

Mobile Mapping auf dem Acker – hochaufgelöste 3D-Vermessung für nachhaltige Pflanzenproduktion

High Resolution 3D Crop Mapping for Sustainable Crop Production

Lasse Klingbeil, Ansgar Dreier, Felix Esser, Lina Zabawa, Diana Pavlic, Heiner Kuhlmann

Eine der größten Herausforderungen für die Landwirtschaft der Zukunft ist die Reduktion negativer Einflüsse auf die Umwelt, bei gleichzeitiger Steigerung des Ertrags. Ein Ansatz, sich dieser Aufgabe zu stellen, besteht im Einsatz und der Weiterentwicklung von Technologien, wie Sensorik, Robotik und künstliche Intelligenz, und deren Integration in agrarische Produktionsprozesse, Modellierung und Vorhersagen. Dieser Ansatz wird im Exzellenzcluster „PhenoRob: Robotics and Phenotyping for Sustainable Crop Production“ an der Universität Bonn verfolgt. Die Geodäsie spielt dabei eine tragende Rolle. In diesem Beitrag wird das Cluster sowie der Beitrag der Ingenieurgeodäsie anhand verschiedener Beispiele vorgestellt.

Schlüsselwörter: Phänotypisierung, Agrarroboter, Nachhaltigkeit, UAV, Georeferenzierung, Punktwolken, Laserscanner

One of the biggest challenges for agriculture in the future is to reduce negative impacts on the environment while increasing yields. One approach to address this task is the use and further development of technologies such as sensors, robotics and artificial intelligence and their integration into agricultural production processes, modeling and forecasting. This approach is being pursued in the Cluster of Excellence “PhenoRob: Robotics and Phenotyping for Sustainable Crop Production” at the University of Bonn. Geodesy plays a leading role in this. In this article, we present the cluster PhenoRob and the contribution of engineering geodesy using various examples.

Keywords: Phenotyping, agricultural robots, sustainability, UAV, georeferencing, point clouds, laser scanning

1 EINLEITUNG UND WISSENSCHAFTLICHER KONTEXT

Künftige agrarische Produktionssysteme stehen vor der Herausforderung, die Ernährungssicherheit einer wachsenden Weltbevölkerung bei gleichzeitiger Reduzierung der ökologischen und sozialen Folgekosten zu gewährleisten. Insbesondere der Klimawandel und die Abnahme der Biodiversität stellen Schwierigkeiten dar, für die standortangepasste und nachhaltige Lösungsstrategien entwickelt werden müssen. Eine Schlüsseltechnologie zur Steigerung der Produktivität und Ressourceneffizienz in der Landwirtschaft liegt in der digitalen Revolution, die in der landwirtschaftlichen Forschung und Praxis zunehmend Raum greift. In jüngerer Zeit wurden substanzielle technische Fortschritte in einigen Kerntechnologien erzielt, die sich künftig noch beschleunigen werden. Beispiel dafür sind u. a. die

Digitalisierung, Sensorentwicklung, Satellitenbildverarbeitung und Robotik.

Der Exzellenzcluster „PhenoRob: Robotics and Phenotyping for Sustainable Crop Production“ ist der aktuell einzige im Rahmen der Exzellenzinitiative des Bundes und der Länder geförderte Cluster mit landwirtschaftlichem Hintergrund. Mit einem Fördervolumen von ca. 27 Mio € über einen Zeitraum von sieben Jahren (2019–2025) wird ein Forschungsprogramm gefördert, welches an der Universität Bonn und dem Forschungszentrum Jülich (FzJ) sowie weiteren Organisationen, wie dem Leibniz-Zentrum für Agrarlandschaftsforschung (ZALF), dem Institut für Zuckerrübenforschung (IfZ) und dem Fraunhofer-Institut für Intelligente Analyse- und Informationssysteme



Abb. 1 | Eine Schlüsseltechnologie zur Steigerung der Produktivität und Ressourceneffizienz in der Landwirtschaft liegt in der digitalen Revolution

(IAIS) umgesetzt wird. Hinter PhenoRob steht ein technologie-orientierter Ansatz, bei dem untersucht werden soll, inwiefern der Einsatz von Robotik, Sensortechnik, Fernerkundung und moderner Datenverarbeitungsansätzen, wie dem maschinellen Lernen, die Pflanzenproduktion sowohl ertragreicher, aber gleichzeitig auch nachhaltiger gestaltet werden kann. Ein besonderes Merkmal des Clusters ist es, die genannten Technologien nicht alleinstehend zu betrachten, sondern deren Einsatz ganzheitlich im Zusammenspiel mit ökonomischen und ökologischen Faktoren zu sehen, auf Skalen, die über einzelne Felder oder Betriebe hinausgehen. Dazu wurde auf eine interdisziplinäre Zusammensetzung des Clusters geachtet, mit Wissenschaftlern aus den Bereichen Robotik, Geodäsie, Maschinelles Lernen, Agrar- und Nutzpflanzenwissenschaft, Bodenkunde und Ökonomie.

PhenoRob ist in sechs Kernbereiche (Core Projects, CP) unterteilt, die sich fachbereichsübergreifend mit unterschiedlichen Aspekten beschäftigen:

- CP1 In-field 4D Reconstruction: Erfassung des Pflanzenzustands und dessen Entwicklung über die Zeit mit Sensoren vom Boden und aus der Luft, von der Einzelpflanze bis zur Feldskala.
- CP2 Relevance Detection of Crop Features: neue phänotypische Merkmale und deren Relevanz.
- CP3 Soil-Root Zone: Untersuchung der Wurzeln und des Bodens mit minimal-invasiven Technologien.
- CP4 Autonomous In-field Intervention: Ableitung von Managementempfehlungen aus Daten und Modellen und deren Ausführung mithilfe von Robotern.
- CP5 New Field Arrangements: Mischkulturen und kleinskalige Feldstrukturen, die durch kleine und smarte Feldroboter ermöglicht werden.
- CP6 Technology Adaption and Impact: Einfluss der untersuchten Technologien auf die Agrarwirtschaft und das Ökosystem.

Zentrale Elemente in PhenoRob sind die sogenannten Plattformen, welche im Wesentlichen Feldexperimente zu unterschiedlichen agrarwissenschaftlichen Fragestellungen sind, die aber gleichzeitig Kristallisationspunkte darstellen für den Einsatz von Sensor- und Robotertechnologien, die Weiterentwicklung von Pflanzen- und Ökosystemmodellen verschiedener Skalen sowie die Erzeugung und Auswertung riesiger heterogener Datenmengen.

Der geodätische Beitrag zum Cluster innerhalb der Universität Bonn wird realisiert durch

- die Professur für Geodäsie (Heiner Kuhlmann: Georeferenzierung, Mobile Sensorsysteme, 3D-Phänotypisierung),
- die Professur für Photogrammetrie und Robotik (Cyrill Stachniss: Robotic Perception, Deep Learning, Crop Detection and Classification),
- die Professur für Fernerkundung (Ribana Roscher: Informed Machine Learning, Anomaliedetektion) und
- die Professur für Geoinformation (Jan-Henrik Haunert: Heterogene Datenbanken).

Cyrill Stachniss und Heiner Kuhlmann sind außerdem die beiden Sprecher des Exzellenzclusters PhenoRob. In diesem Beitrag werden die Aktivitäten der Professur für Geodäsie im Rahmen des Clusters beispielhaft dargestellt.

2 DER BEITRAG DER INGENIEURGEODÄSIE ZUR NACHHALTIGEN PFLANZENPRODUKTION

Es gibt im Wesentlichen zwei Bereiche, in denen Kompetenzen aus dem Bereich der Ingenieurgeodäsie Beiträge zu Fragestellungen der Präzisionslandwirtschaft und damit auch zur nachhaltigen Pflanzenproduktion liefern können. Das ist zum einen die Georeferenzierung verschiedenster Messdaten, insbesondere solcher, die von bewegten Messplattformen wie UAVs (Unmanned Aerial Vehicles) oder Feldrobotern aufgenommen wurden. Zum anderen ist es die Erfassung und Parametrisierung geometrischer Strukturen und deren Veränderungen, wobei es sich bei den geometrischen Strukturen um ganze Pflanzenbestände, einzelne Pflanzen oder Pflanzenteile handeln kann.

Um Messdaten, wie Laserscans, Bilder und spektrale Information, gemeinsam auswerten zu können und diese mit anderen potenziell vorhandenen räumlichen Daten wie Wetter-, Klima- oder Bodenkarten zu kombinieren, müssen die Daten in einem übergeordneten Koordinatensystem registriert werden. Das gleiche gilt, wenn Objekte über einen Zeitraum beobachtet werden, um die Veränderung, z. B. Wachstum, zu vermessen. Im Fall bewegter Multisensorsysteme werden üblicherweise Sensoren, wie GNSS oder Inertialsensoren,

fusioniert, um die Bewegung der den Objektraum beobachtenden Sensoren zu bestimmen und deren Messungen zu georeferenzieren. Es können dazu aber auch die Daten der Kameras und Laserscanner selbst verwendet werden, häufig zusammen mit eingemessenen Zielzeichen in der Umgebung, oder Kombinationen aus beidem. Die Bestimmung der exakten Position und Orientierung der Plattform ist auch bei Anwendungen wichtig, bei denen bestimmte Aktionen, wie die Ausbringung von Pflanzenschutz oder Düngemitteln in bestimmten Bereichen des Felds, an bestimmten einzelnen Pflanzen oder sogar Pflanzenteilen durchgeführt werden sollen. Letzteres entspricht in der Ingenieurgeodäsie einem kinematischen Absteckungsproblem.

Das Monitoring des Pflanzenzustands über die Zeit kann verwendet werden, um daraus Zeitpunkte und Orte für bestimmte Bewirtschaftungsaktivitäten abzuleiten, um Pflanzenkrankheiten oder Abweichungen der erwarteten Entwicklung zu erkennen, oder aber, um Wachstumsmodelle zu kalibrieren oder zu verbessern. Die Ingenieurgeodäsie kann hier einen Beitrag zum Erfassen der geometrischen und strukturellen Erscheinung der Pflanzen liefern. Allerdings handelt es sich bei Pflanzen um strukturell sehr komplexe und unregelmäßige Objekte, bei denen sowohl die Erfassung als auch die Parametrisierung Herausforderungen darstellen. Gleichzeitig ist es derzeit teilweise noch unbekannt, welche Parameter und Merkmale genau für welche agrarwissenschaftliche oder pflanzenphysiologische Fragestellung benötigt werden und welche überhaupt mit welcher Sensorik beobachtet werden können. So ist es z. B. möglich, mit sehr hochauflösenden Sensoren einzelne Pflanzen oder Blätter zu zählen oder deren Größe zu bestimmen. Mit anderen Verfahren lassen sich einzelne Pflanzen, wie z. B. Weizen, ab einem bestimmten Wachstumsstadium gar nicht mehr trennen, es können jedoch interessante Parameter, wie die Bestandshöhe, abgeleitet werden. Für andere Parameter, wie z. B. die Blattfläche oder die Blattwinkelverteilung, müssen aus den Punktwolken Oberflächen rekonstruiert werden, was im Fall von Pflanzen nicht trivial ist.

Im Folgenden werden einige der hier dargestellten Möglichkeiten und Herausforderungen in Form von Beispielen vorgestellt und diskutiert.

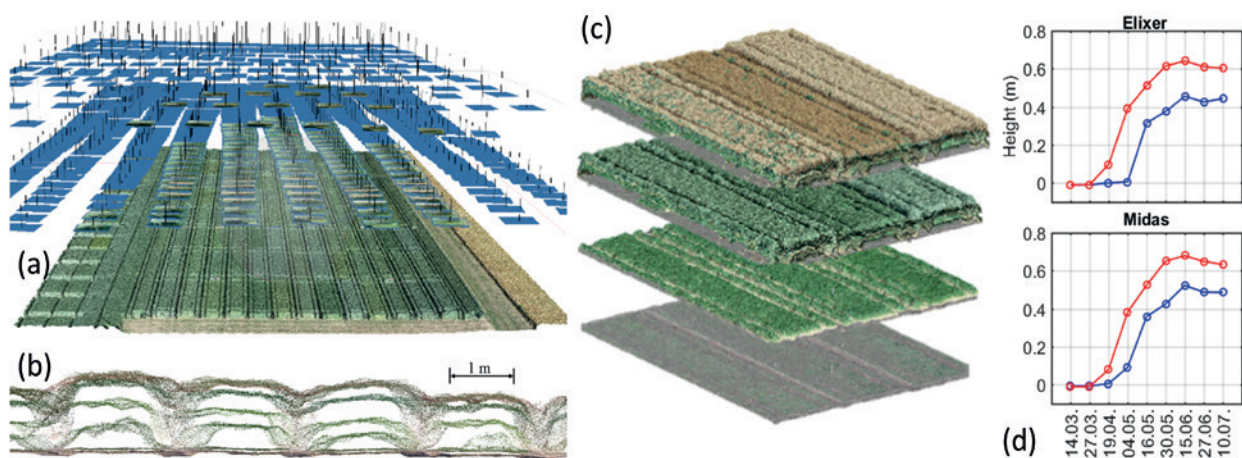


Abb. 2 | Bildbasierte Vermessung mit UAV: a) Verteilung der Bilder, b) Querschnitt durch Punktwolken an mehreren Zeitpunkten, c) Punktwolken an mehreren Zeitpunkten, d) abgeleitete Wachstumskurven für zwei Genotypen

3 BILD-BASIERTE VERMESSUNG AUS DER LUFT

Der Einsatz von UAVs in landwirtschaftlichen Anwendungen ist schon seit vielen Jahren zumindest im wissenschaftlichen Bereich etabliert. Es gibt kommerziell erhältliche Softwarepakete, mit denen relativ einfach Orthomosaike, digitale Höhenmodelle und Punktwolken aus Bildern, die mit ausreichendem Überlapp von UAVs aufgenommen wurden, erstellt werden. Die entsprechenden Fluggeräte mit qualitativ ausreichenden Kameras und einer benutzerfreundlichen Flugplanung sowie -durchführung sind heutzutage ebenfalls am Markt erhältlich. Der Einsatz von Multispektralkameras ermöglicht auf diese Weise auch die Berechnung von Vegetationsindexkarten mit hoher räumlicher Auflösung.

Abb. 2 zeigt beispielhaft den Ablauf einer UAV-Befliegung zur Bestimmung der Pflanzenhöhe einzelner Plots in einem Züchtungsexperiment mit Winterweizen /Becirevic et al. 2019/. Abb. 2a zeigt die einzelnen Bilder, aufgenommen mit einer Kreuzbefliegung in zwei unterschiedlichen Höhen. Aus diesen wurden mithilfe einer photogrammetrischen Auswertesoftware Punktwolken erzeugt, die anhand von am Boden befindlichen Zielzeichen zentimetergenau georeferenziert worden sind. Dadurch lassen sich nun Befliegungen zu verschiedenen Zeitpunkten miteinander vergleichen. Die Punktwolken bzw. Querschnitte an verschiedenen Wachstumsstadien von Winterweizen sind in Abb. 2b und Abb. 2c sichtbar. Zusammen mit einer Befliegung vor dem Aufgang der Pflanzen lässt sich nun über Differenzbildung die ortsabhängige Höhe des Bestands bestimmen. Abb. 2d zeigt die daraus berechnete Wachstumskurven für zwei Sorten (Elixier und Midas) für zwei verschiedene Anbausysteme (intensiv und extensiv) /Honecker et al. 2020/. Neben der Höhe lassen sich noch Bestandsparameter, wie z. B. der Bodenbedeckungsgrad, der Blattflächenindex oder Höhenvariabilitäten, ableiten.

4 LASER-BASIERTE VERMESSUNG AUS DER LUFT

Alternativ zur bildbasierten 3D Vermessung mit photogrammetrischen Methoden werden mittlerweile auch Laserscanner-basierte Verfahren mit UAVs eingesetzt. Immer leichter und kleiner werdende

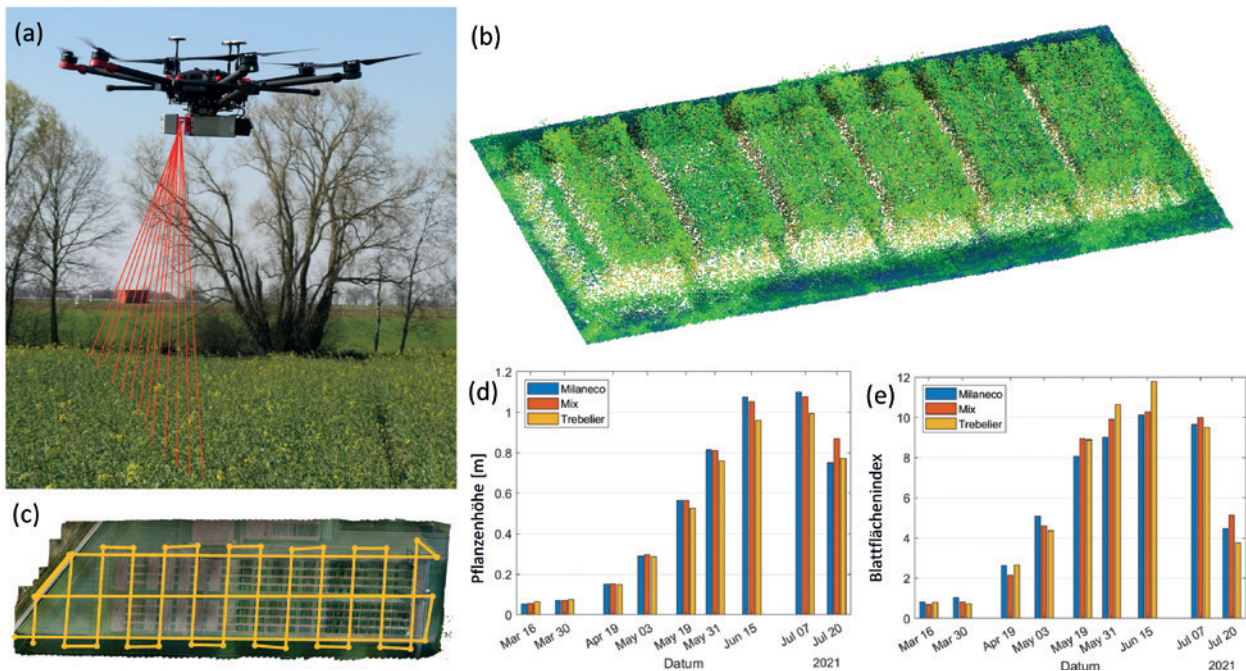


Abb. 3 | Laserscanning mit UAV: a) UAV über einem Rapsfeld, b) generierte Punktwolke eines Winterweizenfelds, c) Flugroute für ein großes Feld, d) abgeleitete Wachstumskurve für drei Genotypen, e) angeleitete Entwicklung des Blattflächenindex für drei Genotypen

Laserscanner sowie die steigende Verfügbarkeit von Plattformen mit höheren Traglasten haben das ermöglicht. Das hier vorgestellte System besteht aus einem Riegli-Profil-Laserscanner miniVUX-2UAV, der zusammen mit einer hochwertigen Applanix-GNSS/IMU-Sensor-einheit an einer DJI-Matrice-600-Drohne befestigt ist (Abb. 3a). Der Scanner erzeugt bis zu 100 Scanprofile pro Sekunde mit einer maximalen Pulsrate von 200 kHz und einer Punktgenauigkeit im unteren Zentimeterbereich /Dreier et al. 2021/. Aus den Daten der

Inertialsensoren und des GNSS-Empfängers werden die Trajektorie des Fluggeräts und damit die Rotations- und Translationsparameter des Scanners relativ zu einem globalen Koordinatensystem berechnet (Abb. 3c). Die Scanprofile werden so registriert und das Ergebnis ist eine georeferenzierte Punktwolke mit einer Punktdichte, die von den Flugparametern der Drohne abhängt (Abb. 3b, hier etwa 4 200 Punkte/m²). Auch hier kann über Mehrfachbefliegungen die zeitliche Entwicklung der Pflanzen erfasst werden.

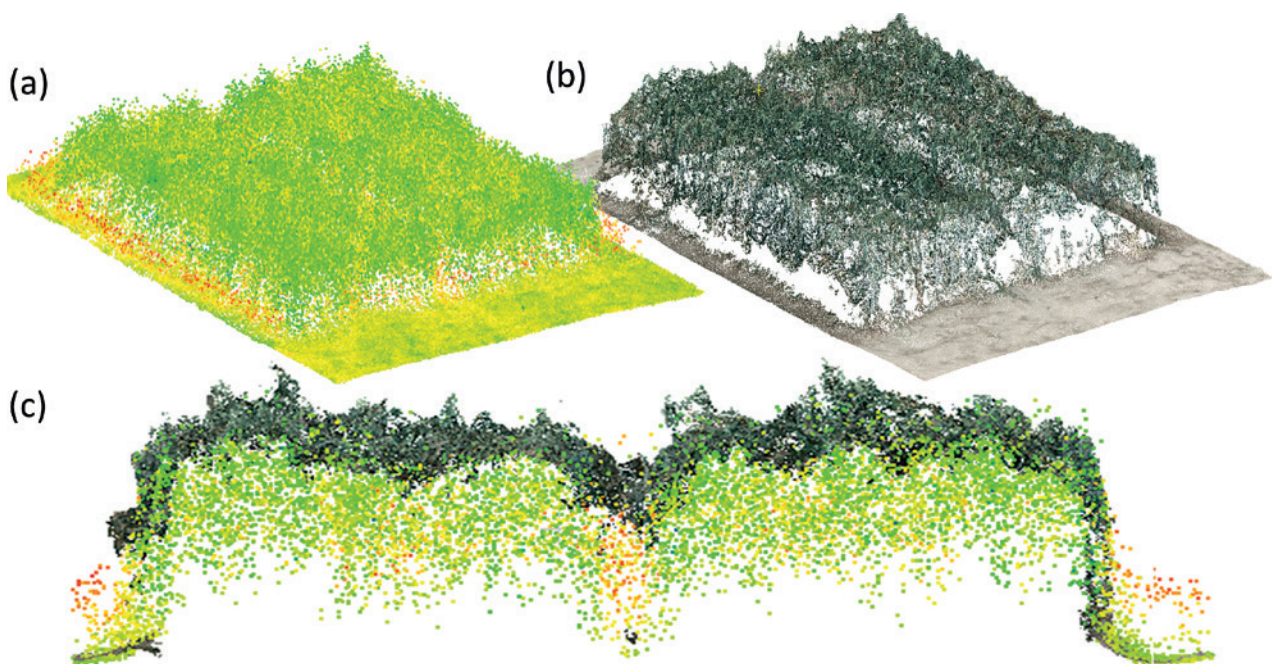


Abb. 4 | Punktwolken desselben Teils eines Winterweizenfelds, gemessen mit einem UAV-Laserscanner-System (a), gerechnet aus Luftbildern (b) und überlagert im Querschnitt (c)

In *Abb. 3d* und *Abb. 3e* ist die aus den Laserdaten berechnete Entwicklung der Pflanzenhöhe und des Blattflächenindex von drei verschiedenen Winterweizensorten über die gesamte Wachstumsperiode zu erkennen. Ähnlich wie bei der Bild-basierten Vermessung wurde die Pflanzenhöhe dabei aus der Differenz zwischen der Kronendachhöhe und dem Boden berechnet. Im Fall des Laserscannings sind jedoch auch bei dichterem Bewuchs üblicherweise noch Bodenpunkte sichtbar, sodass hier auf einen Flug vor dem Aufgang der Pflanzen verzichtet werden konnte. Der Blattflächenindex wurde über die Verteilung der Laserpunkte im Bestand und deren Verhältnis zu Punkten am Boden geschätzt.

Es ist interessant, die Bild-basierte und Laserscanner-basierte Vermessung mit UAVs im landwirtschaftlichen Kontext zu vergleichen. In *Abb. 4* sind die Unterschiede am Beispiel von zwei Parzellen eines Feldexperiments mit Winterweizen zu erkennen. Die aus den Bildern gerechnete Punktwolke (*Abb. 4b*) ist dichter und enthält durch die Verwendung von RGB-Bildern Farbinformationen. Sie erscheint dadurch realistischer. Im Querschnitt (*Abb. 4c*) sieht man aber, dass das Messprinzip nur Punkte an der Oberfläche rekonstruiert und die Algorithmen außerdem zu Glättungseffekten führen können. Die Messungen des Laserscanners hingegen dringen tiefer in den Bestand ein und können so zusätzliche nützliche Informationen liefern. Dafür ist die Punktdichte üblicherweise geringer, die räumliche Auflösung je nach Flugparametern kleiner und es gibt keine Farbinformation. Beide Verfahren tasten die komplexe und feingliedrige Struktur der Pflanzen auf sehr unterschiedliche Weise ab, was zu Herausforderungen bei der Extraktion relevanter Parameter führen kann.

5 KINEMATISCHE LASER-BASIERTE VERMESSUNG AM BODEN

Die beiden oben vorgestellten Messsysteme sind vornehmlich zur Bestimmung von strukturellen Parametern des Kronendachs, wie der Höhe und dem Blattflächenindex, geeignet. Die Untersuchung einzelner Pflanzen ist dabei nur bedingt möglich. Um Informationen über die Entwicklung einzelner Pflanzen oder die Anzahl, Größe und Ausrichtung von Blättern und anderen Pflanzenorganen zu bekommen, ist ein höher auflösendes Messverfahren notwendig.

Aus diesem Grund wurde eine mobile Roboterplattform entwickelt, welche – mit Tiefenkameras, Kameras und Laserscannern ausgestattet – Sensordaten im Feld aufzeichnen kann. Außerdem kommt das System als Trägerplattform für ein Mobile-Mapping-System zum Einsatz, das ursprünglich für kinematische Vermessung von städtischen Räumen konzipiert wurde. Letzteres besteht aus einem hochauflösenden Profillaserscanner der Firma Z+F (Profilier 9012A) sowie einem hochklassigen Inertialsensorsystem der Firma IMAR (iNAV-FJI-LSURV), welches auch ein GNSS-Empfänger enthält (*Abb. 5a*). Aus den Inertialsensordaten und den GNSS-Beobachtungen können, wie oben beschrieben, eine sehr genaue Trajektorie des Roboters berechnet werden, die dann zur Registrierung der Scanprofile verwendet wird (*Abb. 5b*). Das Ergebnis ist eine georeferenzierte Punktwolke (*Abb. 5c*) mit hoher Auflösung (~ 300 Punkte/cm²) und hoher Punktgenauigkeit (~ 1 cm; /Heinz et al. 2020/). Durch Mehrfachbefahrung des Felds kann die Entwicklung einzelner Pflanzen hochaufgelöst beobachtet werden (*Abb. 5d*). Durch die genaue Georeferenzierung können einzelne Pflanzen ohne Weiteres wiedergefunden werden, wodurch sich eine nachträgliche Registrierung der Punktwolken erübrigt.

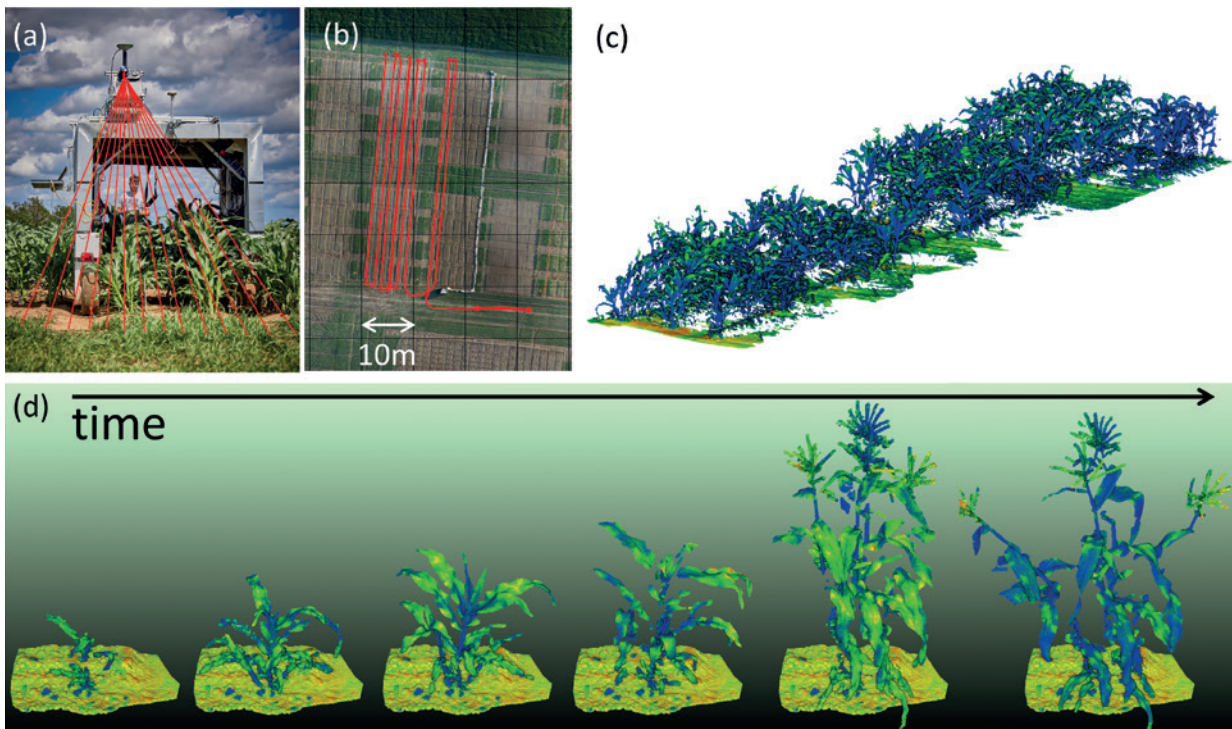


Abb. 5 | Kinematisches Laserscanning im Feld: a) Roboter mit Mobile-Mapping-System im Feld, b) Trajektorie des Systems im Feld, c) generierte Punktwolke eines Maisfelds, d) Entwicklung einer Maispflanze über die Zeit

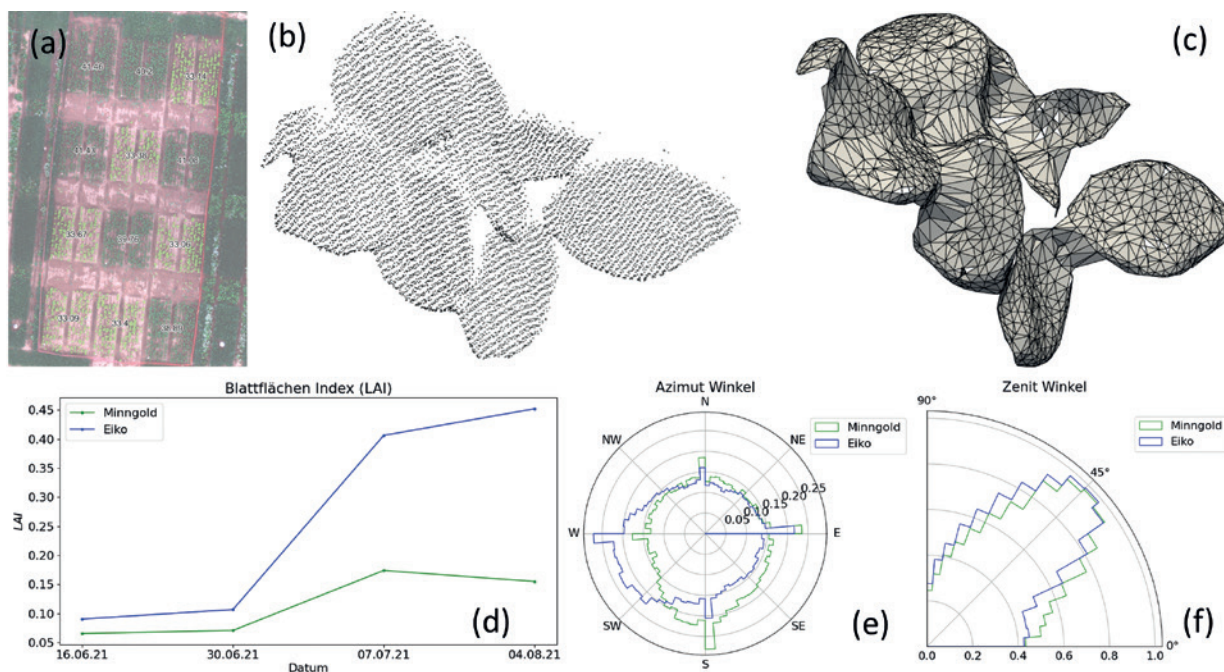


Abb. 6 | Extraktion von Pflanzenparametern: a) Versuchsfeld mit Sojapflanzen, b) mit dem Feldroboter aufgenommene Punktwolke einer Sojapflanze, c) vermaschte Punktwolke, d) zeitliche Entwicklung des Blattflächenindex für zwei Sojasorten, e) Blattwinkelverteilung (Zenitwinkel) für zwei Sojasorten, f) Blattwinkelverteilung (Azimutwinkel) für zwei Sojasorten

Aktuell wird eine neue Version des Mobile-Mapping-Systems entwickelt, welche speziell für die Anwendung im Feld angepasst ist und zwei Triangulationslaserscanner enthält. Diese haben eine noch höhere Distanzauflösung, eine höhere Datenrate und erfassen durch ihre Anordnung einen größeren Teil der Pflanze. Außerdem wird das hochpreisige Inertialsensorsystem durch eine günstigere Variante ersetzt.

6 PARAMETEREXTRAKTION AUF EINZELPFLANZENEBENE

Aus den aufgenommenen Bildern und Punktwolken, ob mit UAVs oder Feldroboter, müssen nun relevante Parameter extrahiert werden. Welche Parameter das sind, wie schnell und mit welcher räumlichen und zeitlichen Auflösung diese erfasst werden müssen, hängt stark von der Anwendung ab. Einige Parameter, wie z. B. die Pflanzenhöhe, die Biomasse oder der Blattflächenindex, werden standardmäßig in vielen agrarwissenschaftlichen Versuchen oder der Züchtung erhoben und man hofft, dass sie durch die vorgestellten Messsysteme häufiger, einfacher, genauer, mit höherer räumlicher Auflösung und nicht-destruktiv erfasst werden können. Weitere Parameter, wie das Entwicklungsstadium oder der Gesundheitszustand, werden meist durch optische Betrachtung durch einen Experten ermittelt, auch hier würde eine automatische, im besten Fall frühzeitige und ortsaufgelöste Erkennung helfen. Zu guter Letzt gibt es noch Parameter, die nur mithilfe der beschriebenen Messtechnik ermittelt werden können, dazu gehört zum Beispiel die Blattwinkelverteilung.

Abb. 6 zeigt beispielhaft die Extraktion einiger relevanter Parameter aus hoch aufgelösten Punktwolken. Mit dem oben beschriebenen

Roboter wurde mehrfach durch ein Feld mit zwei verschiedenen Sojasorten (Abb. 6a) gefahren und es wurden hochaufgelöste Daten erhoben (Abb. 6b). Aus diesen Punktwolken wurde die Oberfläche der Pflanzen als Dreiecksnetz rekonstruiert (Abb. 6c). Für alle Dreiecke sind nun sowohl die Fläche als auch die Ausrichtung (Zenit- und Azimutwinkel) bestimmt und damit der Blattflächenindex (Abb. 5d) und die Blattwinkelverteilungen (Abb. 6e und 6f) berechnet worden. Der Blattflächenindex ist ein Parameter, der bisher nur durch destruktive Messungen, also das Abschneiden aller Blätter und die Bestimmung der Blattoberfläche mithilfe eines Flachbettscanners, wirklich zuverlässig bestimmt werden konnte. Das hier vorgestellte Verfahren verspricht eine ähnliche Genauigkeit, ohne die Pflanze zu beschädigen. Die Blattwinkelverteilung ist eine Eingangsgröße in verschiedenen Modellen, wie z. B. Radiative Transfer Models, mit denen die Interaktion von Pflanzen mit elektromagnetischer Strahlung simuliert werden kann. Bisher basierten die Verteilungen meist auf Annahmen, die jetzt durch direkte Messungen bestätigt werden können.

7 ZUSAMMENFASSUNG UND ZUKÜNFTIGE HERAUSFORDERUNGEN

In diesem Beitrag wurde dargelegt, welche Rolle verschiedene geodätische Messverfahren in der Präzisionslandwirtschaft und der nachhaltigen Pflanzenproduktion spielen können. Es wurden Boden- und Luft-gebundene kinematische Messsysteme und -verfahren präsentiert, die für den landwirtschaftlichen Kontext entwickelt oder angepasst worden sind und in echten Feldexperimenten unter realen Bedingungen eingesetzt wurden.

Ein wichtiger Aspekt dabei war die genaue Georeferenzierung der Daten unterschiedlicher Sensoren. Abb. 7 zeigt anschaulich, was

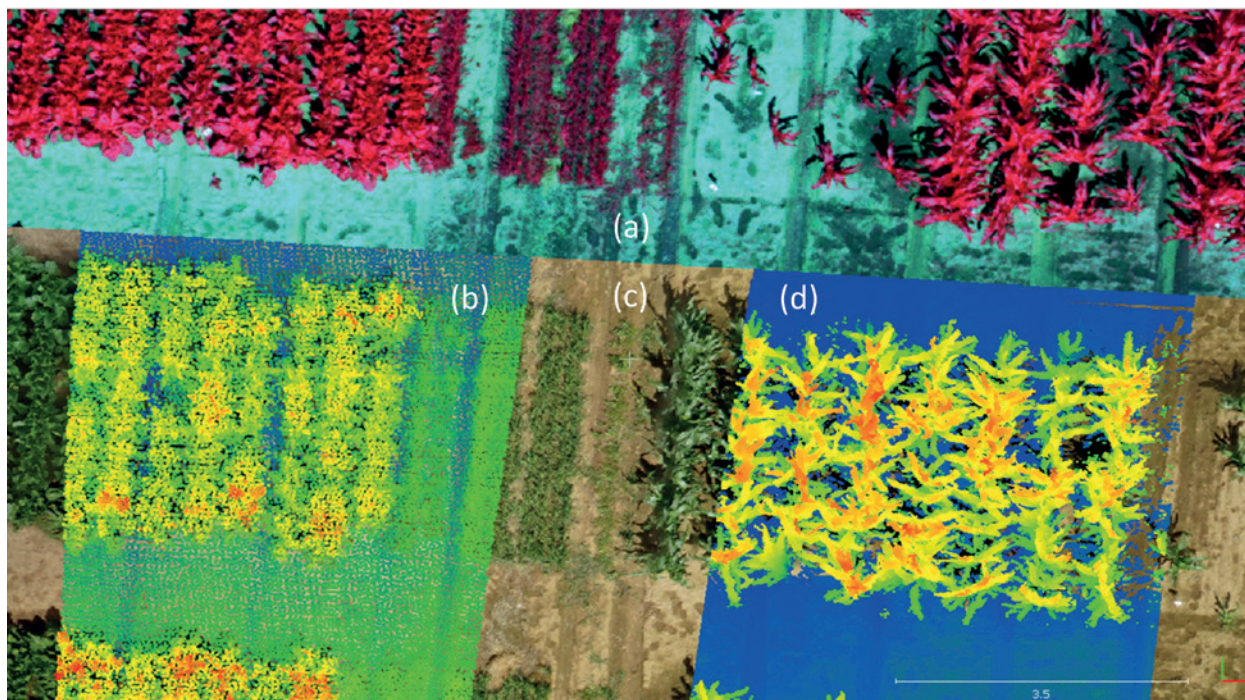


Abb. 7 | Überlagerung von zwei Orthofotos (hochauflösende RGB-Kamera (c) & Multispektralkamera (a)) und zwei Laserpunktewolken (Luft- (b) & Boden-basiert (d)). Die Registrierung der vier unterschiedlichen Datenquellen geschah hier ausschließlich über hochgenaue Georeferenzierung.

dadurch möglich wird. Dargestellt ist eine Überlagerung von zwei Orthofotos und von zwei Punktwolken innerhalb eines Bereichs in einem Feldexperiment. Die beiden Orthofotos wurden mithilfe einer RGB-Kamera sowie einer Multispektralkamera erzeugt, die beiden Punktwolken stammen von den oben beschriebene UAV-basierten Laserscanner sowie dem Feldroboter. Die Daten wurden am gleichen Tag aufgenommen und auf unterschiedliche Weise mit einer Genauigkeit im unteren Zentimeterbereich georeferenziert. Daher konnten die Daten ohne zusätzliche Registrierungsverfahren überlagert werden.

Ein anderer Teilbereich, der hier präsentiert wurde, ist die Extraktion von relevanten Parametern aus den aufgenommenen Punktwolken. Das passierte zum einen auf Ebene des Kronendachs, z.B. durch Rasterisierung zur Berechnung der Bestandshöhe, aber auch auf Einzelpflanzenebene, zur Vermessung einzelner Blätter.

Es gibt noch einige offene Fragestellungen und Herausforderungen, sowohl im Bereich der Erzeugung als auch in der Interpretation der Daten. So ist z. B. insbesondere bei den hochauflösenden Scans durch den Feldroboter die Vollständigkeit der Modelle zu optimieren und die Beeinflussung der Messung durch Wind zu kompensieren. Außerdem kann die Genauigkeit der Trajektorienbestimmung der Plattform mithilfe von günstigen Sensoren noch verbessert werden. Im Bereich der Datenverarbeitung und -interpretation gibt es auch Forschungsbedarf. Die Frage, welche Parameter für welche Anwendung relevant ist und welcher überhaupt mit welchem Sensor unter welchen Bedingungen beobachtbar ist, muss in Zusammenarbeit mit Agrarwissenschaftlern, Pflanzenmodellierern und Phänotypisierern erarbeitet werden. Abhängig davon müssen geeignete Verarbeitungsschritte für die Punktwolken entwickelt werden. Dabei spielen die Segmentierung von Punktwolken in einzelne Pflanzen und Organe eine Rolle, aber auch deren geeignete Repräsentation durch mathematische Modelle.

Die Autoren freuen sich auf weitere Jahre in diesem sehr interdisziplinären Forschungsgebiet, welches gerade durch die Vielfalt und Unregelmäßigkeit der untersuchten Objekte nicht langweilig zu werden droht.

DANKSAGUNG

This work was funded by the Deutsche Forschungsgemeinschaft (DFG, German Research Foundation) under Germany's Excellence Strategy – EXC 2070 – 390732324.

LITERATUR

- Becirevic, D.; Klingbeil, L.; Honecker, A.; Schumann, H.; Rascher, U.; Léon, J.; Kuhlmann, H. (2019): On the derivation of crop heights from multitemporal UAV based imagery. In: ISPRS Annals of the Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences, Vol. IV-2/W5, No. 2/W5. <https://doi.org/10.5194/isprs-annals-IV-2-W5-1-2019>.
- Dreier, A.; Janßen, J.; Kuhlmann, H.; Klingbeil, L. (2021): Quality Analysis of Direct Georeferencing in Aspects of Absolute Accuracy and Precision for a UAV-Based Laser Scanning System. In: Remote Sensing 13(2021)18. <https://doi.org/10.3390/rs13183564>.
- Heinz, E.; Holst, C.; Kuhlmann, H.; Klingbeil, L. (2020): Design and Evaluation of a Permanently Installed Plane-Based Calibration Field for Mobile Laser Scanning Systems. In: Remote Sensing 12(2020)3. <https://doi.org/10.3390/rs12030555>.
- Honecker, A.; Schumann, H.; Becirevic, D.; Klingbeil, L.; Volland, K.; Forberig, S.; Jansen, M.; Paulsen, H.; Kuhlmann, H.; Léon, J. (2020): Plant, space and time – linked together in an integrative and scalable data management system for phenomic approaches in agronomic field trials. In: Plant Methods 16, 55. <https://doi.org/10.1186/s13007-020-00596-3>.

Dr. rer. nat. Lasse Klingbeil

RHEINISCHE FRIEDRICH-WILHELMS-
UNIVERSITÄT BONN
INSTITUT FÜR GEODÄSIE UND GEOINFORMATION

Nussallee 17 | 53115 Bonn
klingbeil@igg.uni-bonn.de

**M. Sc. Ansgar Dreier**

RHEINISCHE FRIEDRICH-WILHELMS-
UNIVERSITÄT BONN
INSTITUT FÜR GEODÄSIE UND GEOINFORMATION

Nussallee 17 | 53115 Bonn
dreier@igg.uni-bonn.de

**M. Sc. Felix Esser**

RHEINISCHE FRIEDRICH-WILHELMS-
UNIVERSITÄT BONN
INSTITUT FÜR GEODÄSIE UND GEOINFORMATION

Nussallee 17 | 53115 Bonn
esser@igg.uni-bonn.de

**M. Sc. Lina Zabawa**

RHEINISCHE FRIEDRICH-WILHELMS-
UNIVERSITÄT BONN
INSTITUT FÜR GEODÄSIE UND GEOINFORMATION

Nussallee 17 | 53115 Bonn
lina.zabawa@igg.uni-bonn.de

**M. Sc. Diana Pavlic**

RHEINISCHE FRIEDRICH-WILHELMS-
UNIVERSITÄT BONN
INSTITUT FÜR GEODÄSIE UND GEOINFORMATION

Nussallee 17 | 53115 Bonn
pavlic@igg.uni-bonn.de

**Prof. Dr.-Ing. Heiner Kuhlmann**

RHEINISCHE FRIEDRICH-WILHELMS-
UNIVERSITÄT BONN
INSTITUT FÜR GEODÄSIE UND GEOINFORMATION

Nussallee 17 | 53115 Bonn
heiner.kuhlmann@uni-bonn.de

