

Laser zum Messen von morphologischen Pflanzenbestandesparametern

Detlef Ehlert

Abteilung Technik im Pflanzenbau, Leibniz-Institut für Agrartechnik, Potsdam-Bornim

Die Kenntnis von ortsspezifischen morphologischen Bestandesparametern wie Pflanzenmassedichte oder Pflanzenhöhe bildet eine wichtige Grundlage für das Optimieren von Prozessen bei der Bestandesführung und auch bei der Ernte. Voraussetzung für eine praktische Umsetzung sind Sensoren, die das Messen von Bestandesparametern mit hinreichender Genauigkeit bei geringen Kosten ermöglichen. In den letzten Jahren wurden Lasersensoren zur Abstandsmessung für zahlreiche industrielle Anwendungen entwickelt und erfolgreich eingesetzt. Im folgenden Beitrag wird untersucht, ob ihr Einsatz auch einen Beitrag zur Messung von Pflanzenparametern erbringen kann.

Schlüsselwörter

Pflanzenparameter, Messprinzip, Laser-Abstandssensor

Einleitung

Das Ziel landwirtschaftlicher Produktion besteht im Erzeugen von pflanzlichen Produkten mit spezifischen Eigenschaften, die im wesentlichen von der Pflanzenart und -sorte bestimmt werden. Trotz des wachsenden Wettbewerbsdruckes müssen die gewählten Produktionsverfahren die Rentabilität der Erzeugerbetriebe sichern. Zunehmend fordert die breite Öffentlichkeit, dass in den Produktionsverfahren stärker die Belange des Umwelt- und Ressourcenschutzes berücksichtigt werden.

Um diese gestiegenen Anforderungen erfüllen zu können, müssen verstärkt Informationen zur Optimierung der landwirtschaftlichen Produktionsverfahren genutzt werden. Diese Informationen können nur mit vertretbarem Aufwand gewonnen werden, wenn Sensoren entwickelt und eingesetzt werden, die in der Lage sind, verfahrensrelevante Boden- und Pflanzenparameter zu ermitteln.

In landwirtschaftlichen Produktionsverfahren ist insbesondere die Menge an gewachsenem pflanzlichem Material ein wichtiger Parameter zur Beurteilung von Pflanzenbeständen. Ein weiterer verfahrensrelevanter Parameter ist insbesondere bei Halmkulturen die mittlere Pflanzhöhe, die i. d. R. mit der Pflanzenmassedichte eng korreliert ist. Beide Parameter geben Auskunft über die zu erwartende Ern-

temenge oder werden genutzt, um den Einsatz von Dünge- und Pflanzenschutzmitteln für eine kleinräumige Bewirtschaftung zu optimieren [1]. Weiterhin können bei Erntemaschinen die Betriebsparameter, wie Fahrgeschwindigkeit oder Drehzahlen von Maschinenbaugruppen, der Pflanzenmenge angepasst werden.

Stand der Entwicklung zur Messung von Bestandesparametern

Zur fahrzeuggestützten Ermittlung der Pflanzenmasse in stehenden Pflanzenbeständen sind bereits indirekte Messverfahren bekannt. Als berührend messende Einrichtung wird zum Beispiel ein physikalisches Pendel eingesetzt, das beim Durchfahren von halmartigen Pflanzenbeständen ausgelenkt wird. Der gemessene Auslenkwinkel ist dabei hoch mit der Pflanzenmasse korreliert [2]. Bei dieser Messmethode ist von Nachteil, dass mechanische Funktionselemente erforderlich sind und der Anwendungsbe- reich nur auf Halmkulturen beschränkt ist.

Berührungslos arbeitende optisch-spektralanalytische Geräte (Yara N-Sensor) zur Bemessung der optimalen Stickstoffdüngermenge sind bereits auf dem Markt verfügbar [3], die ebenfalls in der Lage sind, die Pflanzenmasse relativ zu messen. Scotford & Miller [4] ermittelten Bestandesparameter in Win-

terweizen durch die Kombination der Messung des NDVI-Indexes und der Wuchshöhe mittels Ultraschallsensor. Eine weitere Methode ist die laserinduzierte Fluoreszenzmessung des Chlorophylls, die ebenfalls Rückschlüsse auf die vorhandene Pflanzenmasse gestattet [5].

In der Offenlegungsschrift DE 101 30 665 A1 der Fa. John Deere wird eine Vorrichtung zur Messung der Menge von auf dem Feld stehenden Pflanzen beschrieben. Die Erfindung schlägt vor, dass von einem Sender elektromagnetischer Wellen ein Empfänger die Intensität oder Amplitude der reflektierten Wellen ermittelt, die von der Anzahl der Pflanzen pro Flächeneinheit und der Abmessung der Pflanzen abhängt. Die gemessene Intensität wird bei der Ermittlung der Menge der Pflanzen berücksichtigt.

Von der Fa. Claas werden eine Vorrichtung und ein Verfahren vorgeschlagen, Bestandeskanten bei Feldkulturen (EP 0887 660 A2), Bearbeitungsgrenzen oder entsprechende Leitgrößen zu erkennen. Diese Information wird genutzt, um Erntemaschinen (Mähdrescher, Feldhäcksler) und Maschinen z.B. zur Bodenbearbeitung (DE 197 43 884 A1) automatisch so zu lenken, dass eine gleichbleibende Arbeitsbreite bei gleichzeitiger Entlastung des Fahrers gewährleistet ist. Eine nähere Bewertung physikalischer Parameter des Pflanzenbestandes erfolgt nicht.

Zur berührungslosen Ermittlung des Pflanzenbewuchses werden Vorrichtungen und ein Verfahren (DE 198 58 157 A1; DE 198 58 168 A1) vorgeschlagen, die die Grundlage für die zielgerichtete Durchführung von Pflanzenschutzmaßnahmen bilden sollen. Der Schwerpunkt dieser Lösungen besteht primär darin, die Größe und den Standort von Kulturpflanzen und Unkräutern zu ermitteln.

Bei der zielgerichteten volumenspezifischen Applikation von Betriebsmitteln, vorrangig im Obstbau, wird ein System zum Beeinflussen von Boden und Pflanzen (WO 02/091823) vorgeschlagen, das die Pflanzen durch einen umlaufenden monochromatischen pulsierenden Laserstrahl abtastet und somit ein räumliches Abbild des Baum- oder Strauchbestandes sowie des Bodens entsteht.

Es gibt Messgeräte mit denen der Blattflächenindex (LAI) gemessen werden kann, z.B. CropScan der Fa. Skyeinstruments (www.skyeinstruments.com). Diese Geräte werden ausschließlich für wissenschaftliche Untersuchungen eingesetzt, da ihnen für den Ma-

schineneinsatz in Echtzeit die erforderliche Robustheit und Messeffektivität in Form zu langer Messzyklen fehlen.

Thösink et al. [6] beschreibt die Messung der Pflanzenbestandesdichte mit auf dem Markt bereits vorhandenen optoelektronischen Sensorsystemen, und es werden erste Ergebnisse vorgestellt. In Übereinstimmung mit dem vorgestellten Messprinzip wurde bisher die Patentschrift DE 103 29 472 A1 eingereicht und am 27.01.2005 offen gelegt.

Messen von Bestandesparametern mittels Lasersensoren

Im Jahr 1994 durchgeführte eigene Untersuchungen zur Messung des Pflanzenbestandes hinsichtlich der Ausdehnung und der Masse mit Ultraschallsensoren ergaben nur unbefriedigende Ergebnisse, da die Signale ein sehr hohes Rauschen zeigten. Dieses Rauschen war einerseits bedingt durch die unterschiedlichen Bedingungen der Schallreflexion auf den Pflanzenoberflächen, die von der Pflanzenart, dem Wachstumsstadium und insbesondere durch die Neigung von Blättern, Stängeln und Ähren bestimmt wurden. Andererseits waren die ausgesendeten Schallkeulen hinsichtlich des Durchmessers zu groß, um in die Pflanzenbestände ausreichend tief einzudringen und um eindeutige Abstandssignale zu erhalten.

Ein zu diesem Zeitpunkt eingesetzter nach dem Laufzeit-Messprinzip arbeitender Lasersensor mit einem Strahlbündeldurchmesser von einigen Zentimetern brachte etwas bessere Ergebnisse. Infolge des hohen Preises und der mangelnden Robustheit erschien ein Einsatz in der Landwirtschaft und im Gartenbau zu diesem Zeitpunkt als wenig erfolgversprechend.

Inzwischen wurden neue Lasersensoren zur Abstandsmessung entwickelt und auf den Markt gebracht, die vorrangig nach dem Triangulationsprinzip arbeiten (**Bild 1**). Für dieses Messprinzip ist kennzeichnend, dass ein emittierter Laserstrahl beim Auftreffen auf eine Oberfläche eine punktförmige diffuse Reflexion bewirkt, die vom integrierten Empfänger des Sensors registriert wird. Auf Grund der physikalischen Gesetzmäßigkeiten von Strahlengängen durch Linsen wird der Lichtpunkt je nach Entfernung an unterschiedlichen Stellen des Emp-

fängers abgebildet und gleichzeitig ein elektrisches Signal erzeugt. Einige dieser Sensoren sind relativ preiswert, arbeiten mit sehr geringen Lichtbündelquerschnitten im Millimeterbereich und hoher Messfrequenz. Damit sind die entscheidenden Voraussetzungen geschaffen, mit dem Strahl tief in die Pflanzenbestände einzudringen und eindeutige Reflexionssignale in ausreichender Anzahl zu erhalten.

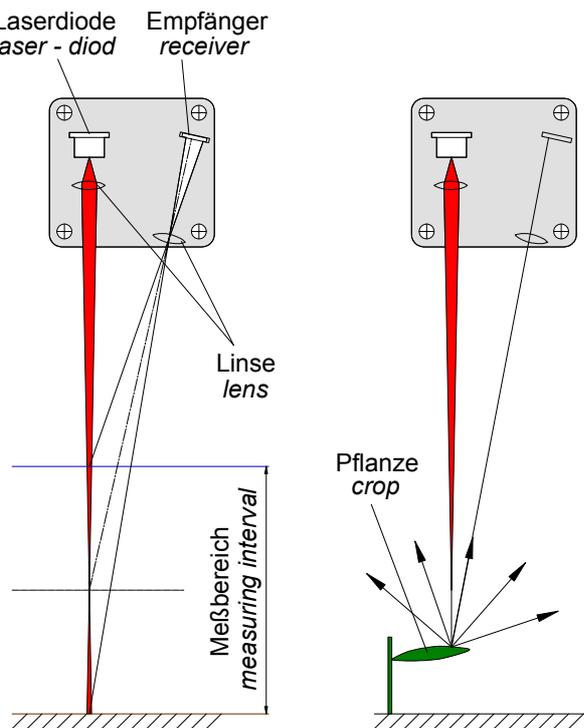


Bild 1: Messprinzip der Laser-Triangulation zum Erfassen morphologischer Bestandesparameter

Das Grundprinzip der Messung von morphologischen Parametern eines Pflanzenbestandes, wie z.B. der Pflanzenmassedichte und der Pflanzenhöhe besteht darin, dass ein in konstanter Höhe über dem Pflanzenbestand bewegter Lasersensor Abstände misst, in denen der Strahl auf die Pflanzenoberfläche oder den Boden trifft und reflektiert wird. Auf der Grundlage einer statistischen Auswertung können dann Aussagen über die Beschaffenheit eines Pflanzenbestandes abgeleitet werden, die die Grundlage für eine optimierte Bestandesführung bilden. Gestützt auf Plausibilitätsüberlegungen kann davon ausgegangen werden, dass grundsätzlich mit stärkerer Ausbildung des Pflanzenbestandes die gemessenen Abstandswerte mit einer hohen statistischen Wahrscheinlichkeit abnehmen werden.

Ein wesentliches Problem bei der Anwendung dieses Messprinzips wird darin gesehen, dass Pflanzenbestände sehr unregelmäßige Strukturen aufweisen und dass die Oberflächen der Pflanzenteile sehr große Unterschiede hinsichtlich der Farbe, Oberflächenbeschaffenheit und Neigung zum einfallenden Laserstrahl aufweisen.

Um die praktische Verwertbarkeit des Messprinzips einschätzen zu können, sind umfangreiche systematische Untersuchungen erforderlich.

Um eine erste Wertung - im Sinne einer Vorbewertung - dieses Messprinzips zu ermöglichen, werden im vorliegenden Beitrag folgende Fragestellungen untersucht:

- Welche Anforderungen sind an Lasersensoren zur Messung von Bestandesparametern zu stellen?
- Welche marktverfügbaren Lasersensoren könnten annähernd die Anforderungen erfüllen?
- Wie ist die Eignung ausgewählter Sensoren zu bewerten?
- Welche weiteren Bearbeitungsschritte sind erforderlich?

Anforderungen an Lasermodelle

Das Erfassen von morphologischen Bestandesparametern stellt an die Lasersensoren einige besondere Anforderungen. Werden diese nicht oder nur unzureichend erfüllt, so bestehen keine Aussichten, das Messprinzip erfolgreich in die praktische Landwirtschaft einzuführen.

Da die Erfassung von Bestandesparametern i.d.R. auf Fahrzeugen im Freiland unter Feldbedingungen erfolgt, müssen die Sensoren robust gegen mechanische Schwingungen und Witterungseinflüsse sein. An die Messgenauigkeit sind nur geringe Anforderungen zu stellen, da für den vorgesehenen Einsatz eine Genauigkeit von 0,01 m als völlig ausreichend betrachtet werden kann. Um -angebracht an landwirtschaftlichen Fahrzeugen- auch in hohen Pflanzenbeständen noch bis hinunter zum Boden messen zu können, sollte der nutzbare Abstandsbereich nicht unter 1,5 m betragen.

Da die Einsatzfähigkeit rund um die Uhr zu gewährleisten ist, müssen die Sensoren bei allen Lichtverhältnissen ausreichend brauchbare Messwerte lie-

fern. Es ist zu erwarten, dass dies nachts und bei geringer Lichtintensität noch möglich ist. Insbesondere bei intensivem Sonnenschein besteht die akute Gefahr, dass das Sonnenlicht die Zielfläche überstrahlt und somit keine messbare Reflexion des Laserstrahls durch den Empfänger möglich ist.

Da der Laserstrahl je Messimpuls nur ein zufälliges Einzelsignal liefert, ist zum Gewährleisten eines statistisch ausreichend gesicherten Ergebnisses eine hohe Anzahl von Einzelmesswerten erforderlich, die nur über eine entsprechend hohe Messfrequenz erreichbar ist. Diese sollte nicht unter 1000 Hz betragen. Zusätzlich ist durch eine entsprechende Sensorführung zu gewährleisten, dass der Laserstrahl ausreichend repräsentative Bereiche des Pflanzenbestands erfasst. Es ist unbedingt auszuschließen, dass z.B. in Reihenkulturen vorrangig nur die Reihenzwischenräume bzw. nur die Pflanzenreihen und damit ein zu geringer bzw. zu hoher Pflanzenbestand ermittelt wird.

Auswahl von Sensoren

Unter Berücksichtigung der zu stellenden Einsatzanforderungen zum Erfassen von Bestandesparametern wurden unter Nutzung des Internets und von Prospektmaterial die auf dem Markt angebotenen Lasersensoren hinsichtlich ihrer potentiellen Eignung analysiert. Die auf der Grundlage der verfügbaren technischen Angaben durchgeführte Vorbewertung erfolgte hinsichtlich der zu erwartenden Erfüllbarkeit der im Punkt „Messen von Bestandesparametern mittels Lasersensoren“ formulierten Anforderungen. **Tabelle 1** enthält eine Zusammenstellung von Sensoren, die ausgewählt und einer näheren Betrachtung unterzogen werden sollen.

Die für industrielle Anwendungen entwickelten La-

ser-Abstandssensoren arbeiten vorrangig im Bereich des sichtbaren roten Lichtes, um ihre Ausrichtung und die Kontrolle der Messfläche ohne spezielle Brillen zu ermöglichen. Auch werden sie aus Gründen des Arbeitsschutzes in Rot ausgeführt und vorrangig auf die Ausführungsklasse 2 beschränkt. Geeignete Laser anderer Wellenlängen wie z.B. Infrarot-Laser, die auf Pflanzenoberflächen ein günstigeres Reflexionsverhalten zeigen müssten, konnten im Rahmen der durchgeführten Recherchen nicht gefunden werden. Aus Kostengründen war die Einzelanfertigung eines für die zu stellenden Anforderungen ausgelegten Lasersensors nicht möglich.

Einsatzergebnisse

Prinzipielle Bewertung der Lasersensoren

Die vorgenommene Vorbewertung zur prinzipiellen Eignung der Lasersensoren für das Erfassen von Pflanzenbestandesparametern basiert auf Untersuchungen, die seit der Vegetationsperiode 2003 mit den in Tabelle 1 aufgeführten Modellen durchgeführt wurden. Da es aus organisatorischen und technischen Gründen (Lieferzeiten, Ausleihfristen, Einbindung in die verwendete Feldmesstechnik, Messbereiche der Sensoren) nicht möglich war, die Eignungstests mit den aufgeführten Sensoren zeitgleich und in gleichen Pflanzenbeständen durchzuführen, sind die gewonnenen Messergebnisse nicht unmittelbar miteinander vergleichbar.

Auf Grund des Messprinzips und der extrem unregelmäßigen Ausbildung der reflektierenden Pflanzenoberflächen ist zu erwarten, dass ungültige Messungen in Form von Fehlmessungen auftreten. Der Anteil offensichtlicher Fehlmessungen an der Anzahl der Gesamtwerte war deshalb ein wichtiges Kriterium zur Beurteilung der Sensoren. Um dieser

Tabelle 1: Zusammenstellung ausgewählter Lasersensoren

| Anbieter | Sensortyp | Messbereich mm | Wellenlänge nm | Messfrequenz Hz | Laser- klasse | ca. Preis € |
|-----------------|---------------------------------|-------------------|-------------------|--------------------|------------------|----------------|
| Baumer electric | OADM 20i6481/S14F ¹⁾ | 200-1000 | 675 | 1000 | 2 | 1.200,- |
| Waycon | LAS-Z-800-A ¹⁾ | 50-800 | 675 | 100/1000 | 2 | 950,- |
| LASE | ODS 1400 HT ¹⁾ | 700-2100 | 670 | 1000 | 2 | 7100,- |
| MEL | M7L/400 ¹⁾ | 80-480 | 675 | 17000 | 3b | 7.500,- |
| Eltrotec | LDS400 ²⁾ | 300- 4000 | 665 | 100/500 | 2 | 1.800,- |

¹⁾ Triangulationsmessprinzip ²⁾ Laufzeitmessprinzip

Frage nachzugehen, wurden die zu untersuchenden Sensoren vor einem Trägerfahrzeug (Traktor, Geräteträger) angebracht. Die Sensoren waren schräg nach unten auf den Pflanzenbestand gerichtet und in einer Höhe montiert, die garantierte, dass der Abstand zur Erdoberfläche geringer als der maximale Messabstand war. Da die maximale Höhe der Pflanzenbestände visuell abschätzbar war, konnte gewährleistet werden, dass die herstellerseitig angegebenen minimalen Messabstände der untersuchten Sensoren nicht unterschritten wurden. Infolge der bekannten Wuchshöhen der Pflanzen war es möglich, offensichtliche Fehlmessungen zu erkennen und sie in die Bewertung einzubeziehen. Da die meisten der untersuchten Sensoren mit einer hohen Messfrequenz im kHz-Bereich arbeiten, konnten nur kurzzeitige Messungen durchgeführt werden. Längere Messzeiten hätten schnell die Auswertemöglichkeiten an ihre Grenzen gebracht.

OADM 20i6581/S14F

Der Lasersensor der Fa. Baumer electric wurde im Gegensatz zu den anderen in Tabelle 1 aufgeführten Sensoren nicht in eigenen Untersuchungen getestet. Dieser Sensor hat einen Ausgang über den es möglich ist, Fehlmessungen zu beseitigen. Erste veröffentlichte Einsatzergebnisse belegen [6], dass dieser Sensor bei Geschwindigkeiten bis 10 km/h noch zufriedenstellend arbeitet und dass nach dem Eliminieren von Fehlmessungen eine exakte Messung des Höhenprofils in einem Haferbestand möglich war.

Waycon LAS-Z-800-A

Bereits erste Tests zeigten, dass dieser Sensor nicht bei normalem Tageslicht im Freien arbeitet. Offensichtlich konnte bei Sonnenlicht vom Sensor kein Reflexionssignal empfangen werden. Erst mit einsetzender Dämmerung war es möglich, auswertbare Signale zu empfangen. Eine Analyse der gemessenen Einzelwerte ergab, dass sich erhebliche Unterschiede bereits bei benachbarten Werten einstellen. Dieses Ergebnis überrascht nicht, da die ausgeprägte räumliche Struktur des Pflanzenbestandes sich schnell ändernde Messabstände irkt.

Die Häufigkeitsverteilung der Reflexionsabstände einer typischen Testfahrt zeigt, dass in Übereinstimmung mit dem vorhandenen Pflanzenbestand in einem Reflexionsabstand unterhalb von 0,50 m ein stetiger Abfall der Häufigkeit eintrat (**Bild 2**). Auffallend war, dass die unterste Abstandsklasse (0...< 0,1 m) mit einer abweichend hohen Häufigkeit von 18,4 % gegenüber der nächst höheren Abstandsklasse (0,1...< 0,2 m) mit 3,9 % vertreten war. Da der vorgegebene Messbereich eingehalten wurde, ist dieser plötzliche Häufigkeitsanstieg nur aus Fehlmessungen erklärbar, die bei diesem Sensormodell mit einem Wert in der Nähe von Null eingehen. Die Ursache der Fehlmessungen resultiert mit großer Wahrscheinlichkeit aus einem fehlenden oder einem zu geringen Reflexionssignal, das vom Empfänger teil nicht mehr registriert werden konnte.

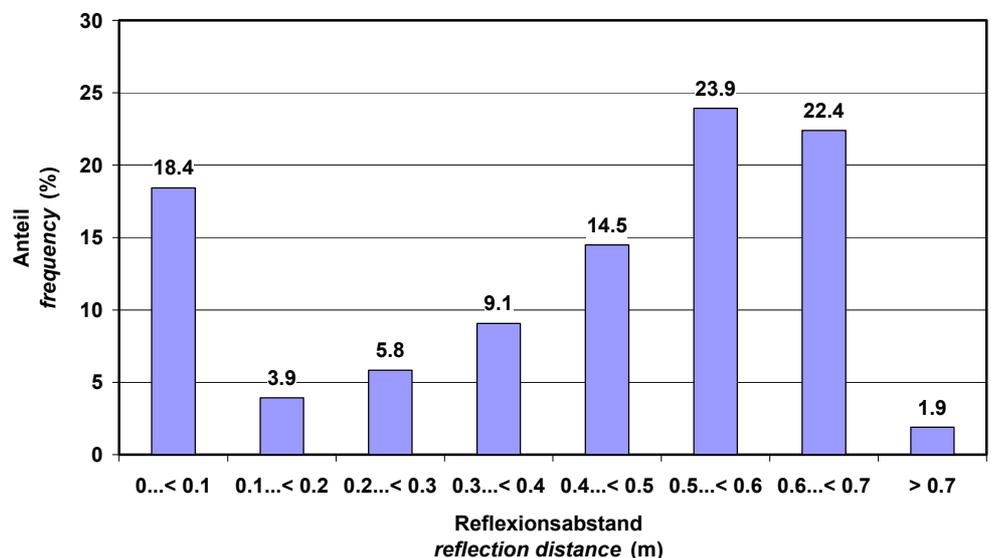


Bild 2: Häufigkeitsverteilung der Messwerte des Sensors Waycon LAS-Z-800-A

LASE ODS 1400 HT

Der Triangulationssensor LASE ODS 1400 HT wurde speziell entwickelt, um in Walzwerken Abstände zu sehr heißen (glühenden) und strahlenden Oberflächen zu messen. Infolge dieser Eigenschaften waren gute Ergebnisse beim Einsatz bei vollem Tageslicht zu erwarten. Der Sensor arbeitet mit einer Messfrequenz von 1000 Hz. Bei diesem Sensor existieren zwei analoge Ausgänge, die jeweils das eigentliche Messsignal (Reflexionsabstand) sowie erkannte Fehlmessungen ausgeben.

Der Test des Sensors erfolgte in der ersten Novemberhälfte 2003 bei Sonnenwetter um die Mittagszeit auf Grasland. Bei jeder Testfahrt wurde der Sensor in einem Vollkreis mit einem Durchmesser von ca. 20 m bewegt, so dass er bei unterschiedlichen Einstrahlungsrichtungen der Sonne arbeiten musste. Ei-

ne erste Messfahrt am 5.11.2003 um 10.53 Uhr ergab einen Anteil an Fehlmessungen von ca. 10,7 % (**Bild 3a**). Wären die Fehlmessungen nicht eliminiert worden, hätte der mittlere Abstand 0,885 m betragen. Ohne Fehlmessungen erhöht sich der mittlere Reflexionsabstand um 0,004 m auf 0,889 m. Eine zweite Messfahrt am 5.11.2003 um 11.27 Uhr erbrachte ein ähnliches Ergebnis (**Bild 3b**). Bei einem deutlich höheren Anteil von 19,4 % Fehlmessungen betrug der Mittelwert aller Einzelwerte 0,864 m. Nachdem die Fehlmessungen eliminiert wurden, stieg der Mittelwert ebenfalls nur geringfügig um 0,002 m auf 0,866 m. Aus diesem Ergebnis kann geschlossen werden, dass dieser Sensor trotz auftretender und unterschiedlich hoher Anteile an Fehlmessungen offensichtlich stabile Mittelwerte liefert.

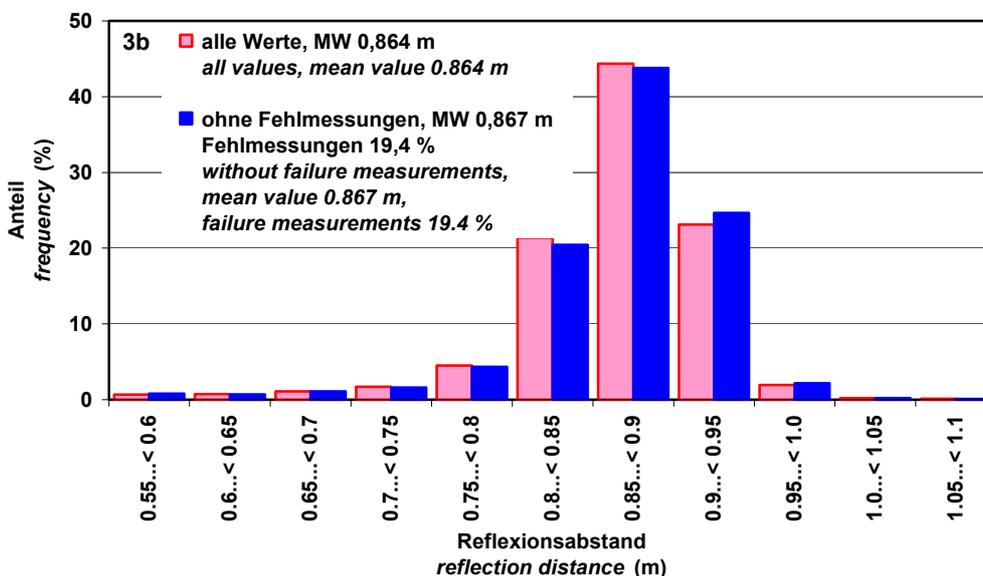
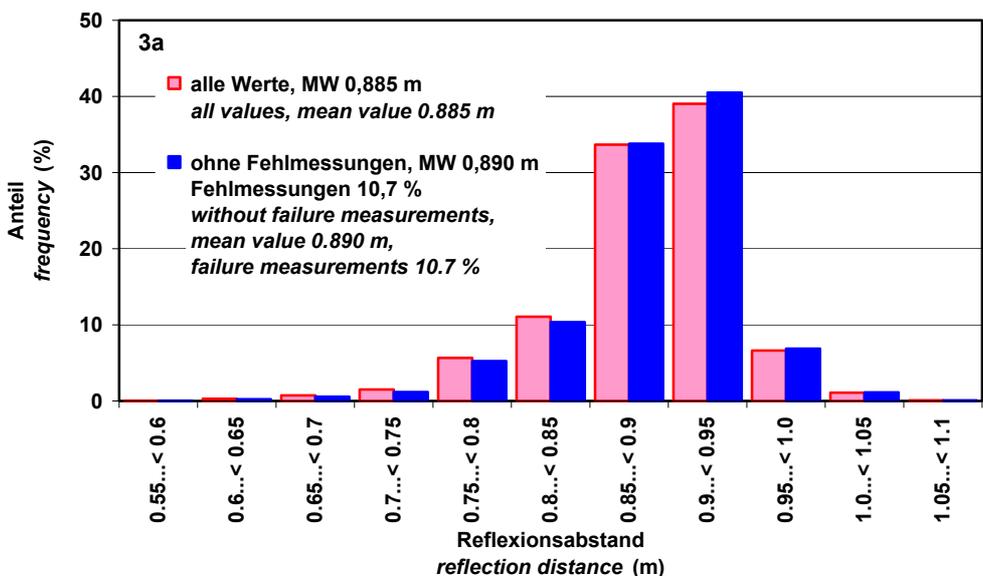


Bild 3: Häufigkeitsverteilungen der Messwerte des Sensors LASE ODS 1400 HT für zwei Messfahrten (3a; 3b)

MEL M7 L 400

Der Lasersensor M7 L 400 hat einen maximalen Messabstand von nur 400 mm. Um diesen nicht zu überschreiten, erfolgte eine entsprechend niedrige Anordnung und der Einsatz in Gras bei vollem Tageslicht, das eine begrenzte Wuchshöhe aufwies. Der Hersteller gibt an, dass bei matten Oberflächen mit großer diffuser Reflexion eine Messung nur bis zu einem Winkel von 45° möglich ist. Infolge der geometrischen Struktur von Pflanzenbeständen sind Winkel über 45° sehr wahrscheinlich, die dann zu Fehlmessungen führen müssten. Der Sensor besitzt zwei analoge Ausgänge. Der eine Ausgang lieferte das Signal für den Messabstand und der andere ein Signal zur Stärke des reflektierten Lichts mit einem Spannungspegel von 0 bis 10 V. Optimal sind 7 V, unter 1 V ist die Intensität zu schwach, um Messfehler und erhöhtes Rauschen in Grenzen zu halten.

Die Auswertung der Einzelmesswerte ergab, dass die Lichtstärken zu 93,2 % unter 1 V und damit in einem für den Sensor sehr ungünstigen Bereich lagen. Auch die ausgewiesenen Abstandswerte deuten auf einen hohen Anteil von Fehlmessungen hin. Die Häufigkeitsverteilung (**Bild 4**) zeigt deutlich, dass 23,6 % aller Messwerte oberhalb des maximal und 3,4 % unterhalb des minimal möglichen Messabstandes liegen. Unter Berücksichtigung der vorhandenen Testbedingungen kann eingeschätzt werden, dass es sich hierbei offensichtlich um Fehlmessungen handelt. Wie exakt die im Messbereich liegenden Werte sind, kann nicht näher ermittelt werden.

Eltrotec LDS 400

Der Lasersensor LDS 400 arbeitet im Gegensatz zu den anderen vorgestellten Sensoren nach dem Prinzip der Lichtlaufzeitmessung. Er wurde am 13.7. 2004 um 10.37 Uhr auf einer Grünfläche einem Funktionstest bei Sonnenlicht unterzogen. Dabei legte das verwendete Basisfahrzeug ebenfalls eine kreisförmige Fahrstrecke zurück. Weil infolge der Sensoranbringung und der Bestandesausbildung der Bereich gültiger Messwerte eingegrenzt werden konnte, war es möglich, den Anteil offensichtlicher Fehlmessungen zu bestimmen. Dieser betrug unter den vorhandenen Testbedingungen mehr als 85 % (**Bild 5**). Da die möglichen gültigen Pflanzenabstände im Bereich von 0,55 bis 1,55 m und damit innerhalb des zulässigen Messbereichs lagen, ist der hohe Anteil der Fehlmessungen ausschließlich auf eine zu geringe empfangene Reflexionsintensität zurückzuführen, die vom Sensor nicht mehr erfasst werden konnte. Im Vergleich zu Triangulationssensoren hat dieser Lasersensor einen relativ großen Strahlenbündeldurchmesser von ca. 1 cm. Da Pflanzenoberflächen sehr filigran und unregelmäßig ausgebildet sind, herrschen im Gegensatz zu ebenen Oberflächen und definierten Bedingungen äußerst ungünstige Reflexionsbedingungen, die zu den erkannten Fehlmessungen führen.

Korrelation zur Pflanzenmasse

Um eine erste Einschätzung der Eignung des Messprinzips der Abstandsmessungen zu Pflanzenoberflächen zur Ermittlung des Parameters "Pflanzen-

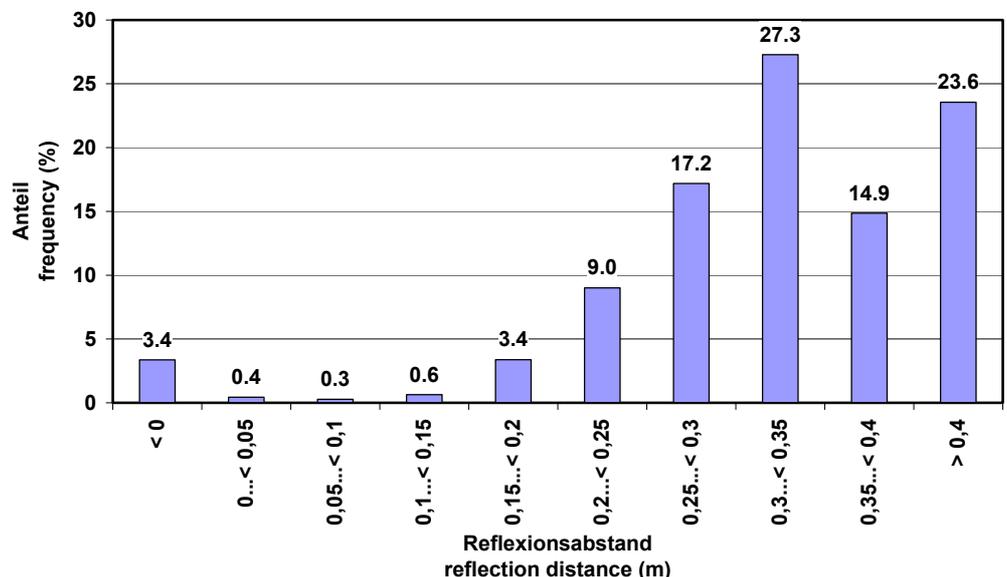


Bild 4: Häufigkeitsverteilung der Messwerte des Sensors M7 L 400

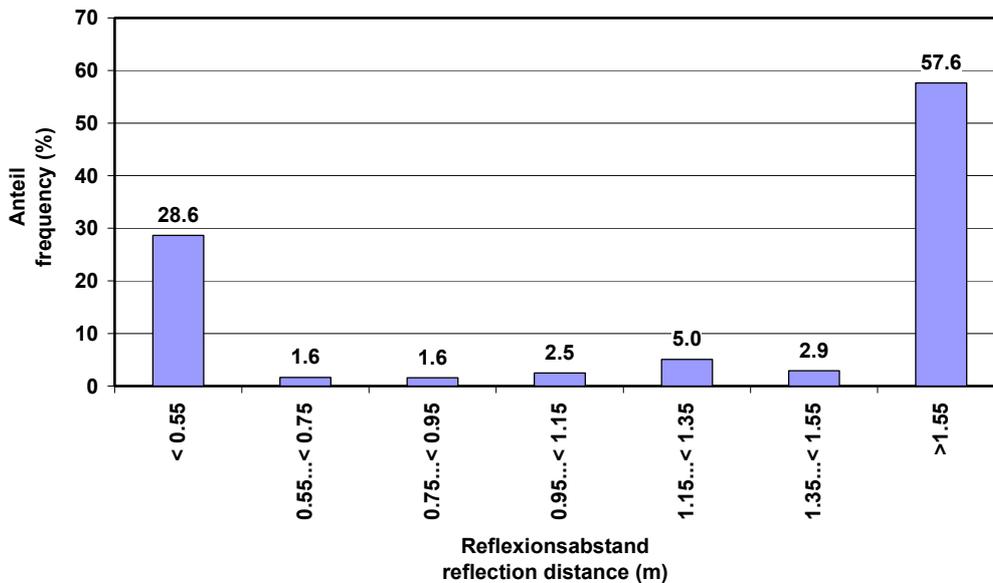


Bild 5: Häufigkeitsverteilung der Messwerte des Sensors LDS 400

massedichte" vornehmen zu können, wurden mit dem Triangulationssensor Waycon LAS-Z-800-A ermittelte Messwerte mit denen eines mechanischen Sensors (Crop-Meter) verglichen.

Das Crop-Meter ist speziell für die fahrzeuggestützte Messung der Pflanzenmassedichte entwickelt worden. Für das Bestimmtheitsmaß der funktionellen Beziehung zwischen dem gemessenen Pendelwinkel und der Pflanzenmassedichte in Halmgutbeständen wird ein Wert oberhalb von $R^2 > 0,9$ angegeben [2]. Um für die Erfassung der Pflanzenmassedichte potentiell einsetzbar zu sein, müssten somit die Messwerte der Lasersensoren mit denen des Crop-Meters hoch korreliert sein.

Diese Vergleichsuntersuchungen fanden in der Vegetationssaison 2003 in den Getreidekulturen Gerste

und Weizen statt. Da mit diesem Sensor bei normalem Tageslicht keine Reflexionssignale gemessen werden konnten, erfolgten die Messfahrten in den Abend- und frühen Nachtstunden. Während der Messfahrten wurden aus den Einzelmesswerten beider Sensoren Mittelwerte über 5,18 m errechnet. Dieser Messweg von 5,18 m resultierte aus einer Triggerung, die über jeweils eine volle Hinterradumdrehung des verwendeten Traktors erfolgte. Aufgrund der Messanordnung war zu erwarten, dass sich die Pflanzenmassedichte und der gemessene mittlere Abstand tendenziell gegenläufig verhalten müssen. Dieser Sachverhalt konnte durch die errechneten Ergebnisse bestätigt werden (**Bild 6**). Aus Bild 6 ist deutlich ersichtlich, dass mit zunehmender Pflanzenmassedichte der vom Sensor gemessene mittlere Abstand zur Pflanzenoberfläche abnimmt.

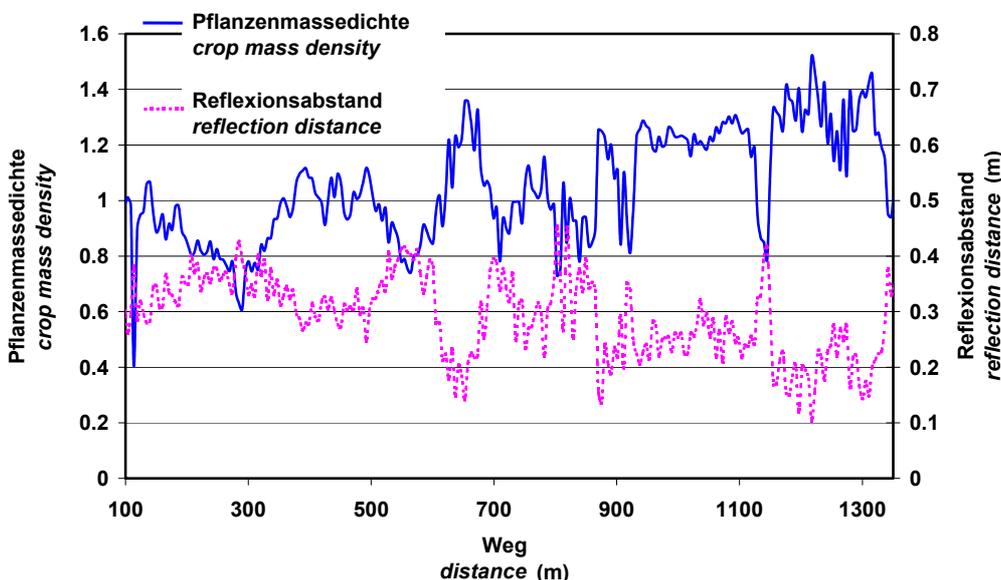


Bild 6: Tendenzielles Verhalten der relativen Pflanzenmassedichte und des mittleren Reflexionsabstands

Um die Korrelation der Messwerte beider Sensoren quantitativ bewerten zu können, wurden für die durchgeführten Messfahrten die Bestimmtheitsmaße der funktionellen Beziehungen errechnet (**Bild 7, Tabelle 2**).

Die in der Tabelle 2 enthaltenen Werte lassen den Trend erkennen, dass bei den Getreidekulturen Gerste und Weizen offensichtlich bessere Bestimmtheitsmaße in der Größenordnung von ca. $R^2 = 0,8$ erzielt werden als auf dem Ödland. Der Grund dafür ist in der sehr unregelmäßigen kleinräumigen Ausbildung des Ödlandbestandes zu sehen. Infolge der unterschiedlichen Messbreiten von 1 bis 2 mm beim Lasersensor und 1 m beim Crop-Meter werden Streifen des Pflanzenbestandes abgebildet, die nicht identisch sind. Insgesamt kann eingeschätzt werden, dass die in Tabelle 2 ausgewiesenen Bestimmtheitsmaße deutliche funktionelle Zusammenhänge belegen.

Nach dem gegenwärtigen Erkenntnisstand ist die begrenzte Übereinstimmung auf folgende drei mögliche Ursachen zurückzuführen:

- die eingeschränkte prinzipielle Eignung des Laser-Messprinzips
- der Eingang von fehlerhaften Messwerten in die Mittelwertbildung (vgl. Abschnitt 6.1)
- die linienförmige Abtastung des Pflanzenbestandes beim Lasereinsatz im Gegensatz zur streifenförmigen beim Crop-Meter

Um bewerten zu können, ob das Laser-Messprinzip nur eine begrenzte prinzipielle Eignung zur Erfassung von Bestandesparametern besitzt, muss demzufolge gewährleistet sein, dass fehlerhafte Messwerte nicht bzw. nur unwesentlich das Gesamtergebnis beeinträchtigen und dass der Pflanzenbestand je nach den spezifischen Anforderungen in einer repräsentativen Form abgetastet wird.

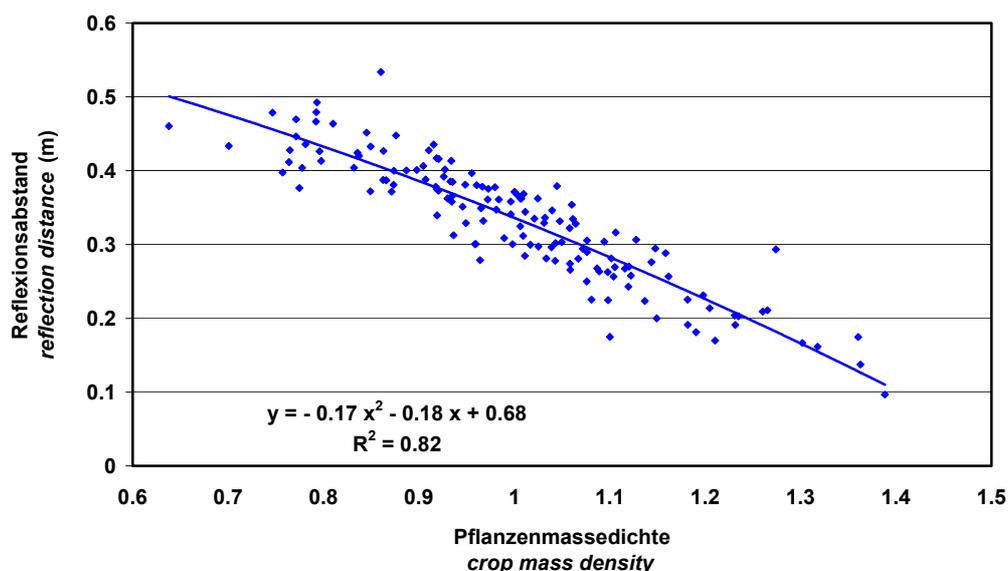


Bild 7: Korrelation von relativer Pflanzenmassedichte und Reflexionsabstand am Beispiel einer Messung (vgl. Tabelle 2, Messung Nr. 5)

Tabelle 2: Bestimmtheitsmaße der funktionellen Beziehungen zwischen den Messergebnissen des Crop-Meters und des Lasersensors Waycon LAS-Z-800-A (relative Pflanzenmassedichte und Reflexionsabstand)

| Messung Nr. | Tag | Gutart | Fahrgeschwindigkeit m/s | Werte-anzahl | R ² | | |
|-------------|-----------|--------|-------------------------|--------------|----------------|-------------|-------|
| | | | | | linear | quadratisch | |
| 1 | 4.7.2003 | Weizen | 1,0 | 54 | 0,799 | 0,818 | |
| 2 | 4.7.2003 | Weizen | 2,2 | 171 | 0,814 | 0,814 | |
| 3 | 8.7.2003 | Gerste | 1,4 | 256 | 0,806 | 0,813 | |
| 4 | 8.7.2003 | Weizen | 1,4 | 93 | 0,723 | 0,727 | |
| 5 | 8.7.2003 | Weizen | 3,0 | 145 | 0,820 | 0,824 | |
| 6 | 17.7.2003 | Ödland | 1,3 | 84 | 0,488 | 0,490 | |
| 7 | 17.7.2003 | Ödland | 2,5 | 77 | 0,446 | 0,449 | |
| 8 | 17.7.2003 | Ödland | 2,0 | 130 | 0,829 | 0,862 | |
| Mittelwert | | | | | | 0,716 | 0,725 |

Auf der Grundlage der Ergebnisse zum Anteil der Fehlmessungen mit dem Sensormodell Waycon LAS-Z-800-A kann eingeschätzt werden, dass bei diesem Sensor nach dem Erkennen und Eliminieren der Fehlmessungen höhere als in Tabelle 2 ausgewiesene Bestimmtheitsmaße entstanden wären. Die damit verbundene Steigerung der Übereinstimmung kann hier nicht näher quantifiziert werden, da im Rahmen des vorliegenden Beitrags das Entwickeln einer Methode zum Eliminieren der Fehlmessungen nur in Zusammenarbeit mit dem Hersteller möglich gewesen wäre.

Schlussfolgerungen

Die im Rahmen der Untersuchungen eingesetzten Lasersensoren erbrachten erhebliche Unterschiede bezüglich ihrer Eignung zur Erfassung von Pflanzenbestandesparametern. Die besonders durch starkes Sonnenlicht und unregelmäßige Pflanzenoberflächen verursachten Funktionsprobleme sowie die realisierbaren Messbereiche schränkten die Einsetzbarkeit erheblich ein.

Mit dem Laser-Messprinzip ist untrennbar verbunden, dass ein bestimmter Anteil an Fehlmessungen nicht zu vermeiden ist (**Bild 8**). Um eine Fehlmessung auszulösen, kann z.B. in Pflanzenbeständen der reflektierte Strahl durch benachbarte Pflanzenteile (Bild 8a) abgedeckt werden. Es können andererseits Pflanzenoberflächen so stark geneigt sein, dass eine unzureichende, vom Empfänger nicht mehr wahrnehmbare Reflexion erfolgt (Bild 8b). Ein bestimmter Anteil an Fehlmessungen ist tolerierbar, wenn diese erkannt und eliminiert werden können oder wenn sie sich nur unwesentlich auf das Gesamtergebnis auswirken.

Die vorliegenden Erkenntnisse lassen die Schlussfolgerung zu, dass alle aufgeführten Sensoren noch nicht die zu stellenden Anforderungen erfüllen, um unter praktischen Einsatzbedingungen die Erfassung von morphologischen Pflanzenparametern auf Landmaschinen mit der erforderlichen Funktionssicherheit zu ermöglichen.

Auf Grund der signalisierten Fehlmessungen, ihres geringen Anteils und ihrer unbedeutenden Auswirkung auf den gemessenen mittleren Reflexionsabstand wird geschlussfolgert, dass aus der Gruppe der untersuchten Sensoren der LASE ODS 1400 HT ein

erhebliches Eignungspotential aufweist. Um die Anforderungen für eine breite Anwendung im Pflanzenbau zu erfüllen, ist der Messbereich auf mindestens 1,5 m zu erweitern.

Nach der Realisierung entsprechender technischer Veränderungen sind zukünftig vertiefende Untersuchungen erforderlich, um

- unter definierten Laborbedingungen die Umgebungslichtempfindlichkeit, die Abstandsmessgenauigkeit und die für eine sichere Abstandsmessung maximale Neigung der Pflanzenoberflächen zu untersuchen und
- unter realen Feldbedingungen die funktionellen Beziehungen zu Pflanzenparametern wie z.B. zur Pflanzenmassedichte und -höhe für unterschiedliche Kulturen (z.B. Winterweizen, Winterroggen, Raps, Gras) zu bestimmen sowie
- die Korrelation zu den Messwerten anderer Messverfahren zur Bestandesanalyse (z.B. NDVI-Index, Blattflächenindex, Bedeckungsgrad, Crop-Meter) eingehender zu klären.

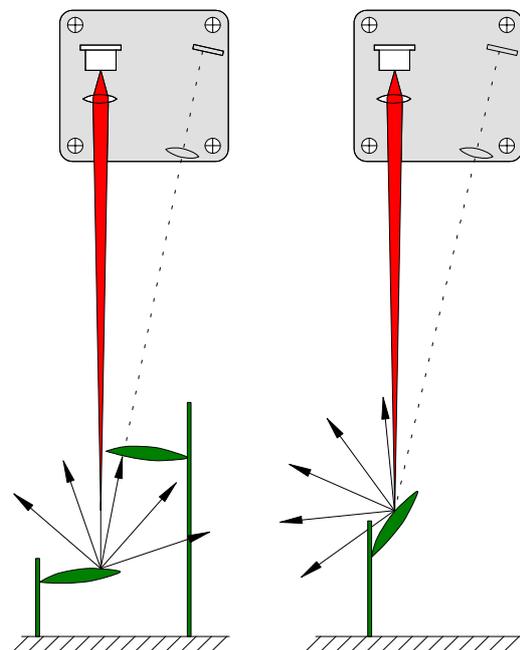


Bild 8: Fehlmessung verursacht durch:
a) Abdeckung und b) Neigung der Pflanzenoberfläche

Bei positiven Ergebnissen sind dann in weiteren Schritten die technischen Voraussetzungen dafür zu schaffen, dass vom Sensor nicht nur eine annähernd gerade verlaufende Punktklinie, sondern ein ausreichend repräsentativer Bestandesstreifen der Feldkultur erfasst wird.

Es sollte ebenfalls im Rahmen künftiger Untersuchungen der Frage nachgegangen werden, ob Laser anderer Wellenlängen (z.B. im Infrarot-Bereich) eine bessere Eignung als die untersuchten Rotlicht-Lasersensoren aufweisen.

Literatur

- [5] BREDEMEIER, C. AND U. SCHMIDHALTER (2003): Non-contacting chlorophyll fluorescence sensing for site specific fertilization in wheat and maize. In: Precision Agriculture: Proceedings of the 4th European Conference on Precision Agriculture, edited by J. Stafford and A. Werner, (Wageningen Academic Publishers) pp 103-108
- [2] EHLERT, D., HAMMEN, V., AND R. ADAMEK (2003): On-line Sensor Pendulum-Meter for Determination of Plant Mass. Precision Agriculture, 4, 139-148
- [1] EHLERT, D. DAMMER, K.H. UND VÖLKER, U. (2004): Applikation nach Pflanzenmasse - Sensorgestützte Ausbringung von Stickstoffdünger, Wachstumsreglern und Fungiziden. Agrartechnische Forschung, Band. 10 Heft 1-3, S.28-32
- [3] LUDOWICY, C., SCHWAIBERGER, R. UND P. LEIT-HOLD (2002): Precision Farming - Handbuch für die Praxis, Frankfurt am Main: DLG-Verlag, ISBN 3-7690-0600-3
- [4] SCOTFORD, I.M. AND P.H.H. MILLER (2003): Characterisation of winter wheat using measurements of normalised difference vegetation index and crop height. In: Precision Agriculture: Proceedings of the 4th European Conference on Precision Agriculture, edited by J. Stafford and A. Werner, (Wageningen Academic Publishers) pp 621-626
- [6] THÖSINK, G., PRECKWINKEL, J., LINZ, A., RUCKELSHAUSEN, A. UND J. MARQUERING (2004): Optoelektronisches Sensorsystem zur Messung der Pflanzenbestandesdichte 59 Landtechnik 2 S. 78-79

Danksagung

Für die Unterstützung bei der Vorbereitung, Durchführung und Auswertung der Untersuchungen danke ich meinen Mitarbeitern Dipl.-Ing. R. Adamek, Dipl.-Ing. H.-J. Horn und Dipl.-Ing. H. Schmidt.

Autor

Dr.-Ing. Detlef Ehlert
Institut für Agrartechnik Bornim e. V.
Abteilung Technik im Pflanzenbau
Max-Eyth-Allee 100
14469 Potsdam
Tel.: +49/(0)331/5699-410
Fax: +49/(0)331/5699-849
E-Mail: dehlert@atb-potsdam.de
www.atb-potsdam.de