritzauftrages wird die über den dGPS Empfänger ermittelte Position des Schleppers mit den korrespondierenden Informationen der Applikationskarten verglichen. Über eine serielle Schnittstelle werden diese Informationen zur Steuerung der Teilbreiten der Pflanzenschutzspritze an den Spritzcomputer weitergegeben. Über farblich differenzierte Symbole wird der Status der Teilbreiten für alle drei Spritzleitungen und die Position des Schleppers auf dem Schlag visualisiert und erlaubt so eine Kontrolle der Funktionalität durch den Anwender.

Um bei der Herbizidapplikation über Unkrautverteilungskarten die Wirkstoffmischung während der Fahrt zu variieren, wurde am Institut für Pflanzenbau der Universität Bonn gemeinsam mit der Firma *Kverneland Group/RAU* eine Dreikammerspritze entwickelt (Abbildung 5.4).

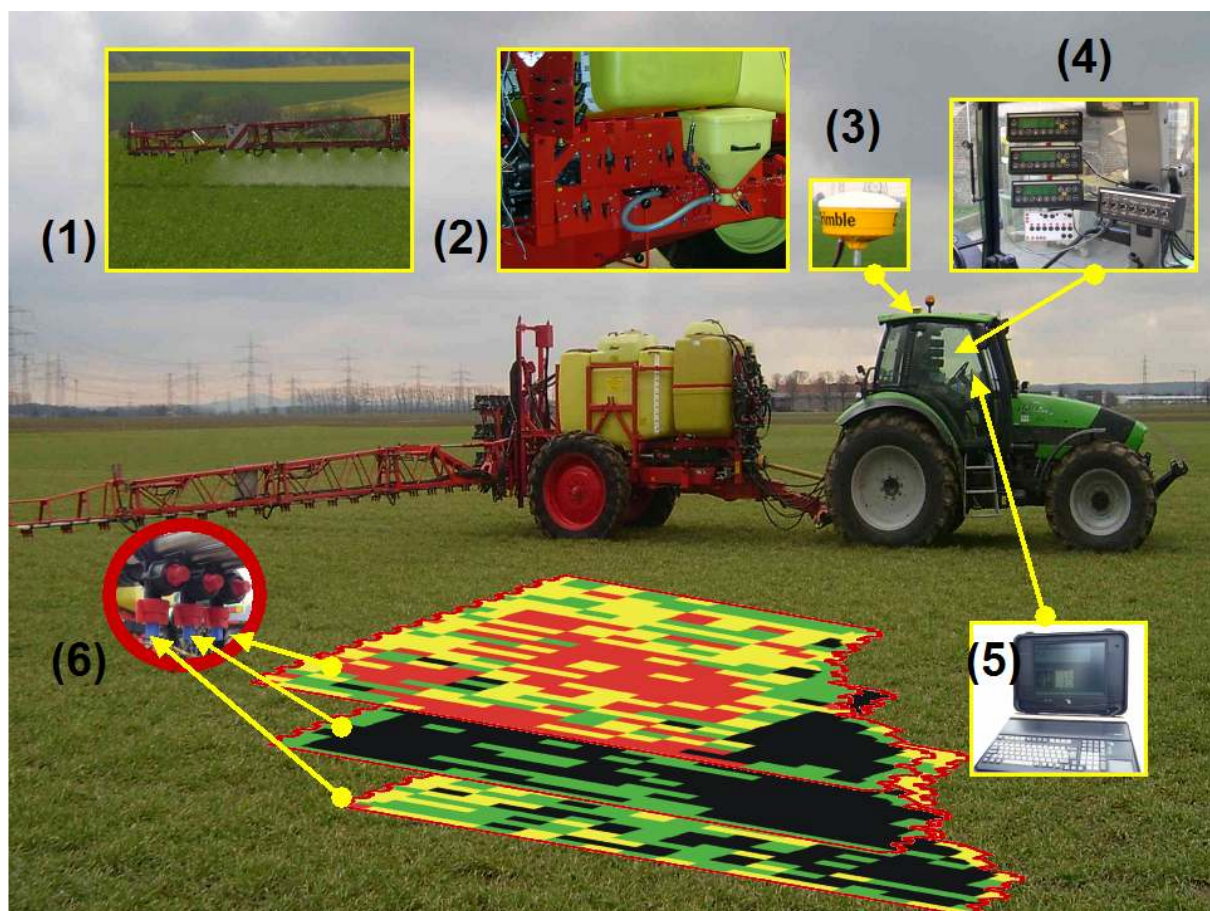


Abb. 5.4: Dreikammerspritze mit Teilbreitenschaltung (1), zentraler Befüllung für drei Tanks (2), dGPS Empfänger (3), zentrale Steuerungseinheit (4) Laptop mit Software zur Steuerung der Spritze über Applikationskarten (5) und Air Mix Düsen (6)

Dabei handelt es sich um eine Sonderanfertigung, bei der auf einem Trägerrahmen die Bauteile von drei konventionellen Pflanzenschutzspritzen verbunden wurden. Drei Tanks

(1.500 l, 1.000 l und 1.000 l) sind mit drei Leitungssystemen (Pumpe, Druckregler und Teilbreitenschaltung für je 3 m) verbunden. Die Spritzleitungen sind an einem 21 m Gestänge befestigt. Für die Ansteuerung der Spritze wurden drei Standard-Spritzcomputer über eine neu entwickelte zentrale Steuerungseinheit verbunden. Über einen Laptop mit der Applikationssoftware *SprayControl* können die einzelnen Teilbreiten aller drei Spritzsysteme anhand von Applikationskarten angesteuert werden. Die Befüllung der drei Tanks wird über eine Einfüllschleuse zentral geregelt. Die Spritze kann auch konventionell eingesetzt werden. Dabei können drei verschiedene Mittel getrennt oder über eine Spritzleitung ausgebracht werden, wodurch die Reinigung der Leitungssysteme erleichtert wird.

Durch das automatische An- und Ausschalten von Teilbreiten und der Regelung der Ausbringmenge ist es bei diesem System möglich, den passenden Herbizidwirkstoff und die Herbiziddosierung der lokalen Verunkrautung anzupassen.

Die Schadensschwellen für die teilschlagspezifische Applikation in den verschiedenen Kulturen basierten auf den in der Literatur beschriebenen Werten (GEROWITT und HEITEFUSS, 1990, PALLUTT und FLATTER 1998, NIEMANN *et al.* 2000, PALLUT und GRÜBNER, 2004, WERNER *et al.* 2004) und der Erfahrung der Betriebsleiter mit den eingesetzten Pflanzenschutzmitteln.

Die in Tabelle 5.2 dargestellten Schadensschwellen für differenzierte Herbizidmengen in Abhängigkeit von Unkrautart und -dichte in Getreide, Mais, Zuckerrüben, Winterraps und Körnererbsen wurden verwendet. Je nach Unkrautartenspektrum, Witterung, Bodenfeuchte oder Schlaghistorie wurden die Werte geringfügig modifiziert.

Tab. 5.2: Angewendete Herbiziddosis (unbehandelt 0 %, 70 %, 85 %, 100%) in Abhängigkeit von Unkrautart und -dichte (Pflanzen pro m²) in verschiedenen Kulturen; 100 % = 290 l Aufwandmenge/ha

Kultur	<i>Galium aparine</i>				Ungräser				sonstige Unkräuter			
	0	70	85	100	0	70	85	100	0	70	85	100
Sommergerste	< 0,2	≥ 0,2	≥ 1	≥ 1	< 5	≥ 5	≥ 15	≥ 25	< 15	≥ 15	≥ 25	≥ 40
Wintergerste	< 0,2	≥ 0,2	≥ 1	≥ 5	< 10	≥ 10	≥ 20	≥ 30	< 10	≥ 10	≥ 15	≥ 40
Winterweizen	< 0,2	≥ 0,2	≥ 1	≥ 5	< 5	≥ 5	≥ 15	≥ 25	< 10	≥ 10	≥ 25	≥ 40
Körnermais	< 0,2	≥ 0,2	≥ 1	≥ 1	< 3	≥ 3	≥ 5	≥ 10	< 2	≥ 2	≥ 10	≥ 25
Zuckerrüben	< 0,2	≥ 0,2	≥ 1	≥ 1	< 1	≥ 1	≥ 5	≥ 10	< 1	≥ 1	≥ 3	≥ 5
Winterraps	< 0,2	≥ 0,2	≥ 1	≥ 2	< 3	≥ 3	≥ 10	≥ 15	< 5	≥ 5	≥ 15	≥ 40
Körnererbsen	< 0,2	≥ 0,2	≥ 1	≥ 2	< 3	≥ 3	≥ 10	≥ 15	< 5	≥ 5	≥ 15	≥ 25

Hintergrund für die Ausbringung von an die Unkrautdichte angepassten Herbiziddosen ist die Dosis-Wirkungsbeziehung. Je geringer die Unkrautdichte auf einer Teilfläche ist, desto

niedriger muss der relative Bekämpfungserfolg sein, um unkrautbedingte Ertragsverluste zu vermeiden. In Nestern mit hoher Abundanz wird auch ein hoher Wirkungserfolg (100 %) benötigt, um eine Ausbreitung von Unkrautnestern zu verhindern. Bei Unterschreitung der Schadensschwelle wurden Teilbreiten ausgeschaltet. Ebenso werden im TURBO-Verfahren die Effekte reduzierter Aufwandmengen bei geringeren Unkrautdichten genutzt. Dadurch werden geringere Bekämpfungserfolge bewusst in Kauf genommen, solange negative Wirkungen durch Unkräuter auf Ertrag und Qualität der Kulturpflanze unterbunden werden.

Die Auswahl der Herbizide wurde in Abhängigkeit von den bei der Bonitur detektierten Leitunkräutern, deren Entwicklungsstadien und Preisen getroffen. Bedingt durch die pfluglose Bodenbearbeitung kam es auf dem Betrieb Hurtz auf vielen Schlägen zu einer flächendeckenden Verunkrautung mit *Brassica napus* in Getreide und von *Hordeum vulgare* in Winterraps durch die jeweiligen Vorfrüchte. Das Unkrautartenspektrum des Betriebes Hurtz und des Dikopshofes in Getreide unterschied sich nur geringfügig.

In **Sommergerste** waren *Avena fatua*, *Poa annua*, *Brassica napus* und *Matricaria spp.* die Leitunkräuter. Mono- und dikotyle Unkräuter wurden getrennt teilschlagspezifisch behandelt. *Galium aparine* kam auf fast allen Schlägen nur vereinzelt vor und wurde nicht als separate Unkrautklasse behandelt.

In **Winterweizen** waren *Alopecurus myosuroides* und *Veronica spp.* auf fast allen Schlägen zu finden. *Viola arvensis*, *Geranium spp.*, *Capsella bursa-pastoris* (L.) Medikus, *Stellaria media* und *Matricaria spp.* waren nesterweise und in geringen Dichten über die ganze Fläche verteilt. *Galium aparine* kam auf fast allen Flächen vor, auf einigen Flächen wurden Nester mit über 50 Pflanzen/m² bonitiert. Eine getrennte Behandlung von *Galium aparine* wurde mit 5 g/ha Florasulam (100 % Dosis) durchgeführt. Bonitur und Herbizidbehandlung wurden im Frühjahr durchgeführt.

In **Wintergerste** waren *Poa annua*, *Alopecurus myosuroides* und *Apera spica-venti* die dominanten Ungräser, *Matricaria spp.*, *Veronica hederifolia* L. und *Viola arvensis* die wichtigsten dikotylen Unkräuter. Die Unkrautbekämpfung wurde im Herbst durchgeführt.

In **Winterraps** kamen *Alopecurus myosuroides*, *Hordeum vulgare*, *Apera spica-venti*, *Matricaria chamomilla* L. und *Veronica hederifolia* in meist geringen Dichten vor. Da aber für eine teilschlagspezifische Applikation in Winterraps noch keine Praxiserfahrungen vorlagen, wurden Ungräser und Unkräuter bereits ab 3 bzw. 5 Pflanzen/m² mit einer Herbiziddosierung

von 70 % bekämpft. *Hordeum vulgare* aus der Vorfrucht wurde mit 37 g/ha Quizalofop-P (100 % Dosis) behandelt.

In **Zuckerrüben** wurden auf dem Dikopshof vor allem *Chenopodium album* und *Galium aparine* als konkurrenzstarke Unkräuter identifiziert. Eine teilschlagspezifische Behandlung wurde nur für *Galium aparine* und für Ungräser durchgeführt. Sonstige Unkräuter wurden betriebsüblich appliziert.

In **Körnermais** wurden *Chenopodium album* und *Echinochloa crus-galli* auf einem Schlag an bestimmten Boniturstellen mit über 1.000 Pflanzen/m² ermittelt. Durch eine jahrelange Monokultur von Mais wurden bei einer durchschnittlichen Unkrautdichte von 400 Pflanzen/m² nur Ungräser teilschlagspezifisch behandelt. Tabelle 5.3 gibt Auskunft über Leitunkräuter, verwendete Herbizide und Aufwandmengen für ausgewählte Schläge in verschiedenen Kulturen. Im Anhang befindet sich eine Tabelle mit allen Bonitur- und Applikationsterminen, eingesetzten Herbiziden und Aufwandmengen auf den Versuchsschlägen 2004 und 2005.

Tab. 5.3: Unkrautarten, Herbizide und Aufwandmengen für ausgewählte Schläge in verschiedenen Kulturen.

Kulturart Jahr Schlag	Leitverunkrautung	Mittel und Aufwandmengen (100 %)	Wirkstoffe
Sommergerste 2004 Roostal	<i>Avena fatua</i> , <i>Poa annua</i> , <i>Bromus spp.</i> , <i>Brassica napus</i> , <i>Matricaria chamomilla</i> , <i>Fumaria officinalis</i>	Duplosan (2,25 l/ha) Ralon Super (1 l/ha)	MCP-P, 2,4 D Fenoxaprop-p-ethyl + Mefenpyr-Diethyl
Wintergerste 2004 Schlag 9	<i>Alopecurus myosuroides</i> , <i>Apera spica-venti</i> , <i>Viola arvensis</i> , <i>Veronica hederifolia</i>	Primus (0,1 l/ha) + Fox (1 l/ha) IPU (3 l/ha)	Florasulam Bifenox Isoproturon
Winterweizen 2005 2 Bäume	<i>Alopecurus myosuroides</i> , <i>Matricaria chamomilla</i> , <i>Veronica hederifolia</i> , <i>Galium aparine</i>	Primus (0,1 l/ha) Artus (50g/ha) IPU (2,5 l/ha)	Florasulam Carfentrazon Metsulfuron, Isoproturon
Körnermais 2004 Schlag 8	<i>Echinochloa crus-galli</i> <i>Chenopodium album</i> , <i>Fumaria officinalis</i>	Gardo Gold (3 l/ha) Cato (30 g/ha)	S-Metalachlor + Terbuthylazin Rimsulfuron
Zuckerrüben 2004 Schlag 6	<i>Chenopodium album</i> , <i>Hordeum spp.</i> , <i>Galium aparine</i>	Select 2400 (0,5 l/ha) Powertwin (0,7 l/ha) + Tramat (0,35 l/ha)	Clethodim Phenmediphan + Ethofumesat
Winterraps 2004 Eisenmustal	<i>Alopecurus myosuroides</i> , <i>Hordeum spp.</i> , <i>Apera spica-venti</i> , <i>Matricaria chamomilla</i> ,	Butisan (2 l/ha) Targa (0,8 l/ha)	Metazochlor Quizalofop-P
Körnererbsen 2005 Drei Pützen	<i>Galium aparine</i> , <i>Brassica napus</i> <i>Alopecurus myosuroides</i> , <i>Poa annua</i> , <i>Matricaria chamomilla</i>	Basagran (1,5 l/ha) Fusilade (0,8 l/ha)	Bentazon Fluazifop-P

5.4 Ergebnisse

In den Jahren 2004 und 2005 wurden auf dem Betrieb Hurtz 24 Schläge mit einer Gesamtfläche von 106 ha, auf dem Dikopshof 8 Schläge (32 ha) teilschlagspezifisch über Applikationskarten mit der Dreikammerspritze behandelt. In 2004 wurde die Behandlung aller Flächen anhand der manuellen Bonituren durchgeführt, da sich die Auswertung der Bildaufnahmen durch den Ausbau und Test der kulturspezifischen Datenbanken verzögerte. Auf dem Betrieb Hurtz wurden 2005 nur Körnererbsen auf der Basis einer kameragesteuerten Unkrautbonitur behandelt, da das Trägerfahrzeug nicht für alle Bonituren verfügbar war.

Der Einsatz eines mobilen GIS (MiniGIS) zur Unkrauterfassung wurde 2004 erstmals auf einem Schlag des Betriebes Hurtz getestet. Durch den Einsatz eines Handheld PDA mit GPS Antenne und entsprechender GIS Software war es dem Betriebsleiter in 2005 möglich, eigenständig Applikationskarten für die teilschlagspezifische Unkrautbekämpfung auf 4 Schlägen anzufertigen. Für die Erstellung dieser *Praxiskarten* war die Kenntnis über die Unkrautverteilung und Unkrautartenzusammensetzung der Schläge aus den Vorjahren sowie die Schlaghistorie (Umwandlung von Weideland in Ackerland, Zusammenlegungen von Flurstücken, Drainagemaßnahmen, ...) von großer Bedeutung. Da für die Flächen bisher kaum Ertragskarten oder Unkrautverteilungskarten vorlagen, war dieses Wissen ebenso wie die Ergebnisse von Feldbegehungen die Grundlage für die *Praxiskarten*. Dabei wurden große Übereinstimmungen in der Position von Unkrautnestern mit der manuellen Bonitur (Abbildung 5.5) gefunden. Die Unkrautdichte in der Praxisbonitur wurde allerdings überschätzt.

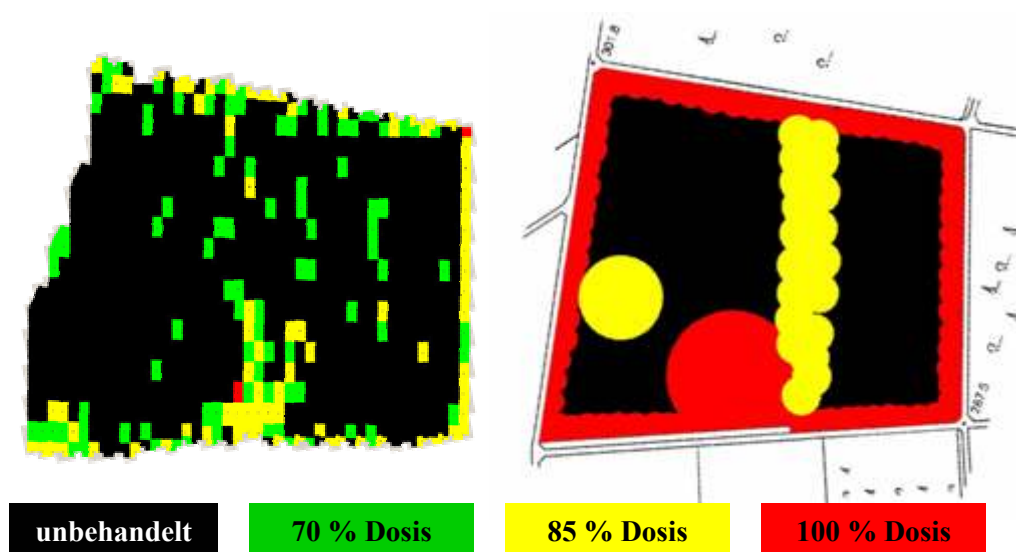


Abb. 5.5: Manuelle Bonitur (links) und Praxisbonitur (rechts) durch MiniGIS für Unkräuter in Winterweizen (7,67 ha).

Kleinräumige Veränderungen der Unkrautdichte oder die Lokalisierung von in geringer Dichte auftretenden *Galium aparine* - Pflanzen konnten mit der Praxiskarte nicht sicher bestimmt werden. Allerdings half die Erfahrung des Betriebsleiters, Zusammenhänge zwischen Schlaghistorie und aktueller Unkrautsituation eines Schlags zu erklären. Abbildung 5.6 zeigt die Bodenkarte sowie die Unkrautverteilungskarten über das Rasterboniturverfahren und die vom Betriebsleiter erstellte Praxiskarte.

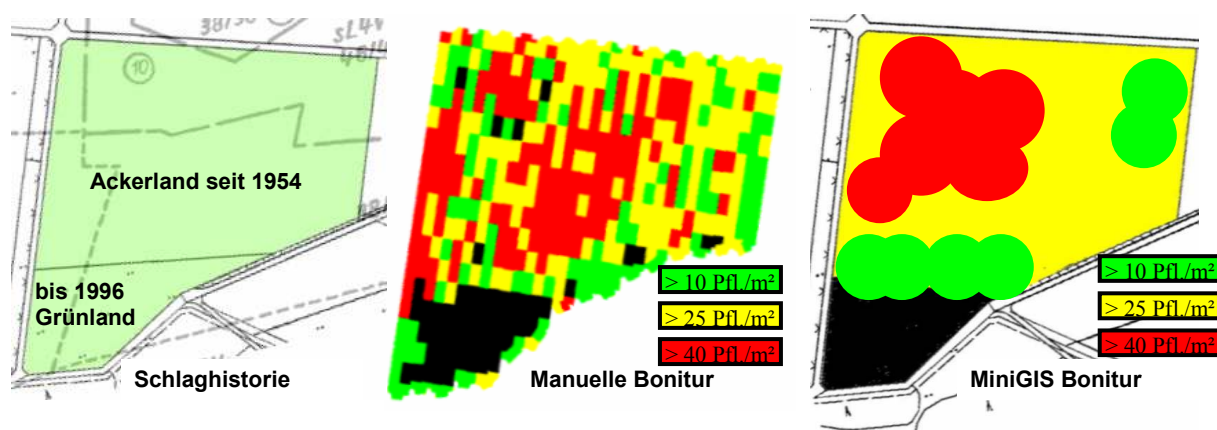


Abb. 5.6: Bodenkarte und Schlaghistorie (links), manuelle Bonitur (Mitte) und Praxisbonitur (rechts) durch MiniGIS für Unkräuter in Braugerste (Schlag Breidel, 4,65 ha).

Auf dem Schlag Breidel war der südliche Teilschlag bis 1996 Grünland, so dass sich dort auch 10 Jahre nach der Umwandlung in Ackerland kaum Unkräuter etabliert haben. Ebenso wurden Zusammenhänge zwischen Unkrautdichte und Bodenverhältnissen hergestellt. Höhere Unkrautdichten wurden auf sehr steinigen Teilflächen identifiziert. An diesen Stellen konnte sich über Jahrzehnte hinweg bedingt durch eine geringere Auflauftrate der Kulturpflanzen eine stärkere Unkrautpopulation durchsetzen. PALLUTT (2000) beschreibt ausführlich, dass standortspezifische Aussaatmengen und Stickstoffgaben in Getreide durch die Verbesserung der Konkurrenz zu einer beträchtlichen Unkrautunterdrückung beitragen.

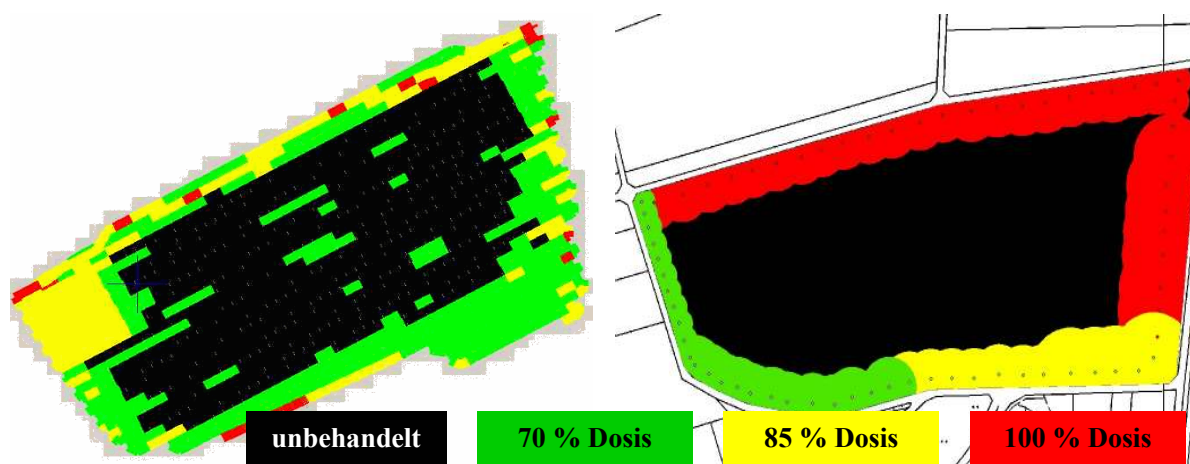


Abb. 5.7: Manuelle Bonitur (links) und Praxisbonitur (rechts) für Ungräser in Braugerste (Schlag An der Barth, 8,43 ha).

Besonders für die Lokalisierung von bewertungswürdigen Nestern mit Ungräsern erwies sich das MiniGIS Verfahren als effizient. Abbildung 5.7 zeigt die Ergebnisse der manuellen Bonitur und der vom Betriebsleiter durchgeführten MiniGIS Bonitur für Ungräser auf einem Braugerstenschlag. Da eine Mahd der Randstreifen in der Region aufgrund von Naturschutzverordnungen erst ab Mitte Juli erlaubt ist, kommt es durch Samenbildung von Gräsern zu einer erhöhten Abundanz von monokotylen Arten im Ackerrandbereich. Durch eine Verteilung der Unkrautsamen über den Mähdrusch kam es auf diesem Schlag zu einer Ausbreitung von *Apera spica-venti* und *Bromus* spp.

Auch über die räumliche Verteilung bestimmter Unkrautarten anhand der Boniturergebnisse in Verbindung mit Zusatzinformationen zur Schlaghistorie sind wichtige Informationen für eine Unkrautmanagementstrategie zu gewinnen. Abbildung 5.8 zeigt die Bodenkarte und Schlaghistorie sowie die Verteilungsmuster für sonstige Unkräuter und *Galium aparine* auf dem Schlag Hürth (Winterweizen). Auffällig ist die hohe Dichte von *Galium aparine* im unteren Bereich der Parzelle. Dort wurden in Teilbereichen über 50 Pflanzen/m² gezählt. Im oberen Bereich kam *Galium aparine* hingegen nur vereinzelt vor. Beide Teilbereiche werden erst seit 1998 als einheitlicher Schlag bewirtschaftet. Der untere Bereich wurde bis zu diesem Zeitpunkt regelmäßig mit Stallmist gedüngt, der obere Bereich ohne organischen Dünger. Leitunkraut im oberen Parzellenbereich war *Veronica* spp.

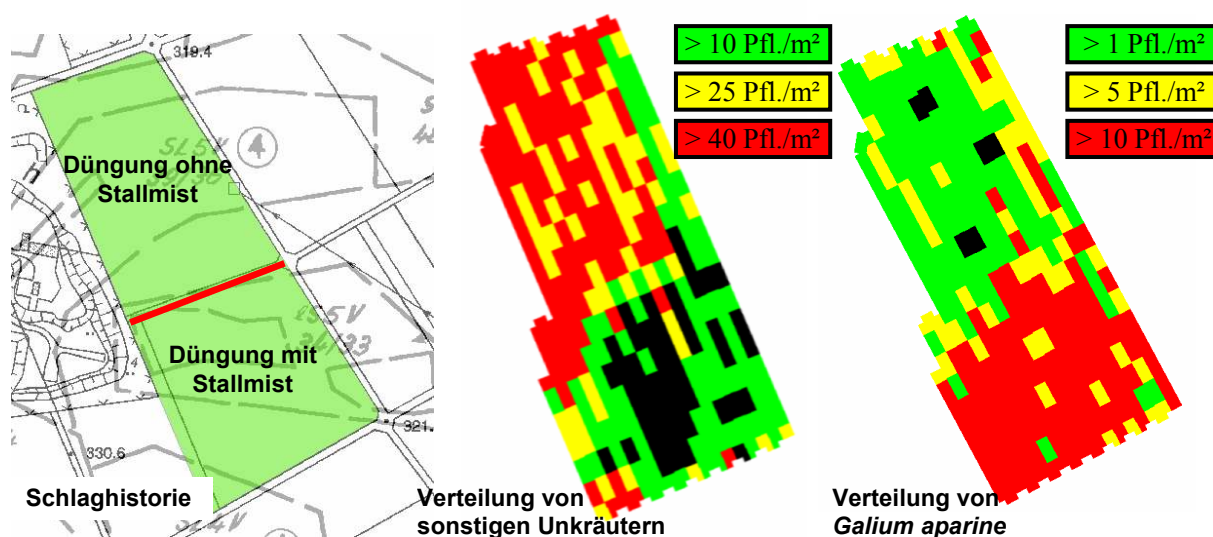


Abb. 5.8: Bodenkarte und Schlaghistorie (links), Verteilung für dikotyle Unkräuter (Mitte) und *Galium aparine* (rechts) in Winterweizen (Schlag Hürth, 2,79 ha).

Auch SÖKEFELD *et al.* (1995) fanden heraus, dass eine unterschiedliche Bewirtschaftungsgeschichte innerhalb nun gleichförmig bewirtschafteter Flächen der Grund für die unterschiedliche Verteilung von Unkräutern war. Eine 30 Jahre zurückliegende Teilung eines Schlages in eine ackerbaulich und eine als Grünland genutzte Teilfläche war

immer noch dadurch zu erkennen, dass auf der vormaligen Ackerfläche *Aphanes arvensis* L. dominierte, während auf dem ehemaligen Grünland *Galium aparine* in höherer Dichte vorkam. Die Etablierung von *Galium aparine* war in diesem Fall durch den höheren Humusgehalt im Bereich des ehemaligen Grünlandes zu erklären.

Neben der räumlichen Variabilität von Unkrautarten ist auch deren zeitliche Dynamik für Managementstrategien in der teilschlagspezifischen Unkrautbekämpfung bedeutend. Durch Boniturverfahren können nur Unkräuter detektiert werden, die schon aufgelaufen sind. Da die Keimung verschiedener Unkrautarten bedingt durch artspezifische Dormanz, Witterung, Bodeneigenschaften und der jeweiligen Kulturart zeitlich variiert, ist der Boniturzeitpunkt von ebenso großer Bedeutung für eine teilschlagspezifische Unkrautkontrolle wie die Boniturqualität. Abbildung 5.9 zeigt die zeitliche Entwicklung der Population von Ungräsern in einem Zuckerrübenschlag. Dabei zeigt sich, dass sich nicht nur die Unkrautdichte pro Boniturpunkt je nach Boniturzeitpunkt veränderte, sondern auch die räumliche Ausbreitung von Unkrautnestern.

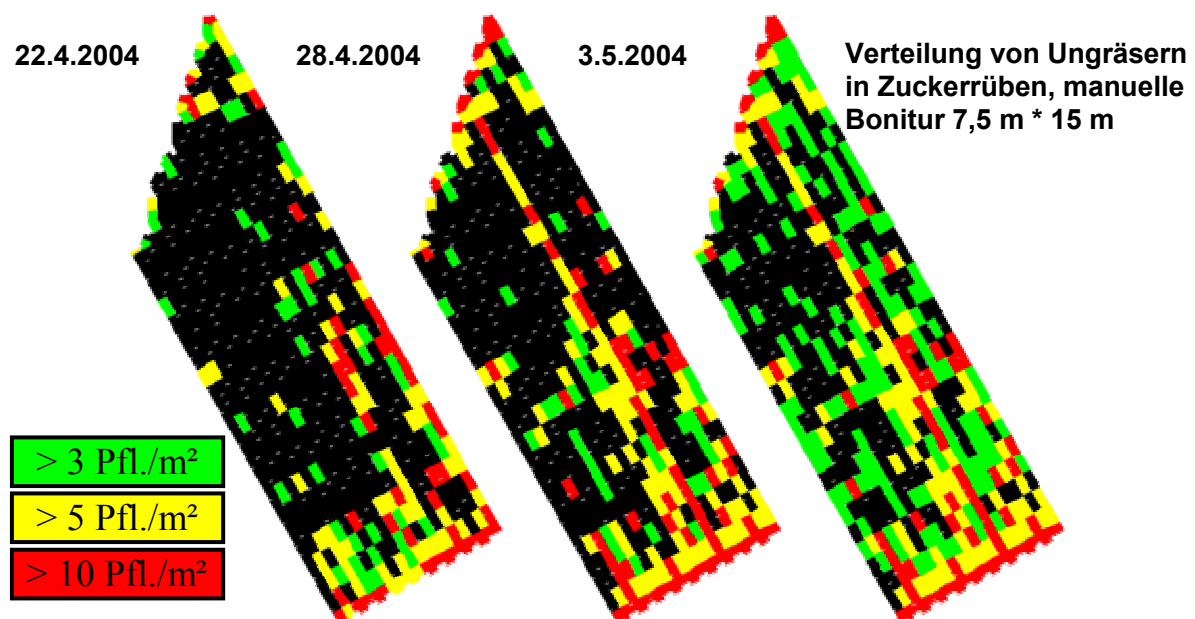


Abb. 5.9: Verteilung und Ausbreitung von Ungräsern in Zuckerrüben (Schlag 6, Dikopshof) an verschiedenen Boniturdaten

Die räumliche Stabilität von Unkrautnestern wurde nur auf dem Versuchsgut Dikopshof untersucht. Dort wird auf fünf Schlägen seit 1996 die Unkrautbekämpfung teilschlagspezifisch durchgeführt. Abbildung 5.10 zeigt die Applikationskarten für Unkräuter in Wintergerste und Winterweizen verschiedener Jahre.

Durch den visuellen Vergleich der Karten wird deutlich, dass Verteilung und Abundanz der Unkräuter in den Jahren variierten, was durch die Auflaufbedingungen (Witterung) und den

gewählten Boniturzeitpunkt (Wintergerste wurde im Herbst bonitiert, Winterweizen im Frühjahr) zu erklären ist. Es konnten aber auch wiederkehrende Teilflächen mit geringer oder hoher Unkrautdichte bestimmt werden. Untersuchungen zur Dynamik von Unkrautpopulationen auf den teilschlagspezifisch behandelten Flächen des Dikopshofes wurden auch von TIMMERMANN (2001), KROHMANN (2003) und DICKE (2005) durchgeführt. KROHMANN (2003) stellte dabei fest, dass in Mais und Zuckerrüben *Chenopodium album* mit hoher räumlicher Stabilität beobachtet wurde, in den Wintergetreidearten waren *Alopecurus myosuroides* sowie *Matricaria* spp. sehr stabil.

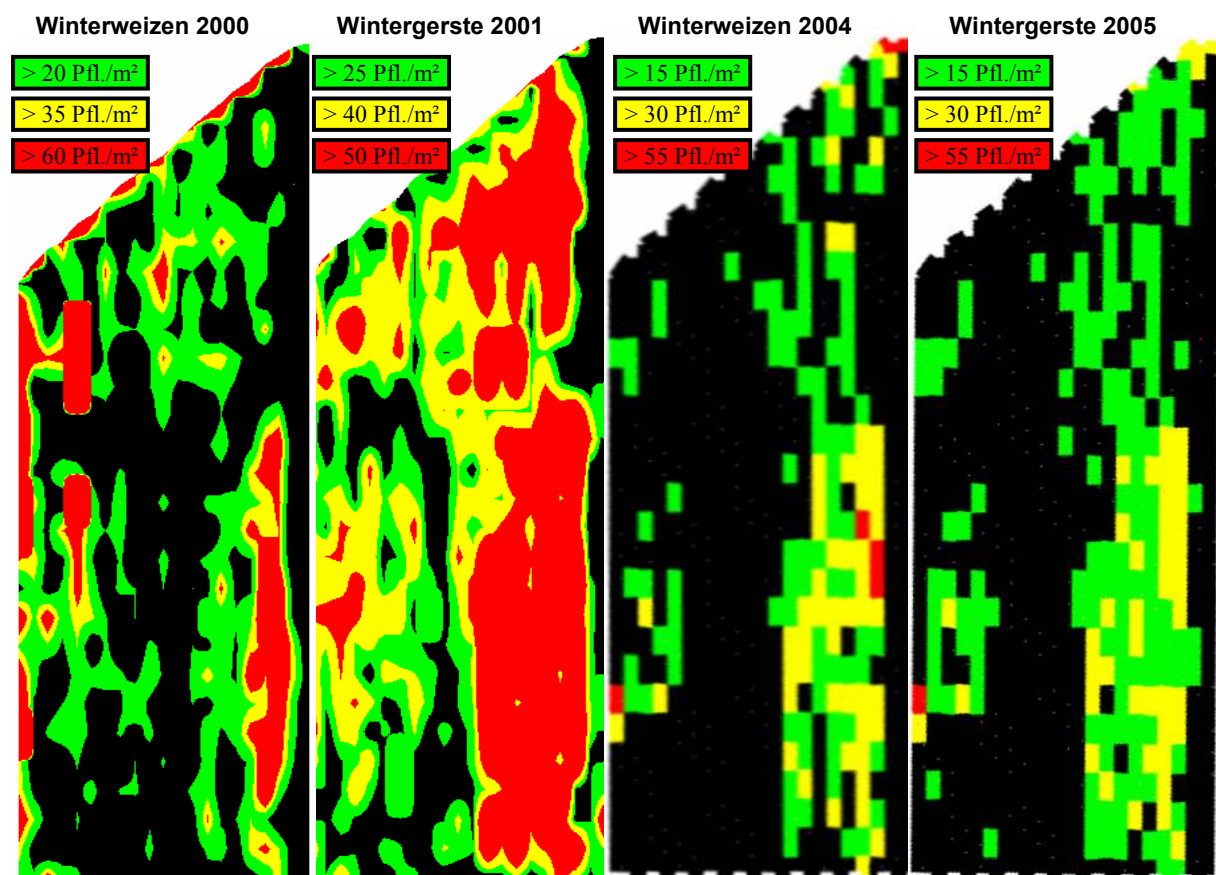


Abb. 5.10: Verteilungskarten für Unkräuter in Wintergerste (2001 und 2005) und Winterweizen (2000 und 2004) auf dem Dikopshof (Schlag 9, 5,8 ha).

Neben der statistischen Auswertung zur Erkennungsgenauigkeit von Unkrautklassen über die digitale Bildanalyse (Kapitel 4) wurden die über dieses Verfahren entstandenen Unkrautverteilungskarten mit denen der manuellen Bonitur verglichen. Dabei wurden weitgehende Übereinstimmungen bei der Position der Unkrautnester festgestellt.

Sowohl in Braugerste (Abbildung 5.11) als auch in Zuckerrüben (Abbildung 5.12) ermöglichten beide Boniturverfahren eine Abgrenzung von Teilflächen (schwarz), auf denen keine Herbizidbehandlung erforderlich war. Eine Evaluierung der Genauigkeit (*ground truth*)

des kameragestützten Boniturverfahrens konnte im Rahmen dieser Arbeit nicht durchgeführt werden. Es ist aber davon auszugehen, dass durch die hohe Anzahl der Bonitурpunkte und den insgesamt durch die Bonitur erfassten größeren Flächenanteil die Unkrautpopulation exakter detektiert werden kann.

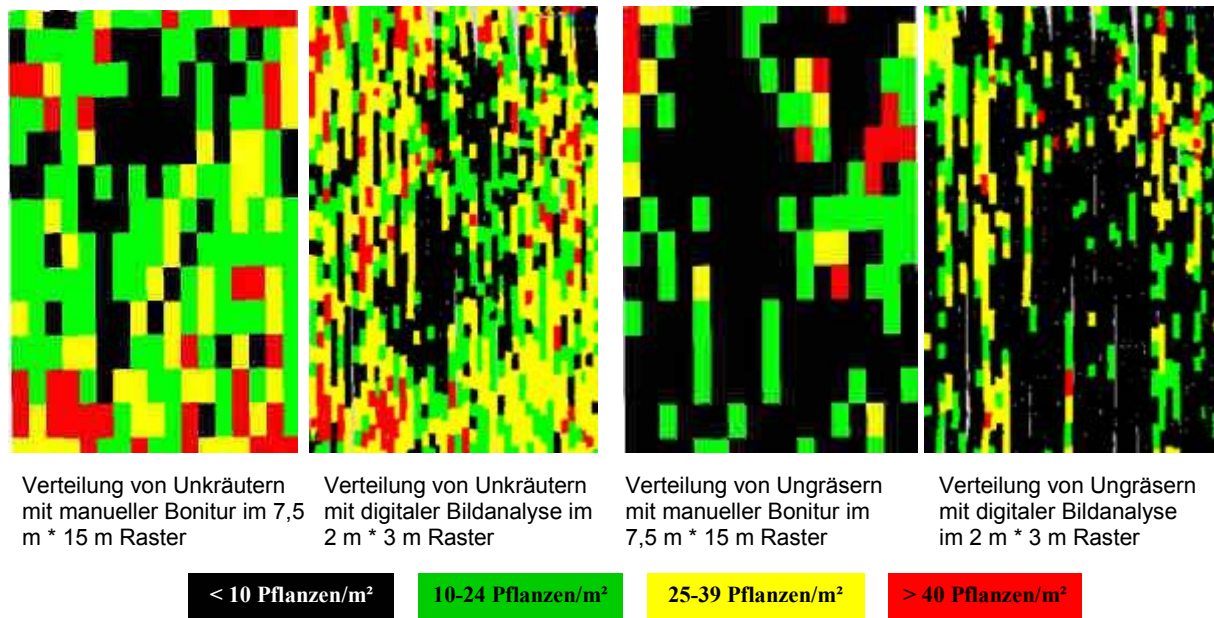


Abb. 5.11: Verteilungskarten für Unkräuter und Ungräser in Braugerste (2,4 ha) aus manuellen Bonituren und digitaler Bildanalyse.

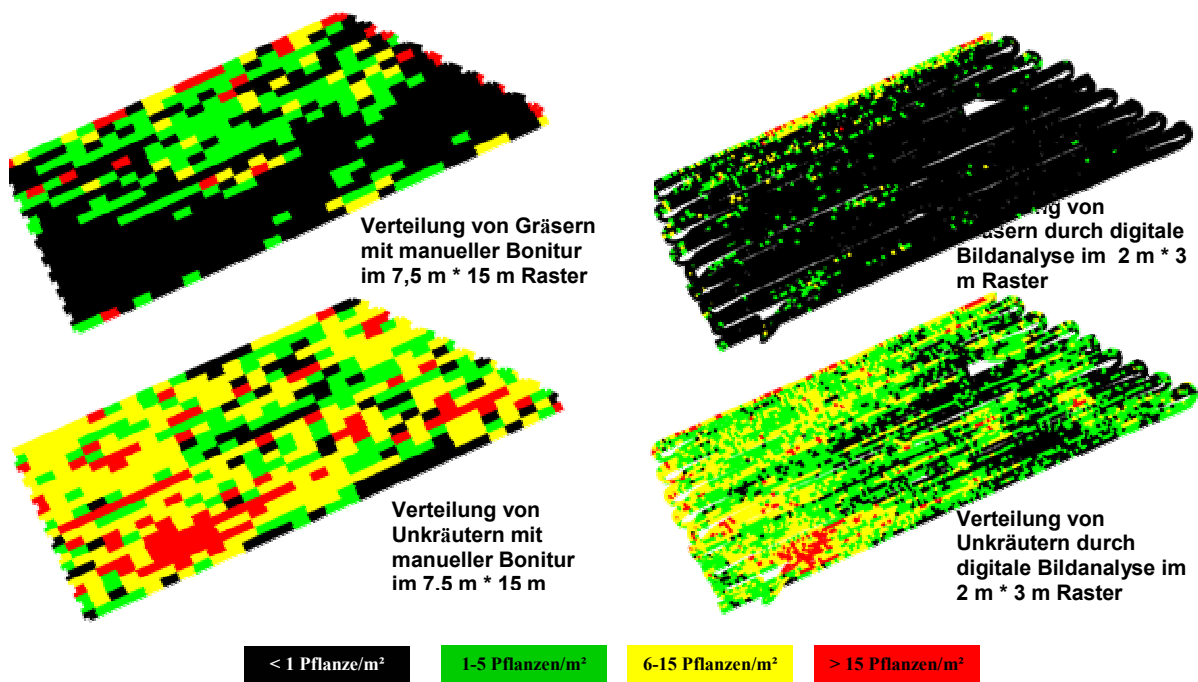


Abb. 5.12: Verteilungskarten für Unkräuter und Ungräser in Zuckerrüben (5,3 ha) aus manuellen Bonituren und digitaler Bildanalyse.

In Körnererbsen wurde die Überfahrt mit dem Trägerfahrzeug nur in den Fahrspuren (Abstand 21 m) durchgeführt. Aufnahmen wurden dabei nur für eine Arbeitsbreite von 9 m gemacht. Obwohl damit deutlich weniger Boniturlpunkte für die Auswertung gegeben waren, zeigt Abbildung 5.12, dass auch hier eine weitgehende Übereinstimmung mit den Ergebnissen der manuellen Bonitur erzielt wurde.

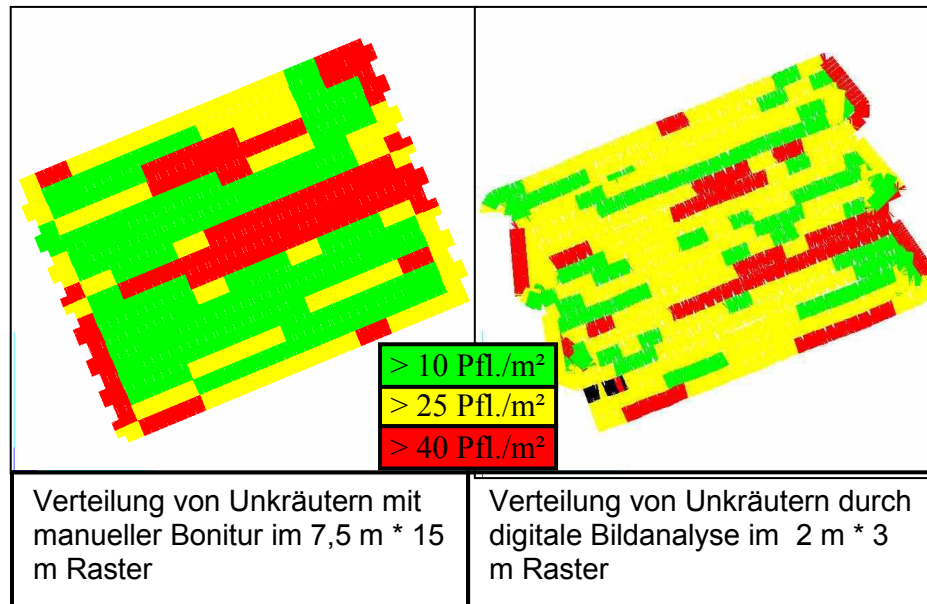


Abb. 5.13: Verteilungskarten für dikotyle Unkräuter in Körnererbsen (3,93 ha) aus manuellen Bonituren und digitaler Bildanalyse.

Aufgrund der hohen Auflösung der Kamerabonitur wurden die Ergebnisse der Unkrautverteilungskarte je nach Fahrgeschwindigkeit bei der Bildaufnahme für 10 bis 20 Boniturlpunkte gemittelt und zusammengefasst. Dadurch wurden Applikationsentscheidungen für eine Länge von mindestens 8 m an die Teilbreiten der Pflanzenschutzspritze gesendet.

Die Umsetzung der teilschlagspezifischen Unkrautbekämpfung über Applikationskarten mit der Dreikammerspritze verlief störungsfrei. Die Integration der Bauteile von drei konventionellen Pflanzenschutzspritzen auf einem Trägerrahmen erwies sich als robust und erlaubte eine selektive, der Unkrautverteilung und -dichte angepasste Herbizidbehandlung. Die Reaktionszeit der Dreikammerspritze (vom Signal an den Spritzcomputer bis zum Aufbau des Spritzkegels) lag bei weniger als einer Sekunde. Durch die Positionsbestimmung über dGPS konnte so eine hohe Applikationsgenauigkeit erreicht werden. Die Herbiziddosierung der Dreikammerspritze über Druckregler war effektiv, so dass sich geringfügige Ungenauigkeiten bei der Applikation als Folge der Verzögerungszeit beim Aufbau des Spritzkegels nicht negativ auf den Behandlungserfolg auswirkten. Die durch das Steuerungsprogramm *SprayControl* berechneten Werte für die benötigten Aufwandmengen

erwiesen sich als praxistauglich, da am Ende einer Feldbehandlung nur die üblichen, technisch bedingten Restmengen im Tank verblieben.

Als Indikator für die Qualität des Verfahrens der teilschlagspezifischen Unkrautbekämpfung kann das Ergebnis der Erfolgsbonituren nach der Herbizidbehandlung herangezogen werden. Nur auf einer Fläche wurde bei der Kontrollbonitur eine hohe Restverunkrautung ermittelt. Dabei handelte es sich um den Schlag GH (Monokultur Mais), der durch ein sehr spätes Auflaufen von *Echinochloa crus-galli* zum Zeitpunkt der Erfolgsbonitur eine Dichte von 41 Pflanzen/m² aufwies. Die Abbildungen 5.14 und 5.15 zeigen die Unkrautdichte der bonitierten Unkrautklassen vor (V) und nach (N) der Herbizidbehandlung in Wintergerste (WG), Winterweizen (WW), Sommergerste (SG), Zuckerrüben (ZR), Körnermais (KM), Winterraps (WR) und Körnererbsen (KE) auf ausgewählten Flächen in den Jahren 2004 und 2005. Eine detaillierte Übersicht aller Versuchsschläge, der bonitierten Leitunkräuter und der Unkrautdichten vor und nach der Herbizidbehandlung befindet sich in Anhang.

Der Wirkungsgrad der teilschlagspezifischen Herbizidbehandlungen lag 2004 zwischen 86,5 % (WW 1) und 97 % (KM 1). In 2005 wurden Wirkungsgrade von 71,8 % (WW 2) bis 98,8 % (KE 2) erzielt. In Kulturen, in denen wegen einer niedrigen Unkrautdichte große Teilflächen unbehandelt blieben, wurde eine insgesamt höhere Restverunkrautung nach der Herbizidbehandlung festgestellt. Eine geringere Dosierung (70 %) der Herbizide bei geringen Unkrautdichten führte nur in Ausnahmefällen dazu, dass bei der Erfolgsbonitur die vorgegebenen Schadensschwellen überschritten wurden.

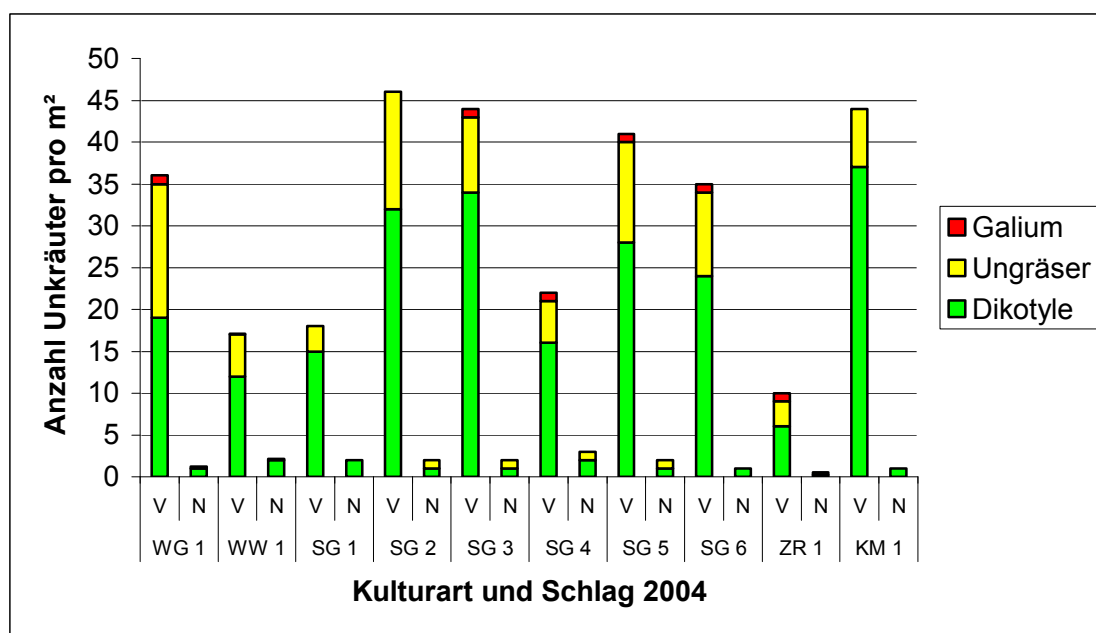


Abb. 5.14: Durchschnittliche Unkrautdichte nach Klassen vor (V) und nach (N) der Herbizidbehandlung in verschiedenen Kulturen in 2004.

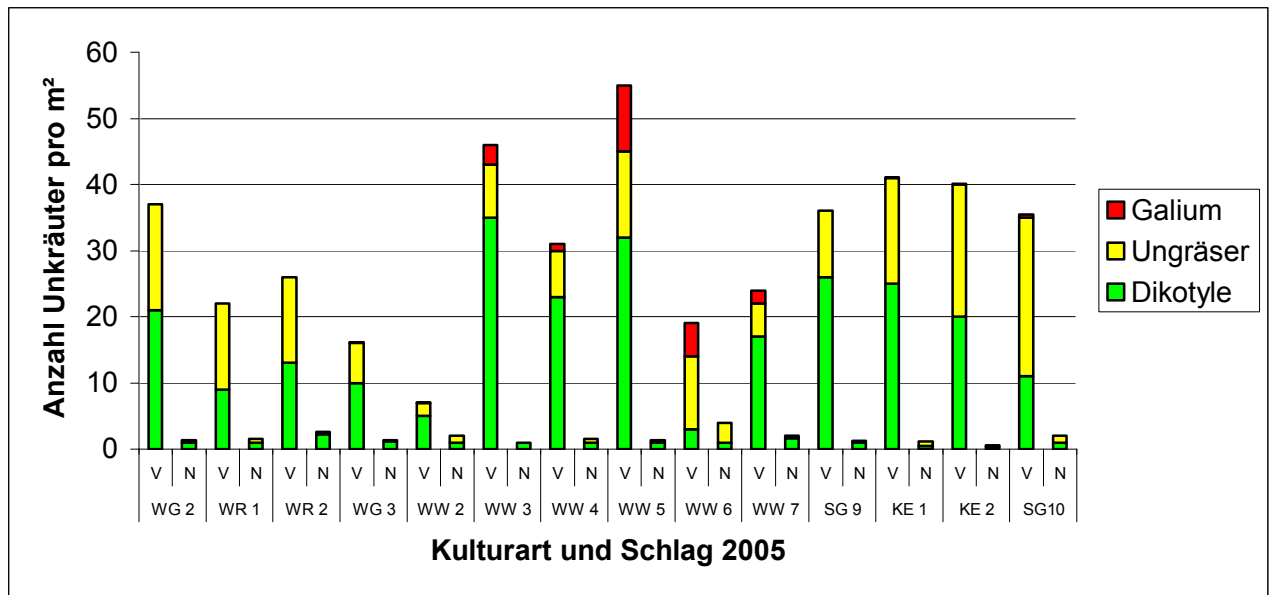


Abb. 5.15: Durchschnittliche Unkrautdichte nach Klassen vor (V) und nach (N) der Herbizidbehandlung in verschiedenen Kulturen in 2005.

Abbildung 5.16 zeigt beispielhaft die Unkrautverteilungskarten über manuelle Bonitur und digitale Bildanalyse in Körnermais sowie die Ergebnisse aus der Erfolgsbonitur der Herbizidbehandlung.

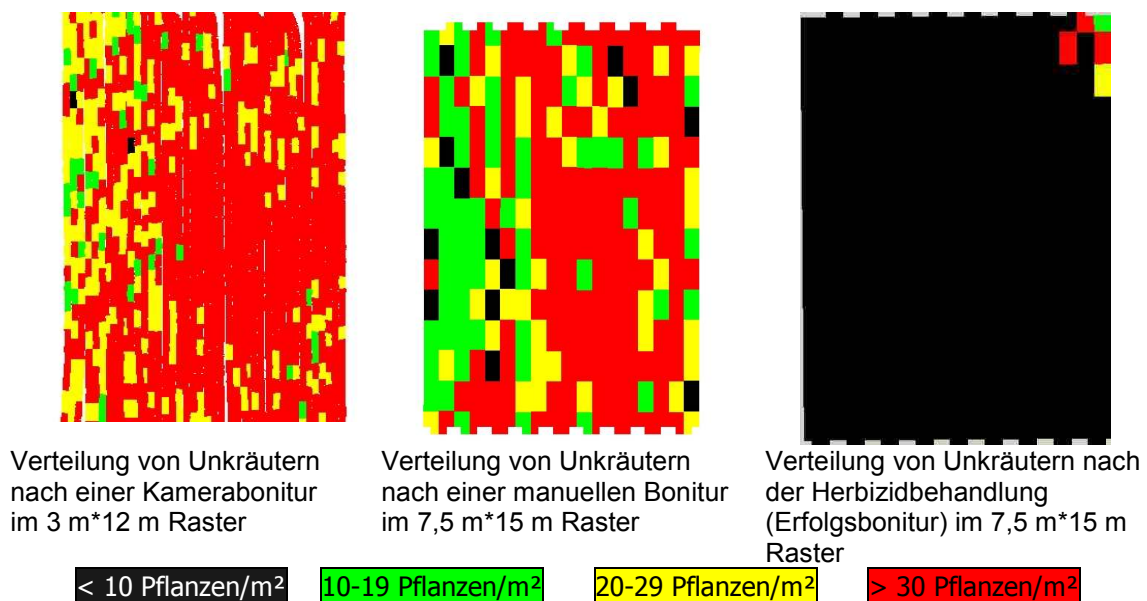


Abb. 5.16: Verteilungskarten von dikotylen Unkräutern in Körnermais (2,40 ha) aus manuellen Bonituren (links), digitaler Bildanalyse (Mitte) und aus der Erfolgsbonitur (rechts)

Zur Überprüfung der angewendeten Entscheidungsalgorithmen wurden in einigen Kulturen Schadensschwellenversuche angelegt. Auf dem Schlag Eisenmustal (3,46 ha) wurden in Braugerste drei verschiedene Schadensschwellen für Ungräser mit je 2 Wiederholungen in 6 Fahrspuren getestet. Dabei wurden Ungräser ab einer Dichte von 3 Pflanzen/m² (A), ab 5

Pflanzen/m² (B) oder ab 10 Pflanzen/m² (C) mit 70 % der Herbizidmenge behandelt. Eine Behandlung mit 100 % der Herbiziddosis erfolgte erst ab 15 Pflanzen/m² (A), 25 Pflanzen/m² (B) oder 40 Pflanzen/m² (C).

Eine visuelle Auswertung der Ertragskarte ergab keine Ertragsverluste durch Unkrautkonkurrenz. Die Markierung der verbleibenden Ungräser und Unkräuter bei der Ernte durch das Ertragskartierungsprogramm (Abbildung 5.17) zeigt allerdings, dass über die Restverunkrautung auf dem Acker bei der teilschlagspezifischen Unkrautbekämpfung auch das Samenpotential der Flächen erhöht wird. Während eine höhere Restverunkrautung von Ungräsern über die Veränderung der Schadensschwellen hervorgerufen wurde, waren die zur Samenreife gekommenen Pflanzen von *Matricaria* spp. Resultat einer geringen Wirkung des eingesetzten Herbizides gegen diese Unkrautart.

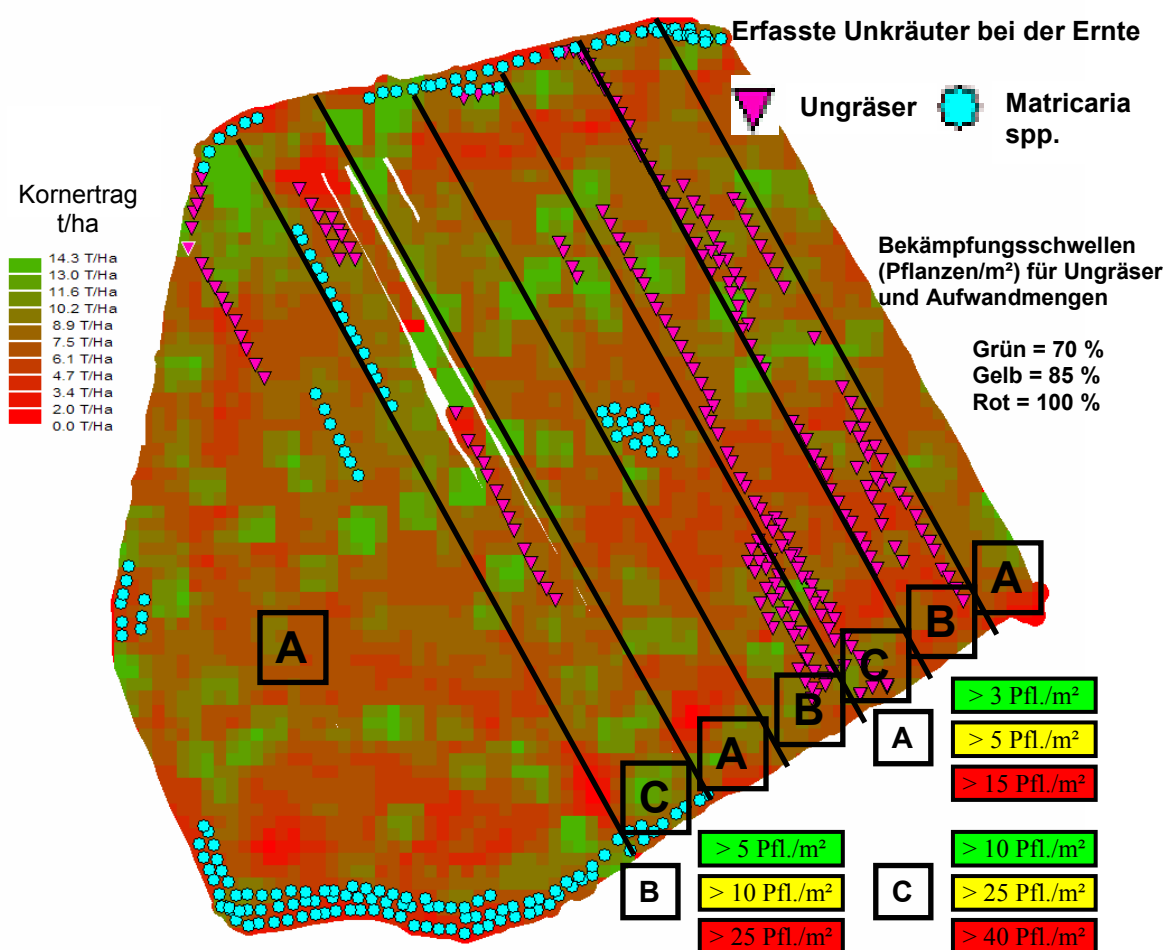


Abb. 5.17: Ertragskarte, Fahrgassen, angewendete Schadensschwellen für Ungräser und Erfolgskontrolle über Unkrautmarkierung über Ertragskartierung auf dem Schlag Eisenmustal (3,46 ha) in Braugerste

Ein weiterer Schadensschwellenversuch in Wintergerste mit einer Erhöhung der Schadensschwellen für Ungräser von 5 Pflanzen/m² auf 10 bzw. 20 Pflanzen/m² bei einer Dosierung von 70 % führte tendenziell sogar zu höheren Erträgen.

Obwohl erhöhte Schadensschwellen zu einem stärkeren Auftreten von Ungräsern auf den Teilflächen führten, wurde kein Ertragsverlust beobachtet. Bei der teilschlagspezifischen Unkrautbekämpfung in Wintergerste und Braugerste konnten Unkräuter und Ungräser auch mit einer reduzierten Herbiziddosis bei geringer Unkrautdichte soweit unterdrückt werden, dass es zu keinen Ertragsverlusten kam. Insbesondere Getreidearten und Winterraps können als konkurrenzstarke Nutzpflanzen durch ihre rasche Biomasseentwicklung eine Unkrautunterdrückung bewirken. Inwieweit die teilschlagspezifische Herbizidapplikation auch einen positiven Einfluss auf den Kornertrag hat, konnte durch die Versuche nicht abschließend geklärt werden. Zusätzliche Schadensschwellenversuche in Winterweizen, Winterraps und Wintergerste wurden im Herbst 2005 angelegt, um die Ertragswirkung unbehandelter Teilflächen mit geringer Unkrautdichte sowie die Reduzierung von Aufwandmengen zu untersuchen.

5.5 Diskussion

Teilschlagspezifische Unkrautbekämpfung sollte eingebunden sein in ein Gesamtkonzept des präzisen Pflanzenbaus. Die Nutzung der räumlichen Informationen aus Unkrautverteilungskarten, Boden- und Ertragskarten tragen zu einer Präzisierung der Entscheidungen zur Unkrautkontrolle bei. Ertragskarten können helfen, Felder in Zonen hohen oder niedrigen Ertragspotentials einzuteilen (BLACKMORE 2000). Informationen über die räumliche Verteilung des Ertragsniveaus auf Ackerschlägen ermöglichen es, die ökonomische Schadensschwelle teilschlagspezifisch anzupassen, Bodenkarten können wichtige Informationen liefern, die Wirkstoffdosis und die Wirkstoffe (Boden- und Blattherbizide) teilflächenspezifisch anzupassen. Humus- und Tongehalt haben Einfluss auf die Effektivität eines Bodenherbizides (BLUMHORST *et al.* 1990), da Wirkstoffe von Humus und Tonmineralien sorbiert werden. Bei der Ausbringung von Bodenherbiziden, die über die Pflanzenwurzeln aufgenommen werden, sollte dies berücksichtigt werden. Durch das Verständnis der Ursachen von Heterogenität in der Unkrautverteilung ist eine gezieltere Bekämpfung möglich. Viele Unkrautarten sind in ihrem Vorkommen stark an die innerhalb eines Ackerschlaages wechselnden Bodenverhältnisse und Bewirtschaftungsweisen gebunden. ANDREASEN *et al.* (1991) untersuchten die Korrelation zwischen der Bodentextur, dem pH-Wert, dem Phosphat-, Kalium- und Humusgehalt und dem Auftreten bestimmter Unkrautarten. Dabei zeigte sich, dass vor allem die Textur des Bodens einen großen Einfluss

auf die Abundanz und Artenverteilung der Unkräuter hatte. Die Individuendichte der Arten *Galeopsis bifida* Boen., *Myosotis arvensis* (L.) Hill., *Polygonum aviculare* L. und *Viola arvensis* nahm mit steigendem Tongehalt signifikant ab, die der Arten *Galium aparine*, *Lamium purpureum* L., *Sinapis arvensis* und *Veronica persica* Poiret stieg an. Hier zeigte sich vor allem die Anpassung der Unkrautarten an eine unterschiedliche Wasserversorgung. In geringerem Ausmaß hatte die Variation im Gehalt an Macro- und Micronährstoffen und der pH-Wert Einfluss auf die Unkrautdichte einiger Arten. NORDMEYER und DUNKER (1999) wiesen eine hohe Dichte von *Alopecurus myosuroides* in Teilschlägen nach, die durch einen hohen Ton- oder Magnesiumgehalt im Boden gekennzeichnet waren. *Poa annua* wurde in einer hohen Dichte in mehr sandigen Feldabschnitten gefunden, *Viola arvensis* korrelierte mit Bereichen hoher Magnesium- und eine niedrige Phosphatkonzentration gefördert. Da sich die in diesen Studien untersuchten Faktoren oftmals wechselseitig beeinflussten, ist es allerdings schwierig, einen einzelnen Auslöser für das Auftreten von Unkrautpopulationen zu identifizieren. Ebenfalls lassen sich allein aus Bodenkarten keine Rückschlüsse auf die zu erwartende Unkrautartenzusammensetzung ziehen. Überhaupt ist unklar, ob es kausale Zusammenhänge zwischen Unkrautvorkommen und einzelnen Bodeneigenschaften gibt. CHANCELLOR (1985) beobachtete in einer 20-jährigen Studie Variationen in der Unkrautpopulation auf einer aus Grünland hervorgegangenen ackerbaulich genutzten Fläche. In einem Teil der Fläche, der in einem Zeitraum von 15 bis 20 Jahren vor dem Grünlandumbruch bereits einmal ackerbaulich genutzt wurde, war *Fumaria officinalis* L. das dominierende Unkraut. Ein anderer Teil war in einem Zeitraum von 5 bis 10 Jahren vor dem Grünlandumbruch in Ackernutzung. Hier dominierte *Papaver rhoeas*. Die beiden vormals unterschiedlich bewirtschafteten Feldabschnitte waren auch in ihrer übrigen Unkrautpopulation klar voneinander abzugrenzen. Als Grund hierfür wird die unterschiedliche Lebensdauer der Unkrautsamen angenommen, die sich in der zwischenzeitlichen Periode unter Ackernutzung etablieren konnten und bei dem erneuten Grünlandumbruch verstärkt aufliefen. Auch SÖKEFELD *et al.* (1995) erkannten in der Schlaghistorie Ursachen für die Variabilität der Unkrautgesellschaft. Die vormalige Teilung eines Feldes in eine hackfruchtbetonte und eine getreidebetonte Fruchtfolge drückte sich im unterschiedlichen Vorkommen von Unkrautarten aus. Auf einem Teilschlag (Hackfrucht) wurde insbesondere *Chenopodium album* als Frühjahrskeimer gefördert. Im Teilschlag mit höherem Getreideanteil in der Felderfolge konnten sich die Ungräser stärker etablieren.

Die in TURBO eingesetzten Boniturverfahren zur Erstellung von Applikationskarten waren geeignet, kleinräumige Veränderungen von Unkrautpopulationen wiederzugeben. Das manuelle Boniturverfahren mit einer Auflösung von 7,5 m * 15 m bildete durch die Bewertung von ca. 90 Boniturlinien pro Hektar eine ausreichende Grundlage für die teilschlag-

spezifische Unkrautkontrolle über Applikationskarten. Die Tatsache, dass bei den Erfolgsbonituren nur in einem Fall eine Überschreitung der Schadensschwellen beobachtet wurde, lässt darauf schließen, dass die Unkrautverteilung in den Applikationsentscheidungen adäquat berücksichtigt wurde. Manuelle Boniturverfahren im vorgestellten Raster erlauben zwar eine genaue Detektion von Problemunkräutern wie *Galium aparine* und eine effektive teilschlagspezifische Unkrautkontrolle, werden aber durch den hohen Zeitaufwand nur wissenschaftlichen Untersuchungen vorbehalten sein.

Durch GIS-gestützte Boniturverfahren konnten Nester von mono- und dikotylen Unkräutern bonitiert und die Ergebnisse durch Applikationskarten in eine teilschlagspezifische Unkrautbehandlung umgesetzt werden. Auch für die Bonitur von ortstabilen Unkräutern wie *Cirsium arvense* scheint dieses Verfahren geeignet (NAGY *et al.* 2004, REISINGER *et al.* 2004). Zusätzliche Informationen aus Bodenkarten, Ertragskartierungen, alten Unkrautverteilungskarten oder Praxiswissen können die Qualität solcher Applikationskarten im Laufe der Jahre verbessern. Gerade für kleinere landwirtschaftliche Betriebe ergeben sich so Perspektiven einer kostengünstigen Alternative der Precision Farming Technologie. Eine kleinräumige Erfassung der Unkrautverteilung, die in Abhängigkeit von der jeweiligen Witterung, der angebauten Kulturpflanze und dem Zeitpunkt die wirkliche Verteilung und Abundanz einzelner Unkrautarten wiedergibt, kann nur mit einer kameragesteuerten Verfahrenstechnik realisiert werden. Das in dieser Arbeit vorgestellte kameragesteuerte Boniturverfahren bildet daher die Grundlage für eine automatisierte Erfassung der Unkrautverteilung im Ackerbau.

Unkrautverteilungskarten können weiterhin dazu dienen, die pflanzenbaulichen Maßnahmen teilflächenspezifisch anzupassen, um die Konkurrenzkraft der Kulturpflanze gegenüber den Unkräutern zu erhöhen. Die Ertragsverluste je Unkrautpflanze/m² sinken mit steigender Konkurrenzkraft der Kulturpflanze. So konnte nach PALLUTT (2000) eine standortangepasste Stickstoffdüngung und Aussaatstärke den durch Unkräuter hervorgerufenen Ertragsverlust deutlich senken. In diesen Beständen konnte die Unkrautkonkurrenz häufig mit reduzierten Herbizidaufwandmengen ausreichend unterbunden werden. Eine langjährige Dokumentation der räumlichen und zeitlichen Populationsdynamik von Unkräutern kann auch dazu dienen, bestehende Populationsmodelle zu verbessern. Dadurch könnten Entwicklungen von Bewirtschaftungskonzepten dargestellt und evaluiert werden.

Durch ihre geringe Reaktionszeit und die Positionsbestimmung über dGPS wurde mit der Dreikammerspritze eine hohe Applikationsgenauigkeit erreicht. Die zentrale Steuerungssoftware erlaubt, dass sowohl Schadensschwellen für Unkrautklassen als auch die

Herbiziddosis individuell eingestellt werden kann. Benötigte Herbizidmengen werden berechnet und dokumentiert, so dass keine Restmengen entstehen. Durch die Entwicklung der Dreikammerspritze (Abbildung 5.18) steht dem Landwirt, sofern er für eine selektive Unkrautbehandlung mehrere Wirkstoffe gleichzeitig ausbringen will, eine Alternative zu einem Direkteinspeisungssystem zur Verfügung.

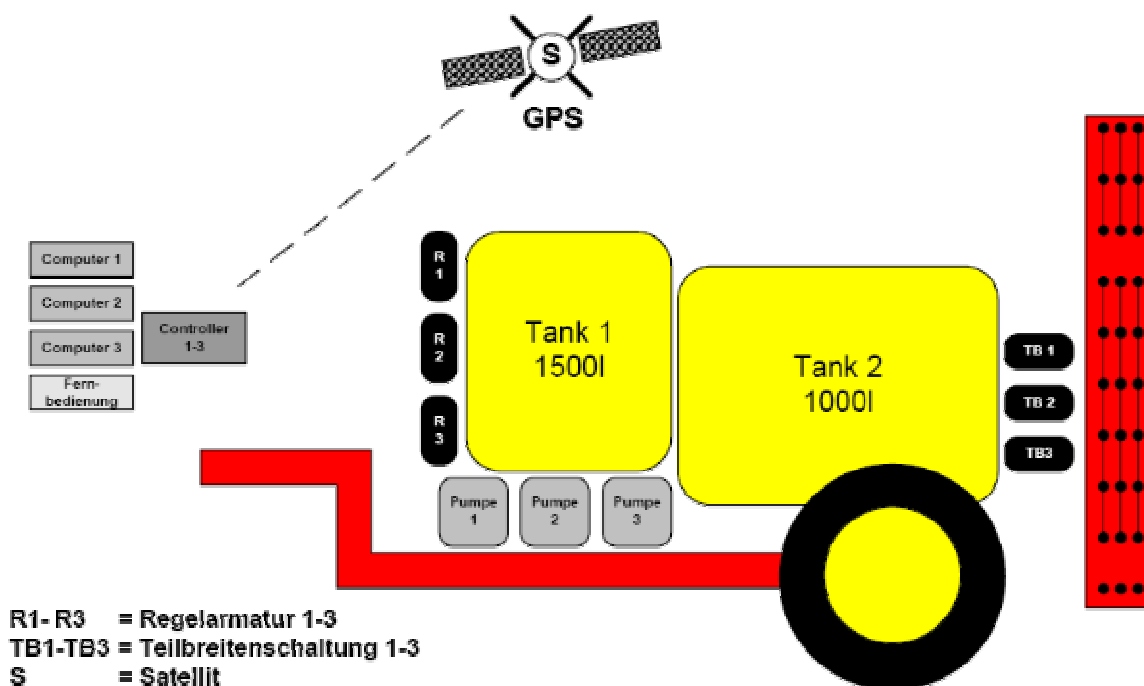


Abb. 5.18: Schematische Darstellung der Dreikammerspritze mit Teilbreitenschaltung, GPS Empfänger und zentraler Steuerungseinheit

Die Ermittlung eines geeigneten Entscheidungssystems (Schadensschwellen), durch welches an jedem Ort im Feld die richtige Herbizidmischung in der richtigen Dosierung ausgebracht werden kann, muss als eine wesentliche Voraussetzung für den sinnvollen Einsatz einer selektiven teilschlagspezifischen Unkrautbekämpfung anhand von Applikationskarten angesehen werden. Dazu müssen weitere Feldversuche angelegt und die Dynamik der Unkrautverteilung unter dem Einfluss der teilschlagspezifischen Unkrautbekämpfung untersucht werden. Die Effizienz der teilschlagspezifischen Unkrautbekämpfung wurde durch manuelle Bonituren vor und nach der Herbizidbehandlung dokumentiert und lag zwischen 71,8 % und 98,8 %, was im Bereich der konventionellen, ganzflächigen Verfahren der Unkrautbekämpfung liegt. Langzeituntersuchungen zur Entwicklung der Unkrautflora unter teilschlagspezifischen Bedingungen ermöglichen eine Folgenabschätzung für diese neue Verfahrenstechnik im Hinblick auf ökonomisch und ökologisch angepasste Schadensschwellen für Precision Farming in der Unkrautbekämpfung. Auch die langfristigen Auswirkungen einer reduzierten Herbiziddosis auf die Unkrautpopulationen sollte näher

untersucht werden. PALLUTT (2002) konnte in einem 6-jährigen Versuch in Getreide und Raps durch den ständigen Einsatz von halbierten Herbizidaufwandmengen nur einen geringen Anstieg der Unkrautdichte in den Nachfrüchten feststellen. Nur bei *Apera spica-venti* konnte ein größerer Wirkungsverlust durch die halbierten Herbiziddosen festgestellt werden. ZWERTGER *et al.* (2004) sahen keine langfristigen negativen Auswirkungen einer teilflächenspezifischen Unkrautbekämpfung auf die Verunkrautung der Folgejahre, da in jedem Jahr aufgrund von Schwellenwerten neu über eine erforderliche Bekämpfung entschieden wird. Auch WARTENBERG und DAMMER (2002) konnten trotz einer Reduzierung der Herbiziddosis auf 50 % bei geringen Unkrautdichten durch eine sensorgesteuerte, teilflächenspezifische Unkrautbekämpfung gute Behandlungserfolge erzielen. Später auflaufende Individuen von *Viola arvensis*, *Chenopodium album* und *Apera spica-venti* konnten keine Samen bilden und hatten keinen Einfluss auf den Kornertrag.

6 Ökonomie der teilschlagspezifischen Unkrautbekämpfung

6.1 Stand des Wissens

Die Wirtschaftlichkeit der chemischen Unkrautbekämpfung wird, unabhängig davon ob sie ganz- oder teilflächig durchgeführt wird, durch die Herbizidkosten, die Preise für Ernteprodukte und die Schadwirkungen der Unkräuter auf die Kulturpflanze im Jahr der Applikation sowie durch eine mögliche Zunahme der Verunkrautung in den Folgejahren beeinflusst. Einfluss haben auch die Nebenwirkungen der Herbizide auf die Kulturpflanzen. Bei der teilschlagspezifischen Unkrautapplikation kommen nach TOEWS (2004) noch Kosten für die Unkrauterfassung sowie für eine selektive und kleinräumig differenzierte Ausbringung von Herbiziden hinzu. Laut KUNISCH (2002) stehen für die Akzeptanz von teilschlagspezifischen Methoden der Unkrautbekämpfung in der Landwirtschaft ökonomische Aspekte im Vordergrund. Dies bedeutet, dass Precision Farming Technologien in der Unkrautkontrolle nur dann erfolgversprechend einzuführen sein werden, wenn trotz höherer Kosten für Unkrautbonitur und Applikationstechnik ein ökonomischer Vorteil durch Herbizideinsparungen und einen eventuellen Mehrertrag erzielt werden kann.

LETTNER *et al.* (2001) haben den Einsatz von Precision Farming Technologien in der Unkrautbekämpfung untersucht, um festzustellen, unter welchen wirtschaftlichen Bedingungen eine teilflächenspezifische Applikation in der Praxis realisierbar ist. Rechnerisch ermittelten sie in Abhängigkeit vom Ertragsniveau und der Größe des zu behandelnden Flächenanteils Einsparungspotenziale von 12 bis 35 €/ha in Winterweizen, 16 bis 41 €/ha in Wintergerste, 12 bis 33 €/ha in Winterroggen, 17 bis 51 €/ha in Mais und 64 bis 151 €/ha in Zuckerrüben. Die Beantwortung der Frage, bei welcher Flächengröße die Schwelle zur Wirtschaftlichkeit (*break even*) im teilflächenspezifischen Management erreicht wird, hängt auch von der Höhe der Herbizidkosten in einer Kulturart ab. Je teurer die Herbizide sind, desto geringer muss die Einsatzfläche der Geräte im Jahr sein bzw. desto kleiner kann der Flächenanteil eines Feldes sein, der nicht behandelt werden muss. TIMMERMANN *et al.* (2003) berechneten in einem vierjährigen Versuch monetäre Einsparungen von 42 €/ha in Mais, in Zuckerrüben von 20 €/ha, in Wintergerste von 27 €/ha, bei einer mittleren Herbizideinsparung von 54 %. Die durchschnittliche Einsparung von 33 €/ha steht somit für die Finanzierung von zusätzlichen Kosten für die Unkrautbonitur und Applikationstechnik zur Verfügung. BARROSO *et al.* (2003) evaluierten den ökonomischen Nutzen einer teilflächenspezifischen Bekämpfung von *Avena sterilis* in Wintergerste. Dieser war abhängig von der Unkrautverteilung und dem angewendeten Boniturraster. Ökonomisch

sinnvoll war eine teilschlagspezifische Behandlung nur, wenn mehr als ein Drittel der Fläche nicht behandelt werden musste.

Das Einsparpotential für Herbizide, aber auch die ökonomische Einschätzung der teilschlagspezifischen Unkrautkontrolle, variiert je nach angewandtem Verfahrenssystem und Kulturpflanze zwischen 9 % und 92 % (KTBL 2001). DAMMER und WARTENBERG (2004) erzielten mit dem Einsatz eines optoelektronischen Sensors Einsparungen von 13 % bis 43 % in Getreide und Erbsen durch Reduzierung der Herbiziddosis. Trotz Mitteleinsparungen führte das Verfahren nicht zu einer stärkeren Folgeverunkrautung. Auch Ernteerschwerisse bzw. Grünbesatz im Druschgut konnten nicht beobachtet werden. NAGY *et al.* (2004) konnten durch ein GPS-gestütztes Boniturverfahren für mehrjährige Unkräuter wie *Cirsium arvense* und *Convolvulus arvensis* in Mais über 70 % an Herbiziden einsparen. Die Unkrautnester wurden mit einer Flächenleistung von 2 bis 5 ha/h bei diesem Verfahren bonitiert. DICKE *et al.* (2004) erzielten über eine manuelle Unkrautkartierung in Braugerste eine Herbizideinsparung von 54 % für *Cirsium arvense* und *Galium aparine* und von über 90 % für die mono- und dikotylen Unkräuter, indem sie unterschiedlich hohe Schadschwellen verwendeten. Manuelle Kartierungsverfahren stellen in der Praxis allerdings kaum eine Alternative zu automatisierten Verfahren dar, da durch den hohen Zeitaufwand die Lohnkosten die erwarteten Kosteneinsparungen übertreffen würden.

TIMMERMANN *et al.* (2003) schätzen die Kosten für ein Verfahren einer automatisierten Unkrautkartierung über Bildverarbeitungsverfahren auf ca. 9 €/ha. Die Investitionen für die Ausrüstung einer handelsüblichen Spritze (12 m) mit optoelektronischen Sensoren, die online Unkräuter detektieren, wurde auf 13.200 € geschätzt. TOEWS (2004) geht davon aus, dass eine für die teilflächenspezifische Ausbringung von Herbiziden geeignete Pflanzenschutzspritze mit einem Direkteinspeisungssystem 30.000 € teuer ist als eine entsprechende Standardspritze. Daraus würden sich wiederum Zusatzkosten für die Applikationstechnik von ca. 10 €/ha ergeben. Eine ökonomische Bewertung ist allerdings aufgrund der noch fehlenden praxisreifen Technologie problematisch.

6.2 Ziele

Im Projekt *Teilschlagspezifische Unkrautbekämpfung durch raumbezogene Bildverarbeitung im Offline- und (Online-) Verfahren* (TURBO) wurden verschiedene Boniturverfahren eingesetzt. Prototypen eines kameragestützten Boniturverfahrens und einer für eine selektive Ausbringung von Herbiziden geeigneten Pflanzenschutzspritze wurden dabei in der

Praxis getestet. Die zusätzlichen Kosten dieser Verfahrenstechnik und die aus den Herbizideinsparungen hervorgegangenen direkten ökonomischen Vorteile wurden im Rahmen einer projektbegleitenden Arbeitsgruppe gemeinsam mit dem Kuratorium für Technik und Bauwesen in der Landwirtschaft (KTBL) berechnet. Die Ergebnisse werden in diesem Kapitel dargestellt und in Zusammenhang mit anderen, nicht monetär berechneten Vorteilen dieser Verfahrenstechnik diskutiert.

6.3 Material und Methoden

Die im TURBO Verfahren verwendete Applikationssoftware *Spray Control* erlaubt eine Berechnung der gesamten Spritzmenge für jede Herbizidklasse und gibt gleichzeitig die behandelte Fläche an. Anhand der Applikationskarten wurden aus diesen Zahlen die jeweiligen Herbizideinsparungen für Ungräser und Unkräuter sowie für die Problemunkräuter *Galium aparine* bzw. *Cirsium arvense* errechnet. Basis für die Berechnung waren die Applikationskarten der manuellen Bonituren, die für alle Schläge mit einer teilschlagspezifischen Behandlung vorlagen. Für die Berechnung der Herbizidkosten wurden die Einkaufspreise des Anwenders herangezogen.

Verschiedene Boniturverfahren wurden für die Kartierung von Unkräutern angewendet und evaluiert. Ein manuelles Boniturverfahren wurde auf allen Flächen für die Unkrautkartierung vor und nach der Herbizidbehandlung verwendet. Für die Durchführung einer manuellen Bonitur im 7,5 m * 15 m Raster wurden Investitionskosten für Applikationssoftware, Computer und Zubehör sowie ein einmaliges Einmessen der Felder eines 100 ha Betriebes in Höhe von 7.250 € veranschlagt. Der Zeitaufwand für die Erstellung einer Applikationskarte betrug 3 h/ha und wurde mit 13 €/AKh berechnet. Bei einer Abschreibung über 5 Jahre wurde von einer jährlichen Flächenleistung von 50 ha ausgegangen.

Das MiniGis Verfahren wurde bei einer jährlichen Flächenleistung von 100 ha mit Investitionskosten von 4.500 €/ha (Handheld mit GPS Empfänger, Applikationssoftware) berechnet. Die Arbeitszeit für die Erstellung einer Applikationskarte verringerte sich auf 1,25 AKh/ha.

Die Anschaffungskosten für ein kameragesteuertes Bildverarbeitungssystem mit einer Arbeitsbreite von 21 m und 3 Kameras bei einer jährlichen Flächenleistung von 1.000 ha bezifferten sich in Absprache mit an dem Projekt beteiligten Partnern auf 25.000 €. Neben Unterhaltungskosten von jährlich 1.000 € wurden für das Offline-Verfahren auch die zusätzlichen Kosten für die getrennte Feldüberfahrt berechnet. Im Online-Verfahren entfallen

diese Kosten, da Unkrautdetektion und -applikation in einem Arbeitsgang durchgeführt werden.

Den Berechnungen der Kosten für die Applikationstechnik liegen die Zahlen der KTBL-Datensammlung Betriebsplanung 2004/05 (KTBL 2004) zugrunde. Den Applikationskosten mit einer herkömmlichen, gezogenen Pflanzenschutzspritze (21 m Gestänge, 3.000 l Tankfassung) bestehend aus den festen Maschinenkosten (ohne Schlepper), veränderlichen Maschinenkosten (Füll- und Fahrzeiten, Wendezeiten) sowie den Kosten für Herbizide und Wasser wurden die Applikationskosten mit einer Dreikammerspritze gegenübergestellt. Die Anschaffungskosten einer Dreikammerspritze wurde von den Projektpartnern mit 70.000 € beziffert. Die Angaben zu den veränderlichen Maschinenkosten orientierten sich an dem Einsatz auf einer 5 ha großen Parzelle mit 330 m Länge. Als Standardspritzmenge einer konventionellen Pflanzenschutzspritze wurden 300 l/ha festgelegt. Die maximale Ausbringungsmenge der Dreikammerspritze betrug 290 l/ha pro Leitungssystem.

6.4 Ergebnisse

Die Herbizideinsparungen unterlagen einer hohen Variabilität abhängig von Kulturpflanze, Jahr, Betrieb sowie Unkrautartenzusammensetzung und Samenpotential des jeweiligen Schlags. Das Einsparpotential in Getreide auf dem Hackfruchtbetrieb Dikopshof war höher als auf dem Betrieb Hurtz mit einer getreidebetonten Fruchtfolge. In Mais wurden nur geringe Einsparungen bei dikotylen Unkräutern realisiert, da es durch die langjährige Monokultur von Mais auf einem Schlag zu einem Unkrautbefall kam, der einen hohen Herbizidaufwand erforderlich machte. In Zuckerrüben wurden die Herbizidbehandlungen gegen Unkräuter ganzflächig mit betriebsüblicher Aufwandmenge durchgeführt. Im Jahr 2004 lag die durchschnittliche Herbizideinsparung in Sommergerste, Winterraps und Wintergerste auf dem Betrieb Hurtz bei 22 % für Unkräuter und 34 % für Ungräser. In 2005 konnten 34 % für Unkräuter und 43 % für Ungräser in den Kulturarten Winterweizen, Sommergerste, Erbsen, Winterraps und Wintergerste eingespart werden. In Winterweizen wurden zusätzlich bei der Behandlung von *Galium aparine* 52 % des eingesetzten Herbizides reduziert und in Winterraps (2005) führte eine teilschlagspezifische Behandlung von *Cirsium arvense* zu einer Einsparung von 72 %.

Auf dem Dikopshof waren 2004 Herbizidreduzierungen von durchschnittlich 33 % (Unkräuter) bzw. 49 % (Ungräser) in Wintergerste, Zuckerrüben, Mais und Wintergerste möglich. Die separate Behandlung von *Galium aparine* in Winterweizen und Zuckerrüben

führte zu einer Einsparung von 77 %. In 2005 wurden in Sommergerste und Winterweizen 69 % (sonstige Unkräuter), 78 % (Ungräser) sowie 83 % (*Galium aparine*) eingespart.

Auf einigen Schlägen des Betriebes Hurtz konnten teilweise höhere Einsparungen nicht realisiert werden, da aufgrund der Fruchtfolge und der eingesetzten Minimalbodenbearbeitung eine flächendeckende Verunkrautung von *Brassica napus* in Sommer- bzw. Wintergerste und von *Hordeum vulgare* in Winterraps zu bekämpfen war. Beispielsweise wären in Sommergerste (2004) ohne diese betriebsbedingte Unkrautsituation Herbizeideinsparungen für Unkräuter von 56 % anstatt 19 % möglich gewesen.

Abbildung 6.1 gibt Auskunft über die Einsparungen in den verschiedenen Unkrautklassen nach Kulturart, Betrieb und Jahr. Eine Tabelle mit den eingesetzten Herbiziden und angewandten Aufwandmengen auf den Versuchsschlägen 2004 und 2005 befindet sich im Anhang.

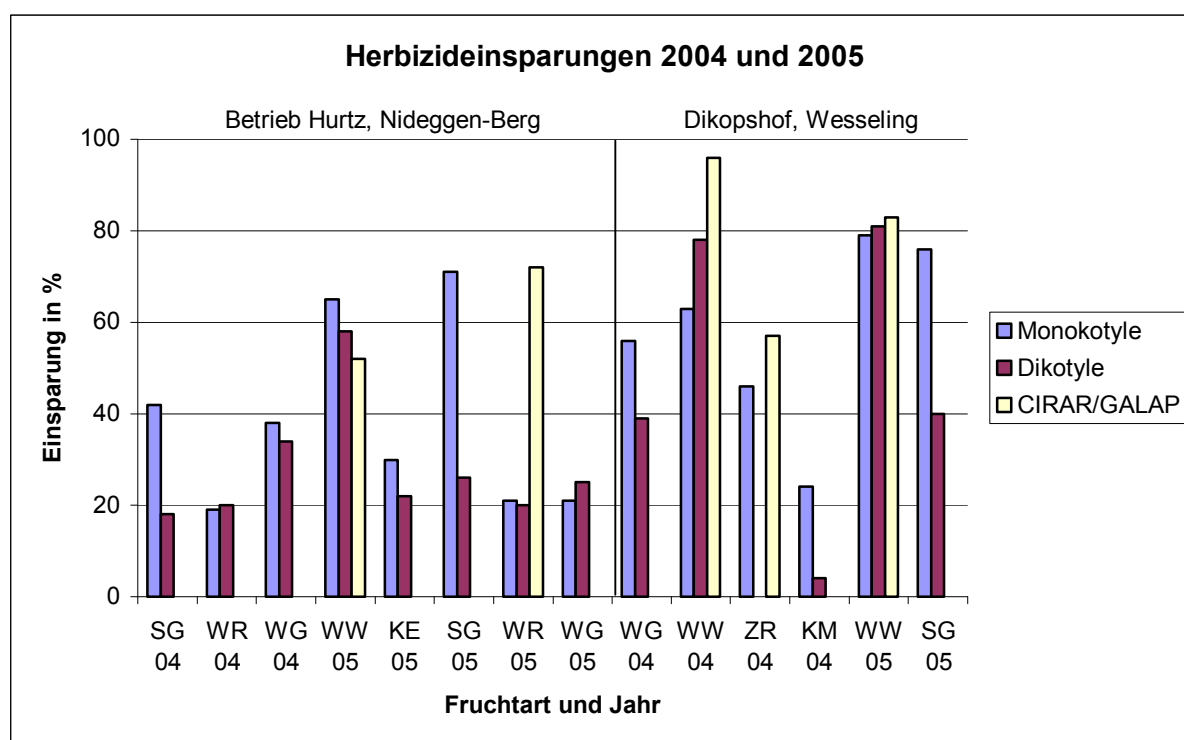


Abb. 6.1: Herbizeideinsparungen für die Unkrautklassen mono- und dikotyle Unkräuter sowie *Galium aparine* oder *Cirsium arvense* in den Jahren 2004 und 2005 auf dem Betrieb Hurtz und auf dem Dikopshof.

Die Betriebsleiter des Dikopshofes und des Betriebes Hurtz wählten die Pflanzenschutzmittel unter ökonomischen und anwendungstechnischen Gesichtspunkten aus. Neben dem Preis war vor allem das artenspezifische Wirkungsspektrum der Herbizide mit für die Auswahl verantwortlich. Die durch die Unkrautbonitur bekannte Artenzusammensetzung und -dichte führte dazu, dass die Bekämpfung von Problemunkräutern wie *Galium aparine*, *Cirsium*

arvense oder auch *Bromus spp.* teilweise durch das Wirkungsspektrum der eingesetzten Herbizide gegen mono- bzw. dikotyle Unkräuter abgedeckt wurde. Bei einer geringen Unkrautdichte wurde aus Kostengründen in diesen Fällen auf eine separate Behandlung verzichtet, auch wenn auf kleineren Teilflächen die Schadschwelle für diese Arten überschritten wurde. Die Herbizidkosten für dikotyle Unkräuter bei einer ganzflächigen Behandlung variierten je nach Mittel und Kultur zwischen 20,20 €/ha und 68,00 €/ha, für die Behandlung gegen Ungräser zwischen 9,70 €/ha und 37,54 €/ha. Die Herbizidkosten für die Bekämpfung von *Cirsium arvense* betragen 57,00 €/ha, für *Galium aparine* 21,12 €/ha in Winterweizen und 24,58 €/ha in Zuckerrüben. Auf dem Betrieb Hurtz beliefen sich die durchschnittlichen Herbizidkosten für Sommergerste auf 62,94 €/ha, für Wintergerste bei 57,16 €/ha, für Winterweizen bei 70,19 €/ha und für Körnererbsen bei 73,05 €/ha. Bei Winterraps erhöhten sich die Kosten durch die zusätzliche Behandlung von *Cirsium arvense* auf den ausgewählten Schlägen von 83,40 €/ha (2004) auf 120,12 €/ha (2005).

Abbildung 6.2 zeigt eine Übersicht der Herbizidkosten für die Unkrautklassen dikotyle Unkräuter, Ungräser und *Galium aparine* bzw. *Cirsium arvense* auf dem Betrieb Hurtz und auf dem Dikopshof nach Kulturart und Jahr auf der Basis einer ganzflächigen Behandlung mit den für die teilschlagspezifische Unkrautbekämpfung eingesetzten Herbiziden.

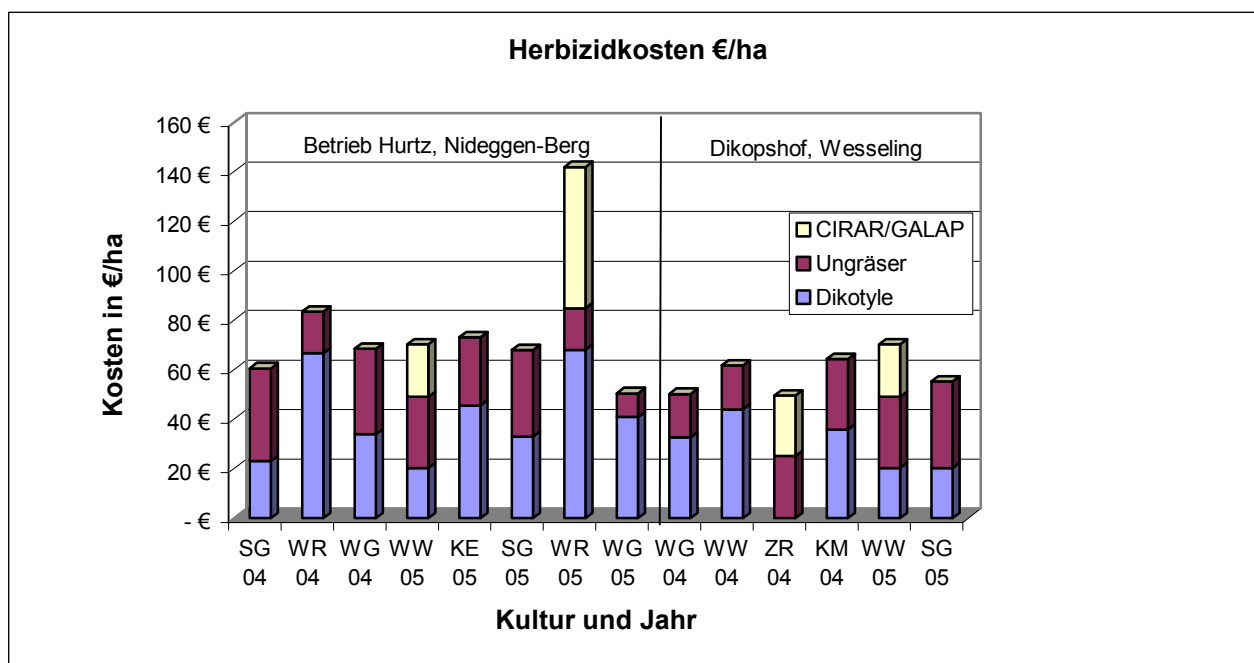


Abb. 6.2: Herbizidkosten nach Kulturart und Jahr für eine konventionelle Unkrautbehandlung auf dem Betrieb Hurtz und auf dem Dikopshof.

Auf der Basis der Herbizidkosten für eine ganzflächige Behandlung wurden die Einsparungen durch eine teilschlagspezifische Bekämpfung nach Unkrautklassen berechnet.

Dabei konnten durch die gezielte Ausbringung von Herbiziden über Applikationskarten durchschnittlich 25,71 €/ha (Betrieb Hurtz) bzw. 29,52 €/ha (Dikopshof) eingespart werden. Ein sehr hohes Einsparpotential bestand in Kulturen, in denen der Herbizidaufwand für mono- und/oder dikotyle Unkräuter um 50 % oder mehr gesenkt werden konnte oder in denen durch die Behandlung von Problemunkräutern ein drittes Herbizid auf Teilflächen eingesetzt wurde.

In Tabelle 6.1 sind die Herbizideinsparungen in den Jahren 2004 und 2005 für die verschiedenen Kulturen dargestellt.

Tab. 6.1: Herbizideinsparungen in €/ha in verschiedenen Kulturen auf dem Betrieb Hurtz (1) und auf dem Versuchsgut Dikopshof (2) in den Jahren 2004 und 2005

Kultur	ha	Einsparung in %			Herbizid- einsparung €/ha
		Monokotyle	Dikotyle	CIRAR/ GALAP	
Braugerste ¹	25,6	52	21	k.A.	24,43 €
Winterraps ¹	32,8	20	20	72*	27,38 €
Wintergerste ¹	21,8	28	29	k.A.	16,84 €
Winterweizen ¹	20,0	65	58	52**	41,53 €
Körnererbsen ¹	5,8	30	22	k.A.	18,35 €
Wintergerste ²	8,5	56	39	k.A.	28,65 €
Winterweizen ²	11,1	70	80	90**	50,84 €
Mais ²	4,6	24	4	k.A.	7,81 €
Braugerste ²	2,4	76	40	k.A.	34,87 €
Zuckerrüben ²	5,3	46	k.A.	57**	25,44 €
Total bzw. Ø	137,9	47	35	71	27,61 €

* *Cirsium arvense*, ** *Galium aparine*, k.A. = keine Applikation

Die berechneten Herbizideinsparungen konnten durch die selektive Ausbringung von Wirkstoffen erzielt werden. Konventionelle Pflanzenschutzspritzen können dies nur durch mehrmalige Überfahrten realisieren. Dies wird allerdings in der Praxis wegen des zusätzlichen Zeitaufwand und der Kosten nicht relevant sein. Um die potentielle Einsparung einer teilschlagspezifischen Unkrautbekämpfung über Applikationskarten durch eine Behandlung mit einem Wirkstoffgemisch über eine Einkammerspritze zu berechnen, zeigt Abbildung 6.3 beispielhaft die Applikationskarten nach Unkrautgruppen (Wirkstoffgruppen a, b und c) wie auch die Applikationskarte für die Ausbringung eines Wirkstoffgemischs (d) mit einer konventionellen Pflanzenschutzspritze für den Schlag Heistern (Winterweizen).

Während durch die selektive Ausbringung der Wirkstoffe gegen Unkräuter 94 %, gegen Ungräser 70 % und gegen *Galium aparine* 39 % der eingesetzten Herbizide eingespart

wurden, konnte durch die Ausbringung eines Wirkstoffgemisches auf dieser Fläche nur eine Einsparung von 36 % erzielt werden.

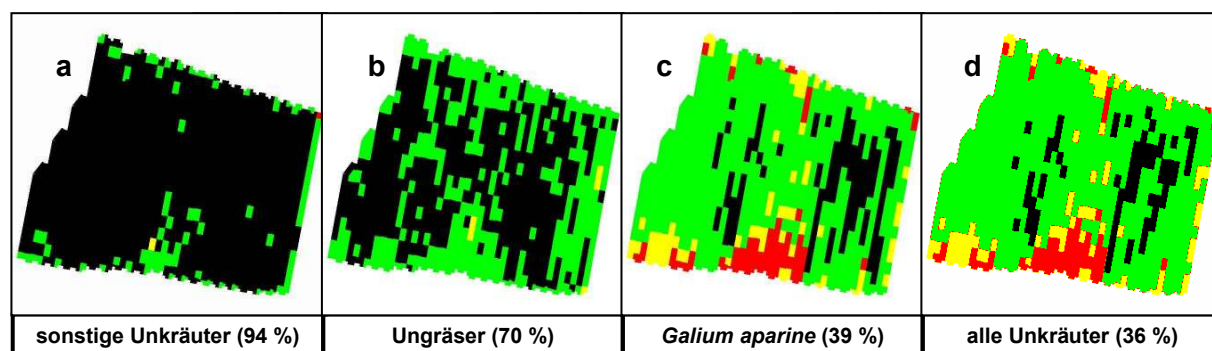


Abb. 6.3: Applikationskarten für eine schadschwellenorientierte, selektive Ausbringung von Wirkstoffen und Applikationskarte zur Behandlung mit einem Wirkstoffgemisch (rechts) für den Schlag Heistern (Winterweizen, 7,67 ha)

Noch geringere Einsparpotentiale durch konventionelle Pflanzenschutzspritzen waren auf Flächen mit einer ganzflächigen Verunkrautung durch Ausfallraps gegeben. Abbildung 6.4 zeigt die Applikationskarten für den Schlag Barth (Sommergerste, 8,43 ha). Durch Ausfallraps kam es zu einer flächendeckenden Verunkrautung. Bei der Behandlung der Unkräuter (a) konnten dadurch nur 26 % des Wirkstoffes eingespart werden. Ohne die Verunkrautung durch die Vorfrucht wäre eine Reduzierung des Herbizideinsatzes von 59 % möglich gewesen (c). 71 % wurden bei der Bekämpfung von Ungräsern (b) eingespart. Eine Reduzierung der Herbizidmenge von 21 % (d) bei der Ausbringung eines Wirkstoffgemisches war in diesem Fall nur durch die Reduzierung der Herbiziddosis auf Teilflächen möglich.

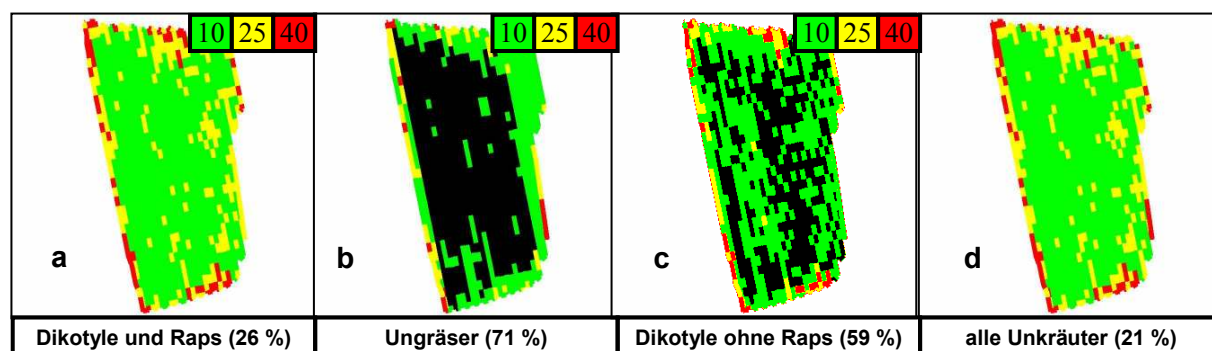


Abb. 6.4: Applikationskarten für eine schadschwellenorientierte, selektive Ausbringung von Wirkstoffen (a, b), gegen Unkräuter ohne Ausfallraps (c) und zur Behandlung mit einem Wirkstoffgemisch (d) für den Schlag Barth (Sommergerste, 8,43 ha)

Auf der Basis der Erfahrungen zur Erstellung von Applikationskarten über eine manuelle Bonitur und eine GPS-gestützte Unkrautkartierung und den von den Projektpartnern

kommunizierten Preisen für eine Unkrautbonitur über digitale Bildverarbeitung sowie die Anschaffungskosten einer Dreikammerspritze wurden die Kosten für Boniturverfahren und Applikationstechnik wie folgt kalkuliert:

Applikationskarten über manuelle Bonituren würden durch den hohen Zeitbedarf 60,10 €/ha kosten. Eine MiniGIS Bonitur kann die Unkrautverteilung eines Schlages für 26,60 €/ha wiedergeben. Ein kameragesteuertes Boniturverfahren mit einer hohen räumlichen Auflösung (3 Kameras für eine Arbeitsbreite von 21 Metern) und einer Flächenleistung von 8 ha/h zur Bereitstellung von Applikationskarten für drei Unkrautklassen kostet im Offline-Verfahren 10,92 €/ha. Würde das Kamerasystem im Online-Verfahren zur direkten Ansteuerung einer Pflanzenschutzspritze verwendet, senken sich die Kosten auf 6,75 €/ha.

Die Kosten der Applikationstechnik mit einer Standardfeldspritze betragen 8,35 €/ha. Dem gegenüber stehen Kosten von 13,69 €/ha für die Ausbringung von Herbiziden mit einer Dreikammerspritze. Diese Mehrkosten von 5,34 €/ha entstehen durch den höheren Anschaffungspreis einer Dreikammerspritze und den geringeren Wirkungsgrad der Spritze, bedingt durch einen höheren Wasserbedarf bei einer selektiven Ausbringung von Wirkstoffen. Insgesamt wurden 60 % mehr Wasser für die teilschlagspezifische Ausbringung mit der Dreikammerspritze benötigt. Abbildung 6.5 gibt einen Überblick von den Verfahrenskosten der eingesetzten Technologie zur teilschlagspezifischen Unkrautbekämpfung.

Kosten Unkrautbonitur:



Kosten Applikationstechnik:



Abb. 6.5: Kosten verschiedener Boniturverfahren und Kosten der Applikationstechnik

Unter Verwendung der Verfahrenskosten für eine teilschlagspezifische Herbizidausbringung nach Unkrautklassen (Offline) entstehen somit für die Unkrauterfassung und für eine selektive und kleinräumig differenzierte Ausbringung von Wirkstoffen Kosten in Höhe von 16,26 €/ha.

Bei durchschnittlichen Herbizideinsparungen von 27,61 €/ha hat der Einsatz des TURBO-Verfahrens in den Jahren 2004 und 2005 auf den behandelten Flächen eine Kostenersparnis von 11,35 €/ha erbracht.

Erste Untersuchungen zu den Ertragswirkungen der teilschlagspezifischen Unkrautkontrolle haben gezeigt, dass keine Ertragseinbußen durch das Verfahren zu erwarten sind. Tendenziell wurden in Getreide sogar höhere Erträge auf Teilflächen erzielt, auf denen durch eine geringe Verunkrautung keine Herbizidbehandlung nötig war.

6.5 Diskussion

Die auf dem Betrieb Hurtz und dem Versuchsgut Dikopshof erzielten Herbizideinsparungen in verschiedenen Kulturarten decken sich mit den Erfahrungen von NORDMEYER *et al.* (1997), GERHARDS und CHRISTENSEN (2003), DAMMER *et al.* (2003), TIMMERMANN *et al.* (2003), GERHARDS und SÖKEFELD (2003) und anderen Autoren, die Methoden zur teilschlagspezifischen Unkrautbekämpfung in der Praxis angewendet haben.

WERNER und GARBE (1998) haben durch Kartierungen der Unkrautverteilung in drei Feldern mit Winterraps (48,7 ha) festgestellt, dass auf 22 % bis 71 % der untersuchten Flächen eine Herbizidmaßnahme unwirtschaftlich war. Die in den Jahren 2004 und 2005 unter Praxisbedingungen erzielten Einsparpotentiale von 35 % für dikotyle Unkräuter, 47 % für Ungräser und 71 % für die Problemunkräuter *Galium aparine* und *Cirsium arvense* zeigen, dass die teilschlagspezifische Unkrautbekämpfung die konsequente Umsetzung des ökonomischen Schadensschwellenmodells bedeutet. Auch kann nach ZWERGER *et al.* (2004) auf größeren Flächen das Einsparpotential höher sein als auf den hier bewerteten Versuchsflächen mit einer Schlaggröße von 2 ha bis maximal 9 ha.

Die Herbizidkosten wurden um durchschnittlich 27,61 €/ha reduziert. Dem gegenüber standen zusätzliche Kosten von 16,26 €/ha für die Anschaffung einer Technologie zur automatischen Unkrauterfassung und einer kleinräumig und selektiv wirkenden Applikationstechnik. Ein Gewinn um mehr als 10 €/ha stellt schon heute einen Anreiz für

viele Landwirte dar, in neue, umweltschonende Technologien der Pflanzenproduktion zu investieren.

Da für eine Einführung von Technologien einer teilschlagspezifischen Unkrautbekämpfung durch den Landwirt direkte ökonomische Vorteile im Vordergrund stehen (ACKERMANN und SCHWARZ, 1999), wurden hier nur die zusätzlichen Verfahrenskosten der tatsächlichen Herbizidkosteneinsparung gegenübergestellt. Der Landwirt muss im Rahmen der Dokumentationspflicht die Einhaltung von Vorschriften des Umwelt- und Verbraucherschutzes nachweisen (AHLERS 2003). Ein vorhandenes, raumbezogenes Datenmanagement, wie im TURBO Verfahren für die Unkrautbekämpfung entwickelt, kann sich dann als ökonomischer Vorteil gegenüber der Marktkonkurrenz beim Absatz von Agrarprodukten erweisen. Auch ist nicht auszuschließen, dass im Rahmen der Umsetzung des Reduktionsprogramms chemischer Pflanzenschutz zusätzliche Abgaben auf Pflanzenschutzmittel eingeführt werden (BMVEL 2005). Eine Erhöhung der Herbizidkosten würde den ökonomischen Anreiz für den Einsatz von pflanzenschutzmittelsparenden Technologien fördern (ZWERGER *et al.* 2004). Auch könnte eine direkte Förderung von umweltschonenderen Verfahren der Pflanzenproduktion die Nachfrage nach diesen Technologien erhöhen (KILIAN 2004).

Tendenziell konnten in Getreide Ertragssteigerungen durch die gezielte Ausbringung von Herbiziden beobachtet werden. Zusätzliche Untersuchungen zu den Ertragswirkungen durch den Einsatz von weniger Herbiziden auf die Kulturpflanzen sind anzustreben, da ein möglicher Ertragsvorteil für den Landwirt einen zusätzlichen ökonomischen Vorteil für die Einführung von Precision Farming darstellt. DEIKE *et al.* (2005) haben die Langzeitwirkungen von reduzierten Herbizidmengen auf die N-Effizienz untersucht. Dabei konnte festgestellt werden, dass der Einsatz von halbierten Herbizidmengen bei niedriger Unkrautdichte zu einer deutlichen Erhöhung der N-Ausnutzung führte.

Der ökonomische Vorteil durch weitere ökologische Effekte der teilschlagspezifischen Unkrautbekämpfung konnten im Rahmen dieser Arbeit nicht untersucht werden. Es ist allerdings davon auszugehen, dass eine Verringerung von Pflanzenschutzmitteln auch die potentielle Kontaminationsgefahr von Grund- und Oberflächenwasser reduziert. Nach CARTER (2000) bilden Herbizide den Hauptbestandteil der in Grund- und Oberflächenwasser gefundenen Pflanzenschutzmittel bzw. Pflanzenschutzmittelrückstände. Eine Reduzierung der ausgebrachten Herbizidmenge ist damit im Sinne des Gewässerschutzes eine vordringliche Maßnahme, die über die teilschlagspezifische Herbizidapplikation und den damit verbundenen Mitteleinsparungen anzustreben ist (LARSON *et al.* 1997). Modelle von

MITCHELL *et al.* (1996) und VERMA *et al.* (1998) zur Senkung der Gewässerbelastung mit Pflanzenschutzmitteln basieren auf einer teilschlagspezifischen Bewirtschaftung. In diesen Modellen wird eine Risikoabschätzung für die Verlagerung von Herbiziden in das Grund- oder Oberflächenwasser anhand von variierenden Bodeneigenschaften und der Topographie des Geländes gemacht. Aus diesen Informationen wiederum werden Hinweise für die teilschlagspezifische Dosierung von Herbiziden abgeleitet.

Ebenso erhöhen die verbleibenden Unkräuter die biologische Vielfalt. ZWERGER *et al.* (2004) gehen davon aus, dass die Gesellschaft von einem landwirtschaftlichen Betrieb in Zukunft mehr erwartet als die Produktion von Nahrungsmitteln. Ökonomische Anreize für Beiträge zum Erhalt der Biodiversität und der natürlichen Landschaftsstrukturen könnten für den Landwirt ein zusätzliches Argument für Investitionen in eine neue umweltschonendere Technologie sein. GEROWITT *et al.* 2003 diskutierten die Möglichkeit, dass im Ackerbau Unkrautbekämpfungsmaßnahmen, die dazu beitragen, dass Unkräuter auf dem Acker verbleiben und damit zu einer Steigerung der Biodiversität beitragen, als eine ökologische Ware durch Ausgleichszahlungen berücksichtigt werden.

Artenvielfalt oder Biodiversität auf Ackerflächen ist aus unterschiedlichen Gründen wünschenswert. So bilden Unkräuter ein genetisches Reservoir, das in der Pflanzenzüchtung als Ursprung neuer Kulturpflanzen genutzt werden kann. Auch bieten Unkrautpflanzen Lebensraum für Nützlinge und tragen damit zur Gesunderhaltung der Kulturpflanzen bei (SPAHILLARI *et al.* 1999). Positive Effekte herbizidfrei gehaltener Teilflächen auf die Artenvielfalt von Pflanzen und Tieren sind aus Ackerrandstreifenprogrammen bekannt. RASKIN *et al.* (1992) wiesen in einem solchen Programm einen Zusammenhang zwischen einer großen Biodiversität und einer geringen Häufigkeit der Herbizidbehandlungen nach. Dieser Effekt bezog sich sowohl auf die Ackerwildkräuter als auch auf die im Feld lebenden Insekten. Eine Zunahme der Populationsdichte einiger bedrohter Unkrautarten, wie *Anagalis foemina* Miller, *Adonis aestivalis* L. oder *Consolida regalis* S.F.Gray, wurde in den herbizidfrei gehaltenen Felldrändern von SCHUMACHER (1992) beobachtet. In einer größeren Selektivität von Herbiziden besteht die Möglichkeit, Umweltschäden zu reduzieren und Nicht-Zielpflanzen zu schützen. Das setzt allerdings voraus, dass der gegenwärtige Trend der Pflanzenschutzmittelindustrie, Mittel mit einem breiten Wirkungsspektrum auf den Markt zu bringen, auch durch politische Maßnahmen gebremst wird. So könnten Landwirte, die Herbizide selektiv und teilschlagspezifisch ausbringen, durch Ausgleichszahlungen gefördert werden. Gesellschaftlich wäre die Orientierung einer produktionsorientierten Förderung der Landwirtschaft hin zu einer ökologisch orientierten Förderung sicherlich wünschenswert.

In jedem Fall aber wird die gezielte und nachvollziehbare Applikation von Pflanzenschutzmitteln zu einer höheren gesellschaftlichen Akzeptanz von Pflanzenschutzmaßnahmen in der Landwirtschaft und mehr Transparenz im Verbraucherschutz beitragen.

Ziel einer ökonomisch und ökologisch sinnvollen Managementstrategie in der Unkrautkontrolle sollte es sein, den richtigen Wirkstoff in der richtigen Dosierung am richtigen Ort und zur richtigen Zeit zu applizieren. Peer Leithold, 2006

7 Diskussion und Ausblick

Der Einsatz von Verfahren der teilschlagspezifischen Unkrautkontrolle in der Landwirtschaft setzt eine automatische, sensorgesteuerte Erfassung der Unkrautverteilung voraus (KUNISCH 2002). Luftbilder sind derzeit aufgrund ihrer niedrigen Auslösung und fehlender Algorithmen für eine automatisierte Bewertung der Unkrautverteilung in Kulturpflanzenbeständen nicht für eine zeitnahe und präzise Beurteilung der Unkrautdichte nutzbar. Optoelektronische Verfahren im Nahbereich können über die Messung der Reflexionsunterschiede von Boden und Pflanzen den Deckungsgrad von Unkräutern in kulturpflanzenfreien Bereichen des Ackers berechnen und daraus Applikationsentscheidungen ableiten. Das Einsparpotential der teilschlagspezifischen Herbizidbehandlung wird dabei nur partiell genutzt, da eine Unkrautartenerkennung und die Ableitung einer an der jeweiligen Unkrautart oder –klasse orientierten Bekämpfungsentscheidung mit selektiven Wirkstoffen nicht möglich ist.

Die automatische Erfassung und Bewertung von Unkrautarten ist nur mit Hilfe von digitalen Bildanalyseverfahren möglich. In der Forschung werden verschiedene Verfahren der Bildaufnahme und –auswertung angewendet und diskutiert. Über Farbbilder (LEE et al. 1999, CHAPRON et al. 1999, SOGAARD und HEISEL 2002, PHILIPP et al. 2002, MARCHANT und OYANGO 2003, KADVIR 2004, ASSÉMAT et al. 2005) können derzeit zwar Boden und Pflanzen mit Bildverarbeitungsalgorithmen segmentiert werden und Unkrautarten anhand von Form-, Farb- oder Texturmerkmalen differenziert werden, eine automatisierte Aufnahme und Auswertung ist mit diesen Verfahren allerdings noch nicht gegeben. Für eine Auswertung von Formmerkmalen werden Farbbilder meist erst in Grauwertbilder transformiert (Abbildung 7.1).

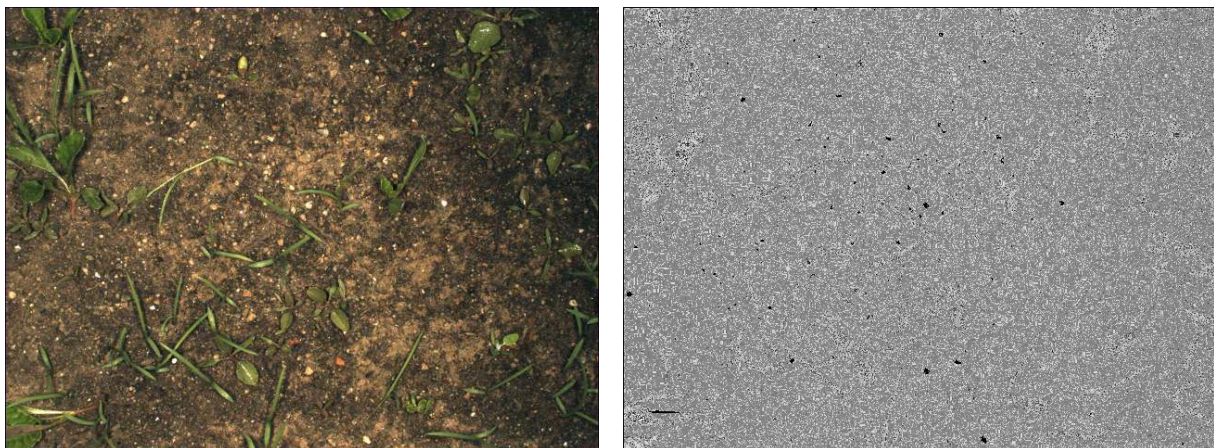


Abb. 7.1: Farbbild und über einen Farbbildverarbeitungsalgorithmus entstandenes Grauwertbild

Die Transformation von Bildern aus dem RGB Farbraum basiert dabei auf den unterschiedlichen Werten des roten (R), grünen (G) und blauen (B) Kanals. Farbbildverarbeitungsalgorithmen nutzen die unterschiedlichen Pixelwerte von Boden und Vegetation, um das gesuchte Objekt (Vegetation) zu extrahieren. Dafür wird in der Bildverarbeitung zusätzliche Rechnerzeit benötigt und durch die heterogene Qualität von im Freiland aufgenommenen Farbbildern kommt es zu Fehlklassifikationen (PHILIPP und RATH, 2002)

Das bispektrale Kamerasystem nutzt das unterschiedliche Reflektionsverhalten von Pflanzen einerseits und Boden, Mulch und Steinen andererseits. Durch die Aufnahme von zwei Bildern im roten und nah-infraroten Spektralbereich und deren Ausgabe als Differenzbild ist eine wirkungsvolle Kontrastanhebung von Pflanzen und Boden möglich. Die Segmentierung von Boden und Pflanzen kann daher mit der Bildverarbeitungssoftware über eine automatische Grauwertschwelle vorgenommen werden. Eine automatische Shutterregelung erlaubt eine Aufnahme von konturscharfen Pflanzenbildern bei Fahrgeschwindigkeiten bis zu 10 km/h.

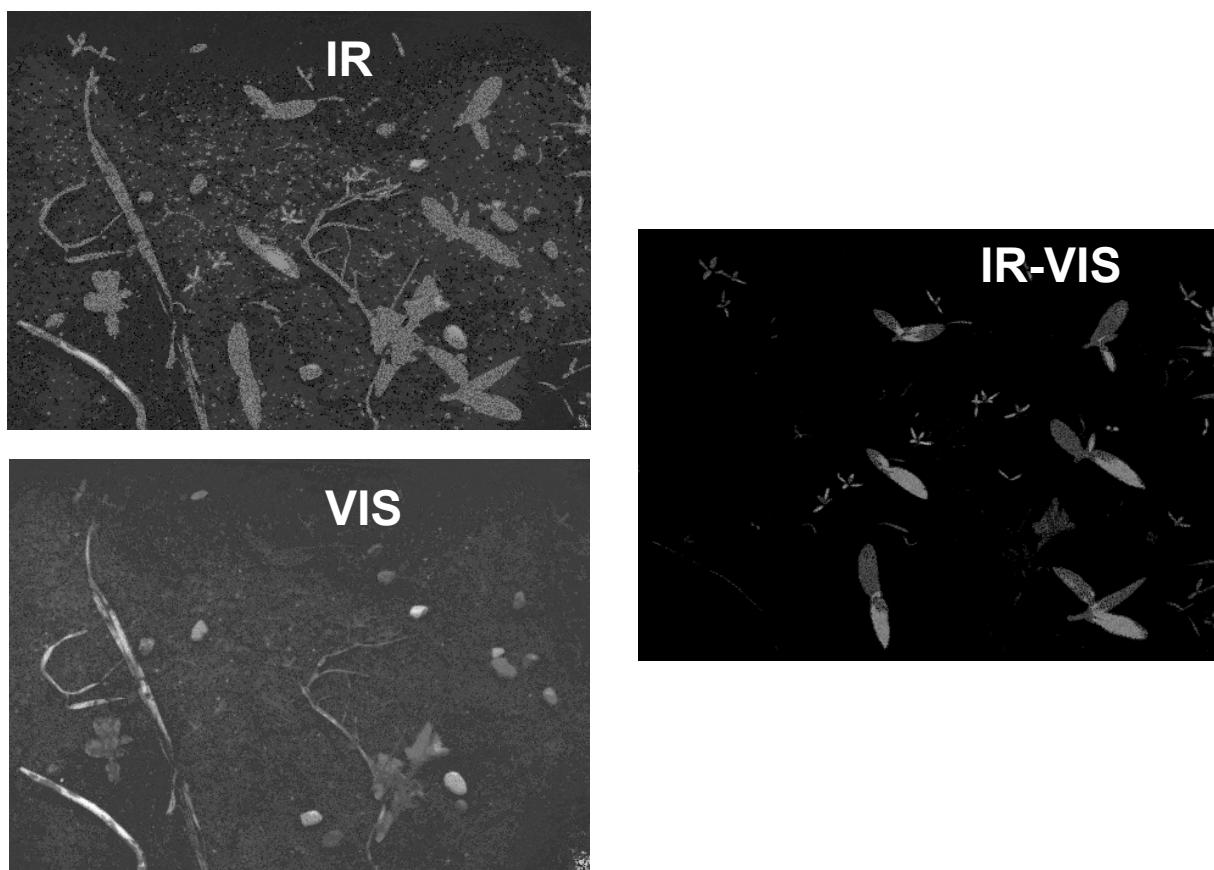


Abb. 7.2: IR und VIS Spektralbild sowie das Differenzbild mit einer Auflösung von 1024 * 766 Pixel

Aufgrund der in dieser Arbeit beschriebenen Erfahrungen bei der Bildaufnahme wurde eine Bispektralkamera mit höherer Bildauflösung und schnellerer Shuttersteuerung entwickelt. Bispektralbilder mit einer Auflösung von 1024 * 768 Pixel erlauben bei einer Bildfläche von 0,2 m² eine gute Darstellung von Unkräutern und Kulturpflanzen (Abbildung 7.2). Der Einsatz dieser Kameras wird somit zu einer größeren Boniturfläche pro Hektar führen.

Zusätzlich wurden Halogenlampen an den Seiten des Kameragehäuses angebracht, um die Qualität von Nachtaufnahmen zu untersuchen. Eine Abbildung des Systemaufbaus befindet sich im Anhang.

Die Auswertung von Formparametern zur Klassifizierung von Unkrautarten und Unkrautklassen führte zu guten Ergebnissen. Die in der Analyse benutzten geometrischen Formmerkmale sowie die Fourierdeskriptoren ergeben einen typischen digitalen Fingerabdruck der jeweiligen Pflanzenart. Sie eignen sich zur Unkrautartenerkennung besser als Farbmerkmale von Pflanzen, die schon bei der Bildaufnahme von den Beleuchtungsverhältnissen beeinflusst werden und einer stärkeren Veränderung durch Umwelteinflüsse unterliegen (HEMMING 2000).

Die Klassifizierung von Unkrautarten im Keimblattsstadium mit Hilfe der Diskriminanzanalyse führte zu sehr guten Resultaten. Der mit der Software *IMPAS-AGRI* eingesetzte Klassifizierungsalgorithmus (Fuzzy Logic, minimale Distanz) eignet sich für die Erkennung von Unkrautklassen. Eine Optimierung des Erkennungsprozesses könnte durch eine Integration von Funktionen der Diskriminanzanalyse in das bestehende Klassifikationsverfahren erreicht werden. Dies würde in allen Kulturpflanzen zu deutlich höheren Erkennungsraten der Unkrautarten führen. Neue Formparameter könnten das vorhandene Bildverarbeitungsverfahren ergänzen und die Artenerkennung innerhalb einer Mischverunkrautung mit Unkrautarten in verschiedenen Entwicklungsstadien verbessern. PHILIPP *et al.* 2002 sehen in einer hohen Erkennungssicherheit bei Problemunkräutern mit niedriger Schadensschwelle ein entscheidendes Argument für die Praxistauglichkeit der computerbildanalytischen Unkrauterkennerung. CHAPRON *et al.* (2001) zogen sowohl zwei- als auch dreidimensionale Merkmale zur Segmentierung von Boden und Pflanzen sowie für eine Differenzierung von Pflanzenarten heran.

Abbildung 7.3 zeigt beispielhaft die Veränderung der abgebildeten Pflanzenoberfläche durch eine senkrechte Bildaufnahme und eine Aufnahme im Winkel von ca. 45°. Ein dreidimensionales Merkmal würde insbesondere die Abbildung von Ungräsern im Keimblattstadium deutlich erleichtern, da diese in der zweidimensionalen Perspektive nur mit einer sehr geringen Fläche wiedergegeben werden. Probleme bei der Verarbeitung von

Digitalbildern aus unterschiedlichen Perspektiven ergeben sich derzeit bei der Entzerrung und Überlagerung der Aufnahmen.



Abb. 7.3: Senkrechte (links) und abgewinkelte (rechts) Aufnahme von Ungräsern im Keimblattstadium

DZINAJ *et al.* (1998) konnten durch die Integration eines Höhensensors die Erkennung von Mais und Unkräutern für den Einsatz einer onlinegesteuerten Hacke erheblich verbessern. Die Wuchshöhe von Pflanzen kann auch in der teilschlagspezifischen Unkrautbekämpfung von bestimmten Unkrautarten ein sicheres Differenzierungsmerkmal sein. So nutzt der *Rotowiper* die Höhenunterschiede von *Rumex* spp. und *Cirsium arvense* in Grünland für eine Einzelpflanzenbehandlung. Hierbei berührt eine mit herbizidgetränkte, rotierende Walze die in der Wuchshöhe das Grünland überragenden Unkräuter. Durch das Auftragen von blattaktiven Wirkstoffen wird eine selektive Behandlung durchgeführt. In einem bestimmten Entwicklungsstadium überragen beispielsweise *Cirsium arvense*, *Abutilon theophrasti* und *Chenopodium album* die Kulturpflanzen. Die Detektion von Einzelpflanzen über die Wuchshöhe durch einen Höhensensor könnte die Grundlage für eine teilschlagspezifische Herbizidbehandlung sein, bevor das Unkraut zur Samenreife gelangt. Ein weiteres Merkmal für eine selektive Unkrautbekämpfung kann die Position der Kulturpflanze sein. BLACKMOORE *et al.* (2005) beschreiben mechanische und chemische Verfahren der Unkrautbekämpfung in Reihenkulturen, bei denen über die exakte Lokalisierung der Kulturpflanze eine differenzierte Bekämpfung von Unkräutern möglich ist.

Die Dreikammerspritze ermöglicht eine der Unkrautverteilung und -dichte angepasste Ausbringung von drei Herbizidlösungen anhand von Applikationskarten. Dadurch können hohe Herbizideinsparungen erzielt werden, die dieses Verfahren auch ökonomisch rentabel

machen. Die anwenderfreundliche Steuerungssoftware erlaubt dem Landwirt eine flexible Einstellung von Schadschwellen und eine Dokumentation der Herbizidbehandlung.

Zur Umsetzung des Einsparpotentials der teilschlagspezifischen Unkrautkontrolle müssen bei einer Pflanzenschutzspritze einzelne Teilbreiten oder sogar einzelne Düsen entsprechend der vorher getroffenen Spritzentscheidung automatisch ein- oder ausgeschaltet werden können. Die Regulierung der Herbiziddosis und ein Wechsel des Wirkstoffes erlauben eine Anpassung der Herbizidmenge und des Wirkstoffes an eine heterogene Unkrautverteilung (STAFFORD und MILLER 1993). Zur Regulierung der Ausbringung über eine Änderung des Flüssigkeitsdrucks gibt es heute verschiedene Düsentypen, die ein gleichbleibend genaues Spritzbild mit der angestrebten Tropfengröße bei variiert Herbiziddosis gewährleisten (PAICE *et al.* 1996).

Die Ideallösung der Regulierung von Ausbringungsmenge und Wirkstoffmischung stellt das Direkteinspeisungssystem dar. Hierbei werden die hochkonzentrierten Pflanzenschutzmittel über eine Dosierpumpe in den Flüssigkeitsstrom eingespeist (Abbildung 7.4). Neben dem Vorteil, dass damit während der Fahrt die Wirkstoffe und deren Dosierung geändert werden können, lösen die Direkteinspeisungssysteme das Problem der Restmengen im Spritztank.

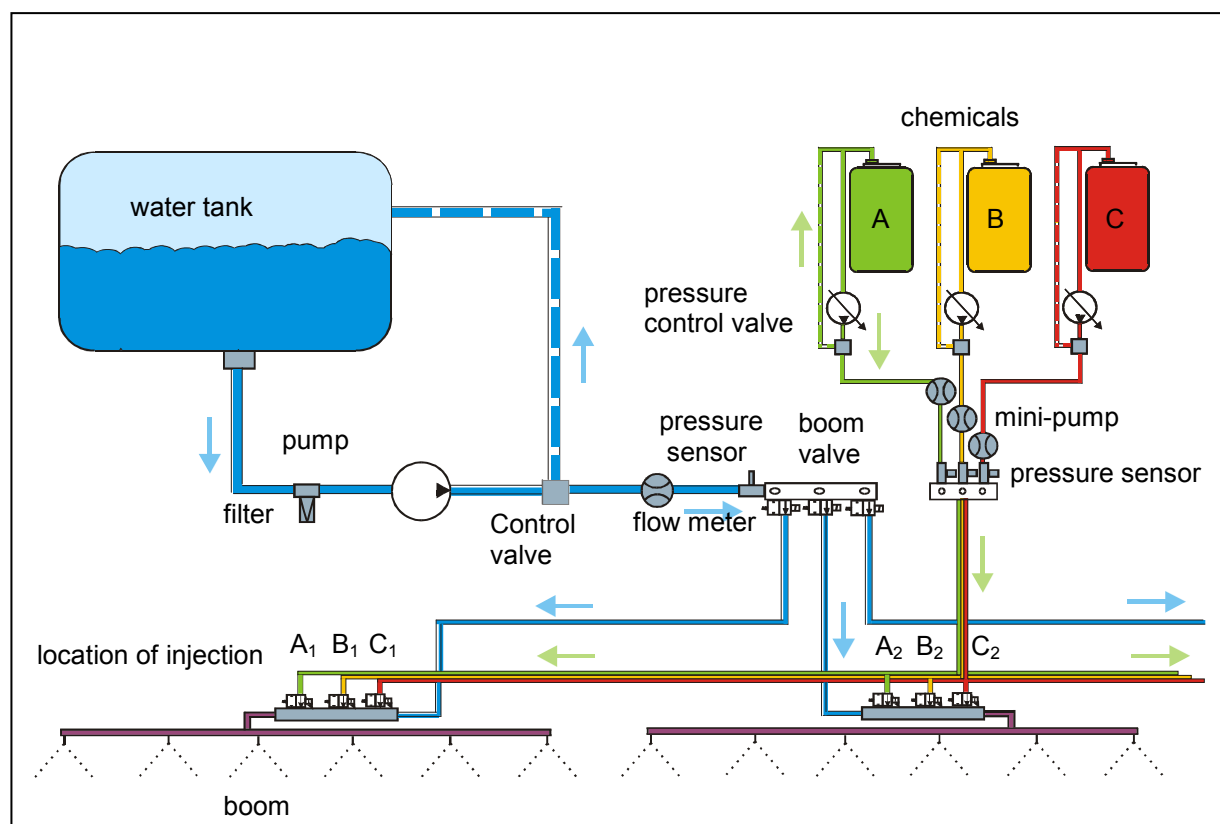


Abb. 7.4: Schematischer Aufbau eines Direkteinspeisungssystems (verändert nach SÖKEFELD *et al.* 2004)

Probleme bei der Direkteinspeisung unterschiedlicher Herbizide ergeben sich zum einen aus den verschiedenen Formulierungen (Viskosität, Löslichkeit) der Mittel und zum anderen aus der Reaktionszeit des Systems. Nach SÖKEFELD *et al.* (2004) sollte das Ziel der weiteren Entwicklung die Einspeisung der Pflanzenschutzmittel direkt an der Düse sein, wodurch das Problem der Verzögerung gelöst wäre und sensorgesteuerte Online-Anwendungen im Pflanzenschutz möglich wären.

Der Einsatz eines autonomen Fahrzeugs, das dGPS-gesteuert und mit Hilfe eines integrierten Bildverarbeitungssystems Unkräuter exakt lokalisiert und entsprechende Applikationsentscheidungen direkt an eine Pflanzenschutzspritze weitergibt, wird derzeit von SOOGARD und LUND (2005) getestet. Precision Farming in der Unkrautkontrolle könnte in Zukunft durch eine exakte Positionsbestimmung, bildanalytische Erkennungsverfahren von Unkrautarten und die räumlich präzise Ausbringung von Herbiziden auf die Zielpflanze zu einer erheblichen Reduzierung der in der Landwirtschaft ausgebrachten Herbizidmengen führen.

Bisher werden Bildaufnahme, Bildauswertung und Steuerung der Pflanzenschutzspritze über Applikationskarten von verschiedenen Softwareprogrammen unterstützt. Für einen großflächigen Praxiseinsatz, insbesondere durch mit der Technik unerfahrene Landwirte, sollten die Komponenten der Aufnahme, Auswertung und Dokumentation des TURBO Verfahrens in einer anwenderfreundlichen Software integriert werden. Neben den pflanzentypischen Formmerkmalen für die Erkennung von Unkrautarten und -klassen müssen in der Software auch Entscheidungsalgorithmen für eine teilschlagspezifische Unkrautbekämpfung nach Schadensschwellen hinterlegt sein. KLÖPFER *et al.* (2001) befragten die im Projekt *PreAgro* teilnehmenden Landwirte und Lohnunternehmen über ihre Erwartungshaltung und Probleme mit Precision Farming Technologien. Neben einem positiven ökonomischen Effekt waren Umweltschutzaspekte, Dokumentation und ein besseres ackerbauliches Verständnis wichtig. Besondere Probleme wurden aber in der Kompatibilität der auf dem Markt befindlichen Hard- und Software für Precision Farming sowie die kostenintensive Datenbeschaffung und -pflege gesehen. Eine anwenderfreundliche und kompatible Software zur Unkrauterkenung und Dokumentation der Herbizidbehandlung hilft dem Landwirt, die vorgeschriebene Dokumentationspflicht der Produktionsverfahren umzusetzen.

Wesentliche Voraussetzung für den sinnvollen Einsatz dieser präzisen Technik zur Unkrauterkenung und selektiven teilschlagspezifischen Unkrautbekämpfung ist es, dass geeignete Entscheidungssysteme (Schadensschwellen) ermittelt werden. Die Berechnung

ortspezifischer Schadenswellen setzt voraus, dass ein vertieftes Verständnis der artenspezifischen Konkurrenzbeziehungen zwischen Kulturpflanzen und Unkräutern, aber auch zwischen einzelnen Unkrautarten vorhanden ist (KUNISCH 2002). Dazu müssen weitere Feldversuche angelegt und die Dynamik der Unkrautverteilung unter dem Einfluss der teilschlagspezifischen Unkrautbekämpfung untersucht werden. Eine GIS-basierte Auswertung von georeferenzierten Daten aus Unkrautverteilungskarten, Luftbildern, Ertrags- und Bodenkarten kann helfen, Zusammenhänge zwischen Bodenart und räumlicher Verteilung von Unkrautarten sowie deren zeitlich differenzierter Interaktion mit der Kulturpflanze darzustellen und zu bewerten. Populationsdynamische Modelle erlauben das Erkennen und Identifizieren der Größen, über die sich die Verunkrautung beeinflussen und lenken lässt und bilden eine Grundlage für die Entwicklung geeigneter Managementstrategien unter Einbeziehung aller pflanzenbaulichen Maßnahmen (GRUNDY 2002). Precision Farming Technologien können nicht nur für die Unkrautbekämpfung ein neues Verständnis pflanzenbaulicher Zusammenhänge provozieren. Eine räumlich und zeitlich differenzierte Ausbringung von Produktionsmitteln in der Landwirtschaft ist sowohl ökonomisch als auch ökologisch sinnvoll. Als Systemansatz erlaubt Precision Farming eine nachhaltigere Landbewirtschaftung.

8 Zusammenfassung

Im Rahmen der vorliegenden Arbeit wurde das Verfahren *Teilschlagspezifische Unkrautbekämpfung durch raumbezogene Bildverarbeitung im Offline- (und Online-) Verfahren* (TURBO) auf Praxisflächen in den Jahren 2004 und 2005 untersucht. Die aus der praktischen Umsetzung des Verfahrens gewonnenen Ergebnisse lassen eine Bewertung der eingesetzten Technologien in den Verfahrensbereichen Bildaufnahme, Bildauswertung und teilschlagspezifische Herbizidapplikation im Feldeinsatz zu. Sie lassen sich wie folgt zusammenfassen:

- Zur **Online-Bildaufnahme** von Unkräutern und Kulturpflanzen wurden Bispektralkameras entwickelt, die durch die Verknüpfung von zwei spektralen Kanälen im roten und nah-infraroten Spektrum homogene und kontrastreiche Grauwertbilder lieferten. Drei dieser Bispektralkameras wurden auf einem Trägerfahrzeug montiert. Bei Fahrgeschwindigkeiten von bis zu 10 km/h konnten durch eine automatische Shuttersteuerung konturscharfe Grauwertbilder von Unkräutern in Getreide, Körnermais, Zuckerrüben, Körnererbsen und Winterraps aufgenommen und automatisch über ein GPS georeferenziert werden.
- Die Bispektralbilder waren auch bei wechselnden Lichtverhältnissen weitgehend frei von Störungen. Steine, Mulch, Boden und Stroh wurden durch die verwendete Aufnahmetechnik in den Bildern nicht abgebildet. Die Qualität der Bilder zeigt eine deutliche Verbesserung zur bisherigen Bildanalysetechnik mit Farb- und Infrarotkameras im Pflanzenbau.
- Die Auflösung der Kameras war für den Einsatz im Offline-Verfahren zur Erstellung von Applikationskarten ausreichend. Mit einem Bildausschnitt von 0,014 m² pro Bild konnten auch Unkräuter im Keimlingsstadium hinreichend dargestellt werden. Das dichte Aufnahmeraster mit ca. 3500 Bonitурpunkten pro Hektar erlaubte eine effiziente Erfassung der Unkrautverteilung auf Ackerflächen.
- Das Verfahren der Pflanzenerkennung über Formmerkmale erlaubte bei der automatisierten **Bildverarbeitung** (Einlesen der Binärbilder, Konturextraktion, Erkennung von Pflanzenarten durch den wissensbasierten Vergleich der Konturmerkmale) der Bispektralbilder eine gute Differenzierung von Kulturpflanzen und drei Unkrautklassen. Dabei konnten von der verwendeten Bildverarbeitungssoftware bis zu 20 Bilder pro Sekunde verarbeitet werden. Die Erkennungsgenauigkeit von unbekanntem Pflanzen über das Prinzip der minimalen Distanz bzw. über Fuzzy Logic lag zwischen 73 % (Sommergerste) und 85 % (Winterraps). Die Berechnung der Diskriminanzfunktionen zur

Trennung von Kulturpflanze und Unkrautklassen anhand der in der Wissensbasis gespeicherten Formparameter erlaubte eine deutlich bessere Klassifizierung von unbekanntem Pflanzen und erhöhte die Erkennungsqualität auf 88,4 % (Zuckerrüben) bis 94 % (Sommergerste).

- Die Formparameter von 45 Unkrautarten in den Entwicklungsstadien BBCH 10 bis BBCH 14 wurden in einer Datenbank aufgezeichnet und die Differenzierungsmöglichkeiten von Unkrautarten in Braugerste, Mais und Zuckerrüben über die Diskriminanzanalyse untersucht. Im Entwicklungsstadium BBCH 10 konnten Unkrautarten durchschnittlich zu über 70 % voneinander unterschieden werden. Sehr gut konnten Kulturpflanzen von Unkräutern sowie mono- und dikotyle Arten differenziert werden. Ein Zusammenfassen von Pflanzenarten (BBCH 10) in Wirkstoffgruppen (*sonstige Unkräuter*, *Ungräser*, *Galium aparine*) führte zu richtigen Klassifikationsergebnissen von 83 % (Sommergerste) bzw. 96 % (Mais). Wurden zusätzlich noch Formparameter der Pflanzen bis in das Entwicklungsstadium BBCH 12 in die Datenbank aufgenommen, reduzierte sich die Erkennungsqualität. Durchschnittlich konnten 40 % (Zuckerrüben) bis 45 % (Sommergerste) der Unkrautarten differenziert werden. Das Zusammenfassen von Unkräutern zu Gruppen mit gleicher Herbizidempfindlichkeit führte zu richtigen Klassifikationsergebnissen von 79 % (Sommergerste) bis 88 % (Mais).
- Über manuelle, GIS- und kameragestützte Boniturverfahren wurden Applikationskarten für drei Herbizidklassen zur **teilschlagspezifischen Unkrautbekämpfung** anhand von Bekämpfungsschwellen in Getreide, Zuckerrüben, Mais, Winterraps und Erbsen auf insgesamt 138 ha erstellt. Die Herbizidapplikation erfolgte mit einer neu entwickelten Dreikammerspritze. Diese integriert die Bauteile von drei konventionellen Pflanzenschutzspritzen auf einem Trägerrahmen und erlaubt durch drei getrennte Flüssigkeitssysteme, Teilbreitenschaltung (3 m), dGPS Ansteuerung und eine zentrale Steuerungseinheit die präzise, kleinräumige Ausbringung von bis zu drei verschiedenen Herbizidmischungen über Applikationskarten.
- Die Herbizideinsparungen durch die teilschlagspezifische Unkrautkontrolle variierten in Abhängigkeit von Kulturpflanze, Jahr, Betrieb sowie Unkrautartenzusammensetzung und Samenpotential des jeweiligen Schlages. Durchschnittlich konnten 47 % der Herbizide für Ungräser und 35 % für Unkräuter eingespart werden. Behandlungen gegen Problemunkräuter wie *Galium aparine* und *Cirsium arvense* führten zu einer durchschnittlichen Einsparung von 71 %.
- Die Effizienz der teilschlagspezifischen Unkrautbekämpfung wurde durch manuelle Bonituren vor und nach der Herbizidbehandlung dokumentiert und lag zwischen 71,8 %

und 98,8 %. Durch das Ausschalten von Teilbreiten bei einer Unkrautdicke unterhalb der Schadensschwelle und durch die Variation der Herbiziddosis von 70 % bis 100 % in Abhängigkeit von der Unkrautdicke auf Teilflächen oberhalb der Schadensschwelle kam es kaum zu Problemen mit Restverunkrautung. Erste Untersuchungen zu den Ertragswirkungen der teilschlagspezifischen Unkrautkontrolle haben gezeigt, dass keine Ertragseinbußen durch das Verfahren zu erwarten sind. Tendenziell wurden in Getreide sogar höhere Erträge auf Teilflächen erzielt, auf denen durch eine geringe Verunkrautung keine Herbizidbehandlung nötig war.

- Eine ökonomische Bewertung der eingesetzten Boniturverfahren sowie der Applikationstechnik wurde anhand der Erfahrungen von zwei Jahren Praxiseinsatz durchgeführt. Applikationskarten über manuelle Bonituren wurden durch den hohen Zeitbedarf mit 60,10 €/ha berechnet, GIS-gestützte Boniturverfahren kosteten 26,60 €/ha. Ein kameragesteuertes Boniturverfahren mit einer hohen räumlichen Auflösung im Offline-Verfahren konnte Applikationskarten für drei Unkrautklassen zu 10,92 €/ha bereitstellen. Wird das Kamerasystem im Online-Verfahren zur direkten Ansteuerung einer Pflanzenschutzspritze verwendet, senken sich die Kosten auf 6,75 €/ha. Die Mehrkosten der Applikationstechnik (Dreikammerspritze) wurden mit 5,34 €/ha beziffert.
- Für eine teilschlagspezifische Herbizidausbringung nach Unkrautklassen (Offline) entstanden Kosten in Höhe von 16,26 €/ha für die Unkrauterfassung und für eine selektive und kleinräumig differenzierte Ausbringung von Wirkstoffen. Demgegenüber wurden durchschnittliche Herbizideinsparungen von 27,61 €/ha berechnet. Der Einsatz des TURBO-Verfahrens in den Jahren 2004 und 2005 hat auf den behandelten Flächen eine durchschnittliche Kostenersparnis von 11,35 €/ha erbracht.
- Eine GIS-basierte Analyse von Unkrautverteilungskarten aus verschiedenen Boniturverfahren mit Boden- und Ertragskarten hat Kausalitäten zwischen Unkrautverteilung, Ertragsverteilung und Bodenvariabilität aufgedeckt. Erste Ergebnisse von Schadensschwellenversuchen und Untersuchungen zur zeitlichen und räumlichen Variabilität von Unkräutern konnten zur Verbesserung von Bekämpfungsentscheidungen in der teilschlagspezifischen Unkrautbekämpfung führen.

9. Summary

In this dissertation a system for site-specific weed control using digital image analysis and georeferenced application maps (TURBO) is presented. The system was applied and analysed on agricultural fields from 2004 to 2005. The results can be summarized as followed:

- For online image acquisition bi-spectral cameras were developed which took homogeneous grey scale pictures with a strong contrast using a combination of two spectral channels in the near infrared and the visible spectrum. Three bi-spectral cameras were mounted in front of a prototype carrier vehicle. Using an automatic control of the exposure time, well focused pictures of weeds in cereals, maize, sugar beets, peas and oil seed rape were taken at a speed up to 10 km/h and stored together with their GPS coordinates.
- Under changing light conditions, bi-spectral images were free of faults. Stones, mulch and soil were not illustrated. The picture quality showed a clear improvement compared to current image analysis technologies using colour and infrared cameras in plant production.
- The geometric resolution of the cameras was sufficient for creating application maps. With a size of 0.014 m² per picture weed seedlings were representatively assessed. The dense grid of 3.500 sampling points per hectare allowed an efficient detection of weed distribution within agricultural fields.
- The procedure of shape analysis including creation of binary images, shape extraction, determination of shape features, plant species discrimination and automatic classification allowed precise identification of weed species in a speed of 20 images per second. The classification rate of unclassified plants using Fuzzy Logic or the principle of minimum distance was between 73 % (malt barley) and 85 % (oil seed rape). The calculation of discrimination functions to separate crops and weed classes by shape parameters allowed a better classification of unknown plants and increased the classification rate to 88.4 % (sugar beets) and 94 % (malt barley).
- Characteristic shape features of 45 weed species in the growth stages BBCH 10 to BBCH 14 were stored in a database and the classification of weed species in malt barley, maize and sugar beets was studied using discrimination analysis. In growth stage BBCH

10 weed species could be differentiated on average by 70 %. Crops were accurately differentiated from broadleaved weeds and grass weeds. Joining weeds species (BBCH 10) in the classes broadleaved weed species, grass weeds, *Galium aparine* and crop resulted in correct classification of 83 % in malt barley to 96 % in maize. Combining weed species from the growth stages BBCH 10 and BBCH 12 in the database, classification rate significantly decreased. On average, 40 % of the weeds in sugar beets and 45 % of all plants in malt barley were correctly identified. When again weed species were grouped, identification rate increased to 79 % in malt barley and 88 % in maize.

- With manual, GIS-based and image analysis sampling methods treatment maps for three weed species classes were created for site-specific weed control in cereals, sugar beet, maize, oil seed rape and peas on a total of 138 ha. Economic weed threshold were used as a decision rule for chemical weed control. Herbicides were only applied when the economic weed threshold was exceeded. Above the economic weed threshold the herbicide dosage was varied from 70 % to 100 % depending on the density of weed species. Herbicide application was performed with a newly developed multiple sprayer. The sprayer integrates three conventional sprayers on one machine including three separated hydraulic circuits, boom section control (3 m), dGPS for real time location and a central control unit. During application the on-board computer loading a georeferenced application maps was linked to the spray control system for precise application of up to three different herbicide mixtures.
- Herbicide savings using site-specific weed control depended on the cultivated crop, weed species composition and weed infestation levels. On average 47 % of herbicides for grass weeds and 35 % for broad-leaved weeds were saved. Herbicide use to control *Galium aparine* and *Cirsium arvense* was reduced by 71 %.
- The efficacy of site-specific weed control was documented by manual weed sampling before and after post emergent herbicide treatments. It ranged from 71.8 % to 98.8 %. Weed infestation level did not increase in the following crops. First results with yield mapping of experimental fields revealed that site-specific weed control did not cause yield reduction. On contrary, in cereals higher yields were observed at locations where no herbicides were applied. However, further studies are needed to prove this hypothesis.
- The economic evaluation of site-specific weed control over two years on practical farm sites showed that site-specific weed control was profitable. For manual distribution maps costs of 60.10 €/ha were calculated, for GIS-based weed maps 26.60 €/ha and for

camera-based weed maps 10.92 €/ha. If cameras were used directly to control the sprayer boom (online), mapping costs were only 6.75 €/ha. Additional costs for the multiple sprayer were calculated with 5.34 €/ha. In total, costs of 16.26 €/ha were calculated for site-specific herbicide application based on treatment maps for three weed classes (offline).

- The average savings for herbicides were 27.61 €/ha. This resulted in an average profit of 11.35 €/ha using the system for site-specific weed control.

- A GIS-based analysis of weed distribution maps, soil and yield maps found correlations between weed distribution, yield and soil characteristics. First results of weed threshold trials and studies on the temporal and spatial variation could improve management decisions for site-specific weed control.

10 Literaturverzeichnis

- ACKERMANN, I., J. SCHWARZ: Einsatz von Pflanzenschutztechnik in der Praxis – Ergebnisse einer empirischen Studie. *Gesunde Pflanzen* **51**, 273-279, 1999.
- ADAMCHUCK, V.I., J.W. HUMMEL, M.T. MORGAN, S.K. UPADHYAYA: On-the-go soil sensors for precision agriculture. *Computers and Electronics in Agriculture* **44**, 71-91, 2004.
- AHLERS, D.: Pflanzenschutz Praxis. Schreiben Sie alles auf. *DLG Mitteilungen* **8**, 48-49, 2003.
- AITKENHEAD, M.J., A. DALGETTY, C.F. MULLMS, A.J.S. McDONALD, N.J.C. STRACHAN: Weed and crop discrimination using image analysis and artificial intelligence methods. *Computers and Electronics in Agriculture* **39**, 157-171, 2003.
- ANDREASEN, C., J.C. STREIBIG, H. HAAS: Soil properties affecting the distribution of 37 weed species in Danish fields. *Weed Research* **31**, 181-187, 1991.
- ASSÉMAT, L., G. RABATEL, N. BERCHER, R. STEGEREAN: A software to compute early weed competition from cover image analysis. In: 13th EWRS Symposium, 19-23 Juni, Bari, Italien, 2005, ISBN 90-809789-1-4, CD.
- AUDENAERT, J.: Verfahren der Applikationstechnik. In: KUNISCH M. (ed.) *KTBL-Fachtagung Precision Farming im Pflanzenschutz*, 16-22, 2001.
- AUERNHAMMER, H.: Precision farming – the environmental challenge. *Computers and Electronics in Agriculture* **30**, 31-43, 2001.
- AUERNHAMMER, H.: Precision Farming – Lexikon. In: *Online-Lexikon*, Frankfurt, DLG 44-59, 1999.
- AULICH, S., H. NORDMEYER: Möglichkeiten einer Differenzierung von Unkrautarten mittels der Chlorophyllfluoreszenzbildanalyse. *Zeitschrift für Pflanzenkrankheiten und Pflanzenschutz, Sonderheft XIX*, 363-369, 2004.
- BACKES, M., D. SCHUMACHER, L. PLÜMER: The sampling problem in weed control – are currently applied sampling strategies adequate for site-specific weed control? In: *Precision Agriculture '05, 5th European Conference on Precision Agriculture*, (ed. JV Stafford). Wageningen Academic Publishers, Netherlands, 155-161, 2005.
- BACKES, M., L. PLÜMER: On the adequacy of GIS-generated weed maps for Precision Farming. In: *Proceedings of the 9th Scandinavian Research Conference on Geographical Information Sciences* (Eds. K. Virrantaus, H. Tveite), Espoo, Finland, 261-268, 2003.
- BACKHAUS, K., W. PLINKE, B. ERICHSON, R. WEIBER: Diskriminanzanalyse. In: *Multivariate Analysemethoden*, Springer Verlag Berlin, 155-228, 2003.
- BARROSO, J., C. FERNANDEZ-QUINTANILLA, B. MAXWELL, L. REW: Using site specific weed management for control of wild oats in Spain: An economic evaluation. *Precision Agriculture* **4**, 47-52, 2003.

- BARROSO, J., C. FERNÁNDEZ-QUINTANILLA, D. RUIZ, P. HERNÁIZ, L.J. REW: Spatial stability of *Avena sterilis* ssp. *ludoviciana* populations under annual applications of low rates of imazamethabenz. *Weed Research* **44**, 178-190, 2004.
- BILLER, R. H.: Pflanzenunterscheidung und gezielter Einsatz von Herbiziden. *ForschungsReport* **1**, 34-36, 1998.
- BILLER, R.H., A. HOLLSTEIN, C. SOMMER: Precision application of herbicides by use of optoelectronic sensors. In: *Precision Agriculture '97, 1st European Conference on Precision Agriculture*, (ed. J.V. Stafford) Warwick University, UK, 451-458, 1997.
- BILLER, R.H., W. IHLE: Pflanzenunterscheidung mit optischen Sensoren. *Landtechnik* **55**, 2: 148-149, 2000.
- BLACK, I.D., C.B. DYSON: An economic threshold model for spraying herbicides in cereals. *Weed Research* **33**, 279-290, 1993.
- BLACKMORE, S.: The interpretation of trends from multiple yield maps. *Computers and Electronics in Agriculture* **26**, 37-51, 2000.
- BLUMHORST, M.R., J.B. WEBER, L.R. SWAIN: Efficacy of selected herbicides as influenced by soil properties. *Weed Technology* **4**, 279-283, 1990.
- BOSSU, J., C. GÉE, J.P. GUILLEMIN, F. TRUCHETET: Feasibility of a real-time weed detection system using spectral reflectance. In: *Precision Agriculture '05, 5th European Conference on Precision Agriculture*, (ed. JV Stafford). Wageningen Academic Publishers, Netherlands, 123-130, 2005.
- BROWN, R.B., S.D. NOBLE: Site-specific weed management sensing requirements – what do we need to see? *Weed Science* **53**, 252-258, 2005.
- BUNDESMINISTERIUM FÜR VERBRAUCHERSCHUTZ, ERNÄHRUNG UND LANDWIRTSCHAFT (BMVEL): Reduktionsprogramm chemischer Pflanzenschutz. Referat 518, 2005.
- BUSCHMANN C., H. SCHREY: Fluorescence induction kinetics of green and etiolated leaves by recording the complete in vivo emission spectra. *Photosynthesis Research* **1**, 233-241, 1981.
- CARTER, A.D.: Herbicide movement in soils: principles, pathways and processes. *Weed Research* **40**, 113-122, 2000.
- CHANCELLOR, R.J.: Changes in the weed flora of an arable field cultivated for 20 years. *Journal of Applied Ecology* **22**, 491-501, 1985.
- CHAPRON M., M. REQUENA-ESTESO, P. BOISSARD, L. ASSEMAT: A method for recognizing vegetal species from multispectral images. In: *Precision Agriculture 1999, 2nd European Conference on Precision Agriculture, Part 1*. (ed. JV Stafford). Sheffield Academic Press, Sheffield, UK, 239-248, 1999.
- CHAPRON M., P. BOISSARD, L. ASSEMAT: A method for 3D reconstruction of vegetation by stereovision. *Precision Agriculture 1999, 2nd European Conference on Precision Agriculture, Part 1*. (ed. JV Stafford). Sheffield Academic Press, Sheffield, UK, 249-256, 1999.

- CHAPRON, M., L. ASSEMAT, P. BOISARD, P. HUET: Weed and corn recognition using a 2D and 3D data fusion. In: Proceedings of the 3rd European Conference on Precision Agriculture (ECPA), June 18-20, Montpellier, France, 527-532, 2001.
- CHAPRON, M., P. BOISSARD, L. ASSEMAT: A multiresolution based method for recognizing weeds in corn fields. In: 15th International Conference on Pattern Recognition, Conference Proceedings Vol. 2, Barcelona, Spain, 303-306, 2002.
- CHAUVEL, B., N. COLBACH, N.M. MUNIER-JOLAIN: How to estimate weed flora in a field? Comparison of sampling methods. Zeitschrift für Pflanzenkrankheiten und Pflanzenschutz, Sonderheft XVI, 265-272, 1998.
- CHRISTENSEN S., T. HEISEL: Patch spraying using historical, manual and real-time monitoring of weeds in cereals. Zeitschrift für Pflanzenkrankheiten und Pflanzenschutz, Sonderheft XVI, 257-263, 1998.
- CHRISTENSEN, S., A.M. WALTER, T. HEISEL: The patch treatment of weeds in cereals. Brighton Crop Protection Conference – Weeds, 591 – 600, 1999.
- CHRISTENSEN, S., T. HEISEL, A.M. WALTER, E. GRAGLIA: A decision algorithm for patch spraying. Weed Research **43**, 276-284, 2003.
- COUSENS, R.: Theory and reality of weed control thresholds. Plant Protection Quarterly, **2**, 1: 13-20, 1987.
- DAMMER, K.H., G. WARTENBERG : Wirkung sensorgestützter Herbizidapplikation in Getreide und Erbsen. Zeitschrift für Pflanzenkrankheiten und Pflanzenschutz, Sonderheft XIX, 405-412, 2004.
- DAMMER, K.-H., H. BÖTTGER, D. EHLERT: Sensor-controlled variable rate application of herbicides and fungicides. Precision Agriculture **4**, 129-134, 2003.
- DEIKE, S., B. PALLUTT, O. CHRISTEN : Langzeitwirkungen von Pflanzenschutzmaßnahmen in Bezug auf die N-Effizienz. Mitteilungen der Gesellschaft für Pflanzenbauwissenschaften **17**, 361-362, 2005.
- DICKE, D., A. FRIES, R. GERHARDS: Ermittlung von Schadschwellen für die teilschlagspezifischen Unkrautbekämpfung im Braugerstenanbau. Zeitschrift für Pflanzenkrankheiten und Pflanzenschutz, Sonderheft XIX, 413-422, 2004.
- DICKE, D.: Lenkung teilschlagspezifischer Unkrautkontrollverfahren unter der Berücksichtigung der Populationsdynamik von Unkräutern mit computergestützten Modellen. Dissertationsschrift an der Landwirtschaftlichen Fakultät der Universität Bonn, 2005.
- DOHMEN, B.: Optoelektronisch gesteuerte Applikation von Herbiziden – Erfahrungen mit dem amerikanischen System WeedSeeker bei der Unkrautbekämpfung auf Bahndämmen. In: Innovative Verfahren zur Unkrauterkenung. KTBL Arbeitspapier 236, 86-94, 1996.
- DUNKER, M., H. NORDMEYER, O. RICHTER: Modellierung der Ausbreitungsdynamik von *Alopecurus myosuroides* HUDS. Für eine teilflächenspezifische Unkrautbekämpfung. Zeitschrift für Pflanzenkrankheiten und Pflanzenschutz, Sonderheft XVIII, 359-366, 2002.

- DZINAJ, T., S. KLEINE HÖRSTKAMP, A. LINZ, A. RUCKELSHAUSEN, O. BÖTTGER, M. KEMPER, J. MARQUERING, J. NAESCHER, D. TRAUTZ, E. WIßEROTH: Multi-Sensor-System zur Unterscheidung von Nutzpflanzen und Beikräutern. Zeitschrift für Pflanzenkrankheiten und Pflanzenschutz, Sonderheft XVI, 233-242, 1998
- EHLERT, D.: Sensorik zur Gewinnung von Bodenparametern, Pflanzenparametern und Ertragsdaten. Elektronik in der Landwirtschaft. Elektronikeinsatz zur Verbesserung der landwirtschaftlichen Produktion und des Managements: Erfahrungen und neue Ansätze. KTBL-LAV-Vortragstagung am 12. April 2000 in Veitshochheim, KTBL-Schrift 390, 59-66, 2000.
- EL-FAKI, M.S, N. ZHANG, D.E. PETERSON: Factors affecting color-based weed detection. Transactions of the American Society of Agricultural Engineers (ASAE), 44:4, 1001-1009, 2000.
- FALCONER, K.E.: Managing diffuse environmental contamination from agricultural pesticides: an economic perspective on issues and policy options, with particular reference to Europe. Agriculture Ecosystems and Environment **69**, 1: 37-54, 1998.
- FELTON, W.L., K.R. MCCLOY: Spot spraying. Agricultural Engineering **73**, 6: 9-12, 1992
- FREIER, B., U. BURTH, F. KLINGAUF: Integrierter Pflanzenschutz als Leitbild – die Anforderungen liegen über der derzeitigen Handlungsnorm der guten fachlichen Praxis. Nachrichtenblatt des Deutschen Pflanzenschutzdienstes 51, 3: 66-70, 1999.
- GERHARDS R., H. OEBEL: Practical experience with a system for site-specific weed control in arable crops using real-time image analysis and GPS-controlled patch spraying. Weed Research **46**, 1-9, 2006.
- GERHARDS R., S. CHRISTENSEN: Real-time weed detection, decision making and patch spraying in maize (*Zea mays* L.), sugarbeet (*Beta vulgaris* L.), winter wheat (*Triticum aestivum* L.) and winter barley (*Hordeum vulgare* L.). Weed Research **43**, 1-8, 2003.
- GERHARDS, R. D. DICKE, H. OEBEL: Testing and analysing decision rules for site-specific weed control in malt barley (*Hordeum vulgare* L.) using a geographic information system. Zeitschrift für Pflanzenkrankheiten und Pflanzenschutz 112, 5: 447-456, 2005.
- GERHARDS, R., D.Y. WYSE-PESTER, D.A. MORTENSEN, G.A. JOHNSON: Characterizing spatial stability of weed populations using interpolated maps. Weed Science **45**, 108-119, 1997.
- GERHARDS, R., M. SÖKEFELD, A. NABOUT, R.-D. THERBURG, W. KÜHBAUCH: Online weed control using digital image analysis. Zeitschrift für Pflanzenkrankheiten und Pflanzenschutz, Sonderheft XVIII, 421-427, 2002.
- GERHARDS, R., M. SÖKEFELD, C. TIMMERMANN, P. KROHMANN, W. KÜHBAUCH: Precision weed control - more than just saving herbicides. Zeitschrift für Pflanzenkrankheiten und Pflanzenschutz, Sonderheft XVII, 179-186, 2000.
- GERHARDS, R., M. SÖKEFELD, W. KÜHBAUCH: Einsatz der digitalen Bildverarbeitung bei der teilschlagspezifischen Unkrautkontrolle. Zeitschrift für Pflanzenkrankheiten und Pflanzenschutz, Sonderheft XVI, 273-280, 1998.

- GERHARDS, R., M. SÖKEFELD: Precision farming in weed control – system components and economic benefits. *Precision Agriculture* **4**, 229-234, 2003.
- GERHARDS, R., M. SÖKEFELD: Sensor systems for automatic weed detection. Brighton Crop Protection Conference – Weeds, 827-834, 2001.
- GEROWITT, B., E. BERTKE, S.-K. HESPELT, C. TUTE: Towards multifunctional agriculture – weeds as ecological goods? *Weed research* **43**, 227-235, 2003.
- GEROWITT, B., R. HEITEFUSS: Weed economic thresholds in cereals in the Federal Republic of Germany, *Crop Protection*, **9**, 5: 323-331, 1990.
- GRUNDY, A.C.: Predicting weed emergence: A review of approaches and future challenges. *Weed research* **43**, 1-11, 2003.
- GUYOT, G.: Optical properties of vegetation canopies. In: Applications of remote sensing in Agriculture, (eds. M. Steven, J. Clark), London, Butterworths, 19-43, 1990.
- HAMOUIZ, P., J. SOKOUP, K. NOVÁKOVA, J. HOLEC: Evaluation of weed distribution and weed stability for precision farming. In: 13th EWRS Symposium, 19-23 Juni, Bari, Italien, 2005, ISBN 90-809789-1-4, CD.
- HÄUSLER, A., H. NORDMEYER, P. NIEMANN: Voraussetzungen für eine teilflächenspezifische Unkrautbekämpfung. *Zeitschrift für Pflanzenkrankheiten und Pflanzenschutz, Sonderheft XVI*, 249-256, 1998.
- HÄUSLER, A., H. NORDMEYER: Using aerial photography to detect weed patches for site-specific weed control – perspectives and limitations. *Precision Agriculture* **4**, 271-277, 2003
- HEISEL, T., C. ANDREASEN, A.K. ERSBOLL: Annual weed distributions can be mapped with kriging. *Weed Research* **36**, 325-337, 1996.
- HEMMING, J., T. RATH: Computer-vision- based weed identification under field conditions using controlled light. *Journal of Agricultural Engineering Research*, **78**, 3: 233-243, 2001.
- HEMMING, J.: Computer vision for identifying weeds in crops. *Gartenbautechnische Informationen, Heft 50*, Institut für Technik in Gartenbau und Landwirtschaft, Universität Hannover, 2000.
- JENSEN, J.E.: Weed control: presence and future – the Danish view. *Zeitschrift für Pflanzenkrankheiten und Pflanzenschutz, Sonderheft XIX*, 19-26, 2004.
- JÜRGENS, C.: Langsames, aber stetiges Wachstum. Beobachtungen zur Akzeptanz von Precision Farming in Deutschland. *Neue Landwirtschaft* **1**, 45-47, 2006.
- KAUTSKY H, A. HIRSCH: Neue Versuche zur Kohlenstoffassimilation. *Naturwissenschaften* **19**, 964, 1931.
- KAVDIR, I.: Discrimination of sunflower, weed and soil by artificial neural networks. *Computers and Electronics in Agriculture* **44**, 153-160, 2004.
- KERÄNEN, M., E.-M., ARO, E. TYYSTJÄRVI, O. NEVALAINEN: Automatic plant identification with chlorophyll fluorescence fingerprinting. *Precision Agriculture* **4**, 53-67, 2003.

- KIELHORN, A., T. DZINAJ, F. GELZE, J. GRIMM, H. KLEINE-HARTLAGE, S. KLEINE HÖRSTKAMP, W. KUNTZE, A. LINZ, J. NAESCHER, M. NARDMANN, A. RUCKELSHAUSEN, D. TRAUTZ, E. WIßERODT: Beikrautregulierung in Reihenkulturen – Sensorgesteuerte Querhacke in Mais. Zeitschrift für Pflanzenkrankheiten und Pflanzenschutz, Sonderheft XVII, 207-215, 2000.
- KILIAN, B.: Ökonomie von Precision Farming. In: Precision Farming – Analyse, Planung und Umsetzung in die Praxis. KTBL-Schrift 419, 2004.
- KLÖPFER, F., D. KOTTENRODT, C. WELTZIEN: Implementation and acceptance of Precision Agriculture (PA) by farmers and agricultural contractors within the research project „PreAgro“. In: Proceedings of the 3rd European Conference on Precision Agriculture (ECPA), June 18-20, Montpellier, France, 527-532, 2001.
- KRAFT, R.: Diskriminanzanalyse. Vorlesungsskript FB Mathematik und Statistik der TU München-Weihenstephan, 2000.
- KROHMANN, P., C. TIMMERMANN, R. GERHARDS, W. KÜHBAUCH: Ursachen für die Persistenz von Unkrautpopulationen. Zeitschrift für Pflanzenkrankheiten und Pflanzenschutz, Sonderheft XVIII, 261-268, 2002.
- KROHMANN, P.: Effizienz teilschlagspezifischer Unkrautkontrolle und räumlich-zeitliche Dynamik der Unkrautpopulationen in einer Felderfolge und Monokultur. Dissertationsschrift an der Landwirtschaftlichen Fakultät der Universität Bonn, 2003.
- KROPF, M.J., J. WALLINGA, L.A.P. LOTZ: Weed population dynamics. 2nd International Weed Control Congress, Kopenhagen, 3-13, 1996.
- KÜHBAUCH, W.: Anwendungsmöglichkeiten der qualitativen Bildanalyse mit Echtfarbenerkennung in der pflanzenbaulich-botanischen Forschung. Angewandte Botanik **59**, 209-218, 1985.
- KÜHBAUCH, W.: Fernerkundung - eine Zukunftstechnologie im Präzisionspflanzenbau. Precision Agriculture: Herausforderung an integrative Forschung, Entwicklung und Anwendung in der Praxis. KTBL-Sonderveröffentlichung 038, 79-88, 2002.
- KUNISCH, M.: Precision Farming in der Unkrautbekämpfung? Zeitschrift für Pflanzenkrankheiten und Pflanzenschutz, Sonderheft XVIII, 415-420, 2002.
- KURATORIUM FÜR TECHNIK UND BAUWESEN IN DER LANDWIRTSCHAFT (KTBL): Betriebsplanung Landwirtschaft 2004/2005. KTBL Datensammlung. Landwirtschaftsverlag, 2004.
- KURATORIUM FÜR TECHNIK UND BAUWESEN IN DER LANDWIRTSCHAFT (KTBL): Precision Farming im Pflanzenschutz am Beispiel der Unkrautbekämpfung. KTBL-Schrift 402, 1-43, 2001.
- LAMB, D. W., R. B. BROWN: Remote sensing and mapping of weeds in crops. Journal of Agricultural Engineering Research **78**, 117-125, 2001.
- LARSON, W.E., J.A. LAMB, B.R. KHAKURAL, R.B. FERGUSON, G.W. REHM: Potential of site-specific management for nonpoint environmental protection. In: PIERCE, F.J., SADLER, E.J. (eds.) The state of site-specific management for agriculture. 337-67, 1997.
- LEE, W.S., D.C. SLAUGHTER, D.K. GILES: Robotic weed control for tomatoes. Precision Agriculture **1**, 95-113, 1999.

- LEMIEUX, C., A. VANASSE, L. VALLÉE: To spray or not to spray: Real-life limitations to a decision-making tool. EWRS 12th Symposium, Wageningen, 396-397, 2002.
- LETTNER, J., K. HANK, P. WAGNER: Ökonomische Potentiale der teilschlagspezifischen Unkrautbekämpfung. Berichte über Landwirtschaft, **79**, 1: 107-139, 2001
- LLOYD, M.: Mean crowding. Journal of Animal Ecology **36**, 1-30, 1967.
- MARCHANT, J.A., C.M. ONYANGO: Comparison of a Bayesian classifier with the multilayer feed-forward neural network using the example of plant/weed/soil discrimination. Computers and Electronics in Agriculture **39**, 3-22, 2003.
- MARSHALL, E.J.P.: Field-scale estimates of grass populations in arable land. Weed Research **28**, 191-198, 1988.
- MEDLIN, C.R., D.R. SHAW, P.D. GERARD, F.E. LAMASTUS: Using remote sensing to detect weed infestations in *Glycine max*. Weed Science, **48**, 3: 393-398, 2000.
- MEHRTENS, J., M. SCHULTE, C. STEDEN, K. HURLE: Deutschlandweites Unkrautmonitoring in Mais – erste Ergebnisse aus den Jahren 2000 und 2001. Zeitschrift für Pflanzenkrankheiten und Pflanzenschutz, Sonderheft XVIII, 115-122, 2002.
- MERKES, R., H. COENEN, F. HESSE, G. SCHÜTZ: Stand der Produktionstechnik zu Zuckerrüben – Ergebnisse der Umfrage 2002. Zuckerindustrie **128**, 425-433, 2003.
- MEYER, G.E., J.C. NETO, D.D. JONES, T.W. HINDMAN: Intensified fuzzy clusters for classifying plant, soil and residue regions of interest from color images. Computers and Electronics in Agriculture **42**, 161-180, 2004.
- MITCHELL, K.M., D.R. PIKE, H. MITASOVA: Using a Geographic Information System (Gis) for herbicide management. Weed Technology **10**, 856-864, 1996.
- MOSHOU, D., B. DE KETELAERE, E. VRINDTS, P. KENNES, J. DE BAERDEMAEKER, H. RAMON: Local linear mapping neural networks for pattern recognition of plants. In: 1st IFAC Workshop on Control Application and Ergonomics in Agriculture, Athens, Greece, 61-66, 1998.
- MOSHOU, D., E. VRINDTS, B. DE KETELAERE, J. DE BAERDEMAEKER, H. RAMON: A neural network based plant classifier. Computers and Electronics in Agriculture **31**, 5-16, 2001.
- NAGY, S., P. REISINGER, K. ANTAL: Mapping of perennial weed species distribution in maize. Zeitschrift für Pflanzenkrankheiten und Pflanzenschutz, Sonderheft XIX, 383-389, 2004.
- NIEMANN, P., K. HURLE, E. BEER, J. KAKAU: Mittelfristige Auswirkungen erhöhter Unkraut-Schadsschwellen in Getreide auf die Verunkrautung in den Folgekulturen. Zeitschrift für Pflanzenkrankheiten und Pflanzenschutz, Sonderheft XVII, 291-290, 2000.
- NIEMANN, P.: Schadsschwellen bei der Unkrautbekämpfung. Angewandte Wissenschaft **257**, Landwirtschaftsverlag Münster Hilstrup, 1981.
- NORDMEYER, H., A. HÄUSLER, P. NIEMANN: Patchy weed control as an approach in precision farming. In: Precision Agriculture '97, 1st European Conference on Precision Agriculture (ed J.V. Stafford) BIOS Scientific Publishers, Oxford, UK, 307-314, 1997.

- NORDMEYER, H., A. HÄUSLER: Erfahrungen zur teilflächenspezifischen Unkrautbekämpfung in einem Praxisbetrieb. Zeitschrift für Pflanzenkrankheiten und Pflanzenschutz, Sonderheft XVII, 195-205, 2000.
- NORDMEYER, H., A. ZUK, A. HÄUSLER: Experiences of site specific weed control in winter cereals. Precision Agriculture **4**, 457-462, 2003.
- NORDMEYER, H., M. DUNKER: Variable weed densities and soil properties in a weed mapping concept for patchy weed control. In: STAFFORD, J.V. (ed.) Precision Agriculture '99, 2nd European Conference on Precision Agriculture, 453-462, 1999.
- NORDMEYER, H.: Site-specific weed control in winter wheat. EWRS 12th Symposium, Wageningen, 414-415, 2002.
- NORRIS, R.F.: Ecological implications of using thresholds for weed management. Journal of Crop Production **2**, 31-58, 1999.
- OEBEL, H., R. GERHARDS, G. BECKERS, D. DICKE, M. SÖKEFELD, R. LOCK, A. NABOUT, R.-D. THERBURG: Teilschlagspezifische Unkrautbekämpfung durch raumbezogene Bildverarbeitung im Offline (und Online)- Verfahren (TURBO) - Erste Erfahrungen aus der Praxis. Zeitschrift für Pflanzenkrankheiten und Pflanzenschutz, Sonderheft XIX, 459-465, 2004.
- OEBEL, H., R. GERHARDS: Site-specific weed control using digital image analysis and georeferenced application maps – On-farm experiences, In: Precision Agriculture '05, 5th European Conference on Precision Agriculture, (ed. JV Stafford). Wageningen Academic Publishers, Netherlands, 131-138, 2005a
- OEBEL, H., R. GERHARDS: Using digital image analysis for automatic weed identification and weed mapping in the field. In: 13th EWRS Symposium, 19-23 Juni, Bari, Italien, 2005b, ISBN 90-809789-1-4, CD.
- PAICE, M.E.R., P.C.H. MILLER, W. DAY: Control requirements for spatially selective herbicide sprayers. Computers and Electronics in Agriculture **14**, 163-177, 1996.
- PALLUT, B., A. FLATTER: Variabilität der Konkurrenz von Unkräutern in Getreide und daraus resultierende Auswirkungen auf die Sicherheit von Schwellenwerten. Zeitschrift für Pflanzenkrankheiten und Pflanzenschutz, Sonderheft XVI, 333-344, 1998.
- PALLUTT, B., P. GRÜBNER: Langzeitwirkungen ausgewählter Bewirtschaftungsmaßnahmen auf die Verunkrautung am Beispiel des Getreides. Zeitschrift für Pflanzenkrankheiten und Pflanzenschutz, Sonderheft XIX, 969-980, 2004.
- PALLUTT, B.: Einfluss der Konkurrenzkraft von Getreidebeständen auf das Unkrautwachstum und den Getreideertrag. Zeitschrift für Pflanzenkrankheiten und Pflanzenschutz Sonderheft XVII, 265-274, 2000.
- PALLUTT, B.: Langzeitauswirkungen reduzierter Herbizidanwendungen und Stickstoffdüngung auf Populationsdynamik und Konkurrenz von Unkräutern im Getreide. Zeitschrift für Pflanzenkrankheiten und Pflanzenschutz, Sonderheft XVIII, 293-304, 2002.

- PENA-BARRAGAN, J.M., F. LÓPEZ-GRANADOS, M. JURADO-EXPÓSITO, L. GARCIA-TORRES: Detection and mapping of *Ridolfia segetum* Moris in sunflower (*Helianthus annuus* L.) crop using remote sensing techniques. In: Precision Agriculture '05, 5th European Conference on Precision Agriculture, (ed. JV Stafford). Wageningen Academic Publishers, Netherlands, 107-122, 2005.
- PÉREZ, A.J., F. LÓPEZ, J.V. BENLLOCH, S. CHRISTENSEN: Colour and shape analysis techniques for weed detection in cereal fields. *Computers and Electronics in Agriculture* **25**, 197-212, 2000.
- PERRY, N.H., P.J.W. LUTMAN, P.C.H. MILLER, H.C. WHEELER: A map based system for patch spraying weeds – weed mapping. *Proceedings of the Brighton Crop Protection Conference – Weeds*, 841-846, 2001.
- PETERSEN, B.B., P.K. HANSEN, A.M. WALTER: Weed density estimation from digital images. *EWRS 12th Symposium*, Wageningen, 416-417, 2002.
- PETRY, W., W. KÜHBAUCH: Automatisierte Unterscheidung von Unkrautarten nach Formparametern mit Hilfe der quantitativen Bildanalyse. *Journal of Agronomy and Crop Science*, **163**, 345-351, 1989.
- PFLUGPFELDER, M.: Kameragestützte Unkrautererkennung im Online-Betrieb in Mais (*Zea mays* L.). Bachelor-Arbeit, Institut für Phytomedizin, Universität Hohenheim, Oktober 2005.
- PHILIPP, I., T. RATH, H. NORDMEYER: Computerbildanalytische Unkrautkartierung in Zuckerrübenbeständen. *Zeitschrift für Pflanzenkrankheiten und Pflanzenschutz, Sonderheft XVIII*, 429-436, 2002
- PHILIPP, I., T. RATH: Improving plant discrimination in image processing by use of different colour space transformations. *Computers and Electronics in Agriculture* **35**, 1-15, 2002.
- RASKIN, R., E. GLÜCK, W. PFLUG: Floren- und Faunenentwicklung auf herbizidfrei gehaltenen Agrarflächen. *Natur und Landschaft* **67**, 7-14, 1992.
- RECKLEBEN, Y., E. ISENSEE: Vergleich von Sensorsystemen für die N-Düngung. *Landtechnik* **60**, 3: 138-139, 2005.
- REISINGER, P., E. LEHOCZKY, S. NAGY, T. KOMIVES: Database-based precision weed management. *Zeitschrift für Pflanzenkrankheiten und Pflanzenschutz Sonderheft XIX*, 467-474, 2004.
- REW L.J., R.D. COUSENS: Spatial distribution of weeds in arable crops: a current sampling and analytical methods appropriate. *Weed Research* **41**, 1-18, 2001.
- REW, L.J., B.D. MAXWELL: Can remotely-sensed imagery be used to advance crop management decisions? *EWRS 12th Symposium*, Wageningen, 422-423, 2002.
- RISSER, P.: Wissensbasierte Unkrautererkennung in Zuckerrüben im Echtzeitverfahren. Bachelor-Arbeit, Institut für Phytomedizin, Universität Hohenheim, Oktober 2005.

- SCHUMACHER, W.: Zur Effizienz der Schutzmaßnahmen für Ackerbiozönosen - mit Empfehlungen zur Vereinheitlichung der bisherigen Schutzprogramme. Internationales Symposium Flora und Fauna der Äcker und Weinberge, 201-218, 1992.
- SCHWARZ, J., G. WARTENBERG: Wirtschaftlichkeit der teilflächenspezifischen Herbizidanwendung. Landtechnik **54**, 334-335, 1999.
- SHIBUSAWA, S., K. EHARA, T. OKAYAMA, H. UMEDA, S. HIRAKO: A real-time multi-spectral soil sensor: predictability of soil moisture and organic matter content in small field. In: Precision Agriculture '05, 5th European Conference on Precision Agriculture, (ed. JV Stafford). Wageningen Academic Publishers, Netherlands, 131-138, 2005.
- SOGAARD, H.T., H.J. OLSEN: Determination of crop rows by image analysis without segmentation. Computers and Electronics in Agriculture **38**, 141-158, 2003.
- SOGAARD, H.T., I. LUND: Investigation of the accuracy of a machine vision based robotic micro-spray system. In: Precision Agriculture '05, 5th European Conference on Precision Agriculture, (ed. JV Stafford). Wageningen Academic Publishers, Netherlands, 613-620, 2005.
- SOGAARD, H.T., T. HEISEL: Machine vision identification of weed species based on active shape models. EWRS 12th Symposium, Wageningen, 402-403, 2002.
- SÖKEFELD, M., P. HLOBEN, P. SCHULZE LAMMERS: Möglichkeiten und Grenzen der Direkteinspeisung von Herbiziden zur teilschlagspezifischen Unkrautkontrolle. Zeitschrift für Pflanzenkrankheiten und Pflanzenschutz, Sonderheft XIX, 431-437, 2004.
- SÖKEFELD, M., R. GERHARDS, D. KNUF, W. KÜHBAUCH: Einfluss der Bewirtschaftungsweise auf die Verteilung von Unkrautarten auf Ackerflächen. Mitteilungen der Gesellschaft für Pflanzenbauwissenschaften **8**, 369-372, 1995.
- SÖKEFELD, M., R. GERHARDS, R.-D. THERBURG, A. NABOUT, J. JACOBI, R. LOCK, W. KÜHBAUCH: Multispektrale Bildanalyse zur Erfassung von Unkraut und Blattkrankheiten. Zeitschrift für Pflanzenkrankheiten und Pflanzenschutz, Sonderheft XVIII, 227-233, 2002.
- SÖKEFELD, M., R. GERHARDS, W. KÜHBAUCH: Automatische Erkennung von Unkrautarten mit digitaler Bildverarbeitung. Zeitschrift für Pflanzenkrankheiten und Pflanzenschutz, Sonderheft XIV, 143-152, 1994.
- SÖKEFELD, M., R. GERHARDS, W. KÜHBAUCH: Teilschlagspezifische Unkrautkontrolle – von der Unkrauterfassung bis zur Herbizidapplikation. Zeitschrift für Pflanzenkrankheiten und Pflanzenschutz, Sonderheft XVII, 227-233, 2000
- SÖKEFELD, M., R. GERHARDS: Automatische Unkrautkartierung mit digitaler Bildverarbeitung. Landtechnik **59** :3, 154-155, 2004
- SÖKEFELD, M.: Automatische Erkennung von Unkrautarten im Keimblattstadium mit digitaler Bildverarbeitung. Dissertationsschrift an der Landwirtschaftlichen Fakultät der Universität Bonn, 1997.
- SPAHILLARI, M., K. HAMMER, T. GLADIS, A. DIEDERICHSEN: Weeds as part of agrobiodiversity. Outlook on Agriculture **28**, 227-232, 1999.

- STAFFORD J.V., J.V. BENLLOCH: Machine- assisted detection of weeds and weed patches. *Precision Agriculture* **1**, 511-518, 1997.
- STAFFORD, J.V., P.C.H. MILLER: Spatially selective application of herbicide to cereal crops. *Computers and Electronics in Agriculture* **9**, 217-229, 1993.
- TANG, L., L.F. TIAN, B.L. STEWARD, J.F. REID: Texture-based weed classification using Gabor wavelets and neural network for real-time selective herbicide applications. American Society of Agricultural Engineers (ASAE) Paper 99-3036, 1999.
- TARTACHNYK, I., W. KÜHBAUCH: Einsatzmöglichkeiten der Laser-Induzierten-Fluoreszenz zur Differenzierung der dikotylen und monokotylen Unkrautarten. *Mitteilungen der Gesellschaft für Pflanzenbauwissenschaften* **17**, 375-376, 2005.
- THORNTON, P. K., R. H. FAWCETT, J. B. DENT, T. J. PERKINS: Spatial weed distribution and economic thresholds for weed control. *Crop Protection* **9**, 337-342, 1990.
- TIMMERMANN, C., R. GERHARDS, W. KÜHBAUCH: The economic impact of site-specific weed control. *Precision Agriculture* **4**, 249-260, 2003.
- TIMMERMANN, C.: Teilflächenspezifische Unkrautkontrolle im präzisen Pflanzenbau unter Berücksichtigung von Ertragsdaten und Bodenparametern. Dissertationsschrift an der Landwirtschaftlichen Fakultät der Universität Bonn, 2001.
- TOEWS, T.: Ökonomik teilschlagspezifischer Unkrautbekämpfung. *Zeitschrift für Pflanzenkrankheiten und Pflanzenschutz, Sonderheft XIX*, 423-430, 2004.
- VERMA, A.K., R.A. COOKE, M.C. HIRSCHI, J.K. MITCHELL: GIS and GPS assisted variable rate application (VRA) of agri-chemicals. *Journal of Geographic Information and Decision Analysis* **2**, 17-22, 1998.
- VIOIX, J-B., J-P. DOUZALS, L. ASSEMAT, V. LE CORRE, F. DESSAINT, J-P. GUILLEMIN: Development of a combined spatial and spectral method for weed detection and localisation. In: *Proceedings of the 3rd European Conference on Precision Agriculture (ECPA)*, June 18-20, Montpellier, France, 605-610, 2001.
- VRINDTS, E., J. DE BAERDEMAEKER: Optical discrimination of crop, weed and soil for on-line weed detection. In *Precision Agriculture '97, 1st European Conference on Precision Agriculture Volume 2: Technology, IT and Management*. (ed. JV Stafford). BIOS Scientific Publishers, Warwick, U, 537-544, 1997
- WARTENBERG, G., K.-H. DAMMER: Erfahrungen bei der Verfahrensentwicklung zur teilflächenspezifischen Herbizidanwendung in Echtzeit. *Zeitschrift für Pflanzenkrankheiten und Pflanzenschutz, Sonderheft XVIII*, 443-450, 2002.
- WERNER, B., F. DE MOL, B. GEROWITT: Schadensprognosen und Bekämpfungsempfehlungen für Unkräuter in Raps und Getreide mit CeBrUs. *Zeitschrift für Pflanzenkrankheiten und Pflanzenschutz, Sonderheft XIX*, 383-389, 2004.
- WERNER, B., V. GARBE: Bedeutung der Unkrautverteilung im Winterraps für eine gezielte Bekämpfung nach Schadensschwellen. *Zeitschrift für Pflanzenkrankheiten und Pflanzenschutz, Sonderheft XVI*, 279-288, 1998.

- WHEELER, H.C., P.C.H. MILLER, N.H. PERRY, P.J.W. LUTMAN, R.I. HULL: A map-based system for patch spraying – system control. Brighton Crop Protection Conference – Weeds, 847-852, 2001.
- WOEBBECKE, D.M., G.E. MEYER, K. VON BARGEN, D.A. MORTENSEN: Color indices for weed identification under various soil, residue and lighting conditions. Transactions of the American Society of Agricultural Engineers (ASAE) **38**, 259-269, 1995a.
- WOEBBECKE, D.M., G.E. MEYER, K. VON BARGEN, D.A. MORTENSEN: Shape features for identifying young weeds using image analysis. Transactions of the American Society of Agricultural Engineers (ASAE) **38**, 271-281, 1995b
- YANG, C. C., S. PRASHER, J.-A. LANDRY, H. RAMASWAMY: Development of an image processing system and a fuzzy algorithm for site-specific herbicide applications. Precision Agriculture **4**, 5-18, 2003.
- ZWERGER, P. H.-P. MALKOMES, H. NORDMEYER, H.-P. SÖCHTING, A. VERSCHWELE: Unkrautbekämpfung: Gegenwart und Zukunft – aus deutscher Sicht. Zeitschrift für Pflanzenkrankheiten und Pflanzenschutz, Sonderheft XIX, 27-38, 2004.

11 Anhang

11.1 Verzeichnis der Anhangstabellen

Anhangstabelle 11.1	EPPO Codes der untersuchten Kulturpflanzen und Unkrautarten...	146
Anhangstabelle 11.2	Konfusionsmatrix für die Trennung von <i>Unkrautarten (BBCH 10 bis 12) in Mais</i> über Diskriminanzfunktionen.....	147
Anhangstabelle 11.3	Konfusionsmatrix für die Trennung von <i>Unkrautarten (BBCH 10 bis 14) in Mais</i> über Diskriminanzfunktionen.....	147
Anhangstabelle 11.4	Konfusionsmatrix für die Trennung von <i>Unkrautarten (BBCH 10 bis 12) in Getreide</i> über Diskriminanzfunktionen.....	148
Anhangstabelle 11.5	Konfusionsmatrix für die Trennung von <i>Unkrautarten (BBCH 10 bis 14) in Getreide</i> über Diskriminanzfunktionen.....	148
Anhangstabelle 11.6	Konfusionsmatrix für die Trennung von <i>Unkrautarten (BBCH 10 bis 12) in Zuckerrüben</i> über Diskriminanzfunktionen.....	149
Anhangstabelle 11.7	Konfusionsmatrix für die Trennung von <i>Unkrautarten (BBCH 10 bis 14) in Zuckerrüben</i> über Diskriminanzfunktionen.....	149
Anhangstabelle 11.8	Ergebnisse des Gleichheitstests der Gruppenmittelwerte für die Datenbank <i>Körnererbsen</i>	150
Anhangstabelle 11.9	Standardisierte kanonische Korrelationskoeffizienten, Eigenwerte und Wilks Lambda der Diskriminanzfunktionen für die Wissensbasis <i>Körnererbsen</i>	150
Anhangstabelle 11.10	Ergebnisse der schrittweisen Diskriminanzanalyse der Datenbank <i>Körnererbsen</i>	151
Anhangstabelle 11.11	Ergebnisse des Gleichheitstests der Gruppenmittelwerte für die Datenbank <i>Körnermais</i>	152
Anhangstabelle 11.12	Standardisierte kanonische Korrelationskoeffizienten, Eigenwerte und Wilks Lambda der Diskriminanzfunktionen für die Wissensbasis <i>Körnermais</i>	152
Anhangstabelle 11.13	Ergebnisse der schrittweisen Diskriminanzanalyse der Datenbank <i>Körnermais</i>	153
Anhangstabelle 11.14	Ergebnisse des Gleichheitstests der Gruppenmittelwerte für die Datenbank <i>Winterraps</i>	154
Anhangstabelle 11.15	Standardisierte kanonische Korrelationskoeffizienten, Eigenwerte und Wilks Lambda der Diskriminanzfunktionen für die Wissensbasis <i>Winterraps</i>	154
Anhangstabelle 11.16	Ergebnisse der schrittweisen Diskriminanzanalyse der Datenbank <i>Winterraps</i>	155
Anhangstabelle 11.17	Ergebnisse des Gleichheitstests der Gruppenmittelwerte für die Datenbank <i>Sommergerste</i>	156

Anhangstabelle 11.18	Standardisierte kanonische Korrelationskoeffizienten, Eigenwerte und Wilks Lambda der Diskriminanzfunktionen für die Wissensbasis <i>Sommergerste</i>	156
Anhangstabelle 11.19	Ergebnisse der schrittweisen Diskriminanzanalyse der Datenbank <i>Sommergerste</i>	157
Anhangstabelle 11.20	Bonitur- und Applikationstermine, Herbizidklassen, Mittel und Aufwandmengen auf den Versuchsschlägen 2004 und 2005.....	158
Anhangstabelle 11.21	Leitunkräuter und Unkrautdichten vor und nach der Herbizidbehandlung auf den Versuchsschlägen 2004 und 2005....	161

11.2 Verzeichnis der Anhangsabbildungen

Anhangsabbildung 11.1	Grafische Darstellung der Diskriminanzwerte der drei Diskriminanzfunktionen der Datenbank <i>Körnererbsen</i>	151
Anhangsabbildung 11.2	Grafische Darstellung der Diskriminanzwerte der drei Diskriminanzfunktionen der Datenbank <i>Körnermais</i>	153
Anhangsabbildung 11.3	Grafische Darstellung der Diskriminanzwerte der drei Diskriminanzfunktionen der Datenbank <i>Winterraps</i>	155
Anhangsabbildung 11.4	Grafische Darstellung der Diskriminanzwerte der drei Diskriminanzfunktionen der Datenbank <i>Sommergerste</i>	157
Anhangsabbildung 11.5	Softwareoberfläche IMPAS AGRI zur Evaluierung der Erkennungsstrategie.....	163
Anhangsabbildung 11.6	Kameraspur in Getreide (Schlag 8, Dikopshof).....	164
Anhangsabbildung 11.7	Systemaufbau Bispektralkamera (1) mit künstlicher Lichtquelle (2) und Ultraschallsensor 3).....	164

Anhangstabelle 11.1 EPPO Codes der untersuchten Kulturpflanzen und Unkrautarten

EPPO	Deutsche Bezeichnung Lateinischer Name	EPPO	Deutsche Bezeichnung Lateinischer Name
ABUTH	Samtpappel <i>Abutilon theophrasti</i>	HORVW	Wintergerste <i>Hordeum vulgare</i>
ACHMI	Gemeine Schafgarbe <i>Achillea millefolium</i>	LAMAM	Stängelumfassende Taubnessel <i>Lamium aplexicaule</i>
AETCY	Hundspetersilie <i>Aethusa cynapium</i>	LAMPU	Rote Taubnessel <i>Lamium purpureum</i>
AGREE	Gemeine Quecke <i>Agropyron repens</i>	LAPCO	Gemeiner Rainkohl <i>Lapsana communis</i>
ALOMY	Acker-Fuchsschwanzgras <i>Alopecurus myosuroides</i>	MATCH	Echte Kamille <i>Matricaria chamomilla</i>
AMARE	Rauhhaariger Amaranth <i>Amaranthus retroflexus</i>	MATIN	Geruchlose Kamille <i>Matricaria perforata</i>
ANGAR	Acker Gauchheil <i>Anagalis arvensis</i>	MYOAR	Acker-Vergissmeinnicht <i>Myosotis arvensis</i>
ANTAR	Acker-Hundskamille <i>Anthemis arvensis</i>	PAPRH	Klatsch-Mohn <i>Papaver rhoeas</i>
APESV	Gemeiner Windhalm <i>Apera spica-venti</i>	PIBSA	Erbsen <i>Pisum sativum ssp.</i>
ATXPA	Gemeine Melde <i>Atriplex patula</i>	POAAN	Einjähriges Rispengras <i>Poa annua</i>
AVEFA	Flughafer <i>Avena fatua</i>	POATR	Gemeines Rispengras <i>Poa trivialis</i>
BEAVA	Zuckerrübe <i>Beta vulgaris</i>	RAPRA	Hederich <i>Raphanus raphanistrum</i>
BROSE	Roggen-Trespe <i>Bromus secalinus</i>	RUMAA	Kleiner Ampfer <i>Rumex acetosella</i>
BROST	Taube Trespe <i>Bromus sterilis</i>	SETVI	Grüne Borstenhirse <i>Setaria viridis</i>
BRSNN	Raps <i>Brassica napus napus</i>	SINAR	Acker-Senf <i>Sinapis arvensis</i>
CAPBP	Gemeines Hirtentäschelkraut <i>Capsella bursa-pastoris</i>	SOLNI	Schwarzer Nachtschatten <i>Solanum nigrum</i>
CHEAL	Weißer Gänsefuß <i>Chenopodium album</i>	STEME	Vogelmiere <i>Stellaria media</i>
CIRAR	Acker-Kratzdistel <i>Cirsium arvense</i>	TAROF	Gemeiner Löwenzahn <i>Taraxacum officinale</i>
CONAR	Ackerwinde <i>Convolvulus arvensis</i>	TRZAW	Winterweizen <i>Triticum aestivum</i>
DAUCA	Wilde Möhre <i>Daucus carota</i>	URTUR	Kleine Brennessel <i>Urtica urens</i>
ECHCG	Gemeine Hühnerhirse <i>Echinochloa crusgalli</i>	VERHE	Efeublättriger Ehrenpreis <i>Veronica hederaefolia</i>
EPHHE	Sonnen-Wolfsmilch <i>Euphorbia helioscopia</i>	VICCR	Vogel-Wicke <i>Vicia cracca</i>
GALAP	Klettenlabkraut <i>Galium aparine</i>	VICFX	Ackerbohne <i>Vicia faba ssp.</i>
GASPA	Franzosenkraut <i>Galingsoga parviflora</i>	VIOAR	Acker-Stiefmütterchen <i>Viola arvensis</i>
HORVS	Braugerste <i>Hordeum vulgare</i>	ZEAMX	Mais <i>Zea mays</i>

Anhangstabelle 11.2 Konfusionsmatrix für die Trennung von *Unkrautarten (BBCH 10 bis 12) in Mais* über Diskriminanzfunktionen

Pflanze	Klassifikationsergebnisse (%) für Unkrautarten (BBCH 10 bis 12) in Mais																		
	AGREE	AMARE	CHEAL	CIRAR	CONAR	ECHCG	EPHHE	GALAP	GASPA	LAMAM	LAPCO	MATIN	POAAN	SETVI	SINAR	SOLNI	STEME	URTUR	ZEAMX
AGREE	74	3	4	0	0	1	0	0	0	0	0	0	18	0	0	0	0	0	0
AMARE	0	0	13	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	87	0	0	0	0	0
CHEAL	0	8	27	0	6	8	4	2	2	0	0	2	0	37	0	0	4	0	0
CIRAR	0	0	0	5	2	0	5	0	32	5	2	0	0	48	0	0	2	0	0
CONAR	0	0	0	0	19	5	5	16	8	24	3	0	0	0	3	11	5	0	0
ECHCG	1	0	1	0	0	59	0	0	0	0	0	0	1	38	0	0	0	0	0
EPHHE	0	0	0	16	0	0	38	0	16	6	4	0	0	18	0	0	0	2	0
GALAP	0	0	0	6	0	3	14	40	6	3	0	0	0	3	3	23	0	0	0
GASPA	0	0	0	0	2	0	6	0	63	15	1	4	0	1	0	0	6	1	0
LAMAM	0	0	1	0	0	1	0	0	33	43	1	4	0	1	0	3	8	4	0
LAPCO	0	0	0	7	0	0	19	0	12	33	21	0	0	7	0	0	0	0	0
MATIN	0	0	0	0	0	0	0	0	22	5	0	50	2	16	0	0	5	0	0
POAAN	18	0	0	0	0	9	0	0	9	0	0	5	50	9	0	0	0	0	0
SETVI	0	0	4	2	0	32	4	0	0	2	0	0	1	54	0	0	1	0	0
SINAR	0	0	0	0	0	0	2	0	14	2	0	0	0	38	8	26	0	8	2
SOLNI	0	0	0	0	5	7	10	0	2	5	5	0	0	24	0	26	2	7	7
STEME	0	0	8	0	0	0	0	0	10	11	3	7	0	28	0	0	32	0	0
URTUR	0	0	0	0	0	0	6	0	23	23	0	0	0	3	6	9	3	29	0
ZEAMX	0	0	0	0	0	0	0	10	0	0	0	0	0	0	0	5	0	0	85

41,6% der ursprünglich gruppierten Fälle wurden korrekt klassifiziert

Anhangstabelle 11.3 Konfusionsmatrix für die Trennung von *Unkrautarten (BBCH 10 bis 14) in Mais* über Diskriminanzfunktionen

Pflanze	Klassifikationsergebnisse (%) für Unkräuter (BBCH 10 bis 14) in Mais																		
	AGREE	AMARE	CHEAL	CIRAR	CONAR	ECHCG	EPHHE	GALAP	GASPA	LAMAM	LAPCO	MATIN	POAAN	SETVI	SINAR	SOLNI	STEME	URTUR	ZEAMX
AGREE	70	7	0	0	0	1	1	0	0	0	0	1	12	5	0	0	1	0	1
AMARE	0	7	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	93	0	0	0	0	0
CHEAL	0	6	26	0	0	1	6	1	4	1	0	0	0	36	6	1	9	1	0
CIRAR	0	0	0	5	0	0	9	0	30	9	2	0	0	36	0	0	9	0	0
CONAR	0	0	5	0	0	3	5	3	11	43	5	0	0	11	0	5	8	0	0
ECHCG	1	0	3	0	0	54	0	0	0	1	0	0	2	36	0	0	1	0	3
EPHHE	0	0	0	1	0	0	47	0	13	20	3	0	0	8	0	1	3	4	0
GALAP	0	0	0	0	0	4	18	32	4	16	0	0	0	12	2	11	0	4	0
GASPA	0	0	4	1	0	0	7	0	57	18	1	0	0	0	0	2	5	5	0
LAMAM	0	0	8	0	0	0	5	6	29	24	4	0	0	3	1	1	16	3	0
LAPCO	0	0	0	5	0	0	13	9	7	34	20	0	0	0	4	2	5	2	0
MATIN	0	0	0	9	0	0	3	1	18	3	0	47	7	7	0	0	7	0	0
POAAN	23	0	2	0	0	5	2	0	7	0	2	5	39	9	0	0	7	0	0
SETVI	0	0	3	3	0	32	2	0	0	1	1	1	0	51	0	1	5	0	1
SINAR	0	0	2	0	0	0	6	5	14	2	2	0	0	30	25	3	2	6	3
SOLNI	0	0	2	0	0	0	14	5	2	5	7	0	0	31	17	7	5	5	0
STEME	0	0	10	1	0	1	7	11	21	9	2	1	0	22	0	0	14	2	0
URTUR	0	0	2	0	0	0	9	2	30	13	0	0	0	0	11	0	6	28	0
ZEAMX	0	0	0	0	0	5	0	0	0	0	0	0	0	0	5	5	0	0	85

36,4% der ursprünglich gruppierten Fälle wurden korrekt klassifiziert.

Anhangstabelle 11.4 Konfusionsmatrix für die Trennung von *Unkrautarten (BBCH 10 bis 12) in Getreide* über Diskriminanzfunktionen

Klassifizierungsergebnisse (%) für Unkrautarten (BBCH 10 bis 12) in Getreide																			
Pflanze	AGREE	ALOMY	ANGAR	ANTAR	APESV	AVEFA	BROSE	BROST	CIRAR	GALAP	HORSV	LAMAM	LAMPU	MYOAR	PAPRH	POAAN	SINAR	STEME	VIOAR
AGREE	37	28	0	0	16	3	11	4	0	0	0	0	0	0	0	3	0	0	0
ALOMY	23	35	0	0	13	1	15	1	0	0	0	0	0	0	4	7	0	0	0
ANGAR	0	0	44	6	0	0	0	0	2	0	0	15	4	13	0	0	0	8	8
ANTAR	0	0	14	64	0	0	0	0	10	0	0	12	0	0	0	0	0	0	0
APESV	0	11	0	0	80	0	1	0	0	0	0	0	0	1	1	5	0	0	0
AVEFA	0	2	0	0	0	44	27	16	2	0	5	5	0	0	0	0	0	0	0
BROSE	1	1	0	3	0	11	53	8	0	0	0	5	2	5	1	1	0	7	1
BROST	0	0	0	0	0	17	58	13	0	0	0	6	0	4	0	1	0	1	0
CIRAR	0	0	14	7	0	0	14	0	16	0	0	11	5	9	0	0	0	23	2
GALAP	0	0	3	0	0	0	0	0	0	46	3	23	3	11	0	0	11	0	0
HORSV	0	0	0	0	0	12	0	0	0	12	77	0	0	0	0	0	0	0	0
LAMAM	0	0	10	5	0	0	4	0	0	0	0	58	4	1	1	0	1	15	1
LAMPU	0	0	0	0	0	0	0	0	0	9	0	5	41	5	2	0	2	11	25
MYOAR	0	0	3	1	0	0	0	0	0	0	0	34	10	33	0	0	0	10	7
PAPRH	0	4	3	0	0	0	25	0	0	0	0	0	0	4	54	0	0	6	4
POAAN	0	18	0	0	9	0	23	0	0	0	0	5	0	9	23	14	0	0	0
SINAR	0	0	10	0	0	0	0	0	0	0	0	13	0	6	0	0	71	0	0
STEME	0	0	1	1	0	0	24	0	0	0	0	8	1	4	11	0	0	42	6
VIOAR	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	5	7	29	0	0	0	24	34

45,6% der ursprünglich gruppierten Fälle wurden korrekt klassifiziert.

Anhangstabelle 11.5 Konfusionsmatrix für die Trennung von *Unkrautarten (BBCH 10 bis 14) in Getreide* über Diskriminanzfunktionen

Klassifikationsergebnisse (%) von Unkrautarten (BBCH 10 bis 14) in Getreide																			
Pflanze	AGREE	ALOMY	ANGAR	ANTAR	APESV	AVEFA	BROSE	BROST	CIRAR	GALAP	HORSV	LAMAM	LAMPU	MYOAR	PAPRH	POAAN	SINAR	STEME	VIOAR
AGREE	37	21	0	0	9	11	15	1	0	0	0	1	0	3	0	3	0	0	0
ALOMY	23	31	0	0	11	4	17	1	0	0	1	3	0	0	0	7	0	1	0
ANGAR	0	0	40	6	0	0	2	0	6	0	0	10	0	27	2	0	0	6	2
ANTAR	0	0	14	64	0	0	0	0	12	0	0	6	0	0	2	0	0	0	1
APESV	0	11	0	2	68	1	1	0	0	0	0	4	0	1	0	12	0	0	0
AVEFA	0	1	0	0	0	37	27	16	1	0	10	4	1	0	0	0	0	1	0
BROSE	1	1	1	2	0	13	53	7	0	0	1	10	0	5	3	1	0	0	1
BROST	1	1	0	0	0	24	51	8	0	0	0	8	0	4	1	0	0	0	0
CIRAR	0	0	5	7	0	0	32	0	7	0	0	21	0	21	5	0	0	2	2
GALAP	0	0	0	5	0	0	4	5	2	32	0	28	4	14	0	0	2	4	2
HORSV	0	0	0	0	0	23	0	0	0	0	73	0	4	0	0	0	0	0	0
LAMAM	0	0	10	2	0	0	3	0	0	3	0	47	6	6	9	0	1	12	3
LAMPU	0	0	0	0	0	0	0	0	0	3	0	14	19	31	8	0	8	3	14
MYOAR	0	0	3	1	0	0	0	0	0	0	0	32	21	29	2	0	0	6	6
PAPRH	0	1	0	3	0	0	24	0	0	1	0	4	2	4	42	0	0	9	10
POAAN	5	14	0	2	18	0	18	0	0	0	0	5	0	9	11	16	0	2	0
SINAR	0	0	7	0	0	0	0	0	0	5	0	14	21	11	0	0	36	2	5
STEME	0	0	0	4	0	0	22	0	0	9	0	10	2	4	26	0	1	11	11
VIOAR	0	0	0	2	0	0	0	0	0	2	0	8	2	40	7	0	0	5	36

36,9% der ursprünglich gruppierten Fälle wurden korrekt klassifiziert.

Anhangstabelle 11.6 Konfusionsmatrix für die Trennung von *Unkrautarten (BBCH 10 bis 12) in Zuckerrüben* über Diskriminanzfunktionen

Klassifizierungsergebnisse Unkrautarten (BBCH 10 bis 12) in Zuckerrüben																					
Pflanze	ABUTH	AETCY	AGREE	AMARE	ANGAR	ANTAR	BEAVA	CHEAL	CIRAR	CONAR	DAUCA	EPPHE	GALAP	LAMAM	LAMPU	LAPCO	POAAN	SINAR	SOLNI	STEME	URTUR
ABUTH	32	0	0	0	0	7	0	0	0	0	0	37	2	2	10	0	0	0	10	0	0
AETCY	4	30	0	2	0	10	0	16	0	0	0	6	0	12	12	4	0	0	0	4	0
AGREE	0	0	71	3	0	0	0	4	0	0	7	0	1	0	0	0	14	0	0	0	0
AMARE	0	0	0	0	0	0	0	80	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	20	0
ANGAR	0	0	0	0	54	4	0	0	0	0	0	2	0	25	4	8	0	0	0	4	0
ANTAR	0	2	0	0	16	55	0	0	0	0	0	2	0	22	0	0	0	0	0	3	0
BEAVA	0	4	0	0	0	0	83	0	0	0	0	2	4	0	0	0	0	0	6	0	0
CHEAL	0	2	0	6	0	2	2	59	0	6	0	0	2	2	8	0	0	0	0	10	0
CIRAR	0	7	0	0	7	14	0	2	2	2	0	7	0	30	2	0	0	0	0	25	2
CONAR	14	0	0	0	0	3	0	0	0	16	0	0	16	24	19	0	0	0	0	8	0
DAUCA	0	1	0	3	0	6	0	11	0	0	51	0	0	1	0	0	26	0	0	0	0
EPPHE	2	6	0	0	0	4	0	0	2	0	0	28	0	30	20	4	0	0	0	2	2
GALAP	9	0	0	0	0	6	0	0	0	0	0	3	43	17	0	0	0	3	17	3	0
LAMAM	3	4	0	1	13	3	0	3	0	1	0	1	0	50	4	0	0	0	1	16	1
LAMPU	7	7	0	0	0	0	0	2	0	11	0	2	0	2	36	7	0	0	7	14	5
LAPCO	0	5	0	0	0	2	0	0	0	0	0	12	0	50	26	2	0	0	0	2	0
POAAN	0	0	5	0	0	0	0	14	0	0	5	0	0	5	0	5	59	0	0	9	0
SINAR	10	6	0	0	6	0	4	16	4	0	0	0	2	16	2	0	0	10	14	2	8
SOLNI	10	14	0	0	0	0	10	7	5	5	0	0	5	2	19	0	0	0	19	2	2
STEME	3	13	0	3	1	4	0	8	0	0	0	1	0	13	3	0	0	0	0	49	1
URTUR	3	0	0	0	9	6	0	0	0	0	0	0	0	29	6	0	0	14	0	3	31

40,7% der ursprünglich gruppierten Fälle wurden korrekt klassifiziert.

Anhangstabelle 11.7 Konfusionsmatrix für die Trennung von *Unkrautarten (BBCH 10 bis 14) in Zuckerrüben* über Diskriminanzfunktionen

Klassifikationsergebnisse (%) für Unkräuter (BBCH 10 bis 14) in Zuckerrüben																					
Pflanze	ABUTH	AETCY	AGREE	AMARE	ANGAR	ANTAR	BEAVA	CHEAL	CIRAR	CONAR	DAUCA	EPHHE	GALAP	LAMAM	LAMPU	LAPCO	POAAN	SINAR	SOLNI	STEME	URTUR
ABUTH	22	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	46	5	5	5	5	0	0	7	2	2
AETCY	10	34	0	14	0	8	0	4	0	0	0	10	0	10	4	2	0	0	0	4	0
AGREE	0	0	59	4	0	0	5	3	0	0	18	0	0	0	0	0	11	0	0	0	0
AMARE	0	0	0	40	0	0	0	27	0	0	0	0	0	27	0	0	0	0	0	7	0
ANGAR	0	2	0	0	52	0	0	0	4	0	0	14	0	23	0	4	0	0	0	2	0
ANTAR	0	2	0	0	17	50	0	0	11	0	7	0	0	8	0	0	0	0	0	4	1
BEAVA	2	2	0	0	0	0	72	6	0	0	0	4	0	0	4	0	0	9	0	0	0
CHEAL	0	0	0	22	0	1	0	41	0	1	0	0	1	4	12	0	0	4	4	4	4
CIRAR	0	21	0	0	7	5	0	2	7	0	0	11	0	30	0	2	0	0	0	7	9
CONAR	11	0	0	0	0	0	0	8	0	5	0	11	3	43	11	3	0	0	0	3	3
DAUCA	0	1	0	13	0	7	0	4	0	0	68	0	0	0	0	4	0	0	3	0	
EPHHE	7	3	0	0	0	0	0	0	4	3	0	41	0	21	9	1	0	0	0	1	9
GALAP	4	0	0	0	0	2	4	2	0	0	0	21	30	18	7	2	0	2	9	0	2
LAMAM	2	4	0	1	10	0	0	7	0	0	0	2	6	42	7	0	0	0	1	14	5
LAMPU	8	9	0	0	0	0	2	16	0	2	0	6	3	3	28	5	0	6	0	9	3
LAPCO	16	7	0	0	2	0	0	0	0	2	0	4	5	45	11	4	0	2	2	2	0
POAAN	0	2	16	0	2	2	0	0	0	0	27	2	0	2	0	2	27	0	0	16	0
SINAR	6	6	0	3	0	0	3	10	0	0	0	6	2	14	11	0	0	22	2	3	11
SOLNI	7	14	0	0	0	0	0	17	0	0	0	0	2	7	17	2	0	12	10	12	0
STEME	2	11	0	4	0	7	0	7	0	0	0	2	10	12	5	1	0	0	1	35	3
URTUR	0	0	0	0	7	0	0	2	0	0	0	7	2	22	0	0	0	6	0	4	50

37,4% der ursprünglich gruppierten Fälle wurden korrekt klassifiziert

Anhangstabelle 11.8 Ergebnisse des Gleichheitstests der Gruppenmittelwerte für die Datenbank *Körnererbsen*

Gleichheitstest der Gruppenmittelwerte					
	Wilks-Lambda	F	df1	df2	Signifikanz
FD1	,497	52,594	3	156	,000
FD2	,558	41,155	3	156	,000
FD3	,578	37,899	3	156	,000
FD4	,622	31,586	3	156	,000
FD5	,755	16,877	3	156	,000
FD6	,662	26,577	3	156	,000
FD7	,733	18,923	3	156	,000
FD8	,745	17,788	3	156	,000
FD9	,687	23,735	3	156	,000
FD10	,665	26,180	3	156	,000
FD11	,596	35,278	3	156	,000
FD12	,677	24,816	3	156	,000
FD13	,681	24,364	3	156	,000
FD14	,670	25,601	3	156	,000
FD15	,707	21,506	3	156	,000
FD16	,587	36,630	3	156	,000
FD17	,531	45,961	3	156	,000
FD18	,696	22,696	3	156	,000
FD19	,744	17,891	3	156	,000
FD20	,705	21,752	3	156	,000
FF	,391	81,075	3	156	,000
Dmin	,270	140,618	3	156	,000
Dmax	,198	211,281	3	156	,000
SPW	,530	46,025	3	156	,000
Area	,270	140,443	3	156	,000
CF	,236	168,704	3	156	,000

Anhangstabelle 11.9 Standardisierte kanonische Korrelationskoeffizienten, Eigenwerte und Wilks Lambda der Diskriminanzfunktionen für die Wissensbasis *Körnererbsen*

Funktion	Eigenwerte				Wilks' Lambda				
	Eigenwert	% der Varianz	Kumulierte %	Kanonische Korrelation	Test der Funktion	Wilks-Lambda	Chi-Quadrat	df	Signifikanz
1	10,298	64	64	0,955	1 bis 3	0,006	766,432	45	0
2	3,384	21	85,1	0,879	2 bis 3	0,067	403,947	28	0
3	2,401	14,9	100	0,84	3	0,294	182,977	13	0

Standardisierte kanonische Diskriminanzfunktionskoeffizienten

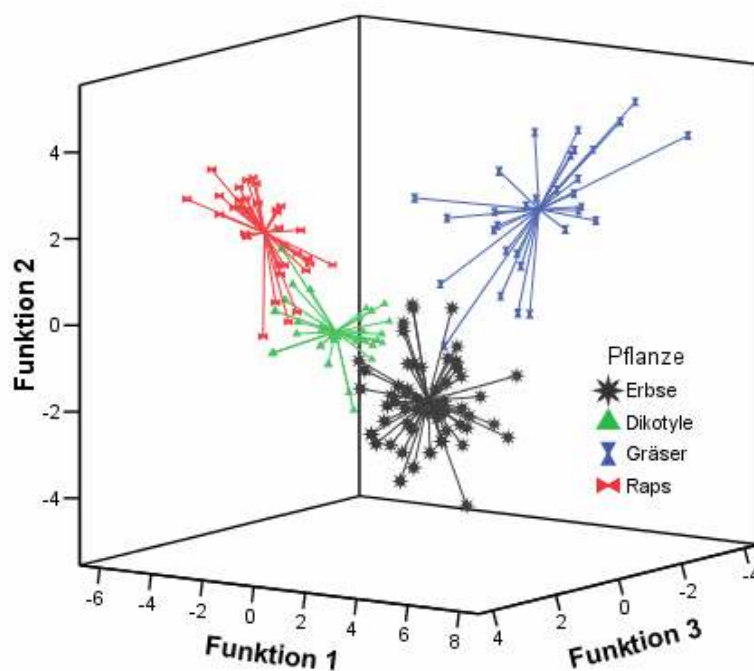
	Funktion		
	1	2	3
FD1	,576	-,045	-,224
FD2	-,399	,804	,386
FD3	,275	,386	,139
FD4	,313	,235	,554
FD9	,293	,036	,256
FD10	,388	-,140	,061
FD11	,248	-,255	,137
FD12	,273	-,144	,145
FD13	,180	-,244	,278
FD16	,233	-,457	,197
FD17	,437	-,071	,321
Dmin	,455	-,397	-,861
Dmax	1,547	,486	,671
SPW	-,059	,713	1,228
CF	-1,623	,402	-,568

Anhangstabelle 11.10 Ergebnisse der schrittweisen Diskriminanzanalyse der Datenbank Körnererbsen

Aufgenommene Variablen													
Schritt	Aufgenommen	Wilks-Lambda											
		Statistik	df1	df2	df3	Exaktes F			Näherungsweise F				
						Statistik	df1	df2	Signifikanz	Statistik	df1	df2	Signifikanz
1	Dmax	,198	1	3	156,000	211,281	3	156,000	,000				
2	SPW	,097	2	3	156,000	114,310	6	310,000	,000				
3	FD2	,049	3	3	156,000					101,967	9	374,946	,000
4	FD16	,034	4	3	156,000					87,448	12	405,091	,000
5	FD1	,026	5	3	156,000					77,210	15	420,006	,000
6	FD11	,020	6	3	156,000					70,730	18	427,578	,000
7	Dmin	,016	7	3	156,000					66,206	21	431,269	,000
8	FD4	,014	8	3	156,000					61,089	24	432,747	,000
9	FD17	,012	9	3	156,000					57,087	27	432,879	,000
10	FD3	,010	10	3	156,000					53,865	30	432,150	,000
11	CF	,009	11	3	156,000					51,260	33	430,847	,000
12	FD10	,008	12	3	156,000					49,819	36	429,146	,000
13	FD9	,007	13	3	156,000					47,629	39	427,163	,000
14	FD13	,006	14	3	156,000					45,327	42	424,972	,000
15	FD12	,006	15	3	156,000					43,357	45	422,626	,000

b Minimaler partieller F-Wert für die Aufnahme ist 3.84.

c Maximaler partieller F-Wert für den Ausschluß ist 2.71.



Anhangsabbildung 11.1 Grafische Darstellung der Diskriminanzwerte der drei Diskriminanzfunktionen der Datenbank Körnererbsen

Anhangstabelle 11.11 Ergebnisse des Gleichheitstests der Gruppenmittelwerte für die Datenbank *Körnermais*

Gleichheitstest der Gruppenmittelwerte					
	Wilks-Lambda	F	df1	df2	Signifikanz
FD1	,543	63,893	3	228	,000
FD2	,691	34,041	3	228	,000
FD3	,900	8,407	3	228	,000
FD4	,630	44,630	3	228	,000
FD5	,941	4,746	3	228	,003
FD6	,906	7,915	3	228	,000
FD7	,938	5,066	3	228	,002
FD8	,835	15,001	3	228	,000
FD9	,864	12,001	3	228	,000
FD10	,846	13,828	3	228	,000
FD11	,743	26,299	3	228	,000
FD12	,831	15,418	3	228	,000
FD13	,888	9,545	3	228	,000
FD14	,822	16,481	3	228	,000
FD15	,880	10,341	3	228	,000
FD16	,876	10,806	3	228	,000
FD17	,904	8,092	3	228	,000
FD18	,816	17,169	3	228	,000
FD19	,885	9,861	3	228	,000
FD20	,869	11,441	3	228	,000
FF	,509	73,264	3	228	,000
Dmin	,215	278,062	3	228	,000
Dmax	,087	797,691	3	228	,000
SPW	,615	47,551	3	228	,000
Area	,216	275,220	3	228	,000
CF	,199	306,192	3	228	,000

Anhangstabelle 11.12 Standardisierte kanonische Korrelationskoeffizienten, Eigenwerte und Wilks Lambda der Diskriminanzfunktionen für die Wissensbasis *Körnermais*

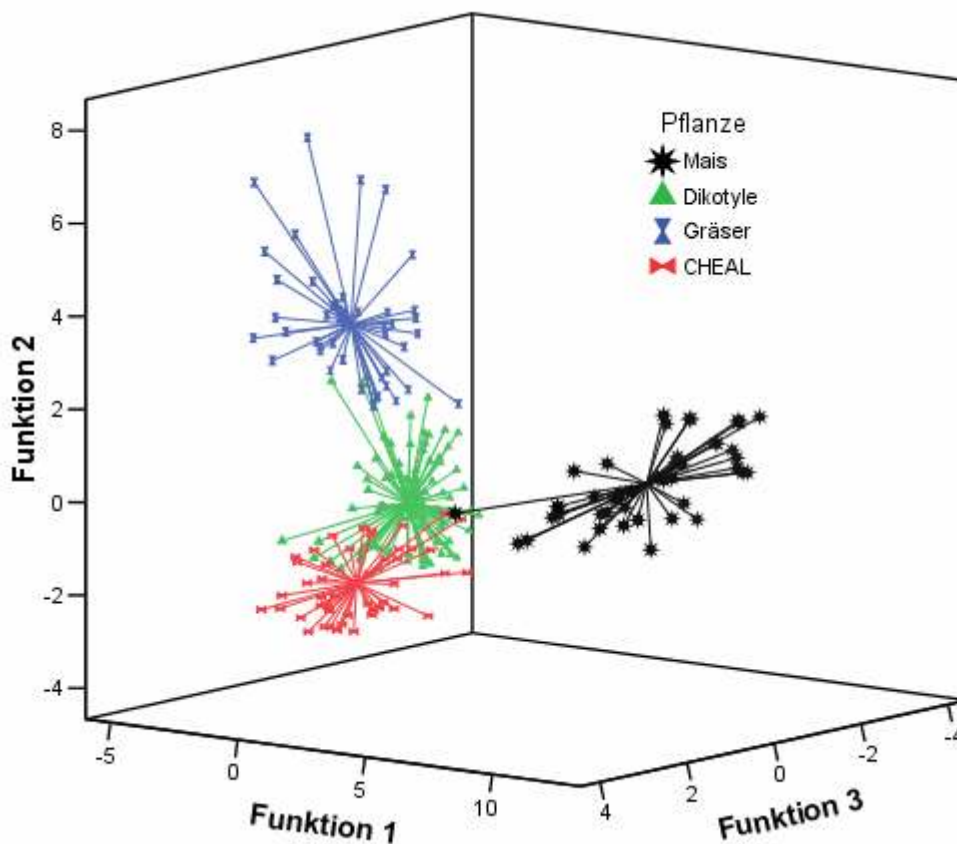
Funktion	Eigenwerte				Wilks' Lambda				
	Eigenwert	% der Varianz	Kumulierte %	Kanonische Korrelation	Test der Funktion	Wilks-Lambda	Chi-Quadrat	df	Signifikanz
1	14,980	77,4	77,4	,968	1 bis 3	,007	1103,345	36	,000
2	3,324	17,2	94,6	,877	2 bis 3	,113	485,342	22	,000
3	1,039	5,4	100,0	,714	3	,491	158,848	10	,000

Funktion	Standardisierte kanonische Diskriminanzfunktionskoeffizienten		
	1	2	3
FD4	-,191	-,342	,577
FD9	-,156	,231	,116
FD10	,129	,016	,342
FD11	,017	,075	,451
FD12	,064	-,036	,369
FD18	,172	-,087	,315
FF	-,599	1,340	,047
Dmin	,408	,214	,732
Dmax	1,365	,168	,054
SPW	,039	-,757	-,345
Area	-,154	,568	-,137
CF	-,429	-1,269	-,877

Anhangstabelle 11.13 Ergebnisse der schrittweisen Diskriminanzanalyse der Datenbank *Körnermais*

Aufgenommene Variablen													
Schritt	Aufgenommenen	Wilks-Lambda											
		Statistik	df1	df2	df3	Exaktes F				Näherungsweise F			
						Statistik	df1	df2	Signifikanz	Statistik	df1	df2	Signifikanz
1	Dmax	,087	1	3	228,000	797,691	3	228,000	,000				
2	FF	,038	2	3	228,000	311,241	6	454,000	,000				
3	SPW	,021	3	3	228,000					239,022	9	550,175	,000
4	FD4	,013	4	3	228,000					203,603	12	595,586	,000
5	FD11	,012	5	3	228,000					163,708	15	618,767	,000
6	CF	,011	6	3	228,000					137,001	18	631,225	,000
7	Area	,010	7	3	228,000					120,285	21	638,014	,000
8	Dmin	,009	8	3	228,000					107,306	24	641,568	,000
9	FD18	,009	9	3	228,000					97,663	27	643,156	,000
10	FD10	,008	10	3	228,000					89,419	30	643,484	,000
11	FD12	,008	11	3	228,000					82,919	33	642,972	,000
12	FD9	,007	12	3	228,000					77,321	36	641,878	,000

Minimaler partieller F-Wert für die Aufnahme ist 3.84.
Maximaler partieller F-Wert für den Ausschluß ist 2.71.



Anhangsabbildung 11.2 Grafische Darstellung der Diskriminanzwerte der drei Diskriminanzfunktionen der Datenbank *Körnermais*

Anhangstabelle 11.14 Ergebnisse des Gleichheitstests der Gruppenmittelwerte für die Datenbank *Winterraps*

Gleichheitstest der Gruppenmittelwerte					
	Wilks-Lambda	F	df1	df2	Signifikanz
FD1	,433	62,324	3	143	,000
FD2	,707	19,748	3	143	,000
FD3	,455	57,144	3	143	,000
FD4	,989	,541	3	143	,655
FD5	,808	11,302	3	143	,000
FD6	,865	7,467	3	143	,000
FD7	,778	13,627	3	143	,000
FD8	,859	7,805	3	143	,000
FD9	,784	13,100	3	143	,000
FD10	,873	6,947	3	143	,000
FD11	,894	5,665	3	143	,001
FD12	,986	,687	3	143	,561
FD13	,907	4,906	3	143	,003
FD14	,903	5,101	3	143	,002
FD15	,844	8,842	3	143	,000
FD16	,909	4,781	3	143	,003
FD17	,883	6,335	3	143	,000
FD18	,930	3,604	3	143	,015
FD19	,921	4,064	3	143	,008
FD20	,927	3,747	3	143	,013
FF	,212	177,150	3	143	,000
Dmin	,156	257,121	3	143	,000
Dmax	,171	231,188	3	143	,000
SPW	,383	76,795	3	143	,000
Area	,293	115,296	3	143	,000
CF	,156	257,462	3	143	,000

Anhangstabelle 11.15 Standardisierte kanonische Korrelationskoeffizienten, Eigenwerte und Wilks Lambda der Diskriminanzfunktionen für die Wissensbasis *Winterraps*

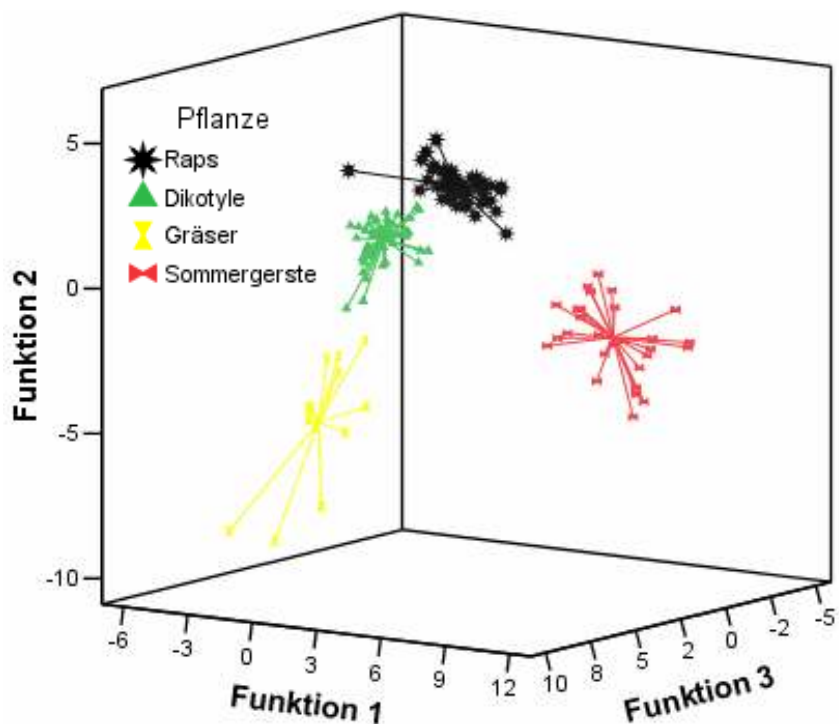
Funktion	Eigenwerte				Wilks' Lambda				
	Eigenwert	% der Varianz	Kumulierte %	Kanonische Korrelation	Test der Funktion	Wilks-Lambda	Chi-Quadrat	df	Signifikanz
1	17,577	66,5	66,5	,973	1 bis 3	,002	845,379	33	,000
2	6,757	25,6	92,0	,933	2 bis 3	,042	440,693	20	,000
3	2,106	8,0	100,0	,823	3	,322	156,960	9	,000

	Standardisierte kanonische Diskriminanzfunktionskoeffizienten		
	Funktion		
	1	2	3
FD1	,623	-,213	-,369
FD2	,463	,147	,434
FD3	,077	,513	,725
FD9	,275	-,056	-,169
FD16	-,366	-,006	,177
FD20	,420	,056	,059
FF	-,279	-,892	,900
Dmin	,889	,435	,198
Dmax	1,307	-,601	-,148
Area	-1,612	,073	1,548
CF	,306	,567	-1,277

Anhangstabelle 11.16 Ergebnisse der schrittweisen Diskriminanzanalyse der Datenbank *Winterraps*

Aufgenommene/Entfernte Variablen													
Schritt	Aufgenommen	Wilks-Lambda											
		Statistik	df1	df2	df3	Exaktes F				Näherungsweise F			
						Statistik	df1	df2	Signifikanz	Statistik	df1	df2	Signifikanz
1	CF	,156	1	3	143,000	257,462	3	143,000	,000				
2	FF	,034	2	3	143,000	210,082	6	284,000	,000				
3	Area	,016	3	3	143,000					169,165	9	343,308	,000
4	FD3	,009	4	3	143,000					150,475	12	370,697	,000
5	Dmax	,007	5	3	143,000					132,835	15	384,119	,000
6	FD1	,004	6	3	143,000					126,521	18	390,808	,000
7	Dmin	,004	7	3	143,000					112,632	21	393,940	,000
8	FD2	,003	8	3	143,000					103,208	24	395,043	,000
9	FD20	,003	9	3	143,000					95,856	27	394,912	,000
10	FD16	,002	10	3	143,000					88,806	30	393,992	,000
11	FD9	,002	11	3	143,000					82,540	33	392,546	,000

Minimaler partieller F-Wert für die Aufnahme ist 3.84.
Maximaler partieller F-Wert für den Ausschluß ist 2.71.



Anhangsabbildung 11.3 Grafische Darstellung der Diskriminanzwerte der drei Diskriminanzfunktionen der Datenbank *Winterraps*

Anhangstabelle 11.17 Ergebnisse des Gleichheitstests der Gruppenmittelwerte für die Datenbank *Sommergerste*

Gleichheitstest der Gruppenmittelwerte					
	Wilks-Lambda	F	df1	df2	Signifikanz
FD1	,691	18,172	3	122	,000
FD2	,834	8,075	3	122	,000
FD3	,799	10,223	3	122	,000
FD4	,761	12,751	3	122	,000
FD5	,697	17,651	3	122	,000
FD6	,841	7,709	3	122	,000
FD7	,842	7,652	3	122	,000
FD8	,797	10,352	3	122	,000
FD9	,786	11,093	3	122	,000
FD10	,660	20,972	3	122	,000
FD11	,885	5,264	3	122	,002
FD12	,788	10,966	3	122	,000
FD13	,878	5,636	3	122	,001
FD14	,833	8,177	3	122	,000
FD15	,781	11,433	3	122	,000
FD16	,803	9,974	3	122	,000
FD17	,869	6,132	3	122	,001
FD18	,750	13,581	3	122	,000
FD19	,855	6,889	3	122	,000
FD20	,899	4,552	3	122	,005
FF	,473	45,385	3	122	,000
Dmin	,352	74,768	3	122	,000
Dmax	,246	124,317	3	122	,000
SPW	,689	18,367	3	122	,000
Area	,391	63,272	3	122	,000
CF	,300	95,086	3	122	,000

Anhangstabelle 11.18 Standardisierte kanonische Korrelationskoeffizienten, Eigenwerte und Wilks Lambda der Diskriminanzfunktionen für die Wissensbasis *Sommergerste*

Funktion	Eigenwerte				Wilks' Lambda				
	Eigenwert	% der Varianz	Kumulierte %	Kanonische Korrelation	Test der Funktion	Wilks-Lambda	Chi-Quadrat	df	Signifikanz
1	5,689	59,8	59,8	,922	1 bis 3	,021	451,647	33	,000
2	3,125	32,9	92,7	,870	2 bis 3	,143	228,337	20	,000
3	0,693	7,3	100,0	,640	3	,591	61,831	9	,000

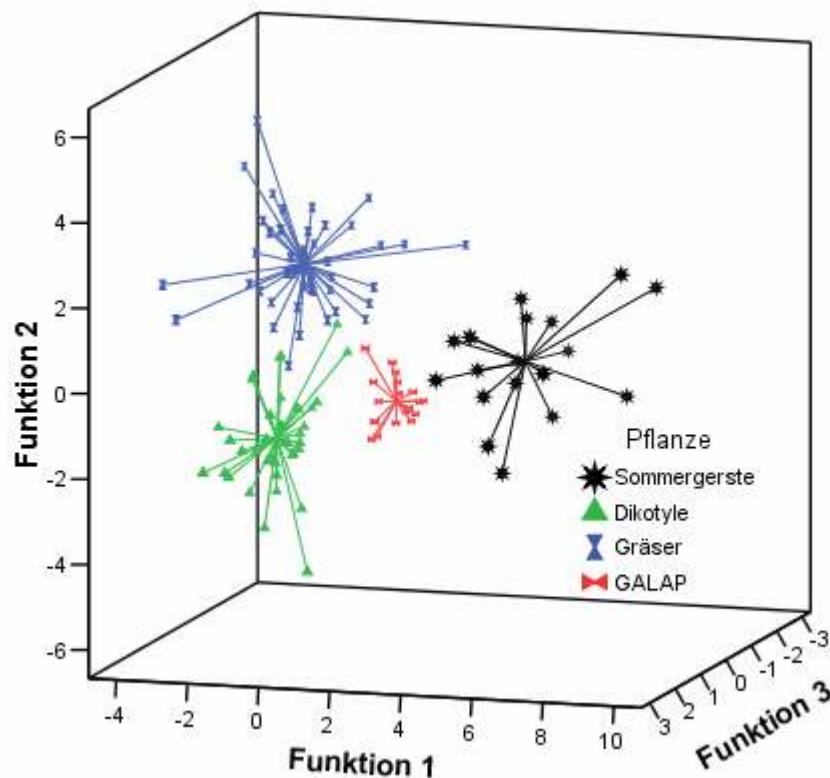
Standardisierte kanonische Diskriminanzfunktionskoeffizienten

	Funktion		
	1	2	3
FD1	,413	,398	,175
FD4	-,168	,265	,531
FD6	,182	,289	-,399
FD9	-,379	-,337	,215
FD10	,191	,413	,263
FD11	-,267	,572	-,230
FD15	,095	,287	,406
FF	-,750	,716	,031
Dmin	,482	,831	,155
Dmax	1,070	-,716	-,383
SPW	-,093	-1,448	,318

Anhangstabelle 11.19 Ergebnisse der schrittweisen Diskriminanzanalyse der Datenbank *Sommergerste*

Aufgenommene Variablen													
Schritt	Aufgenommen	Wilks-Lambda											
		Statistik	df1	df2	df3	Exaktes F				Näherungsweise F			
						Statistik	df1	df2	Signifikanz	Statistik	df1	df2	Signifikanz
1	Dmax	,246	1	3	122,000	124,317	3	122,000	,000				
2	FF	,097	2	3	122,000	89,378	6	242,000	,000				
3	SPW	,064	3	3	122,000					67,977	9	292,199	,000
4	FD4	,052	4	3	122,000					53,800	12	315,136	,000
5	FD11	,044	5	3	122,000					45,757	15	326,147	,000
6	FD10	,038	6	3	122,000					40,300	18	331,411	,000
7	FD1	,034	7	3	122,000					35,932	21	333,639	,000
8	FD6	,030	8	3	122,000					32,554	24	334,136	,000
9	FD9	,027	9	3	122,000					30,058	27	333,581	,000
10	Dmin	,024	10	3	122,000					28,401	30	332,353	,000
11	FD15	,021	11	3	122,000					26,920	33	330,677	,000

Minimaler partieller F-Wert für die Aufnahme ist 3.84.
Maximaler partieller F-Wert für den Ausschluß ist 2.71.



Anhangsabbildung 11.4 Grafische Darstellung der Diskriminanzwerte der drei Diskriminanzfunktionen der Datenbank *Sommergerste*

Anhangstabelle 11.20 Bonitur- und Applikationstermine, Herbizidklassen, Mittel und Aufwandmengen auf den Versuchsschlägen 2004 und 2005

Nr. ha	Schlag Kultur Ort	Boniturtermin ¹	Applikations-termin	Herbizidklassen, Mittel und Aufwandmengen (100 %)	
WG1 2,75	Schlag 4 Wintergerste Dikopshof	16-2-04 MB 10-4-04 EB	15-3-04	Dikotyle	Orkan 2 l/ha
				Gras	TolkanFlo 3 l/ha
				Galium	Orkan 2 l/ha
WW1 5,80	Schlag 9 Winterweizen Dikopshof	25-2-04 MB 10-4-04 EB	15-3-04	Dikotyle	Orkan 2 l/ha
				Gras	TolkanFlo 3 l/ha
				Galium	Orkan 2 l/ha
SG1 1,25	Isemistal Sommergerste Berg	16-4-04 KB 22-4-04 MB 18-5-05 EB	28-4-04	Dikotyle+Raps	Duplosan 2 l/ha
				Gras	Ralon 1 l/ha
SG2 3,46	Eisenmustal Sommergerste Berg	16-4-04 KB 22-4-04 MB 17-5-05 EB	28-4-04	Dikotyle+Raps	Duplosan 2 l/ha
				Gras	Ralon 1 l/ha
SG3 0,45	Roos 33 Sommergerste Berg	16-4-04 KB 22-4-04 MB 18-5-05 EB	30-4-04	Dikotyle+Raps	Duplosan 2 l/ha
				Gras	Ralon 1 l/ha
SG4 3,17	Roostal Sommergerste Berg	16-4-04 KB 21-4-04 MB 20-5-05 EB	30-4-04	Dikotyle+Raps	Duplosan 2 l/ha
				Gras	Ralon 1 l/ha
SG5 0,77	Barth 49 Sommergerste Berg	14-4-04 KB 21-4-04 MB 18-5-05 EB	30-4-04	Dikotyle+Raps	Duplosan 2 l/ha
				Gras	Ralon 1 l/ha
SG6 4,64	Breidel 79+81 Sommergerste Berg	13-4-04 MG 19-4-04 MB 19-5-05 EB	26-4-04	Dikotyle+Raps	Duplosan 2 l/ha
				Gras	Ralon 1 l/ha
SG7 3,32	Rosdahl Sommergerste Berg	22-4-04 MB 19-5-05 EB	26-4-04	Dikotyle	Husar 200 g/ha
				Gras	Ralon 0,75 l/ha
SG8 0,13	Breidel 80 Sommergerste Berg	19-4-04 MB 19-5-05 EB	26-4-04	Dikotyle	Duplosan 2 l/ha
				Gras	Ralon 1 l/ha
ZR1 5,30	Schlag 6 Zuckerrüben Dikopshof	23-4-04 MB 27-4-04 KB 28-4-04 KB 20-7-04 EB	29-4-04 (1) 6-5-04 (2) 14-5-04 (3)	Gras	Select (0,5 l/ha)
				Galium	Powerwin (0,7 l/ha), Trammat (0,35 l/ha)
KM1 2,20	Schlag GH Körnermais Dikopshof	5-5-04 MB 4-5-04 KB 20-7-04 EB	18-5-04	Dikotyle	Gardo Gold (3 l/ha), Callisto (0,75 l/ha)
				Gras	
				Hirse	
KM2 2,40	Schlag 8 Körnermais Dikopshof	13-5-04 MB 21-5-04 KB 20-7-04 EB	25-5-04	Dikotyle	Gardo Gold (3 l/ha),
				Hirsen	

¹ MB = manuelle Bonitur, EB = Erfolgsbonitur, KB= Kamerabonitur, MG = MiniGIS Bonitur

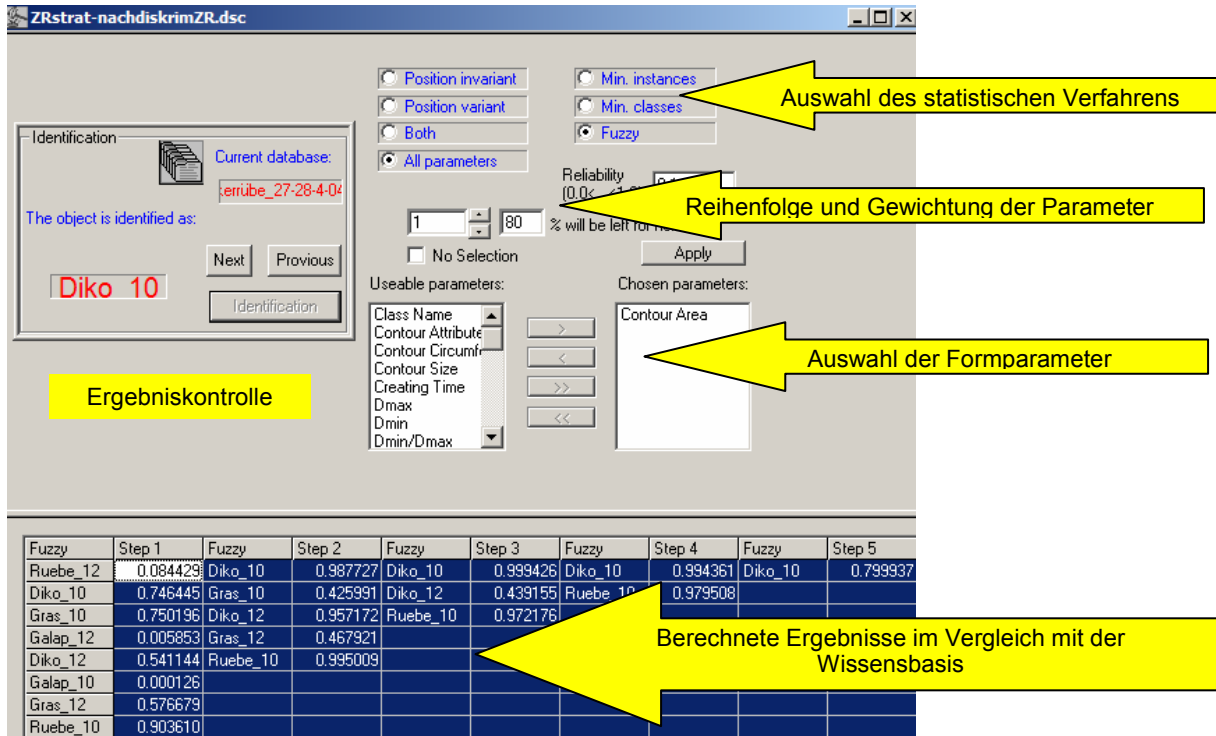
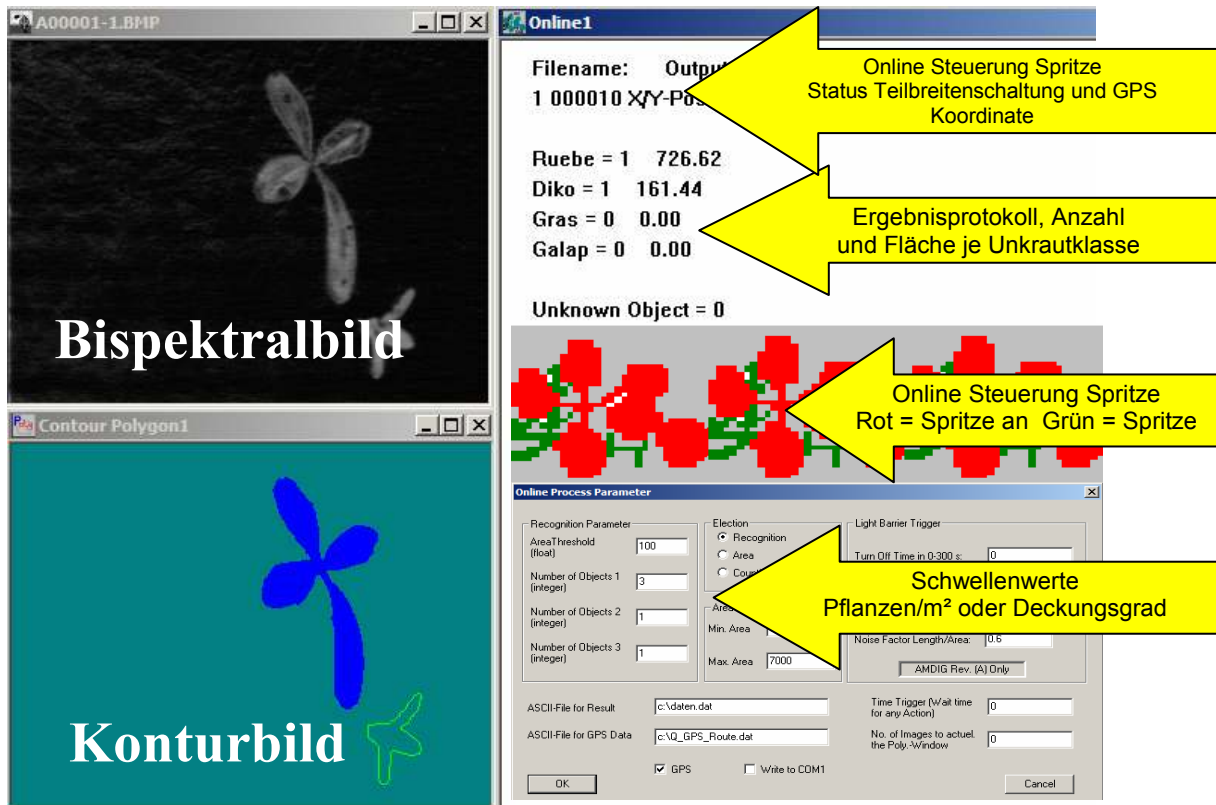
Nr. ha	Schlag Kultur Ort	Boniturtermin	Applikations- termin	Herbizidklassen, Mittel und Aufwandmengen (100 %)	
WG2 8,11	Wiesenbusch Wintergerste Berg	25-10-04 MB 3-3-05 EB	3-11-04	Dikotyle	Bifenal (2,5 l/ha)
				Gras	IPU (3 l/ha)
WR1 3,46	Eisenmustal Winterraps Berg	10-9-04 MB 15-9-04 KB 18-11-04 EB	17-9-04	Dikotyle+Gras	Butisan (2 l/ha)
				Hordeum	Targa (0,8 l/ha)
WR1 3,17	Roostal Winterraps Berg	10-9-04 MB 18-11-04 EB	17-9-04	Dikotyle+Gras	Butisan (2 l/ha)
				Hordeum	Targa (0,8 l/ha)
WG3 5,80	Schlag 9 Wintergerste	23-10-04	2-11-04	Dikotyle	Primus (0,1 l/ha), Fox (1l/ha)
				Gras	IPU (3 l/ha)
WW2 3,19	2 Bäumen Winterweizen Berg	17-3-05 MB 9-5-05 EB	23-3-05	Dikotyle	Artus (50 g/ha)
				Gras	IPU (2,5 l/ha)
				Galium	Primus (0,1l/ha)
WW3 2,46	Hasenacker Winterweizen Berg	17-3-05 MB 9-5-05 EB	23-3-05	Dikotyle	Artus (50 g/ha)
				Gras	IPU (2,5 l/ha)
				Galium	Primus (0,1l/ha)
WW4 2,79	Hürth Winterweizen Berg	17-3-05 MB 11-5-05 EB	23-3-05	Dikotyle	Artus (50 g/ha)
				Gras	IPU (2,5 l/ha)
				Galium	Primus (0,1l/ha)
WW5 1,22	Klotzacker Winterweizen Berg	17-3-05 MB 10-5-05 EB	23-3-05	Dikotyle	Artus (50 g/ha)
				Gras	IPU (2,5 l/ha)
				Galium	Primus (0, l/ha)
WW6 7,67	Heistern Winterweizen Berg	17-3-05 MB 8-5-05 EB	23-3-05	Dikotyle	Artus (50 g/ha)
				Gras	IPU (2,5 l/ha)
				Galium	Primus (0,1l/ha)
WW7 2,64	Märzental Winterweizen Berg	17-3-05 MB 10-5-05 EB	23-3-05	Dikotyle	Artus (50 g/ha)
				Gras	IPU (2,5 l/ha)
				Galium	Primus (0,1l/ha)
SG9 8,43	An der Barth Sommergerste Berg	15-4-05 MB 19-5-05 EB	21-4-05	Dikotyle	Starane (1,5 l/ha)
				Gras	Ralon (1 l/ha)
KE1 3,93	Drei Pützen Körnererbsen Berg	15-4-05 MB 18-5-05 EB	21-4-05	Dikotyle	Basagran (1,5 l/ha)
				Gras	Fusilade (0,8 l/ha)
KE2 2,37	Mommersloch Körnererbsen Berg	15-4-05 MB 20-5-05 EB	21-4-05	Dikotyle	Basagran (1,5 l/ha)
				Gras	Fusilade (0,8 l/ha)

Nr. ha	Schlag Kultur Ort	Boniturtermin	Applikations- termin	Herbizidklassen, Mittel und Aufwandmengen (100 %)	
SG10 2,40	Schlag 8 Sommergerste Dikopshof	21-4-05 MB 21-4-05 KB	22-4-05	Dikotyle	Artus (50 g/ha)
				Gras	Ralon (1 l/ha)
WR3 8,43	An der Barth Winterraps Berg	19-9-05 MB 20-9-05 MG 3-11-05 EB	23-9-05	Dikotyle	Butisan (2 l/ha)
				Hordeum	Targa (0,8 l/ha)
WR4 4,78	Äckerchen Winterraps Berg	21-9-05 MG 4-11-05 EB	23-9-05	Cirsium	Lontrel (1 l/ha)
WR5 8,11	Wiesenbusch Winterraps Berg	19-9-05 MB 20-9-05 MG 3-11-05 EB	23-9-05	Dikotyle	Butisan (2 l/ha)
				Hordeum	Targa (0,8 l/ha)
WG4 7,67	Heistern Wintergerste Berg	24-10-05 MB 25-10-05 MG 2-12-05 EB	26-10-05	Dikotyle	Malibu (3 l/ha)
				Gras	Areion (2,5 l/ha)
WG5 2,64	Märzentäl Wintergerste Berg	23-10-05 MB 25-10-05 MG 2-12-05 EB	26-10-05	Dikotyle	Malibu (3 l/ha)
				Gras	Areion (2,5 l/ha)
WG6 3,37	Bärskreuz Wintergerste Berg	23-10-05 MB 25-10-05 MG 2-12-05 EB	26-10-05	Dikotyle	Malibu (3 l/ha)
				Gras	Areion (2,5 l/ha)

Anhangstabelle 11.21 Leitunkräuter und Unkrautdichten vor und nach der Herbizidbehandlung auf den Versuchsschlägen 2004 und 2005

Nr. ha	Schlag Kultur Ort	Leitunkräuter 2004	Unkrautdichte (Pflanzen/m ²)		
			Unkraut-klasse	vorher	nachher
WG1 2,75	Schlag 4 Wintergerste Dikopshof	<i>Poa annua, Viola arvensis</i>	Dikotyle	19	1
			Gras	16	0,2
			Galium	1	0
WW1 5,80	Schlag 9 Winterweizen Dikopshof	<i>Alopecurus myosuroides, Apera spica-venti, Viola arvensis, Veronica hederifolia</i>	Dikotyle	12	2
			Gras	5	0,1
			Galium	0,1	0
SG1 1,25	Isemistal Sommergerste Berg	<i>Avena fatua, Poa annua, Brassica napus, Matricaria chamomilla, Thlaspi arvense, Fumaria officinalis</i>	Dikotyle	10	2
			Gras	3	0
			Raps	5	0
SG2 3,46	Eisenmustal Sommergerste Berg	<i>Avena fatua, Poa annua, Bromus ssp., Brassica napus Matricaria chamomilla, Fumaria officinalis</i>	Dikotyle	22	1
			Gras	14	1
			Raps	10	0
SG3 0,45	Roos 33 Sommergerste Berg	<i>Avena fatua, Poa annua, Brassica napus Matricaria chamomilla, Thlaspi arvense, Fumaria officinalis</i>	Dikotyle	24	1
			Gras	9	1
			Raps	10	0
SG4 3,17	Roostal Sommergerste Berg	<i>Avena fatua, Poa annua, Brassica napus, Thlaspi arvense, Fumaria officinalis</i>	Dikotyle	22	1
			Gras	5	1
			Raps	10	0
SG5 0,77	Barth 49 Sommergerste Berg	<i>Avena fatua, Poa annua, Brassica napus Matricaria chamomilla, Thlaspi arvense, Fumaria officinalis</i>	Dikotyle	11	2
			Gras	5	1
			Raps	5	0
SG6 4,64	Breidel 79+81 Sommergerste Berg	<i>Avena fatua, Poa annua, Matricaria chamomilla, Thlaspi arvense, Fumaria officinalis</i>	Dikotyle	28	1
			Gras	12	1
			Galium	1	0
SG7 3,32	Rosdahl Sommergerste Berg	<i>Avena fatua, Poa annua, Matricaria chamomilla, Thlaspi arvense, Fumaria officinalis</i>	Dikotyle	14	1
			Gras	10	0
			Raps	10	0
SG8 0,13	Breidel 80 Sommergerste Berg	<i>Avena fatua, Poa annua, Matricaria chamomilla, Thlaspi arvense, Fumaria officinalis</i>	Dikotyle	22	1
			Gras	12	0
			Galium	1	0
ZR1 5,30	Schlag 6 Zuckerrüben Dikopshof	<i>Chenopodium album, Hordeum vulgare, Galium aparine</i>	Dikotyle	6	0,2
			Gras	3	0,3
			Galium	1	0
KM2 2,20	Schlag GH Körnermais Dikopshof	<i>Echinochloa crus-galli, Chenopodium album</i>	Dikotyle	239	3
			Gras	8	1
			Hirse	143	47
KM1 2,40	Schlag 8 Körnermais Dikopshof	<i>Echinochloa crus-galli, Chenopodium album, Fumaria officinalis</i>	Dikotyle	37	1
			Hirsen	7	0

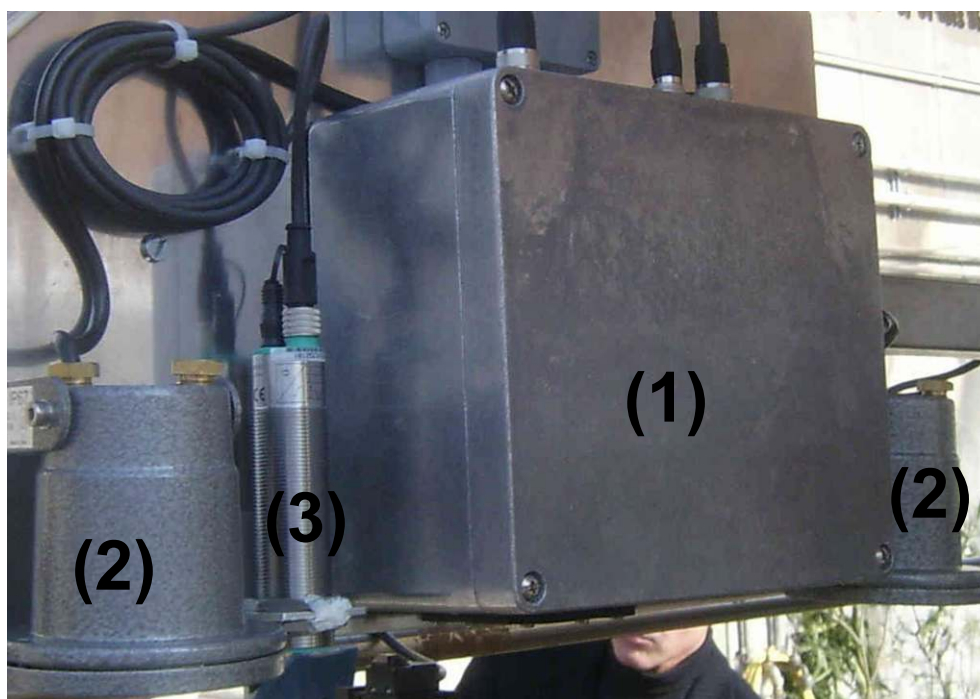
Nr. ha	Schlag Kultur Ort	Leitunkräuter 2005	Unkrautdichte (Pflanzen/m ²)		
			Unkraut-klasse	vorher	nachher
WG2 8,11	Wiesenbusch Wintergerste Berg	<i>Alopecurus myosuroides</i> , <i>Apera spica-venti</i> , <i>Matricaria camomilla</i> , <i>Veronica hederifolia</i> , <i>Viola arvensis</i>	Dikotyle	21	1
			Gras	16	0,4
WR1 3,46	Eisenmustal Winterraps Berg	<i>Alopecurus myosuroides</i> , <i>Hordeum vulgare</i> , <i>Matricaria camomilla</i> , <i>Veronica hederifolia</i>	Dikotyle	9	1
			Gras	3	0,5
			Hordeum	10	1
WR2 3,17	Roostal Winterraps Berg	<i>Alopecurus myosuroides</i> , <i>Hordeum vulgare</i> <i>Apera spica-venti</i> , <i>Matricaria camomilla</i> , <i>Veronica hederifolia</i>	Dikotyle	13	2,2
			Gras	3	0,4
			Hordeum	10	0
WG3 5,80	Schlag 9 Wintergerste	<i>Alopecurus myosuroides</i> , <i>Apera spica-venti</i> , <i>Matricaria camomilla</i> , <i>Veronica hederifolia</i>	Dikotyle	10	1,2
			Gras	6	0,2
			Galium	0,1	0
WW2 3,19	2 Bäumen Winterweizen Berg	<i>Alopecurus myosuroides</i> , <i>Stellaria media</i> , <i>Matricaria camomilla</i> , <i>Veronica hederifolia</i> , <i>Viola arvensis</i> <i>Galium aparine</i>	Dikotyle	5	1
			Gras	2	1
			Galium	0,1	0
WW3 2,46	Hasenacker Winterweizen Berg	<i>Alopecurus myosuroides</i> , <i>Matricaria camomilla</i> , <i>Veronica ssp</i> , <i>Viola arvensis</i> , <i>Geranium ssp</i> , <i>Capsella bursa-pastoris</i> , <i>Brassica napus</i> , <i>Stellaria media</i>	Dikotyle	35	1
			Gras	8	0
			Galium	3	0
WW4 2,79	Hürth Winterweizen Berg	<i>Alopecurus myosuroides</i> , <i>Galium aparine</i> <i>Matricaria camomilla</i> , <i>Veronica ssp</i> , <i>Stellaria media</i>	Dikotyle	23	1
			Gras	7	0,5
			Galium	1	0
WW5 1,22	Klotzacker Winterweizen Berg	<i>Alopecurus myosuroides</i> , <i>Matricaria camomilla</i> , <i>Veronica hederifolia</i> , <i>Viola arvensis</i> <i>Galium aparine</i> , <i>Brassica napus</i>	Dikotyle	32	1
			Gras	13	0,4
			Galium	10	0
WW6 7,67	Heistern Winterweizen	<i>Alopecurus myosuroides</i> , <i>Galium aparine</i> , <i>Matricaria camomilla</i> , <i>Veronica hederifolia</i> <i>Brassica napus</i>	Dikotyle	17	1,6
			Gras	5	0,4
			Galium	2	0
WW7 2,64	Märzental Winterweizen	<i>Galium aparine</i> , <i>Alopecurus myosuroides</i> , <i>Poa annua</i> , <i>Matricaria camomilla</i> , <i>Veronica hederifolia</i> , <i>Geranium ssp</i> . <i>Brassica napus</i>	Dikotyle	3	1
			Gras	11	3
			Galium	5	0
SG9 8,43	An der Barth Sommergerste	<i>Veronica hederifolia</i> <i>Brassica napus</i>	Dikotyle	16	1
			Gras	9	0,3
			Raps	10	0
KE1 3,93	Drei Pützen Erbsen	<i>Galium aparine</i> , <i>Alopecurus myosuroides</i> , <i>Poa annua</i> , <i>Matricaria camomilla</i> , <i>Veronica hederifolia</i> , <i>Geranium ssp</i> . <i>Brassica napus</i>	Dikotyle	16	0,5
			Gras	10	0,7
			Raps	11	0
KE2 2,37	Mommersloch Erbsen	<i>Alopecurus myosuroides</i> , <i>Galium aparine</i> , <i>Matricaria camomilla</i> , <i>Veronica hederifolia</i> <i>Brassica napus</i>	Dikotyle	10	0,4
			Gras	20	0,2
			Raps	10	0
SG10 2,40	Schlag 8 Sommergerste	<i>Galium aparine</i> , <i>Alopecurus myosuroides</i> , <i>Matricaria camomilla</i> , <i>Veronica hederifolia</i> , <i>Brassica napus</i>	Dikotyle	11	1
			Gras	24	1
			Galium	0,5	0



Anhangsabbildung 11.5 Softwareoberfläche IMPAS AGRI zur Evaluierung der Erkennungsstrategie



Anhangsabbildung 11.6 Kameraspur in Getreide (Schlag 8, Dikopshof)



Anhangsabbildung 11.7 Systemaufbau Bispektralkamera (1) mit künstlicher Lichtquelle (2) und Ultraschallsensor (3)

Curriculum Vitae

Name: Horst Oebel
geboren am: 16. Januar 1963 in Euskirchen
Familienstand: verheiratet, drei Kinder
Adresse: Brabanterstr.24; D-53919 Weilerswist-Lommersum
E-Mail: oebel4u@yahoo.de

Schulbildung:

1973 – 1982 Emil-Fischer-Gymnasium in Euskirchen
1969 – 1973 Grundschule in Lommersum

Berufsausbildung

Seit 11/2003 Dissertation zum Thema *Teilschlagspezifische Unkrautbekämpfung durch raumbezogene Bildverarbeitung im Offline- (und Online-) Verfahren (TURBO)* an der Universität Hohenheim.

Mitglied im DFG Graduiertenkolleg 722 (*Informationstechniken für den präzisen Pflanzenschutz*)

10/1984 - 5/1990 Studium der Agrarwissenschaft an der Rheinischen Friedrich-Wilhelms Universität in Bonn; Fachrichtung Pflanzenbau

Berufserfahrung:

Aktuelle Position Wissenschaftlicher Mitarbeiter am Institut für Phytomedizin, Fachgebiet Herbologie, Universität Hohenheim
❖ Betreuung des BMVEL geförderten Projektes *Teilschlagspezifische Unkrautbekämpfung durch raumbezogene Bildverarbeitung im Offline (und Online)- Verfahren (TURBO)*

2003 - 2004 Wissenschaftlicher Mitarbeiter am Institut für Pflanzenbau, Rheinische Friedrich-Wilhelms Universität in Bonn

1997 – 2002 Berater im Projekt *Autopromotion Pastorale dans le Ferlo* in Saint Louis/Senegal für die deutsche Gesellschaft für technische Zusammenarbeit (GTZ)

1993 – 1997 Berater der Abteilung Landnutzungsplanung/Dorfentwicklung im Projekt *Promotion de l'Élevage dans l'Atacora* in Natitingou/Benin für die deutsche Gesellschaft für technische Zusammenarbeit (GTZ)

1990 - 1993 Berater im Projekt *Ländliche Entwicklung Bougouriba/GTZ* in Diebougou/Burkina Faso für den deutschen Entwicklungsdienst (DED)

*Entweder gibt es einen Weg. - Oder wir werden ihn finden.
Hannibal, 217 v. Chr.*

Danksagung

Herrn Prof. Dr. Roland Gerhards danke ich ganz herzlich für das in mich gesetzte Vertrauen. Seine persönliche Betreuung bei dieser Arbeit und sein Engagement bei der Praxis-einführung des TURBO Verfahrens waren mir eine große Hilfe.

Bei Herrn Prof. Dr.-Ing. Stefan Böttinger und Herrn Prof. Dr. Wilhelm Claupein bedanke ich mich für die Übernahme der Korreferate.

Mein ganz besonderer Dank gilt Herrn Gerd Beckers von der Lehr- und Forschungsanstalt Dikopshof der Universität Bonn und Herrn Manfred Hurtz, Betriebsleiter aus Nideggen-Berg. Ohne ihre Einsatzbereitschaft und Innovationsfreude wären die ersten Ergebnisse zur Praxiseinführung des TURBO Verfahrens nicht möglich gewesen.

Herrn Prof. Dr. Walter Kühbauch sowie Frau Anne Reinders, Frau Hiltrud Bartels, Herrn Reiner Lock und Herrn Dr. Dominik Dicke vom Institut für Pflanzenbau der Universität Bonn danke ich für Ihre Unterstützung in der Vorbereitung dieser Arbeit.

Mein Dank für Ihre Zusammenarbeit und Ihr Engagement bei der Umsetzung des Projektes *Teilschlagspezifische Unkrautbekämpfung durch raumbezogene Bildverarbeitung im Offline- (und Online-) Verfahren (TURBO*)* gilt auch:

Torsten Drey (Universität Bonn, Geographisches Institut)
Dr. Hubert Hüging und den Kollegen vom Dikopshof
Peer Leithold (AgriCon, Precision Farming Company)
Dr. Adnan Nabout (Universität Wuppertal, Institut für Elektrotechnik und Informationstechnik)
Norbert Paulus, Martien Beijjaard, Christian Sill (KvernelandGroup/RAU)
Dr. Markus Sökefeld (AgriScience)
Dr.-Ing. Rolf-Dieter Therburg, Nils Roelf Carsjens (Ingenieurbüro THECON)
Janis Repsons (Universität Jelgawa, Lettland)
Peter Risser und Markus Pflugfelder, Universität Hohenheim
Dr. Ludwig Weiershäuser, Dr. Martin Kunisch, Dr. Florian Klöpfer (Kuratorium für Technik und Bauwesen in der Landwirtschaft)
Hubert Weiser (Wasserleitungszweckverband Neffetalgemeinden)
allen Kollegen und Kolleginnen des DFG Graduiertenkollegs *722 Informationstechniken für den präzisen Pflanzenschutz*

* Das Projekt *Teilschlagspezifische Unkrautbekämpfung durch raumbezogene Bildverarbeitung im Offline- (und Online-) Verfahren (TURBO)* wird vom Bundesministerium für Verbraucherschutz, Ernährung und Landwirtschaft (BMVEL) gefördert.

Erklärung

Hiermit versichere ich, Horst Oebel, geboren am 16. Januar 1963 in Euskirchen, dass ich die vorliegende Dissertation selbständig verfasst und die von mir genutzten Quellen und Hilfsmittel als solche in der Arbeit angegeben habe.

Diese Arbeit wurde in gleicher oder ähnlicher Form noch keiner Prüfungsbehörde vorgelegt.

Hohenheim, den 6.3.2006

Horst Oebel