

Automatisierte Höhenbestimmung von Topfpflanzen mit dem OEOS-Lichtschattensensor am Beispiel von Weinreben

Automated height detection of pot plants with the OEOS shadow imaging sensor using grapevine

Nieberg, Dominik ¹; Bilges, Kevin ²; Matthäus, Fritz ¹; Mentrup, Daniel ²; Ruckelshausen, Arno ¹

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

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

E-Mail: a.ruckelshausen@hs-osnabrueck.de

Zusammenfassung:

Der Einsatz von Lichtschattensensoren eröffnet durch die seitliche und verzerrungsfreie Bildaufnahme neue Optionen für die automatisierte Pflanzenphänotypisierung. Im Rahmen von Versuchsreihe am „The Plant Accelerator“ an der University of Adelaide wurde erstmals mit dem *Opto-Electronic Object-Scanner (OEOS)* der Firma *iotec GmbH* ein hochauflösender Laser-basierter Lichtschattensensor als bildgebendes System zur Phänotypisierung von Weinreben in Töpfen eingesetzt. Die verzerrungsfreien Binärbilder erlauben neue Möglichkeiten zur Erfassung morphologischer Pflanzenparameter. In dieser Arbeit wird exemplarisch ein schlanker Algorithmus vorgestellt, welcher den Wachstumsverlauf von Pflanzen basierend auf der Pflanzenhöhe sowie der Pixelbelegung errechnet.

Deskriptoren: Laserzeilensensor, Schattenbildverfahren, Pflanzenphänotypisierung, Höhenbestimmung, Wachstumsverlauf.

Summary:

The application of shadow imaging sensors opens up new possibilities for automated plant phenotyping due to its sideview imaging free of optical distortions. With the Opto-Electronic Object Scanner (OEOS) of iotec GmbH a high-resolution laser line based shadow imaging sensor has been tested for the first time as an imaging system for phenotyping of grapevines along test series at “The Plant Accelerator” at the University of Adelaide, Australia. The binary images are free of optical distortions and allow the identification of new morphological plant traits. As a first example, a lean algorithm for the calculation of plant growth based on the plant height as well as on the pixel coverage is shown in this paper.

Keywords: shadow imaging, laser line sensor, light curtain, plant phenotyping, plant height detection, plant growth rate.

1. Einleitung

Nach der technologischen Revolution in der Genforschung wurde bald deutlich, dass deren Potential in der Pflanzenzucht ohne entsprechende Phänotypisierungstechnologien in der Pflanzenzüchtung nur bedingt ausgeschöpft werden konnte (FURBANK & TESTER 2011, MONTES, *et al.* 2007). In der vergangenen Dekade wurde daher die Forschung im Bereich der automatisierten Pflanzenphänotypisierung stark intensiviert. Die Analyse des Zusammenhangs zwischen dem Genotyp und dem Phänotyp einer Pflanze hat im Bereich der Einzelpflanzenforschung in vollautomatisierten Gewächshausanlagen in den vergangenen Jahre große Fortschritte gemacht. Kontrollierte Laborbedingungen erlauben den Einsatz zahlreicher bildgebender Sensorsysteme und darauf basierender Untersuchungen (LI, *et al.* 2014). Auch in parzellenbasierten Feldversuchen konnten automatisierte Hochdurchsatzverfahren der Pflanzenphänotypisierung erfolgreich eingesetzt werden (BUSEMEYER, *et al.* 2013, MONTES, *et al.* 2011, RUCKELSHAUSEN 2014, WINTERHALTER, *et al.* 2013). Dennoch unterscheiden sich beide Ansätze deutlich, auch in Hinblick auf die zu untersuchenden Merkmale. Zwei grundlegende gemeinsame Merkmale in beiden Verfahren sind die Pflanzenhöhe und der Wachstumsverlauf. In vollautomatisierten Gewächshäusern wird hierfür zum Beispiel ein LemnaTec *Scanalyzer 3D-HT* eingesetzt (HONSDORF, *et al.* 2014). In den Feldversuchen mit Mais und Getreide hat sich der Einsatz von Lichtgittertechnologien als bildgebende Sensorsysteme bewährt (BUSEMEYER, *et al.* 2013, DZINAJ, *et al.* 1998, FENDER, *et al.* 2005, KIELHORN, *et al.* 2000, MONTES, *et al.* 2011).

Bei den verschiedenen Lichtgittertechnologien werden typischerweise LEDs als Sender und Fotodioden als Empfänger eingesetzt, welche übereinander angeordnet sind und seriell ausgelesen werden. In 2014 stellte die Firma *iotec GmbH* erstmals den *Opto-Electronic-Object-Scanner (OEOS)* vor (KOVACHEVA, *et al.* 2014). Das OEOS-System geht vom bislang in der Pflanzenphänotypisierung eingesetzten Funktionsprinzip einzelner in Reihe angeordneter Lichtschranken zu einer einzigen Lichtquelle über, welche über einen Spiegel als paralleles Licht auf eine CCD/CMOS-Sensorzeile projiziert wird. Mit einer vertikalen Auflösung von 64µm und einer Auslesegeschwindigkeit von 4000Hz eröffnet das OEOS-System neue Dimensionen zur Erfassung morphologischer Pflanzenmerkmal. In Kooperation mit der *Australian Plant Phenomics Facility - APPF* (www.plantphenomics.org.au) konnte ein OEOS-Prototyp im *The Plant Accelerator* erstmals für phänotypische Untersuchungen eingesetzt werden. *The Plant Accelerator* ist eine vollautomatisierte Versuchsanlage für Hochdurchsatzverfahren unter kontrollierten Bedingungen. Für die phänotypische Analyse nutzt *The Plant Accelerator* den LemnaTec *Scanalyzer 3D-HT*.

Es war das Ziel der Untersuchungen mit dem *OEOS*, das Potential des Sensors in Hinblick auf die hohe Auflösung unter kontrollierten Laborbedingungen zu testen. Hierfür wurden im Rahmen mehrerer Versuchsreihen am *The Plant Accelerator* Daten erhoben. Beispielhaft für die schlanke Bildverarbeitung aufgrund der verzerrungsfreien Binärdaten wurde ein Wachstumsverlauf der Pflanzen auf Basis der Pflanzenhöhe sowie der Pixelbelegung erstellt. Die Pflanzenhöhe ist in der Pflanzenzucht nicht eindeutig bestimmt und muss je nach Erkenntnisinteresse definiert werden. Da die erhobenen Daten bislang nicht in die phänotypischen Untersuchungen des *APPF* einfließen, wurde versuchsreihenübergreifend die Pflanzenhöhe als höchster Pixel der zusammenhängenden Bildfläche im Schattenbild definiert.

Die Errechnung des Wachstumsverlaufs anhand der Pixelbelegung im Schattenbild wurde mit Lichtgittertechnologien bereits erfolgreich im Feldversuchswesen durchgeführt (BUSEMEYER, *et al.* 2013, FENDER, *et al.* 2006). Auch der *Scanalyzer 3D-HT* im *The Plant Accelerator* erfasst den Wachstumsverlauf anhand der Pixelbelegung (HONSDORF, *et al.* 2014) auf Grundlage von RGB-Bildern aus mehreren Perspektiven. In Laborversuchen wurde bereits gezeigt, dass dieser Ansatz auch mit Lichtgittertechnologien durchgeführt werden kann (FANOURLAKIS, *et al.* 2014).

Anhand der Messungen aus der Versuchsreihe mit 28 Einzelpflanzen der Weinrebsorte (*Vitis vinifera*) Shiraz konnte mit beiden Ansätzen erfolgreich ein Wachstumsverlauf erstellt werden. Im Rahmen dieses Papiers wird der Algorithmus erläutert werden, welcher hierfür erstellt wurde. Eine Überprüfung der Wachstumsverläufe mit den Ergebnissen des Referenzsystem *Scanalyzer 3D-HT* ist der nächste Schritt über diese Arbeit hinaus.

2. Material und Methoden

Das *OEOS 800* der Firma *iotec GmbH* wurde zur Aufnahme von Weinpflanzen bei der *APPF* in Adelaide, Australien eingesetzt. Dabei wurde es in einem Gewächshaus an einer integrierten Förderanlage (*LemnaTec*) in Kombination mit weiteren Systemkomponenten angebracht.

2.1. The Plant Accelerator

The Plant Accelerator (**Bild 1**) ist eine Einrichtung der *APPF* in Adelaide, Australien welche sich auf dem Waite Campus der University of Adelaide befindet. Die Einrichtung verfügt über zwei *Scanalyzer 3D-HT* der Firma *LemnaTec* und wurde im Januar 2010 offiziell eröffnet. Der *Scanalyzer 3D-HT* (<http://www.lemnatec.com/products/hardware-solutions/scanalyzer-3d-high-throughput/>) ist ein vollautomatisierte Versuchsanlageanlage für Hochdurchsatzverfahren unter

kontrollierten Bedingungen, welche mit seinen fünf verschiedenen *Scanning modes* (*infrarot Licht, sichtbares Licht, nahinfrarot Licht für Wurzeln, nahinfrarot Licht, fluoreszenz Licht*) und der entsprechenden Software, Pflanzendaten liefern kann.

Die beiden Anlagen sind im Obergeschoss des *The Plant Accelerator* untergebracht. Die Anlagen befinden sich im vorderen weißen Bereich sowie im hinteren braunen Bereich auf **Bild 1**.

Am *The Plant Accelerator* werden unterschiedliche Testreihen vermessen. Während der Testphase des *OEOS*-Systems konnten so Aufnahmen von verschiedenen Testreihen mit unterschiedlichen Pflanzentypen gemacht werden.



Bild 1: *The Plant Accelerator* der APPF in Adelaide, Australien

2.2. OEOS 800 System

Das *OEOS* System besteht aus einem Sender, welcher parallelisierte Laserstrahlen aussendet, sowie einem Empfänger, welcher die Laserstrahlen detektiert. Wenn sich ein Objekt zwischen Sender und Empfänger befindet werden die Laserstrahlen an dieser Stelle unterbrochen. So ergibt sich bei einer kontinuierlichen Objektgeschwindigkeit (z.B. durch ein Förderband) eine fortlaufende Aufnahme des Objektes wie in **Bild 2** dargestellt

Die Auflösung von 64µm entspricht einem Pixel in vertikaler Richtung. In horizontaler Richtung ist die Auflösung von der Objektgeschwindigkeit sowie der Abtastrate des Sensors (max. 4000 Hz) abhängig. Die

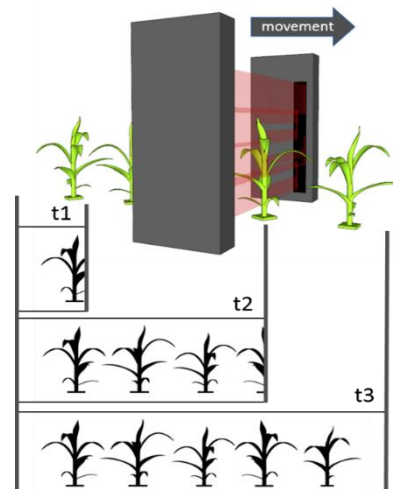


Bild 2: Funktionsprinzip des *OEOS* Sensors

Bildgröße sowie die vertikale Auflösung können somit angepasst werden. Jede der aufgenommenen Zeilen wird zur Laufzeit mit einem Zeitstempel versehen und in eine Log-Datei geschrieben, welche am Ende der Messung abgespeichert wird.

Die erzeugten Bilder aus den Messungen weisen für jeden Pixel einen direkten Zusammenhang zwischen der Höhe sowie der Breite in Metern auf. Dadurch ist es möglich das Pflanzenwachstum anhand der Pflanzenhöhe sowie der Pflanzenfläche aus den Messdaten zu bewerten.

2.3. OEOS 800 System Integration am The Plant Accelerator

Das *OEOS 800* kann in Kombination mit verschiedensten Sensoren als eigenständige Messstation aufgebaut werden, wie in **Bild 3** schematisch dargestellt. Für die Versuche am *The Plant Accelerator* wurde das *OEOS System* mit einem Start-/Stop-Trigger sowie zwei RGB-Kameras zur Bildkontrolle der aufgenommenen Daten

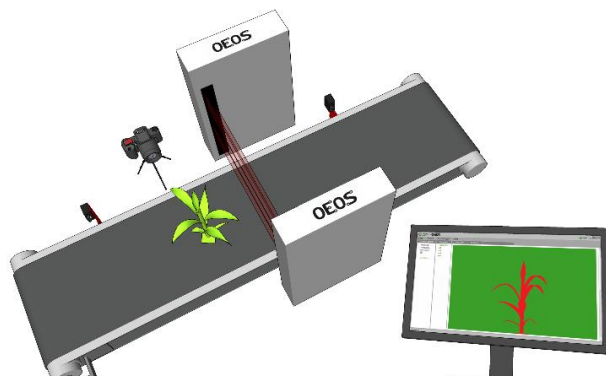


Bild 3: Schematische Darstellung der *OEOS 800* Messstation

kombiniert. Die Daten und Bilder werden mit Datum- und Zeitstempel abgelegt.

Fährt ein Objekt an dem Start-Trigger vorbei, wird eine Messung gestartet. Die Messung läuft solange, bis das Objekt an dem Stop-Trigger vorbei fährt. Für die Kameras kann zusätzlich ein zeitgesteuerter Selbstausröser mit der Messung gestartet werden. Dadurch ist es möglich eine voll automatisierte Messung durchzuführen.

Die *OEOS* Messstation wurde, wie in **Bild 4** dargestellt, im *LemnaTec – Scanalyzer 3D-HT* der *APPF* zwischen den Bildaufnahmekabinen und der Wässerungsstation installiert. Die Messstation nutzt das bestehende Transfersystem und muss nicht weiter in die Sensorik oder die Software des *Scanalyzer 3D-HT* integriert werden.

Die Pflanzenversuchsreihen werden in entsprechend Töpfe gepflanzt. Die Töpfe werden auf dem Transfersystem mit entsprechenden RFID-Bestückten Werkstückträger befördert, in einem Lager gelagert und den Messstationen einzeln zugeführt. In den Bildaufnahmekabinen werden die Töpfe durch pneumatisch betätigte Stopper angehalten und die Aufnahmen vorgenommen. Das Transfersystem läuft kontinuierlich weiter und Messungen mit dem *OEOS – Sensor* sind ohne Verzögerung möglich.

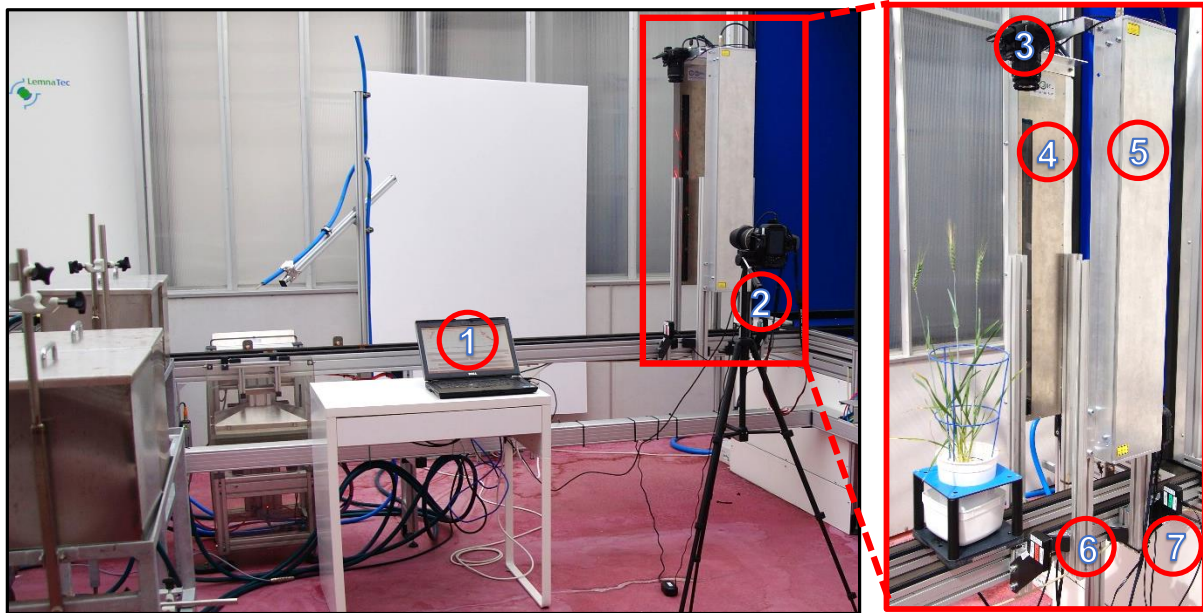


Bild 4: Einbauort der OEOS-Messstation am *Scanalyzer 3D-HT* - (links) 1: Laptop zur Datenaufnahme; 2: Kamera Seite; (rechts) 3: Kamera oben; 4: OEOS-Empfänger; 5: OEOS-Sender; 6: Start-trigger; 7: Stopp-trigger

2.4. Messreihe

Während der Einsatzzeit des OEOS-Systems am *The Plant Accelerator* wurden Daten in mehreren Versuchsreihen (Gerste, Weinreben, Sonnenblumen, Mais) aufgenommen. Für diese Arbeit wurde die Versuchsreihe der Weinrebsorte (*Vitis vinifera*) Shiraz herangezogen. Die Messreihe besteht aus insgesamt 28 Pflanzen. Die Pflanzen befanden sich im Stadium von 22 Tage (typische Pflanzengröße ca. 20cm) bis 41 Tage (typische Pflanzengröße ca. 70cm) nach der Pflanzung und wurden täglich vermessen. Im Rahmen dieser Arbeit wurden Bilder bei einer Systemhöhe von 810mm, einer Abtastrate von 2330 Hz sowie einem Aufzeichnungszeitraum von 3 Sekunden aufgenommen. Anhand dieser Konfiguration entstanden Binärbilder der Pflanzen mit einer Auflösung

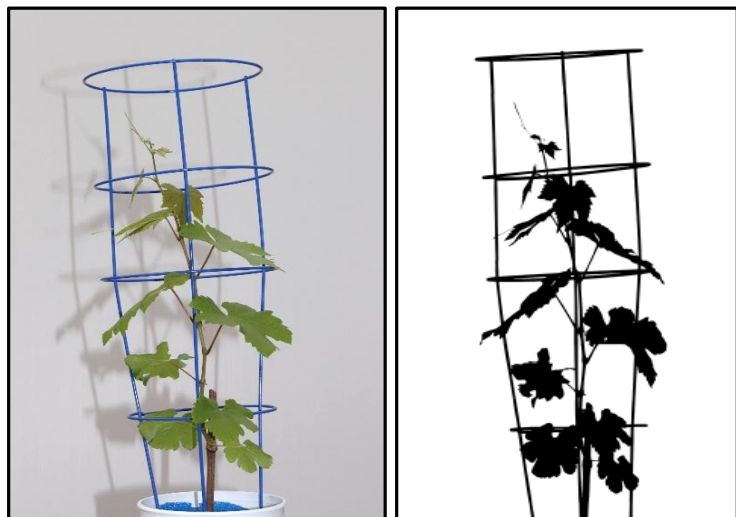


Bild 5: (links) OEOS-Kontrollbild von Pot 13 - Lane 1; (rechts) dazugehöriges Schattenbild des OEOS-Systems

von rund 88 Mega-Pixel (6.990x12.656) aufgezeichnet.

Es wird ein Drahtgestell wie in **Bild 5** in die Töpfe eingelassen damit unter anderem ein gerades Hochranken der Pflanzen zustande kommen kann. Der Drahtkorb besteht bei dieser Messreihe aus drei senkrechten Streben, so wie vier waagrecht in einem bestimmten Abstand übereinander angeordneter Ringen. Für die Höhenbestimmung mittels *OEOS* – Systems muss der Drahtkorb entsprechend beachtet werden, wie in Kapitel 2.5 dargelegt wird. In **Bild 5** ist eine Aufnahme des *OEOS*-Systems sowie das dazugehörige Kontrollbild der seitlichen RGB-Kamera der Pflanze 13 aus der Versuchsreihe 1 zu sehen. Im Vergleich der beiden Bilder wird die Verzerrung der Pflanze im Kontrollbild durch die Kameralinse deutlich erkennbar, insbesondere bei den Ringen des Drahtkorbes.

2.5. Algorithmus

Ziel des Algorithmus ist die Berechnung der Pflanzenhöhe sowie deren Flächenbelegung in Pixeln. Die Pflanzenhöhe wurde als höchster Punkt der

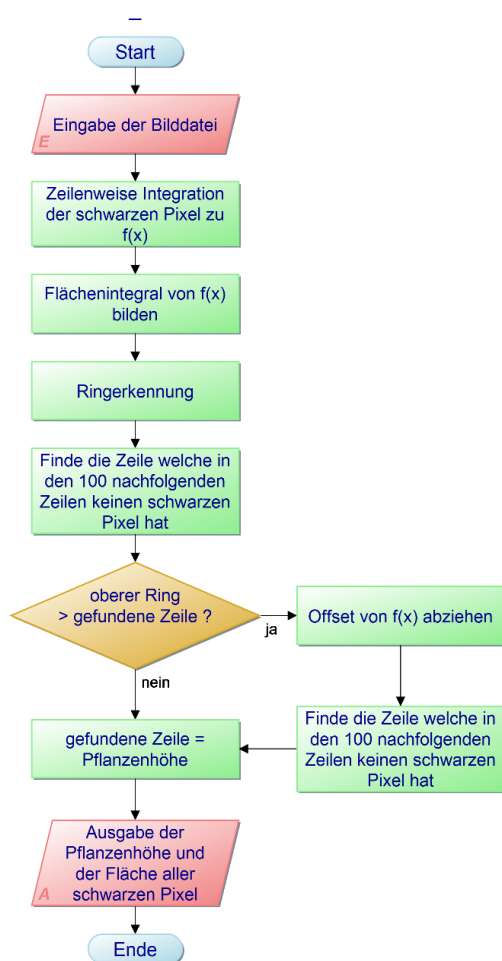


Bild 6: Ablaufdiagramm der Höhenbestimmung

zusammenhängenden Pixelfläche definiert. Hierbei erweist sich der beschriebene Drahtkorb als Störgröße. Wenn die Pflanze über dem Korb endet, kann angenommen werden, dass das oberste der gesamten zusammenhängenden Pixel die Höhe der Pflanze angibt. Um zu wissen ob der oberste Teil der Pflanze in dem Bereich des Drahtkorbes endet, muss der oberste Ring des Drahtkorbes ermittelt werden.

Der Ablauf des Algorithmus (**Bild 6**) fängt mit der Konvertierung des *OEOS*-Bildes mit einer Auflösung von rund 90 Mega-Pixel in eine Funktion an. Die Funktion enthält die Summen aller schwarzen Pixel für die jeweilige Bildzeile. Diese Summe ist die Grundlage zur Berechnung des Flächenwachstumsverlaufs der Pflanzen. Das Drahtgeflecht wird hierbei mitgezählt und kann anschließend als Offset bei der Auswertung herausgerechnet werden.

Für die Höhenbestimmung der Pflanze müssen die Ringe des Korbgeflechts identifiziert werden. Da sich die Ringe in der

erstellten Funktion durch eine starke Steigung von der Pflanze abheben, sind diese über die Ableitung, wie in **Bild 7** dargestellt, näher zu untersuchen. Die erste Ableitung der Funktion zeigt durch eine Ansammlung hoher Steigung in den Bereichen der Ringe die Möglichkeit zur Verbesserung der Erkennung durch eine bereichsweise Integration der absoluten Werte der Ableitung. Dies hat zur Folge, dass die Ansammlungen der Steigungen an den Ringbereichen stärker von den sanften Steigungen der Pflanze abgehoben werden.

Zur Bestimmung der Ringpositionen wird das Resultat der Integration mit einem dynamischen Schwellwert verglichen. Der Schwellwert läuft vom Maximum des Resultates nach unten, bis die Anzahl der Ringe durch die Ringerkennung über dem Sollwert, hier vier Ringe, liegt. Wenn das der Fall ist, wird die Schwelle auf den letzten gültigen Wert (richtigen Anzahl an Ringen) zurückgesetzt und die Positionen der oberen Kanten der Ringe ermittelt.

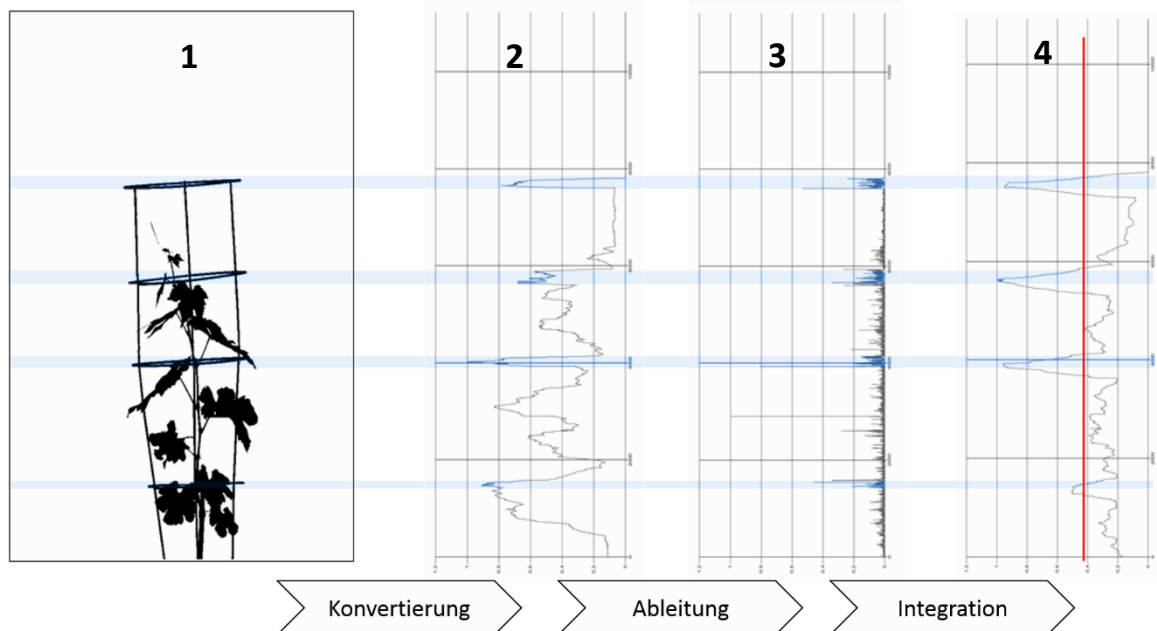


Bild 7: Vorgehensweise der Ringerkennung – 1: Binärbild des OEOS-Systems; 2: Funktion der Summen aller schwarzen Pixel für die jeweilige Bildzeile; 3: Ableitung der Funktion; 4: Integration der absoluten Werte der Ableitung

Mit dem Wissen der Ringpositionen kann darauf geschlossen werden, ob die Pflanze oberhalb des obersten Ringes endet. Dazu wird die aus den Bildzeilen erstellte Funktion von der Bodenseite aus auf leere Zeilen geprüft. Wenn genügend aufeinanderfolgende Zeilen als leer erkannt wurden, ist die Höhe des vermessenen Objektes erkannt. Ist diese niedriger als der oberste Ring, so befindet sich das Pflanzenende innerhalb des Drahtkorbes. Andernfalls wäre die Pflanzenhöhe somit bestimmt.

Wenn das Pflanzenende in dem Drahtkorb zu suchen ist, müssen die senkrechten Streben behandelt werden. Dazu wird ein Offset auf die Funktion der Bildzeilen

angewendet, welcher der Dicke der drei Streben entspricht. Im Rahmen dieser Versuchsreihe wurde dieser Offset bei der definierten horizontalen Auflösung von 6.990 Pixel mit 150 Pixeln definiert. Wenn der Offset vor der Ringerkennung angewendet wird kann es passieren, dass die Pflanze oberhalb des Drahtkorbes abgeschnitten wird, wodurch die Höhe nicht richtig ermittelt werden kann. In **Bild 8** ist das Ergebnis der Höhenbestimmung dargestellt.

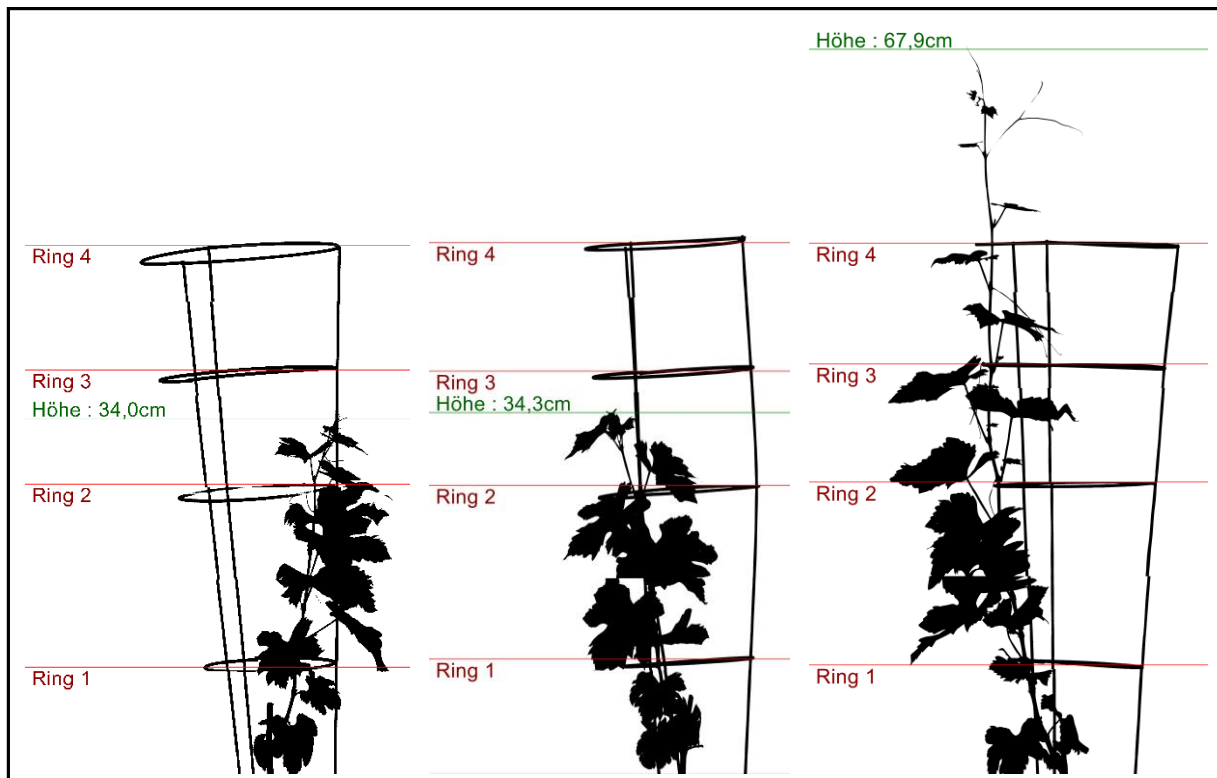


Bild 8: Ergebnis der Höhenbestimmung bei Pot 14 (links) und Pot 11 (mitte und rechts) an zwei verschiedenen Tagen der Linie 1 mit erkannten Ringen und der Pflanzenhöhe

3. Ergebnis

Für die Auswertung standen 13 Messtermine im Zeitraum zwischen dem 25.10.2014 und dem 13.11.2014 zur Verfügung. Beispielhaft sind in **Bild 9** die Höhenwachstumsverläufe von drei verschiedenen Pflanzen über den Messzeitraum dargestellt. Die Ergebnisse zeigen für diesen Zeitraum einen weitgehend linearen Wachstumsverlauf. Bestehende Abweichungen können von unterschiedlichen Wachstumsgeschwindigkeiten, unterschiedlichen Tageszeiten oder anderen Einflüssen stammen. Die Versuche mit dem *OEOS*-System haben gezeigt, dass ein Höhenwachstumsverlauf mit dem dargestellten Algorithmus erstellt werden kann. Die Aussagekraft dieses Wachstumsverlaufs für phänotypische Untersuchungen muss noch geklärt werden. Hierfür bietet sich ein Vergleich der *OEOS*-Daten mit den Ergebnisse des *Scanalyzer 3D-HT* für diese Versuchsreihe an.

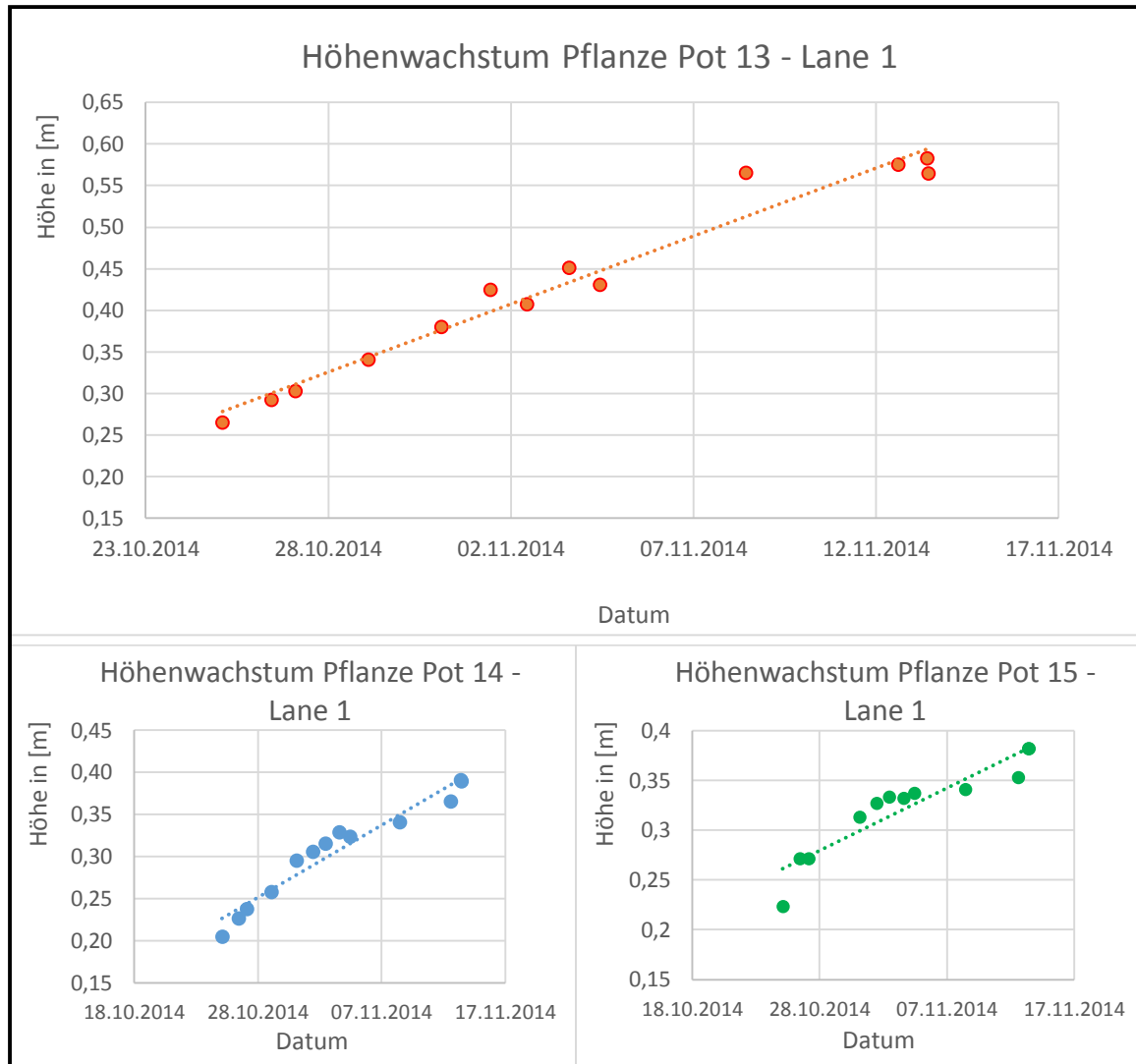


Bild 9: Beispiel Höhenwachstumsverläufe von Pot 13 bis Pot 15 der Reihe 1 welche aus der ermittelten Pflanzenhöhe resultieren

Am Beispiel der Pflanzen 13-15 der Versuchsreihe werden in **Bild 10** ebenfalls exemplarisch die Wachstumsverläufe der Pflanzen auf Basis der Pixelbelegung dargestellt. Die Ergebnisse verdeutlichen die hohe Auflösung des *OEOS*-Systems bei einer Pixelbelegung durch die Pflanze bis zu 7 Mega-Pixeln. Allerdings ist erkennbar, dass sich der Flächenwachstumsverlauf vom Höhenwachstumsverlauf unterscheidet. Zudem ist die Streuung der Messergebnisse deutlich größer. Die Schlussfolgerung liegt nahe, dass der zweidimensionale Ansatz des Schattenbildverfahrens zur Bestimmung von Flächenwachstum bei Einzelpflanzenuntersuchungen nicht die ausreichend ist. Für eine endgültige Aussage müssen die Wachstumsverläufe ebenfalls mit den Ergebnissen des *Scanalyzer 3D-HT* verglichen werden.

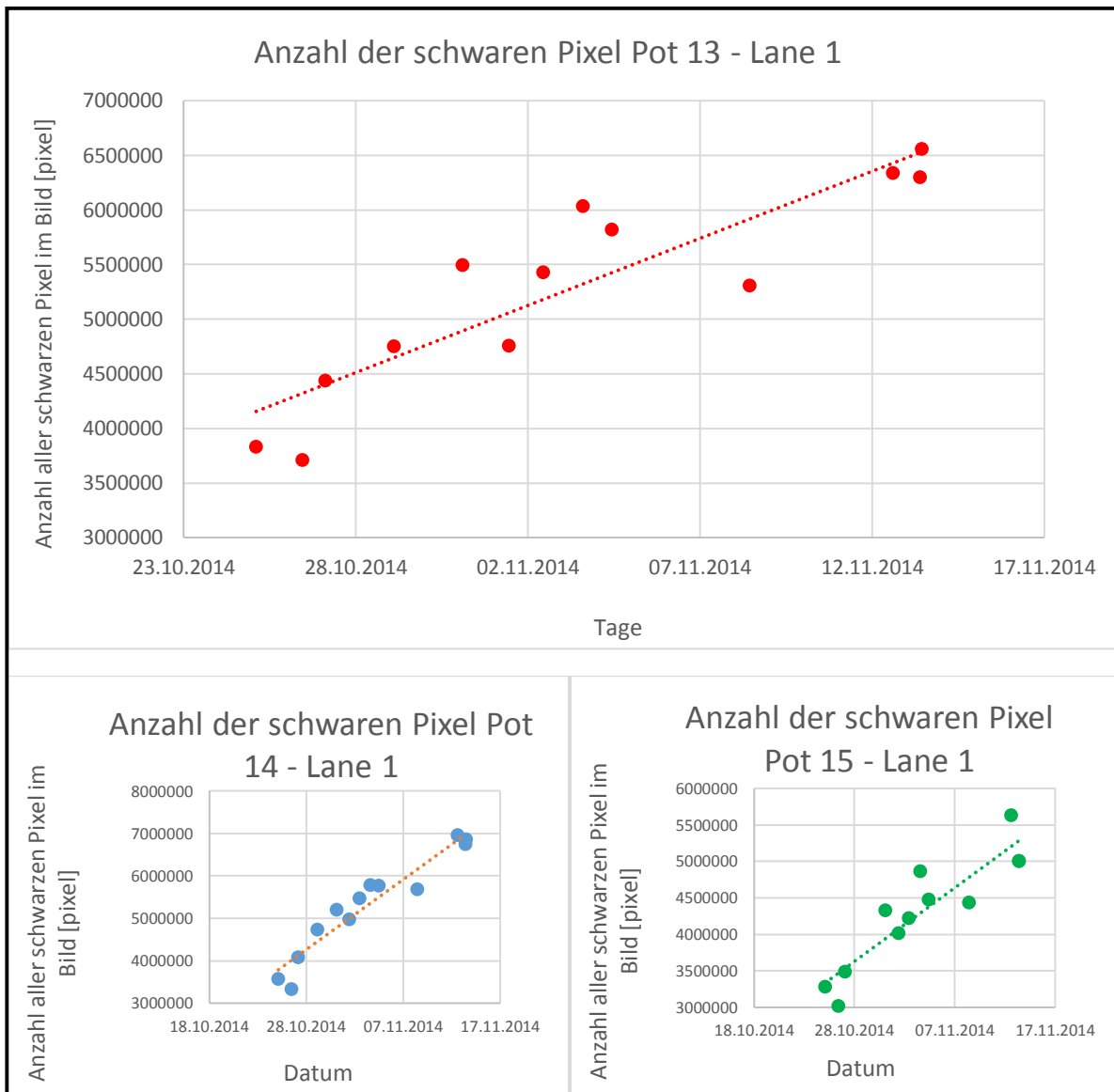


Bild 10: Beispiel der Flächenwachstumsverläufe von Pot 13 bis Pot 15 der Reihe 1, welche über die Anzahl der belegten Pixel in einem Bild ermittelt wurden

4. Fazit

Die Funktionalität des *OEOS*-Systems konnte erfolgreich getestet werden. Es wurde gezeigt, dass das *OEOS*-System in *Scanalyzer 3D-HT*-Phänotypisierungsanlagen integriert werden kann und vollautomatisiert hochauflösende Schattenbilder liefert. Die Berechnung phänotypischer Merkmale wurde am Beispiel des Höhenwachstumsverlaufs und des Flächenwachstumsverlaufs bei Weinreben demonstriert. Durch die binäre Datenstruktur und die verzerrungsfreien Aufnahmen konnten diese Merkmale mit einem schlanken Algorithmus errechnet werden. Die Aussagekraft der errechneten Wachstumsverläufe für phänotypische Analysen muss in einem nächsten Schritt durch einen Abgleich der Ergebnisse mit den Resultaten des

Scanalyzer-3D-HT als Referenzsystem überprüft werden. Die errechneten Flächenwachstumsverläufe legen den Schluss nahe, dass eine ausschließlich zweidimensionale Aufnahme mit dem *OEOS*-System nicht ausreichend sein kann. Hier erscheint es sinnvoll, weitere Versuche durchzuführen und Schattenbilder einer Pflanze aus mehreren Perspektiven für die Berechnung des Flächenwachstumsverlaufs heranzuziehen.

Die in dieser Versuchsreihe verwendete Auflösung von rund 88 Mega-Pixeln könnte in der Horizontale durch eine höhere Abtastrate und eine geringere Objektgeschwindigkeit noch deutlich erhöht werden. Die Autoren sind überzeugt, dass das *OEOS*-System noch viel Potential für die Erfassung morphologischer Pflanzenmerkmale bietet, wie z.B. die Vermessung der Pflanzenstengel. Dafür ist die verstärkte Zusammenarbeit mit Biologen und Saatgutzüchtern eine wichtige Voraussetzung.

5. Danksagung

Diese Arbeit wurde im Rahmen des Forschungsprojektes "predbreed" vom Förderprogramm „Nachwachsende Rohstoffe“ des Bundesministeriums für Ernährung und Landwirtschaft (BMEL) über den Projektträger Fachagentur Nachwachsende Rohstoffe e.V. (FNR) gefördert. Ohne die freundliche Zusammenarbeit und finanzielle Unterstützung des *APPF* und der University of Adelaide wäre diese Arbeit nicht möglich gewesen. Die wichtigste Voraussetzung für diese Arbeit waren die Unterstützung sowie die hervorragende Kooperation der Firma iotec GmbH und der Hochschule Osnabrück.

Literaturverzeichnis

- Busemeyer, L., Mentrup, D., Möller, K., Wunder, E., Alheit, K., Hahn, V., Maurer, H., Reif, J., Würschum, T., Müller, J., Rahe, F., and Ruckelshausen, A. (2013):** BreedVision — A Multi-Sensor Platform for Non-Destructive Field-Based Phenotyping in Plant Breeding. *Sensors* 13, 3, 2830–2847.
- Dzinaj, T., Kleine-Hörstkamp, S., Linz, A., Ruckelshausen, A., Böttger, O., Kemper, M., Marquering, J., Näscher, J., Trautz, D., and Wisserodt, E. (1998):** Multi-Sensor-System zur Unterscheidung von Nutzpflanzen und Beikräutern. *Zeitschrift für Pflanzenkrankheiten und Pflanzenschutz* 1998, Sonderheft XVI, 233–242.
- Fanourakis, D., Briese, C., Max, J. F., Kleinen, S., Putz, A., Fiorani, F., Ulbrich, A., and 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.

- Fender, F., Hanneken, M., In der Stroth, S., Kielhorn, A., Linz, A., and Ruckelshausen, A. (2006).** *Sensor Fusion meets GPS: Individual Plant Detection*. Proceedings of CIGR EurAgEng, S. 279-280.
- Fender, F., Hanneken, M., Linz, A., Ruckelshausen, A., and Spicer, M. (2005):** Messende Lichtgitter und Multispektralkameras als bildgebende Systeme zur Pflanzenerkennung. *Bornimer Agrartechnische Berichte* 2005, Heft 40, 7–16.
- Furbank, R. T. and Tester, M. (2011):** Phenomics – technologies to relieve the phenotyping bottleneck. *Trends Plant Sci.* 16, 12, 635–644.
- Honsdorf, N., March, T. J., Berger, B., Tester, M., and Pillen, K. (2014):** High-throughput phenotyping to detect drought tolerance QTL in wild barley introgression lines. *PLoS ONE* 9, 5, e97047.
- Kielhorn, A., Dzinaj, T., Gelze, F., Grimm, J., Kleine-Hartlage, H., Kleine-Hörstkamp, S., Kuntze, W., Linz, A., Näscher, J., Ruckelshausen, A., Trautz, D., and Wisserodt, E. (2000):** Beikrautregulierung in Reihenkulturen - Sensorgesteuerte Querhacke in Mais. *Zeitschrift für Pflanzenkrankheiten und Pflanzenschutz* 2000, Sonderheft XVII, 207–215.
- Kovacheva, I., Kerksen, S., Mentrup, D., Rosemann, T., Bilges, K., and Ruckelshausen, A. (2014):** Bildgebende Lichtschrankensensoren zur Detektion von Pflanzhöhen, Ähren und Grannen. *CBA Tagung 2014*.
- Li, L., Zhang, Q., and Huang, D. (2014):** A review of imaging techniques for plant phenotyping. *Sensors* 14, 11, 20078–20111.
- Montes, J. M., Melchinger, A. E., and Reif, J. C. (2007):** Novel throughput phenotyping platforms in plant genetic studies. *Trends Plant Sci.* 12, 10, 433–436.
- Montes, J. M., Technow, F., Dhillon, B. S., Mauch, F., and Melchinger, A. E. (2011):** High-throughput non-destructive biomass determination during early plant development in maize under field conditions. *Field Crops Research* 121, 2, 268–273.
- Ruckelshausen, A. (2014):** Neue Sensorentwicklungen - ein technischer Blick auf Pflanzen, Sensoren und Daten. *Journal für Kulturpflanzen* 2014, 66 (2), 73–79.
- Winterhalter, L., Mistele, B., and Schmidhalter, U. (2013):** Evaluation of active and passive sensor systems in the field to phenotype maize hybrids with high-throughput. *Field Crops Research* 154, 236–245.