

Bildgebende Lichtschrankensensoren zur Detektion von Pflanzenhöhen, Ähren und Grannen

Ivana Kovacheva¹, Simon Kerksen², Daniel Mentrup², Tina Rosemann², Kevin Bilges², Arno Ruckelshausen¹

¹ University of Applied Sciences Osnabrück, Albrechtstraße 30, 49076 Osnabrück, Germany

² iotec GmbH, Albert-Einstein-Str. 1, 49076 Osnabrück, Germany

Email: a.ruckelshausen@hs-osnabrueck.de

Zusammenfassung: Bildgebenden Lichtschrankensensoren – wie Lichtgitter und Laserzeile - werden zur Erfassung morphologischer Pflanzenmerkmale entwickelt und in Systeme zur Auswertung der Daten integriert. Die Sensorsysteme werden Indoor (Gewächshaus) sowie Outdoor (Feldroboter) eingesetzt und nehmen binäre Daten der Pflanzenbestände auf. Diese Daten stellen ein Schattenbild der vermessenen Pflanzen dar, die für den neu entwickelten Lasersensor sogar die Detektion der Grannen ermöglicht. Durch Bildverarbeitungsalgorithmen können Pflanzenparameter aus den Rohdaten extrahiert werden, Beispiele für Triticale sind die Pflanzenhöhe, die Ährenlänge oder der Winkel zwischen Ähre und Halm.

Deskriptoren: Bildgebende Lichtschrankensensoren, Lichtgitter, Laserzeilensensor, morphologische Pflanzenparameter, Phänotypisierung

Abstract: *Imaging light barrier sensors – such as light curtains and laser line sensor – are developed and applied in systems for the detection of morphological plant properties. The sensors are used indoor (greenhouse) and outdoor (field robots) and take binary data of the crop profile, which can be used for even detecting the awns with the new developed laser sensor. With image processing algorithms crop properties can be extracted from the raw data, examples for Triticale are crop height, ear length or the angle between stalk and ear.*

Keywords: *Imaging light barrier sensors, light curtain, laser line sensor, morphological plant parameters, phenotyping*

1 Einleitung

Sensorsysteme zur dynamischen Erfassung von Pflanzen-, Boden-, Maschinen- und Umgebungsmerkmalen spielen in Kombination mit weiteren Daten eine zentrale Rolle zur gleichzeitigen Optimierung ökonomischer und ökologischer Fragestellungen im Pflanzen- und Gartenbau sowie in der Forstwirtschaft. Der Einsatz innovativer – insbesondere bildgebender – Sensorsysteme spielt gerade für die Pflanzenzüchtung eine wesentliche Rolle, da dort Defizite in der Verfügbarkeit robuster Sensor und einer Systemtechnik zur Datenaufnahme auftreten. Zur Kompensation variierender Selektivitäten

der Pflanzen und Umgebungsmerkmale bietet die Sensorfusion das Potenzial zur robusten Merkmalbestimmung unter Feldbedingungen. Die Komplexität der Messbedingungen und die zeitliche und räumliche Zuordnung der einzelnen Sensoren sind dabei maßgebliche Herausforderungen für die Phänotypisierungsplattformen (BUSEMEYER *et al.* 2013). Das Potenzial dabei ist erheblich, bis hin zu Möglichkeiten der Individualpflanzen-Phänotypisierung bei Mais (FENDER *et al.* 2006, RUCKELSHAUSEN 2014).

Die Mehrzahl bildgebender Systeme (z.B. Farbkameras, Spectral Imaging, Lichtschnitt-Kameras) blicken von oben auf den Feldbestand und sind daher bzgl. der vollständigen Informationen zu den Pflanzen – und insbesondere auch bei deren Überlappung – eingeschränkt. Durch die seitliche Abtastung mit Lichtschranken bieten sich Lösungsoptionen für diese Fragestellungen. Die Autoren entwickeln seit ca. 1997 bildgebende Lichtschrankensysteme und integrieren kommerzielle Systeme in die Feldversuchstechnik oder Landwirtschaft (siehe z.B. DZINAJ *et al.* 1998, RUCKELSHAUSEN *et al.* 1999, FENDER *et al.* 2005, BUSEMEYER *et al.* 2013).

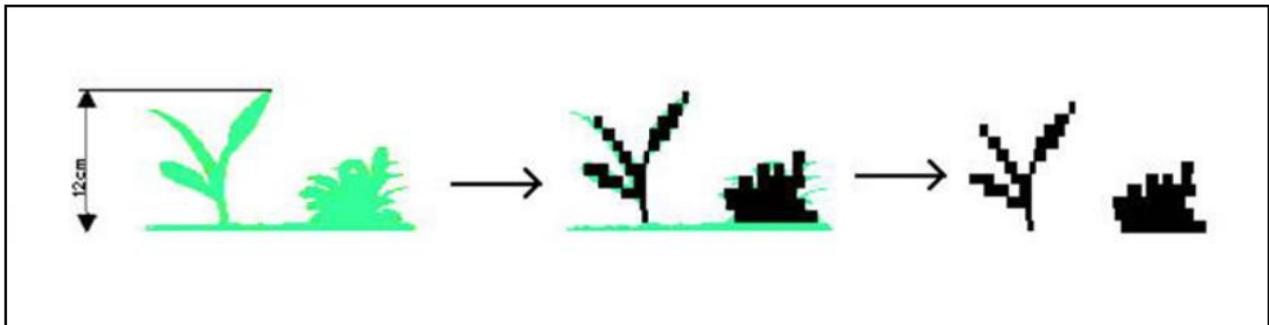


Bild 1: Messtechnische Realisierung des Prinzips bildgebender Lichtschrankensensoren („Schattenbild“) im Feldversuch am Beispiel einer Mais- und Beikrautpflanze (KIELHORN *et al.* 2000)

Das Messprinzip ist in **Bild 1** dargestellt: Das Schattenbild der Pflanzen wird durch bildgebende Lichtschranken mit einer entsprechenden Auflösung abgetastet und die resultierenden Binärdaten eines „Endlosbildes“ werden mit Bildverarbeitungsalgorithmen ausgewertet. In dem Beispiel von **Bild 1** wurde das System für die Unterscheidung von Nutzpflanzen und Beikräutern bei der mechanischen Beikrautregulierung innerhalb von Maisreihen eingesetzt (KIELHORN *et al.* 2000).

Das System kann beispielsweise sehr gut für die Bestimmung des Höhenprofils von Pflanzen eingesetzt werden, in Feldversuchen werden für Mais und Triticale seit mehreren Jahren Feldversuche durchgeführt. **Bild 2** zeigt dazu die schematische Anordnung für Mais mit den eingezeichneten Lichtschranken und das entsprechende Messprofil des Feldversuchs (FENDER *et al.* 2005, BUSEMEYER *et al.* 2011). Durch die Integration eines Wegsensors (z.B. ein Drehgeber) wird die Proportionalität der Messsignale in Bewegungsrichtung erfasst, so dass räumlich unverzerrte Binärdaten in die Algorithmen zur Analyse der Endlosbilder einfließen. Die Sensoren werden auch in größeren Pflanzenbeständen eingesetzt, **Bild 2** zeigt auch Lichtgitter im Triticale-Bestand, hier werden Pflanzenhöhen bis ca. 2 m vermessen. Aus sicherheitstechnischen Gründen (Beschädigungen) bei der Überfahrt sind die Gitter etwas schräg angeordnet, die resultierenden Messdaten werden entsprechend korrigiert.

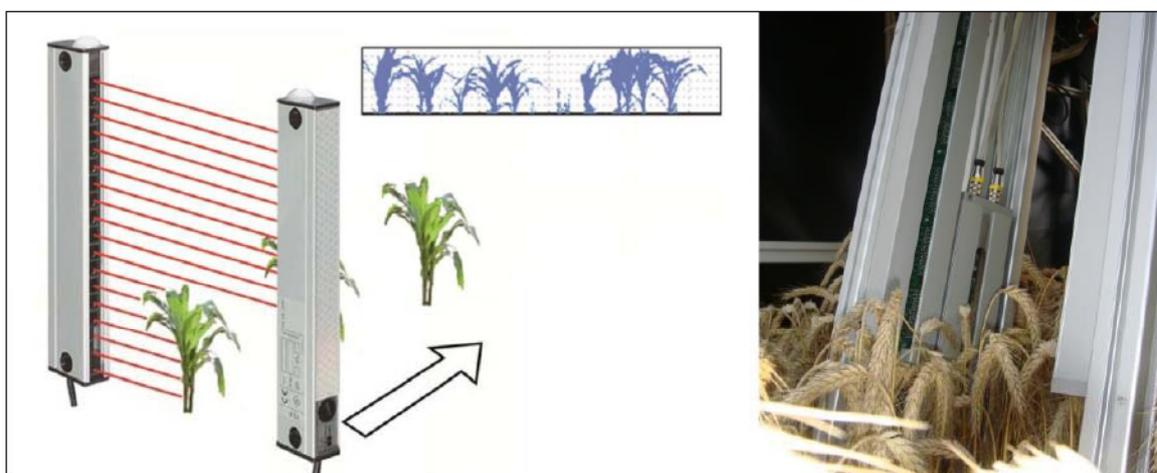


Bild 2: Sensoraufbau zur Feldmessung bildgebender Lichtschranken (am Beispiel Lichtgitter) in Mais und Triticale (BUSEMEYER *et al.* 2010)

Die Messung des seitlichen Pflanzenprofils bietet sowohl im Labor/Gewächshaus als auch auf dem Feld nützliche Informationen. Auf Grundlage der beschriebenen Arbeiten haben mittlerweile auch andere Arbeitsgruppen diese Technologien zur Indoor-Pflanzenphänotypisierung (FANOURKIS *et al.* 2014) oder in Feldversuchen bei Mais (MONTES *et al.* 2011) eingesetzt, in beiden Fällen wurden Lichtgitter als bildgebende Lichtschrankensensoren eingesetzt. Im Rahmen dieser Arbeit wird die Weiterentwicklung der Feldversuchs-Technologien unter folgenden Zielrichtungen beschrieben:

- a) Die Ermittlung weiterer Pflanzenparameter aus den Rohdaten (z.B. Eigenschaften der Ähren bei Triticale)
- b) Die weitere technologische Verbesserung der räumlichen Auflösung der bildgebenden Lichtschrankensensoren durch den Einsatz von Laserzeilensensoren an Stelle von Lichtgittern.

2 Material und Methoden

Als bildgebende Lichtschrankensensoren werden 2 unterschiedliche Prinzipien eingesetzt:

- (1) Lichtgitter: Eine Vielzahl individueller Lichtschranken mit jeweils einem Sender (typischerweise eine LED) und einem Empfänger (typischerweise eine Fotodiode), die übereinander angeordnet sind und seriell ausgelesen werden. Diese Lichtgitter werden bisher typischerweise bei Feldmessungen eingesetzt (DZINAJ *et al.* 1998, FENDER *et al.* 2005, BUSEMEYER *et al.* 2010/2013, MONTES *et al.* 2011).
- (2) Lasersensor: Es wird eine einzige Lichtquelle (typischerweise ein Laser) verwendet, das Licht wird optisch auf eine Zeile projiziert und eine CCD/CMOS-Sensorzeile dient als Detektor. Diese Lichtschrankentechnologie wurde bisher nicht zur Pflanzenphänotypisierung eingesetzt.

Lichtgitter

Das Lichtgitter InfraScan 5288/2.5 der Firma Sitronic GmbH (siehe **Tabelle 1**) wird für Feldmessungen in Mais und Triticale eingesetzt (BUSEMEYER *et al.* 2010). Das System besteht aus diskreten Sendern (übereinander angeordneten Infrarot Sendedioden) und Empfängern (übereinander angeordneten Silizium-PIN-Fotodioden), wobei die Empfänger den auf sie fallenden Lichtstrahl detektieren. Wenn sich ein Objekt zwischen den Sensoreinheiten befindet, dann sind die Lichtstrahlen an diesen Stellen unterbrochen. Die Auflösung von 2,5 mm in vertikaler Richtung(y-Richtung) wird durch den Abstand zwischen den einzelnen Lichtschranken bestimmt. Bewegen sich entweder der Sensor (z.B. auf einer Phänotypisierungsplattform) oder die Pflanzen (z.B. auf einem dynamischen Labormessstand), so entsteht aus den einzelnen „Bildern“ (frames) des Lichtgitters ein kontinuierliches binäres Bild. Ein Drehgeber (auf der Plattform oder dem Teststand) gibt die Position des Messobjektes mit ca. 1 mm Genauigkeit an und wird in die Systemtechnik integriert. Somit ist die Skalierung in Bewegungsrichtung unabhängig von der Relativgeschwindigkeit von Pflanzen und Sensor, auch werden morphologische Daten zusätzlich in Bewegungsrichtung absolut messbar. Die aufgenommenen Daten des Lichtgitters werden mit Zeit- und Ortsstempel in eine MySQL Datenbanken abgespeichert. Aus diesen Informationen können durch automatische und halb-automatische Bildverarbeitungs- Algorithmen die Pflanzenhöhe(**h**), Ährenlänge(**l**), Winkelstellung der Ähren gegenüber dem Halm(**w**) sowie die Anzahl von den erfassten Pflanzen bestimmt werden (siehe auch **Bild 5**).

Tabelle 1: Vergleich charakteristischer Daten für ein Lichtgitter (InfraScan, Sitronic) und einen Laserzeilensensor (iotec GmbH).

Parameter	Lichtgitter InfraScan 5288/2.5	Laserzeilensensor
Hersteller	SITRONIC GmbH	iotec GmbH
Optische Daten		
Dioden/Pixelanzahl	288 Dioden	1536 Pixel (pro 98 mm Messfeld)
Strahlenabstand/Auflösung	2.5 mm	64 μm
Messfeld	720 mm	98 mm (kaskadierbar)
Abstand Sender-Empfänger	0,2 m bis 6,5 m	0,1 m bis 10,0* m
Wellenlänge	950 nm	650 nm
Optisches Filter	Tageslichtsperrfilter	Rotlichtfilter, Tageslichtsperrfilter
Elektrische Daten		
Ausgabemodi	Binär, BCD oder Gray	Binär oder Grauwerte (8 Bit)
Zykluszeit	3,08 ms	250 μs
Schnittstellen	RS422, Konverter RS422→RS232	Ethernet
Weitere technische Daten		
Schutzklasse		Laserklasse 1
Schutzart	IP 67	IP 66*
Betriebstemperaturbereich	-25°C...50°C	-0°C...55°C

Laserzeilensensor

Bildgebende Lichtschranken können auch mit einer einzelnen Linienlichtquelle (z.B. ein Laser) und einem integrierten CCD/CMOS-Zeilensensor aufgebaut werden. Die örtliche Auflösung liegt damit im Bereich des einzelnen Bildsensorpixels (z.B. bei 64 μm) und ist deutlich höher im Vergleich zu den oben beschriebenen Lichtgittern mit diskret aufgebauten Sensor-Empfänger-Kombinationen (2500 μm). Für landwirtschaftliche Anwendungen wurde ein ähnliches System zur Messung von Saat- oder Düngerkörnern aufgebaut (FENDER *et al.* 2007). Die Firma iotec GmbH hat nun ein solches System mit einem hochauflösenden Lasersensor für den Einsatz in der Pflanzenphänotypisierung aufgebaut (**Tabelle 1**). Es wird – wie bei einem Lichtgitter – ein Schattenbild erzeugt. Die deutlich verbesserte Auflösung führt dazu, dass nun neben den Ähren auch die Grannen bei Triticalen erfasst werden können und damit weitere Pflanzenparameter bei der Feldphänotypisierung zugänglich werden. Das entwickelte Laserzeilensensorsystem besteht aus Laserdioden auf der Senderseite und CCD/CMOS-Bildsensoren auf der Empfängerseite. Das sichtbare Rotlicht der Laserdiode wird über die interne Optik in eine Linie aufgeweitet. Die Objekte werden nach dem Schattenwurfprinzip vermessen

mit einer ca. 40-mal höheren Pixelauflösung als das vorgestellte Lichtgitter. Die Datenumwandlung erfolgt durch einen FPGA - Field Programmable Gate Array (ROSEMANN 2013). Infolge liegt die Bildauflösung in horizontaler x-Richtung wie in vertikaler y-Richtung im μm -Bereich (auch bei ca. 1 km/h Geschwindigkeit). Somit können die Granen an den Ähren vermessen werden und damit die Option zur Bestimmung der Körnerzahl pro Ähre durch einen entsprechenden Bildverarbeitungsalgorithmus.

Experimentelle Umgebung

Mit den Systemen werden sowohl Labormessungen an dynamischen Messständen im Labor (**Bild 3**) als auch Feldmessungen mit den Phänotypisierungsplattformen BoniRob und BreedVision (**Bild 4**) durchgeführt.



Bild 3: Dynamischer Messplatz (Förderband) zur Sensor- und Algorithmenentwicklung unter Laborbedingungen; Laserzeilensensor-Modul im Ährenbereich (links) und Lichtgitter über die gesamte Pflanzenhöhe (rechts)



Bild 4: Feldmessungen mit bildgebenden Lichtgittern in Mais mit dem autonomen Feldroboter BoniRob (links) und der Phänotypisierungsplattform BreedVision in Triticale (rechts) nach BUSEMEYER *et al.* 2010 sowie dort aufgeführter Referenzen.

Für die Messungen im Labor werden Versuchsplots durch echte Pflanzen modelliert. Dabei wurden die einzelnen Pflanzen auf einer MDF-Platte (1 m Länge und 0,25 m Breite) an zufälligen Koordinaten in senkrechter Position platziert. Die Pflanzenplots werden mithilfe eines Förderbandes mit definierter variabler Geschwindigkeit (typisch 0,5 m/s) durch die Sensoreinheiten bewegt. Unter anderem wurden Modelle mit Bestandesdichten von 450 Ähren pro m² und 600 Ähren pro m² vermessen, die realen Triticale-Feldbeständen entsprechen. Die Rohdaten werden im Anschluss mit den entwickelten Algorithmen analysiert.

Algorithmen

Für die Bestimmung der morphologischen Pflanzenparameter bei Triticale wurden zwei Methoden entwickelt - halbautomatisch und automatisch (KOVACHEVA 2013). Das erste Verfahren gibt dem Benutzer die Möglichkeit die gewünschten Ähren auf dem aufgenommenen Schattenbild mithilfe der Maus zu selektieren und speichert die Koordinaten von Ährenspitze(x_1, y_1) und Ährenanfang(x_2, y_2) ab. Aus diesen Informationen werden die Pflanzenparameter ermittelt, dieses Verfahren ist auf Lichtgitter- sowie auf Lasersensordaten übertragbar. Die zweite Methode bestimmt die Parameter aus der Binärinformation durch eine Reihe morphologische Bildverarbeitungsoperationen. Dabei werden vorrangig morphologische Öffnung, Dilatation und Skelettierung des Bildes angewendet. Somit werden die Halme aus dem Bild entfernt und aus dem Skelett des Ährenbereiches werden weiterhin die einzelnen Ähren automatisch detektiert. Ziel von beiden Verfahren ist die Bestimmung der Ährenkoordinaten. Wenn sie bekannt sind, können weiterhin die gesuchte Parameter **h**, **l** und **w** ermittelt werden. Dabei wird angenommen, dass die Halme senkrecht zum Boden stehen. Die automatische Methode kann (bisher noch nicht) zwischen Ährenanfang und Ährenspitze nicht unterscheiden und aus diesem Grund wird angenommen, dass **w** kleiner als 90° ist (siehe **Bild 5**). Der Winkel **w** wird mithilfe Formel (1) berechnet.

$$w = \frac{180}{\pi} * \text{atan}(|x_1 - x_2| * \text{Auflösung}_x / (|y_1 - y_2| * \text{Auflösung}_y)) \quad (1)$$

Für jede selektierte oder automatisch erkannte Ähre werden die gesuchten Parameter einzeln berechnet. Als letzter Schritt werden mittlere Pflanzenhöhe, mittlere Ährenlänge, mittlerer Winkel sowie mittlerer Ähren-Halm-Faktor (Quotient von Ährenlänge und Pflanzenhöhe) berechnet. Diese Mittelwerte werden mithilfe der detektierten Ähren ermittelt, die größer als 70 mm sind; dadurch wird der Einfluss von falsch erkannten (selektierten) Ähren auf das Gesamtergebnis minimiert.

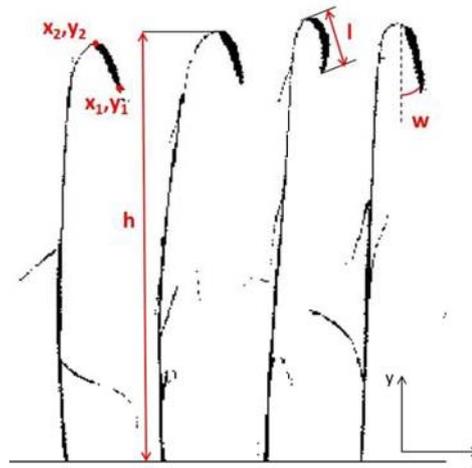


Bild 5: Definition der Ährenkoordinaten (Spitze: x_1, y_1 ; Anfang: x_2, y_2), der Ährenlänge l , des Ährenwinkels w und der Pflanzhöhe h für Triticale am Beispiel einer Messung an einem Förderband-Testplatz (siehe **Bild 4**).

3 Ergebnisse und Diskussion

Die Ergebnisse der dynamischen Feldmessungen mit dem Lichtgitter – insbesondere zur Biomasse-Bestimmung - werden ausführlich in BUSEMEYER *et al.* 2013 und dort aufgeführten Referenzen beschrieben. In diesem Beitrag werden die Bestimmung der Pflanzenparameter aus den Rohdaten bildgebender Lichtschrankensysteme sowie die ersten Messresultate des Laserzeilensensors beschrieben. **Bild 6** zeigt Messdaten am dynamischen Labormessstand für das Lichtgitter (sitronic) und den Laserzeilensensor (iotec). Zusätzlich wurde ein Lichtgitter mit niedrigerer Auflösung (5 mm; KONTURflex, Leuze) zum Vergleich mit aufgenommen, welches die Ähren nicht auflösen kann. Die Ähren sind bei dem InfraScan-System deutlich erkennbar, der Laserzeilensensor ist sogar in der Lage, die Grannen zu detektieren. Die Entwicklung eines Algorithmus, der die Grannen an den Ähren aus dem Binärbild erkennt, ermöglicht die Schätzung der Körner pro Ähre.

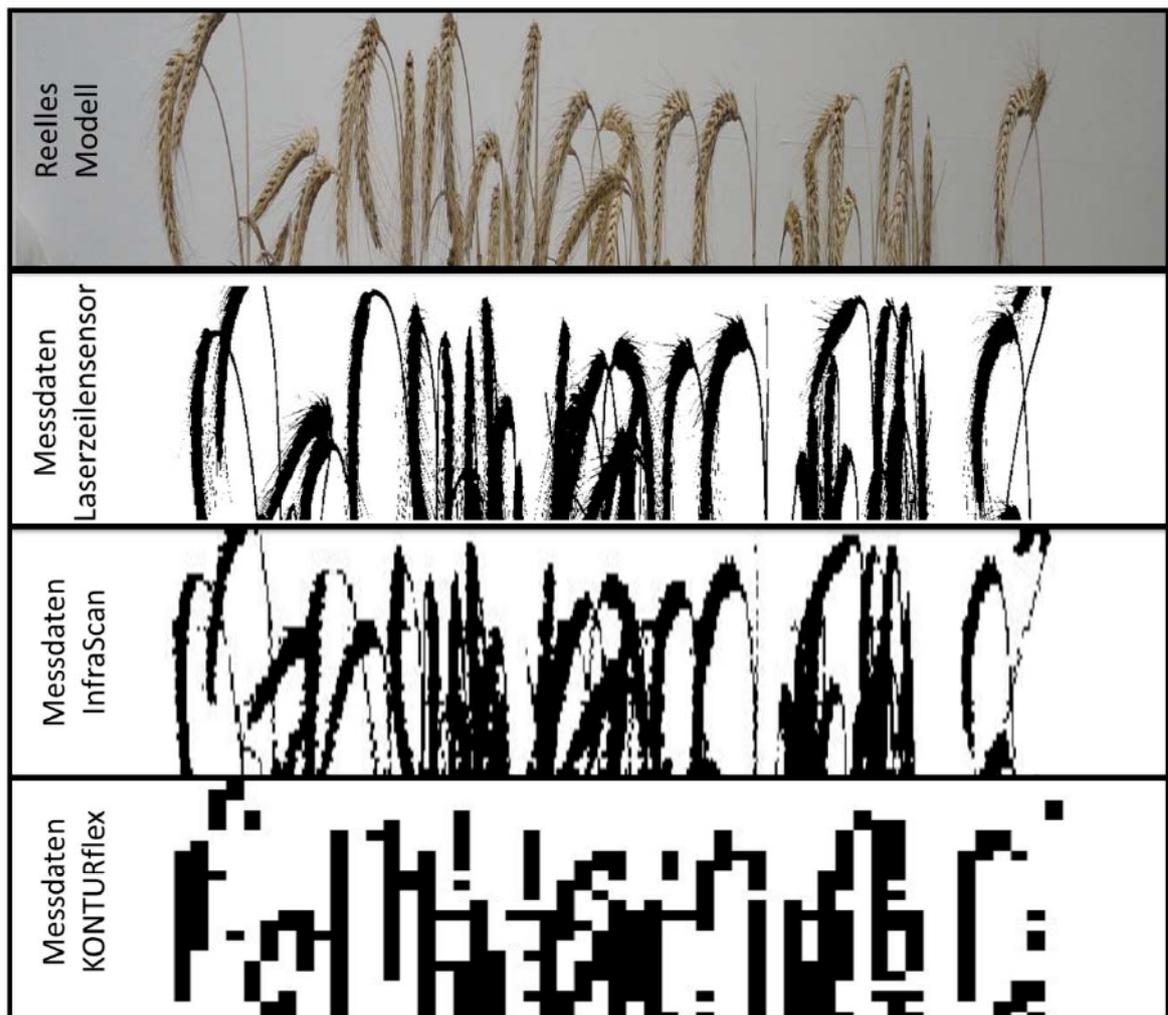


Bild 6: Vergleich verschiedener bildgebender Lichtschrankensensoren für Triticale unter dynamischen Laborbedingungen am Förderband (von oben nach unten): Photo (Modellpflanzen), Laserzeilensensor mit Grannendetektion, Lichtgitter mit Auflösung der Ähren (InfraScan) sowie zum Vergleich ein Lichtgitter mit niedrigerer Auflösung (Konturflex).

Das Ergebnis des vollautomatischen Algorithmus zur Ährenerkennung ist in **Bild 7** dargestellt. Dabei wurde ein Pflanzenplot mit 148 Pflanzen (Bestandesdichte ca. 600 Ähren pro m^2) vermessen. Der Algorithmus hat die mittlere Höhe von dem Bestand berechnet und 140 Ähren (rot markiert) detektiert, davon wurden 57 vollständig (>70 mm) detektiert. Daraus folgt, dass die Mittelwerte von den gesuchten Parametern aus ca. 40% aller Pflanzen berechnet wurden.

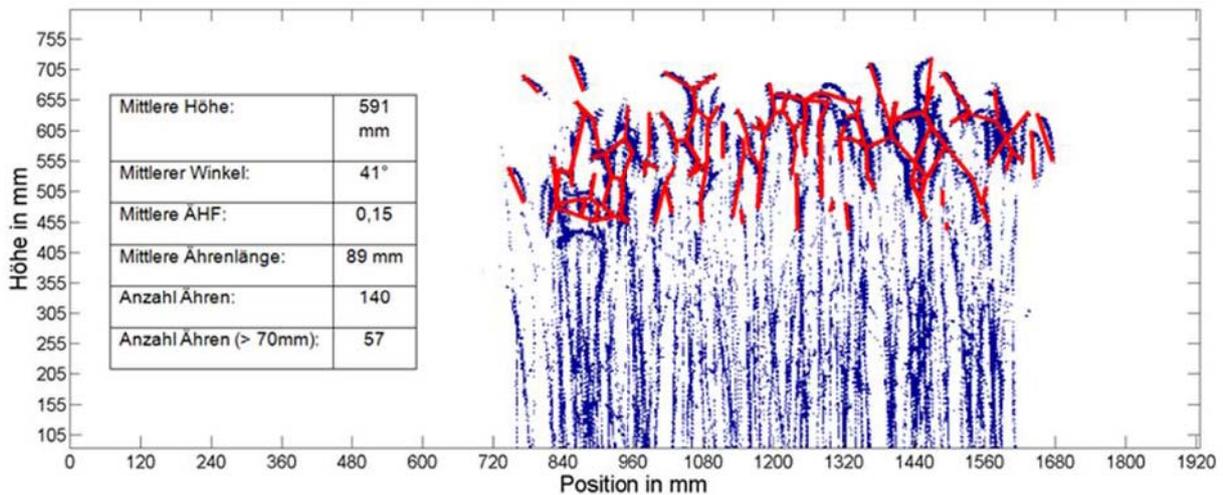


Bild 7: Automatische Ermittlung von Pflanzenparametern aus bildgebenden Lichtschrankensensoren am Beispiel Triticale (KOVACHEVA 2013)

Aus der Häufigkeitsverteilung des Ährenwinkels w (**Bild 8**) kann die Streuung der Winkel zwischen den Ähren gegenüber den Halmen abgeschätzt werden. Die Daten können z.B. hinsichtlich des Reifegrades interpretiert werden.

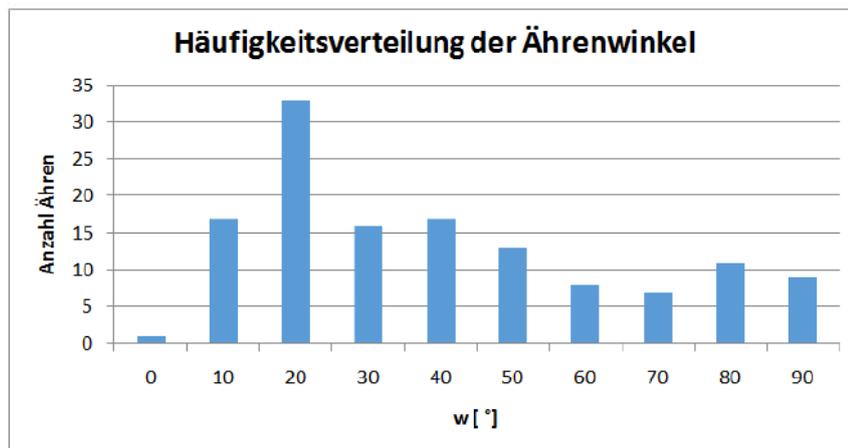


Bild 8: Beispiel für eine Häufigkeitsverteilung des Ährenwinkels w (Ähre zu Halm)

4 Ausblick

Bildgebende Lichtschrankensensoren - Lichtgitter und ein Lasersensor - werden für die Erfassung morphologischer Merkmale von Triticale eingesetzt. Das kontinuierliche Auslesen von unterbrochenen und ununterbrochenen Strahlen ergibt bei bewegten Pflanzen oder bewegtem Sensor ein Seitenprofil der Bestände in Form eines Binärbildes. Dieses Bild kann durch halbautomatische und automatische Algorithmen analysiert werden, um die Pflanzenparameter Höhe, Ährenlänge, Winkel der Ähren gegenüber den Halmen, Ähren-Halm-Faktor sowie die Anzahl der vermessenen Pflanzen zu ermit-

teln. Aus diesen Daten können weitere agronomische Werte der Bonitur berechnet werden: die effektive Höhe der Pflanze und die Bestandesdichte.

Die sehr gute Auflösung (unterhalb von 0,1 mm) des Laserzeilensensors ermöglicht die Vermessung der Grannen an den Ähren. Dieser bis jetzt nicht technisch erfasster Parameter kann für andere agronomische Merkmale wie Anzahl Körner pro Ähre, Tausendkornmasse und Kornertrag pro m² von großer Bedeutung sein. Hierzu werden Messungen im Labor und Feld durchgeführt. Die entwickelte Laserzeilensensor-Technologie öffnet damit neue Einsatzfelder für die bildgebenden Lichtschrankensensoren. Die Kaskadierung des Sensors ermöglicht darüber hinaus ein größeres Messfeld und somit die Erfassung von ganzen Pflanzen, dies ist in **Bild 9** dargestellt.

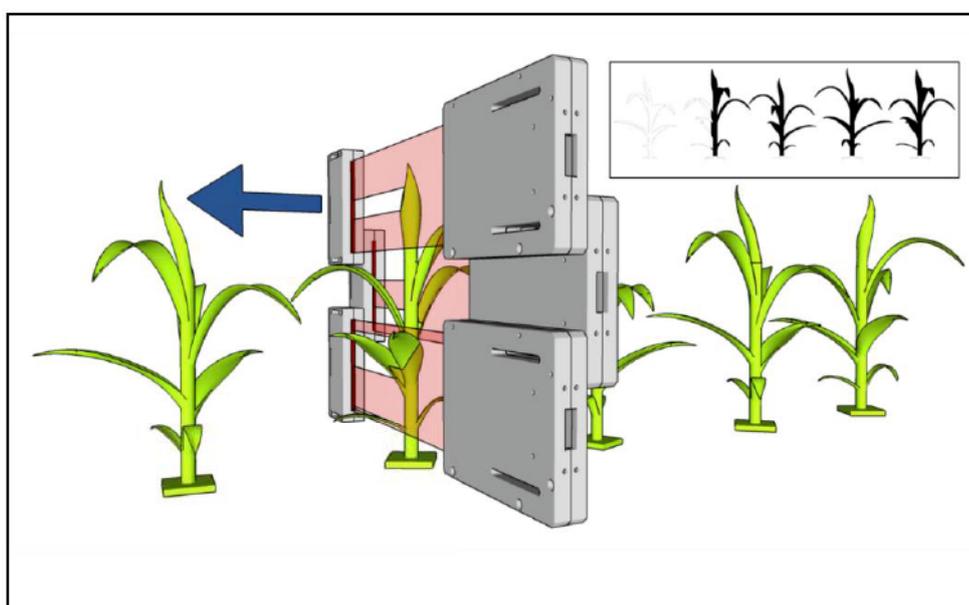


Bild 9: Schematische Darstellung zur Kaskadierung von Laserzeilensensoren zur Vermessung kompletter Pflanzen; der Sensor bewegt sich von rechts nach links

Literaturverzeichnis

- BUSEMEYER L., KLOSE R., LINZ A., THIEL M., WUNDER E., TILÉNAC M., RUCKELSHAUSEN A. (2010):** Agro-sensor systems for outdoor plant phenotyping platforms in low and high density crop field plots; Proceedings 68th International Conference Agricultural Engineering 2010, pp.213 - 218
- BUSEMEYER L., MENTRUP D., MÖLLER K., WUNDER E., ALHEIT K., HAHN V., MAURER H.P., REIF J.C., WÜRSCHUM T., MÜLLER J., RAHE F., RUCKELSHAUSEN A. (2013):** BreedVision — A Multi-Sensor Platform for Non-Destructive Field-Based Phenotyping in Plant Breeding, Sensors, 2013, Vol. 13, pp. 2830-2847
- DZINAJ T., KLEINE-HÖRSTKAMP S., LINZ A., RUCKELSHAUSEN A., BÖTTGER O., KEMPER M., MARQUERING J., NAESCHER J., TRAUTZ D., WISSERODT E. (1998):** Multi-Sensor-System zur Unterscheidung von Nutzpflanzen und Beikräutern. 19. Deutsche Arbeitsbesprechung über Fragen der Unkrautbiologie und -bekämpfung, 10.-12.03.98, Z. PflKrankh. Pflschutz, Sonderh. XVI, 233 - 242, Stuttgart- Hohenheim

- FANOURAKIS D., BRIESE C., MAX J., KLEINEN S., PUTZ A., FIORANI F., ULBRICH A., SCHURR U. (2014):** Rapid determination of leaf area and plant height by using light curtain arrays in four species with contrasting shoot architecture. *Plant Methods*, 10:9 doi:10.1186/1746-4811-10-9
- FENDER F., HANNEKEN M., LINZ A., RUCKELSHAUSEN A., SPICER M. (2005):** Messende Lichtgitter und Multispektralkameras als bildgebende Systeme zur Pflanzenerkennung, *Bornimer Agrartechnische Berichte*, Heft 40, (ISSN 0947-7314), S.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*, 2006, 279-280
- FENDER F., LANG B., MARQUERING J., RUCKELSHAUSEN A., SCHEUFLER B. (2007):** Duo-Körnerlichtschranke als bildgebendes Sensorsystem zur Charakterisierung landwirtschaftlicher Gutpartikel, *Bornimer Agrartechnische Berichte*, Heft 60, 2007, S.123-128
- KIELHORN A., DZINAJ T., GELZE F., GRIMM J., KLEINE-HARTLAGE H., KLEINE HÖRSTKAMP S., KUNTZE W., LINZ A., NAESCHER J., NARDMANN M., RUCKELSHAUSEN A., TRAUTZ D., WIBERODT E. (2000):** Beikrautregulierung in Reihenkulturen – Sensorgesteuerte Querhacke im Mais; *Zeitschrift für Pflanzenkrankheiten und Pflanzenschutz*, Sonderheft XVII, S.207-215
- KOVACHEVA I. (2013):** Bestimmung von Pflanzenparametern unter Anwendung bildgebende Lichtgitter, Master Thesis, Hochschule Osnabrück
- MONTES J.M., TECHNOW F., DHILLON B.S., MAUCH F., MELCHINGER A.E. (2011):** High-throughput non-destructive biomass determination during early plant development in maize under field conditions, *Field Crops Research*, Volume 121, Issue 2, 18 March 2011, Pages 268–273
- ROSEMAN T. (2013):** Entwicklung eines FPGA-basierten Laserzeilen-Sensorsystems mit Ethernet-Schnittstelle, Bachelor Thesis, Hochschule Osnabrück
- RUCKELSHAUSEN A., DZINAJ T., GELZE F., KLEINE-HÖRSTKAMP S., LINZ A. (1999):** Microcontroller-based multi-sensor system for online crop/weed detection. *The 1999 Brighton Conference Weeds*, 15.-18.11.99, Conference proceedings volume 2, 601 - 606, Brighton
- RUCKELSHAUSEN A. (2014):** Neue Sensorentwicklungen – ein technischer Blick auf Pflanzen, Sensoren und Daten, *Journal für Kulturpflanzen*, 66 (2). S.73-79, ISSN1876-0911, DOI: 10.5073/JFK.2014.02.06, Verlag Eugen Ulmer KG, Stuttgart