

# Messsystem zur Bewertung des Unkrautvorkommens

Measuring system for the  
assessment of weeds

Gefördert durch:



Bundesministerium  
für Bildung  
und Forschung

Mit Unterstützung von:



Projektträger des BMBF und BMV  
Forschungszentrum Jülich Gm

---

Bornimer Agrartechnische Berichte

Heft 44

Potsdam-Bornim 2005

**Herausgeber:**

Leibniz-Institut für Agrartechnik Potsdam-Bornim e.V. (ATB)  
Max-Eyth-Allee 100  
14469 Potsdam

☎ 0331 5699-0  
Fax 0331 5699-849  
E-Mail atb@atb-potsdam.de  
Internet www.atb-potsdam.de

**Bearbeiter des ATB:**

Dr. G. Wartenberg (Projektleitung bis 12/2002)  
Dr. H.-R. Langner (Projektleitung ab 12/2002)  
Dipl.-Ing. H. Böttger  
Dipl.-Ing. H. Schmidt

Die Bearbeitung erfolgte im Rahmen des Förderprogramms "Forschung für die Umwelt" zum Thema

**Agrartechnik - Integrierter Umweltschutz in der Landwirtschaft**

„Verbesserung der Umweltverträglichkeit landwirtschaftlicher Produktionsverfahren durch Entwicklung innovativer Sensorik und Gestaltung der Produktionsprozesse im Sinne eines integrierten Umweltschutzes“

**Projektpartner:****Fachhochschule Osnabrück**

Prof. Dr. A. Ruckelshausen (Projektleitung)  
Dipl.-Ing.(FH) S. In der Stroth (Projektingenieur BMBF-Projekt)  
Dipl.-Ing. (FH) A. Linz (Labor für Mikro- und Optoelektronik)  
Dipl.-Ing. (FH) B. Ramler (Forschungsschwerpunkt Intelligente Sensorsysteme)

**Firma SYMACON Bildverarbeitung GmbH Magdeburg**

Dr. U. Urbansky (Projektleitung)  
Dipl.-Ing. L. Schulze  
Dipl.-Ing. D. Heppner

**Firma Müller-Elektronik GmbH & Co. Salzkotten**

Dipl.-Ing. R. Buschmeier (Projektleitung)  
Dipl.-Ing. Th. Wischke  
Dipl.-Ing. D. Heinze

**Typographische Gestaltung:**

Dipl.-Ing. (FH) Katrin Witzke

Oktober 2005

Herausgegeben vom Leibniz-Institut für Agrartechnik Potsdam-Bornim e.V. (ATB) mit Förderung des Bundesministeriums für Bildung und Forschung (BMBF) und Unterstützung des Projektträgers des BMBF Forschungszentrum Jülich GmbH (PTJ).  
BMBF-FKZ: 0339992 Teilprojekt 02 (5444)

Für den Inhalt der Beiträge sind die Autoren verantwortlich.

Eine Weiterveröffentlichung von Teilen ist unter Quellenangabe und mit Zustimmung des Leibniz-Instituts für Agrartechnik Potsdam-Bornim e.V. möglich.

ISSN 0947-7314

© Leibniz-Institut für Agrartechnik Potsdam-Bornim e.V., Potsdam-Bornim 2005

## Inhaltsverzeichnis

<b>1</b>	<b>Einleitung .....</b>	<b>5</b>
1.1	Zielstellung.....	5
1.2	Zusammenarbeit mit Kooperationspartnern.....	5
<b>2</b>	<b>Voruntersuchungen.....</b>	<b>6</b>
2.1	Untersuchungen am Unkrautbestand .....	6
2.1.1	Auswirkungen der Verunkrautung.....	6
2.1.2	Pflanzenerkennung durch spektrale Merkmale.....	8
2.2	Lösungsansätze und Sensortechnik des ATB .....	10
2.2.1	Messsystem mit Diodensensor .....	10
2.2.2	Messsystem mit Lasersensor .....	12
2.3	Lösungsansätze der FH Osnabrück .....	15
2.3.1	Photodiodensysteme .....	15
2.3.2	Zwei-Kamera-System .....	16
2.4	Maschinen- und Elektroniksystem .....	17
2.4.1	Sensor- und Applikationstechnik für den Echtzeitbetrieb.....	17
2.4.2	Anpassung der Feldspritze .....	18
2.4.3	Übertragbarkeit von Sensorwerten .....	22
<b>3</b>	<b>Entwicklung der Messsysteme.....</b>	<b>24</b>
3.1	Entwicklung der ImSpector-Systeme .....	24
3.1.1	Spektrometer ImSpector mit CMOS-Kamera.....	25
3.1.2	Untersuchungen an den ImSpector-Systemen .....	25
3.2	Entwicklung des Systems mit Multispektralkamera .....	27
3.2.1	Allgemeine technische Angaben.....	27
3.2.2	Konfiguration der Farbkanäle.....	29
3.2.3	Hardwarekonfiguration zur Versuchsdurchführung.....	30
3.3	Darstellung der Software zum Messsystem Multispektralkamera.....	31
3.3.1	Vorgaben zur Anpassung der Software .....	31
3.3.1.1	Allgemeine Hinweise.....	31
3.3.1.2	Modus „Kalibrierung des Wegsignals“ .....	32
3.3.1.3	Modus „Messung“ .....	33
3.3.1.4	Modus „Kalibrierung Unkraut“ .....	34
3.3.1.5	Klassierung und Bereichseinteilung.....	35
3.3.2	Überblick zur Softwarelösung .....	35
3.3.2.1	Programmaufbau .....	35
3.3.2.2	Verschaltung der Komponenten .....	36
3.3.3	Benutzeroberfläche.....	37
3.4	Weiterentwicklung des Lasersensors .....	40
<b>4</b>	<b>Versuchsdurchführung und Ergebnisse .....</b>	<b>43</b>

---

4.1	Aufbau der Versuche .....	43
4.1.1	Labora Aufbau zum ImSpector -System.....	43
4.1.2	Labora Aufbau zur Multispektralkamera .....	44
4.1.3	Vorrichtungen für den Feldeinsatz .....	46
4.1.3.1	Schutzgehäuse .....	46
4.1.3.2	Schwingungsschutz .....	47
4.1.4	Beleuchtung, Triggerung.....	49
4.2	Ergebnisse der Laboruntersuchungen .....	51
4.3	Ergebnisse der Felduntersuchungen .....	57
4.4	Ergebnisse in der Spektralauswertung.....	62
4.4.1	Auswahl der Entscheidungskriterien .....	62
4.4.2	Durchführung und Auswertung der Untersuchung .....	63
<b>5</b>	<b>Zusammenfassung und Ausblick .....</b>	<b>66</b>
5.1	Erweiterung der Anwendungsmöglichkeiten .....	66
5.1.1	Randerkennung .....	66
5.1.2	Bedeckungsgrad .....	66
5.1.3	Erkennung von Pilzkrankheiten.....	68
5.2	Möglichkeiten der Kostenreduzierung und Ausblick.....	69
5.2.1	Ökonomische Betrachtungen.....	69
5.2.2	Kosten der Sensortechnik .....	70
5.3	Einschätzungen und Ausblick .....	72
	Abstract.....	72
<b>6</b>	<b>Literaturverzeichnis .....</b>	<b>76</b>
	Bilderverzeichnis .....	79
	Tabellenverzeichnis .....	81
	Bornimer Agrartechnische Berichte.....	82
	Anlage A: Veröffentlichung von Projektergebnissen .....	85
	Anlage B: Beleuchtungstechnik .....	87
	Anlage C: ImSpector-System: Übersicht.....	96
	Anlage D: Charakterisierung des ImSpector/Fuga1000-Systems .....	115
	Anlage E: Mikrocontroller-Technik .....	137
	Anlage F: Video- und Messdaten-Synchronisierung .....	155

## 1 Einleitung

### 1.1 Zielstellung

Über mehrere Jahre wurden am ATB umfangreiche Untersuchungen zu verschiedenen Verfahren der Unkrautregulierung, zu den Anforderungen an die Applikationstechnik sowie zum teilflächenspezifischen Spritzen von Herbiziden durchgeführt. Aus den Ergebnissen dieser Voruntersuchungen und deren Zusammenhängen ergab sich die Aufgabenstellung des Projekts „Messsystem zur Bewertung des Unkrautvorkommens“. Die Hauptzielstellung des Projekts bestand darin, ein einfaches Schätzverfahren zur Bewertung des Unkrautvorkommens abzuleiten, das eine praxisorientierte Anwendung des teilflächenspezifischen Spritzens in enggestellten Reihenkulturen ermöglicht.

Durch eine teilflächenspezifische Unkrautregulierung nach ökonomischen Schwellenwerten können wesentliche Herbizideinsparungen erzielt werden. Teilflächenspezifisches Spritzen erfordert jedoch die verteilungskonforme Aufnahme der Verunkrautung. Da die räumliche Verteilung der Unkräuter und ihre Schadenswirkung in landwirtschaftlichen Kulturen standortabhängig und kleinflächig strukturiert ist, sind eng gerasterte, artenspezifische Bonituren notwendig. Nach dem Stand der Technik ließen sich diese artenspezifischen Erhebungen zum Zeitpunkt des Projektbeginns nur mit hohem Aufwand in absätzigen Verfahren durch visuelle Bonituren ermitteln. Die technischen Voraussetzungen für eine automatische Erkennung und Bewertung des Unkrautvorkommens waren zu Projektbeginn nicht gegeben. Daher konnte die Zielstellung der Entwicklungsarbeiten nicht auf ein verfügbares optoelektronisches Messsystem zur Bewertung des Unkrautbestands zurückgreifen. Im Projekt wurden mehrere Messsysteme entwickelt und getestet, die für ein landtechnisches Projekt geeignet erschienen. Aus wirtschaftlichen Gründen konzentrierten sich die Arbeiten auf Lösungen, die eine gesteuerte Herbizidapplikation in Echtzeit unterstützen. Eine weitere Forderung der Landtechniker an ein Messsystem zur Bewertung des Unkrautvorkommens bestand darin, bereits kurz nach Aussaat die jungen Unkrautkeimlinge unter realen Feldbedingungen sicher zu detektieren.

Im Abschnitt 3 werden die Entwicklungsarbeiten des Projekts dargelegt, im Abschnitt 4 folgt die Beschreibung der durchgeführten Versuche im Labor sowie im Freiland. Der Abschnitt 4.2 stellt die erreichten Ergebnisse vor und das Kapitel 5 fasst die Ergebnisse zusammen und gibt einen applikationsorientierten Ausblick. Die umfangreichen Vorarbeiten zum Projekt werden vorab im Abschnitt 2 erläutert.

### 1.2 Zusammenarbeit mit Kooperationspartnern

Die Entwicklung der Messsysteme erforderte die Bearbeitung einer Reihe interdisziplinär verknüpfter Aufgabenstellungen. Besonders unter dem Gesichtspunkt der kurzen Bearbeitungszeit von 2 Jahren war es notwendig, eine hohe Effektivität durch das problemorientierte Zusammenarbeiten mit spezialisierten Partnern zu erreichen.

Folgende Einrichtungen bzw. Firmen wurden als Kooperationspartner gewonnen:

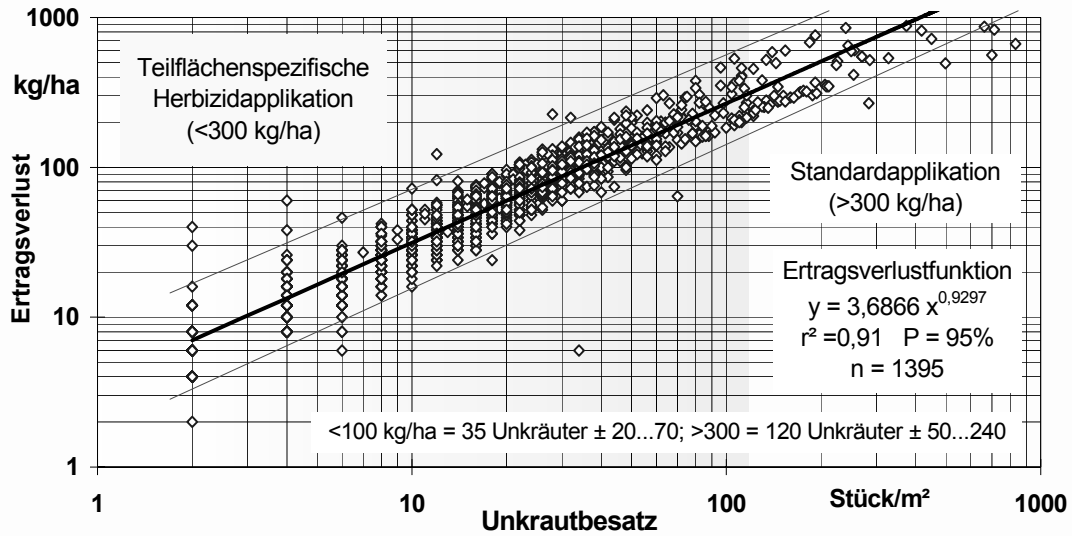
- Die Fachhochschule Osnabrück, Fakultät Ingenieurwissenschaften und Informatik, beschäftigt sich bereits seit 1997 mit Arbeiten zur sensorischen Erfassung von Pflanzenmerkmalen. Dabei standen Anwendungen im low-cost-Bereich im Vordergrund. Durch Vorarbeiten zur Pflanzenerkennung mit Spektralbereichs-sensoren lagen Erfahrungen vor, die direkt zur Entwicklung einer vorgesehenen Lösungsvariante im Vorhaben herangezogen werden konnten.
- Die Firma SYMACON Bildverarbeitung GmbH Magdeburg arbeitet seit 1986 an der Entwicklung und Realisierung innovativer Einzelkomponenten zur optischen Qualitätssicherung und -kontrolle sowie an Lösungen zur Prozesssteuerung. Die Firma SYMACON hat insbesondere Erfahrungen zu Konzipierung und Aufbau von Kameras, Beleuchtung und Informationsverarbeitung in das Projekt eingebracht.
- Das Unternehmen Müller-Elektronik in Salzkotten entwickelt, fertigt und vertreibt Systemlösungen zur Steuerung von Applikationstechnik für die Landwirtschaft. In den zurückliegenden Jahren wurden in mehreren Projekten zur teilflächenspezifischen Steuerung von Landmaschinen wesentliche Erfahrungen gesammelt. Durch die Firma Müller-Elektronik wurden die projektspezifischen Anforderungen der sensorgesteuerten Herbizidapplikation in Software für die Jobrechner umgesetzt.

## **2 Voruntersuchungen**

### **2.1 Untersuchungen am Unkrautbestand**

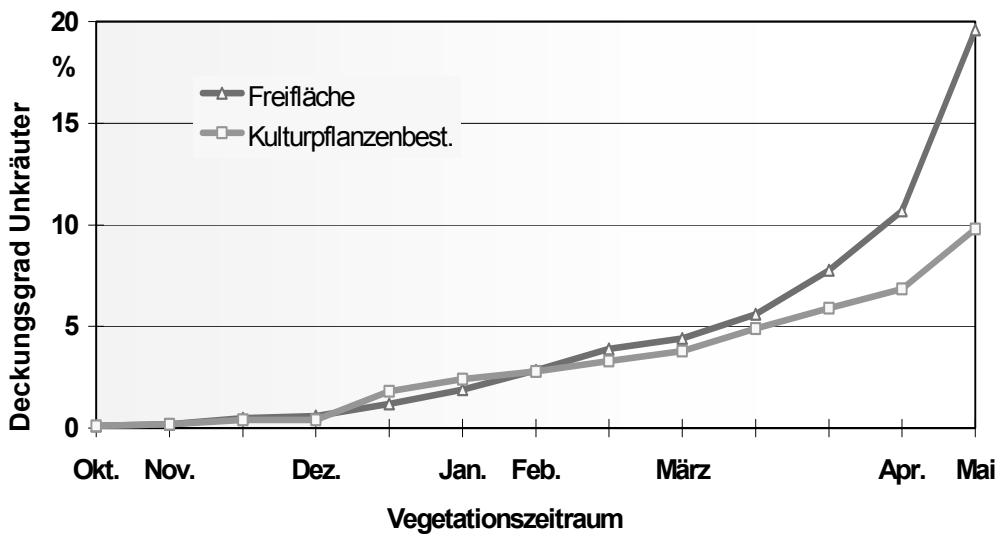
#### **2.1.1 Auswirkungen der Verunkrautung**

Mehrjährige Untersuchungen zur räumlichen und zeitlichen Dynamik von Unkrautgesellschaften belegen, dass sich unter den gegenwärtigen Produktionsbedingungen feldspezifische Unkrautgesellschaften im Durchschnitt nur aus wenigen Leitunkräutern zusammensetzen (WARTENBERG & DAMMER 2001). Damit bestehen auch Voraussetzungen, einfache Entscheidungsmodelle für das Setzen von Schadensschwellen anzuwenden. So ergaben Auswertungen, die in Anlehnung an Arbeiten zur Schadensschwellendynamik mit Datenbeständen des ATB Bornim aus mehrjährigen Feldbonituren vorgenommen wurden, dass zwischen der Unkrauthäufigkeit und der Summe des artenspezifisch berechneten Ertragsverlustes eine quasilineare Korrelationsfunktion besteht. Trotz erheblicher Unterschiede in der Artenzusammensetzung ist durch das dominante Auftreten weniger Unkrautarten in den einzelnen Bonituren ein gut gesicherter Zusammenhang zwischen der Unkrauthäufigkeit und dem Ertragsverlust zu erkennen (**Bild 1**).



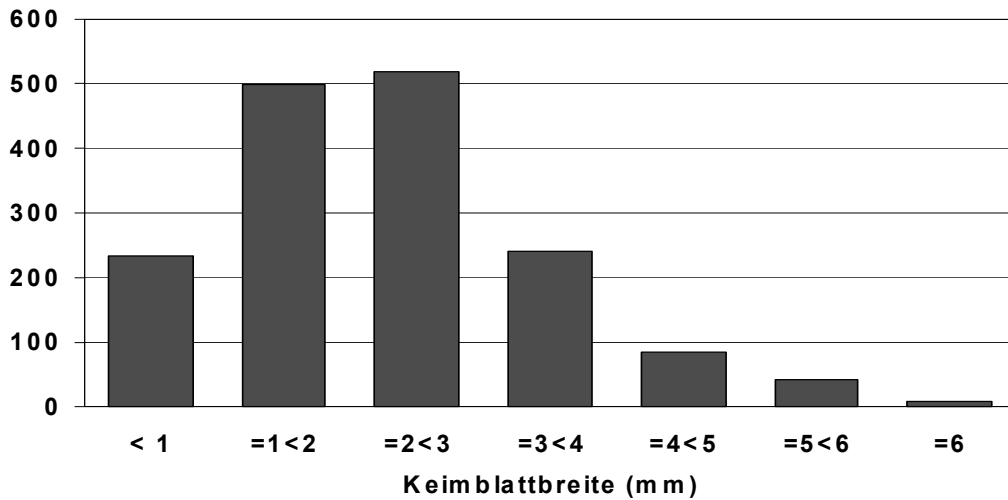
**Bild 1:** Ertragsverlustfunktion mit 95% Konfidenzintervall von Unkrautbonituren in Winterweizen (WARTENBERG & DAMMER 2002)

Herbologische Untersuchungen zeigen, dass zum Spritztermin im Frühjahr sowohl kulturpflanzenfreie als auch bewachsene Flächen vergleichbare Unkrautbedeckung erreichen (**Bild 2**).



**Bild 2:** Entwicklung des Unkrautdeckungsgrades auf Freiflächen und im Getreidebestand nach PETRY (1989)

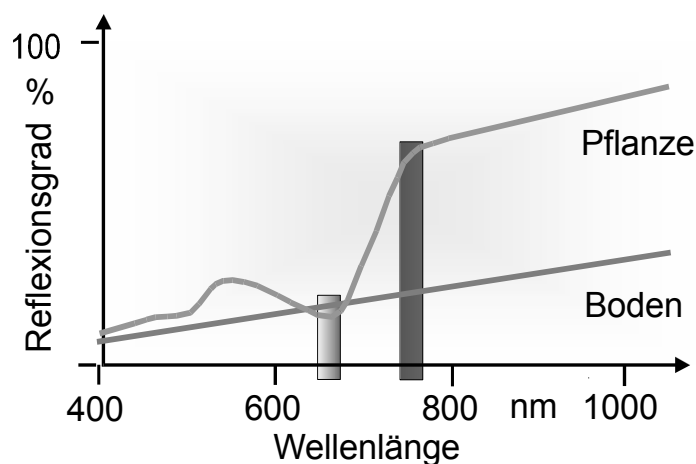
Auflaufende Unkrautpflanzen weisen in Abhängigkeit von der Art und den botanischen Merkmalen eine deutliche Variation der sichtbaren Blattfläche auf. Die zum optimalen Behandlungszeitpunkt zu detektierende Oberfläche von Schadgräsern (Monokotyle) beginnt infolge des aufrecht stehenden Keimblatts bei einer Blattbreite von ca. 1 mm, zweikeimblättrige Unkräuter (Dikotyle) erreichen im Durchschnitt eine Blattbreite von ca. 1 bis 4 mm (**Bild 3**).



**Bild 3:** Häufigkeitsverteilung des Unkrautaufkommen und Größenklassifizierung der Unkräuter zur Herbstapplikation (Winterroggen, 09.11.2000)

### 2.1.2 Pflanzenerkennung durch spektrale Merkmale

Optoelektronische Sensoren - wie auch Kameras - registrieren die Lichtreflexion der im Blickfeld liegenden Oberflächen oder Objekte. Das entwickelte Messverfahren nutzt zur Unterscheidung intakter Pflanzenoberflächen vom Boden oder den abgestorbenen Pflanzenresten die Intensitätsunterschiede bestimmter Spektralanteile der remittierten Strahlung. Die pflanzentypische Spektralverteilung ist durch ein ausgeprägtes Minimum im Wellenlängenbereich von ca. 650 nm und eine maximale Flanke ab ca. 750 nm gekennzeichnet (**Bild 4**). Durch Verrechnung der beiden Strahlungsanteile lässt sich eine Trennung zwischen Bodenoberfläche und grünen Pflanzen erreichen.



**Bild 4:** Reflexionsverhalten von Pflanze und Boden (BILLER & SCHICKE 2000)

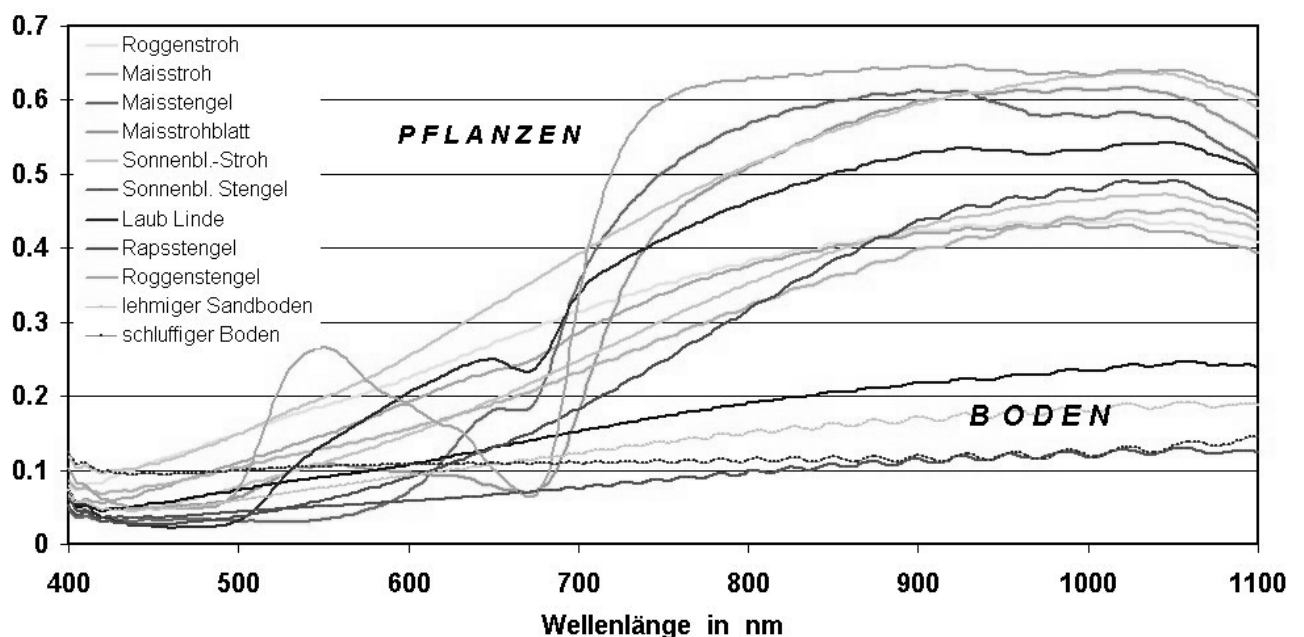
Das angewandte Detektionsprinzip ermöglicht das Zählen der Unkräuter im Keimblattstadium bzw. bei vorangeschrittener Entwicklung der Pflanzen die Erfassung des De-



ckungsgrads. Das entwickelte Verfahren lässt sich wie folgt charakterisieren (WARTENBERG & DAMMER 2002):

- Unkrauterfassung in kulturpflanzenfreien Bereichen des Feldes (Fahrgassen),
- Signalinterpretation nach dem Modellansatz: Ertragsverlust = f (Unkrauthäufigkeit),
- Annahme gleicher Unkrautverteilung und gleichen Ertragsverlustes innerhalb der Spritzenarbeitsbreite,
- schadensschwellenbezogene Applikation der Herbizide nach den langwelligen Veränderungen des Ertragsverlustes und der geschätzten Konkurrenzkraft der Kulturpflanzen,
- Reduktion der Herbizidmenge bis zu 50 % bezogen auf die üblichen Aufwände,
- Applikation in Echtzeit.

Die Messverfahren nutzen zur Unterscheidung zwischen Pflanze und Boden die Intensitätsunterschiede in den Spektralanteilen der remittierten Strahlung (**Bild 5**).



**Bild 5:** Reflexionsspektren von Pflanzen und Boden (BÖTTGER & LANGNER 2003)

Die pflanzentypische Spektralverteilung ist durch ein ausgeprägtes Minimum im Wellenlängenbereich von ca. 650 nm und eine maximale Flanke ab ca. 750 nm gekennzeichnet, dagegen weist der Boden in diesem Bereich einen stetigen, flach ansteigenden Verlauf auf. Durch Verrechnung der beiden Strahlungsanteile lässt sich eine relativ sichere Trennung zwischen der Bodenoberfläche und den grünen Pflanzen erreichen, wie im Abschnitt 4.4 ausführlich dargelegt wird.

## 2.2 Lösungsansätze und Sensortechnik des ATB

### 2.2.1 Messsystem mit Diodensensor

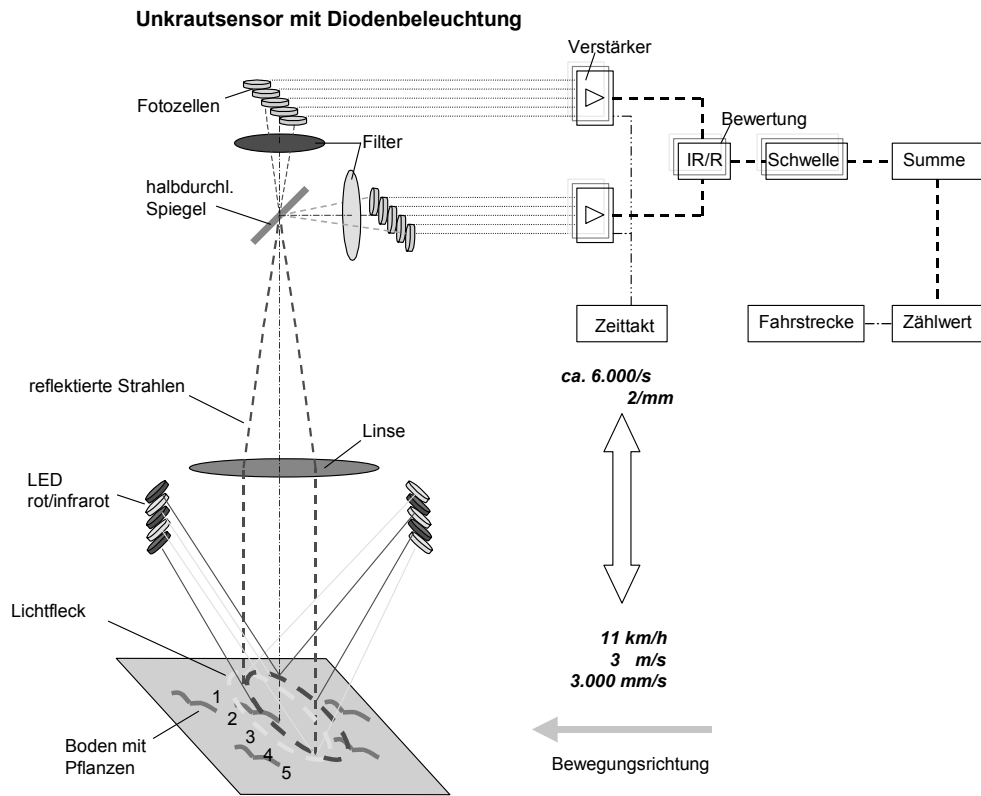
Im ATB wurde ein Sensor als Prinzipmuster entwickelt, mit dem die Unkrautererkennung in der Regelspur möglich war und mit dessen Einsatz das Verfahren der Herbizidapplikation in Echtzeit praktisch angewendet und erprobt werden konnte. **Bild 6** zeigt diesen Sensor mit der entsprechenden Führungseinrichtung am Traktor angebaut.



**Bild 6:** Prinzipmuster Diodensensor im Feldeinsatz

Die Funktion des Sensors ist nur gewährleistet, wenn der Abstand zum Boden genau eingehalten wird. Dies wird mit Hilfe des im Bild sichtbaren Führungsrades und einer Dreipunktaufhängung am Traktor erreicht. Der Sensor ist auf einfache Weise mittels Luftschläuchen schwingungsgedämpft.

Die durch Boden und Pflanzen reflektierte Strahlung wird durch eine Linse gebündelt und gelangt durch einen Strahlteiler (halbdurchlässiger Spiegel) ortsproportional auf die beiden Sensorzeilen (Fotodiodenarrays). Jede Sensorzeile bildet einen Farbkanal und wertet 8 Bildpunkte aus. Die Farbkanäle sind definiert durch die vorgeschalteten Filter der Spektralbereiche Rot und Infrarot (**Bild 7**). Für Laboruntersuchungen erwies es sich nicht als notwendig, den Detektionsbereich zusätzlich zu beleuchten. Für den Feldeinsatz wurde die Diodenbeleuchtung (rote und infrarote LEDs) durch ein Halogenlicht mit 4 x 50 W Kaltlicht-Spiegellampe ersetzt (**Bild 8**).



**Bild 7:** Schema des Diodensensors



**Bild 8:** Halogenlampen zur Ausleuchtung der Detektionsfläche

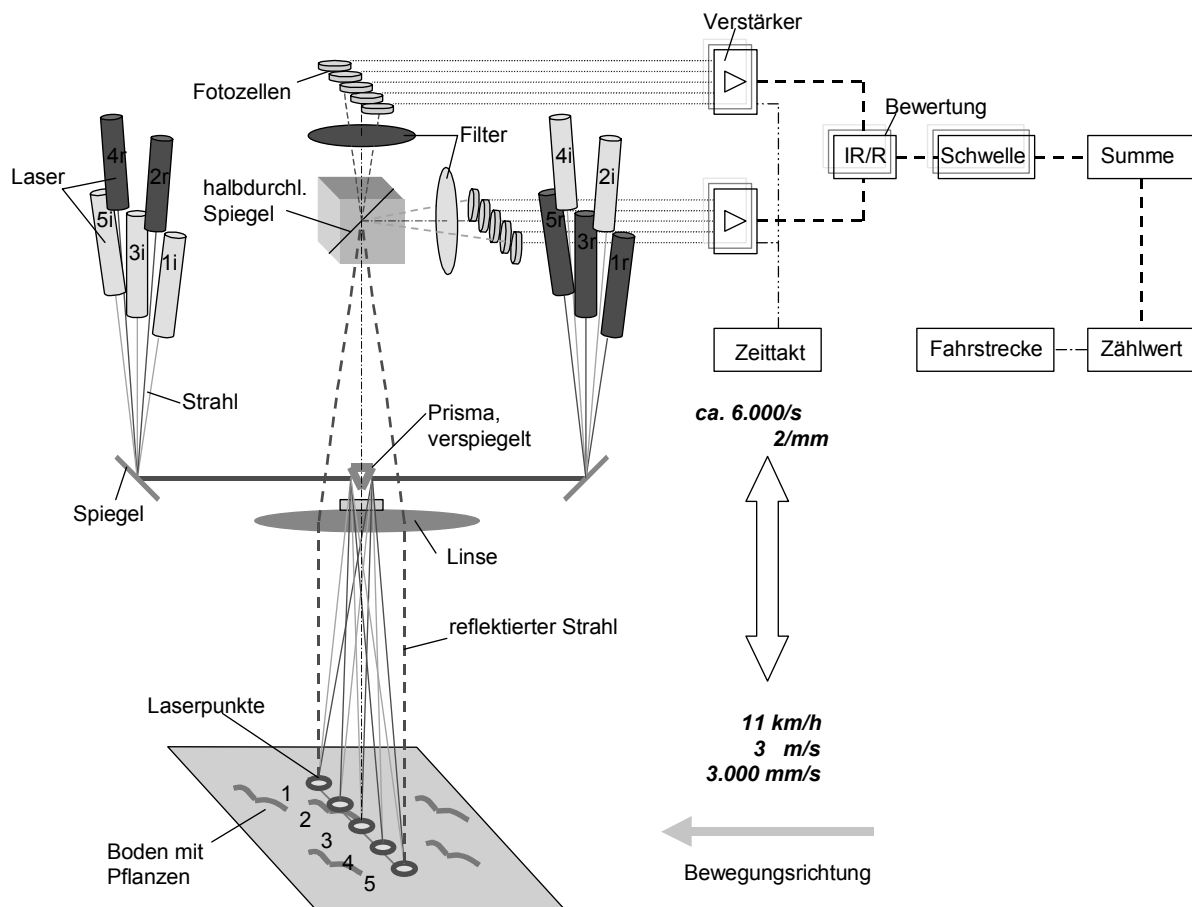
Messfehler können entstehen:

- durch Helligkeitsunterschiede des Umgebungslichtes (Wolkenbildung, Sonnenstand),
- durch Unterschiede in der Bodenfarbe (Sand bis Moor),
- durch Strukturänderungen der Boden- und Pflanzenoberflächen,
- durch unterschiedliche Stellungen der Pflanzenblätter zur Reflexionsachse,
- sowie bei Vorhandensein abgestorbener Pflanzenteile (Stroh).

Das Prinzipmuster des Diodensensors wurde in einem vorangegangenen Projekt zur Unkrauterkennerung für die teilflächenspezifische Herbizidapplikation auf mehreren hundert Hektar im Echtzeitverfahren erprobt. Die hierbei gesammelten Erfahrungen und Erkenntnisse waren eine Voraussetzung zur Weiterentwicklung der Messsysteme und zur Verbesserung der Erkennungssicherheit (BÖTTGER & LANGNER 2003).

### 2.2.2 Messsystem mit Lasersensor

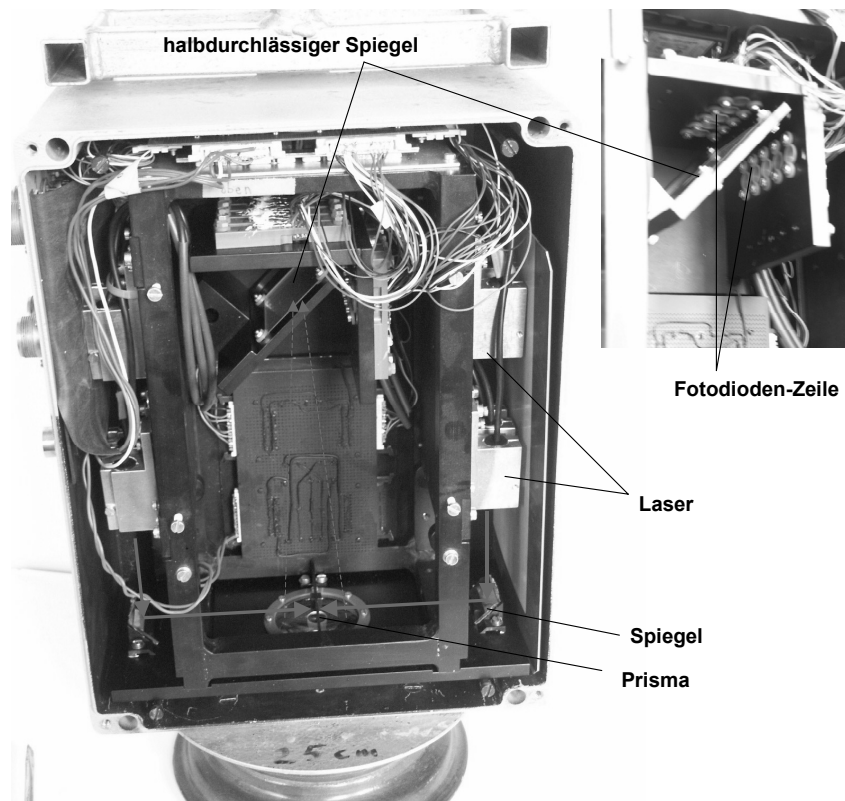
Eine Weiterentwicklung des Diodensensors in bezug auf einen größeren Detektions- und Schärfentiefebereich sowie höhere Erkennungssicherheit war das Prinzipmuster mit Laserbeleuchtung. Das Prinzip dieses Sensors ist im **Bild 9** dargestellt.



**Bild 9:** Schema des Prinzipmusters Lasersensor

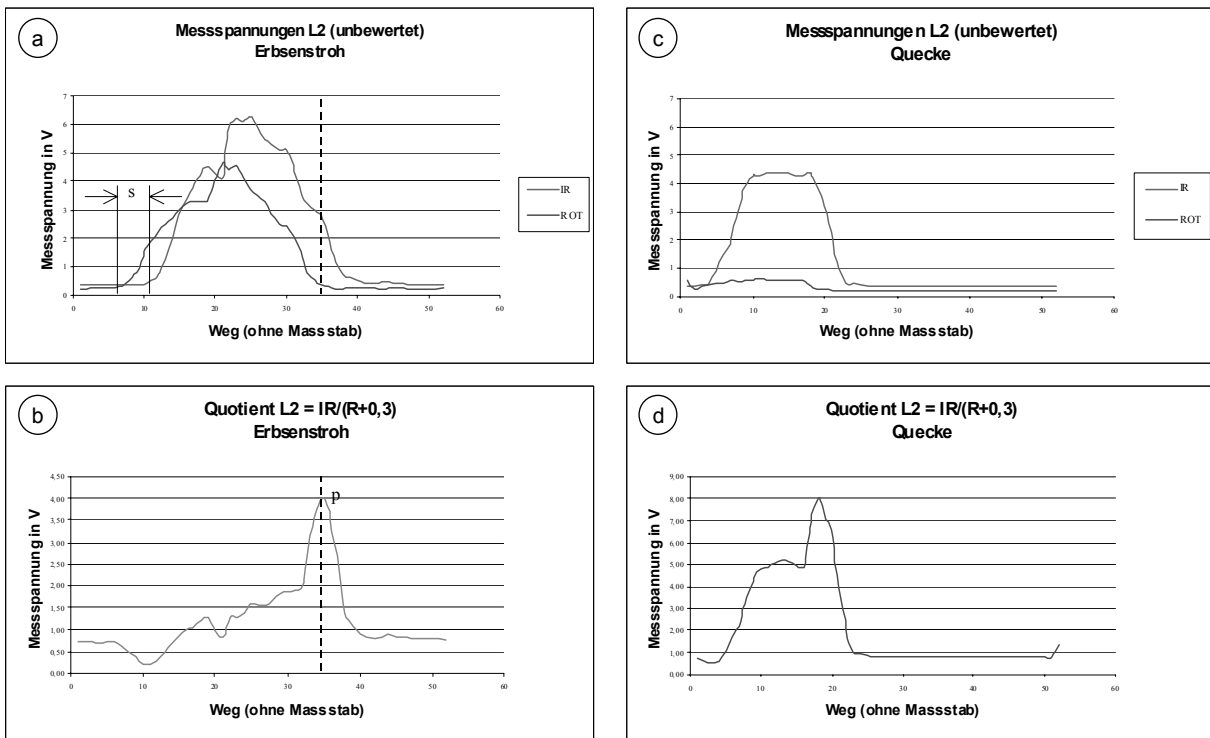
Die Funktion beruht darauf, dass Laserlicht hoher Leuchtdichte zur punktförmigen Beleuchtung des Detektionsbereiches zu verwenden und das reflektierte Licht analog zum Diodensensor spektral zu empfangen und auszuwerten. Jeder der 8 Punkte wird von einem roten und einem infraroten Laserpaar erzeugt (670 und 780 nm). Das Laserlicht wird dabei so in die optische Achse des Sensors eingespiegelt, dass es aus der Hauptebene der Sammellinse zu kommen scheint. Der Vorteil besteht darin, dass eine ortsfeste Projektion der Punkte genau auf den zugeordneten Fotozellen erfolgen kann. Damit wird ein großer Schärfentiefebereich erzielt. **Bild 10** zeigt einen Blick in das geöffnete Gehäuse des Lasersensors. Der Strahlengang im Gehäuse ist angedeutet.

Mit dem Lasersensor wurden in früheren Felduntersuchungen sehr gute Ergebnisse erzielt (siehe **Abschnitt 3.4**). Die Erkennung auch kleiner Pflanzen war bei hohen Fahrgeschwindigkeiten möglich. Allerdings stellte sich als Nachteil heraus, dass dieser Sensor teilweise Stroh als Pflanzenbedeckung detektierte.



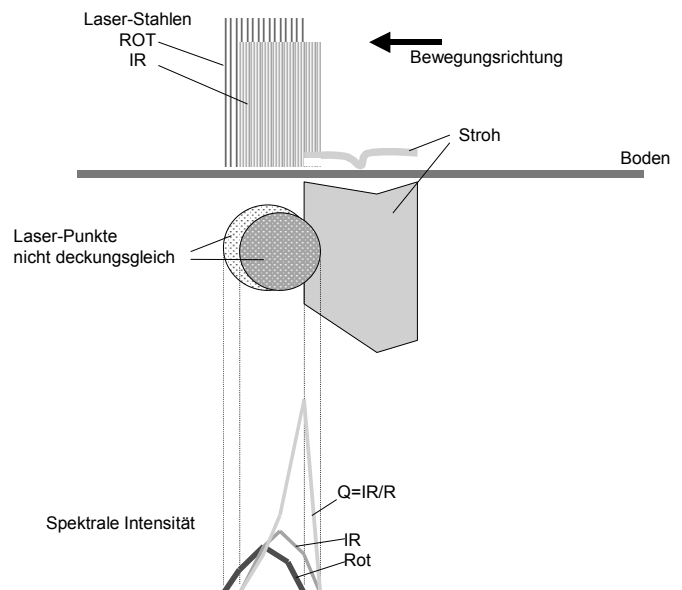
**Bild 10:** Blick in das geöffnete Gehäuse des Lasersensors, mit schematischem Strahlengang

Aus den dynamischen Messspannungsverläufen wurde deutlich, dass die roten und infraroten Laserpunkte nicht genau übereinander lagen (**Bild 11**). Dadurch entsteht ein Versatz und der Messkanal rot erreicht zu anderen Zeiten das Signalmaximum als der Messkanal infrarot. In der dynamischen Auswertung ergaben sich dadurch kurzzeitig falsche Detektionen.



**Bild 11:** Dynamischer Messspannungsverlauf von Stroh und Pflanze

Die Strecke *s* im Bild 11 (Diagramm a) bezeichnet den Versatz der Kurvenverläufe zwischen rotem und infrarotem Messsignal beim Überfahren eines Strohhalmes. Dieser Versatz führt in Bild 11 (Diagramm b) zu einer Spitze *p*, die in der gleichen Größenordnung liegt wie der pflanzliche Grundpegel (Diagramm d). Der Sachverhalt wird durch die Darstellung im **Bild 12** noch einmal verdeutlicht.



**Bild 12:** Fehlerhafte Detektion von Stroh

Die Laserpunkte waren sorgfältig visuell übereinander justiert worden. Eine Überprüfung mit Darstellung und Vergrößerung der Punkte mit Hilfe einer Farbkamera machte den Versatz der Maxima deutlich. Dabei wurde auch die Erkenntnis gewonnen, dass die Justage von Laserpunkten mit unterschiedlichen Spektralfarben sehr aufwendig ist und die technische Umsetzung des Prinzips dadurch sehr erschwert wird.

### 2.3 Lösungsansätze der FH Osnabrück

Vor Beginn des Forschungsvorhabens wurden auf Basis vorhandener Erfahrungen bei den Projektpartnern verschiedene Lösungsansätze zur Messung der Flächenbelegung von Unkräutern diskutiert und experimentelle Voruntersuchungen durchgeführt (WARTENBERG 2001). Vor der vorgesehenen Verwendung eines Spektalkamera-Systems ImSpector mit nachgeschalteter CMOS-Kamera wurden von Seiten der Fachhochschule Osnabrück zwei Lösungsansätze geprüft, die sich insbesondere durch niedrige Kosten auszeichnen. Die Ansätze "Photodiodensysteme" und "Zwei-Kamera-System (low-cost)" wurden durch die Integration von Diplomarbeiten in einen Stand gebracht, der einen Vergleich mit dem Spektalkamera-System ImSpector ermöglichte.

#### 2.3.1 Photodiodensysteme

Die typischen Reflexionseigenschaften von Pflanzen und Boden ermöglichen die Bestimmung des Flächenanteils Grün durch die Messung des Quotienten zweier Wellenlängenintensitäten, z.B. bei 750 und bei 670 nm. Diese Lösung erfordert einerseits eine hohe Dynamik für das einzelne System, andererseits sollten die Sensoren aufgrund der geringen Messfläche eines einzelnen Sensors möglichst kostengünstig sein. Im Rahmen der Arbeiten wurde daher ein Lösungsansatz gesucht, der sich sowohl durch eine hohe Selektivität als auch durch geringe Kosten auszeichnet. Hierzu wurden systematisch die spektralen Charakteristika neuer Photosensoren als Lichtempfänger und LEDs als Lichtquellen untersucht. Durch die Kombination dieser Signaturen mit dem spektralen Reflexionsverhalten von Pflanzen und Boden ergaben sich mehrere technische Lösungen mit guten Selektivitäten. Weiterhin wurden die LEDs gepulst betrieben, so dass eine weitgehende Unabhängigkeit vom Fremdlichteinfluss (z.B. Sonnenlicht) erzielt werden konnte.

Wichtige charakteristische Merkmale des Photodiodensystems sind:

- Verwendung von Standardkomponenten (zur Kostenreduktion)
- Vermeidung (teurer) Spektralfilter
- Einsatz neuer Spektalsensoren (Wellenlängensensor, Farbsensor)
- Gezielte Beleuchtung in optimalen Wellenlängenbereichen
- Gepulster Betrieb zur Vermeidung von Fremdlichteinfluss
- Mikrocontrollerbasiertes Gesamtsystem

Die grundlegenden Untersuchungen zur Optimierung der spektralen Eigenschaften neuer Sensoren und LEDs sowie zum Aufbau des Mikrocontroller-Systems wurden durch Diplomarbeiten unterstützt (HUNTEMANN & MAßBAUM 2001, BÖHMER 2002 - siehe **Anlage A**). Die Arbeiten zu gepulsten LEDs bei selektiven Wellenlängen sind in die Entwicklung eines Sensorsystems zur Messung des Reifegrades von Maispflanzen eingeflossen. Das System wurde von der Firma Krone als „AutoScan“ auf der Agritechnica 2005 vorgestellt und mit einer Silbermedaille prämiert. Die Entwicklung wurde auf der 63. Internationalen Tagung Landtechnik vorgestellt und publiziert (EGBERS et al. 2005).

Rechnet man den gemessenen Quotienten in eine Flächenbelegung um, so erhält man in einer entsprechenden geometrischen Anordnung beispielsweise folgende Werte: Fläche von 0 – 40 cm<sup>2</sup>, Genauigkeit ca. 0,5 cm<sup>2</sup>, Detektionsschwelle ca. 0,9 cm<sup>2</sup>, Kosten bei ca. 30 % im Vergleich zu Photodioden/Filter-Lösungen, Fahrtgeschwindigkeiten bis 10 km/h. Die Methode wurde auf der VDI-MEG-Tagung Landtechnik 2002 vorgestellt und veröffentlicht (RUCKELSHAUSEN et al. 2002, siehe Anlage A).

### 2.3.2 Zwei-Kamera-System

Zur Erfassung kleiner Messbereiche mit hoher Ortsauflösung werden üblicherweise spezielle Kameras verwendet. Von den Kooperationspartnern ATB und SYMACON wurde daher im Rahmen des Vorhabens eine 3-Chip-CCD-Kamera mit Spektralfiltern zur Boden-Pflanze-Unterscheidung spezifiziert und eingesetzt. Für Mehrfachauslegungen eines solchen Sensorsystems sind die Kosten zu hoch, so dass der Einsatz von Billigkameras geprüft wurde. Da bereits Kameras mit Preisen unterhalb von 20 € verfügbar sind, bieten sich hier – trotz der zusätzlich erforderlichen Filter – sehr kostengünstige Systeme im Vergleich zu 2- oder 3-Chip-CCD-Kameras an. Es wurde daher im Rahmen einer Diplomarbeit (SCHWARZLOSE 2002, siehe Anlage A) ein Zwei-Kamera-System aufgebaut, wobei die Kameramodule C-CAM der Firma Conrad Elektronik GmbH verwendet wurden. Die Kameradaten wurden über eine Framegrabberkarte aufgenommen und mit einer Standard-Bildverarbeitungssoftware (QuickCog) verarbeitet. Durch den bekannten geometrischen Versatz der Kameras konnten die Daten softwaremäßig übereinandergelegt werden, so dass für quasistatische Messungen erste Charakterisierungen vorgenommen werden konnten.

Die Zwei-Kamera-Lösung lieferte positive Resultate bei einer Objektauflösung von ca. 5 mm. Sollte eine spätere Anwendung ein Kamerasystem mit vergleichsweise geringen Kosten mehrfach benötigt werden, so wäre der Ansatz mit low-cost-Kameras und speziellen Filtern (Sensorkosten: ca. 200 €) eine Alternative. Bezüglich der Ortsauflösung sind aufgrund der softwaremäßigen Verschiebung der Bilder bei dynamischen Messungen jedoch qualitative Verschlechterungen gegenüber dem Multispektral-Kamerasystem zu erwarten (wurde im Rahmen der Voruntersuchungen nur ansatzweise getestet).



## 2.4 Maschinen- und Elektroniksystem

### 2.4.1 Sensor- und Applikationstechnik für den Echtzeitbetrieb

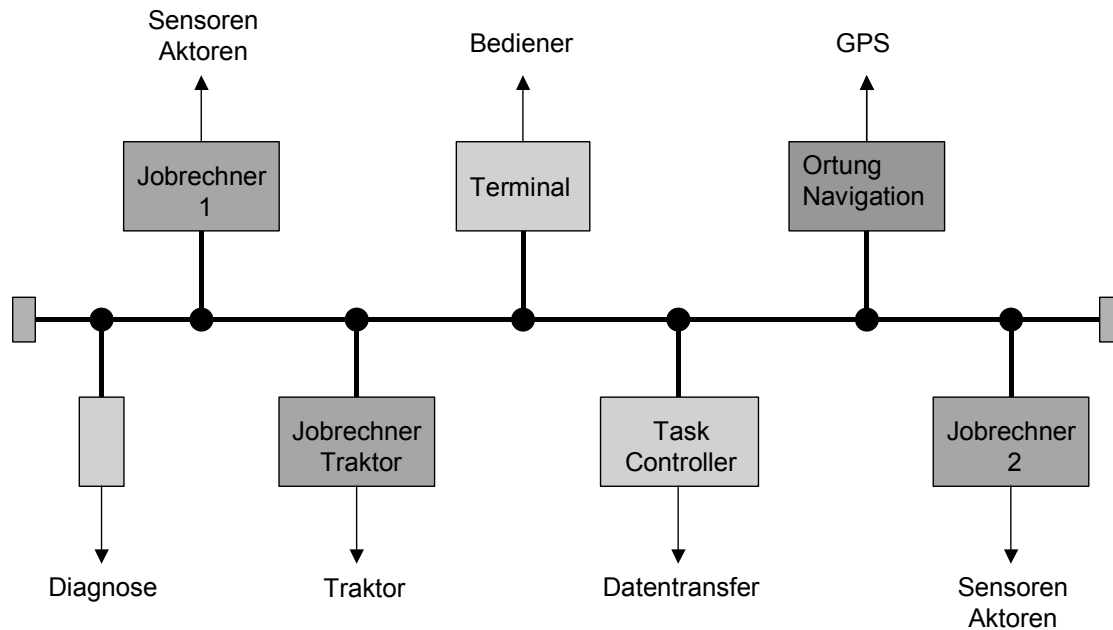
Das Maschinensystem, das im ATB bisher zur Herbizidapplikation im Echtzeitverfahren eingesetzt wurde, zeigt **Bild 13**. Im Echtzeitverfahren erfolgen die Erfassung der Variabilität und die Applikation zeitgleich. Mit einem Sensor werden während der Fahrt Informationen gewonnen, nach denen die Applikationsmengen berechnet und ausgebracht werden.



**Bild 13:** Traktor mit Anhängfeldspritze und Unkrautsensor

Funktionsbedingt befindet sich der Sensor zur Unkrauterfassung an der Front des Traktors. Die Applikation wird über den Spritzbalken am Heck der Anhängespritze ausgeführt. Die Signalübertragung vom Sensor zur Spritze erfolgt über eine elektrische Datenleitung, den sogenannten Bus (hier LBS-Bus, Landwirtschaftliches Bussystem). Die Übertragung der Daten auf der Busleitung erfolgt in digitaler Form, und zwar nach einer bestimmten Norm. Diese Norm hat das Ziel, die Kompatibilität von Traktoren und Anbaumaschinen zu gewährleisten. Nach unterschiedlichen Entwicklungen verschiedener Hersteller bzw. auf Landesebene gilt seit kurzem der Standard ISOBUS, der zukünftig für die Kompatibilität von Traktoren und Anbaugeräten weltweit maßgeblich sein wird (**Bild 14**).

Alle über den Bus verbundenen Aggregate bzw. Elemente sind mit einem Rechner, dem sogenannten Jobrechner, ausgestattet. Jeder Jobrechner hat eine eigene Kennung, kann geräteinterne Signale in Daten mit Busformat umwandeln und ebenso Busdaten lesen, um diese wieder in Signale z. B. zur Betätigung von Aktoren umzusetzen. So kann der „Jobrechner Feldspritze“ direkt kommunizieren mit dem „Jobrechner Unkrautsensor“, von dem er den Sensorwert für das Unkrautvorkommen erhält, und dem „Jobrechner Traktor“, der einen Kontrollwert für die Zapfwellendrehzahl (Pumpendrehzahl) bereitstellt.



**Bild 14:** Schema des Bussystems ISOBUS

Von besonderer Bedeutung für die Gesamtfunktion ist das im Fahrerhaus des Traktors angebrachte Bediener-Terminal. Über dieses Terminal kann der Fahrer Einstellungen in den verbundenen Jobrechnern vornehmen, während der Applikation die Parameter kontrollieren und gegebenenfalls eingreifen. Auf einem Display melden sich selbständig die angeschlossenen Jobrechner als Grafik des entsprechenden Anbaugerätes, hier die Feldspritze, mit verständlichen Symbolen und wichtigen Betriebsgrößen zugeordneten Zahlenwerten (wie momentane Applikationsmenge, Druck in der Spritzbrüheleitung, Tankinhalt und vorhandene Reichweite). Zusätzlich bietet das Terminal die Möglichkeit, GPS-Koordinaten zu berechnen und parallel zu den Applikationswerten auf einer Chipkarte zu speichern.

#### 2.4.2 Anpassung der Feldspritze

Bisher wurden Feldspritzen mit Einzeldüsen ausgerüstet, deren Volumenstrom nur in einem kleinen Bereich von ca. 1:2 über die Veränderung des Druckes variiert werden konnte. Deutlich verschiedene Applikationsmengen konnten nur durch unterschiedliche Fahrgeschwindigkeiten erzielt werden. Für eine teilflächenangepasste Applikation ist ein größerer Regelbereich erforderlich, denn die ortsabhängig unterschiedlichen Ausbringmengen sollen bei einer technologisch günstigen, möglichst hohen Fahrgeschwindigkeit realisierbar sein.

Die Firma AMAZONE bietet eine neue Feldspritze mit "intelligentem Düsengetriebe" an, die diesen Erfordernissen Rechnung trägt (ANONYM 1997). Es werden Mehrfach-Düsenträger der Fa. LECHLER mit der Bezeichnung VarioSelect® eingesetzt, in denen vier Düsen unterschiedlicher Größe angeordnet sind. Abhängig von der benötigten Ausbringmenge erfolgt die Ansteuerung einer bestimmten Düse bzw. mehrerer Düsen

in Kombination. Das Schalten der Düsen erfolgt mittels federbelasteter Pneumatikkolben, die direkt mit dem Brüheventil verbunden sind. Unbeaufschlagt sind die Ventile geschlossen. Jede Teilbreite ist einzeln über elektropneumatische Ventilblöcke ansteuerbar. Die intelligente Ansteuerung erfolgt durch einen Jobrechner „Feldspritze“, der in Zusammenarbeit mit der Fa. Müller-Elektronik entwickelt wurde.

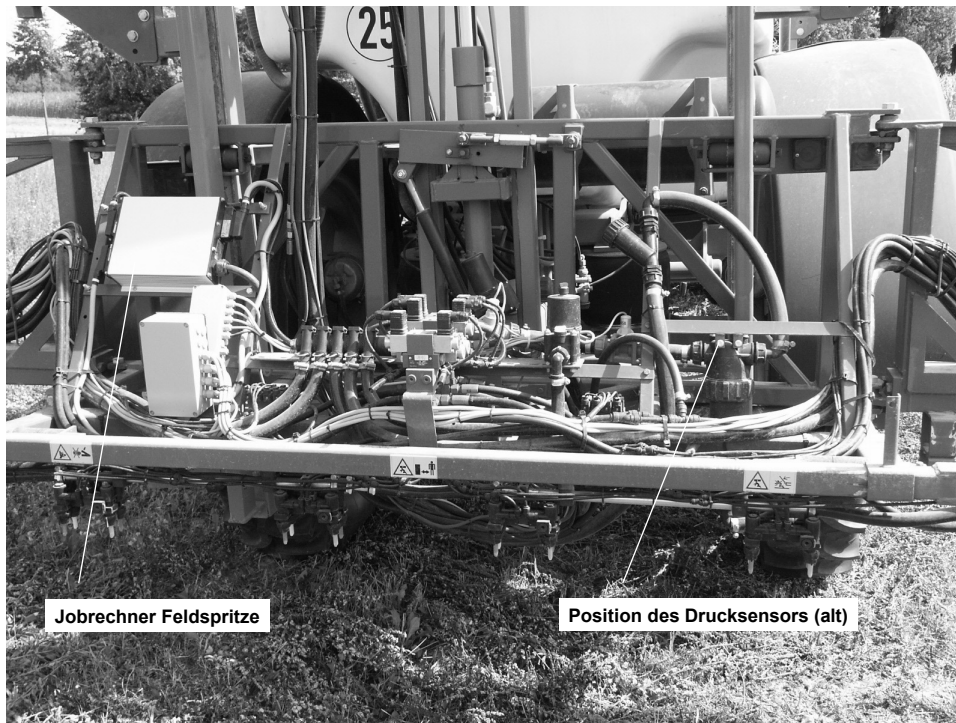
Die bisher im ATB eingesetzte Feldspritze vom Typ S 340 AIR 18 der Fa. AMAZONE/BBG wurde auf eine Spritzbreite von 24 m umgebaut und mit dem intelligenten Düsengetriebe ausgestattet. Das **Bild 15** zeigt einen Teil des Spritzbalkens mit den Mehrfach-Düsenträgern. Diese sind mit den grobtropfigen Injektordüsen des Typs ID bestückt. Standardmäßig erfolgt diese Bestückung mit den Düsen ID 015, 02, 03, 05. Um den Anforderungen nach minimalen Ausbringungsmengen von ca. 50 l/ha bei einer Regelfahrtgeschwindigkeit von 8 km/h gerecht zu werden, wurde eine Düsenkombination gewählt, die die kleinste mögliche Düse einschließt (ID 01, 015, 02, 04).



**Bild 15:** Spritzbalken mit den Mehrfach-Düsenträgern

Um im Kennlinienfeld die für die Regelung erforderlichen Parameter (Düsenkombination, Schwelle) festlegen und den Jobrechner Feldspritze entsprechend programmieren zu können, war die Kenntnis der realen Kennlinien erforderlich. Dazu wurden die Ausbringungsmengen der Düsen und Düsenkombinationen im eingebauten Zustand im normalen Spritzmodus der Feldspritze ermittelt (alle Teilbreiten eingeschaltet, simulierte Fahrtgeschwindigkeit 8 km/h, Medium Wasser). Als Messwertgeber für Druck und Durchfluss wurden die für die Regelung der Ausbringungsmenge serienmäßig in der Brüheleitung installierten Aufnehmer genutzt.

Zunächst traten erhebliche Diskrepanzen zwischen den angezeigten und den tatsächlichen Ausbringungsmengen auf. Als Ursache wurde ein Druckabfall in den Verteilleitungen ermittelt. Diesen Druckabfall konnte der Druckaufnehmer in der Hauptzuleitung nicht erfassen. Deshalb wurde die Position des Druckaufnehmers verändert und dieser direkt in der Nähe der Düsen angeordnet (**Bild 16**).



**Bild 16:** Position des Druckgebers am Filter in der Hauptleitung

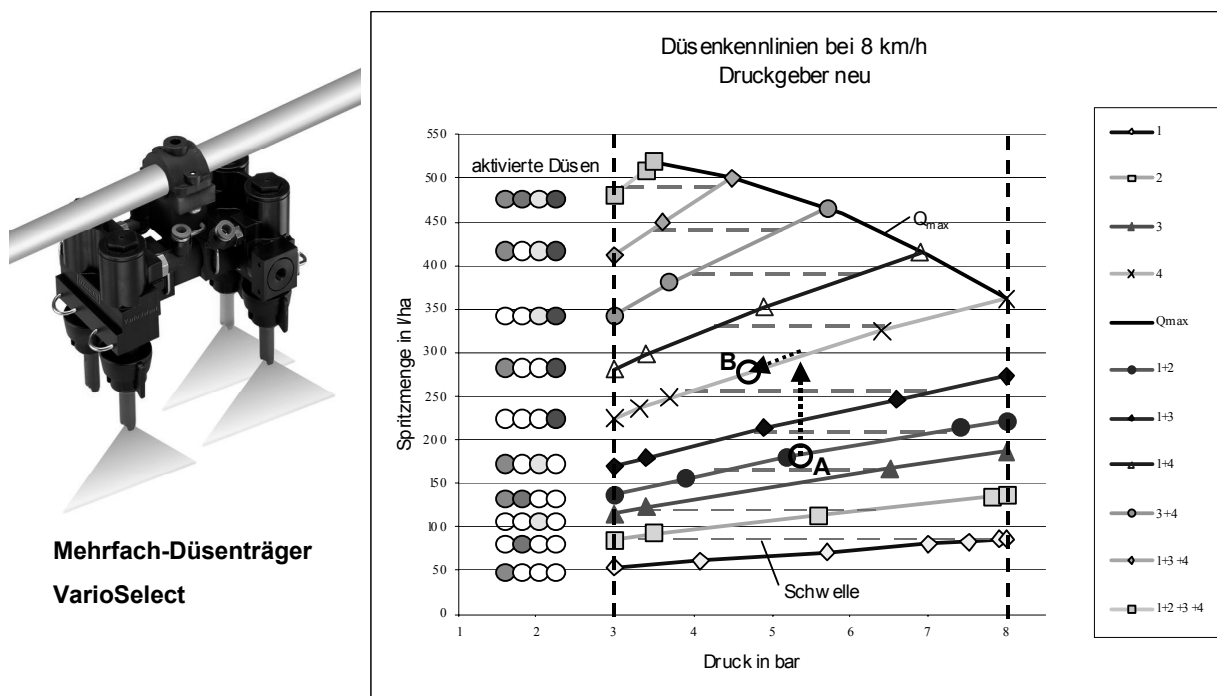
Der mit dieser Anordnung ermittelte Zusammenhang zwischen Druck und Ausbringungsmenge in Zuordnung zur Düsenkombination diente zur Festlegung der Regelparameter. Diese wurden in der Software des Jobrechners „Feldspritze“ hinterlegt. Die Konfigurationsdaten sind in der folgenden Tabelle aufgeführt (**Tabelle 1**).

Im **Bild 17** sind die programmierten Düsenkombinationen und die zugehörigen Kennlinien für eine konstante Fahrgeschwindigkeit von 8 km/h dargestellt. Der optimale Arbeitsbereich der Düsen liegt bei einem Druck zwischen 3 und 8 bar. In diesem Bereich sind Spritzmengen zwischen ca. 50 und 500 l/ha realisierbar. Je nach Sollwertvorgabe werden vom Jobrechner bestimmte Düsen aktiviert und damit die zugeordnete Kennlinie festgelegt. Über die Einstellung des Druckes wird dann der Arbeitspunkt angefahren. Im Jobrechner sind die Schwellen hinterlegt, die den Übergang von einer Kennlinie zur anderen regeln. Soll die Ausbringungsmenge z. B. von dem aktuellen Arbeitspunkt A bei 180 l/ha auf den Punkt B bei 275 l/ha verändert werden, wählt das Programm den Kennlinienabschnitt oberhalb der Schwelle 255 l/ha, schaltet die Düsen 01+015 ab und gleichzeitig die Düse 04 ein. Durch das Umschalten bei dem vorhandenen Druck von 5,4 bar stellt sich eine Ausbringungsmenge von 295 l/ha ein. Diese wird durch Abregeln des Druckes auf den vorgegebenen Sollwert verringert.

**Tabelle 1:** Zugangsmodus und Konfiguration Jobrechner Feldspritze

ESC	Programm beenden	
SMGR	OK	
Moduswahl	Passwort = "\$ Datum (JJMMTT) rückwärts"	
	OK	
ME	Modus	Gerätedialog
Spritze	Konfiguration	
Interna	Nächste	
Nr. auswählen	Editieren	OK + - OK
Zurück	ESC	

	Düse				Düsen	Nr.	Wert	Eingabe	Menge		
	1	2	3	4					l/min	l/ha	
	Bit	0	1	2	3						
Nozzles combination 10		x	x	x	x	1234	Nozzles transition 10	15	38	3,8	570
Nozzles combination 9		x		x	x	134	Nozzles transition 9	13	32	3,2	480
Nozzles combination 8				x	x	34	Nozzles transition 8	12	29	2,9	435
Nozzles combination 7		x			x	14	Nozzles transition 7	9	26	2,6	390
Nozzles combination 6					x	4	Nozzles transition 6	8	22	2,2	330
Nozzles combination 5		x		x		13	Nozzles transition 5	5	17	1,7	255
Nozzles combination 4		x	x			12	Nozzles transition 4	3	14	1,4	210
Nozzles combination 3				x		3	Nozzles transition 3	4	11	1,1	165
Nozzles combination 2				x		2	Nozzles transition 2	2	8	0,8	120
Nozzles combination 1		x				1	Nozzles transition 1	1	6	0,6	90



**Bild 17:** Programmierte Düsenkombinationen, zugehörige Kennlinien und Schwellen

Die Feldspritze mit diesem intelligenten Düsengetriebe wurde zur sensorgesteuerten Herbizid- und Fungizidapplikation in Winterweizen, Wintergerste und Futtererbsen erfolgreich eingesetzt. Dabei wurden in Praxisbetrieben ca. 100 ha teilflächenspezifisch und vergleichsweise flächeneinheitlich bearbeitet. Die Herbizidapplikation erfolgte vorwiegend in einem Bereich von 100 bis 200 l/ha, die Fungizidapplikation in einem Bereich von 50 bis 200 l/ha.

### 2.4.3 Übertragbarkeit von Sensorwerten

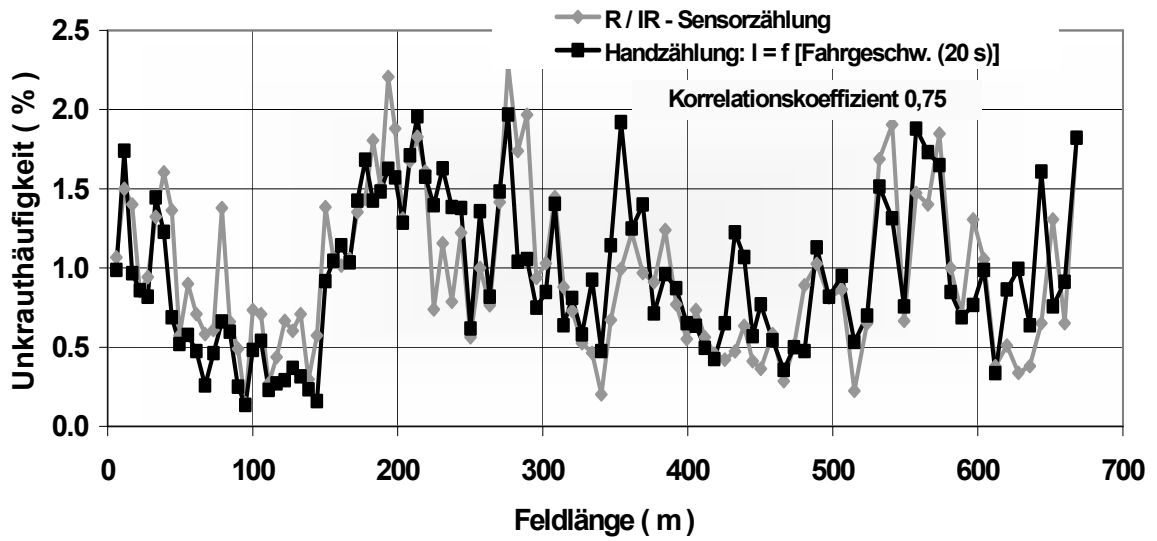
Eine Voraussetzung für den Einsatz der Sensorsysteme in Fahrgassen ist die Vergleichbarkeit des Unkrautbestandes in der Fahrspur zum Unkrautbestand im Pflanzenbestand eines Schlages. Dieser Test zwischen den Sensoraufzeichnungen und einer manuellen Zählung in den verschiedensten Kulturen wurde bereits in Voruntersuchungen mit dem Prototyp Diodensensor durchgeführt. Das Ergebnis liess einen Einfluss unterschiedlicher Detektionsbedingungen auf das Zählergebnis erkennen (**Tabelle 2**).

**Tabelle 2:** Zählgenauigkeit des Sensors in Abhängigkeit von der Kulturart (WARTENBERG & DAMMER 2000)

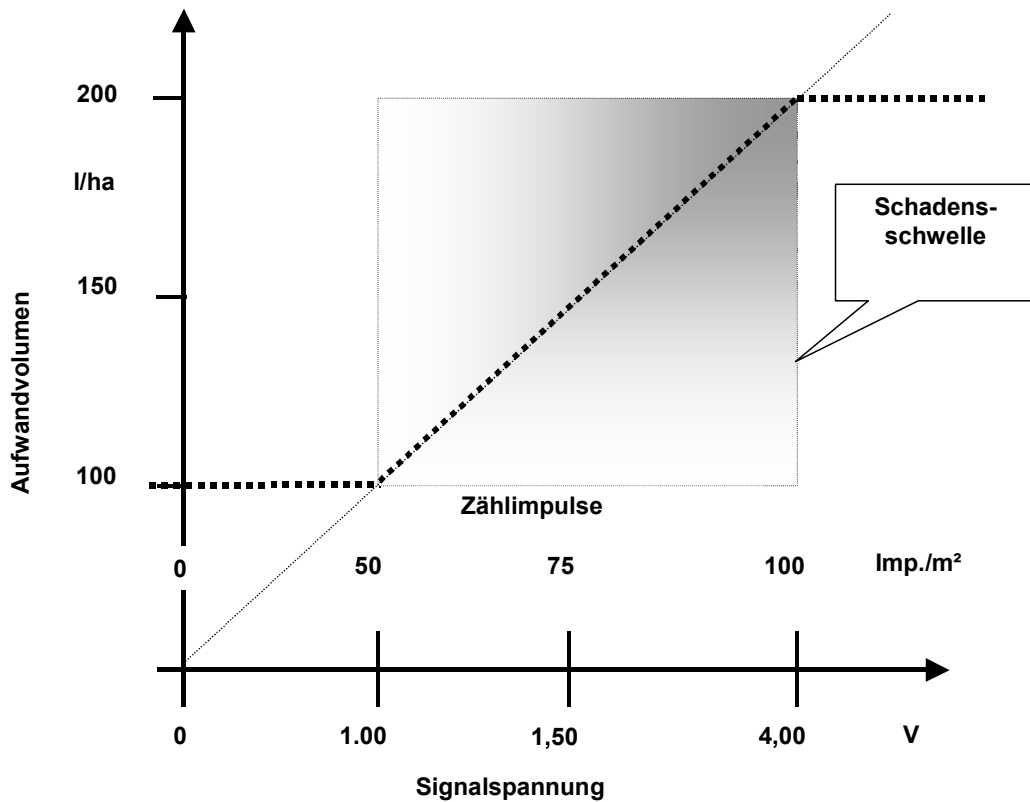
Kulturart	Körnermais	Sommergerste	Winterweizen	Winterroggen
BBCH	10 - 11	10 - 12	16 – 18	10 - 25
Korrelationskoeffizient	0,8 - 0,9	0,5 - 0,7	0,7 – 0,8	0,4 - 0,6

Die Ergebnisse machten deutlich, dass sich mit dem Sensorsystem langwellige Heterogenitätsveränderungen auf den Feldern mit genügender Genauigkeit ermitteln lassen. Wird die erreichbare Detektionsgenauigkeit auf die Gesamtfläche bezogen, ist sie etwa mit geostatistischen Schätzungen von Unkrautverteilungen zu vergleichen, die auf der Grundlage rastergestützter Bonituren ermittelt werden (ANONYM 2000).

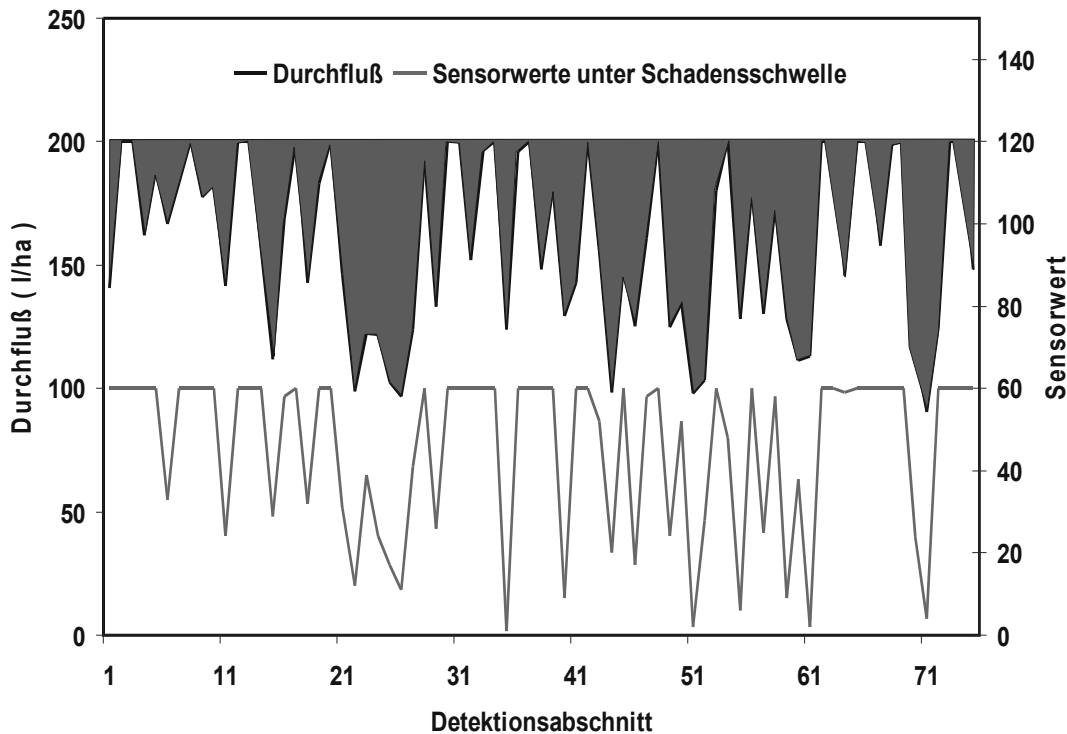
Das Detektionssystem summierte die Zählwerte jeweils über ca. 5 m. Ein Beispiel für eine gemessene Verteilung in einem Winterroggenschlag, gemessen mit Hilfe des Diodensensors, zeigt **Bild 18**. Die gemittelten Zählwerte wurden in eine proportionale analoge Signalspannung im Bereich 1 bis 4 V umgewandelt und mit einer Schadensschwelle bewertet (**Bild 19**). Die zugeordnete Regelung der Applikationsmenge erfolgte im Bereich zwischen 100 und 50 %. Der Maximalwert von 100 % entspricht dem üblichen Wert entsprechend der allgemeinen fachlichen Praxis der Landwirte. **Bild 20** zeigt abschließend dazu den Verlauf der Herbizidapplikation in einem Winterweizenfeld mit variablem Unkrautvorkommen.



**Bild 18:** Unkrautdetektion in Fahrgassen, Winterroggen 4/98, Agrarbetrieb Fahrland (WARTENBERG & DAMMER 2000)



**Bild 19:** Funktionelle Zuordnung der Signalspannung und der Applikationsmenge zu den Detektionswerten – Zählimpulse (WARTENBERG & DAMMER 2002)



**Bild 20:** Reduzierung der Applikationsmenge in Abhängigkeit vom Zählwert des Sensors (30.10.2001, Winterweizen BBCH 12) (WARTENBERG & DAMMER 2002)

Die Voruntersuchungen haben bestätigt, dass die teilflächenspezifische Herbizidapplikation nach dem online-Prinzip ein praxisnahes Echtzeitverfahren darstellt, das im Praxiseinsatz bedeutende ökonomische und ökologische Vorteile erbringen kann.

### 3 Entwicklung der Messsysteme

#### 3.1 Entwicklung der ImSpector-Systeme

Für die Projektbearbeitung stellte das ATB der Fachhochschule Osnabrück erprobte Spektrometer der Firma Specim ([www.specim.fi](http://www.specim.fi)) vom Typ ImSpector zur Verfügung (WARTENBERG 2001). Die Optik der Spektrometer ImSpector nimmt das reflektierte Licht einer geometrischen Zeile auf und fächert durch eine spezielle Optik jeden Punkt in sein Wellenlängenspektrum auf. Wird die zweidimensionale Ort-Wellenlängen-Matrix mit einer Kamera aufgenommen, so kann für jeden Punkt durch die Auswertung der Bilddaten eine Spektralanalyse – z.B. eine Boden-Pflanze-Unterscheidung – vorgenommen werden. Wird das ImSpector/Kamera-System bewegt, so hat man gewissermaßen einen "Spektralscanner" zur Verfügung. Verwendet man eine CMOS-Kamera, so kann man für jede Ortsposition ausschließlich die zur Auswertung notwendigen Wellenlängen auslesen, während man bei CCD-Kameras zunächst das komplette Bild aufnehmen muss. Hierdurch ergeben sich ohne besondere zusätzliche Kosten Geschwindigkeitsvorteile um den Faktor 100. Weitere Informationen zur Funktionsweise des ImSpector-

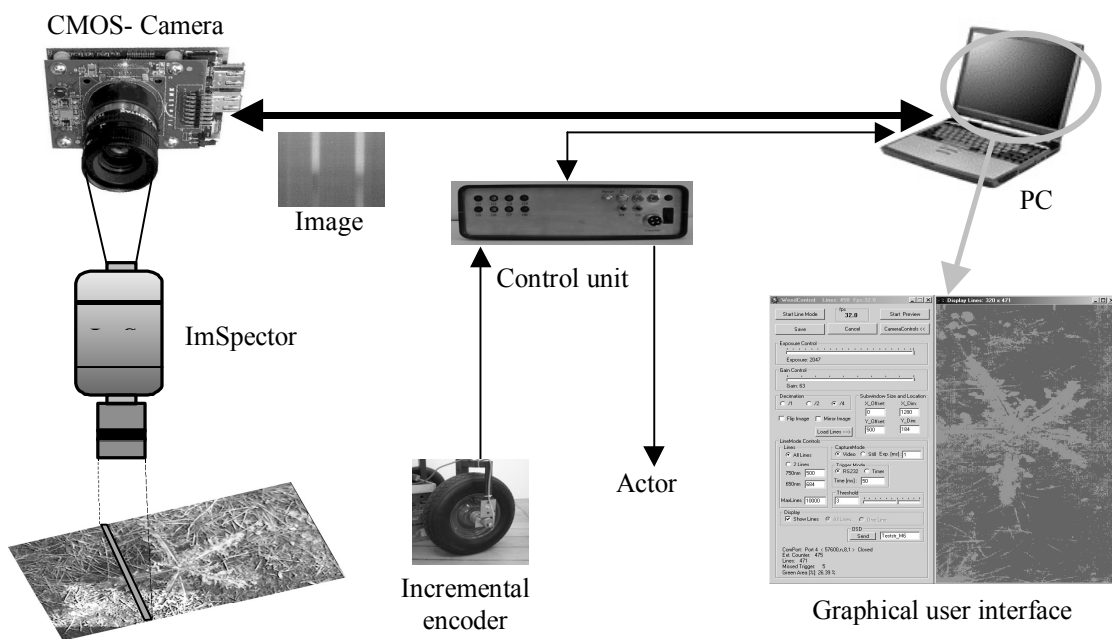


Systems sind in **Anlage C** aufgeführt. Für das Konzept wurde eine Patentanmeldung eingereicht (IN DER STROTH et al. 2003).

### 3.1.1 Spektrometer ImSpector mit CMOS-Kamera

**Bild 21** zeigt den Aufbau des Spektalkamera-Systems. An die Optik (ImSpector) wird eine CMOS-Kamera angekoppelt, deren Daten auf einen PC übertragen werden. Durch einen Drehgeber wird über eine Kontrolleinheit die Position aufgenommen (typische Auflösung: 1 mm), so dass die präzise Ansteuerung eines Aktors erfolgen kann. Es wurden zwei Systemlösungen aufgebaut:

- PC-basiert (siehe Bild 21), lineare CMOS-Kamera (PixelLink), Entwicklungsumgebung mit entwickelter Software WeedControl, Einlernen des Systems
- Mikrocontroller-basiert, logarithmische CMOS-Kamera (Fuga1000), CAN-Anbindung, PC-unabhängig (siehe z.B. Anlage C)



**Bild 21:** Aufbau des Spektalkamera-Systems (PC-basiert, Software WeedControl)

Zur Entwicklung der Hard- und Softwarekomponenten sowie zur Charakterisierung des Gesamt-Systems wurden umfangreiche Entwicklungen vorgenommen (siehe z.B. **Anlagen B bis F**).

### 3.1.2 Untersuchungen an den ImSpector-Systemen

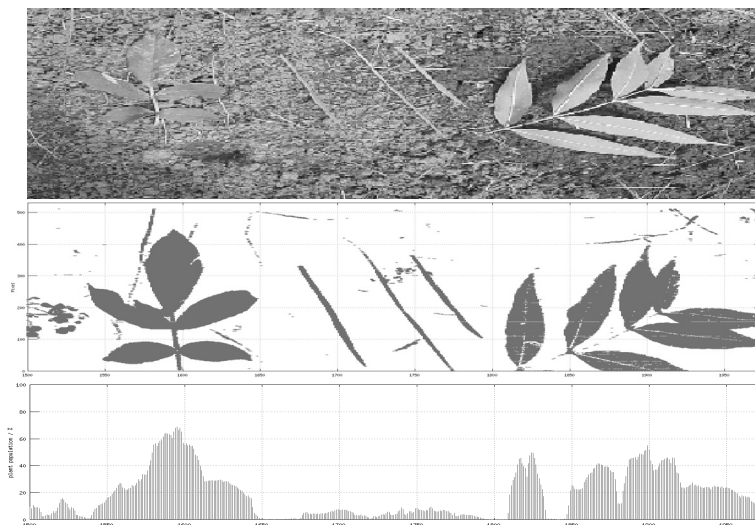
Auf Basis der entwickelten Systeme wurden statische Messungen zum Vergleich der Systeme durchgeführt und Einschätzungen zur Dynamik vorgenommen. Die ImSpector-Systeme konnten zu diesem Zeitpunkt mit Hilfe verfügbarer Messtechnik dynamisch vermessen werden. Folgende Systeme wurden bezüglich ihrer technischen Parameter

(z.B. Auflösung, Farbselektivität) sowie des zu erwartenden Aufwandes (Entwicklung, Systemkosten) verglichen:

- ImSpector mit logarithmischer Kamera (Fuga, Mikrocontroller-basiert)
- ImSpector mit linearer Kamera (PixelLink, PC-basiert)

Die geforderte örtliche Auflösung im mm-Bereich in Verbindung mit hohen Fahrgeschwindigkeiten von typisch 10 km/h konnte von den beiden ImSpector-Systemen erreicht werden. Daher wurden beide Lösungsansätze intensiv weiterverfolgt. Allerdings liegen die Sensorkosten der ImSpector-Lösungen mit ca. 6000 – 8000 € für das Sensorsystem inklusive Auswerteeinheit deutlich oberhalb der Preise für einfache Photodiodesysteme. Bezüglich der Optik und Lichttechnik müssten für einfache Photodiodesysteme erhebliche Entwicklungs- und Systeminvestitionen erbracht werden.

Die Analyse dynamischer Messdaten ohne ein entsprechendes Bild (Videoinformation) hat in der Vergangenheit bei vielen Experimenten Probleme bereitet. Integrale Messdaten (z.B. die Bestimmung der Zahl der Pflanzen oder der Grünfläche) sind bei der Optimierung oder Fehlerbehebung nur begrenzt hilfreich. Es müssen für eine erfolgreiche Analyse zu einem konkreten Zeitpunkt sowohl die Messdaten (z.B. die Drehgeber-Information) als auch die entsprechende Videoinformation vorliegen.



**Bild 22:** Boden-Pflanze-Unterscheidung (oben: Video, mitten: ImSpector-System, unten: berechnete Flächenbelegung)

Im Rahmen des Vorhabens wurde daher eine Video-Messdaten-Synchronisierung mit Hilfe einer OSD-Einheit (**O**n **T**he **S**creen **D**isplay) realisiert und eingesetzt (siehe **Anlage B**).

**Bild 22** zeigt das Beispiel einer Boden-Pflanze-Unterscheidung. Im oberen Teil sind die Videoinformationen dargestellt, in der Mitte die mit Hilfe der Software ermittelten Daten des ImSpector/CMOS-Kamera-Systems, unten die hieraus berechnete Flächenbelegung. Durch Setzen eines Schwellwertes wird ein Triggersignal für einen Aktor generiert, welches über die Position des Drehgebers und den räumlichen Versatz von Sen-

sor und Aktor (sowie gegebenenfalls unter Einbeziehung weiterer Informationen) den Feldbedingungen angepasst wird.



**Bild 23:** Mobiler Messwagen mit Sprayer

Labor- und Feldversuche wurden mit einem einfachen Messwagen durchgeführt (siehe **Bild 23**). Neben dem ImSpector-Kamerasystem kann man hierbei die Batterie, Beleuchtung, Videokamera, Notebook sowie die Sprayereinheit erkennen. Das Spektralsystem (ohne Sprayereinheit) wurde an einem Traktor für Geschwindigkeiten bis ca. 12 km/h getestet. Die Ergebnisse der Arbeiten mit dem ImSpector sind in die Entwicklung eines Sensorsystems zur automatischen Trennung von Beimengungen und Kartoffeln eingeflossen, welches seit 2004 von der Fachhochschule Osnabrück und der Grimme Landmaschinenfabrik GmbH & Co. KG/Damme bearbeitet wird. Das Projekt wird von der Arbeitsgruppe Innovative Projekte beim Ministerium für Wissenschaft und Kultur des Landes Niedersachsen (AGIP) gefördert.

### 3.2 Entwicklung des Systems mit Multispektralkamera

#### 3.2.1 Allgemeine technische Angaben

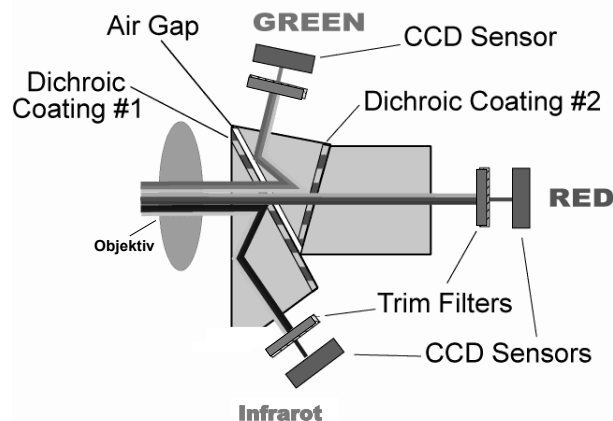
Die eingesetzte Kamera ist eine Multispektralkamera der Firma DuncanTech vom Typ MS 2100 (**Bild 24**). Es handelt sich um eine progressive Scan Digitalkamera, die für verschiedene Spektralbereiche angeboten wird.



**Bild 24:** Multispektralkamera MS 2100

Einige wichtige technische Daten:

Bildsensor:	3 Stück 1/2" Interline Transfer CCD Chips
Bildelemente:	659 (H) x 494 (V)
Pixelgröße:	9,9 x 9,9 $\mu\text{m}$
Pixel Takt:	12 MHz, max.
Bildformat:	6,5 x 4,5 mm
Bildrate:	30 frames pro Sekunde, max.
Digitaler Bildausgang:	32 bits max. EIA 644 oder RS 422
Signal/Rauschverhältnis:	60 dB
Objektiv-Anschluss:	F-Mount oder Canon ENG
Objektiv:	Sigma EX Aspherical 14/2,8
Elektron. Shutter:	je Kanal 1/8000 s bis 1/7,5 s einstellbar
Verstärkung:	je Kanal 0...36 dB
Steuer Eingang:	RS-232
Betriebstemperatur:	0...50 $^{\circ}\text{C}$
Betriebsspannung:	12 VDC
Leistungsaufnahme:	10 W
Gewicht:	1,62 kg



**Bild 25:** Schema des optischen Teils der Multispektralkamera

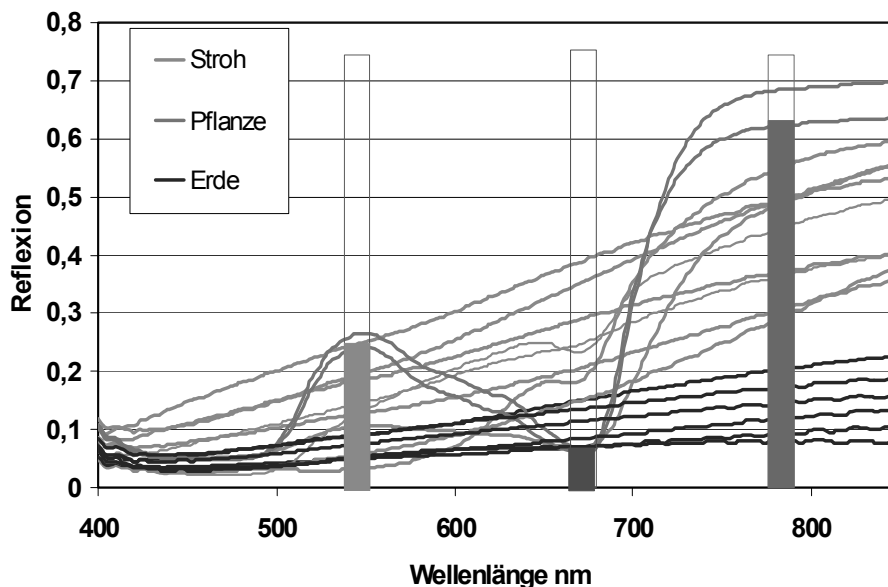
Der Aufbau der Kamera ist schematisch im **Bild 25** dargestellt. Kernstück ist ein Prismenblock, der das einfallende Licht in 3 Strahlenbündel aufteilt und auf 3 unabhängige CCD Chips weiterleitet. Die brechenden Flächen des Prismenblockes sind mit dichroiden Schichten versehen, die die Strahlenbündel in verschiedene Spektralbereiche aufteilen. Zusätzlich sind vor den Bildsensoren Schmalbandfilter angeordnet, die entsprechend der gewünschten Konfiguration ausgelegt werden können. Standardmäßig werden folgende Konfigurationen angeboten:

RGB-Konfiguration: Farben rot, grün, blau  
 CIR-Konfiguration: Farben rot, grün, nahes infrarot  
 RGB/CIR-Konfiguration: Farben rot, grün, blau, nahes infrarot

Kundenspezifisch werden multispektrale Konfigurationen angeboten, die Farbkombinationen auf dieser Basis im Bereich der Empfindlichkeit der CCD-Bildsensoren von 400 bis 1100 nm einschließen.

### 3.2.2 Konfiguration der Farbkanäle

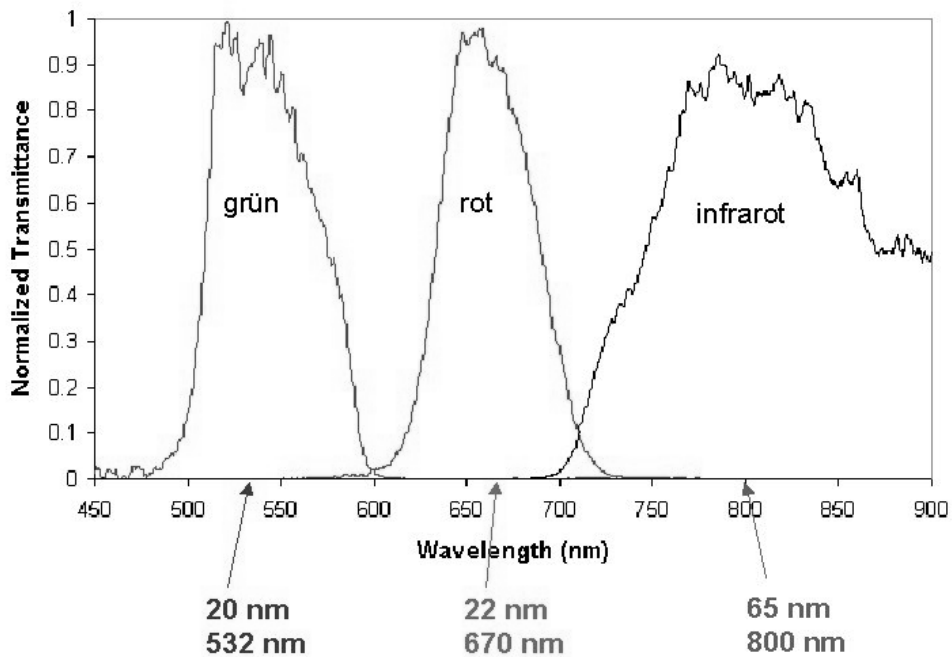
Die Konfiguration des optischen Systems erfolgte entsprechend der Zielstellung, grüne Pflanzen auf unterschiedlichen Böden und unter verschiedenen Umgebungsbedingungen sicher zu erkennen (z.B. gemulchte Flächen mit abgestorbenen Pflanzenresten). Dazu ist es erforderlich, das Minimum der Pflanzenreflexion im Bereich Rot (siehe **Bild 26**) bei 670 nm als Hauptkriterium zu nutzen und einen Bezug zu den Reflexionswerten im Bereich Infrarot bei 780 nm herzustellen.



**Bild 26:** Spezifische Reflexion von grünen Pflanzen (LANGNER & BÖTTGER 2004a)

Die angebotene Konfiguration CIR-2, eine schmalbandige Ausführung, genügte diesen Anforderungen nicht. Die Forderung nach möglichst geringer Bandbreite in den Spektralbereichen Rot und Grün wurden wie folgt realisiert (siehe **Bild 27**):

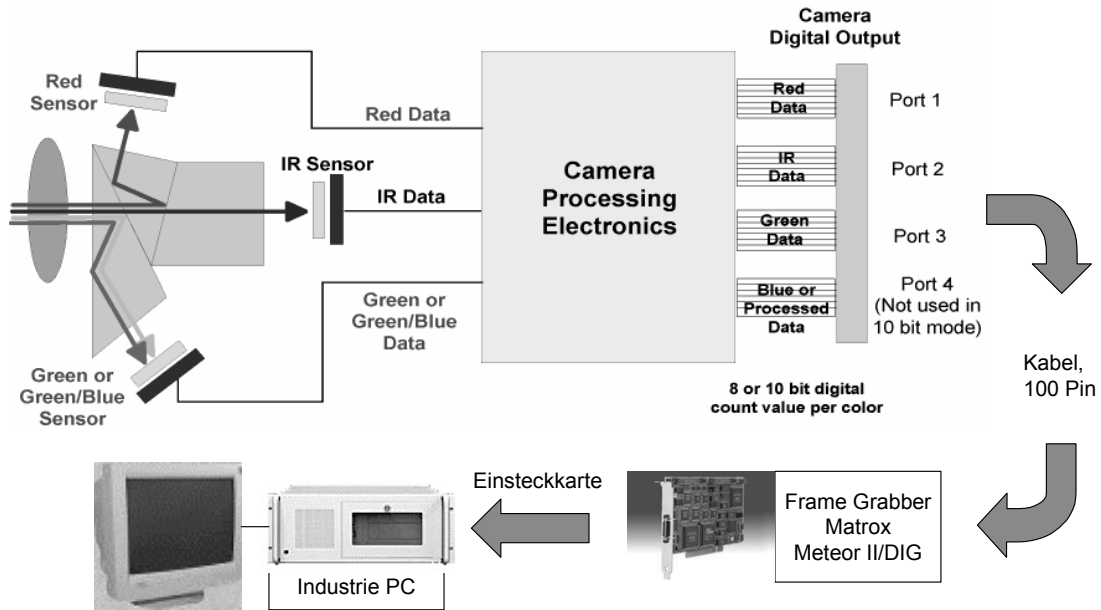
<b>Band</b>	Konfiguration CIR-2		kundenspezifische Konfiguration	
	<i>mittl. Wellenlänge</i>	<i>mittl. Bandbreite</i>	<i>mittl. Wellenlänge</i>	<i>mittl. Bandbreite</i>
<b>Grün</b>	550 nm	40 nm	532 nm	20 nm
<b>Rot</b>	660 nm	40 nm	670 nm	22 nm
<b>IR</b>	800 nm	65 nm	800 nm	65 nm



**Bild 27:** CIR-2- und kundenspezifische Konfiguration der Farbkanäle

### 3.2.3 Hardwarekonfiguration zur Versuchsdurchführung

Zur Gewährleistung der Kamerafunktion unter Versuchsbedingungen wurde ein PC-basierter Aufbau gewählt (**Bild 28**). Die digitalen Bilddaten der 3 Farbkanäle werden parallel ausgegeben (8 Bit-Modus) und über eine Bildverarbeitungskarte an einen PC übergeben.



**Bild 28:** Schema der Kamera und des Signalverlaufes

Der Framegrabber Meteor 2 /DIG entspricht einer Empfehlung des Kameraherstellers. Bei dem PC handelt es sich um einen handelsüblichen Industrie-PC mit 2,8 GHz und 24 V-Netzteil. Eine universelle I/O-Karte (PCI\_DAS\_6025) dient der Eingabe von Triggerimpulsen sowie zur Ausgabe von Analogwerten. Dieser Aufbau ermöglicht einen universellen Einsatz der Kamera zum Nachweis der Funktion sowohl am Prüfstand als auch im Feldeinsatz. Darüber hinaus ist die direkte Einbindung in das bisherige Maschinensystem zur Herbizidapplikation möglich. Dazu kann der Anschluss an den vorhandenen Jobrechner „Unkrautsensor“ und damit an das bestehende Bussystem erfolgen.

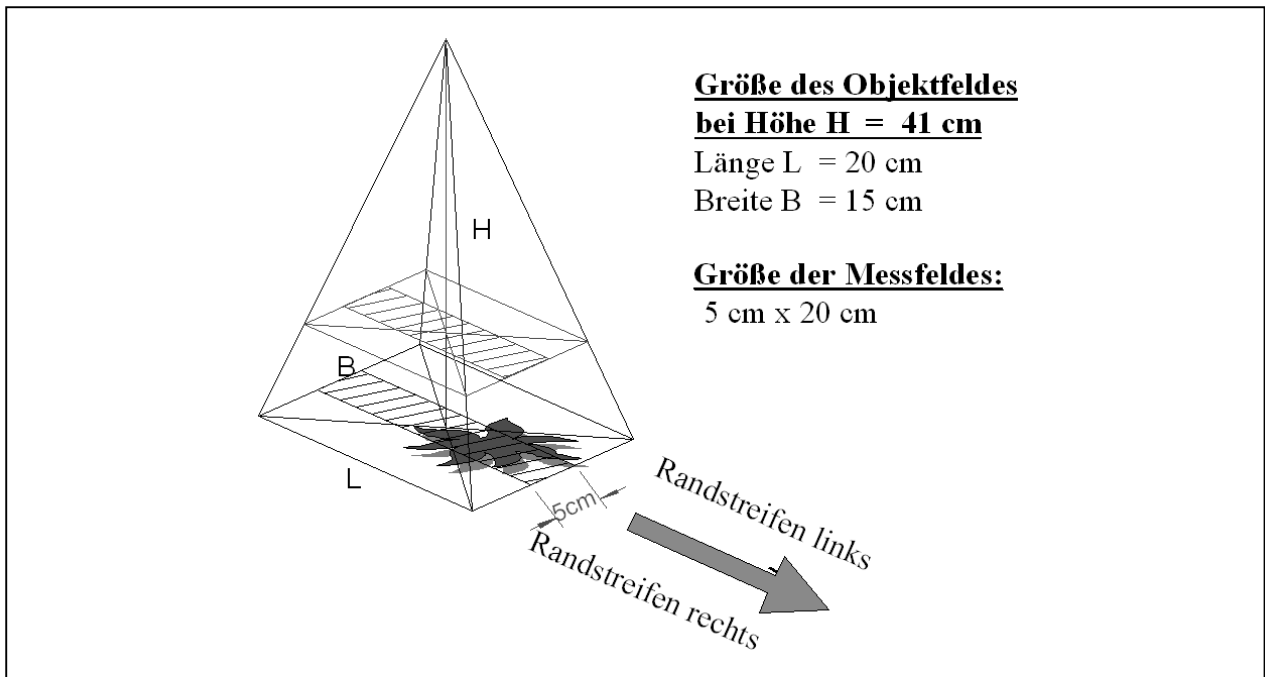
### 3.3 Darstellung der Software zum Messsystem Multispektralkamera

Die Software wurde vom Projektpartner Firma SYMACON Bildverarbeitung erstellt. Hierzu wurde für das System mit Multispektralkamera ein interaktives Softwaresystem DUN-MTRX-Inspektor-32/CD angewendet. Softwaremodule vom Kamerahersteller (Kamerasteuerung DT Control) wurden eingearbeitet sowie die PCI-Karte eingebunden.

#### 3.3.1 Vorgaben zur Anpassung der Software

##### 3.3.1.1 Allgemeine Hinweise

Die Kamera wird am Fahrzeug in einer Höhe von 41 cm geführt, so dass sich bei Ausnutzung der Bildfläche auf dem Chip eine Objektgröße von 20 x 15 cm ergibt (siehe **Bild 29**). Bezogen auf die Fahrtrichtung erfolgt die Orientierung der Kamera so, dass die Längsseite des Bildes in Fahrtrichtung liegt. In Abhängigkeit vom zurückgelegten Weg soll die Bildfolge so gewählt werden, dass ein lückenloser Anschluss entsteht.



**Bild 29:** Kameraabstand-Objektgröße (LANGNER & BÖTTGER 2004b)

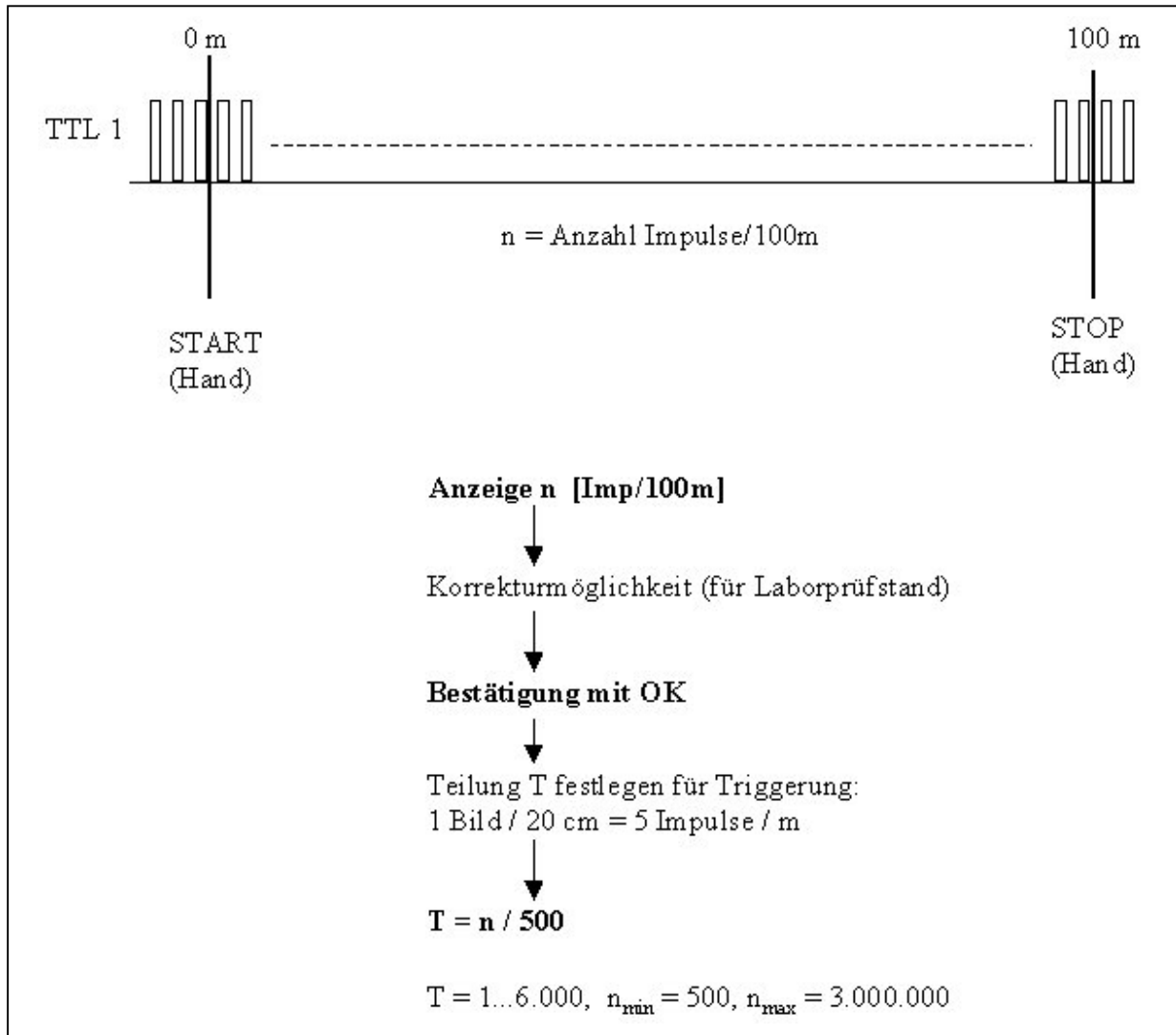
Bei einer Bildfrequenz von 15 Bildern/sec und jeweils 5 Bilder/m entspricht dies einer Fahrgeschwindigkeit von 3 m/s bzw. 10,8 km/h.

Am Fahrzeug wird ein Signalgeber installiert, der ein Wegsignal liefert, das als TTL1-Signal zur Verfügung steht. Die Signalgewinnung kann auf unterschiedliche Weise erfolgen (Impuls- oder Inkrementalgeber am Rad, Kardanwelle oder Tellerrad). Entsprechend kann die Impulszahl stark variieren.

### 3.3.1.2 Modus „Kalibrierung des Wegsignals“

Die Kalibrierung des Wegsignals erfolgt auf einer ausgemessenen Distanz von 100 m (siehe **Bild 30**). START und STOP sollen von Hand ausgelöst werden. Die Anzahl der Impulse muss angezeigt werden. Da der Vorgang einige Male wiederholt wird, muss der angezeigte Wert korrigierbar sein.



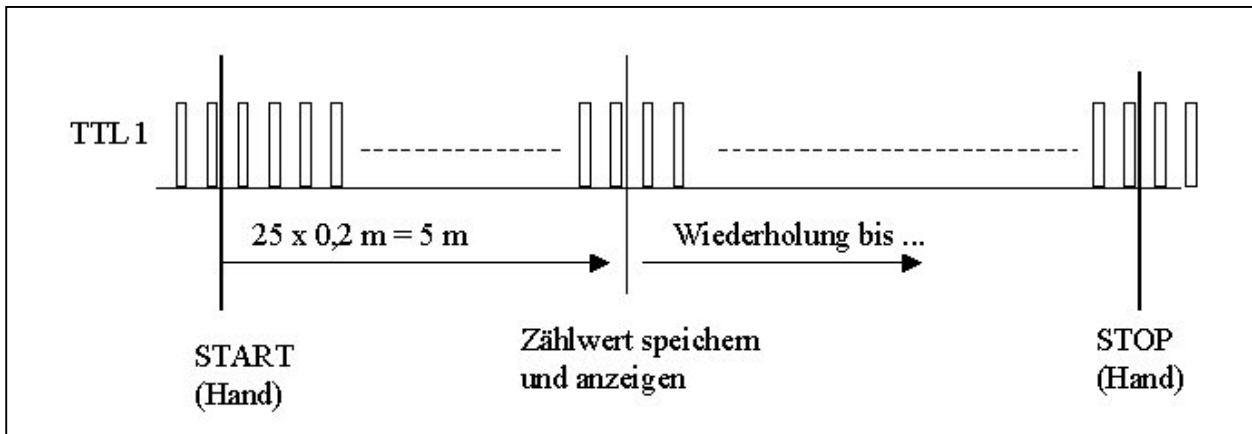


**Bild 30:** Kalibrierung Wegsignal

Auch wenn keine Messstrecke befahren wird, wie das bei Laboruntersuchungen z. B. auf einer rotierenden Scheibe der Fall ist, muss ein Wert eingetragen werden können. Ein als richtig eingeschätzter Wert sollte bestätigt werden und dient dann zur Festlegung der Teilung.

### 3.3.1.3 Modus „Messung“

Beim Messvorgang soll die Anzahl (und die Größe) der Unkräuter jeweils über eine Wegstrecke von 5 m (wenn möglich als Variable), also als Summe aus 25 Bildern, gezählt werden (siehe **Bild 31**). Dieser Zählwert soll an den Jobrechner Unkrautsensor übergeben werden und als Sollwert für die Applikationsmenge dienen (Analogspannung 1...4 V).



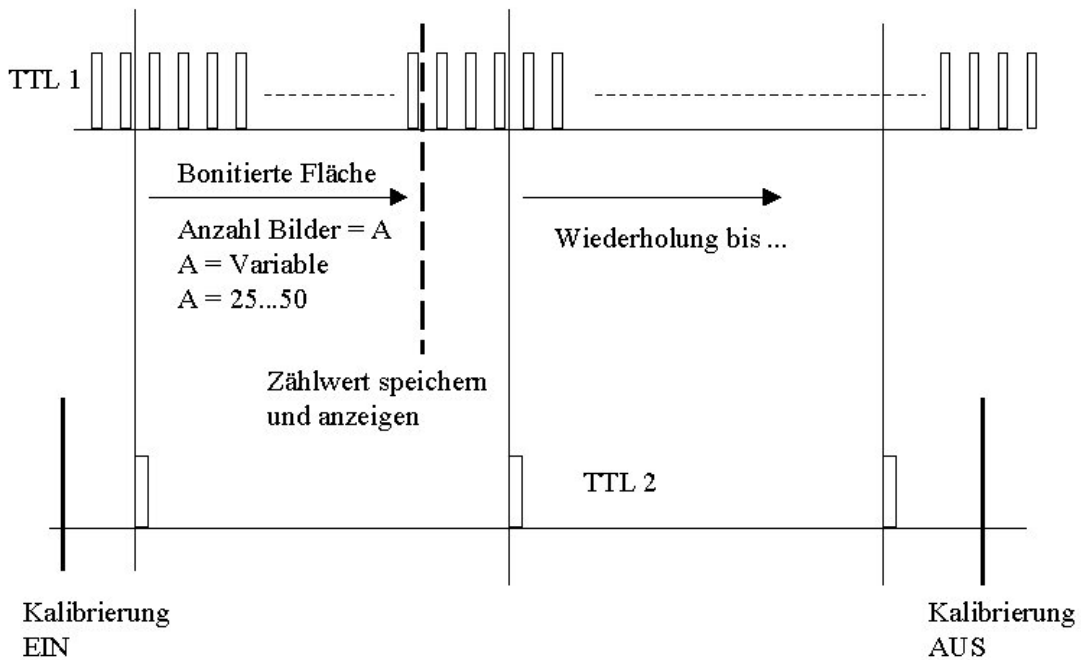
**Bild 31:** Messung

Der Zählwert muss angezeigt (als Kontrolle für den Bediener) und gespeichert werden. Die Speicherung sollte möglichst in einem Format erfolgen, das direkt in Excel einlesbar ist, um den Aufwand bei der Auswertung zu minimieren.

Die Anzeige, Speicherung und Analogausgabe „Bedeckung“ sollen analog zum Zählwert erfolgen.

#### 3.3.1.4 Modus „Kalibrierung Unkraut“

Dieser Modus dient dem Vergleich einer auf einer bestimmten Fläche vorhandenen Anzahl von Unkräutern und der von der Kamera erfassten Anzahl. Dazu erfolgt eine Bonitur, d.h. eine visuelle Bestimmung der Anzahl, der Größe und der Art der Unkräuter auf dieser Fläche. Die gleiche Fläche wird mit der Kamera detektiert. Damit genau die gleiche Fläche getroffen wird, wird der Anfang der Fläche gekennzeichnet und mittels Signalgeber erfasst (siehe **Bild 32**). Der Signalgeber liefert die Impulse TTL 2. Die Länge der Flächen ist vorher festgelegt worden und beträgt jeweils ein Vielfaches der Objektlänge der Kamera (etwa 5...10 m). Diese Länge kann in Anzahl der Bilder angegeben werden und stellt eine Variable dar, deren Wert eingegbar sein muss.



**Bild 32:** Kalibrierung Unkraut

### 3.3.1.5 Klassierung und Bereichseinteilung

Zusätzlich zur Anzahl der Unkräuter (Ergebnis Zählwert) kann deren Größe erfasst und verschiedenen Klassen zugeordnet werden. Die Ergebnisse können wieder in einem Excel kompatiblen Format gespeichert werden. Ausreichend und günstig waren 10 Klassen mit festen Klassengrenzen, z. B. in folgender Ausführung:

2, 16, 64, 100, 225, 400, 900, 1600, 2500, 3600 [mm<sup>2</sup>]

Abbildungsverhältnis = Pixelanzahl/Objektfläche:  $659 \times 494 / (201 \times 150) = 10,8 \text{ Px/mm}^2$

Eine Bereichseinteilung wird entsprechend Bild 29 (siehe S. 33) im gegenwärtigen Entwicklungsstand noch nicht ausgewertet. Es wird bisher nur der mittlere Bereich, etwa 1/3 der Objektfläche, zur Detektion von Unkrautkeimlingen genutzt. Die beiden Randbereiche sollen zukünftig bei einer Weiterentwicklung der Software einbezogen und ebenfalls ausgewertet werden, um zusätzliche Signale über Abweichungen von der Fahrspur zu gewinnen. Es kann in Zukunft z. B. aus der Anzahl und der Größe der detektierten Pflanzen abgeleitet werden, ob die Fahrspur verlassen wurde und im Kamerabereich bereits Pflanzen aus den Reihenkulturen sichtbar sind.

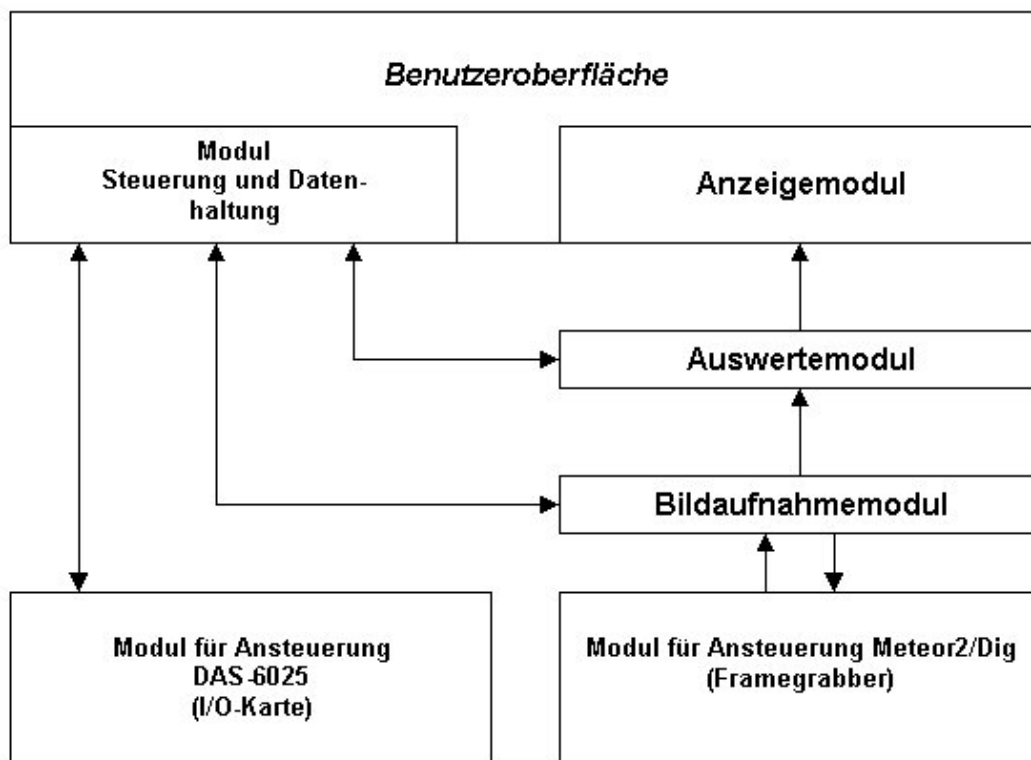
## 3.3.2 Überblick zur Softwarelösung

### 3.3.2.1 Programmaufbau

Die Hardwareeinbindung für den verwendeten Framegrabber Meteor 2 der Firma Matrox Imaging ([www.matrox.com](http://www.matrox.com)) und die I/O-Karte DAS-6025 der Firma Measurement Computing Corp. erfolgt über Treiber und Bibliotheken der jeweiligen Hersteller. Für die Meteor 2/Digital ist dies die Matrox Imaging Library 6.1 (MIL 6.1), die auch eine

große Anzahl der Bildverarbeitungsfunktionen für die notwendigen Auswertungen zur Verfügung stellt. Für die DAS-6025 ist es die Universal Library 5.33, die auch eine direkte Parametrierung und Steuerung der I/O-Karte erlaubt.

Das Programm „Beikraut“ ist modular aufgebaut. Die einzelnen Programmmodule sind über den Programmrahmen fest miteinander verbunden. Die Kommunikation zwischen den Modulen erfolgt über interne Schnittstellen. Die verwendeten Module und ihre Verknüpfung untereinander gehen aus **Bild 33** hervor.



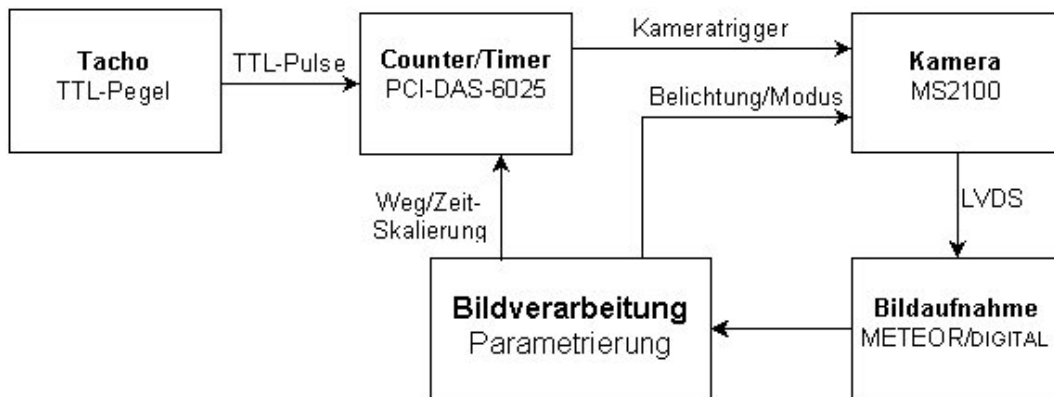
**Bild 33:** Verknüpfung der Module des Programms „Beikraut“

### 3.3.2.2 Verschaltung der Komponenten

Der Zählereingang CTR1\_CLK der DAS-6025 (Pin 93) wird mit dem Impulsgeberausgang (Tachometer) des Traktors verbunden. Am Zählerausgang CTR1\_OUT der DAS-6025 (Pin 95) kann die Bildaufnahmefrequenz abgenommen werden. CTR1\_OUT wird zum Triggern der Kamera verwendet. Die Bildaufnahmefrequenz wird dabei durch Konfiguration (Parametrierung) eines Teilers für den Zählerbaustein bestimmt. Die Parametrierung des Teilers wird von der Bildverarbeitungssoftware vorgenommen.

Der TTL-Eingang PORT\_A0 der DAS-6025 (Pin 51) wird mit dem Sensor für die Messstrecke verbunden. Ist der Port gesetzt (High) bedeutet dies: Messung durchführen.

**Bild 34** stellt den Informationsfluss zwischen den Komponenten schematisch dar.



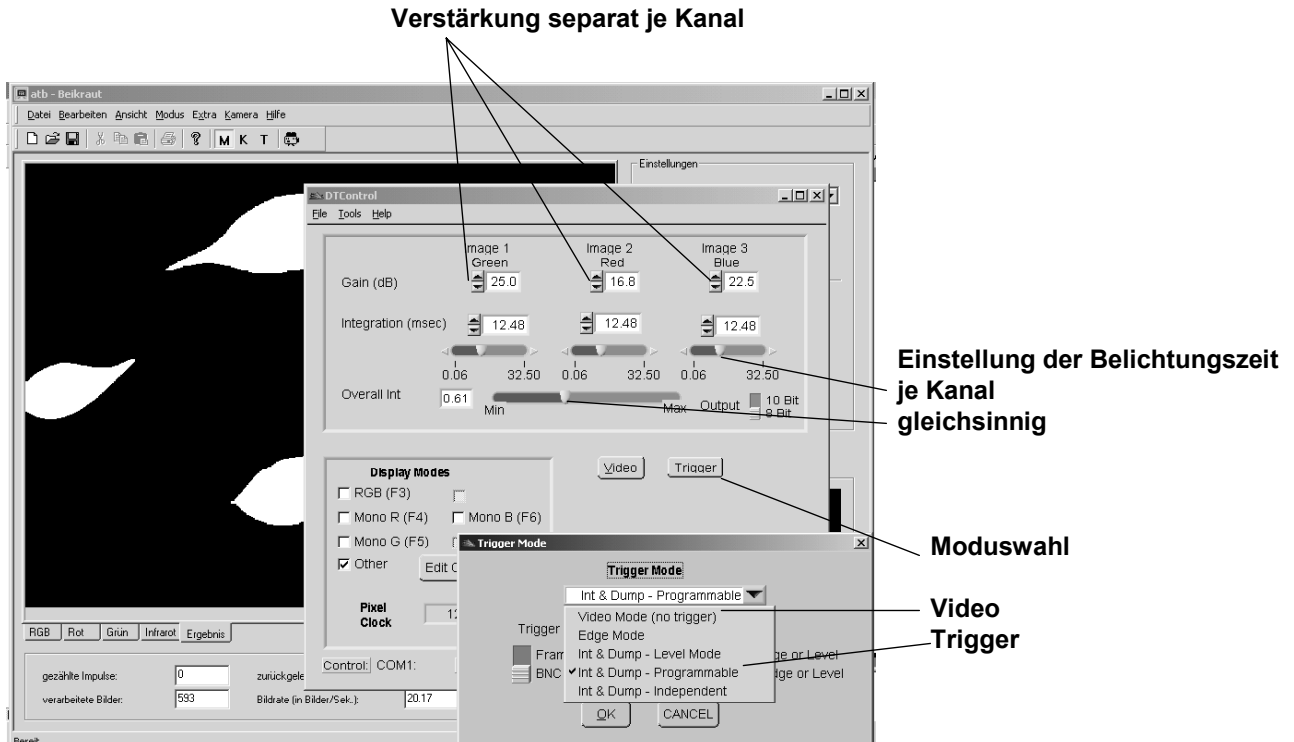
**Bild 34:** Informationsfluss zwischen den Komponenten

### 3.3.3 Benutzeroberfläche

Über die Benutzeroberfläche erfolgt die Kamerasteuerung, die Wahl der verschiedenen Programmmodi sowie die Verfolgung und Kontrolle der Aufnahmen und der Messwerte. Im Fenster DT Control (**Bild 35**) wird die Verstärkung eingestellt, separat für jeden der 3 Farbkanäle im Bereich 0...30 dB. Die Belichtungszeit kann separat für jeden Kanal oder gleichsinnig über einen gemeinsamen Regler kontrolliert werden. Über den Button „Trigger“ wird die Aufnahmeart gewählt. Im Video-Modus erfolgt die Anzeige der Bilder mit maximaler Bildfrequenz (ca. 20 fps), im Triggermodus wird jedes zweite Bild dargestellt. Im Bildfenster können Darstellungen als Summenbild (RGB), ein separater Farbkanal (Rot, Grün, IR) oder das Ergebnisbild angezeigt werden (**Bild 36**).

Das Ergebnisbild wird bestimmt durch die Auswertemethode und die Binarisierungsschwelle. Die Auswertung kann nach folgenden Beziehungen erfolgen:

- IR/Rot
- (IR/Rot)+(Grün/Rot)
- IR-Rot
- Grün-Rot
- (IR-Rot)+(Grün-Rot)
- (IR-Rot)/(IR+Rot)



**Bild 35:** Kamerasteuerung über DT Control



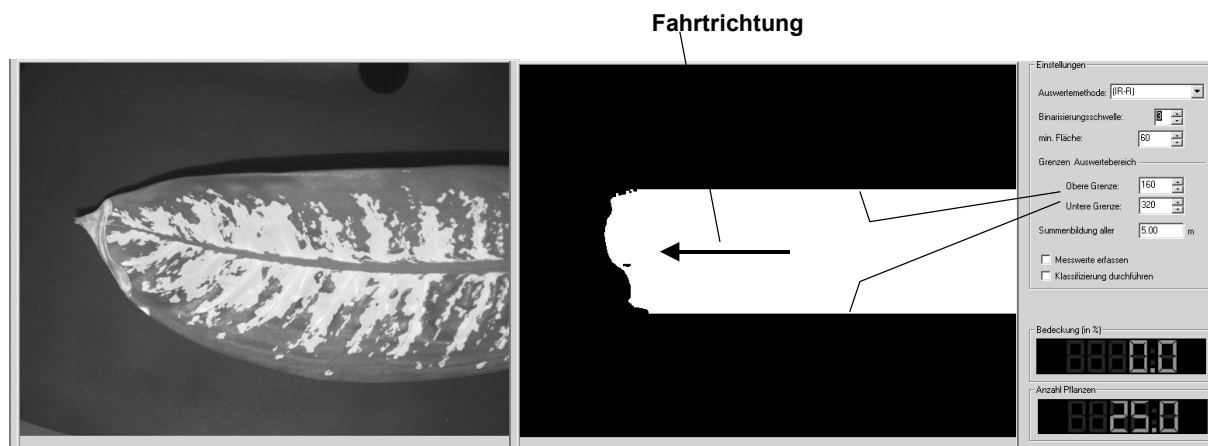
**Bild 36:** Beispiele für die Auswahl der Bildanzeige

Vor dem Messvorgang muss eine Kalibrierung des Wegsignals erfolgen, damit die Bildfolge entsprechend der Bildgröße dem zurückgelegten Weg (Teilung Triggersignal) zugeordnet werden kann (**Bild 37**).



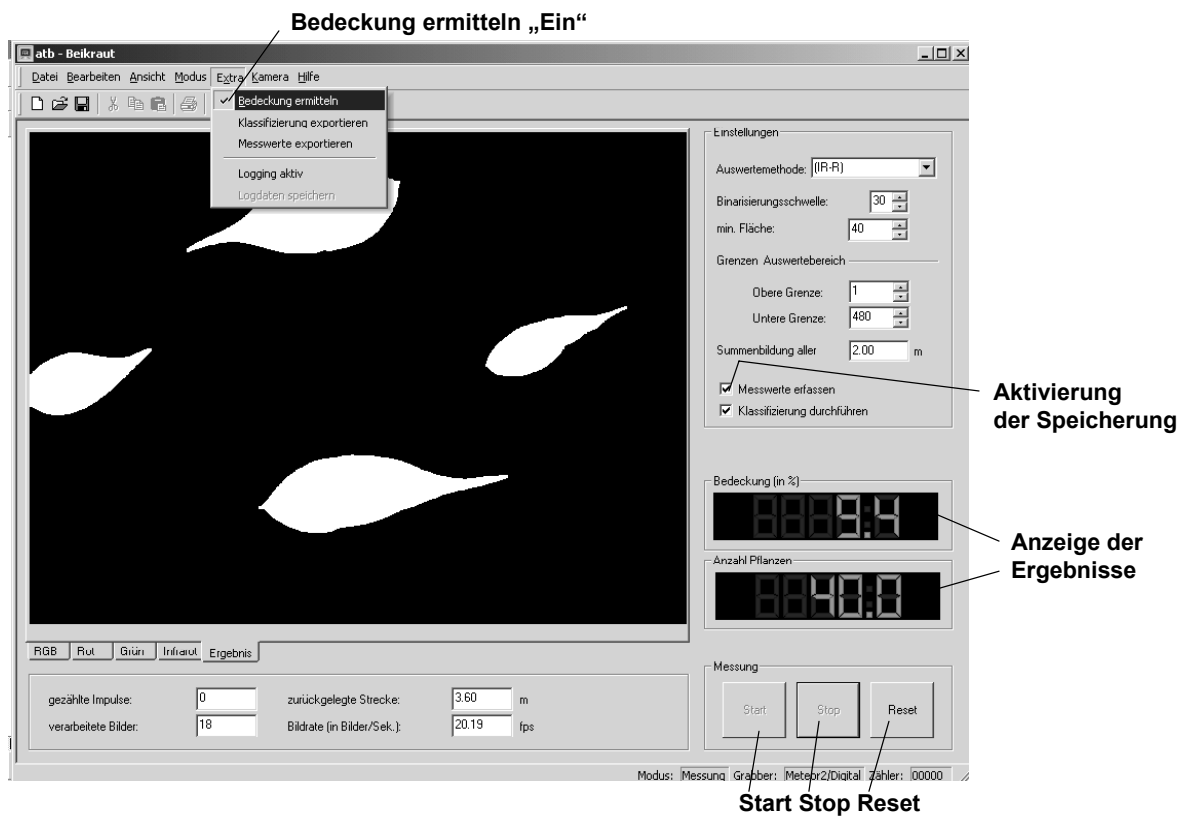
**Bild 37:** Fenster zur Kalibrierung des Wegsignals

Entsprechend der zu wählenden Detektionsbreite kann der Auswertebereich (als Teilbereich der vertikalen Pixelanzahl) kontinuierlich eingestellt werden (**Bild 38**).



**Bild 38:** Festlegung des Auswertebereiches

Die auf dem Bildschirm dargestellten Funktionselemente sind verständlich und weitestgehend selbsterklärend (**Bild 39**). So wird im Modus „Messen“ mit den Buttons „Start/ Stop“ der Messvorgang ausgelöst und beendet. Die Messwerte werden angezeigt und, falls die Häkchen bei „Messwerte erfassen“ und „Klassierung durchführen“ gesetzt sind, können die Ergebnisse im Ordner Daten gespeichert werden. Dazu erfolgt noch eine Aufforderung nach einem „Reset“, das vor jeder neuen Messung erforderlich ist.



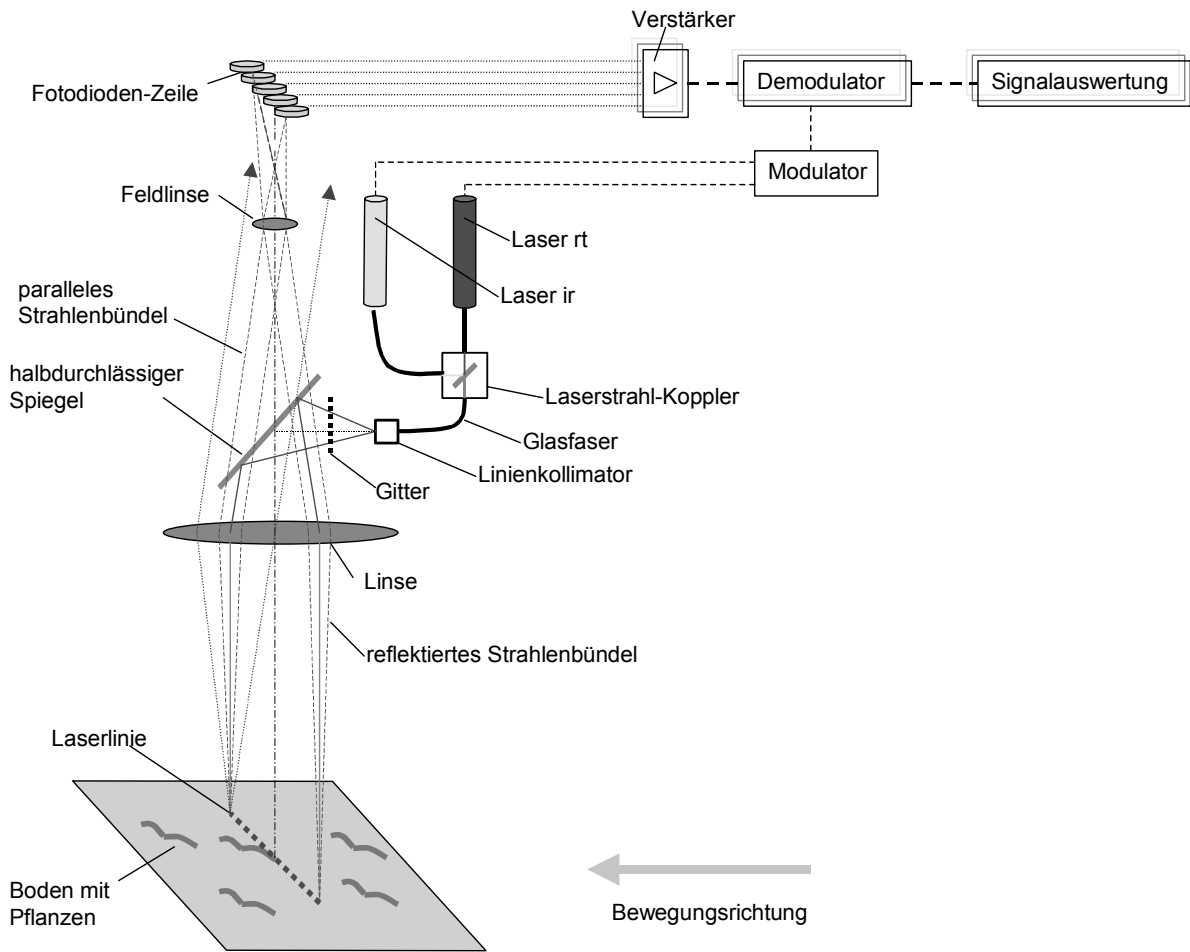
**Bild 39:** Funktionselemente und Anzeigen

### 3.4 Weiterentwicklung des Lasersensors

Die Weiterentwicklung des Lasersensors führte zu einer Lösung, die den wesentlichen Nachteil des Prinzipmusters nicht mehr aufwies: die fehlerhafte Unkrautdetektion auf gemulchten Flächen. Das Schema dieser weiterentwickelten Variante ist im **Bild 40** dargestellt.

Der offensichtlichste Unterschied zum Vormodell besteht darin, dass nur je ein Laser für Rot und Infrarot erforderlich ist. Das Licht dieser beiden Laser wird mit Hilfe eines Kopplers in einer Glasfaser vereinigt und als unterbrochene Linie in die optische Achse des Sensors eingespiegelt. Dazu wird die vom Linienkollimator erzeugte Laserlinie durch ein Gitter geleitet und als Punktlinie auf den Boden projiziert. Das von den Bildpunkten reflektierte Licht wird über eine telezentrische Optik, z. B. auf einer Fotodiodezeile, ortsfest abgebildet. Um die Spektralanteile vom Rot und Infrarot im Empfänger zu trennen, wird das mit verschiedenen Frequenzen modulierte Laserlicht elektronisch gefiltert.





**Bild 40:** Unkrautsensor mit Laserlinie und telezentrischem Strahlengang

Im Labor wurde die Funktion des optischen Teils dieses Prinzips nachgewiesen. Zu diesem Zweck wurde das System auf einer optischen Bank aufgebaut. Für die Beleuchtung wurde nur ein roter Laser verwendet. Mit den Abmessungen der Gitterlinien konnte die Anzahl und Größe der Bildpunkte frei bestimmt werden. Es wurde ein objektseitiger telezentrischer Strahlengang mit einer Brennweite von 20 cm realisiert. Als Empfänger diente eine Farbkamera ohne Objektiv. In einem weiten Bereich von ca. 50 cm konnte die ortsfeste Abbildung der Punkte nachgewiesen werden. Auf Grund der Abhängigkeit von der Entfernung verändert sich die Größe der Streukreise. Dies hat eine Begrenzung der Auswertemöglichkeit zur Folge, die den Schärfentiefebereich bestimmt. Bei einem Objektstand von 40 cm betrug die Schärfentiefe mindestens  $\pm 10$  cm.

Die durch diese Untersuchungen gewonnenen Erkenntnisse über die optischen Parameter und deren Abhängigkeiten wurden konstruktiv umgesetzt. Die Anordnung weist wesentliche neue Merkmale und Vorteile zum Stand der Technik auf und wurde durch eine Patentanmeldung geschützt (AZ 103 02 579.0).

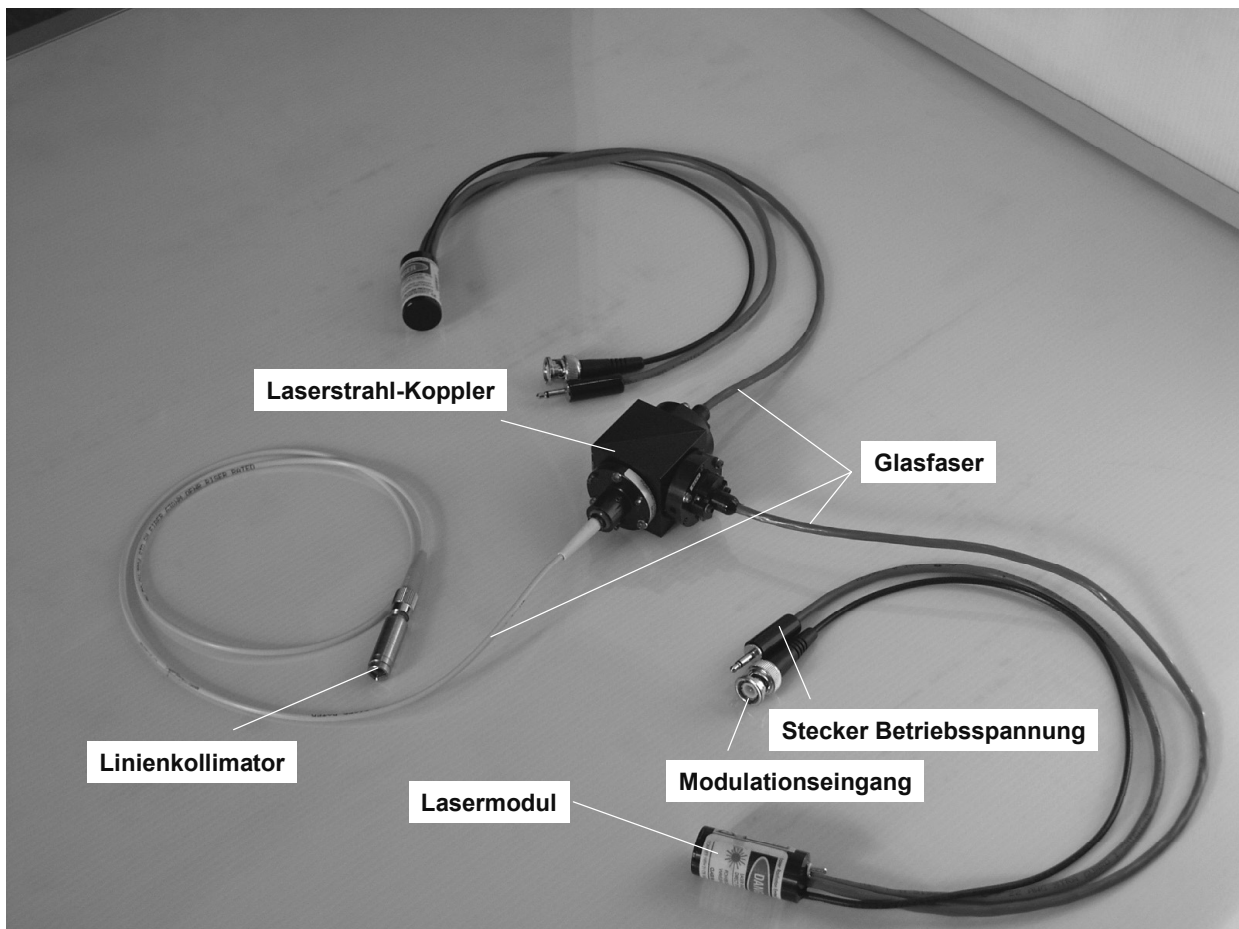
Die für den Sensor vorgesehene Baugruppe Laserbeleuchtung ist im **Bild 41** abgebildet. Sie besteht aus den beiden Lasermodulen Rot und Infrarot, dem Faserpigtail, der

Koppeleinheit und dem fokussierbaren Kollimator. Die Laser haben folgende technischen Daten:

Wellenlänge (Rot, 660 nm) mit Leistung 50 mW, bei externem Kollimator. 18,2 mW

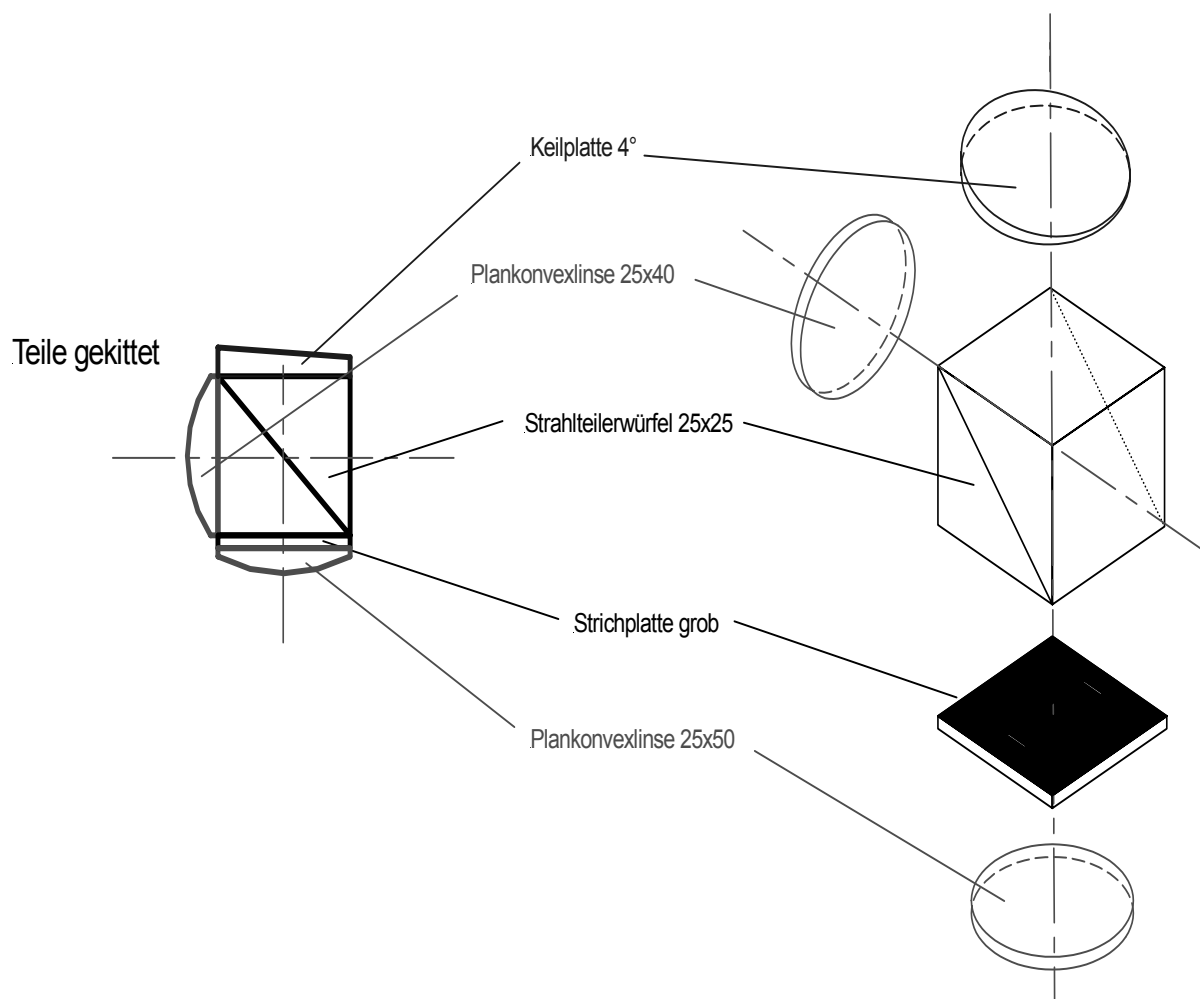
Wellenlänge (IR, 785 nm) mit Leistung 70 mW, bei externem Kollimator. 24,2 mW

Bei der Dimensionierung der Laser wurde berücksichtigt, dass beim Einkoppeln in die Faser sowie beim Einspiegeln am Strahlteiler Verluste auftreten, die die Ausgangsleistung am Kollimator erheblich reduzieren.



**Bild 41:** Baugruppe Laserbeleuchtung

Ein Prinzipmuster dieses Sensors mit objektseitig telezentrischem Strahlengang wurde in den mechanischen und optischen Komponenten fertiggestellt. Das eingesetzte Objektiv (Sammellinse) ermöglicht eine Detektionsbreite von 120 cm bei einem Sensorabstand von 30 bis 50 cm. Der Strahlengang, die Anordnung der optischen Komponenten sowie die Anforderungen an die Robustheit bedingen relativ große Abmessungen des Gehäuses (ca. 400x310x180 mm). Für vergleichende Funktionsuntersuchungen wurde ein weiteres Muster mit bildseitig telezentrischem Strahlengang entworfen und gefertigt, für das die gleichen Baugruppen Laserbeleuchtung und Strahlteiler-Block eingesetzt werden können (**Bild 42**).



**Bild 42:** Kompakter Strahlteiler-Block, als Kittgruppe ausgeführt

Im Verlaufe der Themenbearbeitung, die eine zu breite Untersuchung unterschiedlicher Lösungswege aus Kapazitätsgründen nicht ermöglichte, wurde beim dargestellten Entwicklungsstand eine Einstellung der Arbeiten zum Lasersensor beschlossen und die zur verfügbaren Entwicklungskapazitäten auf das Messsystem mit Multispektralkamera konzentriert.

## 4 Versuchsdurchführung und Ergebnisse

### 4.1 Aufbau der Versuche

#### 4.1.1 Laboraufbau zum ImSpector -System

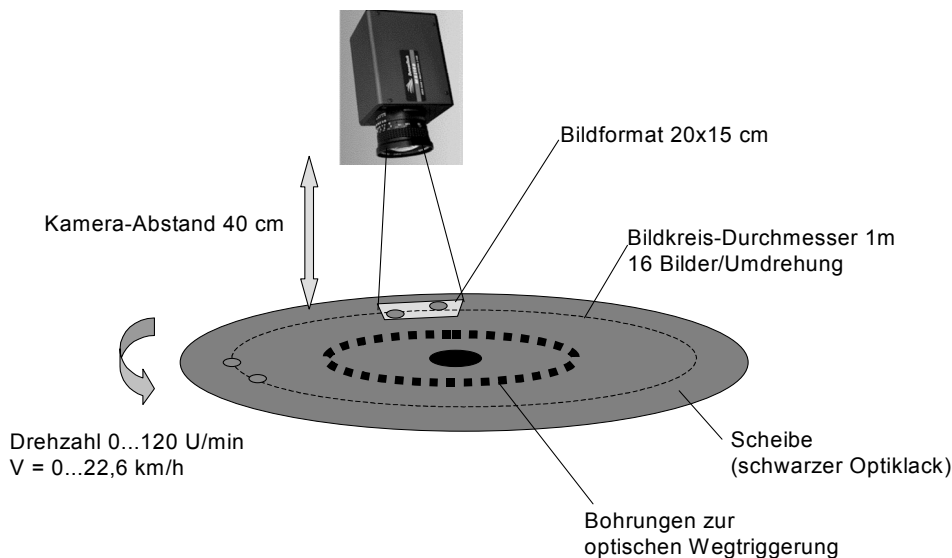
Bild 21 (siehe S. 27) zeigt den experimentellen Aufbau für die Untersuchungen mit dem ImSpector-System. Mit der selbst entwickelten Software WeedControl wird die Datenkommunikation zwischen dem PC und der Kamera gesteuert. Weiterhin werden die Einstellungen der Kamera, die Bildverarbeitung, die Einrechnung der Position (Drehgeber) und die Ansteuerung eines Aktors kontrolliert. Für Experimentierzwecke können Parameter und Grafiken über ein User-Interface verändert werden. Beispielsweise kann

die Auflösung der Kamera per Software eingestellt oder eine andere Wellenlängen zur Analyse verwendet werden.

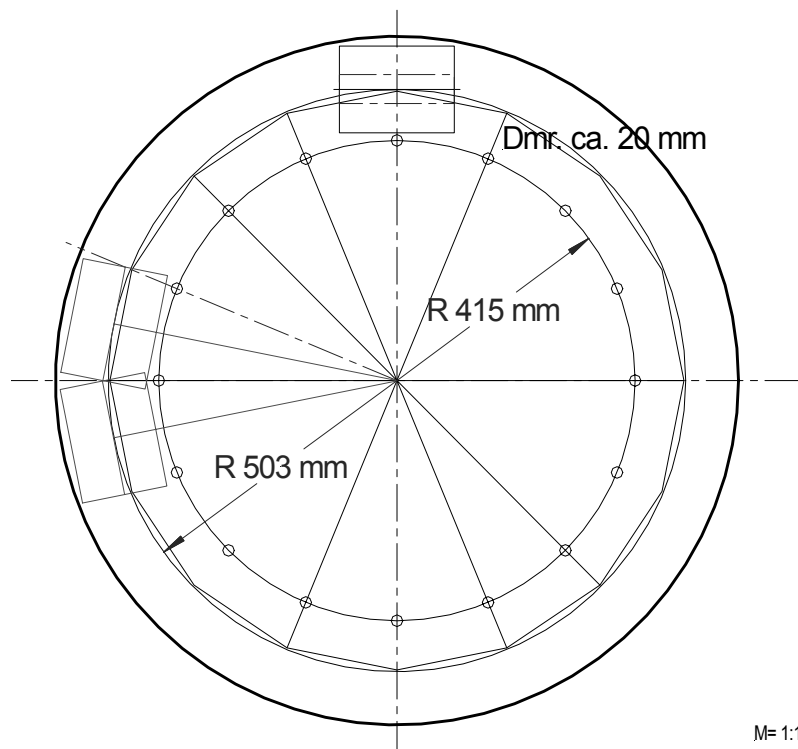
Mit der Methode des Spectral Imaging konnten mit den Versuchsaufbauten und der selbst entwickelten Systemtechnik erste erfolgreiche Feldexperimente zur Flächenbelegung von Unkraut durchgeführt werden. Das System ermöglicht hohe Empfindlichkeiten (Messfleck typisch 1-2 mm Durchmesser) auch bei Geschwindigkeiten im Bereich von 10 km/h. Das System zeichnet sich insbesondere durch eine hohe Flexibilität aus: In Abhängigkeit von sich ändernden äußeren Randbedingungen (z.B. Änderung des zu erfassenden Bereichs oder der spektralen Signaturen) können Systemparameter via Software geändert werden. Hierzu zählen beispielsweise die Änderung der Kameraauflösung oder die Auswertung anderer Wellenlängen. Die Kosten des Gesamtsystems liegen – ohne weitere Optimierung – bei ca. 8000 €. Die technischen Voraussetzungen zur Entwicklung und Erprobung eines Prototyps zur online-Messung der Flächenbelegung von Pflanzenkulturen sind mit diesen Entwicklungen gegeben.

#### 4.1.2 Laboraufbau zur Multispektralkamera

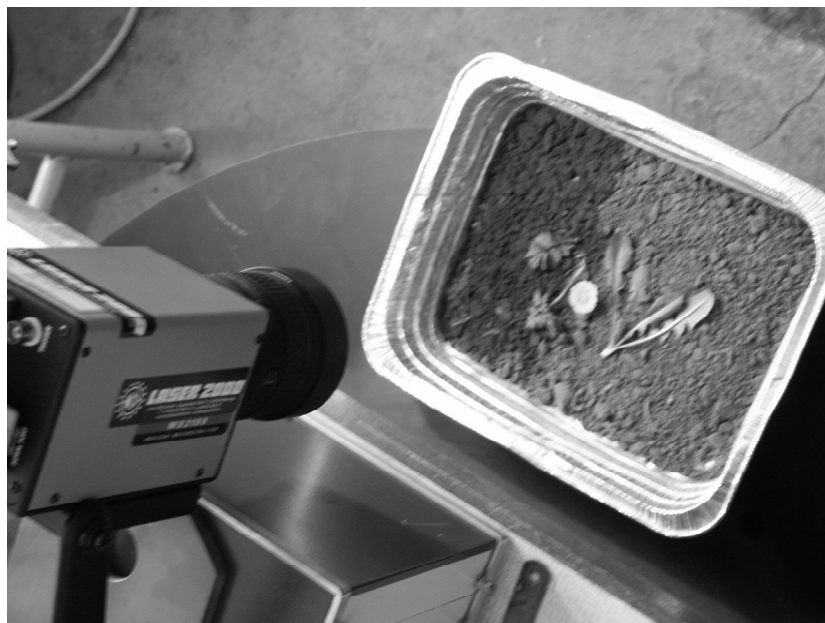
Um den Umgang mit der Multispektralkamera und ihre Handhabung kennen zu lernen, sowie zum Testen der Software und zum Nachweis der Kamerafunktion, wurde ein Laborprüfstand errichtet. Er besteht aus einer horizontal angeordneten kreisförmigen Platte, über der die Kamera in einem veränderlichen Abstand so angebracht ist, dass deren optische Achse auf einem bestimmten Teilkreis liegt (**Bild 43** und **44**).



**Bild 43:** Schema des Laborprüfstandes



**Bild 44:** Skizze der Platte



**Bild 45:** Laborprüfstand mit Multispektralkamera und Pflanzenschale

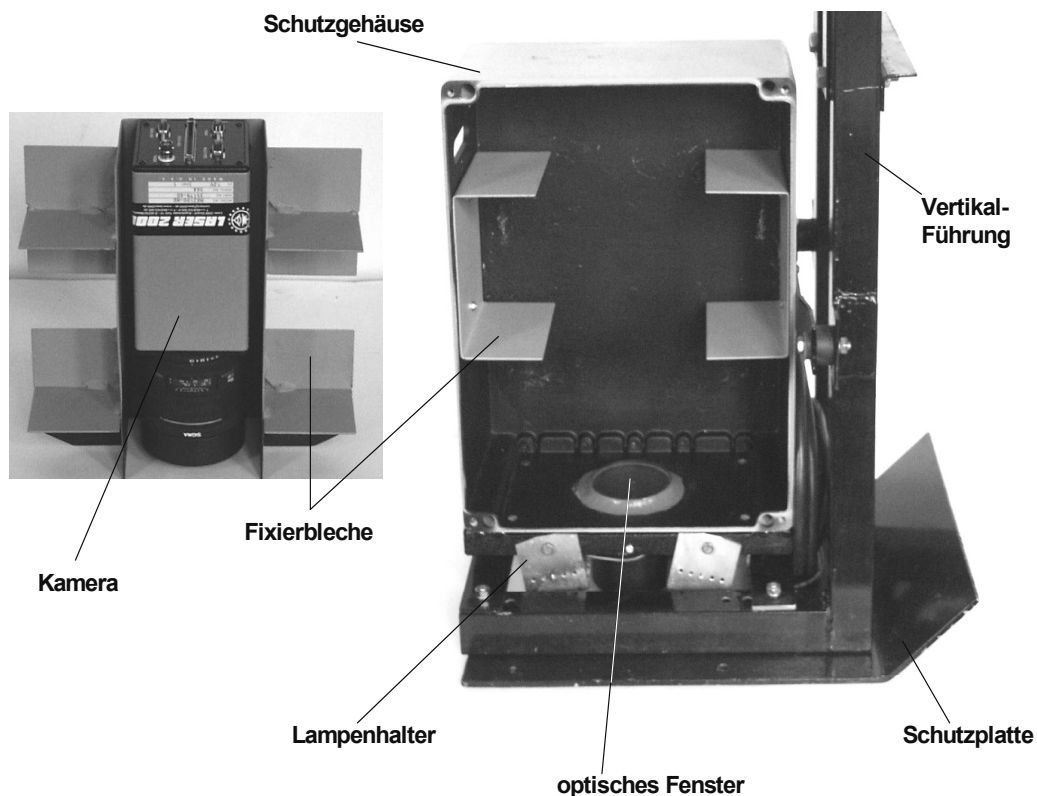
Auf einem Teilkreisradius von 503 mm können genau 16 Quadrate mit einer Länge von 20 cm aneinander gereiht werden (entsprechend Bildgröße  $L \times B = 20 \times 15$  cm). Mit symmetrischer Teilung sind 16 Bohrungen auf einem Radius von 415 mm eingebracht. Diese dienen zusammen mit einem optischen Näherungssensor zur Triggerung der Kamera. Die Platte kann mit einem thyristorgesteuerten Getriebemotor in Drehung ver-

setzt werden. Die Drehzahl wird über die umgerichtete Frequenz stufenlos eingestellt und ermöglicht die Simulation einer Fahrgeschwindigkeit bis ca. 23 km/h. Auf der Platte können Untersuchungsobjekte (Pflanzen, Stroh) befestigt werden. Zur Objektbeleuchtung dient eine normale Glühlampe 200 W oder ein Spotlight mit 60W. **Bild 45** zeigt den Laborprüfstand mit Blick auf die Kamera und eine Versuchsschale, eine Anordnung für Untersuchungen im Stand.

#### 4.1.3 Vorrichtungen für den Feldeinsatz

##### 4.1.3.1 Schutzgehäuse

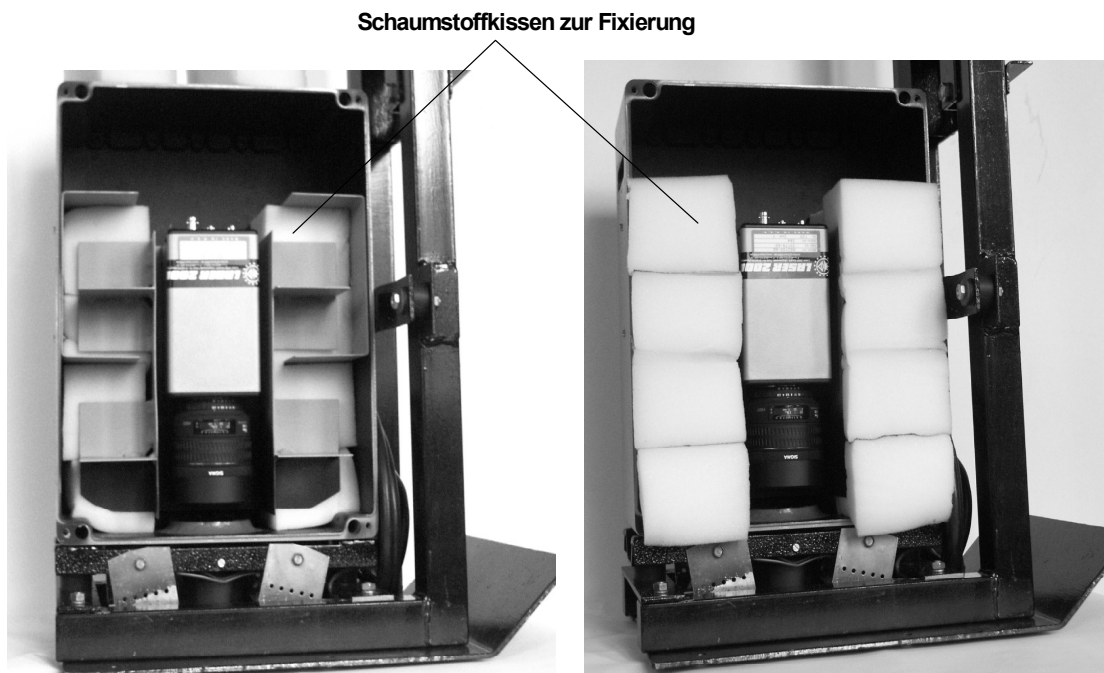
Aus den Erfahrungen der Einsatzuntersuchungen mit den Prinzipmustern ist bekannt, welchen hohen mechanischen Belastungen ein am Traktor angebauter Sensor ausgesetzt sein kann. Diese treten im allgemeinen nicht während der normalen Mess- oder Applikationsfahrten auf, sondern meistens bei Fahrten von der und zur Einsatzstelle auf schlechten Feldwegen, wo aus Zeitgründen auch oft mit zu hoher Geschwindigkeit gefahren wird. Dabei werden Hindernisse oder Querrinnen oft nicht oder zu spät erkannt und es kommt zu hohen Beschleunigungsspitzen.



**Bild 46:** Kamera und Schutzgehäuse mit Fixierblechen

Um die hochwertige Multispektralkamera optimal zu schützen, wurde sie vibrationsgedämpft in einem stabilen Gehäuse eingebaut und am Fahrzeug schwingungsgedämpft befestigt. Als Gehäuse dient ein spritzwassergeschütztes Alu-Standardgehäuse (Bern-

stein, Typ CA-460). An der Kamera und im Gehäuse sind Fixierbleche so angebracht (**Bild 46**), dass die Kamera lagestabil in weichem Schaumstoff eingebettet werden konnte. Die zwischen die Fixierbleche geschobenen quaderförmigen Schaumstoffteile (**Bild 47**) bewirken eine räumliche Schwingungsabsorption im mittleren Frequenzbereich. An der Unterseite des Gehäuses, in der optischen Achse des Objektivs, befindet sich das optische Fenster für den Lichteintritt, an der Stirnseite eine wasserdichte Kabeleinführung.



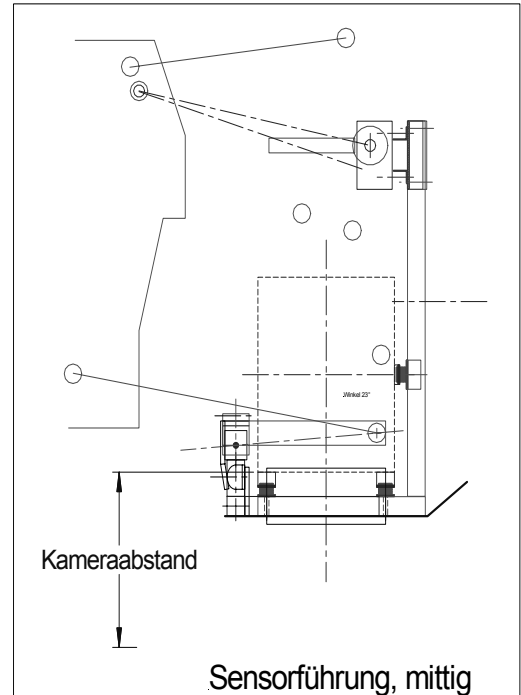
**Bild 47:** Lagestabile Fixierung der Kamera in Schaumstoff

#### 4.1.3.2 Schwingungsschutz

Zur Minderung der durch Fahrschwingungen eingeleiteten Schwingungsbelastung der Kamera wurden zwei Varianten für gefederte Aufhängungen gebaut. Eine Variante dient der mittigen Anordnung der Kamera an der Front des Traktors, die zweite ermöglicht die Führung der Kamera über der Regelspur vor dem Vorderrad. Beide Aufhängungen sind für den frontseitigen Dreipunktbau ausgelegt. Als Federelemente wurden jeweils parabolische Gummipuffer eingesetzt, die eine gewisse Eigendämpfung aufweisen und mit denen eine vertretbare Eigenfrequenz von etwa 2,5 Hz erreicht werden konnte. Für beide Varianten liegen detaillierte Zeichnungen vor. **Bild 48** zeigt die Aufhängung vorn mittig an einem Traktor montiert.

Eine mittige Kameraanordnung ist erforderlich zum Nachweis der Funktion der Kamera. In dieser Position ist das wiederholte Befahren von Streckenabschnitten möglich, ohne Beeinflussung der Detektionsspur. Dies ist die Voraussetzung zur Beurteilung der Erkennungssicherheit der Kamera bei verschiedenen Fahrgeschwindigkeiten, unter-

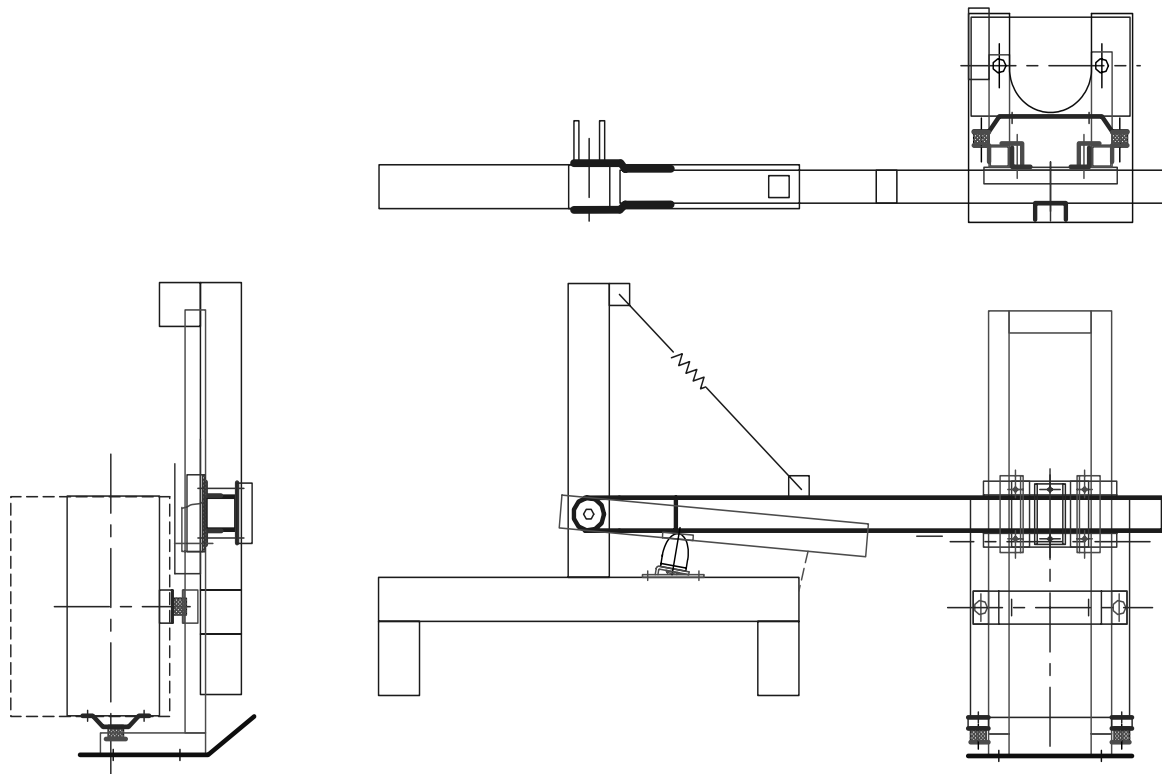
schiedlichen Beleuchtungsverhältnissen und variierten Einstellungen (Abstand, Belichtungszeit, Blende, Auswertemodus).



**Bild 48:** Seitenansicht der mittigen Sensorführung

Die Aufhängung zur Führung der Kamera über der Regelspur ist so ausgelegt, dass sowohl die Einstellung der Spurweite als auch der Kamerahöhe variabel sind. Dazu kann die Baugruppe „vertikale Führung“ senkrecht und waagrecht am Querbalken verschoben werden (**Bild 49**). Diese Baugruppe ist mit wenig Aufwand vom Querbalken zu lösen und kann, an der gefederten Schwinge befestigt, die mittige Aufhängung bilden.

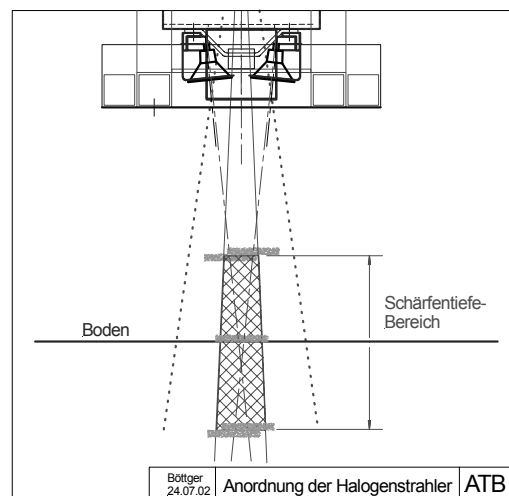




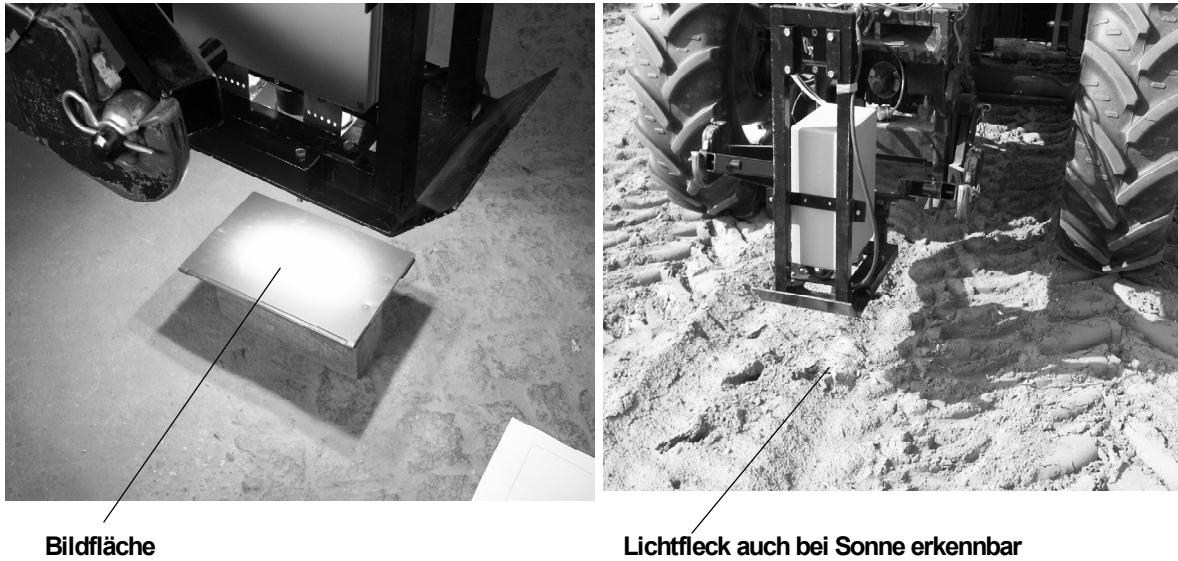
**Bild 49:** Zeichnung der Sensorführung über der Regelspur

#### 4.1.4 Beleuchtung, Triggerung

Unter Prüfstandbedingungen war eine problemlose Kamerasteuerung mit Lichtleistungen zur Beleuchtung der Aufnahme­fläche von 60 bis 200 Watt (normale Glühlampen) möglich. Unter praktischen Einsatzbedingungen muss gewährleistet sein, dass starkes Fremdlicht (Sonne) ohne Einfluss auf die Erkennungssicherheit ist. Deshalb wurde eine Beleuchtungseinrichtung installiert, die aus 4 Halogenspots 12 V, 50 W besteht.



**Bild 50:** Beleuchtungseinrichtung, Lichtkegel fokussiert



Bildfläche

Lichtfleck auch bei Sonne erkennbar

**Bild 51:** Ausleuchtung der Bildfläche

Diese Leistung von 200 W kann von der elektrischen Anlage des Traktors noch problemlos zusätzlich aufgebracht werden. Die Strahler sind an der Unterseite des Kameragehäuses justierbar angeordnet, so dass das Bildfeld optimal ausgeleuchtet werden kann (**Bilder 50** und **51**).



20 Markierungen zur wegabhängigen Triggerung

Höhe über dem Boden 53 cm

Bildfolge aller 26 cm

**Bild 52:** Zuordnung Triggerung-Kameraabstand

Da die Bildfolge der Kamera wegabhängig gesteuert (getriggert) werden muss, ist softwareseitig eine Kalibrierung des Wegsignals möglich. Damit kann die Impulszahl der in Frage kommenden Impulsgeber (z.B. Inkrementalgeber am Traktorrads) an die erforder-

liche Triggerfrequenz angepasst werden. Wegen eines Defektes der PCI-Karte funktionierte die Impulsteilung nicht. Deshalb wurde eine Möglichkeit geschaffen, die Kamera mit Hilfe eines speziellen Signalgebers direkt anzusteuern (1 Impuls/Bild). 20 Markierungen an der Innenseite des Hinterrades können optisch abgetastet werden. Mit dem Abrollweg von 5,20 m ergibt sich eine Bildlänge von 26 cm, der ein Kameraabstand von 53 cm zuzuordnen ist (**Bild 52**).

#### 4.2 Ergebnisse der Laboruntersuchungen

Die Laboruntersuchungen dienten der Ermittlung der Detektionssicherheit der Kamera bei unterschiedlichen Parametern:

- Kameraeinstellungen, Entfernung, Blende, Belichtungszeit,
- Lichtverhältnisse, Beleuchtung,
- Untergrund, verschiedene Bodenarten, trocken und feucht,
- Pflanzen, Farbe, Struktur,
- Pflanzengröße,
- Störmaterialien, abgestorbene Pflanzenreste, Stroh,
- Objektgeschwindigkeit, Bildrate

Bereits aus einfachen Aufnahmen im Stand lassen sich grundlegende Abbildungs- und Erkennungseigenschaften der Multispektralkamera ableiten. Gegenüber der Abbildung mit einer normalen Digitalkamera, bei der Wert auf eine natürliche Farbwiedergabe gelegt wird, weist das Bild der Multispektralkamera eine Falschfarbendarstellung auf (**Bild 53**). Grüne Pflanzen werden blau dargestellt. Dies ist begründet im Fehlen wesentlicher spektraler Anteile und einer anderen Zuordnung der Farbkanäle.

Entsprechend der spezifischen Reflexion der Pflanzen und der Fensterwirkung der Schmalbandfilter wird pflanzliches Grün im roten Farbkanal dunkel und im infraroten hell abgebildet. Der grüne Farbkanal nimmt eine Mittelstellung ein. Im Ergebnisbild (Binärbild IR-R) wird das Grün weiß dargestellt gegenüber dem schwarzen Untergrund. Die gelbe Löwenzahnblüte, in allen Spektralbildern deutlich sichtbar, erscheint im Ergebnisbild nicht. Beispielhaft zeigen die folgenden Bilder, dass auch abgestorbene Pflanzen (Stroh, Laub) im Binärbild nicht dargestellt werden (**Bild 54**) und unterschiedlicher Untergrund keinen Einfluss auf die Grünerkennung hat (**Bild 55**).

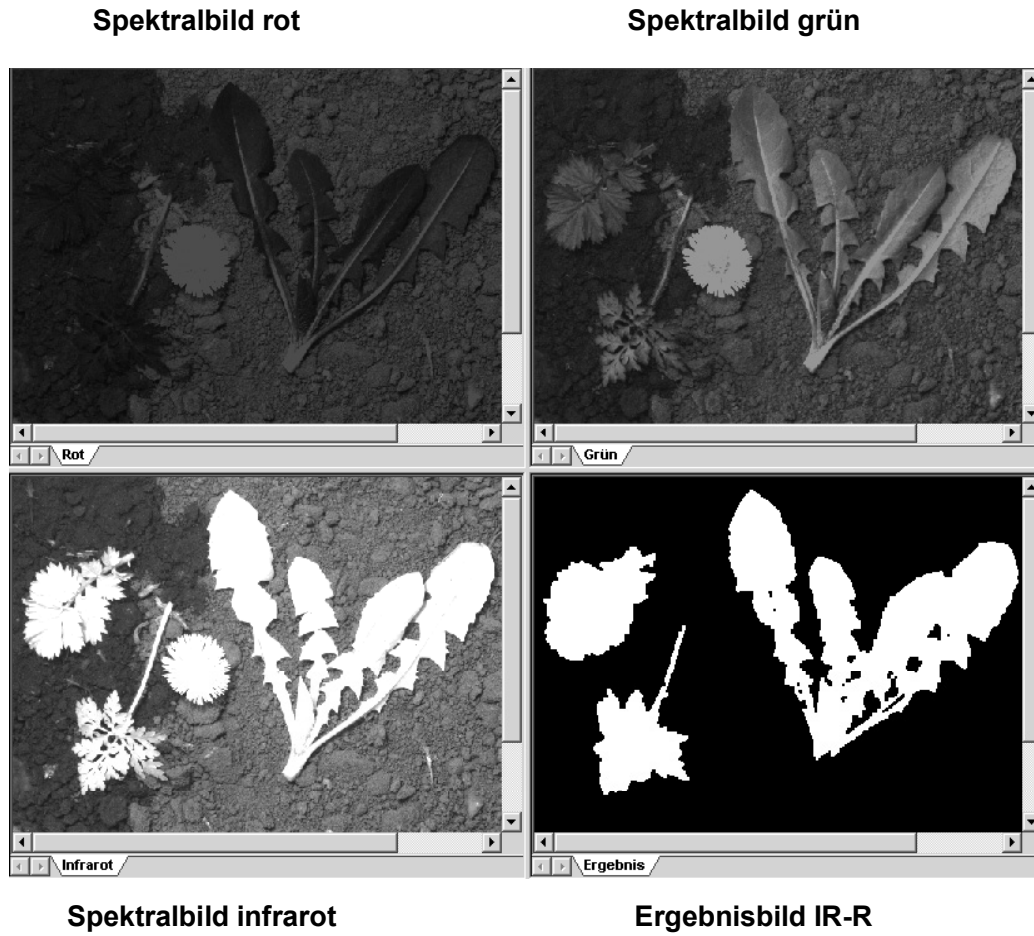


Bild 53: Spektrale Bilder und Ergebnisbild eines Arrangements

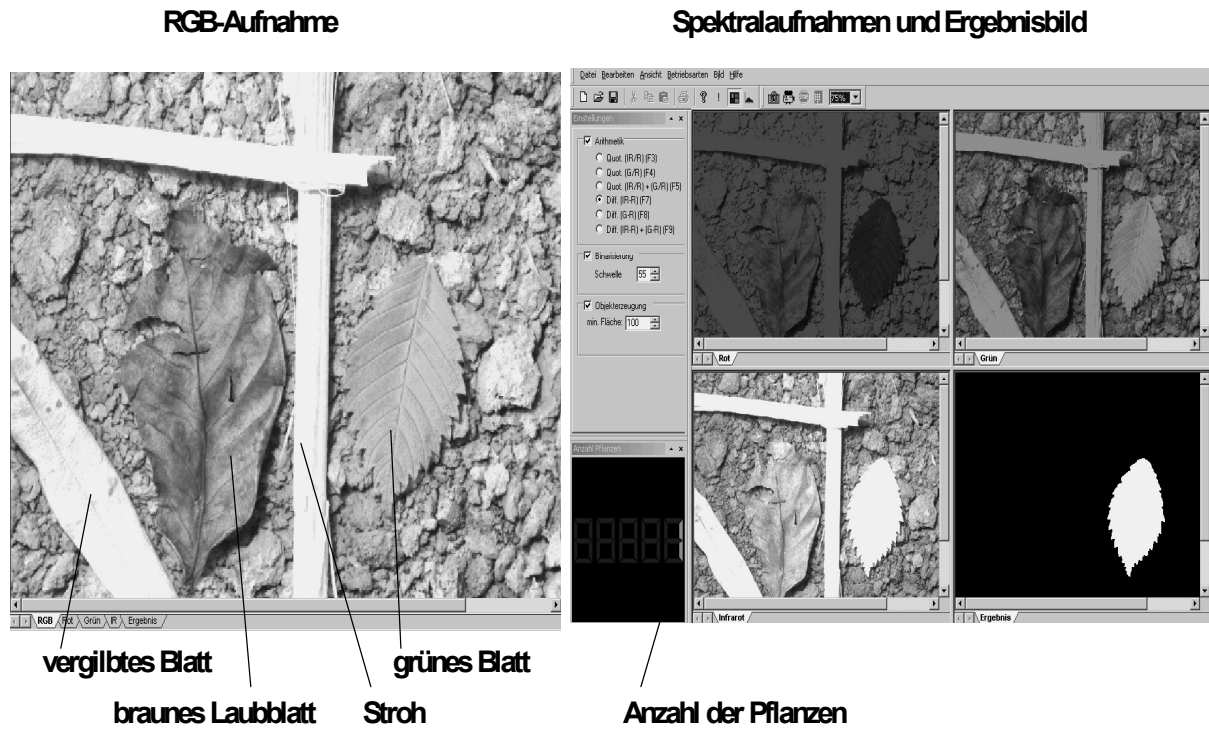
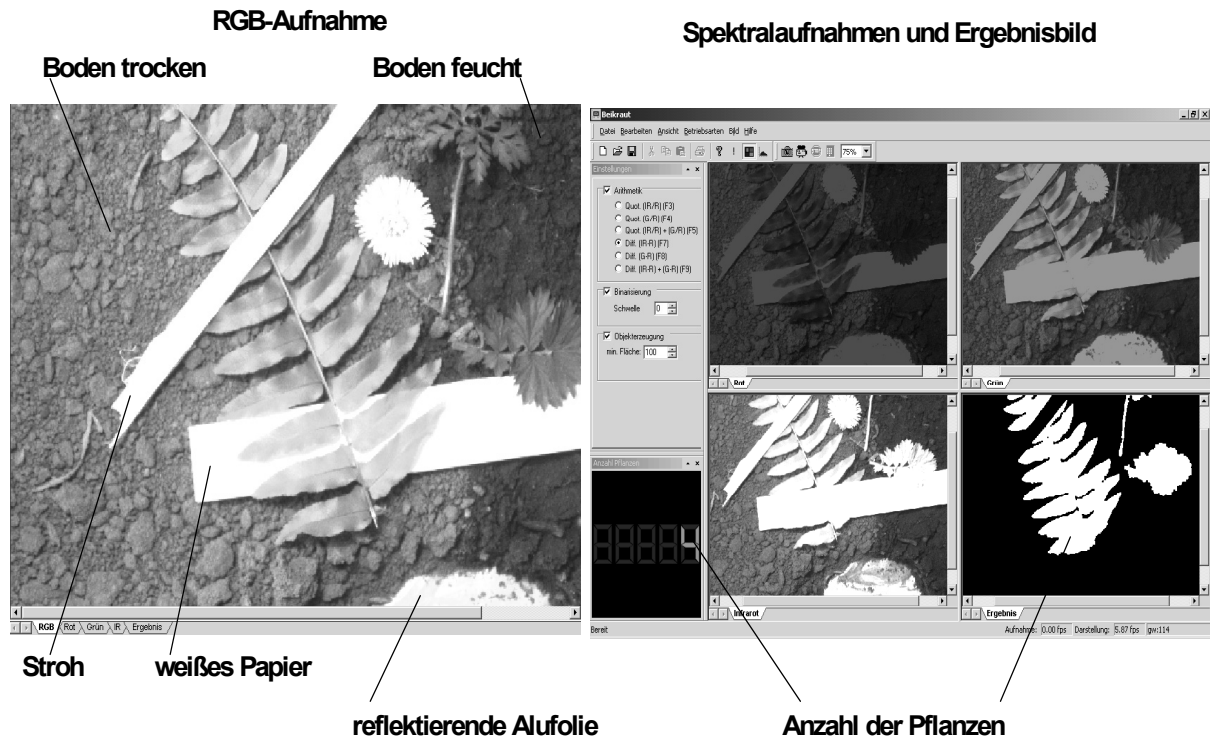
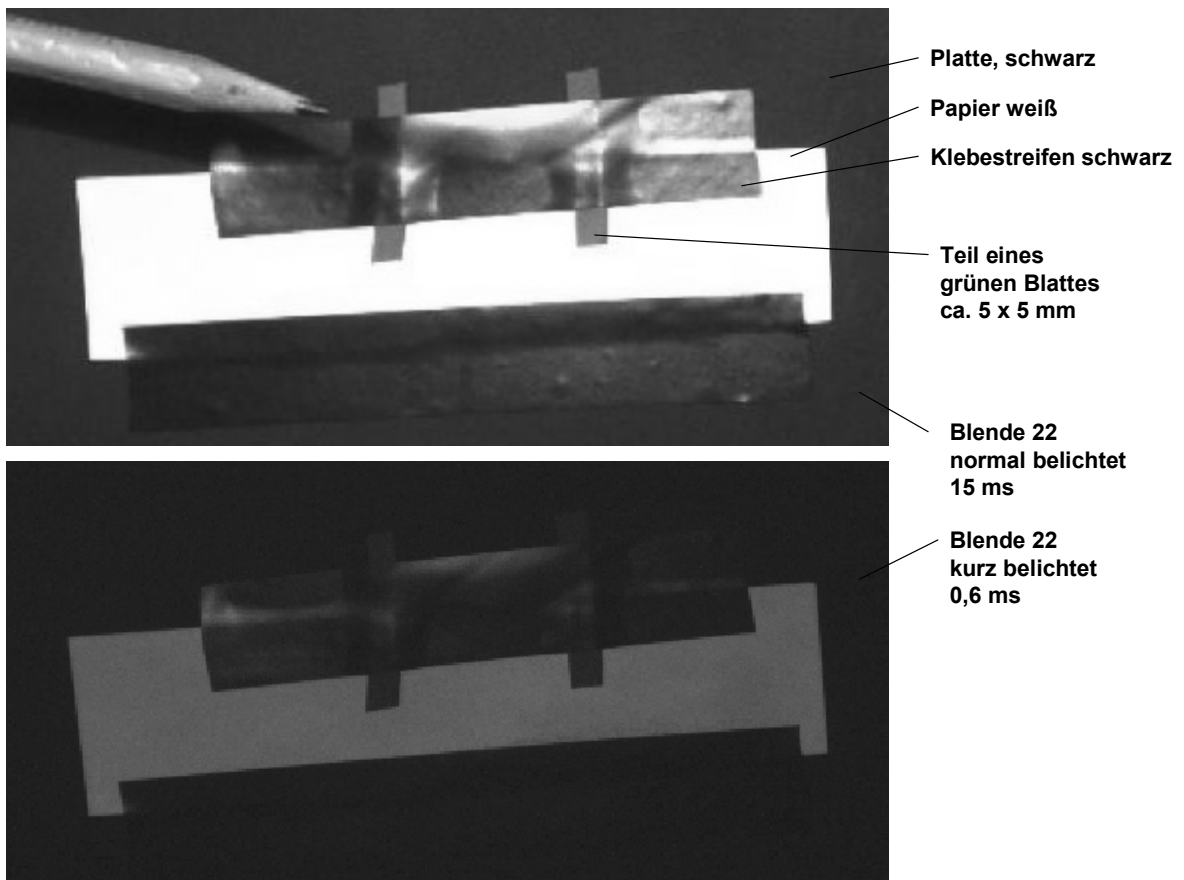


Bild 54: Beispielaufnahme zur Abbildung abgestorbener Pflanzen



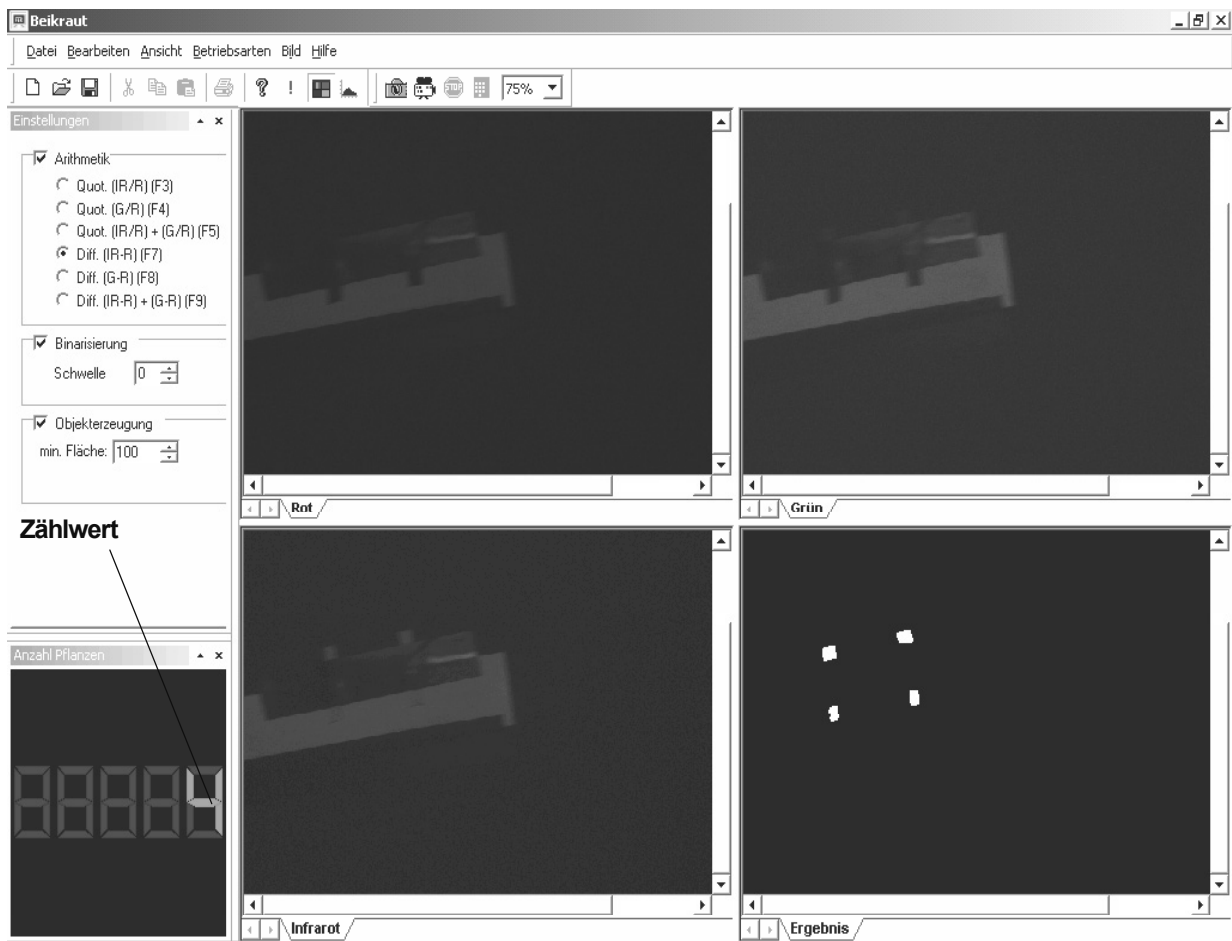
**Bild 55:** Beispielaufnahme zum Einfluss des Untergrundes



**Bild 56:** RGB-Bild von Objekten im Stand bei verschiedenen Belichtungszeiten

Zur Demonstration der Erkennung kleiner Pflanzen bei simulierter Fahrgeschwindigkeit wurden kleine Pflanzenteile auf der drehbaren Prüfstandsplatte angebracht. Im **Bild 56** sind 4 etwa quadratische Blattstücke erkennbar, die zusammen mit einem weißen Papierstreifen mit Hilfe von schwarzen Klebestreifen auf der Platte befestigt wurden.

Um dieses Arrangement im RGB-Bild gut sichtbar zu machen, ist bei maximal geöffneter Blende eine Belichtungszeit von etwa 15 ms erforderlich. Mit dieser Belichtungszeit ist bei schnell bewegten Objekten keine scharfe Abbildung möglich. Die durchgeführten Versuche zeigten, dass bis zu einer Geschwindigkeit von ca. 18 km/h Belichtungszeiten von ca. 0,6 ms notwendig und ausreichend sind. Das untere Teilbild zeigt das gleiche Arrangement bei dieser kurzen Belichtungszeit, beide Aufnahmen erfolgten im Stand. Bei Drehung der Prüfstandsplatte mit einer Geschwindigkeit von 12 km/h entstanden die im **Bild 57** dargestellten Aufnahmen.

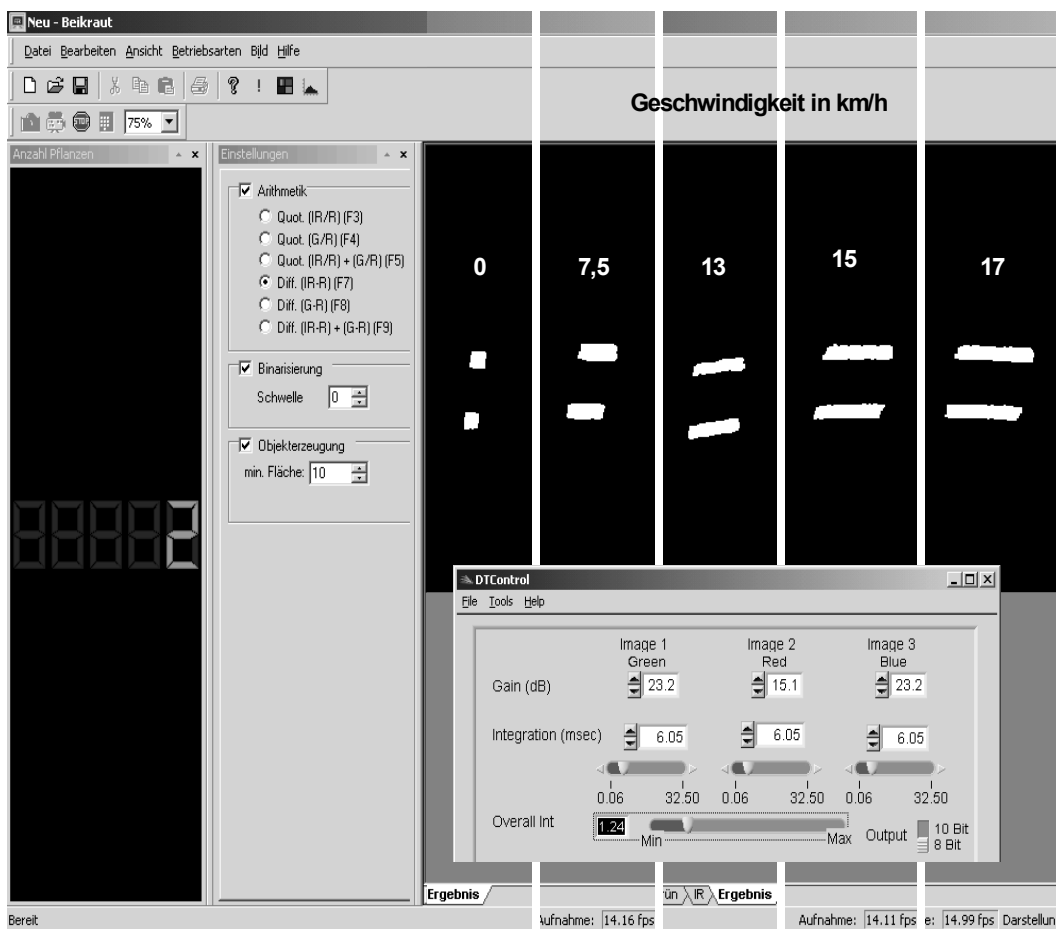


**Bild 57:** Spektral- und Binärbild des Arrangements bei 12 km/h, Belichtungszeit 0,6 ms

Auch hier scheinen die spektralen Einzelbilder völlig unterbelichtet zu sein, ein Erkennen der Umriss eines Teils der Pflanzen ist lediglich im Kontrast gegenüber dem weißen Papier möglich. Trotzdem zeigt das Binärbild eine brillante Abbildung der vier Pflanzenteile. Die Berechnung des Ergebnisbildes erfolgte nach der Beziehung Infrarot–

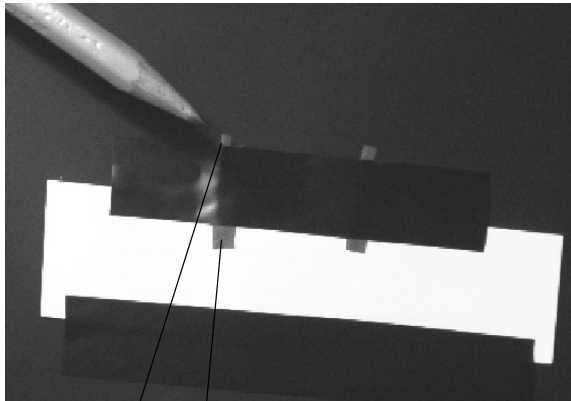
Rot. Es zeigte sich unter allen Versuchsbedingungen am Laborprüfstand und später auch im Feldeinsatz, dass mit dieser Auswertemethode die günstigsten Ergebnisse erzielt werden.

Eine konturgetreue Abbildung der Pflanzenteile im Ergebnisbild ist die Voraussetzung für die richtige Auswertung nach Anzahl und Fläche. Die Belichtungszeit muss deshalb ausreichend kurz gewählt werden. Ist dies nicht der Fall, wird das Bild in Bewegungsrichtung verwischt (**Bild 58**). Unter realen Bedingungen werden frisch aufgelaufene Unkräuter mit dem bloßen Auge erkennbar sein, wenn die Keimblattgröße etwa 2 mm beträgt. Unter Prüfstandbedingungen konnte nachgewiesen werden, dass Pflanzenteile mit den Abmessungen 2x2 mm sicher erkannt, innerhalb der Messstrecke (beliebige Anzahl von Umläufen der rotierenden Platte) richtig gezählt und ihre Fläche in die richtige Größenklasse eingeordnet wird (**Bild 59**).



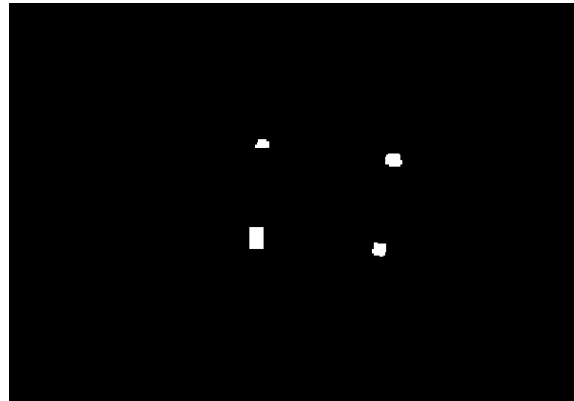
**Bild 58:** Einfluss der Objektgeschwindigkeit auf die Abbildung bei nicht angepasster Belichtungszeit (6 ms)

RGB-Aufnahme im Stand, 15 ms

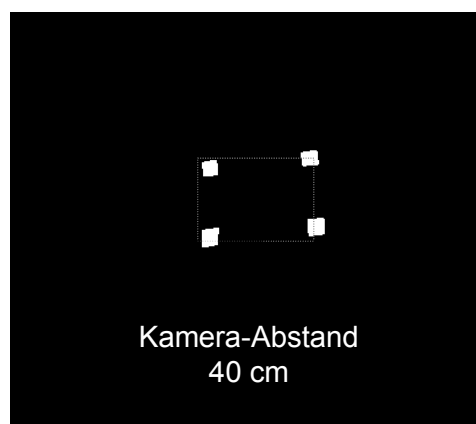
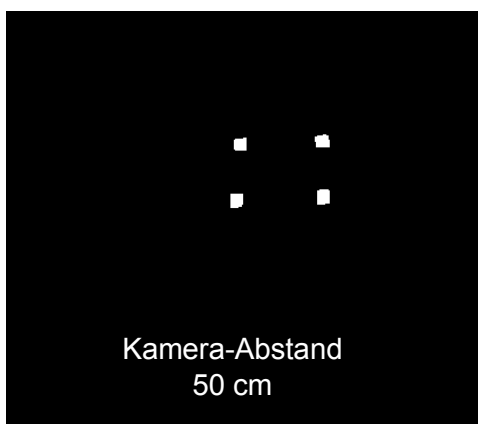
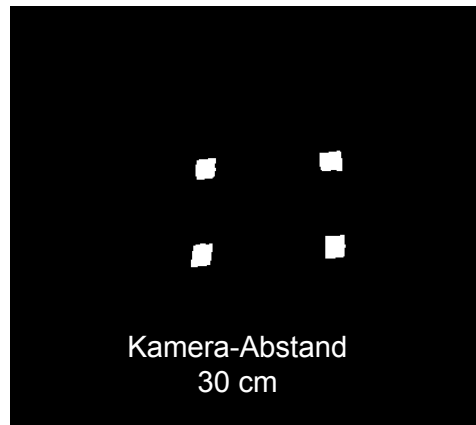
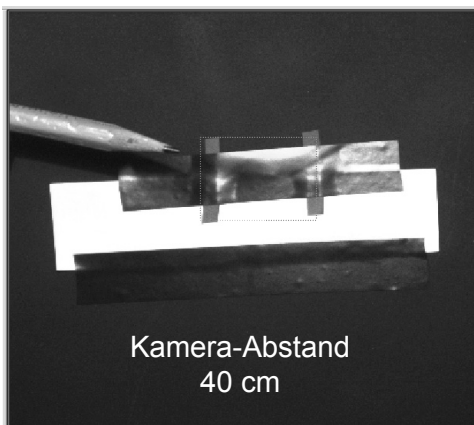


2x2 bis 5x5 mm  
4 Teile eines grünen Blattes

Ergebnisbild, 15 km/h, 0,6 ms



**Bild 59:** Abbildung kleiner Pflanzenteile im Stand und bei 15 km/h



**Bild 60:** Demonstration der Schärfentiefe

Von besonderer Bedeutung für den Einsatz der Kamera unter praktischen Einsatzbedingungen ist ein ausreichend großer Schärfentiefebereich. Es muss gewährleistet sein, dass Abstandsänderungen durch natürliche Bodenunebenheiten, durch Fahrschwin-



gungen des Trägerfahrzeuges oder auf Grund von Spurrinnen nicht zu einer unscharfen Abbildung führen. Entsprechende Untersuchungen haben gezeigt, dass der Schärfentiefebereich mindestens  $\pm 25\%$  des Objektabstandes beträgt. Bei einem Abstand von 40 cm sind das  $\pm 10$  cm, die in der Praxis sicher nicht erreicht werden (**Bild 60**).

#### 4.3 Ergebnisse der Felduntersuchungen

Die Untersuchungen des Kamerasystems auf dem Laborprüfstand haben gezeigt, dass kleine Pflanzen mit den Abmessungen 2x2 mm bei simulierten Fahrgeschwindigkeiten bis 15 km/h sicher erkannt werden und dass die Anpassung an unterschiedliche Beleuchtungsverhältnisse möglich ist. Weiterhin konnte nachgewiesen werden, dass der Einfluss unterschiedlicher Böden, von Stroh und abgestorbenen Pflanzenresten zu eliminieren ist und ein ausreichender Schärfentiefebereich ( $\pm 10$  cm) vorliegt. Im Feldeinsatz konnten diese Ergebnisse unter natürlichen Bedingungen bestätigt werden. Insbesondere konnte nachgewiesen werden, dass starke Helligkeitsschwankungen des Umgebungslichtes (Wechsel von Sonne und Schatten) die Ergebnisse nicht beeinflussen. **Bild 61** zeigt den im Feldeinsatz verwendeten Versuchstraktor mit der frontseitig angebauten Kamera.

Um das Detektionsvermögen und die Erkennungssicherheit des Kamerasystems unter praktischen Einsatzbedingungen zu ermitteln, erfolgte die Aufnahme der Unkrautverteilung auf zwei verschiedenen Versuchsstrecken im Zeitraum 2003/2004:

- Testfeld, Messstrecke 100 m, Sandboden mit frisch aufgelaufenen Unkräutern,
- Rapsfeld, Messstrecke 160 m, Sandboden mit Unkräutern im vergleichbaren Entwicklungsstadium.



**Bild 61:** Versuchstraktor mit Kamerasystem

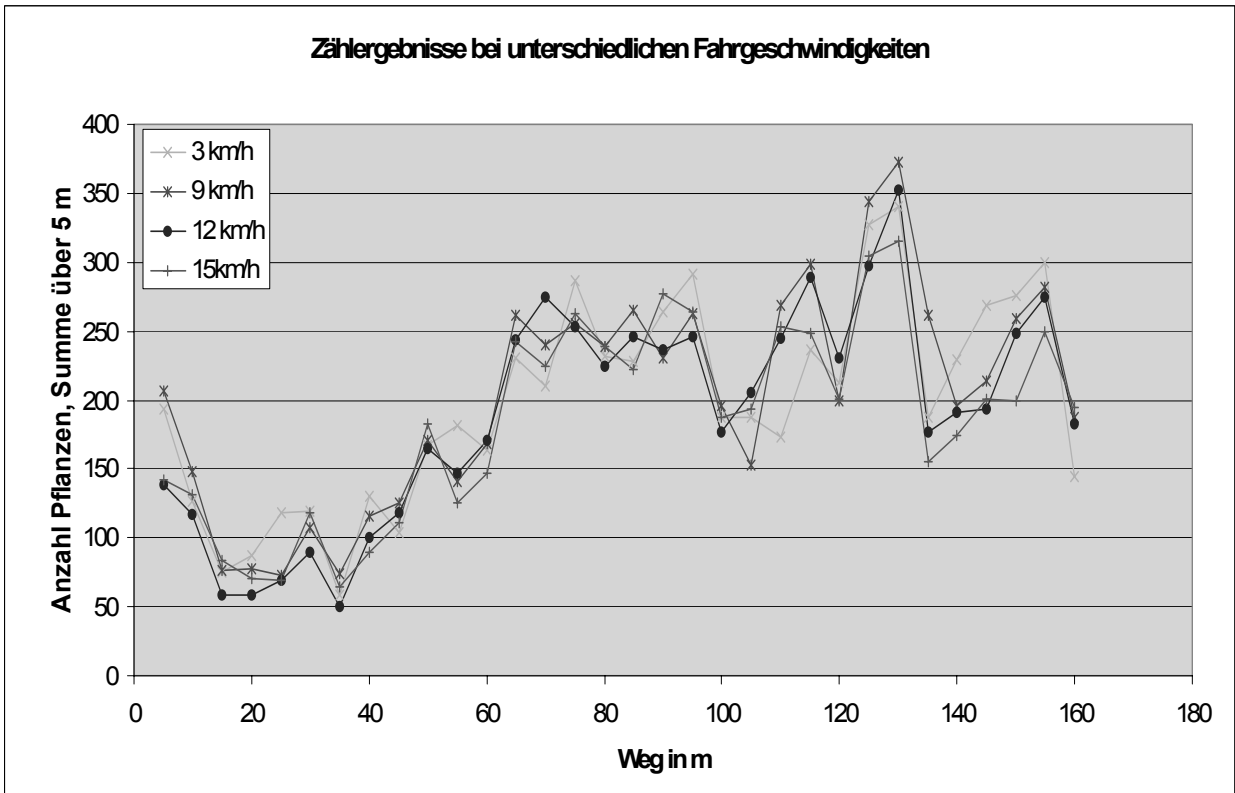
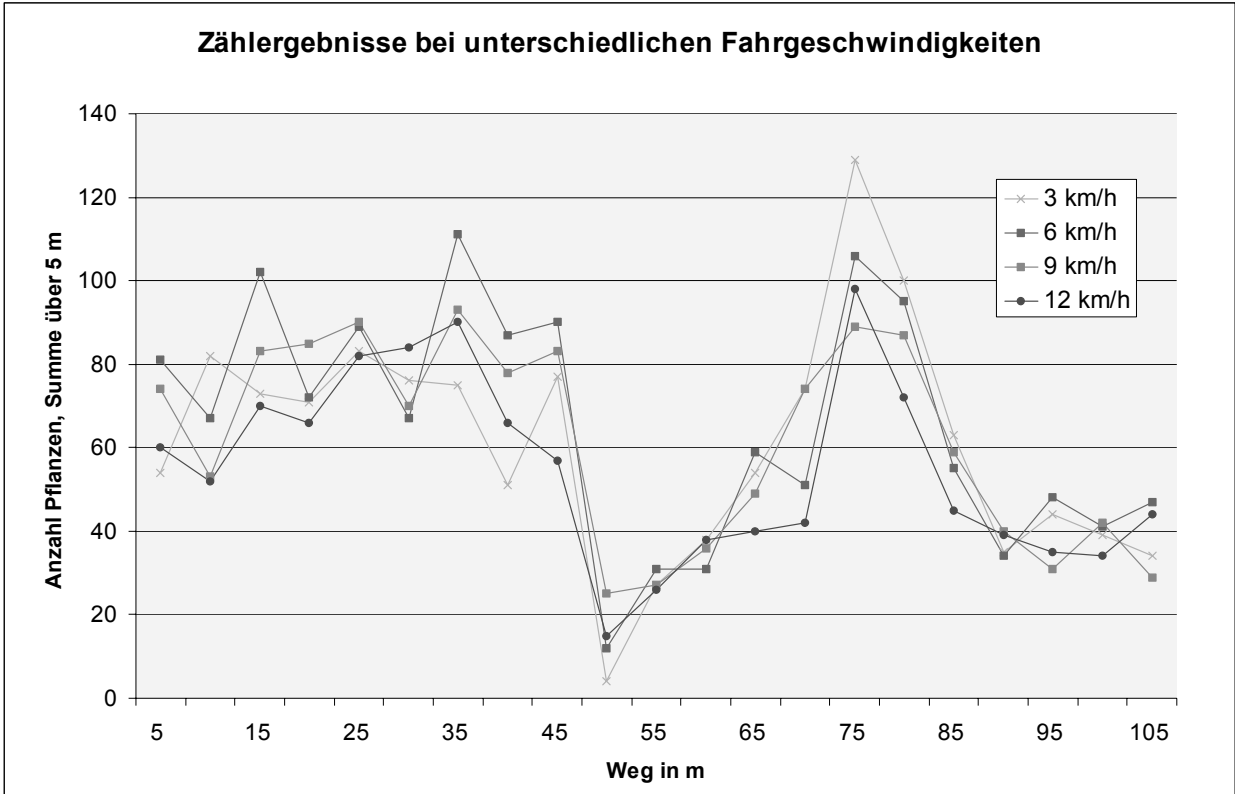
Im **Bild 62** ist beispielhaft eine Unkrautszene aus der Messstrecke vergrößert dargestellt, um die Größe der aufgelaufenen Unkräuter deutlicher zu zeigen.



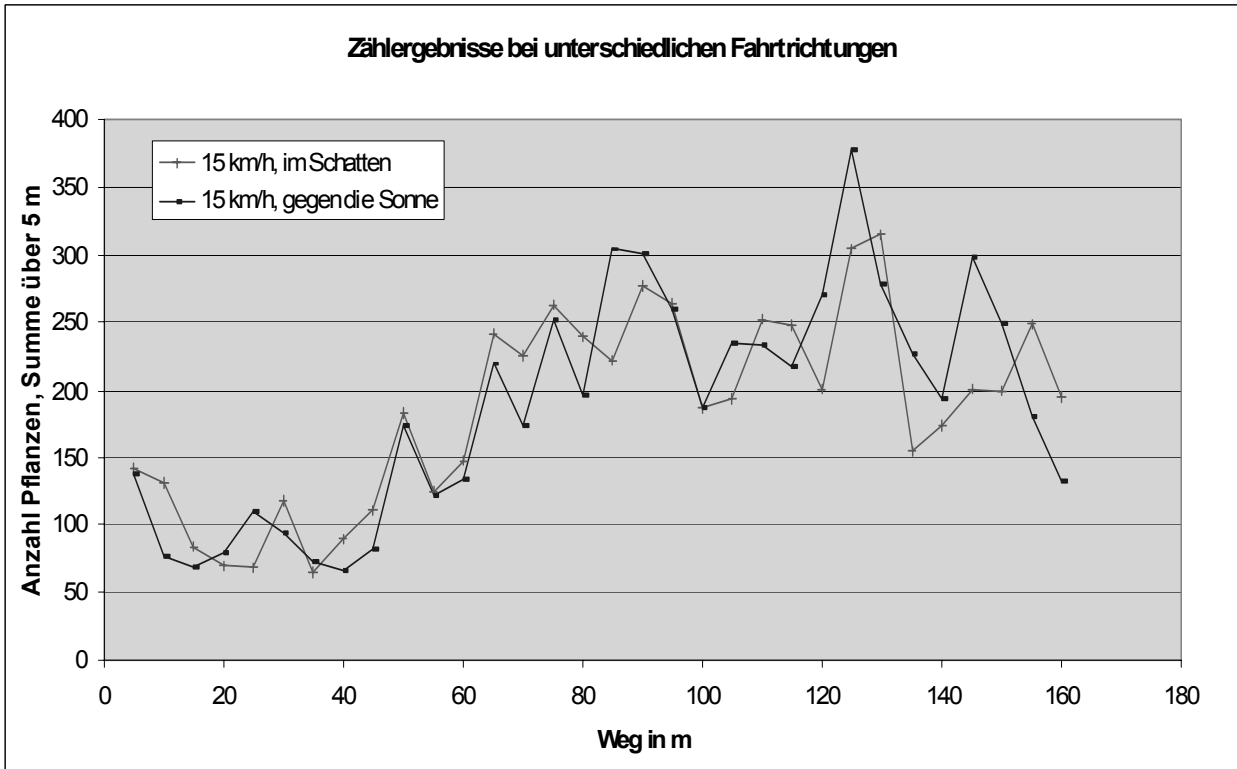
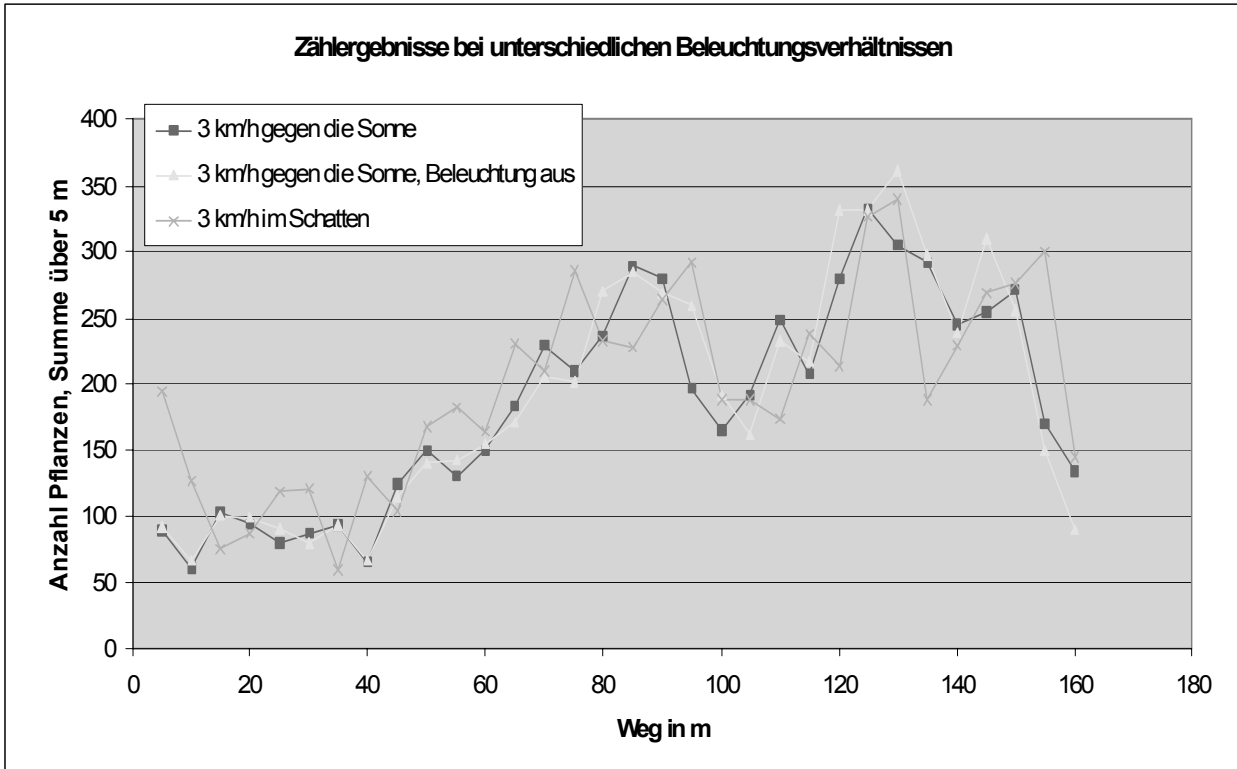
**Bild 62:** Unkrautszene mit Unkräutern, Blattbreite ca. 2 mm



**Bild 63:** Beispiel eines Ergebnisbildes, weiße Pflanzen auf schwarzem Grund



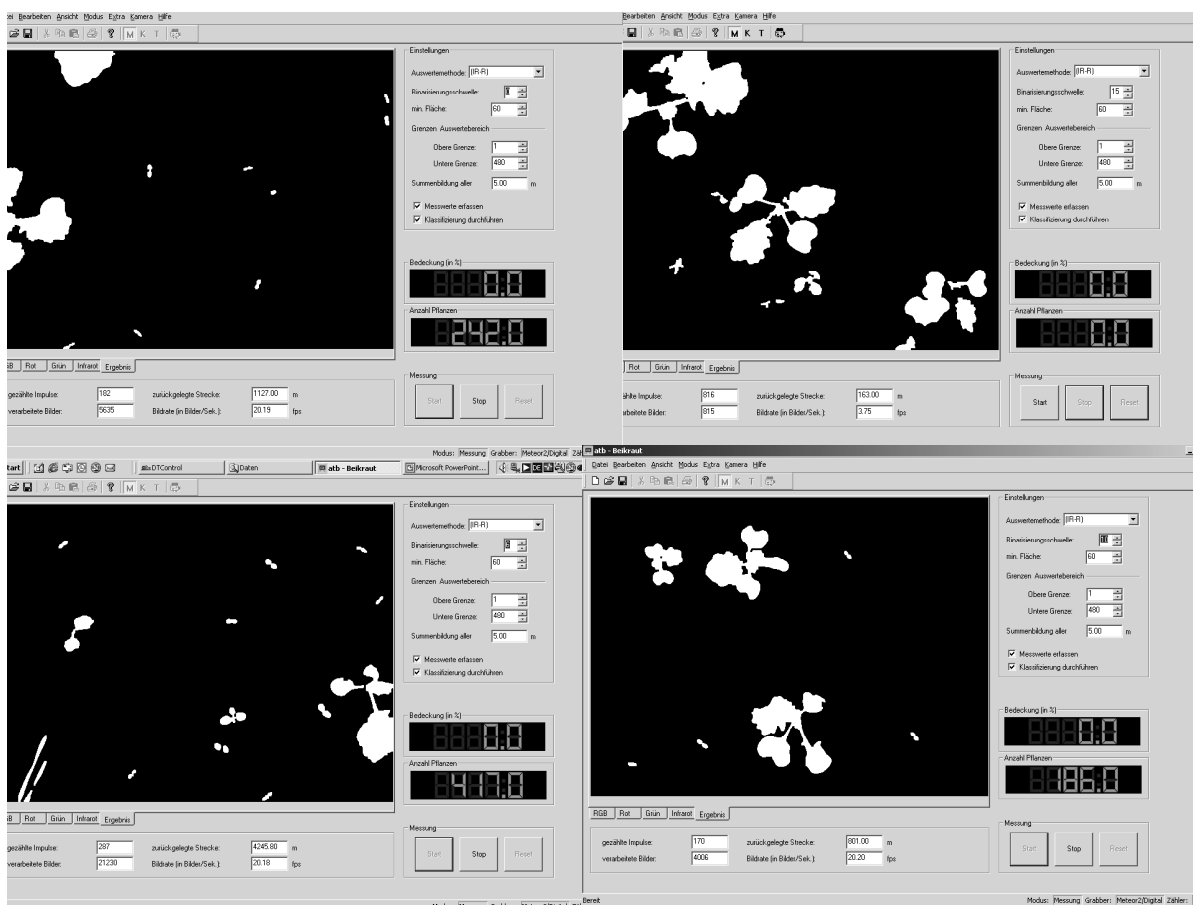
**Bild 64:** Zählergebnisse bei unterschiedlichen Fahrgeschwindigkeiten, oben Testfeld, unten Rapsfeld



**Bild 65:** Zählergebnisse bei unterschiedlichen Beleuchtungsverhältnissen (*Rapsfeld*)

Die Messstrecken wurden mehrfach befahren, mit verschiedenen, jeweils konstanten Fahrgeschwindigkeiten im Bereich von 3 bis 15 km/h. Außerdem wurde die Fahrtrichtung gewechselt, so dass stark unterschiedliche Beleuchtungsverhältnisse (Sonne, teilweise Schatten, usw.) auftraten. Beispielhaft zeigt das **Bild 63** ein berechnetes Binärbild, in dem sich kleine Unkrautpflanzen und eine Rapspflanze befinden. Die Berechnung des Binärbildes erfolgte mit dem Parameter DIRT (Differenz Infrarot-Rot und Schwellwert) entsprechend Abschnitt 4.4.2

Die Auswertung der Versuchsfahrten erfolgte nach Anzahl der Pflanzen mit Klassierung ihrer Größe (10 Klassen). In den Diagrammen (**Bild 64**) sind die Zählergebnisse für einige Beispielfahrten (Fahrgeschwindigkeit 3 bis 15 km/h, Fahrtrichtung gegen die Sonne) dargestellt. Jeder Zählwert ist aus der Summe über 5 m gebildet worden. Dies entspricht jeweils 25 ausgewerteten Bildern. Die geringe Streuung der Zählwerte zeigt, dass keine offensichtliche Abhängigkeit von der Fahrgeschwindigkeit besteht. Die erkennbaren Unterschiede sind auf die unvermeidlichen Abweichungen in den Fahrspuren zueinander zurückzuführen. Der gleiche Sachverhalt zeigte sich bei Messfahrten im eigenen Schatten (Fahrtrichtung mit der Sonne) und bei Messfahrten mit ausgeschalteter Beleuchtung (Fahrtrichtung gegen die Sonne) (**Bild 65**).



**Bild 66:** Beispiele für Zählobjekte auf verschiedenen Streckenabschnitten (Rapspflanzen und Unkräuter)

Während auf dem Testfeld ausschließlich kleine Unkräuter zu erkennen und zu zählen waren, die wenigen Größenklassen zugeordnet werden konnten, gab es auf dem Rapsfeld Pflanzen unterschiedlicher Größe und Form zu zählen und zu klassieren. Im **Bild 66** sind die Ergebnisbilder einiger beliebiger Aufnahmen innerhalb der Messstrecke wiedergegeben. Die relativ zerklüfteten Blattstrukturen einer Pflanze werden als eine Pflanze gezählt, wenn die Blattflächen zusammenhängen, z. B. über den Stiel. Ist andererseits der Stiel nicht sichtbar, werden die Blätter gezählt. Unter dem Gesichtspunkt dieser unterschiedlichen Zählweisen zeugt die gute Übereinstimmung der Zählergebnisse von einer hohen Erkennungssicherheit.

#### 4.4 Ergebnisse in der Spektralauswertung

##### 4.4.1 Auswahl der Entscheidungskriterien

Die Auswertung der Spektralbilder wurde speziell auf die Probleme mit Stroh, Erde mit Pflanzenresten bzw. gemulchtem Untergrund optimiert. Für die Bildverarbeitung ist die Mischung von Pflanzenresten, Stroh und Erde insgesamt als Hintergrund einzustufen. Die Auswertung von Unkrautscenen auf gemulchtem Boden ist insofern kompliziert, da die Eigenschaften aller Materialien die Entscheidung zwischen Unkraut und dem Hintergrund (Pflanzenreste, Stroh und Erde) beeinflussen. Die Hauptaufgabe der Bildanalyse besteht darin, den Hintergrund zu unterdrücken, da er keine Information von Interesse liefert. Um dieses zu erreichen, muss die Software einen Parameter für jedes Pixel berechnen, mit dessen Hilfe eine Entscheidung zwischen Unkrautpixel und Hintergrundpixel möglich wird.

Der Einsatz der Messsysteme auf gemulchten Böden benötigt ein spezielles Entscheidungskriterium zur Differenzierung zwischen Unkraut und Hintergrund. Die Qualität der Unkrautdetektion hängt stark von der Wahl dieses Entscheidungskriteriums ab. Folgende Entscheidungswerte, die alle auf der Grundlage von Roten (R) und Infraroten (IR) Reflexionswerten arbeiten, wurden getestet:

der Normalisierte Differenz Vegetation Index (NDVI)

$$\text{NDVI} = (\text{IR} - \text{R}) / (\text{IR} + \text{R})$$

und der Quotient aus den Messwerten IR und R

$$\text{Quotient} = \text{IR} / (\text{R} + 0.15).$$

Der einfache Quotient IR/R variiert stark und kann für gesunde Pflanzen Werte größer 20 erreichen. Zusätzlich ist das Problem der Division durch Null akut, falls der Messwert rot ausfallen sollte. Damit beide Probleme umgangen werden können, wurde der Schwellwert 0,15 in die oben genannte Formel eingefügt.

Das Ziel von vergleichenden Untersuchungen war, festzustellen, welcher der ausgewählten Vegetationsindizes die höchste Zuverlässigkeit für die Differenzierung zwischen Unkraut und Hintergrund liefert. Die Auswertung der experimentellen Ergebnisse schließt den Vergleich zwischen den genannten drei Vegetationsindizes und einem neuen Kriterium ein. Die Formel für einen neuen Differenzindex DIRT (**D**ifference **I**ndex

with **Red Threshold**) mit zusätzlichem Schwellwert-Parameter  $\beta$  für den Messwert Rot lautet:

$$\text{DIRT} = \text{sign} (\beta - R) * (IR - R) / (IR + R)$$

Der neue Vegetationsindex, ein Differenz Index mit Schwellwert  $\beta$  für den Messwert Rot setzt voraus, dass die Intensität R eines Unkrautpixels unterhalb des Schwellenwerts  $\beta$  sein muss. Wenn die gemessene Intensität R höher liegt als die Schwelle  $\beta$ , dann wird das Vorzeichen (sign) des DIRT umgekehrt und angezeigt, dass dieses Pixel kein Unkrautpixel ist. Mit der Vorzeichen-Funktion sign ist es möglich, den zusätzlichen Parameter  $\beta$  und den NDVI in einer Formel zu kombinieren.

Während der Tests wurde der Wert  $\beta$  auf 0,12 gesetzt und nie geändert. Weitere Untersuchungen werden klären, ob diese Schwelle auf die Bodenverhältnisse und Mulchmaterialien eingestellt werden sollte.

#### 4.4.2 Durchführung und Auswertung der Untersuchung

Um den neuen Index DIRT zu testen, wurden 42 Proben von einer gemulchten Fläche untersucht. Die erste Gruppe von Testmaterialien schließt 21 Proben von drei Unkrautarten ein. Die zweite Gruppe von Testmaterialien enthält 21 Proben von Erbsenstroh und Weizenstroh. Die Proben wurden in sieben Gruppen aufgeteilt und in einem Abstand von jeweils einem Meter auf einer Teststrecke verteilt. Die Ergebnisse sind Zeitserien von Roten und Infraroten Intensitätswerten, die gleichzeitig aufgezeichnet und mit der Software Beikraut ausgewertet wurden. **Tabelle 3** fasst alle Infraroten und Roten Messwerte als eine Funktion der Testmaterialien zusammen.

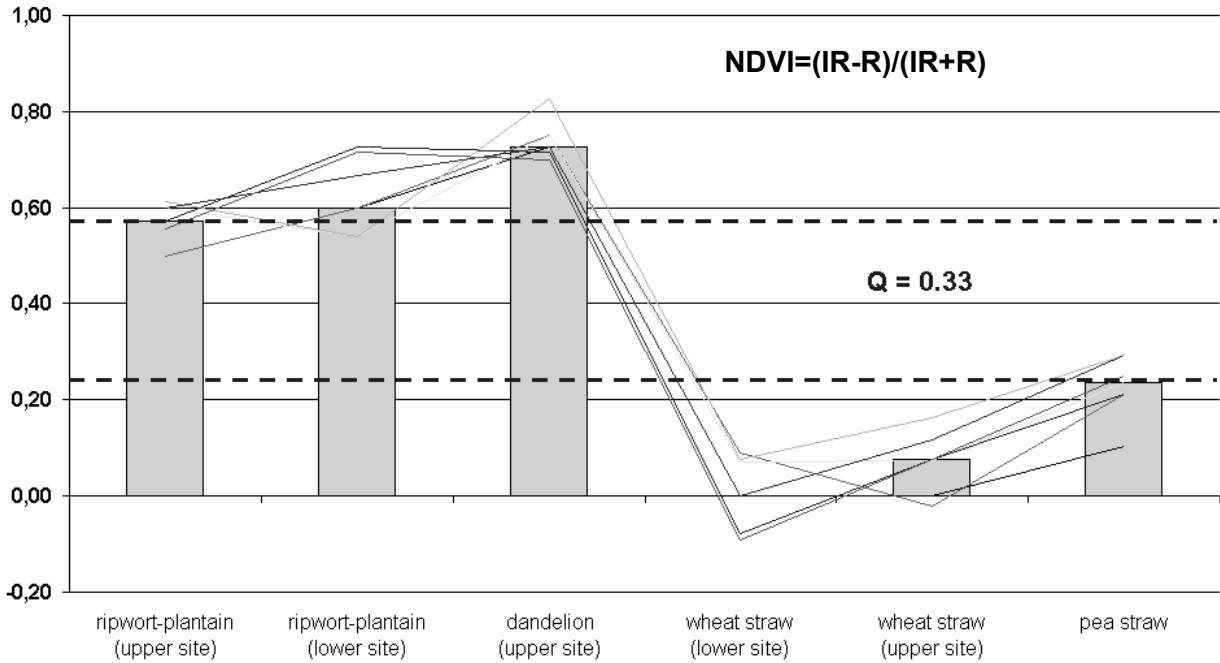
**Tabelle 3:** Infrarot (IR) und Rot (R) Messwerte der Untersuchungsmaterialien

Material	Gr.1		Gr.2		Gr.3		Gr.4		Gr.5		Gr.6		Gr.7	
	IR	R	IR	R	IR	R	IR	R	IR	R	IR	R	IR	R
<b>Ripwort-plantain</b> ( <i>Plantago lanceolata</i> ) (Oberseite)	0.24	0.08	0.24	0.08	0.24	0.06	0.25	0.06	0.24	0.06	0.22	0.06	0.21	0.06
<b>Ripwort-plantain</b> ( <i>Plantago lanceolata</i> ) (Unterseite)	0.20	0.05	0.20	0.05	0.20	0.06	0.20	0.06	0.20	0.04	0.19	0.03	0.18	0.03
<b>Dandelion</b> ( <i>Taraxacum officinale</i> ) (Oberseite)	0.19	0.03	0.21	0.03	0.21	0.03	0.21	0.02	0.19	0.03	0.18	0.03	0.17	0.03
<b>Wheat straw</b> (Weizenstroh) (Unterseite)	0.25	0.25	0.24	0.20	0.23	0.20	0.21	0.18	0.16	0.16	0.12	0.14	0.10	0.12
<b>Wheat straw</b> (Weizenstroh) (Oberseite)	0.21	0.21	0.22	0.23	0.22	0.19	0.25	0.18	0.24	0.19	0.21	0.18	0.21	0.18
<b>Pea straw</b> (Erbsenstroh) (Oberseite)	0.16	0.13	0.20	0.13	0.21	0.13	0.22	0.12	0.22	0.12	0.20	0.13	0.20	0.12

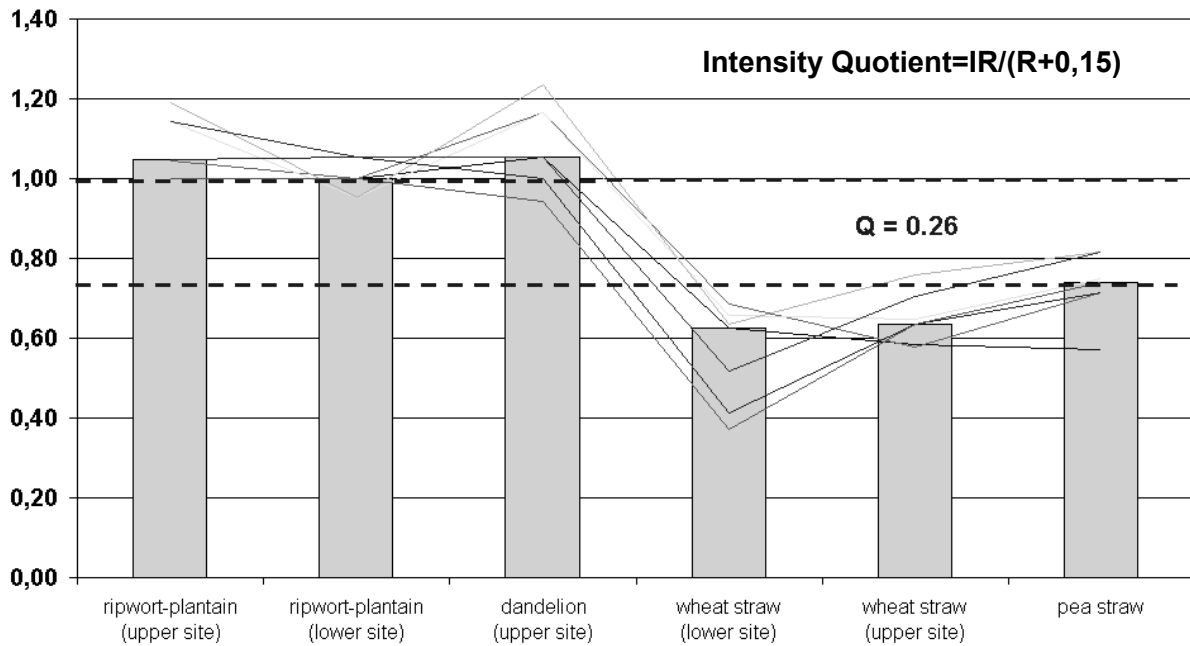
Aus den Tabellenwerten wurden die oben genannten Entscheidungskriterien berechnet. Die **Bilder 67 bis 69** zeigen die Ergebnisse. Für alle Testmaterialien ist der Median gra-

fisch als Bargraph dargestellt. Um die Vegetationsindizes vergleichen zu können, ist die Definition eines Qualitätsparameters Q notwendig. Der Parameter Q gibt die Spreizung an zwischen dem Minimalwert der Unkrautproben und dem Maximalwert bei Strohproben:

$$Q = \text{Min}(\text{Vegetationsindex Unkraut}) - \text{Max}(\text{Vegetationsindex Stroh})$$

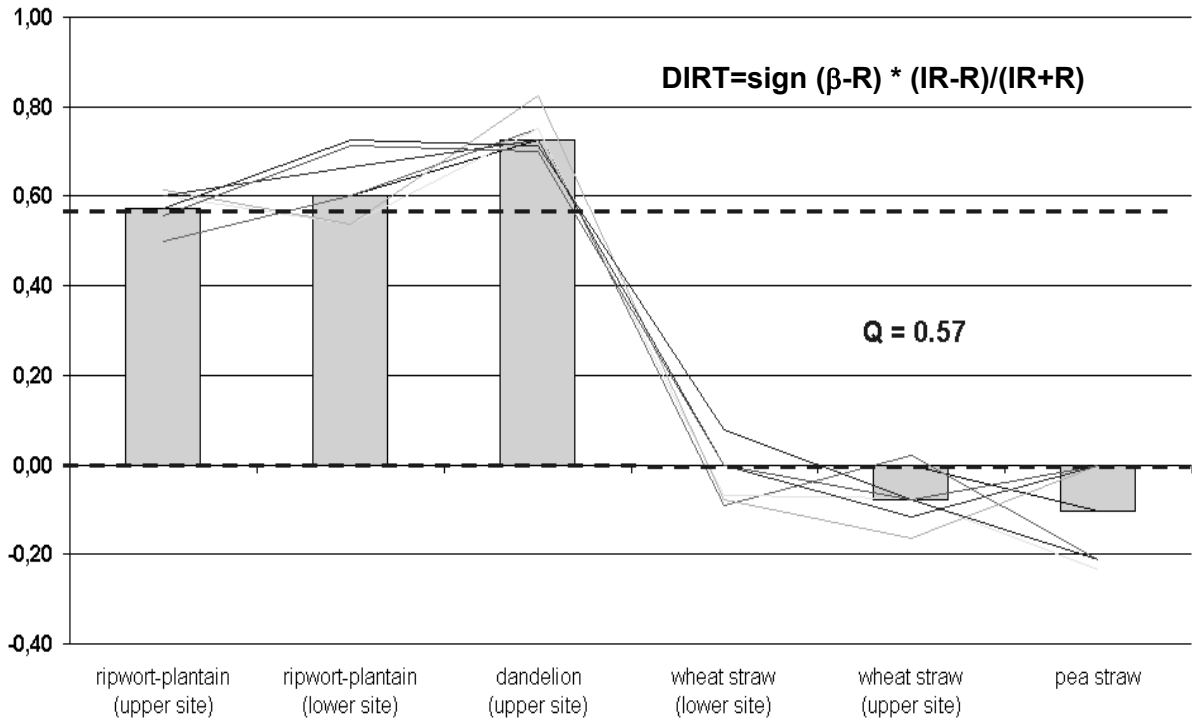


**Bild 67:** Messergebnisse mit dem Entscheidungskriterium NDVI



**Bild 68:** Messergebnisse mit dem Entscheidungskriterium Quotient





**Bild 69:** Messergebnisse mit dem Entscheidungskriterium DIRT

Das Entscheidungskriterium DIRT (Bild 76) liefert offensichtlich die größte Spreizung zwischen Unkraut und Stroh. Die Spreizung Q (minimale Entfernung zwischen den Vegetationsindizes von Unkraut und Stroh) wurde für jedes Testkriterium in den Bildern 74, 75 und 76 als Strichlinien gekennzeichnet.

Normalisierte Differenz (NDVI)	$(IR-R) / (IR+R)$	Q = 0,33
Quotient	$IR / (R+0,15)$	Q = 0,26
Differenz mit Rot-Schwelle (DIRT)	$\text{sign}(\beta-R) (IR-R)/(IR+R)$	Q = 0,57

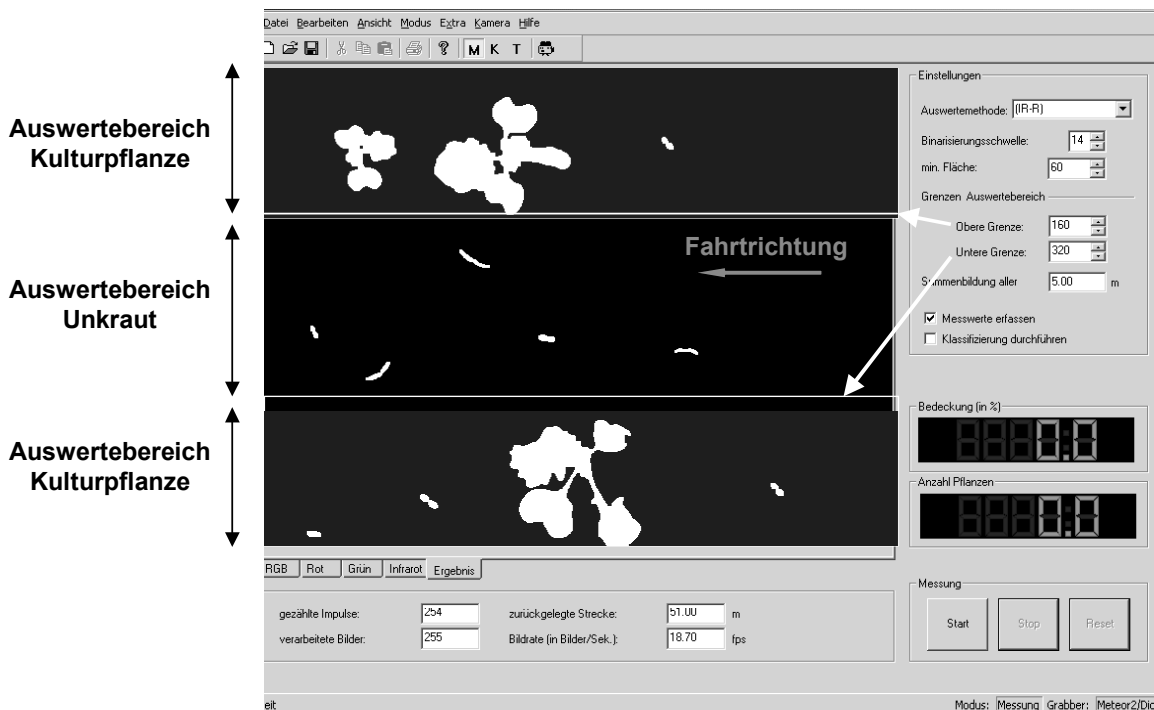
Mit Hilfe des Index DIRT konnte eine weitere Funktionsverbesserung der Messsysteme erzielt werden. Der häufig verwendete NDVI und der bisher verwendete Index Quotient erwiesen sich als ungünstiger. Die Anwendung der Auswertefunktion DIRT (Differenz Index mit Rot-Schwelle) brachte eine deutliche Verbesserung der Erkennungssicherheit, weil Stroh und abgestorbene Pflanzenteile das Ergebnis der Unkrautdetektion weniger stark beeinflussen. Die Schwelle  $\beta$  ist eine Konstante, die für die Verrechnung der Signalpegel Rot angewendet wird. Der Wert  $\beta$  sollte auf einen Wert oberhalb des Minimums der Unkrautreflexion im roten Bereich gesetzt werden (typisch 0,1 bis 0,15).

## 5 Zusammenfassung und Ausblick

### 5.1 Erweiterung der Anwendungsmöglichkeiten

#### 5.1.1 Randerkennung

Bei der automatischen Unkrautbonitur in Regelspuren oder Reihenkulturen mit dem beschriebenen Verfahren steht nur ein schmaler Detektionsbereich zur Verfügung. Die bisherige Softwarelösung bietet deshalb die Möglichkeit, die Randbereiche neben der gewünschten Detektionsspur auszublenden. Dazu sind variable Grenzen entsprechend einzustellen. In der Weiterentwicklung wäre eine zusätzliche Auswertung der Randbereiche (Randerkennung) sinnvoll. Im **Bild 70** ist die mögliche Bereichsauswertung beispielhaft aufgezeigt. Die Randbereiche könnten separat nach Pflanzengröße oder Bedeckungsgrad ausgewertet und damit Rückschlüsse auf die Anwesenheit von Kulturpflanzen gezogen werden. Damit ließen sich z.B. Abweichungen von der Fahrspur erfassen und als Signal für eine Korrektur nutzen.



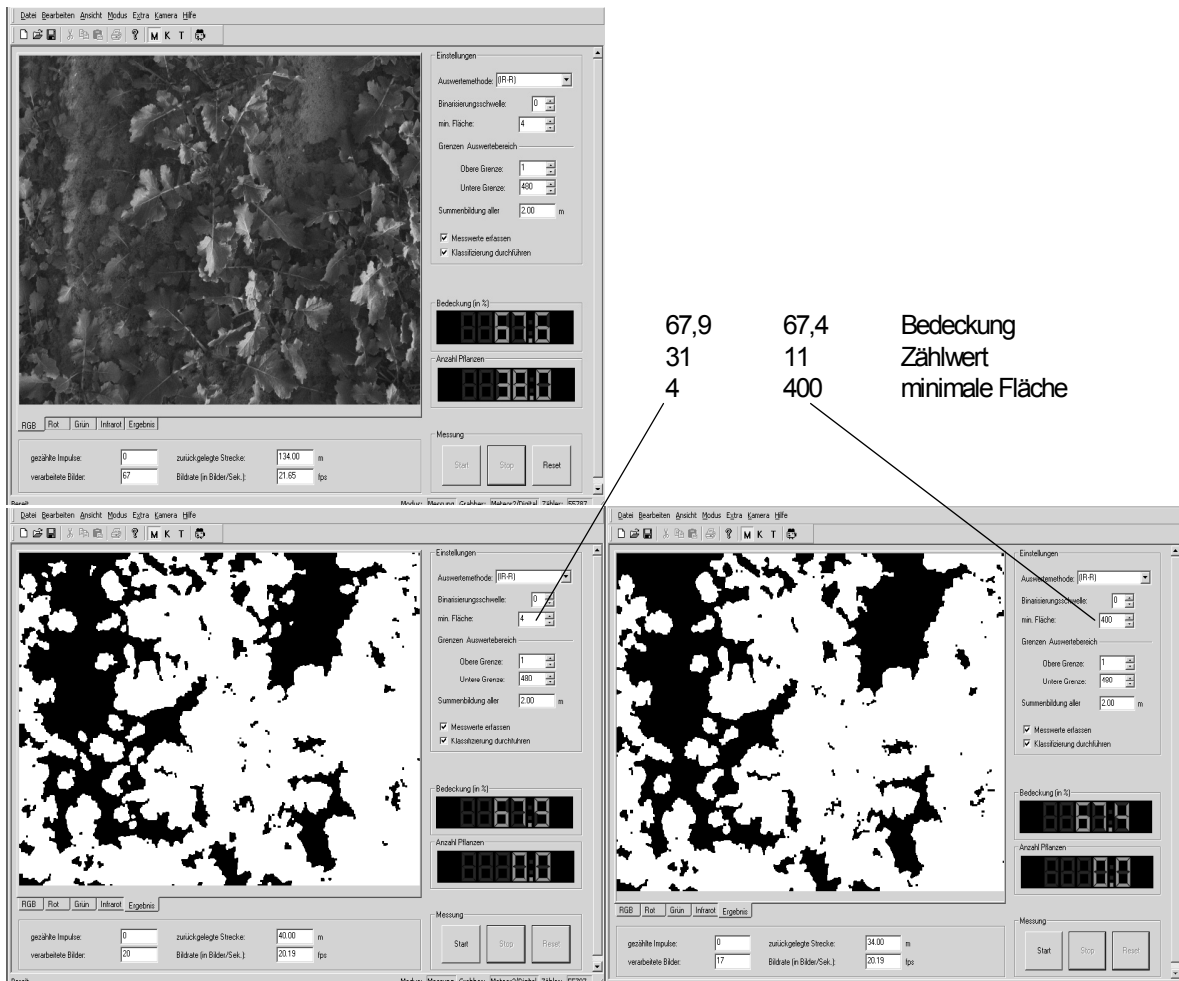
**Bild 70:** Beispiel einer möglichen Bereichsauswertung

#### 5.1.2 Bedeckungsgrad

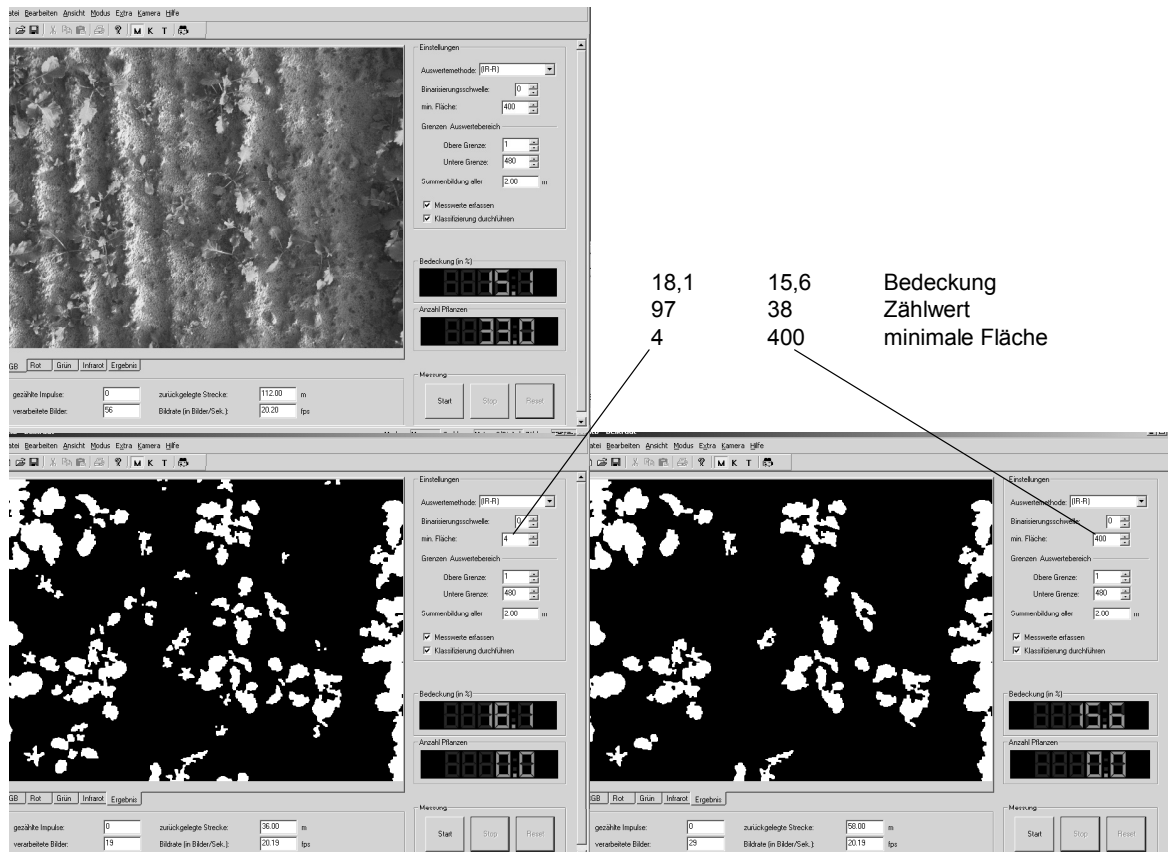
Die Auswertemethode „Bedeckungsgrad ermitteln“ ist eine Möglichkeit, das Unkrautauflkommen danach zu beurteilen, welchen Anteil die gesamte Unkrautfläche (Grünfläche) an der detektierten Fläche einnimmt. Das kann bei hohem Unkrautauflkommen sinnvoll sein, wenn die Pflanzen sich überdecken und nicht mehr als Einzelpflanzen zu erkennen sind. Das Verfahren bietet sich aber auch für andere Anwendungen an. So kann, wenn das Bildfeld der Kamera entsprechend vergrößert wird, auf einfache Weise z.B. der Bedeckungsgrad von Kulturpflanzen ermittelt werden. Mit Sicherheit lässt sich bei

ausgewählten Kulturpflanzen je nach Wachstumsstadium eine Korrelation zur Pflanzenmasse bestimmen. Dann bestände die Möglichkeit, Pflanzenschutzmittel im Echtzeitverfahren nach der Pflanzenmasse bzw. Bestandesdichte zu applizieren.

Ein erster Tastversuch, der die prinzipielle Eignung dieser Auswertemethode verdeutlicht, wurde auf einem Rapsfeld unternommen. **Bild 71** zeigt eine RGB-Aufnahme mit Rapspflanzen, die sich deutlich überdecken. Der Bildausschnitt beträgt 1,00 x 0,75 m, bei einem Abstand der Kamera von ca. 2,00 m. Im Ergebnisbild zeichnen sich die zusammenhängende Pflanzenoberfläche sowie einzelne Blätter und kleine Einzelpflanzen ab. Es wird ein Bedeckungsgrad von 67,9% ausgewiesen. Das Programm bietet die Möglichkeit, kleine Einzelpflanzen bis zu einer bestimmten Größe nicht zu berücksichtigen. Dazu ist eine Schwelle zu setzen, die die minimale Fläche in Anzahl Pixel angibt. Wird diese minimale Fläche z.B. auf 400 gesetzt, werden 20 Einzelpflanzen nicht mehr abgebildet und damit nicht bewertet (Verringerung des Bedeckungsgrades um 0,5 %).



**Bild 71:** Ermittlung des Bedeckungsgrades im dichten Bestand



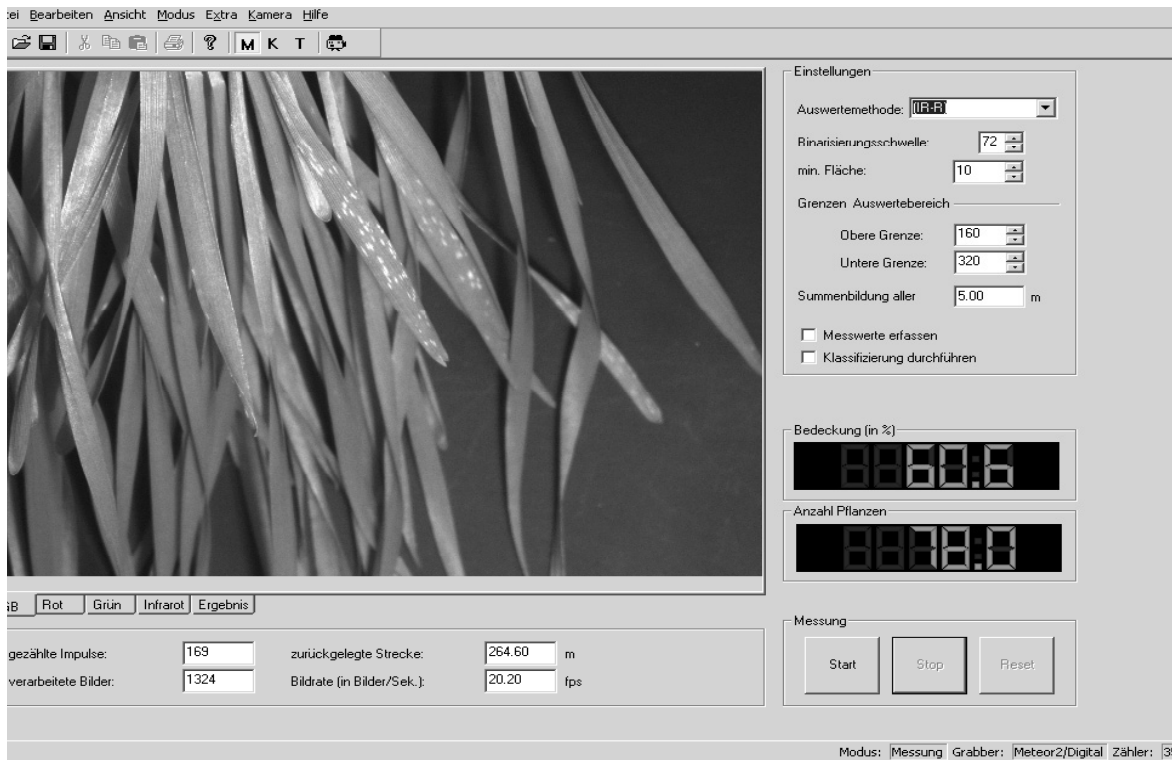
**Bild 72:** Ermittlung des Bedeckungsgrades von Einzelpflanzen

Im **Bild 72** sind die Verhältnisse dargestellt, wenn der Bestand durch kleinere Einzelpflanzen gebildet wird. Der Vergleich der Aufnahmen mit dem zugeordneten Bedeckungsgrad lässt den vorläufigen Schluss zu, dass der Bedeckungsgrad mit der Pflanzenmasse im Zusammenhang steht.

### 5.1.3 Erkennung von Pilzkrankheiten

Untersuchungen am ATB zur bedarfsgerechten Fungizidapplikation wurden auf die Fragestellung erweitert, ob die Spektralkamera prinzipiell als Sensor zur Bereitstellung von Befallsdaten geeignet ist. Ein Tastversuch diente der Beurteilung des Erkennungsvermögens von Pilzbefall auf Getreidepflanzen.

Bereits mit bloßem Auge sichtbare Schädigungen, die auch im RGB-Bild deutlich werden (**Bild 73**), können im Ergebnisbild mit den gegenwärtig implementierten Einstellparametern nicht hervorgehoben werden. Die Befallsstellen ließen sich zwar bei schwarzem Hintergrund im Rotbild pixelgenau auswerten, eine Anwendung während der Fahrt durch den Bestand scheint jedoch eher unrealistisch.



**Bild 73:** RGB-Aufnahme von Pilzbefall auf Getreidepflanzen

## 5.2 Möglichkeiten der Kostenreduzierung und Ausblick

### 5.2.1 Ökonomische Betrachtungen

Im ATB wurden in dreijährigen Praxisversuchen zur Effizienz teilflächenspezifischer Bewirtschaftung mit dem Online-Verfahren und dem Prototyp des Unkrautsensors (Diodesensor) durchschnittliche Einsparungen an Spritzmitteln nachgewiesen (DAMMER et al. 2002). Im Mittel entsprachen diese Einsparungen einem Betrag von etwa 8 €/Hektar. Auch durch andere Forschungseinrichtungen wurden Einsparungen in ähnlicher Größe nachgewiesen (NORDMEYER & HÄUSLER 2000).

Die Entwicklung innovativer Sensor- und Verfahrenstechniken dient auch der Verbesserung der Umweltverträglichkeit landwirtschaftlicher Produktionsverfahren im Sinne eines integrierten Umweltschutzes. 45 % der in Deutschland eingesetzten Pflanzenschutzmittel werden zur Unkrautbekämpfung eingesetzt, das sind pro Jahr rund 16.000 t. Durch das Verfahren könnten in Deutschland im Durchschnitt 25 % der Spritzmittel eingespart werden, das wären jährlich in Deutschland etwa 1.300 t. Dadurch können externe Kosten gespart werden, die durch den Einsatz der Pflanzenschutzmittel entstehen (Grund- und Oberflächengewässer reinhalten u.a.m.) (ANONYM 2002). Allgemein wird eingeschätzt, dass eine teilflächenspezifische Regulierung des Unkrautvorkommens in Deutschland auf mindestens 1/3 der Getreide-Anbaufläche wirtschaftlich ist. Hochgerechnet auf diese Anbauflächen ergibt sich folgendes Einsparpotenzial (**Tabelle 4**):

**Tabelle 4:** Zusammenstellung von Daten zur ökonomischen Bewertung

	<b>Anbaufläche Getreide, gesamt</b>	Teilflächenspezif. Anwendung auf 33% der Fläche	jährl. Herbizid- applikations- mengen in Deutschland	mögl. Herbizid- Einsparung auf Basis 33 % geschätzt
	ha	ha	t	t
<b>Deutsch- land</b>	<b>7.046.000</b>	2.349.000	16.000	1.300

Der Einsatz des Verfahrens ist beschränkt auf größere Unternehmen mit einer landwirtschaftlichen Fläche von 1000 ha und mehr, in denen Maschinen mit hoher Produktivität zum Einsatz kommen. Dann amortisieren sich die Anschaffungskosten in ca. 1,5 bis 3 Jahren bei einem Sensorpreis von ca. 10 T€. Strukturbedingt gibt es in den Neuen Bundesländern ca. 3350 Betriebe dieser Größe, in den alten Bundesländern besteht durch Dienstleister in den Maschinenringen ein Potenzial für den Einsatz von ca. 1400 Maschinen. Geht man allein von der Betriebsgröße aus, ergibt sich eine mögliche Gesamtstückzahl in Deutschland von 4750 Detektionssystemen. Da sich das Kamerasystem neben der Unkrautdetektion auch zur Bestimmung des Deckungsgrades von Pflanzenbeständen eignet, könnte das Messsystem zusätzlich für die teilflächenspezifische Düngung und Fungizidbehandlung in Kartoffeln und Zuckerrüben eingesetzt werden. Dadurch entsteht kein neuer Investitionsbedarf und die Amortisationszeiten verkürzen sich. Hierzu sind jedoch noch Grundlagenuntersuchungen erforderlich.

### 5.2.2 Kosten der Sensortechnik

Die Gesamtkosten für das Versuchsmuster Multispektralkamera sind in der folgenden **Tabelle 5** zusammengestellt:

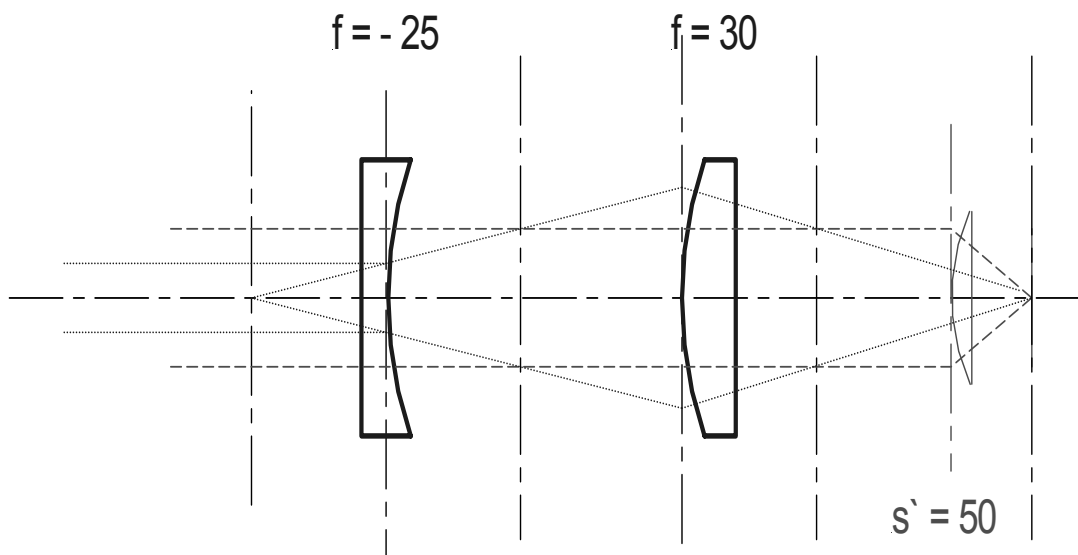
**Tabelle 5:** Zusammenstellung der Kosten für das Versuchsmuster Multipektralkamera

Ausrüstungsgegenstand	Nettopreis	Teilsumme
Kamera MS 2100	14.600	
Objektiv Aspherical 14/2.8	1.760	16.360
Matrox-Kabel (100pin, 6m)	810	17.170
Framegrabber Meteor 2 (incl. Software u. Lizenz)	3.760	20.930
PCI-Karte (incl. Software)	990	21.920
Industrie-PC, 2.8 GHz	3.500	25.420

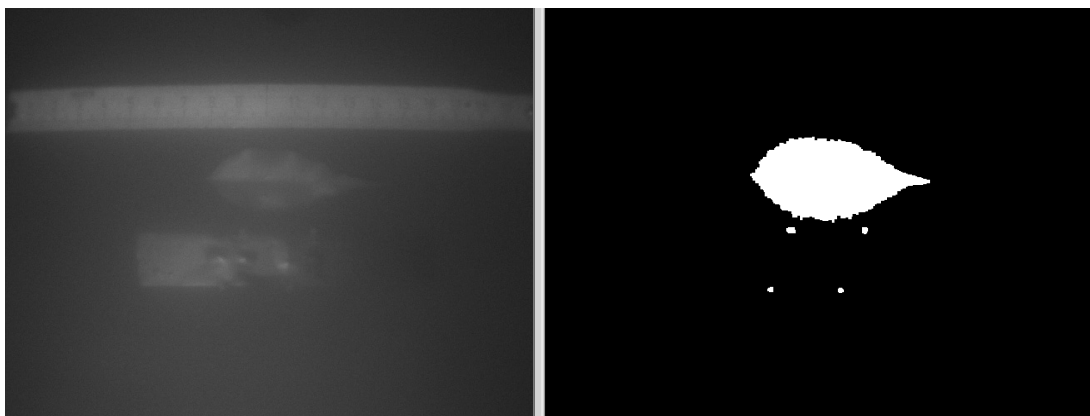
Den größten Kostenfaktor bildet die Kamera selbst. Der PC wird in der Weiterentwicklung durch einen speziellen Controller ersetzt werden müssen, die Kosten der Entwicklungssoftware werden sich auf größere Stückzahlen verteilen. Unter Einbeziehung der

Gewinnspanne eines Herstellungsbetriebes muss von einem Preis um 20 T€ ausgegangen werden. Das verwendete Objektiv EX SIGMA Aspherical 14/2,8 ist ein relativ teures, auskorrigiertes Weitwinkelobjektiv, das höchsten Abbildungsansprüchen gerecht wird. Für die gegebenen Einsatzbedingungen der Kamera ist ein einfacheres und damit preiswerteres Objektiv denkbar. Dieser Sachverhalt konnte durch einen Versuch bestätigt werden, bei dem das Objektiv durch eine einfache Optik aus zwei Linsen ersetzt wurde (**Bild 74**). Es handelt sich um zwei einfache, unvergütete Linsen, deren Brennweiten so gewählt wurden, dass die Schnittweite mit der des Originalobjektivs übereinstimmt.

**Bild 75** zeigt eine Aufnahme mit dem Ersatz-Objektiv. Das RGB-Bild ist deutlich unscharf, weist sphärische Abberation auf und wird durch Streulicht aufgehellt. Trotzdem sind im Ergebnisbild die Pflanzen, auch die kleinen Teile von 2x2 mm, deutlich und auswertbar abgebildet. Weitere Untersuchungen mit preiswerten, handelsüblichen Objektiven könnten zu dem Ergebnis führen, dass eine ausreichende Bildqualität für die Unkrautdetektion erzielt werden kann.



**Bild 74:** Ersatzobjektiv,  $D_1=25$  mm,  $D_2=20$  mm



**Bild 75:** Aufnahme mit dem Ersatz-Objektiv

### 5.3 Einschätzungen und Ausblick

In den Untersuchungen vor und während der Projektlaufzeit konnte nachgewiesen werden, dass eine automatische Steuerung der teilflächenspezifischen Herbizidapplikation in Echtzeit durch den Einsatz von Sensoren technisch möglich ist. Bei der Sensorentwicklung wurde von der Voraussetzung ausgegangen, dass sich auf der zu untersuchenden Fläche keine Kulturpflanzen befinden (z.B. in den Fahrspuren) bzw. die Kulturpflanzen sich in der Größe deutlich vom Unkraut unterscheiden. Die technischen Lösungen für eine teilflächenspezifische Herbizidapplikation in Echtzeit wurden im Rahmen der Projektbearbeitung in Form von Prototypen entwickelt (Kameratechnik, Auswertesoftware, Spritze mit großem Regelbereich, Businterface zu den Jobrechnern und dem Bedienerterminal). Weiterhin wurden diese technischen Lösungen sowie die Software zur Auswertung der spektralen Reflexion verschiedener Materialien auf konventionellen Flächen und auf gemulchten Flächen umfangreich getestet. Die Auswertesoftware und der Algorithmus zur Detektion von Unkraut auf gemulchten Flächen haben sich in den Tests bewährt. Weitergehende Untersuchungen auf unterschiedlichen Bodentypen stehen noch aus. Insgesamt schließen die erarbeiteten hardware- und softwaretechnischen Lösungen die Lücke im Gesamtsystem einer teilflächenspezifischen Applikation von Herbiziden, die zwischen der Bewertung des Unkrautvorkommens und der Steuerung der Herbizidbringung bestand.

Zusammenfassend kann eingeschätzt werden, dass die entwickelten Messsysteme auf Basis der Multispektralkamera und der ImSpector-Kamera die wesentlichen Anforderungen bezüglich Erkennungssicherheit, Geschwindigkeit und optischen Parametern zur Unkrauterkenntnis erfüllen. Erste Erkenntnisse zur Kostenstruktur des Verfahrens, zur Weiterentwicklung der Kameras sowie zur Verbesserung der Gesamtlösung liegen vor. Es kann davon ausgegangen werden, dass die Weiterentwicklungen zu kostengünstigeren Kamerasystemen in Zukunft zu einem für Industriepartner insgesamt attraktiven Gesamtsystem führen werden.

## **Abstract**

### Introduction

The spatial distribution of weed occurrences in agricultural areas is heterogeneously and location dependently structured. Weed regulation with herbicide savings could be gained with a technical solution using patch spraying and economic thresholds. Splashing patch specifically requires the measurement of the weeds distribution in small areas. This narrowly screened elevations should be combined with a specific pest plant boniture. Examinations at ATB have shown that application with patch spraying can save an average 24.4% of the herbicides. The environment is relieved with that and the costs are reduced by 8 to 15 euros per hectare. To make the saving potential business economically as completely as possible utilizably, the real time registration of the weed oc-



curance is required during the herbicide application. An important demand is the proper detection of plants in the cotyledon stage under the influences of ambient effects. These could be investigated only with high effort in visual methods or with an state of the art image processing system. Comparing the application methods economically the expectation about the best solution is patch spraying in real time. The prerequisites for it, suitable reconnaissance strategies and technical solutions to the fast weed detection, weren't given. A research project was initiated at ATB and promoted by funds from the German Federal Department for Education and Research BMBF.

The development of the measuring system required the processing of a number of formulations connected interdisciplinary. Particularly during the predefined short time for processing (2 year) it was necessary to strive for a high effectiveness by a problem oriented reunion of specialized partners. The following companies were won as project partners:

- The University of Applied Sciences, Faculty of Engineering and Computer Science,
- The company SYMACON Magdeburg, expert for industrial image processing,
- The company Müller-Elektronik in Salzkotten, developer and manufacturer for control of application technology in the farming. Within the last years first experiences were gained in several projects to the application of the patch specific control of agricultural machinery.

The technical requirements on the sensor technique for the real time registration of small weed plants are quite high. Since the herbicide spraying must be carried out at a time as early as possible the accumulating weeds represent very small seedlings in the range of few mm<sup>2</sup>. These small objects must get sure detected at usual driving speeds from 8 to 12 km/h and more. This makes very high demands on the sensor technique due to the very short measuring and exposure times: The observation conditions vary into dependence of the clouds due to vehicle movements and by the angle of incidence of the sun. The development task of the project consisted to derive very small weed plants under swaying observation and lights conditions with a high resolution and to control the sprayer from the multitude of measurements. According to the project partners a system was developed that records the weed density by sensor, that converts the measurements accordingly to the threshold principle in a splashing instruction in real time. The main task of the project consisted in developing and proof testing of different sensor variants in which both economical and technically demanding solutions had to be examined for her suitability and reconnaissance safety. The aim position based on the topic processing was formulated as follows: Development of a measuring system with an optoelectronic sensor which is able to do weed assessments during herbicide application in real time.

In the context of the project camera solutions and photo-optic solution variants were examined for the weeds reconnaissance at ATB Potsdam, the University of Applied Sciences Osnabrück and the company SYMACON image processing Magdeburg. The

investigation turned out that low-cost camera systems as well as simple spectral sensors are unsuitable in the real time business for the reconnaissance of small weed plants. Two solution variants reached the high aim positions: The reconnaissance of small plants for high driving speeds, different floor and lighting conditions and without influence of numb plant remains. One of the systems is based on the application of a CMOS camera with ImSpector optics, the second one on the application of a special multi-spectral camera (MSK).

The camera system is conceived so that the reconnaissance of the plants is carried out due to her specific reflection. The main item of the camera is a beam splitter which is consisting of several prisms which divides the incident light up into three ray bundles. Every individual beam is conducted on a separate CCD image sensor. This order has the advantage that color filters which make a spectral assessment of the individual pictures possible can be arranged tightly in front of the image sensors. The test camera was fitted with special narrowband filters of the colors green, red and infrared. The pictures of the three color channels are selected parallel and supplied in digital form to the PC. Exposure time and reinforcements can be stopped separately. On a screen are the three color channels and the sum picture. A rugged PC-based software developed the one into the picture evaluation whom spectral pictures settle after different mathematical functions SYMACON permitted. All relevant parameters have to be derived from the binary pictures such as number of weeds per area unit, its size classes as well as the covering degree of the floor. The results can be reprocessed summed up, standardizedly and weightedly and so for the control of a sprayer. The solution trial permits the usage of the maximum modulating frequency of the camera (30 pictures per second) at acceptable software effort and forms the prerequisite for work in the online method and at high driving speeds. The camera system had been examined first on a laboratory test bed regarding detectivity and reconnaissance safety. Here it turned out that little plants are recognized up to 15 km/h for certain with the measurements of 2 x2 mm at feigned driving speeds and that the adaptation to different lights conditions is possible. Furthermore different floors, straw and numb plant remains have only a negligible influence on the result. In field tests good and reproducible results could be achieved under natural conditions. Particularly fluctuations of the surroundings light (change of sun and shade) don't influence the results.

#### Economical and ecological importance

With the camera system an automatic boniture of small weed plants is practicable in the real time business. The method can be adapted to site-specific herbicide application using this camera boniture. Herbicides are only sprayed where the actual weeds occurrence requires a treatment. This method is proven and opens a great reduction potential at herbicides. The technical solution stands out particularly due to a high flexibility. Into dependence of outer boundary conditions (e.g. change of the area to be included or the spectral signatures) changing system parameters can be adapted in the software. Add-

---

ing for example the change of the camera dissolving or the algorithm for the image processing. The costs of the complete system is approx. € 8000 without a further optimization. The technical prerequisites for the development and prooftesting of a prototype for the online measuring of weeds under the direction of an industry partner are given in our assessment. The camera system fulfills the aim position of the project, however still not this one requirements at the ruggedness and at the price. Use would be economic for enterprises and machine rings as of 1000 hectares agriculturally productive land.

## 6 Literaturverzeichnis zum Text

- ANONYM (1997):** Harmonisation Paper DIN9684 – LBS (Teil 3), Quelle: Fa. Müller-Elektronik
- ANONYM (2000):** agrocom.: Bedienungsanleitung – LBS-Software AMAZONE Hytronic nach Teil 3, 28.03.2000
- ANONYM (2002):** Statistisches Jahrbuch über Ernährung, Landwirtschaft und Forsten: 32 ff
- BILLER, R.H., SCHICKE, R. (2000):** Multi-frequency optical identification of different weeds and crops for herbicide reduction in precision agriculture. In : Proc. 5th Intern. Conf. on Precision Agriculture, 16.-17.7.2000, University of Minnesota, St.Paul, MN, USA
- BÖTTGER, H., LANGNER, H.-R. (2003):** Erfahrungsbericht zur bildgestützten Unkraut-Erkennung mit einer 3-Chip-CCD-Kamera. Vortrag zum Workshop Anwendung der Computer-Bild-Analyse in der Landwirtschaft 06.05.2003, Uni Bonn
- DAMMER, K.-H., WARTENBERG, G., BÖTTGER, H., SCHMIDT, H. (2003):** Der Sensor ersetzt das Auge. DLG Mitteilungen (1): 40-43
- DAMMER, K.-H., WARTENBERG, G., EHLERT, D. (2002):** Variable rate real-time application of fungicides in cereals by use of a sensor-controlled field sprayer. In: International Conference on Agricultural Engineering (AGENG), Budapest, 30. Juni - 03. Juli 2002, CD-ROM (ISBN 963 9058 15 7), edited by the Scientific Society of Mechanical Engineering (GTE).
- EGBERS, M. \*, KRONSEIN, C. \*\*, RUCKELSHAUSEN, A. \*\* (2005):** Online-Messung des Reifegrades von Maispflanzen zur Optimierung der Häckselqualität. 63. Internationale Tagung Landtechnik 2005, Hannover, VDI-Verlag, VDI-Berichte Nr. 1895, S.337-341 (\* Maschinenfabrik Bernard Krone GmbH, Spelle ; \*\* Fachhochschule Osnabrück).
- GANZELMAIER, H. (2001):** Trends bei der Pflanzenschutztechnik. Landtechnik 56 (6): 378-380
- IN DER STROTH, S., LINZ, A., RAMLER, B., RUCKELSHAUSEN, A. (2003):** Weed detection based on spectral imaging system with CMOS-cameras. 4<sup>th</sup> European Conference on Precision Agriculture ECPA, Berlin, Programme book, p. 224, ISBN 9076998345
- LANGNER, H.-R., BÖTTGER, H. (2004a):** Bildgestützte Unkrautererkennung. Landtechnik(4),S. 202-203
- LANGNER, H.-R., BÖTTGER, H. (2004b):** Messsystem zur Bewertung des Unkrautvorkommens. In: Bornimer Agrartechnische Berichte, Heft 36: Hightech-Innovation für Verfahrensketten der Agrarproduktion, Potsdm: 49-54
- NORDMEYER, H., HÄUSLER A. (2000):** Erfahrungen zur teilflächenspezifischen Unkrautbekämpfung in einem Praxisbetrieb. Zeitschrift für Pflanzenkrankheiten und Pflanzenschutz, Sonderheft XVIII: 195-205
- PETRY, W. (1989):** Unkrautkontrolle im landwirtschaftlichen Pflanzenbau mit Hilfe der quantitativen Bildanalyse. Dissertation, Universität Bonn, 74 S
- WARTENBERG, G.(2001):** Wenn Sensoren entscheiden. Neue Landwirtschaft, Sonderheft, Pflanzenschutz: 92-95
- WARTENBERG, G., DAMMER, K.-H. (2002):** Erfahrungen bei der Verfahrensentwicklung zur teilflächenspezifischen Herbizidanwendung in Echtzeit. Zeitschrift für Pflanzenkrankheiten und Pflanzenschutz, Sonderheft XVIII: 443-450
- WARTENBERG, G., DAMMER, K.-H. (2001):** Site-specific real time application of herbicides in practice. In: Grenier, G. and Blackmore, S. (Eds.): 3<sup>rd</sup> European conference on Precision Agriculture: 617-622

**WARTENBERG, G., DAMMER, K.-H. (2000):** Unkrauterkennung im Echtzeitbetrieb – Möglichkeiten und Probleme. Zeitschrift für Pflanzenkrankheiten und Pflanzenschutz, Sonderheft XVII: 187-194

### *ergänzende Literatur*

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

**BARET, F., GUYOT, G. (1991):** Potentials and limits of vegetation indices for LAI and PAR assessment. Remote Sens Environ 35(1991), 161–173

**BUSCHMANN, C., NAGEL, E. (1993):** In vivo spectroscopy and internal optics of leaves as basis for remote sensing of vegetation. Int. J. Remote Sensing 14 , 711–722

**CHAPRON, M., REQUENA-ESTESO, M.,BOISSARD, P., ASSEMAT, L. (1999):** A method for recognizing vegetal species from multispectral images. Precision Agriculture 1999, 2nd European Conference on Precision Agriculture, Part 1, 239–248.Sheffield Academic Press,UK.

**CHRISTENSEN, S.,HEISEL, T. (1998):** Patchspraying using historical, manual and real-time monitoring of weeds in cereals. Zeitschrift für Pflanzenkrankheiten und Pflanzenschutz Sonderheft XVI,257 –263.

**CHRISTENSEN, S.,HEISEL, T.,PAICE, M. (1999):** Simulation of long term Alopecurus myosuroides population using three patchspraying strategies. In: Precision Agriculture 1999, 2nd European Conference on Precision Agriculture, Part 2 (Stafford), 977–987. Academic Press, Sheffield,UK.

**FELTON, W.L., McCLOY, K.R. (1992):** Spot spraying. Agricultural Engineering 11, 9 –12.

**GERHARDS, R., SÖKEFELD, M., NABOUT, A., THERBURG, R.D., KÜHBAUCH, W. (2002):** Online weed control using digital image analysis. Zeitschrift für Pflanzenkrankheiten und Pflanzenschutz Sonderheft XVIII, 421 –427.

**GITELSON, A.A. (2004):** Wide Dynamic Range Vegetation Index for Remote Quantification of Biophysical Characteristics of Vegetation. Journal of Plant Physiology 161, 165–173

**HEISEL, T.,CHRISTENSEN, S., WALTER, A.M. (1997):** Validation of weed patch spraying in spring barley –preliminary trial. In: Precision Agriculture 1997 , 1st European Conf. on Precision Agriculture,Vol 2:Technology, IT and Management (ed. Stafford), 879 –886. BIOS Scientific Publishers, Warwick,UK.

**HOCK, B., FEDTKE, C., SCHMIDT, R.R. (1995):** Herbizide–Entwicklungen, Anwendungen, Wirkungen, Nebenwirkungen. Georg Thieme Verlag, Stuttgart, Germany.

**JOHNSON, G.A., MORTENSEN, D.A., MARTIN, A.R. (1995):** A simulation of herbicide use based on weed spatial distribution. Weed Research 35, 197 –205.

**KROPFF, M.J. (1988):** Modelling the effects of weeds on crop production. Weed Research 8, 465 – 471.

**LAMB, D.W., BROWN, R.B. (2001):** Remote sensing and mapping of weeds in crops. Journal of Agricultural Engineering Research 78, 117 –125.

**LASER2000 (2003)** Catalogue Image Processing Products, Comp. Laser2000, Weßling (Germany) Bulletin No. 1004, S.49-50

**LINDQUIST, J.L., DIELEMAN, J.A., MORTENSEN, D.A, JOHNSON, G.A., WYSE-PESTER, D.Y. (1998):** Economic importance of managing spatially heterogeneous weed populations. Weed Technology 12, 7 –13.

- MARCHANT, J.A., ANDERSEN, H.J., ONYANGO, C.M. (2001):** Evaluation of an imaging sensor for detecting vegetation using different waveband combinations. *Computers and Electronics in Agriculture* 32, 101-117
- OPPELT, N., MAUSER, W. (2004):** Hyperspectral remote sensing – A tool for the derivation of plant nitrogen and its spatial variability within maize and wheat canopies. *Precision Agriculture*, 493 -498
- PEREZ, A.J., LOPEZ, F., BENLLOCH, J.V., CHRISTENSEN, S. (2000):** Colour and shape analysis techniques for weed detection in cereal fields. *Computers and Electronics in Agriculture* 25, 197-212
- PHILIPP, I., NORDMEYER, H., RATH, T. (2003):** Algorithms for discrimination of weeds in sugar beet fields using digital image processing. *Proceedings 4. European Conf. on Precision Agriculture, Programme book of ECPA – ECPLF*, 527 – 528, Wageningen Academic Publishers.
- PHILIPP, I., NORDMEYER H., RATH T. (2003):** Automatische und manuelle Unkrautkartierung in Zuckerrübenbeständen im Vergleich. *Computerbildanalyse in der Landwirtschaft, Workshop 2003, Bornimer Agrartechnische Berichte, Heft 28*, Institut für Agrartechnik Bornim.
- RONDEAUX, G., STEVEN, M., BARET, F. (1996):** Optimisation of Soil-Adjusted Vegetation Indices. *Remote Sensing of Environment* 55, 95 -107
- TIAN L. (2002):** Development of a sensor-based precision herbicide application system *Computers and Electronics in Agriculture* 36 (2002) 133-149

**Bilderverzeichnis**

Bild 1:	Ertragsverlustfunktion mit 95% Konfidenzintervall von Unkrautbonituren in Winterweizen (WARTENBERG & DAMMER 2002).....	7
Bild 2:	Entwicklung des Unkrautdeckungsgrades auf Freiflächen und im Getreidebestand nach PETRY (1989) .....	7
Bild 3:	Häufigkeitsverteilung des Unkrautauftreten und Größenklassifizierung der Unkräuter zur Herbstapplikation (Winterroggen, 09.11.2000) .....	8
Bild 4:	Reflexionsverhalten von Pflanze und Boden (BILLER & SCHICKE 2000).....	8
Bild 5:	Reflexionsspektren von Pflanzen und Boden (BÖTTGER & LANGNER 2003).....	9
Bild 6:	Prinzipmuster Diodensensor im Feldeinsatz.....	10
Bild 7:	Schema des Diodensensors .....	11
Bild 8:	Halogenlampen zur Ausleuchtung der Detektionsfläche .....	11
Bild 9:	Schema des Prinzipmusters Lasersensor.....	12
Bild 10:	Blick in das geöffnete Gehäuse des Lasersensors, mit schematischem Strahlengang .....	13
Bild 11:	Dynamischer Messspannungsverlauf von Stroh und Pflanze .....	14
Bild 12:	Fehlerhafte Detektion von Stroh .....	14
Bild 13:	Traktor mit Anhängfeldspritze und Unkrautsensor .....	17
Bild 14:	Schema des Bussystems ISOBUS .....	18
Bild 15:	Spritzbalken mit den Mehrfach-Düsenträgern.....	19
Bild 16:	Position des Druckgebers am Filter in der Hauptleitung .....	20
Bild 17:	Programmierte Düsenkombinationen, zugehörige Kennlinien und Schwellen .....	21
Bild 18:	Unkrautdetektion in Fahrgassen, Winterroggen 4/98, Agrarbetrieb Fahrland (WARTENBERG & DAMMER 2000) .....	23
Bild 19:	Funktionelle Zuordnung der Signalspannung und der Applikationsmenge zu den Detektionswerten – Zählimpulse (WARTENBERG & DAMMER 2002) .....	23
Bild 20:	Reduzierung der Applikationsmenge in Abhängigkeit vom Zählwert des Sensors (30.10.2001, Winterweizen BBCH 12) (WARTENBERG & DAMMER 2002).....	24
Bild 21:	Aufbau des Spektalkamera-Systems (PC-basiert, Software WeedControl).....	25
Bild 22:	Boden-Pflanze-Unterscheidung (oben: Video, mitten: ImSpector-System, unten: berechnete Flächenbelegung) .....	26
Bild 23:	Mobiler Messwagen mit Sprayer.....	27
Bild 24:	Multispektalkamera MS 2100 .....	28
Bild 25:	Schema des optischen Teils der Multispektalkamera.....	28
Bild 26:	Spezifische Reflexion von grünen Pflanzen (LANGNER & BÖTTGER 2004a).....	29
Bild 27:	CIR-2- und kundenspezifische Konfiguration der Farbkanäle.....	30
Bild 28:	Schema der Kamera und des Signalverlaufes.....	31

Bild 29:	Kameraabstand-Objektgröße (LANGNER & BÖTTGER 2004b) .....	32
Bild 30:	Kalibrierung Wegsignal .....	33
Bild 31:	Messung .....	34
Bild 32:	Kalibrierung Unkraut .....	35
Bild 33:	Verknüpfung der Module des Programms „Beikraut“ .....	36
Bild 34:	Informationsfluss zwischen den Komponenten .....	37
Bild 35:	Kamerasteuerung über DT Control .....	38
Bild 36:	Beispiele für die Auswahl der Bildanzeige .....	38
Bild 37:	Fenster zur Kalibrierung des Wegsignals.....	39
Bild 38:	Festlegung des Auswertebereiches .....	39
Bild 39:	Funktionselemente und Anzeigen .....	40
Bild 40:	Unkrautsensor mit Laserlinie und telezentrischem Strahlengang .....	41
Bild 41:	Baugruppe Laserbeleuchtung .....	42
Bild 42:	Kompakter Strahlteiler-Block, als Kittgruppe ausgeführt .....	43
Bild 43:	Schema des Laborprüfstandes .....	44
Bild 44:	Skizze der Platte .....	45
Bild 45:	Laborprüfstand mit Multispektralkamera und Pflanzenschale .....	45
Bild 46:	Kamera und Schutzgehäuse mit Fixierblechen .....	46
Bild 47:	Lagestabile Fixierung der Kamera in Schaumstoff.....	47
Bild 48:	Seitenansicht der mittigen Sensorführung .....	48
Bild 49:	Zeichnung der Sensorführung über der Regelspur .....	49
Bild 50:	Beleuchtungseinrichtung, Lichtkegel fokussiert .....	49
Bild 51:	Ausleuchtung der Bildfläche.....	50
Bild 52:	Zuordnung Triggerung-Kameraabstand .....	50
Bild 53:	Spektrale Bilder und Ergebnisbild eines Arrangements .....	52
Bild 54:	Beispielaufnahme zur Abbildung abgestorbener Pflanzen.....	52
Bild 55:	Beispielaufnahme zum Einfluss des Untergrundes .....	53
Bild 56:	RGB-Bild von Objekten im Stand bei verschiedenen Belichtungszeiten .....	53
Bild 57:	Spektral- und Binärbild des Arrangements bei 12 km/h, Belichtungszeit 0,6 ms .....	54
Bild 58:	Einfluss der Objektgeschwindigkeit auf die Abbildung bei nicht angepasster Belichtungszeit (6 ms) .....	55
Bild 59:	Abbildung kleiner Pflanzenteile im Stand und bei 15 km/h.....	56
Bild 60:	Demonstration der Schärfentiefe .....	56
Bild 61:	Versuchstraktor mit Kamerasystem .....	57
Bild 62:	Unkrautszene mit Unkräutern, Blattbreite ca. 2 mm.....	58
Bild 63:	Beispiel eines Ergebnisbildes, weiße Pflanzen auf schwarzem Grund .....	58
Bild 64:	Zählergebnisse bei unterschiedlichen Fahrgeschwindigkeiten, oben Testfeld, unten Rapsfeld .....	59
Bild 65:	Zählergebnisse bei unterschiedlichen Beleuchtungsverhältnissen ( <i>Rapsfeld</i> ) .....	60



Bild 66:	Beispiele für Zählobjekte auf verschiedenen Streckenabschnitten (Rapspflanzen und Unkräuter).....	61
Bild 67:	Messergebnisse mit dem Entscheidungskriterium NDVI .....	64
Bild 68:	Messergebnisse mit dem Entscheidungskriterium Quotient .....	64
Bild 69:	Messergebnisse mit dem Entscheidungskriterium DIRT.....	65
Bild 70:	Beispiel einer möglichen Bereichsauswertung.....	66
Bild 71:	Ermittlung des Bedeckungsgrades im dichten Bestand .....	67
Bild 72:	Ermittlung des Bedeckungsgrades von Einzelpflanzen .....	68
Bild 73:	RGB-Aufnahme von Pilzbefall auf Getreidepflanzen .....	69
Bild 74:	Ersatzobjektiv, $D_1=25$ mm, $D_2=20$ mm.....	71
Bild 75:	Aufnahme mit dem Ersatz-Objektiv .....	71

### Tabellenverzeichnis

Tabelle 1:	Zugangsmodus und Konfiguration Jobrechner Feldspritze.....	21
Tabelle 2:	Zählgenauigkeit des Sensors in Abhängigkeit von der Kulturart (Wartenberg & Dammer 2000).....	22
Tabelle 3:	Infrarot (IR) und Rot (R) Messwerte der Untersuchungsmaterialien .....	63
Tabelle 4:	Zusammenstellung von Daten zur ökonomischen Bewertung .....	70
Tabelle 5:	Zusammenstellung der Kosten für das Versuchsmuster Multipektralkamera .....	70

**In der Reihe****Bornimer Agrartechnische Berichte**

sind bisher erschienen:

Heft 1	Technik und Verfahren der Landschaftspflege	1992
Heft 2	Beiträge zur Lagerung und Verarbeitung pflanzenbaulicher Produkte	1993
Heft 3	Technik und Verfahren in der Tierhaltung	1993
Heft 4	Technik und Verfahren der Landschaftspflege und für die Verwendung der anfallenden Materialien	1994
Heft 5	Verfahrenstechnik der Aufbereitung, Lagerung und Qualitätserhaltung pflanzlicher Produkte	1994
Heft 6	Biokonversion nachwachsender Rohstoffe und Verfahren für Reststoffbehandlung	1994
Heft 7	Preußische Versuchs- und Forschungsanstalt für Landarbeit und Schlepperprüffeld in Bornim 1927 bis 1945	1995
Heft 8	Qualitätssicherung und Direktvermarktung	1996
Heft 9	Konservierende Bodenbearbeitung auf Sandböden	1996
Heft 10	Anwendung wärme- und strömungstechnischer Grundlagen in der Landwirtschaft	1996
Heft 11	Computer-Bildanalyse in der Landwirtschaft Workshop 1996	1996
Heft 12	Aufbereitung und Verwertung organischer Reststoffe im ländlichen Raum	1996
Heft 13	Wege zur Verbesserung der Kartoffelqualität durch Verminderung der mechanischen Beanspruchung	1997
Heft 14	Computer-Bildanalyse in der Landwirtschaft Workshop 1997	1997
Heft 15	Technische und ökonomische Aspekte der Nutztierhaltung in großen Beständen	1997
Heft 16	11. Arbeitswissenschaftliches Seminar	1997
Heft 17	Nachwachsende Rohstoffe im Land Brandenburg Stand Aktivitäten und Perspektiven einer zukunftsfähigen und umweltgerechten Entwicklung	1998
Heft 18	Qualität von Agrarprodukten	1998
Heft 19	Computer-Bildanalyse in der Landwirtschaft Workshop 1998	1998
Heft 20	Beiträge zur teilflächenspezifischen Bewirtschaftung	1998
Heft 21	Landnutzung im Spiegel der Technikbewertung – Methoden Indikatoren, Fallbeispiele	1998

---

Heft 22	Kriterien der Nachhaltigkeit in der Verfahrensentwicklung für die Nutztierhaltung	1999
Heft 23	Situation und Trends in der Landtechnik / Erneuerbare Energien in der Landwirtschaft	1999
Heft 24	Institut für Landtechnik der Deutschen Akademie der Landwirtschaftswissenschaften zu Berlin 1951 bis 1965	1999
Heft 25	Computer-Bildanalyse in der Landwirtschaft Workshop 1999 / 2000	2000
Heft 26	Computer-Bildanalyse in der Landwirtschaft Workshop 2001	2001
Heft 27	Approaching Agricultural technology and Economic Development of Central and Eastern Europe	2001
Heft 28	6 <sup>th</sup> International Symposium on Fruit, Nut, and Vegetable Production Engineering	2001
Heft 29	Measurement Systems for Animal Data and their Importance for Herd Management on Dairy Cow Farms	2002
Heft 30	Produktion, Verarbeitung und Anwendung von Naturfasern	2002
Heft 31	Computer-Bildanalyse in der Landwirtschaft Workshop 2002	2002
Heft 32	Biogas und Energielandwirtschaft - Potenzial, Nutzung, Grünes Gas <sup>TM</sup> , Ökologie und Ökonomie	2003
Heft 33	Sozioökonomische Aspekte zu Perspektiven des Offenlandmanagements	2003
Heft 34	Computer-Bildanalyse in der Landwirtschaft Workshop 2003	2003
Heft 35	Energieholzproduktion in der Landwirtschaft Potenzial, Anbau, Technologie, Ökologie und Ökonomie	2004
Heft 36	High-Tech Innovationen für Verfahrensketten der Agrarproduktion. Statusseminar 2003	2004
Heft 37	Computer-Bildanalyse in der Landwirtschaft Workshop 2004	2004
Heft 38	Die Landmaschinenprüfung in der DDR 1951-1991 und ihre Vorgeschichte	2004
Heft 39	Energieverlust und Schimmelpilzentwicklung bei der Lagerung von Feldholz-Hackgut	2005
Heft 40	Computer-Bildanalyse in der Landwirtschaft Workshop 2005	2005
Heft 41	Demonstration der Langzeitwirkung bedarfsorientierter Fungizidbehandlung mit dem CROP-Meter	2005
Heft 42	Biochemicals and Energy from Sustainable Utilization of herbaceous Biomass (BESUB)	2005

Heft 43    Ozontes Waschwasser zur Qualitätssicherung leichtverderblicher Produkte - Entwicklung einer *Fuzzy-Logic*-Steuerung des Waschprozesses 2005

**Interessenten wenden sich an:**

**Leibniz-Institut für Agrartechnik Potsdam-Bornim e.V.**  
**Max-Eyth-Allee 100**  
**14469 Potsdam**

**Tel.: (0331) 5699-820**  
**Fax.: (0331) 5699-849**  
**E-Mail: [atb@atb-potsdam.de](mailto:atb@atb-potsdam.de)**

Schutzgebühr: 13,- €