

## Intelligente Sensorsysteme für autonome Feldroboter

### *Intelligent Sensor System for Autonomous Field Robots*

Arno Ruckelshausen, Ralph Klose, Andreas Linz, Matthias Gebben, Sebastian Brinkmann

COALA – Competence in Applied Agricultural Engineering / Fachhochschule Osnabrück,  
Albrechtstr. 30, 49076 Osnabrück, Germany  
E-mail: ruckelshausen.os@t-online.de

**Kurzfassung:** Die Entwicklung autonomer Feldroboter bietet vielfältige Optionen für zukünftige Applikationen in der Landtechnik und darüber hinaus. Dabei stellt die Robustheit der Systeme hohe Anforderungen an die Systemtechnik und insbesondere die Sensorik. Die Erfassung und Auswertung verschiedenartiger Merkmale ist dabei unerlässlich, so dass der Sensor- und Datenfusion eine wesentliche Rolle zukommt. In Verbindung mit a priori – Informationen sowie GPS-Daten liefern Sensorsysteme Agro- und Navigations-Informationen sowie Daten für Sicherheits- und Kontrollsysteme. Es werden verschiedene Sensorsysteme vorgestellt, die in Entwicklungsstudien autonomer Systeme eingesetzt werden. Insbesondere wird auf den Einsatz eines optischen Maussensors, eines 2D-Laserscanners sowie einer intelligenten Kamera mit Zeilenstatistik eingegangen.

**Deskriptoren:** Sensorik, Sensorfusion, intelligente Kameras, autonome Feldroboter.

**Summary:** *The development of autonomous field robots opens future options for applications in agriculture and beyond. Several technological challenges with respect to the system and sensor technologies have to be solved in order to achieve robustness. The detection and analysis of different characteristics is necessary, as a consequence sensor and data fusion are of high importance. Together with a priori information and GPS data sensors supply related to the agricultural environment, navigation, safety and control. Different sensor systems are described, already tested in first studies of autonomous systems. Examples are optical mouse sensors, 2D laser scanner and smart camera using a line statistics.*

**Keywords:** *Sensors, sensor fusion, smart cameras, autonomous field robots.*

## 1 Autonome Feldroboter

Die technische Entwicklung der Agrartechnik wird zunehmend durch die Integration der Elektronik und Software beeinflusst. Beispielsweise stellte die Zahl der Innovationen aus diesen Bereichen die größte Gruppe der Neuheitenanmeldungen auf der Agritechnica 2007 dar ([www.agritechnica.com](http://www.agritechnica.com)). Über die aktuellen Weiterentwicklungen der Fahrerassistenzsysteme und teilautonome Flotten stellt der Einsatz autonomer Feldroboter dabei die nächste Innovationsstufe der zukünftigen Landtechnik dar. Die Landtechnik bietet hierfür eingeschränkte Rahmenbedingungen im Vergleich zum Straßenverkehr oder Gesundheitswesen. Dennoch ist die Komplexität des Einsatzes elektronischer Systeme und Sensoren auf landwirtschaftlichen Flächen erheblich, die Anforderungen an die technische Robustheit der Systeme unter dem Einfluss von Störgrößen wie Sonne, Staub, Feuchtigkeit, Wind, Schwingungen oder Bodenunebenheiten sind erheblich (PEDERSEN *et al.* 2002, RATH & KAWOLLEK 2006). Darüber hinaus spielen anwendungsorientierte Aspekte sowie insbesondere die Kosten eine wichtige Rolle (PEDERSEN *et al.* 2006).

Hieraus ergibt sich, dass die kostengünstige Verfügbarkeit und Interpretation aktueller Informationen zum Umfeld des Roboters –d.h. überwiegend Sensorinformationen - einen wesentlichen Aspekt zur Entwicklung kommerziell verfügbarer autonomer Feldroboter darstellen. Die Sensorik stellt daher eine der Schlüsseltechnologien zur Entwicklung zukünftiger robuster autonomer Feldroboter dar.

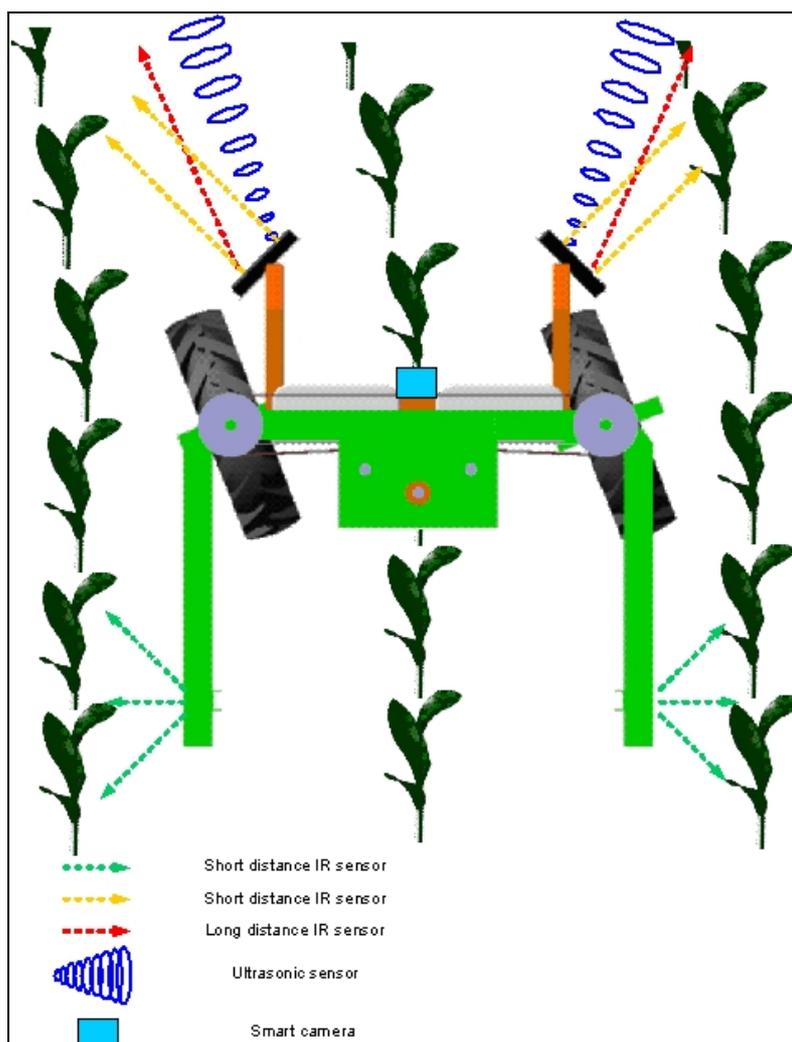
## 2 Sensor- und Datenfusion

Ein autonomer Feldroboter benötigt im Wesentlichen Informationen zur Navigation, zur agrartechnischen Umgebung („Agro-Information“), zur Sicherheit sowie zum Zustand des Roboters (Kontrollsysteme). Neben der Sensorik sind hierfür *a priori* Informationen (z.B. über den Abstand von Reihen) sowie Daten von GPS oder Landmarken von Bedeutung (**Tabelle 1**).

**Tabelle 1:** Aufgaben und Informationen zum Einsatz autonomer Feldroboter

Aufgabe	Sensorik	<i>A priori</i> -Information	GPS / Landmarken
Navigation	Pflanzen, Boden, Umgebung	Pflanzenbauliche Größen	Online
Agro-Information			Kartierung (online / offline)
Sicherheit	Sicherheitsspezifische Sensorik		Kartierung (online / offline)
Kontrollsysteme	Fahrzeugsensorik		

Die Sensorik zur Navigation und Agro-Information erfordert umfassende Informationen für einen robusten Betrieb des Feldroboters. Wünschenswert sind bildgebende Informationen zum Abstand, zur Morphologie oder zur VIS/NIR-Spektralcharakteristik bis hin zu Temperaturmessungen. Da eine „Superkamera“ zur gleichzeitigen punktwisen Messung aller Parameter (noch) nicht verfügbar ist, werden Methoden der Sensor- und Datenfusion angewendet.



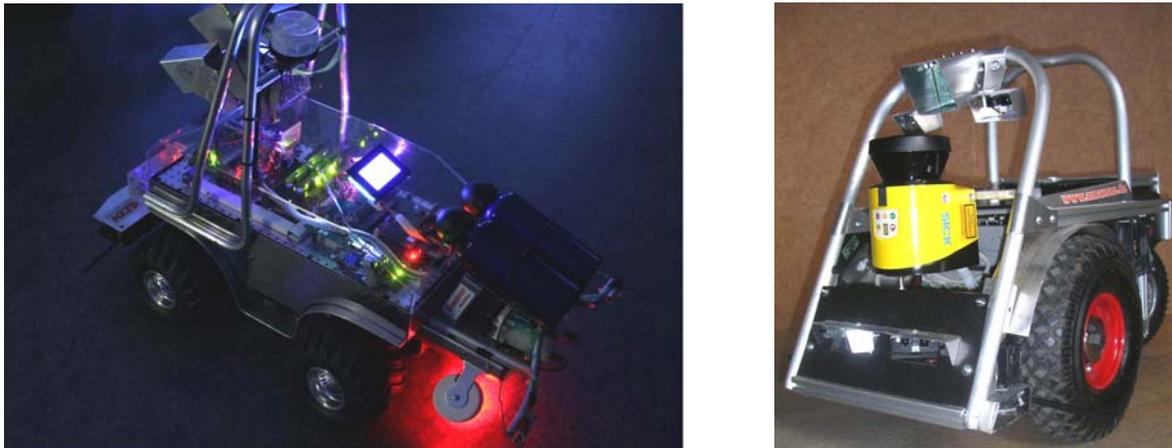
**Abbildung 1:** Anordnung zur Sensor Fusion am Beispiel des autonomen Feldroboters Weedy (Unkrautregulierung)

Die Autoren haben dieses Prinzip bereits 1999 zur Unterscheidung von Nutzpflanzen und Unkräutern angewendet (RUCKELSHAUSEN *et al.* 1999) und kürzlich zur Navigation autonomer Feldroboter eingesetzt (KLOSE *et al.* 2007). Dabei erzielt insbesondere die Interpretation von Daten optoelektronischer Sensoren eine hohe Selektivität zur Navigation und Agro-Information. Hier zählen Lichtgitter (FENDER *et al.* 2005), CMOS-Kameras (RUCKELSHAUSEN & LINZ 2000), intelligente Kameras (KLOSE *et al.* 2005), Spectral Imaging (IN DER STROTH *et al.* 2003), VIS/NIR-Sensorik (KRONSBELN *et al.* 2006) oder opti-

sche Distanzsensoren (THÖSINK *et al.* 2004). In Verbindung mit einem hochauflösenden GPS-System bieten die Sensoren Optionen zur Bonitur von Einzelpflanzen (FENDER *et al.* 2006). **Abbildung 1** zeigt eine Sensoranordnung für eine Studie zur autonomen Unkrautregulierung in Reihenkulturen (Feldroboter „Weedy“; KLOSE *et al.* 2008).

### 3 Ausgewählte Sensorsysteme

In diesem Abschnitt wird auf aktuelle Sensorentwicklungen zur Navigation autonomer Feldroboter eingegangen. Die Entwicklungen werden typischerweise auf Plattformen zum Field Robot Event (VAN HENTEN *et al.* 2007) eingesetzt und fließen – im Falle positiver Erfahrungen – in Projektstudien zur Entwicklung autonomer Feldroboter ein. Im Wesentlichen werden dabei kostengünstige Systeme – wie z.B. die intelligente Kamera CMUCam – betrachtet. **Abbildung 2** zeigt den Einsatz eines optischen Maussensors („optiSense“) zur Odometrie und den Einsatz eines 2D-Laserscanners zur Pflanzendetektion.



**Abbildung 2:** Einsatz optoelektronischer Sensorsysteme bei autonomen Feldrobotern: 2D-Laserscanner am Feldroboter NAD (rechts); optische Maus am Feldroboter Amaizeing (links)

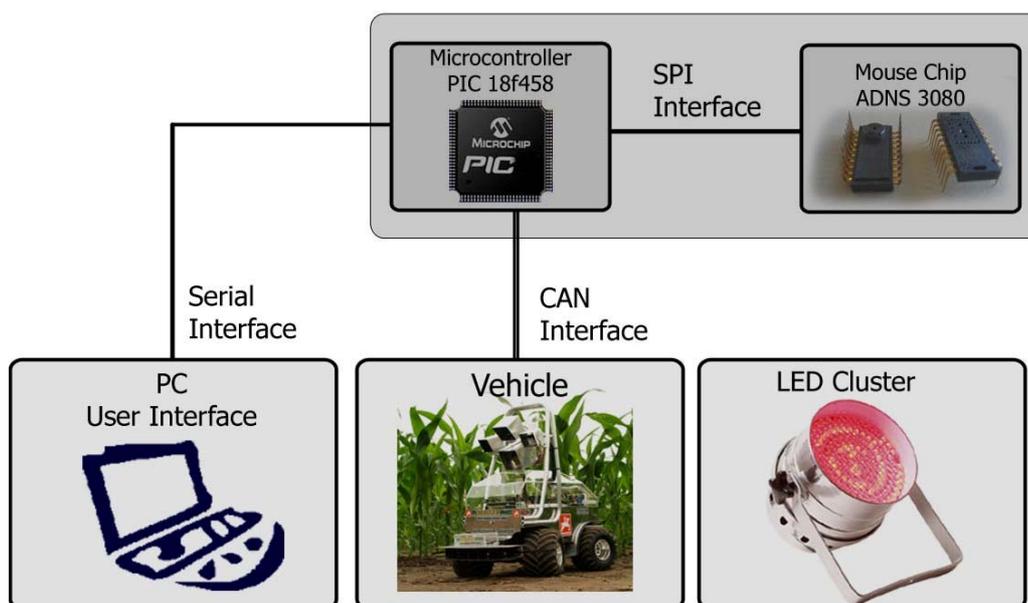
#### 3.1 Odometrie: Optischer Maussensor „optiSense“

Die Aufnahme zuverlässiger Weginformationen stellt eine wesentliche Voraussetzung für eine robuste Navigation in landwirtschaftlicher Umgebung dar. Typischerweise werden Drehgeber zur Odometrie eingesetzt, jedoch wird die Interpretation der Daten durch das Auftreten von Schlupf erschwert.

Die weite Verbreitung optischer Mäuse (mit integrierten Kameras) bietet alternative Optionen zum Einsatz solcher Systeme im Feld. Dabei werden niedrig aufgelöste Differenzbilder zur Wegmessung in x- und y-Richtung ausgewertet. Im Rahmen eines studentischen Projektes wurde ein solcher Sensor aufgebaut und erstmals im Roboter Amaizeing (siehe Abbildung 2) erfolgreich getestet. Systematische quantitative Messungen zum Grad der

Schlupfreduktion im Vergleich zu Drehgebern unter verschiedenen Feldbedingungen sind geplant.

Zur Entwicklung von „optiSense“ wurde der optische Mauschip ADNS 3080 des Herstellers AGILENT verwendet, die Optik wurde an die Einbauhöhe im Roboter Amaizeing (siehe Abbildung 2) angepasst, die Beleuchtungsintensität wurde durch die Verwendung eines LED-Clusters erhöht. Die Kommunikation mit dem Mouse Chip, dem PC (zur Entwicklung) sowie dem Roboter erfolgte über einen Mikrocontroller (siehe **Abbildung 3**). Die Kosten aller optiSense-Komponenten liegen bei knapp 100 €



**Abbildung 3:** Systemintegration des optischen Maussensors optiSense

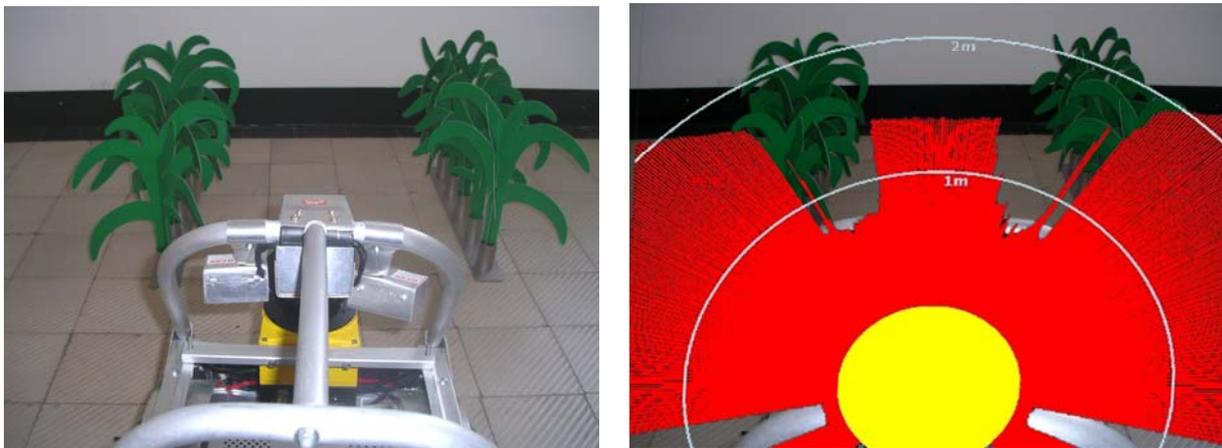
### 3.2 Abstandserfassung: Laserscanner

Die Navigation innerhalb von Reihenkulturen, die Erkennung des Vorgewendes oder die Detektion von Hindernissen basiert maßgeblich auf Abstandsinformationen. Bis auf den Einsatz von Ultraschallsensoren für gemittelte Informationen dominieren optoelektronische Systeme. Die Robustheit der Systeme im Hinblick auf Störgrößen (insbesondere Sonnenlicht, Staub, optische Oberflächeneigenschaften) lässt sich häufig durch den Einsatz von Software oder zusätzlicher Hardware (Abschattung, Elektronik, Sensorik) erhöhen.

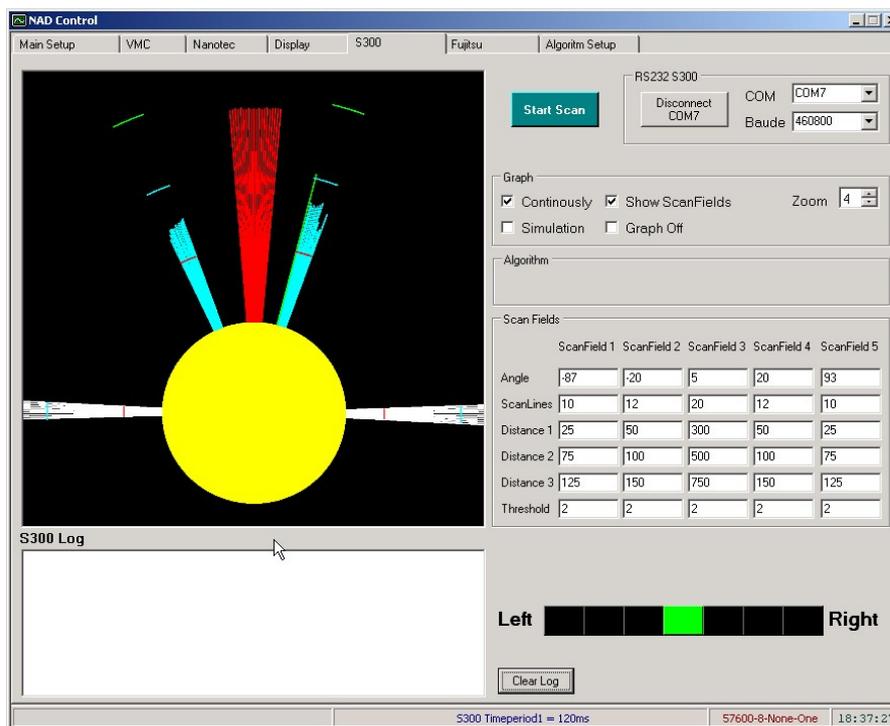
- **1D:** Punktförmige optoelektronische Distanzsensoren basieren auf Triangulation- oder Laufzeitverfahren. Typischerweise können hohe Taktraten (bis in den kHz-Bereich) erzielt werden, intelligente Sensoren verfügen über eine integrierte Vorverarbeitung und Lichtintensitätsanpassung sowie einen Fehlerausgang zur Interpretation der Daten. Die geringe Informationsdichte kann durch den Einsatz mehrerer Sensoren teilweise kompensiert werden.

- 2D: Hier werden 2D-Laserscanner (siehe unten) eingesetzt, die Abstandsinformationen über eine Zeile mit Taktraten im 10Hz-Bereich liefern. Durch die Verfügbarkeit lichtstarker Laserlinien haben in den letzten Jahren auch Lichtschnittverfahren an Bedeutung gewonnen. Dabei wird eine projizierte Laserlinie mit einer Kamera aufgenommen und der Abstand zu den detektierten Pixeln über Triangulation berechnet.
- 3D: Durch die Bewegung eines 2D-Laserscanners (über Schrittmotoren) werden 3D-Laserscanner realisiert. Vielversprechende Ergebnisse wurden mittlerweile auch von 3D-Kameras geliefert, für die entwickelten Laufzeitsysteme wird erhebliches Potenzial gesehen.

Als Beispiel zum Einsatz von Laserscannern auf Feldrobotern wurde der 2D-Laserscanner S300 (Sick) in den autonomen Feldroboter NAD (modifizierte Plattform des ProfiBot, Fraunhofer-Gesellschaft; siehe Abbildung 2) integriert. Die Messdaten mit einem Scanwinkel von  $270^\circ$  (Auflösung:  $0,5^\circ$ ) werden mit Messzyklen bis zu 12 Hz aufgenommen, der erfasste Abstandsbereich liegt zwischen 5 cm und 30 m. Die Anbindung des Sensors an den Feldroboter erfolgt über einen RS422-USB-Konverter direkt an den PC. Zur Evaluation und Systemintegration wurde eine grafische Benutzeroberfläche entwickelt (siehe **Abbildungen 4 und 5**). Bei einer Anwendung auf dem Feld (Reihennavigation) genügt es, den Abstand zu den beiden Reihen und das Reihenende zu erkennen. Dies kann ohne aufwändige Berechnungen online geschehen. Prinzipiell kann man den Sensor als ein System aus vielen (540) Abstandssensoren betrachten. Eine einfache Navigation kann daher z.B. über das Auswerten einzelner Strahlen oder Strahlenbündel (siehe Abbildung 5). Dabei ist das Umrechnen polarer Koordinaten in kartesische Koordinaten zu beachten. Da der maximale Messbereich des Sensors bei 32 m liegt, können Reihenenden oder Hindernisse (Kollisionsschutz) frühzeitig erkannt werden.



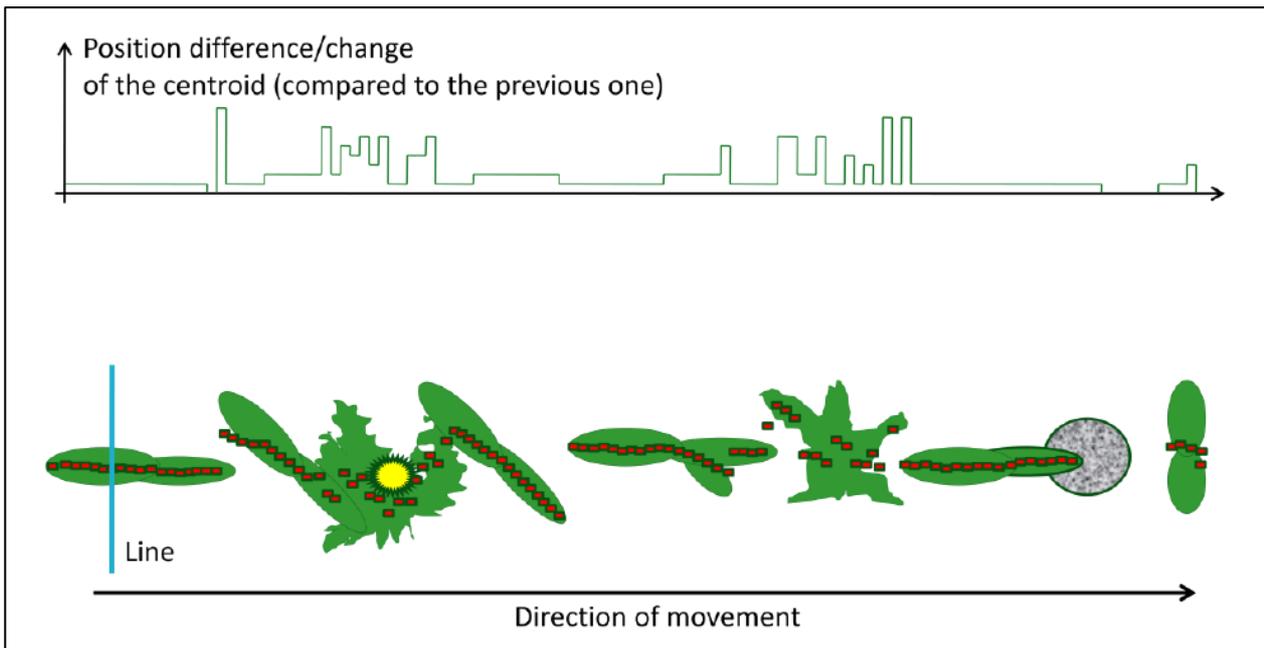
**Abbildung 4:** 2D-Laserscanner zur Detektion von Reihenkulturen



**Abbildung 5:** Grafische Benutzeroberfläche zum Einsatz eines 2D-Laserscanners mit „Strahlenbündel“

### 3.3 Color Tracking: Intelligente Kamera mit Zeilenstatistik

Von den Autoren wird seit 2004 die kostengünstige intelligente Kamera CUMCam2 eingesetzt (KLOSE *et al.* 2005). Seit kurzer Zeit ist das Nachfolgemodell CMUCam3 verfügbar, ein programmierbares Embedded System mit einem Bildsensor. Die Kamera wurde nun zur Reihennavigation und als Unkrautindikator eingesetzt (KLOSE *et al.* 2008). Dabei wird das Color-Tracking zur Detektion der „grünen“ Pixel mit einem entsprechenden Farbtoleranzbereich verwendet. Die intelligente Kamera führt eine einfache Bildverarbeitung durch und liefert die reduzierten Daten über die Schnittstelle zum Roboter. Die in die CMUCam3 integrierte Option zur Zeilenstatistik kann für die Navigation und Agro-Information wichtige Daten beitragen: **Abbildung 6** zeigt die Schwerpunktbildung für die grünen Pixel, die als gleitender Mittelwert zur Navigation eingesetzt werden können. Bildet man die Differenzen benachbarter Schwerpunkte, so zeigen diese bei den Nutzpflanzen (Mais) geringe Schwankungen, während die Abweichungen bei Unkraut deutlich größer sind. Diese Informationen können daher als selektive Informationen in das Sensor Fusion Konzept des Roboters zur Unterscheidung von Nutzpflanzen und Unkräutern integriert werden.



**Abbildung 6:** Schwerpunktberechnung und Differenzbildung "grüner" Pixel mit der CMUCam3 für eine Pflanzenreihe

#### 4 Ausblick

Die Einsatzmöglichkeiten verschiedener Sensoren zur Navigation und Applikation in landwirtschaftlichen Flächen wurden an den Beispielen optischer Maussensor, 2D-Laserscanner und intelligente Kamera gezeigt. Die Komplexität autonomer Systeme in der Landtechnik stellt hohe Anforderungen an die Robustheit solcher Systeme. Die Sensor- und Datenfusion basiert wesentlich auf der Verfügbarkeit verlässlicher Detail-Informationen. Es entsteht somit zunehmender Bedarf, neben der Vorverarbeitung auch weite Bereiche der Auswertung einzelner Sensoren sensornah zu platzieren. Die technische Verfügbarkeit solcher „intelligenter Sensoren“ steigt kontinuierlich, auch sinken die Kosten. Hierdurch wird eine wichtige Voraussetzung für die intelligente – robuste – Verknüpfung der Informationen zur Entwicklung erster Prototypen autonomer Feldroboter geschaffen.

#### 5 Literatur

**FENDER F., HANNEKEN M., LINZ A., RUCKELSHAUSEN A., SPICER M. (2005):** Messende Lichtgitter und Multispektralkameras als bildgebende Systeme zur Pflanzenerkennung / Imaging for crop detection based on light curtains and multispectral cameras. Bornimer Agrartechnische Berichte 40: 7-16

- FENDER F., HANNEKEN M., IN DER STROTH S., KIELHORN A., LINZ A., RUCKELSHAUSEN A. (2006):** Sensor Fusion Meets GPS: Individual Plant Detection. Proceedings of CIGR EurAgEng/VDI-MEG
- HENTEN E.J. VAN, HOFSTEE J.W., MÜLLER J., RUCKELSHAUSEN A. (2007):** The Field Robot Event – An International Design Contest in Agricultural Engineering. In: Fountas S., Aggelopoulou A., Gemtos F., Blackmore S. (eds.), 2007. Proceedings of the 6th European Conference on Precision Agriculture, 3-7 June 2007, Skiathos, Greece, Paper nr. 88, 6 pp
- IN DER STROTH S., RAMLER B., LINZ A., RUCKELSHAUSEN A. (2003):** Weed detection based on spectral imaging systems with CMOS cameras. 4th European Conference on Precision Agriculture ECPA
- KLOSE R., MEIER M., LINZ A., RUCKELSHAUSEN A. (2005):** Reihenführung autonomer Roboter mit der Low-Cost-Kamera CMUCam. Bornimer Agrartechnische Berichte, 40: 131-137
- KLOSE R., KLEVER J., LINZ A., NIEHAUS W., RUCKELSHAUSEN A., THIEL M., URRASACO M., WEGNER U. (2007):** Sensor fusion based navigation of the autonomous field robot Maizerati. Bornimer Agrartechnische Berichte, 60: 56-62
- KLOSE R., MARQUERING J., THIEL M., RUCKELSHAUSEN A. (2008):** Weedy – a Sensor Fusion Based Autonomous Field Robot for Selective Weed Control. 66th International Conference Agricultural Engineering, Stuttgart-Hohenheim, to be published
- KRONSBEN C.-F., EGBERS M., RUCKELSHAUSEN A. (2006):** Optoelektronisches Sensorsystem zur Reifegradmessung bei der Maisernte. Bornimer Agrartechnische Berichte, 56: 16-21
- PEDERSEN, T.S., NIELSEN K.M., ANDERSEN P., BAK T., NIELSEN D. (2002):** Development of an Autonomous Vehicle for Weed and Crop Registration. In: Proc. European Society of Agricultural Engineering -AgEng2002- Conf., 22-24. Budapest-Gödöllő, Hungary
- PEDERSEN S.M., FOUNTAS S., HAVE H., BLACKMORE B.S. (2006):** Agricultural robots – system analysis and economic feasibility. Precision Agric 7: 295–308
- RATH, T., KAWOLLEK, M. (2006):** Probleme des Einsatzes von Robotern zur selektiven Ernte von Pflanzen und Pflanzenteilen. Bornimer Agrartechnische Berichte, 56: 67-75
- RUCKELSHAUSEN A., DZINAJ T., GELZE F., KLEINE HÖRSTKAMP S., LINZ A., MARQUERING J. (1999):** Microcontroller-based multisensor system for online crop/weed detection. Proceedings Brighton Conference, Vol.2: 601-606
- RUCKELSHAUSEN A., LINZ A. (2000):** CMOS-Kameras zur online Erfassung spektraler und geometrischer Signaturen von Pflanzen und Pflanzeigenschaften. Bornimer Agrartechnische Berichte, 25: 101-110
- THÖSINK G., PRECKWINKEL J., LINZ A., RUCKELSHAUSEN A., MARQUERING J. (2004):** Optoelektronisches Sensorsystem zur Messung der Pflanzenbestandsdichte. Landtechnik 59: 78-79