

Detlef Ehlert, Rolf Adamek und Hans-Jürgen Horn, Potsdam-Bornim

Messeigenschaften von Laser-Abstandssensoren

Um mit Laser-Abstandssensoren repräsentativ Pflanzenbestände erfassen zu können, müssen diese den Pflanzenbestand vorausschauend und in entsprechender Breite abscannen. Dazu sind Messabstände oberhalb von 2,5 m zu realisieren. Da Laserstrahlen einen gerätespezifischen Querschnitt haben, der mit steigendem Abstand zunimmt, ist zu erwarten, dass Pflanzenbestände mit filigraner Struktur (Getreidebestände) nicht sicher ausgemessen werden können. Anhand von wiederholten Scans unter gleichen Bedingungen wird nachgewiesen, dass auch bei größeren Messabständen eine hohe Wiederholgenauigkeit erreicht wird.

Auf dem Markt verfügbare Laser-Abstandssensoren arbeiten nach den Messprinzipien: Licht-Laufzeit, Phasenmodulation, Interferometrie oder Triangulation. Häufig werden auch die drei ersten Prinzipien zusammenfassend als Licht-Laufzeit-Messung bezeichnet. Triangulationssensoren werden zum Messen von geringen Entfernungen (nur wenige Meter) und bei sehr hohen Genauigkeitsanforderungen eingesetzt, während Sensoren nach dem Licht-Laufzeit-Prinzip sowohl für geringe als auch für große Entfernungen geeignet sind.

Idealisiert kann der Laserstrahl als dreidimensionaler Gaußstrahl betrachtet werden, dessen Intensität in der Strahlachse am höchsten ist. Der vom Sensor ausgesendete Lichtstrahl besitzt einen gerätespezifischen Querschnitt, der zusätzlich von der Messentfernung abhängig ist [1]. Daraus folgt, dass der Messabstand einen Einfluss auf das Messverhalten eines Laser-Abstandssensors hat. Somit sind die Messeigenschaften eines Laser-Abstandssensors gerätespezifisch und müssen daher für beabsichtigte Einsatzbedingungen näher untersucht werden.

Im Gegensatz zu industriellen Anwendungen, die meistens unter Dach und definierten Bedingungen erfolgen, sind die Einsatzbedingungen im landwirtschaftlichen Bereich wesentlich schwieriger. Neben Belastungen durch Schwingungen und Staub entstehen weitere wesentliche Probleme durch das Arbeiten im Freien unter sehr verschiedenen Witterungs- und Beleuchtungsbedingungen.

Um bei intensivem Sonnenlicht messen zu können, werden von Herstellern Laser-Abstandssensoren der Klasse 3b eingesetzt, die hinsichtlich des Arbeitsschutzes als problematisch einzuschätzen sind.

Weiterhin besteht im Pflanzenbau die Notwendigkeit, aus der Fahrbewegung Entfernungen zu pflanzlichen Zieloberflächen zu messen, die sehr unterschiedlich geformt und geneigt sind und die relativ geringe Abmessungen aufweisen. Charakteristische Beispiele dafür sind fahzeuggestützte Messungen in Pflanzenbeständen von Gras- und Getreide, die eine sehr filigrane Struktur aufweisen. Unter solchen Einsatzbedingungen ist offen, wie sich das Messergebnis gestaltet, wenn zum Beispiel der Laserstrahl gleichzeitig auf unterschiedlich entfernte Pflanzenoberflächen oder die Bodenoberfläche trifft. Es ist zu erwarten, dass diese Situation insbesondere bei größeren Messentfernungen und Strahlquerschnitten auftritt.

Laser-Abstandssensoren in der Landtechnik

Laser-Abstandssensoren haben im Bereich der Pflanzenproduktion ein erhebliches Anwendungspotenzial. Nach dem gegenwärtigen Erkenntnisstand können Laser-Abstandssensoren auf Geräten zur teilflächenspezifischen Applikation von Düngemitteln und Pflanzenschutzmitteln und auch auf Erntemaschinen erfolgreich eingesetzt werden.

Dr.-Ing. Detlef Ehlert ist Leiter der Abteilung Technik im Pflanzenbau am Leibniz-Institut für Agrartechnik Potsdam-Bornim e.V., Max-Eyth-Allee 100, 14469 Potsdam; e-mail: dehlert@atb-potsdam.de.
Dipl.-Ing Rolf Adamek und Dipl.-Ing. Hans-Jürgen Horn sind Mitarbeiter der Abteilung.

Schlüsselwörter

Präzisionslandwirtschaft, Laser-Abstandssensor, Messeigenschaften

Keywords

Precision Agriculture, laser rangefinder, measuring properties

Tab. 1: Mögliche Kombinationen der Lage der Schwenkachse und Anordnungen des Laserstrahls zur fahzeuggestützten Messung von Bestandesparametern

Table 1: Combination variants of arrangements of the swivel axle and laser beam for vehicle based measurement of crop parameters

Lage der Schwenkachse	Anordnung des Laserstrahls zur Schwenkachse	Durch Strahl generierte Figur	Schnittfigur mit Aufstandsebene	Messung des Schwenkwinkels
waagrecht	senkrecht ($\varphi=0^\circ; \gamma \neq 0^\circ$)	Kreis	gerade Linie	erforderlich
	geneigt ($\varphi \neq 0^\circ; \gamma \neq 0^\circ$)	Kegelmantel	Hyperbel	erforderlich
geneigt	senkrecht ($\varphi \neq 0^\circ; \gamma \neq 0^\circ$)	Kreis	gerade Linie	erforderlich
	geneigt ($\varphi \neq 0^\circ; \gamma \neq 0^\circ$)	Kegelmantel	Parabel, Ellipse, Hyperbel	erforderlich
senkrecht	senkrecht ($\varphi=90^\circ; \gamma \neq 0^\circ$)	Kreisscheibe	keine	-
	geneigt ($\varphi \neq 0^\circ; \gamma \neq 0^\circ$)	Kegelmantel	Kreis	nicht erforderlich

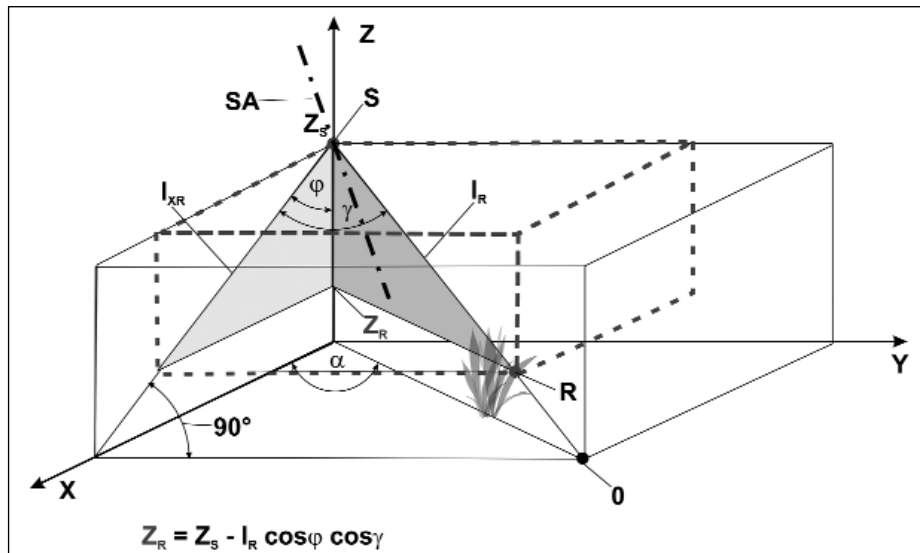


Bild 1: Geometrie des Laserstrahls im Raum

Fig.1: Geometry of the laser beam in the space

Im Bereich der marktverfügbaren Landtechnik werden Laser-Abstandssensoren gegenwärtig bereits auf Mähdreschern eingesetzt. So verwendet die Fa. Claas einen Laser-Abstandssensor (Laserpilot) auf den Lexion-Mähdreschern, der in der Lage ist, die Bestandeskante zu erkennen. Mit dieser Information wird die Lenkung des Mähdreschers so angesteuert, dass die Breite des Schneidwerks optimal ausgenutzt wird. Eine ähnliche Lösung ist auf den neuesten CX-Mähdreschern von Case-New Holland zu finden, die als SmartSteer bezeichnet wird. Neben der Einhaltung der optimalen Schnittbreite des Schneidwerks werden positive Effekte bei der Genauigkeit der Ertragskartierung durch das Einhalten einer konstanten Arbeitsbreite erzielt.

Im Bereich der Forschung wurden marktverfügbare Laser-Abstandssensoren hinsichtlich ihrer Eignung für das fahrzeuggestützte Messen von Pflanzenparametern untersucht [2]. Es konnten enge funktionelle Zusammenhänge zwischen der aus der Reflexionshöhe errechneten Reflexionshöhe (m) und der Pflanzenmassedichte (kg m^{-2}) ermittelt werden. In den Feldkulturen Winterraps, Winterroggen und Winterweizen war das Bestimmtheitsmaß bei einem linearen Ansatz stets größer als 0,9 ($R^2 > 0,9$). Bei Wiesengras wurden infolge der sehr unterschiedlichen Morphologie der Pflanzen diese hohen Werte nicht erreicht. Der Laserstrahl war bei diesen Messungen entweder starr nach unten in den Bestand gerichtet oder wurde um eine waagerechte Achse von $\pm 15^\circ$ geschwenkt. Die Installationshöhe des Sensors und somit die Messentfernungen betragen weniger als 2,5m. Aus diesen Angaben kann abgeleitet werden, dass die Messpunkte mit einem Durchmesser im Millimeterbereich auf einer

Geraden oder einer sinusförmigen Linie mit einer Amplitude von weniger als 1,34 m angeordnet waren.

Landmaschinen für das Ausbringen von Dünge- und Pflanzenschutzmitteln haben meist Arbeitsbreiten von mehr als 20m. Um für diese Arbeitsbreiten den Pflanzenbestand weitgehend repräsentativ durch den Laser-Abstandssensor zu erfassen, müssten die Messungen über einen breiteren Streifen und somit in größeren Entfernungen erfolgen. Damit entsteht das oben bereits beschriebene Problem.

Aus der Sicht der Strahlführung ist bei Laser-Abstandssensoren zu unterscheiden zwischen Sensoren mit einem festen Strahl und denen mit einem scannerförmig bewegten Strahl. Während bei Laserscannern auf Seiten des Anwenders nur eingegrenzte Möglichkeiten bestehen, die Scannerbewegung zu beeinflussen, können bei Lasern mit festem Strahl vom Anwender durch Bewegen des gesamten Sensorgehäuses mit einer entsprechenden Kinematik individuelle Lösungen entwickelt werden.

Scannen mit Feststrahl-Sensoren

Um eine Scanbewegung mit einem Feststrahl-Sensor zu erzeugen, muss der Sensor um eine Achse geschwenkt oder gedreht werden. Je nachdem wie die Achse im Raum angeordnet ist, entstehen völlig unterschiedliche Scaneigenschaften des Lasersensors (Bild 1). Da bei Landmaschinen der Bereich vor dem Fahrzeug und unterhalb des Sensors zu erfassen ist, sind ganze Drehungen des Sensors sowie Schwenkwinkel γ von mehr als $\pm 90^\circ$ zur Fahrtrichtung (X-Achse) grundsätzlich nicht erforderlich.

In Tabelle 1 sind mögliche Kombinationen der Lage der Schwenkachse SA und Anord-

nungen des Laserstrahls zur Schwenkachse für die fahrzeuggestützte Messung von Bestandesparametern dargestellt. In der Mehrzahl der Kombinationen hängt der gemessene Reflexionsabstand I_R vom Schwenkwinkel γ ab und muss rechnerisch kompensiert werden, um die Reflexionshöhe Z_R zu ermitteln. Um diese Kompensation zu ermöglichen, ist Voraussetzung, dass der Schwenkwinkel γ zeitsynchron mit dem Reflexionsabstand I_R gemessen wird.

Das Messen des Schwenkwinkels kann entfallen, wenn – wie aus Tabelle 1 ersichtlich – die Schwenkachse senkrecht zur Aufstandsfläche des Basisfahrzeugs steht und der Sensorstrahl um den Winkel φ zur Schwenkachse geneigt ist. In diesem Fall beschreibt der Sensorstrahl einen senkrecht stehenden Kegelmantel. Im idealisierten Fall würde bei dieser Anordnung und bei nicht vorhandenem Pflanzenbestand für jeden Schwenkwinkel γ eine Reflexionshöhe Z_R von Null errechnet werden. Diese Unabhängigkeit des Reflexionsabstandes vom Schwenkwinkel γ ist in gleicher Weise bei Messungen im Pflanzenbestand gewährleistet.

Reproduzierbarkeit der Scans unter Feldbedingungen

Bei größeren Messentfernungen und Schwenkwinkeln ist es sehr schwierig, die funktionellen Beziehungen zwischen Refle-

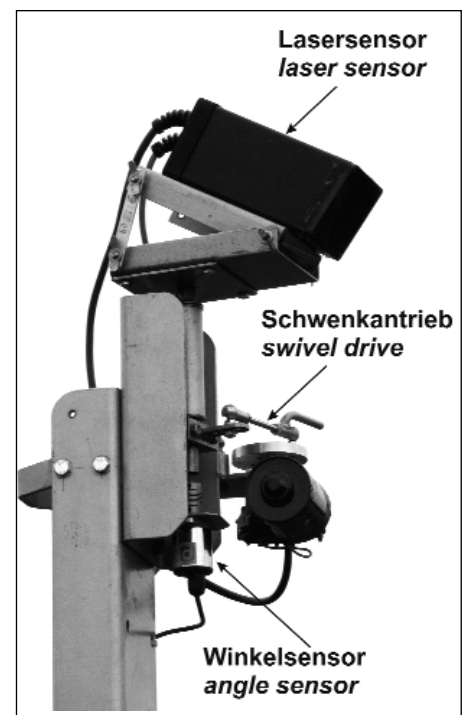


Bild 2: Schwenkeinrichtung mit Feststrahl-Sensor und senkrechter Achsanordnung

Fig. 2: Swivel unit with fixed beam sensor and vertical axle arrangement

Tab. 2: Vergleich der Mittelwerte, Standardabweichungen und Variationskoeffizienten des Reflexionsabstandes in Winterweizen

Table 2: Comparing mean values, standard deviations and coefficients of variations of the reflection range in winter wheat

Anstellwinkel φ Grad	Anzahl Scans	Mittelwert m	Vorlauf / Rücklauf Standardabw. m	Variationsk. %
	Winterweizen, erntereif, 13. 7.2007, Sensorhöhe 3,65 m			
45	43 / 43	4,543 / 4,564	0,0095 / 0,0084	0,21 / 0,18
60	60 / 60	6,061 / 6,065	0,0118 / 0,0116	0,19 / 0,19
75	56 / 56	10,093 / 10,087	0,0538 / 0,0512	0,53 / 0,51
	Winterweizen, BBCH 33, 15.5.2008, Sensorhöhe 2,75 m			
45	24 / 22	3,214 / 3,188	0,0094 / 0,0086	0,29 / 0,16
60	25 / 23	4,064 / 4,080	0,0062 / 0,0086	0,15 / 0,21
75	26 / 25	7,213 / 7,127	0,0067 / 0,0087	0,09 / 0,12

xionshöhe und Pflanzenmassedichte in Einzelmessungen zu untersuchen, da ein genauer räumlicher Bezug zwischen dem gescannten Bereich des Pflanzenbestandes und der dabei erfassten Pflanzenmasse nur mit erheblichen Aufwendungen möglich ist. Laser-Abstandssensoren können dennoch hinsichtlich ihrer Messeigenschaften bei größeren Messentfernungen überprüft werden, indem sie mit jedem Scan einen zwar unbekannt, aber dennoch konstanten Ausschneid aus einem Pflanzenbestand ausmessen. Unter Feldbedingungen können diese Voraussetzungen geschaffen werden, indem ein Lasersensor auf einem Basisfahrzeug in der Weise montiert wird, dass seine Schwenkachse senkrecht zum Basisfahrzeug steht. Wird das Basisfahrzeug in einen Pflanzenbestand gefahren und während der Messung nicht bewegt, ist gewährleistet, dass für jeden Scan der identische Pflanzenbestand vorhanden ist. In diesem Fall müsste der Lasersensor für jeden einzelnen Scan die gleiche mittlere Reflexionshöhe ausweisen. Anhand der Streuung der mittleren Reflexionshöhen der einzelnen Scans ist es möglich, Aussagen über die Wiederholgenauigkeit der Messungen abzuleiten. Eine weitere Form, die Sensoreigenschaften bei größeren Messentfernungen zu bewerten, besteht darin, den Laserstrahl markante Merkmale des Pflanzenbestandes wie Fahrspuren oder Bestandekanten abtasten zu lassen. Diese müssten sich durch Sprünge im Reflexionsabstand in den einzelnen Scans deutlich zu den entsprechenden Schwenkwinkeln γ abzeichnen.

Um diese Fragen zu klären, wurden in Winterweizen im Jahr 2007 in einem erntereifen Bestand und 2008 im BBCH-Stadium 33 entsprechende Messungen durchgeführt. Als Lasersensor wurde der Feststrahlsensor ACUITY eingesetzt, der bereits in [3] hinsichtlich seiner technischen Daten beschrieben wurde. Der Sensor wurde mit einer speziell entwickelten Schwenkeinrichtung bewegt (Bild 2). Die Schwenkachse stand

senkrecht zum Basisfahrzeug (Hege- Geräteträger) und wurde mit einer Kurbelschwinge über einem Schwenkwinkel von 73° und einer Frequenz von ~ 1 Hz bewegt. Die zeit-synchrone Messung des Schwenkwinkels erfolgte mit dem Drehwinkelsensor P500A.160 L300 der Fa. Positek Ltd. UK. Als Neigungswinkel φ des Sensors wurden 45° , 60° und 75° gewählt.

Ergebnisse

Um den Grad der Übereinstimmung der Messwerte aus den einzelnen Scans visuell darzustellen, wurden die gemessenen Reflexionsentfernungen über den entsprechenden Schwenkwinkeln aufgetragen (Bild 3). Wie das Bild 3 beispielhaft zum Ausdruck bringt, werden die charakteristischen Verläufe von jedem einzelnen Scan wiedergegeben. Besonders markant sind die Sprünge, die von den Regelspuren erzeugt wurden. Um die

Scans etwas differenzierter bewerten zu können, wurden die Vorläufe und die Rückläufe getrennt betrachtet und miteinander verglichen. Dieser Vergleich in Tabelle 2 belegt, dass die Mittelwerte des Reflexionsabstandes der einzelnen Scans nur im cm-Bereich variieren.

Literatur

- [1] Fischer, C.: Wirtschaftlichere Anwendung des Strahlwerkzeugs Laser – Eigenschaften besser analysieren. *optolines* 14 (2007), H. 14, S. 19-22
- [2] Ehlert, D., R. Adamek and H-J. Horn: Assessment of laser rangefinder principles for measuring crop biomass. In Stafford, J. (ed): Precision agriculture '07. 6th European conference on Precision Agriculture, Wageningen Academic Publishers, The Netherlands, 2007 (ISBN 978-90-8686-024-1), pp. 317-324
- [3] Ehlert, D., und R. Adamek: Einsatzpotenzial von Laser-Abstandssensoren im Pflanzenbau. *Landtechnik* 62 (2007), H. 1, S. 22-23

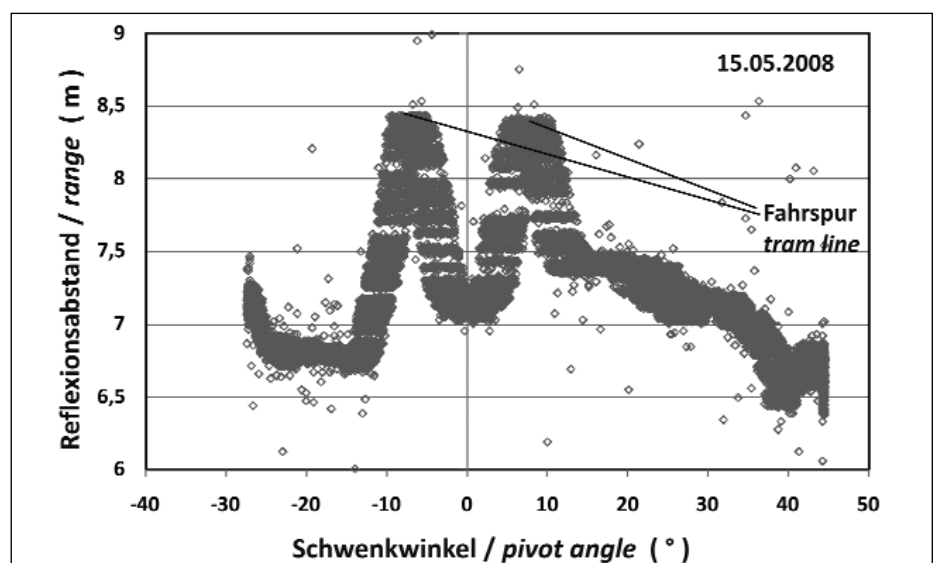


Bild 3: Darstellung des Reflexionsabstands in einem Weizenbestand (BBCH 33; 25 Scans; Sensorhöhe $\sim 2,75$ m; Neigungswinkel 75°)

Fig. 3: Demonstration of the reflection range in winter wheat (BBCH 33; 25 scans; sensor height 2.75 m; inclination angle 75°)