

Thomas Riegler, Christian Rechberger, Franz Handler und Heinrich Prankl

# Bildverarbeitungssystem zur Qualitätsbeurteilung von Bodenbearbeitung

In dieser Studie wurde der Einsatz von passiver Bilddatenerfassung für die Generierung von 3-D-Modellen der Ackeroberfläche mittels Stereovision untersucht. Hierfür wurde ein Stereo-Vision-System (SVS) verwendet, welches an einer elektrisch angetriebenen Lineareinheit montiert ist. Um zu überprüfen, ob sich die Methode zur Charakterisierung der Arbeitsqualität eignet, wurde die Messunsicherheit in z-Achse theoretisch als auch praktisch in Vorversuchen ermittelt. Zusätzlich wurden die Variationen der Messgrößen im praktischen Gebrauch evaluiert. Die Arbeitsqualität von Bodenbearbeitungssystemen kann durch den Vergleich der Steigung der Ackeroberfläche vor und nach der Bodenbearbeitung quer zur Fahrtrichtung, mit statistischen Kennwerten des 3-D-Modells, durch die Rauheit der Oberfläche, die Volumenänderung und die Arbeitstiefe charakterisiert werden. Die Ergebnisse zeigen, dass Stereovision eine geeignete Methode ist, um 3-D-Modelle von Ackeroberflächen zu generieren und darauf aufbauend Daten in Outdoor-Umgebungen zu analysieren.

eingereicht 3. März 2014

akzeptiert 6. Mai 2014

## Schlüsselwörter

Stereovision, Arbeitsqualität, Bodenbearbeitung, Rauheitsindex, Volumenänderung, Agrarinformationstechnologie

## Keywords

Stereo vision, quality, tillage, roughness index, volume change, agricultural information technology

## Abstract

Riegler, Thomas; Rechberger, Christian; Handler, Franz and Prankl, Heinrich

## Image Processing System for Evaluation of Tillage Quality

Landtechnik 69(3), 2014, pp. 125–131, 4 figures, 5 tables, 19 references

The usage of passive image data acquisition technique for generating 3-D maps of the surface of soil by means of stereo vision is investigated. A stereo vision system is mounted onto an electrical powered movable slider of a linear motion frame. To

indicate the capability of the method for characterizing quality of tillage, uncertainty of measurement in z-axis was examined theoretically and in preliminary experiments. Quality of tillage can be characterized by comparing slope of the soil surface perpendicular to driving direction before and after tillage, statistic attributes of the 3-D map, roughness of the surface, volume change and working depth. Evaluating the variation of quality of work in practical use was part of this work. Stereo vision is an appropriate method for generating 3-D maps and consecutive measurement in outdoor environments.

Die Qualität von Bodenbearbeitung hängt von mehreren unabhängigen Faktoren ab, welche mit Bodeneigenschaften und Eigenschaften des Bodenbearbeitungssystems zusammengefasst werden können. Aufgrund der enormen Anzahl an Einflussparametern ist es wichtig, die Arbeitsqualität der Bodenbearbeitung durch objektive Kriterien zu charakterisieren. Die Arbeitsqualität kann durch den Vergleich der Steigung der Ackeroberfläche vor und nach der Bodenbearbeitung quer zur Fahrtrichtung, verschiedene statistische Attribute, die Rauheit der Ackeroberfläche, die Volumenänderung durch die Bodenbearbeitung und die Arbeitstiefe charakterisiert werden. Basierend auf diesen Kennzahlen können verschiedene Bodenbearbeitungssysteme und auch deren unterschiedliche Einstellungen verglichen werden.

Die Bestimmung der Rauheit der Ackeroberfläche und der Volumenänderung erfordert eine Methode zur Generierung eines 3-D-Modells. Verschiedene Systeme, z.B. Bildverarbeitungssysteme oder Laserscanner, mit variierender Genauigkeit, Auflösung, Zeit für die Datenerfassung und Größe des Aufnahmebereichs sind verfügbar. In dieser Studie wird die Verwendung eines Stereo-Vision-Systems (SVS) zur Generierung eines 3-D-Modells der Ackeroberfläche untersucht und evaluiert. Dazu wurde ein Software-Modul entwickelt, welches in der Lage ist, Bilder eines konventionellen Kamerasystems zu erfassen und zu verarbeiten. Für den Vergleich von verschiedenen Werkzeugen und Bodenbearbeitungssystemen müssen Änderungen der Ackeroberfläche über die gesamte Arbeitsbreite betrachtet werden. Die Vorteile eines passiven Bilddatenverarbeitungsverfahrens sind die kostengünstige Hardware, ein hoher Automatisierungsgrad und die Unempfindlichkeit gegenüber sich ändernden Lichtbedingungen.

### Relevante Vorarbeiten

Der Bodenbearbeitungsindex von Colvin et al. [1] basiert auf Höhendifferenzen quer zur Bearbeitungsrichtung, der prozentualen Bodenbedeckung durch Pflanzenrückstände, der Rauheit der Ackeroberfläche und der Bearbeitungstiefe. In Bezug auf die Bodenrauheit geben Taconet und Ciarletti [2] einen Überblick über verschiedene Rauheitsindizes gruppiert nach Standardabweichung, Schiefe und Tortuositätsindex sowie Höhenwert-Autokovarianzfunktion. Die Parameter quadratisches Mittel (RMS), Autokorrelationsfunktion (ACF) und die assoziierten korrelierten Längen können verwendet werden, um die Bodenrauheit zu charakterisieren [3]. Mit dem Rauheitsindex RC<sub>x</sub> und RC<sub>y</sub>, vorgestellt von Taconet und Ciarletti [2] als Erweiterung zum Rauheitsindex RC von Currence und Lovely [4], können Höhendifferenzen quer zur Fahrtrichtung untersucht werden. Die Arbeitstiefe ist typischerweise definiert als Distanz zwischen Arbeitssohle und Durchschnittsniveau der Bodenoberfläche vor der Bodenbearbeitung [5].

In den letzten 50 Jahren wurden sowohl verschiedene manuelle als auch automatische Systeme zur Erfassung von Höhenwerten der Ackeroberfläche entwickelt: Allmaras et al. verwenden einen manuellen Mikroreliefmeter zur Messung der Erhöhungen der Ackeroberfläche durch die Bodenbearbeitung, um die Porosität abzuschätzen [6]. Currence und Lovely benutzen für die Analyse der Rauheit der Ackeroberfläche ein automatisches Profilmeter. Die Erfassung von 4 800 Höhenwerten dauert für eine Fläche von 60 x 80 inch (152 x 203 cm) 3–4 Stunden [4]. Für eine Abschätzung der Bodenerosion durch Wind setzen Zobeck und Hagan ein Kontakt-Mikrorelief-Meter ein, mit welchem auf einer Fläche von 1 m<sup>2</sup> 800 Gridpunkte aufgenommen wird [7]. Eine weit verbreitete Methode zur automatischen Datenerfassung ist der Einsatz von Laserscannern, welche üblicherweise auf Lineareinheiten montiert werden. Untersuchungen zur Messunsicherheit von Laserscannern basierend auf einem Leitfaden von VDI/VDE [8] werden in Boehler et al. [9] gezeigt. Um die Rauheit eines Saatbetts zu

analysieren, wird ein auf einer Lineareinheit aufgebauter Laser-Profilmeter mit einem Schrittmotor verwendet um eine Fläche von 1 x 50 cm zu erfassen [10]. Verschiedene lokale Rauheitsindizes werden von Guillobez und Arnaud [11] vorgeschlagen und diskutiert. Dabei wird ein 3-D-Profilograph mit einer Laserzelle verwendet, welche 930 Datenpunkte mit einer Rastergröße von 3,2 mm erfasst. Droll und Kutzbach [12] arbeiten mit einem Laserscanner zur Vermessung von Reifenabdrücken auf weichem Untergrund für eine Fläche von 1 000 x 180 mm mit einer durchschnittlichen Distanz von 1,75 mm zwischen den Messpunkten. Raper et al. setzen einen portablen Bodenbearbeitungs-Profiler mit einem Laser-Scanner ein [13]. Zhixiong et al. [3] verwenden einen Laser-Profiler mit einer räumlichen Auflösung von 1 mm zur Vermessung der Bodenrauheit. Zur Vorhersage der Oberflächenporosität in einem bewirtschafteten Feld wird ein Laser-Profiler zum Scannen einer Fläche von 2 x 1 m eingesetzt [14]. Marzahn et al. nutzen die Fotogrammetrie zur Untersuchung und Evaluierung des Verhaltens von verschiedenen Rauheitsindizes unter Betrachtung der räumlichen Probengröße und Probenform [15]. Jester und Klik [16] vergleichen die Methoden Roller-kette, portabler Laserscanner, Pin-Meter und Stereofotografie zur Erfassung von Bodenrauheit in Bezug auf Datenerfassung und Berechnungsaufwand. Ein Überblick über aktive optische Entfernungssensoren wird in [17] gegeben, während in [18] aktive und passive Entfernungssensoren gezeigt werden.

### Material und Methoden

Ein SVS, genannt Bumblebee 2 von Point Grey Research (**Abbildung 1**), wurde auf einem mit 12 V elektrisch angetriebenen Schlitten einer Lineareinheit (**Abbildung 2**) montiert. Die Lineareinheit hat eine Länge von 4 m mit einer montierten SVS in einer Höhe von 0,6–0,8 m. Das SVS selbst besteht aus 2 parallel montierten Kameras, wobei jede Kamera einen 1/3"-CCD-Bildsensor mit einer maximalen Auflösung von 1 032 x 776 Pixel (4,65 µm quadratische Pixel) aufweist. Die Brennweite

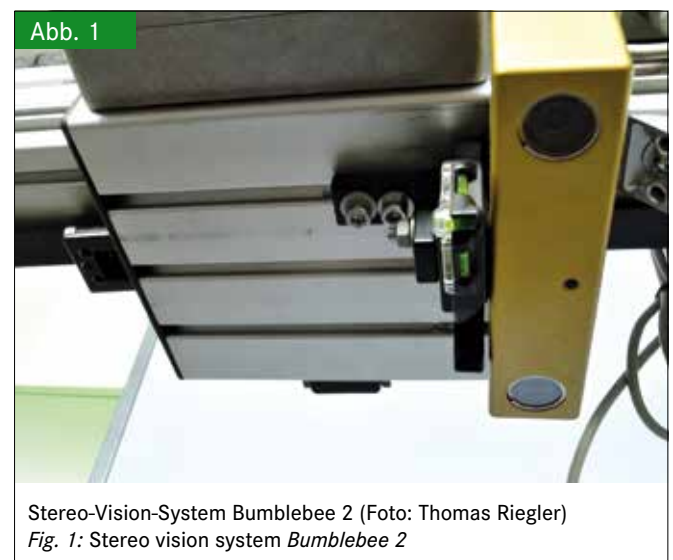


Abb. 1

Stereo-Vision-System Bumblebee 2 (Foto: Thomas Riegler)  
Fig. 1: Stereo vision system *Bumblebee 2*

Abb. 2



Rahmen mit Lineareinheit und 3-D-Scanner (Foto: Thomas Riegler)  
 Fig. 2: Linear motion 3-D scanner frame

der Objektivs beträgt 3,8 mm bei  $66^\circ$  horizontalem Sichtfeld (HFOV). Der Abstand der optischen Achsen (Baseline) zwischen den Kameras beträgt 12 cm. In einem linkshändigen Koordinatensystem stellt die y-Achse die Bewegungsrichtung des Schlittens dar, welche quer zur Fahrtrichtung der Bodenbearbeitung liegt. Die x-Achse definiert die Fahrtrichtung des Bodenbearbeitungssystems und die z-Achse die Erhöhungen des Bodens.

### Entwicklung der Software

Für die Bilderfassung, die Erstellung des 3-D-Modells und die anschließende Auswertung wurde ein Softwarepaket entwickelt. Dieses wurde mit der Programmiersprache C#.NET für das Betriebssystem Microsoft Windows (32- und 64-bit-Architektur) unter Einbindung der Bibliotheken FlyCapture SDK (Version 1.8.3.27), Triclops SDK (Version 3.3.1.3) und VTK Visualization Toolkit (Version 5.8.0.607) implementiert. Die resultierenden Auswertungen werden als Microsoft-Excel-Arbeitsblätter generiert. Das Softwarepaket, die Lineareinheit und das SVS bilden ein integriertes Komplettsystem, mit welchem alle Arbeitsschritte bei der Ermittlung der Kennzahlen zur Arbeitsqualität von Bodenbearbeitungssystemen durchgeführt werden können.

Ein 3-D-Modell wird aus den zwei synchron aufgenommenen Bildern der Kameras mittels einer Stereo-Vision-Verarbeitungszusammenfassung erstellt. Die Bilder werden kontinuierlich während der Bewegung des Schlittens der Lineareinheit mit einer Bildfrequenz von 1 Bild pro Sekunde (Geschwindigkeit ca. 0,13 m/s) aufgenommen. Das SVS hat ein HFOV von  $66^\circ$ , welches in einem Blickfeld von ca. 1 m auf der Längsseite und ca. 0,8 m auf der Breitseite bei einer typischen Einsatzdistanz von 0,8 m resultiert. Das SVS würde eine höhere Bildfrequenz erlauben, diese ist jedoch aufgrund des Blickwinkels nicht notwendig. Der nächste Schritt ist die Rektifizierung des Bildes um Linsenverzerrungen zu eliminieren und die Bilder planparallel

Tab. 1

Berechnete Messunsicherheit in z-Achse

Table 1: Calculated uncertainty of measurement in z-axis

Höhe in z-Achse (z) [mm] Height in z-axis (z) [mm]	Messunsicherheit in z-Achse [mm] Uncertainty of measurement in z-axis [mm]
700	0,5
800	0,7
900	0,9
1000	1,1
1100	1,3

auszurichten. Mittels Kantendetektion wird sichergestellt, dass die Korrespondenzfindung nicht von der unterschiedlichen Helligkeit der Bilder beeinflusst wird. Die Korrespondenzfindung ist der zentrale Schritt bei der Stereovision, in welchem der Versatz zwischen korrespondierenden Bildpunkten ermittelt wird. Dieser Versatz kann in einer Disparitätskarte dargestellt werden. Durch Triangulation können die Werte der Disparitätskarte in Realweltkoordinaten transferiert werden. Ergebnis ist eine Punktwolke mit ca. 620 000 unorganisierten Punkten. Um die Qualität der Verarbeitungsprozedur zu erhöhen, werden Subpixel-Interpolation, Back-and-Forth-Validierung und Oberflächenvalidierung eingesetzt. Bezogen auf das Blickfeld ergibt sich eine Auflösung von durchschnittlich 60 Punkten pro  $\text{cm}^2$ . Bis zu diesem Schritt wurden nur Teilmodelle, welche sich aus dem Blickfeld des SVS ergeben, bearbeitet. Um die Teilmodelle der Punktwolken in ein gemeinsames Koordinatensystem zu überführen und um eine Arbeitsbreite von 3 m zu erfassen, wird eine 3-D-Starrkörper-Transformation mit unveränderten z-Werten durchgeführt. Abschließender Schritt ist eine 2-D-Delaunay-Triangulation zur Oberflächenrekonstruktion. Dabei werden einzelne Punkte über Kanten verbunden, sodass Drei-

Abb. 3



Evaluierung des Linearbewegungs-3-D-Scanners  
 (Foto: Thomas Riegler)  
 Fig. 3: Evaluation of the linear motion 3-D scanner

ecke entstehen. Resultat ist eine flächendeckendes 3-D-Modell der gescannten Fläche (ca. 3,5 x 1 m).

Um Volumenänderungen aufgrund der Bodenbearbeitung zu betrachten, kann von 3-D-Modellen die Volumendifferenz ermittelt werden. Bei der Berechnung der Volumendifferenzen von zwei 3-D-Modellen, werden die Modelle zuerst auf die gleiche Größe beschnitten. Dies geschieht durch Berechnung der Bounding-Box jedes 3-D-Modells, wovon dann jeweils der Wert der geringsten Ausdehnung in jeder Richtung verwendet wird. Zweiter Schritt ist die Berechnung der Volumendifferenz zu einer Ebene mit Höhenwerten gleich 0 ( $z = 0$ ). Hierfür wird der Schwerpunkt jedes einzelnen Dreiecks der rekonstruierten Oberfläche bestimmt. Das Volumen des dreiseitigen Prismas erhält man durch Multiplikation des Höhenwertes ( $z$ -Wert) dieses Schwerpunkts mit der projizierten Fläche. Diese Berechnung des Teilvolumens jedes dreiseitigen Prismas wird für jedes Dreieck des 3-D-Modells durchgeführt und aufsummiert. Die Berechnung des Volumens zur Ebene mit Höhenwert 0 wird mit dem zweiten 3-D-Modell wiederholt. Folglich ergibt die Differenz dieser zwei bestimmten Volumina die Volumendifferenz zwischen den beiden verglichenen 3-D-Modellen.

## Ergebnisse

### Evaluierung des Systems

Um die Eignung des SVS und der entwickelten Software für die Charakterisierung der Arbeitsqualität von Bodenbearbeitungs-

systemen zu evaluieren, wurde eine Analyse der Messunsicherheit durch Analyse der systematischen Messabweichung von wiederholten Messungen durchgeführt.

Gemäß [19] basiert die Messunsicherheit der  $z$ -Achse ( $\partial z$ ) auf der Gleichung:

$$\partial z = \frac{-z^2}{fB} m \quad (\text{Gl. 1})$$

Die Parameter Korrelationsgenauigkeit ( $m$ ), Stereo-Grundlinie ( $B$ ) und Brennweite ( $f$ ) der Kamera sind vom Hersteller des SVS vorgegeben. Das SVS wird in einer Höhe von 0,7 bis 0,8 m montiert und durch die maximal angenommene Arbeitstiefe von 0,3 m bei der Bodenbearbeitung ergeben sich für  $z$  typische Werte zwischen 0,7 und 1,1 m.

**Tabelle 1** zeigt die berechnete Messunsicherheit in  $z$ -Achse ( $\partial z$ ) [19]. Die Parameter des SVS sind  $m = 0,1$  Pixel,  $f = 774,3$  Pixel und  $B = 120$  mm. Das Ergebnis zeigt, dass die Messunsicherheit von der Distanz der Kamera zur betrachteten Oberfläche abhängt. Die Messunsicherheit ist bei einer Distanz bis ca. 0,9 m zwischen SVS und beobachteter Oberfläche kleiner 1,0 mm.

Da der Korrelationsalgorithmus bei Stereovision eine gut strukturierte ungleichmäßige Oberfläche benötigt, ist es schwierig die Distanz vom SVS zu einer planaren Oberfläche zu messen. Um die systematische Messabweichung und Messunsicherheit

Tab. 2

Messunsicherheit und systematische Messabweichung der Volumenmessung ( $n = 24$ )

Table 2: Uncertainty of measurement and systematic error of volume measurement ( $n = 24$ )

Zugefügtes Volumen von Sand [dm <sup>3</sup> ] Added volume of sand [dm <sup>3</sup> ]	Gescannte Fläche [dm <sup>2</sup> ] Scanned area [dm <sup>2</sup> ]	Arithmetisches Mittel des gemessenen Volumens [dm <sup>3</sup> ] Arithmetic mean of measured volume [dm <sup>3</sup> ]	Standardabweichung des gemessenen Volumens [dm <sup>3</sup> ] Standard deviation of measured volume [dm <sup>3</sup> ]	Mittlere Differenz zwischen Spalte 3 und 1 [dm <sup>3</sup> ] Mean difference between column 3 and 1 [dm <sup>3</sup> ]
6,00	360,62	6,01	0,10	0,01
12,00	360,62	11,90	0,11	0,10

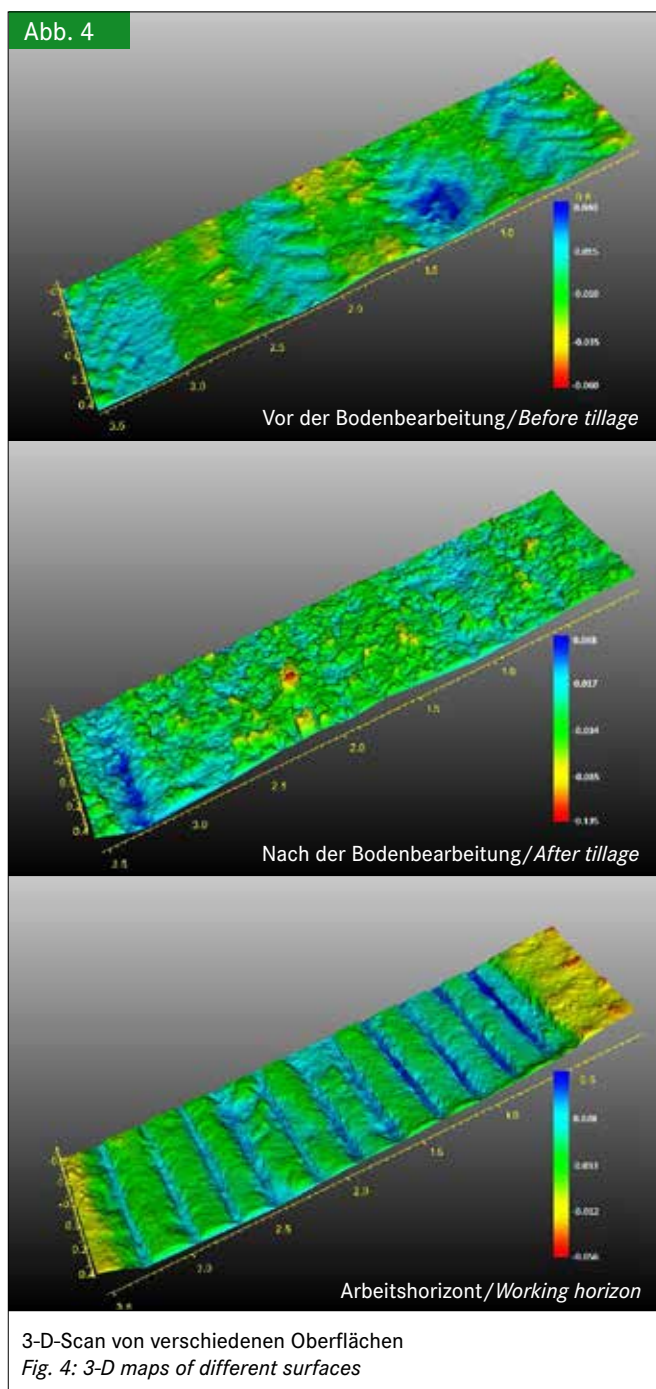
Tab. 3

Messunsicherheit und systematische Messabweichung der Volumenmessung bei neu modellierter Oberfläche nach jedem Scan ( $n = 4$ )

Table 3: Uncertainty of measurement and systematic error of volume measurement with remodeled surface after each scan ( $n = 4$ )

Zugefügtes Volumen aus Sand [dm <sup>3</sup> ] Added volume of sand [dm <sup>3</sup> ]	Gescannte Fläche [dm <sup>2</sup> ] Scanned area [dm <sup>2</sup> ]	Arithmetisches Mittel des gemessenen Volumens [dm <sup>3</sup> ] Arithmetic mean of measured volume [dm <sup>3</sup> ]	Standardabweichung des gemessenen Volumens [dm <sup>3</sup> ] Standard deviation of measured volume [dm <sup>3</sup> ]	Mittlere Differenz zwischen Spalte 3 und 1 [dm <sup>3</sup> ] Mean difference between column 3 and 1 [dm <sup>3</sup> ]
9,83	358,13	9,02	0,75	-0,82
19,62	358,13	21,17	2,32	1,55
29,24	358,13	30,33	2,17	1,09
38,92	358,13	39,41	2,18	0,49
48,62	358,13	49,19	2,52	0,57
97,10	358,13	97,97	0,85	0,87
145,58	358,13	145,93	2,16	0,36
194,06	358,13	193,55	0,61	-0,50

im praktischen Gebrauch zu erheben, wurde daher die berechnete Volumendifferenz zwischen zwei Oberflächen aus Sand mit einer Korngröße von 0,5–2,0 mm verwendet (**Abbildung 3**). Für die Untersuchung der systematischen Messabweichung und der Messunsicherheit wurden zwei Versuchsanordnungen ausgearbeitet. Zuerst wurde als Referenz eine raue Oberfläche geformt und gescannt, worauf anschließend definierte Volumina von 6 bzw. 12 dm<sup>3</sup> hinzugefügt und wiederholt gescannt wurden. In einer zweiten Anordnung wurde ebenfalls eine Referenzoberfläche geformt und gescannt, um anschließend mit hinzugefügten Volumina von 10, 20, 30, 40, 50, 100, 150 und 200 dm<sup>3</sup> erneut zu scannen. Im Unterschied zur ersten Versuchsanordnung wurde die Oberfläche vor jedem Scan neu modelliert.



**Tabelle 2** und **Tabelle 3** beinhalten die Ergebnisse der Evaluierung der Volumenmessungen. Die mittlere Differenz zwischen dem tatsächlich hinzugefügten Volumen von Sand und des gemessenen Volumens (siehe Spalte 5) wird als Maß für die systematische Messabweichung verwendet. Für wiederholte Messungen derselben Oberfläche (**Tabelle 2**) ist die Standardabweichung der Messungen (Messunsicherheit) geringer als bei wiederholten Messungen, bei denen vor jedem Scan die Oberfläche neu modelliert wurde (**Tabelle 3**).

#### Arbeitsqualität der Bodenbearbeitung

Für die Charakterisierung der Arbeitsqualität von Bodenbearbeitungssystemen werden drei aufeinanderfolgende 3-D-Modelle des gleichen Bereichs erstellt:

- jeweils vor der Bodenbearbeitung (BT, before tillage),
- nach der Bodenbearbeitung (AT, after tillage) sowie
- vom Arbeitshorizont (WH, working horizon), der durch das Entfernen der gelockerten Erde entsteht.

In **Abbildung 4** sind Beispiele von 3-D-Modellen der Ackeroberfläche vor und nach der Bodenbearbeitung mit einem 3-balkigen Universalgrubber mit Flügelscharen bei einer Arbeitstiefe der Scharspitzen von 10 cm dargestellt. Von diesen 3-D-Modellen (BT, AT und WH) werden die folgenden Kennzahlen für die Arbeitsqualität berechnet.

#### Die Steigung

Die Steigung beschreibt die Neigung der gescannten Oberfläche in y-Richtung (quer zur Fahrtrichtung) durch Berechnung einer Regressionsgeraden von gemittelten Werten in x-Richtung. Ein Vergleich vor und nach Bearbeitung sowie des Arbeitshorizonts gibt Aufschluss über Änderungen, die durch die Bodenbearbeitung verursacht wurden. Durch den relativen Vergleich der Steigungen ist es nicht notwendig das SVS waagrecht oder parallel zur Bodenoberfläche am Feld aufzustellen. Ergibt sich durch die Bodenbearbeitung eine abweichende Tendenz zur Regressionsgeraden vor der Bodenbearbeitung, deutet dies auf ein ungleichmäßig arbeitendes Bodenbearbeitungsgerät hin. Ursache hierfür kann eine unsachgemäße Einstellung des Geräts sein, aber auch systembedingt sein, z.B. aufgrund asymmetrischer Werkzeugelemente oder wendende Bodenbearbeitung, welche die Erde seitlich versetzt ablegt. Dieser Kennwert kann ebenfalls herangezogen werden, um die Erdverlagerung bei der Arbeit in Schichtenlinie am Hang zu beurteilen.

#### Hauptmerkmale der Höhenwerte in z-Richtung

Statistische Attribute wie arithmetisches Mittel, Median und Standardabweichung beschreiben Hauptmerkmale der Höhenwerte in z-Richtung. Als Vergleichsbasis können hierfür die z-Werte vor der Bodenbearbeitung verwendet werden. Das arithmetische Mittel z und der Median z nach der Bodenbearbeitung stellen die mittlere Höhenzunahme des Bodens durch die Bearbeitung dar, während das arithmetische Mittel z und der Median z des Arbeitshorizonts die mittlere Tiefe der Bearbeitung darstellen.

### Der Rauheitsindex RC

Der Rauheitsindex RC berücksichtigt Grundstücksneigungen und wird mittels Korrektur jedes Höhenwerts von Reihen- und Spalteneffekten (Oberflächenstruktur in Fahrtrichtung und quer zur Fahrtrichtung) berechnet [4]. Taconet und Ciarletti [2] definieren den Rauheitsindex RC als geeigneten Index, um die Amplitudenvariationen der Höhenwerte der Mittelwertsebene darzustellen.

### Mittelwerte der z-Werte

Für die nicht isotrope Struktur der Oberfläche können Mittelwerte der z-Werte über eine einzelne Koordinate berechnet werden. Taconet und Ciarletti versuchen anhand der Rauheitsindizes RCx und RCy, die Rauheit der Ackeroberfläche in verschiedene Richtungen (in Fahrtrichtung und quer zur Fahrtrichtung) zu charakterisieren [2].

### Volumenzuwachs

Durch den Vergleich der 3-D-Modelle vor und nach der Bodenbearbeitung kann der Volumenzuwachs durch Lockerung des Bodens ermittelt werden. Bei bekannter Lagerungsdichte vor der Bodenbearbeitung kann die mittlere Lagerungsdichte nach der Bodenbearbeitung bzw. das mittlere Porenvolumen nach der Bodenbearbeitung berechnet werden.

### Bearbeitetes Volumen

Durch den Vergleich der 3-D-Modelle vor der Bodenbearbeitung und des Arbeitshorizontes kann das bearbeitete Volumen be-

rechnet werden. Dieser Kennwert ist vor allem von Interesse, wenn ein spezifischer Kraftbedarf für die Bodenbearbeitung ermittelt werden soll.

### Arbeitstiefe und Arbeitshorizont

Die exakte Messung der Arbeitstiefe ist in der Theorie trivial, aber in der praktischen Durchführung schwierig. Die Oberfläche des Bodens stellt keine ebene Fläche dar, daher sind Höhenwerte von der jeweiligen Messstelle abhängig. Auch der Arbeitshorizont bildet keine ebene Fläche für eine exakte Messung. Bei einigen Bodenbearbeitungssystemen ist ein unebener Arbeitshorizont sogar systembedingt (z. B. Grubber). Somit kann die Angabe zur Arbeitstiefe nur ein Mittelwert von mehreren Messungen sein. Für eine mittlere Arbeitstiefe stellt der Vergleich der Mediane der z-Werte vor der Bodenbearbeitung und des Arbeitshorizonts eine gute Möglichkeit dar. Vorteil des Median gegenüber dem arithmetischen Mittel ist die Unempfindlichkeit gegenüber Randeffekten (Abschrägung zum unearbeiteten Bereich). Eine weitere Möglichkeit für die Angabe der mittleren Arbeitstiefe ist eine Berechnung der Volumendifferenz vor und nach der Bodenbearbeitung bezogen auf die Projektionsfläche.

### Evaluierung im Feld

Um die Variationen der Kennzahlen zur Beurteilung der Arbeitsqualität unter praktischen Bedingungen zu ermitteln, wurden 11 Scans von der gleichen Oberfläche jeweils vor und nach der Bodenbearbeitung sowie vom Arbeitshorizont er-

Tab. 4

Charakterisierung der Arbeitsqualität eines Grubbers ( $\bar{x}$  = arithmetisches Mittel,  $s$  = Standardabweichung)

Table 4: Characteristics for the quality of work of a cultivator ( $\bar{x}$  = arithmetic mean,  $s$  = standard deviation)

	Vor der Bodenbearbeitung Before tillage		Nach der Bodenbearbeitung After tillage		Arbeitshorizont Working horizon	
	$\bar{x}$	$s$	$\bar{x}$	$s$	$\bar{x}$	$s$
Steigung $y$ /Slope $y$ [mm]	-0,04	0,0	0,04	0,0	-0,17	0,0
Arithmetisches Mittel $z$ /Arithmetic mean $z$ [mm]	-0,1	0,5	36,5	0,4	-67,9	0,5
Median $z$ /Median $z$ [mm]	0,0	0,0	36,1	0,7	-79,5	0,7
Rauheitsindex RC/Roughness index RC [mm]	7,1	0,1	14,6	0,1	11,6	0,1
Rauheitsindex RCy/Roughness index RCy [mm]	13,7	0,1	18,6	0,1	34,8	0,1
Rauheitsindex RCx/Roughness index RCx [mm]	7,1	0,1	14,1	0,1	9,4	0,0

Tab. 5

Volumen des Bodens zwischen gescannten Oberflächen ( $\bar{x}$  = arithmetisches Mittel,  $s$  = Standardabweichung)

Table 5: Volume of soil between scanned surfaces ( $\bar{x}$  = arithmetic mean,  $s$  = standard deviation)

Volumen des Bodens Volume of soil	Zwischen Oberfläche vor und nach Bearbeitung Between surface before and after tillage		Zwischen Oberfläche vor Bearbeitung und Arbeitshorizont Between surface before tillage and working horizon		Zwischen Oberfläche nach Bearbeitung und Arbeitshorizont Between surface after tillage and working horizon	
	$\bar{x}$	$s$	$\bar{x}$	$s$	$\bar{x}$	$s$
Volumen [dm <sup>3</sup> /m <sup>2</sup> ] Volume [dm <sup>3</sup> /m <sup>2</sup> ]	35,40	0,22	66,07	0,16	101,47	0,12

stellt. Die Kennzahlen wurden aus den in **Abbildung 4** dargestellten 3-D-Modellen ermittelt. In **Tabelle 4** und **Tabelle 5** sind die arithmetischen Mittel und Standardabweichungen der Kennwerte dargestellt. Der Vergleich der Steigung vor der Bodenbearbeitung mit dem Arbeitshorizont zeigt, dass die Steigung abgenommen hat; dies ist somit ein Indiz auf ein ungleichmäßig arbeitendes Gerät. Wenn der Median z herangezogen wird, ergibt sich eine mittlere Arbeitstiefe von ca. 8 cm. Beim Vergleich des Rauheitsindex vor und nach der Bodenbearbeitung, wird deutlich, dass die Ackeroberfläche nach der Bodenbearbeitung rauer ist. Die Rauheitsindizes RCx und RCy zeigen typische Werte, welche durch die Bearbeitung mit einem Universalgrubber entstehen. Dabei ist eine höhere Rauheit quer zur Fahrtrichtung zu beobachten, welche durch die Stiele verursacht wird.

In **Tabelle 5** ist die Volumenzunahme durch die Bodenbearbeitung dargestellt, welche sich durch die Differenz der Volumen des Bodens zwischen den Oberflächen vor und nach der Bodenbearbeitung ergibt. In diesem Beispiel beträgt die Zunahme des Volumens ca. 54 % bei einem bearbeiteten Volumen von 66,07 dm<sup>3</sup> je Quadratmeter.

Die Standardabweichungen aller berechneten Kennwerte sind relativ gering, was eine geringe Messunsicherheit indiziert.

### Schlussfolgerungen

Passive Bilderfassung durch ein SVS ist eine geeignete Methode um 3-D-Modelle von Ackeroberflächen mithilfe einer Stereo-Vision-Verarbeitungsprozedur zu erstellen. Die Volumendifferenz von unterschiedlichen Oberflächen wurde als Maß für die systematische Messabweichung verwendet. Diese liegt auf einer Fläche von etwa 360 dm<sup>2</sup> im Bereich von 0,01 bis 0,1 dm<sup>3</sup> bei gleichbleibender Oberfläche und von 0,4 bis 1,6 dm<sup>3</sup> bei neu modellierter Oberfläche. Die geringen Messabweichungen zeigen, dass die Methode geeignet ist, um Messungen an der Ackeroberfläche durchzuführen.

Der besondere Vorteil der Stereovision ist, dass sie sich für Outdoor-Anwendungen und daher auch sehr gut für die Generierung von 3-D-Modellen der Ackeroberfläche eignet. Dabei kann die Ackeroberfläche und der Arbeitshorizont durch manuellen Abtrag der gelockerten Erde betrachtet werden. Die Methode eignet sich für die Charakterisierung der Arbeitsqualität von Bodenbearbeitungssystemen über die Arbeitsbreite, wobei jedoch die Manipulierbarkeit der Lineareinheit beachtet werden muss. Da die Bodenbearbeitung in einer dreidimensionalen Arbeitsschicht erfolgt, sollten sich zukünftige Forschungsaktivitäten auch auf die Analyse des bearbeiteten Volumens, z. B. im Hinblick auf die Durchmischung, die Aggregatsgrößenverteilung usw. richten. Die in dieser Studie verwendete passive Bilderfassungstechnologie ist hierfür nicht geeignet, da damit nur die sichtbare Oberfläche erfasst werden kann.

In dieser Studie wurde unter praktischen Bedingungen die Arbeitsqualität eines Universalgrubbers charakterisiert. Durch die Integration von Software, Lineareinheit und SVS entsteht

ein Komplettsystem, mit welchem alle Arbeitsschritte zur Ermittlung der Kennzahlen für die Arbeitsqualität von Bodenbearbeitungssystemen durchgeführt werden können.

### Literatur

- [1] Colvin, T.S.; Erbach, D.C.; Buchele, W.F.; Cruse, R.M. (1984): Tillage Index Based on Created Soil Conditions. Transactions of the ASAE 27, pp. 370–371
- [2] Taconet, O.; Ciarletti, V. (2007): Estimating soil roughness indices on a ridge-and-furrow surface using stereo photogrammetry. Soil and Tillage Research 93, pp. 64–76
- [3] Zhixiong, L.; Nan, C.; Perdok, U.D.; Hoogmoed, W.B. (2005): Characterisation of Soil Profile Roughness. Biosystems Engineering 91, pp. 369–377
- [4] Currence, H.; Lovely, W. (1970): The analysis of soil surface roughness. Transactions of the ASAE 13, pp. 710–714
- [5] Pochi, D.; Fangigliulo, R. (2010): Testing of Soil Tillage Machinery. In: Soil Engineering, Berlin/Heidelberg, Springer, pp. 147–168
- [6] Allmaras, R.R.; Burwell, R.E.; Larson, W.E.; Holt, R.F.; Nelson, W.W. (1966): Total Porosity and random roughness of the interrow zone. U.S. Department of Agriculture, Conservation Research Report No. 7, pp. 1–22
- [7] Zobeck, T.M.; Hagan, L.J. (1990): A microrelief index to estimate soil erodibility by wind. Transactions in Agriculture 33, pp. 151–155
- [8] Guideline VDI/VDE 2634 (2002): Optical 3-D measuring systems/Optical systems based on area scanning. Berlin, Beuth Verlag
- [9] Boehler, W.; Vicent, M.B.; Marbs, A. (2003): Investigating laser scanner accuracy. The International Archives of Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences 34 (Part 5), XIX. CIPA Symposium, 30.9.–4.10.2003, Antalya, Turkey, <http://cipa.icomos.org/fileadmin/template/doc/antalya/189.pdf>, Zugriff am 14.5.2014
- [10] Anken, T.; Hilfiker, T. (1996): Feines Saatbett: Hoher Energiebedarf und Felddaufgang, aber kein Mehrertrag bei Winterweizen. FAT-Berichte 484, S. 1–9
- [11] Guillobez, S.; Arnaud, M. (1998): Regionalized soil roughness indices. Soil and Tillage Research 45, pp. 419–432
- [12] Droll, P.; Kutzbach, H.D. (2001): Laserscanner zur 3D-Oberflächenvermessung. Landtechnik 56(3), S. 148–149
- [13] Raper, R.L.; Grift, T.E.; Tekeste, M.Z. (2004): A portable tillage profiler for measuring subsoiling disruption. Transactions of the ASAE 47, pp. 23–27
- [14] Sun, Y.; Lin, J.; Lammers, P.S.; Damerow, L.; Hueging, H.; Zhang, H.; Sun, W. (2009): Predicting surface porosity using a fine-scale index of roughness in a cultivated field. Soil and Tillage Research 103, pp. 57–64
- [15] Marzahn, P.; Rieke-Zapp, D.; Ludwig, R. (2012): Assessment of soil surface roughness statistics for microwave remote sensing applications using a simple photogrammetric acquisition system. ISPRS Journal of Photogrammetry and Remote Sensing 72, pp. 80–89
- [16] Jester, W.; Klik, A. (2005): Soil surface roughness measurement – methods, applicability, and surface representation. Catena 64, pp. 174–192
- [17] Besl, P.J. (1988): Active, optical range imaging sensors. Machine Vision and Applications 1, pp. 127–152
- [18] Hebert, M. (2000): Active and passive range sensing for robotics. Tagung 2000 IEEE International Conference on Robotics and Automation, San Francisco, pp. 102–110
- [19] Point Grey Research (2012): Stereo Accuracy and Error Modeling. Technical Application Note TAN2004006

### Autoren

**Dipl.-Ing. (FH) Thomas Riegler** und **Dipl.-Ing. Christian Rechberger** sind wissenschaftliche Mitarbeiter bei Josephinum Research, A-3250 Wieselburg, E-Mail: [thomas.riegler@josephinum.at](mailto:thomas.riegler@josephinum.at)

**Dipl.-Ing. Franz Handler** ist Leiter der Abteilung Verfahrenstechnik und **Dipl.-Ing. Heinrich Prankl** ist Leiter für Forschung und Innovation an der BLT Wieselburg, A-3250 Wieselburg

### Hinweise

Die Arbeit entstand im Rahmen des Forschungsprogramms Future Farm Technology (FFT). Es wird gefördert aus Mitteln des COMET Programms der Österreichischen Forschungsförderungsgesellschaft.

Das Thema wurde auf der VDI-Tagung LAND.TECHNIK 2013, Hannover, 8.–9. November 2013, vorgestellt und eine Kurzfassung im VDI-Bericht veröffentlicht (Bd. 2193, S. 315–326).