

Kartierung von Maiskörnern mittels Drohne als Prüfmethode von Einzelkornsätechnik unter Feldbedingungen

Steffen Konnemann, Eike Hunze, Frank Beneke

Diese Arbeit zeigt drei Ansatzpunkte zur Weiterentwicklung des von der Deutschen Landwirtschafts-Gesellschaft (DLG) angewandten Prüfrahmens für Einzelkornsägeräte im Feldeinsatz auf und leitet daraus eine auf Fernerkundung basierende Methodik ab. Durch den Einsatz einer Drohne mit RGB-Sensor konnten mittels Einzelkornsämaschine gelegte Maiskörner auf rückverfestigtem Boden teilautomatisiert segmentiert und kartiert werden. Dies gelang durch die Anwendung des Otsu-Schwellenwertes auf den a^* -Kanal des CIELab-Farbraums mit anschließender Filterung für die Fläche eines repräsentativen Maiskorns. Die mittlere Sichtbarkeitsrate bei der offenen Ablage von Maiskörnern liegt bei $> 90\%$. Der Segmentierungsalgorithmus erkennt die sichtbaren Maiskörner mit einer hohen Sensitivität von $\geq 96\%$, jedoch muss die Genauigkeit von $\geq 62\%$ weiter verbessert werden. Doppelstellen werden ab einer Distanz von zwei Zentimetern mit gleichwertiger Fehlerquote erkannt. Die Kartierung der Ablagepunkte mit einem $RMSE_{xy}$ zwischen 1,7 und 5,1 mm ist genauer als in vergleichbaren Arbeiten mit pflanzenbasierter Kartierung. Die Ergebnisse dieser Arbeit legen den Grundstein für eine Anpassung des DLG-Prüfrahmens an die technischen Weiterentwicklungen in der Einzelkornsätechnik.

Schlüsselwörter

Einzelkornsätechnik, Saatkörner, Drohne, Ablagegenauigkeit, Segmentierung, CIELab

Der erzielbare Kornertrag von Mais (*Zea mays* L.) ist von den vier Ertragsfaktoren Pflanzendichte, Kolbenanzahl pro Pflanze, Körneranzahl pro Kolben und Korngewicht abhängig (ASSEFA et al. 2016). Zu geringe Bestandesdichten werden von Maispflanzen, im Vergleich zu anderen Gräsern, nicht durch die Ausbildung mehrerer Triebe kompensiert (SANGOI 2001). Zu hohe Pflanzendichten verringern wiederum den Ertrag pro Pflanze durch zunehmende Konkurrenz um Licht, Wasser und Nährstoffe (DUNCAN 1984, SANGOI 2001). Die Einzelkornsätechnik wurde daher in den letzten Jahrzehnten laufend weiterentwickelt, um durch die Gleichmäßigkeit der Saatgutausbringung und Einheitlichkeit der Pflanzenbestände das Ertragspotenzial auszuschöpfen (ZHANG et al. 2018).

Die Funktionen einer Einzelkornsämaschine (EKS) umfassen das Öffnen des Saatschlitzes, die Vereinzelung und den Transport des Saatguts bis in den Saatschlitz sowie das Bedecken und Andrücken des Saatguts mit Erde (PANNING et al. 2000). Als Messgrößen für die Ablagegenauigkeit ergeben sich daraus die Schwankung um den Zielablagepunkt (Sollstelle), das Ausbleiben des Ablegens eines Saatkorns (Fehlstelle) und die gleichzeitige Ablage mehrerer Saatkörner (Doppelstelle) (PANNING et al. 2000).

Für eine vergleichbare Bewertung der Leistungsfaktoren verschiedener EKS wurde im Jahr 1984 der Standard ISO 7256-1:1984 veröffentlicht (INTERNATIONAL ORGANIZATION FOR STANDARDIZATION 1984). Heute angewandte Prüfungen wie bspw. durch die American Society of Agricultural and Biological En-

gineers (KACHMAN and SMITH 1995) oder der Deutschen Landwirtschafts-Gesellschaft (DLG) (DEUTSCHE LANDWIRTSCHAFTS-GESELLSCHAFT 1991) orientieren sich an diesem. Grundsätzlich lassen sich die Prüfungen in Laborverfahren und Feldverfahren unterteilen. Laborverfahren sind als Voruntersuchung hinreichend gut geeignet, eine Untersuchung im Feld ist jedoch in Hinblick auf den Einfluss durch Erschütterung der Säaggregate und der Bewegung des Saatguts notwendig (PANNING et al. 2000, BUDDE 2016).

In der Feldprüfung von EKS der DLG werden für diesen Zweck drei Maissorten in verschiedenen Fahrgeschwindigkeiten auf einem vorpräparierten Saatbeet gelegt. Zur Erfassung der Ablagegenauigkeit, der Kornstellenverteilung und des Feldaufgangs werden zwei bis vier Wochen nach der Aussaat die Abstände von viermal 250 Maispflanzen innerhalb einer Saatreihe pro Versuchsvariante mittels mobilem Abstandsmessgerät erfasst. Das Abstandsmessgerät wird an der Pflanzenreihe entlanggeschoben und misst die gefahrene Distanz von Pflanze zu Pflanze beim Drücken des Aufnahmeknopfes durch den Bedienenden (DEUTSCHE LANDWIRTSCHAFTS-GESELLSCHAFT 1991, SCHUCHMANN 2019).

Die Limitationen der etablierten Prüfmethodik der DLG liegen (1) in der ausschließlichen Erfassung von Pflanzenabständen innerhalb einer Reihe, (2) der Erfassung auf nur einem kleinen Teil der Gesamtfläche und (3) in der Betrachtung aufgelaufener Maispflanzen, deren Überlebensrate von Umwelteinflüssen beeinträchtigt ist.

(1) Die Standardoptimierung von Maispflanzen durch angepasste Reihenweiten und die Aussaat in Gleichstandsamt hat in den letzten Jahren an Bedeutung gewonnen (GRIEPENTROG 1999, GÖTZ und BERNHARDT 2010, SCHUCHMANN 2019). Gründe hierfür sind Ertragsvorteile, eine schnellere Beschattung und verbesserte Nährstoffausnutzung sowie die Erhöhung der beim Hacken bearbeitbaren Fläche von 66 auf 90 % (HOFF und MEDERSKI 1960, BULLOCK et al. 1988, GÖTZ und BERNHARDT 2010). Zwar kann über die Erfassung des Pflanzenabstandes innerhalb einer Reihe die Standardverteilung als Bewertungsmaß einer Gleichstandsamt errechnet werden, jedoch ist dies nur bei festgelegter Reihenweite und gleichbleibender Aussaatstärke möglich. Eine Erfassung der Pflanzenkoordinaten über mehrere Saatreihen hinweg in einem Geoinformationssystem (GIS) würde die Auswertungsmöglichkeiten erweitern (GRIEPENTROG 1999).

(2) Weitere Trends der letzten Jahre stellen das Variieren der Aussaatmenge, beispielsweise in Abhängigkeit von der Bodenfruchtbarkeit (WOLI et al. 2014), die automatische Reihenabschaltung und die Auswertung von Telemetriedaten dar (SCHUCHMANN 2019). Diese Techniken lassen sich nur über Maschinentests auf größerer Fläche bewerten, während aktuell angewandte händische Boniturtechniken des Feldversuchswesens nur stichprobenartig die Pflanzenabstände kontrollieren (DEUTSCHE LANDWIRTSCHAFTS-GESELLSCHAFT 1991, GRIEPENTROG et al. 2005, BOZDOĞAN 2008). Das manuelle Bonitieren ist arbeitskraft- und zeitintensiv sowie durch menschliche Subjektivität beeinträchtigt (VONG et al. 2021, PATHAK et al. 2022). Studien zeigen, dass die Nutzung von Fernerkundungstechnik zur Erfassung der Pflanzenkoordinaten diese Limitationen aufheben können (SHUAI et al. 2019, PATHAK et al. 2022).

(3) Die Bewertung von EKS anhand aufgelaufener Pflanzen vermengt Einflüsse der Pflanzenkeimung und Effekte der Leistungsfähigkeit der EKS (PANNING et al. 2000, THORP et al. 2007). Die Überlebensrate der Pflanzen ist von vielfältigen Faktoren wie Nährstoffen, Wasser, Saattiefe, Herbizidrückständen, Wetterextremen, Krankheiten und Sonneneinstrahlung abhängig (PATHAK et al. 2022). Als Konsequenz werden im DLG-Prüfrahmen die Anteile an Doppelstellen und Fehlstellen im Feldversuch zwar erfasst, jedoch nicht bewertet (SCHUCHMANN 2019). Andere Testverfahren zeigen, dass die

direkte Erfassung der ausgelegten Saatkörner eine Alternative darstellen kann. Dies ist jedoch zeitaufwendig und es besteht das Risiko, die Ablageposition des Saatkorns beim Öffnen des Saatschlitzes zu verfälschen (PANNING et al. 2000).

Die aufgeführten Limitationen führten in den letzten Jahren zu einem erhöhten Interesse an der Nutzung von Techniken der Fernerkundung für landwirtschaftliche Feldversuche (PATHAK et al. 2022). Fernerkundung ist als Prozess der Detektion und Überwachung physikalischer Eigenschaften in einem Raum definiert. Im Agrarkontext wird bspw. die reflektierte oder emittierte Radiation eines Feldes oder einer Pflanze über verschiedene Plattformen aus der Ferne erfasst (NATIONAL AERONAUTICS AND SPACE ADMINISTRATION 2019). Im Feldversuchswesen werden überwiegend unbemannte Luftfahrzeuge (engl. unmanned aerial vehicle, UAV) als Plattform eingesetzt. Sie bieten eine flexible räumliche und zeitliche Auflösung, einen handhabbaren Datenerhebungsaufwand und sind günstiger als bemannte Luftfahrzeuge (PATHAK et al. 2022). Im Bereich der Pflanzensegmentierung und -kartierung konnten UAVs bereits unter anderem in den Kulturen Baumwolle, Kartoffel, Mais, Obstbäumen, Raps, Sorghum, Weizen und Zuckerrohr erfolgreich eingesetzt werden (SHUAI et al. 2019, PATHAK et al. 2022). Die Bildverarbeitung erfolgt in den Studien mit unterschiedlicher Komplexität von einfachen Bild- und Farbprozessierungen mit Filteralgorithmen bis hin zu vielschichtigen Analysen unter Einsatz maschinellen Lernens (PATHAK et al. 2022). Im Bereich der Bild- und Farbprozessierung finden entweder spezielle Vegetationsindizes über die Verrechnung einzelner Reflektionsbänder oder alternative Farbräume durch eine nicht-lineare Transformation des RGB-Farbraums Anwendung (GARCÍA-MARTÍNEZ et al. 2020). So entwickelten ZHANG et al. (2018) eine Extraktionsmethodik für die Kartierung von Maispflanzen über den Excess Green Index mit anschließender Segmentierung des Bildes über den Otsu-Schwellenwert (OTSU 1979). Über Filter für Fläche und Form repräsentativer Maispflanzen wird Hintergrundrauschen herausgefiltert und geteilte Einzelpflanzen werden verbunden. Informationen über die Höhe und den Winkel der Kamera sowie über die mittlere Höhe des Maisbestandes werden genutzt, um die Austrittskoordinaten der Maispflanzen zu approximieren. Eine Reihenerkennung durch Informationen zur Fahrtrichtung und Pflanzweite bei der Aussaat ermöglicht abschließend die Berechnung der Pflanzenabstände innerhalb einer Maisreihe (ZHANG et al. 2018). SHUAI et al. (2019) wendeten die beschriebene Methodik im Feld an und erzielten beim Zählen von 129 bis 141 Maispflanzen pro Saatreihe eine Sensitivität von $>0,95$ und eine Genauigkeit von $>0,97$ bei drei Wiederholungen pro Versuchsglied. Bei der Pflanzenkartierung wurden Abweichungen von 17 bis 26 mm mit einem R^2 von 0,9 festgestellt (SHUAI et al. 2019). GARCÍA-MARTÍNEZ et al. (2020) verwendeten stattdessen für die Maispflanzensegmentierung den a^* -Kanal des CIELab-Farbraums (COMMISSION INTERNATIONALE DE L'ECLAIRAGE 2007) mit dem Schwellenwert null und filterten anschließend mittels normierter Kreuzkorrelation. Bei der Segmentierung von Maispflanzen im Feldversuch konnte eine Sensitivität von $>0,90$ erreicht werden, allerdings erfolgte keine Erfassung der Pflanzendistanzen (GARCÍA-MARTÍNEZ et al. 2020). Alle Studien stimmen darin überein, dass die Erfassung der Pflanzenkoordinaten nur unter Einschränkungen möglich ist. So ist das Zeitfenster, in dem einzelne Maispflanzen gut unterschieden werden können, sehr kurz, da sich die wachsenden Pflanzen zunehmend überlappen (GNÄDINGER und SCHMIDHALTER 2017, GARCÍA-MARTÍNEZ et al. 2020, PATHAK et al. 2022). Zudem beeinflusst das Auftreten von Beikraut die Segmentierung, weil ein der Maispflanze ähnliches Farbspektrum reflektiert werden kann (GNÄDINGER und SCHMIDHALTER 2017, SHUAI et al. 2019, GARCÍA-MARTÍNEZ et al. 2020). Weitere Herausforderungen treten bei wechselhafter Sonneneinstrahlung und vermehrten Pflanzenresten an der Bodenoberfläche auf (GOLZARIAN et al. 2012).

Aus den beschriebenen Limitationen des DLG-Prüfrahmens für EKS im Feldeinsatz sowie der Schwierigkeiten bei der fernerkundlichen Erfassung von Pflanzenkoordinaten über die Pflanzen selbst ergibt sich die Motivation zur Durchführung dieser Forschungsarbeit. Das Ziel ist es, eine Methodik zur Überprüfung von EKS im Feldeinsatz zu entwickeln, die UAVs als Fernerkundungsplattform nutzt, um sichtbar abgelegte Maiskörner georeferenziert zu kartieren. Aus diesem Ziel ergeben sich die betrachteten Forschungsfragen:

- (1) Ist die Sichtbarkeitsrate von Maiskörnern bei maschineller Ablage mit offenem Saatschlitz vergleichbar mit der Überlebensrate von Maispflanzen?
- (2) Ist es möglich, die sichtbar gelegten Maiskörner mit einer Drohne zu erfassen, zu segmentieren und ihre Position zu bestimmen?

In Forschungsfrage (1) geht es folglich darum, die DLG-Prüfmethodik vom Erfassungsgegenstand Pflanze zum Erfassungsgegenstand Saatkorn weiterzuentwickeln (Abbildung 1). In einem zweiten Schritt wird über die Beantwortung der Forschungsfrage (2) angestrebt, eine teilautomatisierte Erfassungsmethodik zur georeferenzierten Kartierung der Saatkörner anstelle einer manuellen Abstandsmessung zu entwickeln.

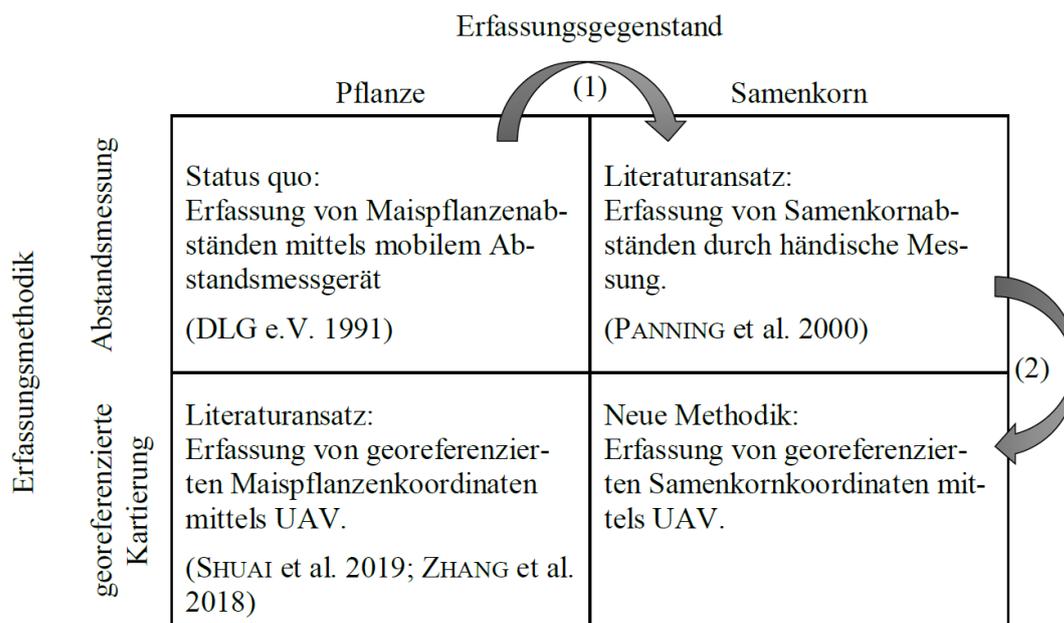


Abbildung 1: Grafische Zusammenfassung der Zielsetzung und der Forschungsfragen

Material und Methoden

Studienstandort und vorbereitende Maßnahmen

Der Feldversuch wurde im September 2023 auf einem Feld südlich von Göttingen (Deutschland) durchgeführt (51°29'42.8"N 9°56'05.8"E, WGS84). Der Bodentyp des Schlages ist durch das LANDESAMT FÜR BERGBAU, ENERGIE UND GEOLOGIE NIEDERSACHSEN (2023) als mittlere Tschernosem-Parabraunerde angesprochen und der Boden damit tonig-lehmig. Die Erntereste und der Wiederauflauf der Vorfrucht Winterraps wurden im Vorfeld des Versuchs zweimal im Abstand von 14 Tagen mit einem Grubber auf 10 cm eingearbeitet. Am Versuchstag wurde eine Fräse für eine gleichmäßige

Verteilung der Bodenfeuchte und Einarbeitung der verbliebenden organischen Masse auf 15 cm Tiefe in 90° Versatz zur späteren Versuchsanlage eingesetzt.

Vorversuche zeigten, dass die Rückverfestigung des Bodens und das Fixieren der Andruckrollen der EKS in nicht arbeitender Position geeignete Maßnahmen sind, Maiskörner in einem offenen Saatschlitz auszulegen. Für den Versuch erfolgte daher eine gezielte Rückverfestigung des Bodens in zwei Faktorstufen (hohe/niedrige Verdichtung). Die hohe Verdichtungsstufe wurde durch die Reifen eines Fendt 718 Vario (Gewicht: 9.070 kg, Bereifung vorne: 540/65R30, hinten: 650/65R42) mit einem mittleren errechneten Kontaktflächendruck von 0,90 bar erzeugt. Die niedrige Verdichtungsstufe wurde durch eine angebaute Reifenwalze mit Alliance Flotation 339 Matrix-Reifen (Gewicht: 1.425 kg, Bereifung: 400/55R17,5) mit einem mittleren errechneten Kontaktflächendruck von 0,67 bar zeitgleich realisiert. Für die Befahrung der Versuchsanlage wurde eine georeferenzierte Gerade mit Hilfe der Software NEXT Farming Live mit Stand vom 23.09.2023 (FarmFacts GmbH, Marktoberdorf, <https://www.nextfarming.com/software/next-farming-live-1/>) auf das RTK-GNSS-Lenksystem des Traktors aufgespielt. Der Spurabstand betrug 4,5 m. Jeder der 55 m langen Versuchstreifen wurde sechsmal mit einer Geschwindigkeit von 5 km/h überfahren. Mit Hilfe des Penetrologgers 06.15.SA (v6.03; Royal Eijkelkamp, NL) wurde der Verdichtungserfolg mit fünf Messpunkten pro Spur in der Mitte der Versuchsanlage dokumentiert. Abbildung 2 stellt den gemessenen Kegeldurchdringungswiderstand in den ersten 15 cm dar. Gleichzeitig wurde die Bodenfeuchte durch Entnahme und Trocknung von Bodenproben in den oberen sechs Zentimetern erfasst. Sie betrug während der Versuchsdurchführung 14,6 % mit einer Standardabweichung von 0,3 %.

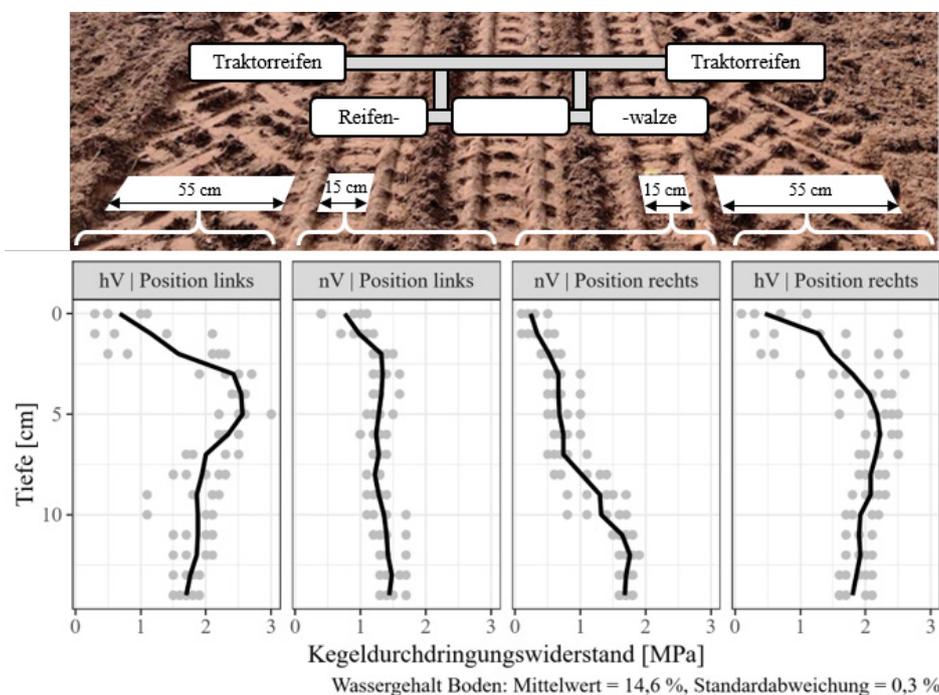


Abbildung 2: Oben: Bildaufnahme des rückverfestigten Bodens mit Skizze der Anordnung von Traktorreifen und Reifenwalze (die Maße geben die Breite der rückverfestigten Spur an, in der anschließend die Säaggregate der EKS arbeiteten); unten: der pro Reihe in der Versuchsmitte gemessene Kegeldurchdringungswiderstand in Abhängigkeit von der Tiefe (die schwarze Linie bildet den Verlauf des Mittelwertes ab, die Daten wurden bei einem mittleren Wassergehalt von 14,6 % erhoben)

Händische und maschinelle Auslage der Maiskörner

Als Zielobjekt für die Erfassung mittels UAV dient konventionelles Maissaatgut mit rötlicher, fungizider Beizung. Das Tausendkorngewicht der eingesetzten Charge betrug 283 Gramm.

Zur Entwicklung eines Segmentierungsalgorithmus für Maiskörner, der auch gegenüber Doppelstellen robust ist, wurden im Nordbereich des Feldversuchs 0,5 x 5 m große Testparzellen durch händische Auslage von Saatgut angelegt (Abbildung 3). Für eine möglichst hohe Ähnlichkeit zu den von der EKS gelegten Maiskörnern wurden die Testparzellen zuvor im gleichen Maße rückverfestigt und mit der EKS bei 8 km/h Fahrgeschwindigkeit befahren. Es folgte eine händische Auslage von Maiskörnern in den vier Faktorstufen Einzelkorn, 0 cm Abstand, 1 cm Abstand und 2 cm Abstand mit Hilfe einer selbst konstruierten Ablagehilfe (Abbildung 3). Die Auslage erfolgte in drei Blöcken, innerhalb derer pro Säagregatposition für jede Faktorstufe fünf Wiederholungen ausgelegt wurden.

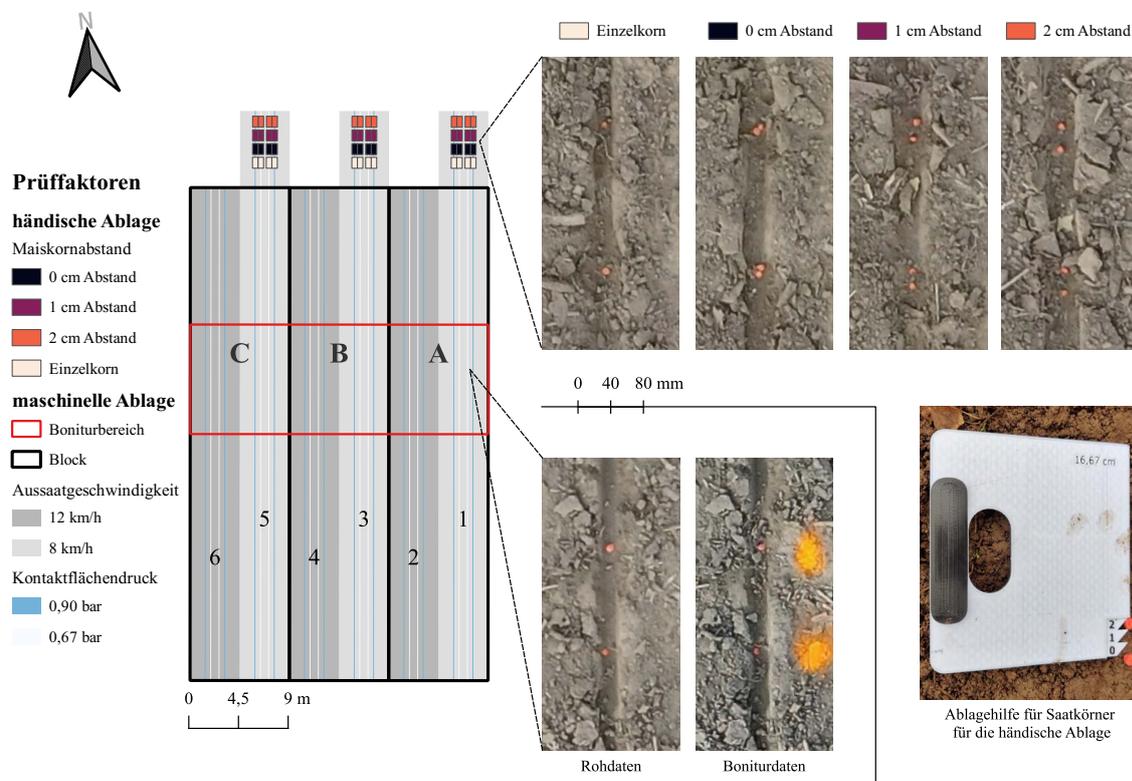


Abbildung 3: Übersicht der Versuchsanlage (Norden: Händische Ablage von Maiskörnern mit eigens konstruierter Ablagehilfe in definierten Abständen in mit der Einzelkornsämaschine geformte Saatschlitze; Süden: Maschinelle Ablage durch die Einzelkornsämaschine bei 8 und 12 km/h in den mit 0,67 und 0,90 bar rückverfestigten Boden; die Nummerierung gibt die Überfahrt der Einzelkornsämaschine bzw. das Belichtungsszenario beim Drohnenflug wieder; die Bilder zeigen Ausschnitte der Orthomosaik der ersten Drohnenbefliegung zur Rohdatenerfassung; im rot umrandeten Boniturbereich erfolgte eine zweite Drohnenbefliegung zur Dokumentation der händischen Markierung der Maiskörner mit Farbspray, zu sehen im zweiten Bild unten rechts)

Zur Prüfung der Realisierbarkeit einer maschinellen Maiskornablage mit offenem Saatschlitz und zur Erprobung des entwickelten Segmentierungsalgorithmus wurden Maiskörner mittels EKS in die zuvor rückverfestigten Streifen abgelegt. Verwendet wurde ein Fendt 314 Vario und die EKS Precea 4500-2CC Super der Firma Amazonen-Werke H. Dreyer SE & Co. KG. Für die Befahrung der Versuchstreifen wurde ein RTK-GNSS-Lenkssystem und die Lenkspur der vorherigen Rückverfestigungsmaß-

nahme genutzt. Die Überfahrten erfolgten in den zwei Faktorstufen 8 und 12 km/h von Süd nach Nord. Entsprechend der Betriebsanleitung wurden die Vereinzlungsscheiben mit 5 mm Bohrung eingesetzt, das Gebläse auf 45 mbar und der Saatgutschieber auf die Position F eingestellt. Die Positionen der genutzten mittleren vier Säaggregate der sechsreihigen EKS wurden an die Spurweite der verdichteten Reihen angepasst. Das Fixieren der Andruckrollen in nicht arbeitender Position verhinderte den Verschluss des Saatschlitzes mit Erde. Nach zwei Einsätzen auf neben der Versuchsanlage angelegten Teststreifen wurde die Saattiefeneinstellung D für die Aggregate in der hohen und die Saattiefeneinstellung B für die Aggregate in der niedrigen Verdichtungsstufe ausgewählt. Grundlage für die Entscheidung war eine qualitative Abwägung zwischen einem zu flachen Saatschlitz mit erhöhtem Risiko für verrollte Maiskörner und einem zu tiefen Saatschlitz mit erhöhtem Risiko für verschüttete Maiskörner. Die Saatschlitztiefe wies im Versuch eine Tiefe von circa 1 cm und eine Breite von circa 2 cm auf. Der Soll-Abstand für die Kornvereinzlung wurde auf praxisübliche 16,67 cm festgelegt.

Erfassung der Roh- und Boniturdaten mittels Drohne

Für die Datenerfassung wurde der Quadrocopter DJI Matrice 300 RTK und ein Zenmuse P1 RGB-Sensor mit 50 mm Objektiv eingesetzt (DJI Technology Co., China). Die Flugplanung erfolgte in DJI Pilot 2 auf Basis der georeferenzierten Versuchsplanung. Für die Sicherstellung der Erkennung der Maiskörner wurde die Flughöhe auf 12 m über dem Startpunkt für eine Bodenauflösung (engl. ground sample distance, GSD) von 1 mm/px eingestellt. Vorversuche ergaben eine zu erwartende Anzahl von 25 vollständig im Maiskorn liegenden Pixeln, was über dem in der Literatur zu findenden Minimum von vier Pixeln pro zu erkennendem Objekt liegt (HENGL 2006). Die Versuchsfläche wurde mit einer seitlichen Überlappung der Bilder von 70 % und einer frontalen Überlappung von 80 % kartiert.

Der erste Drohnenflug zur Erfassung der Rohdaten erfolgte unmittelbar nach dem Legen der Maiskörner am 19.09.2023 zwischen 15:48 und 16:14 Uhr Ortszeit bei wechselnd bewölktem Wetter. Die Befliegung war parallel zu den Versuchspartellen entlang der Nord-Süd-Achse der Versuchsanlage ausgerichtet. Dies ermöglicht die spätere Analyse möglicher Witterungseinflüsse auf das Segmentierungsergebnis durch eine Aufschlüsselung der Versuchspartellen nach Belichtungsszenarien. Nach der farblichen Markierung aller ausgelegten Maiskörner erfolgte der zweite Drohnenflug zwischen 16:48 und 17:04 Uhr Ortszeit bei wechselnd bewölktem Wetter für die digitale Dokumentation der Handbonitur im zehn Meter langen Auswertungsbereich (Abbildung 3). Die Flugausrichtung dieser zweiten Flugroute erfolgte orthogonal zur ersten.

Die Prozessierung der Einzelbilder folgte dem typischen Vorgehen für das Zusammensetzen eines Orthomosaiks in Agisoft Metashape (v1.7.2; Agisoft LLC, <https://www.agisoft.com/>). Zunächst wurden die Fotos mit Genauigkeit = hoch ausgerichtet. Als Referenz für die Ausrichtung des ersten Orthomosaiks wurde die interne Echtzeitkinematik (engl. real time kinematic, RTK) der Drohne verwendet. Das zweite Orthomosaik wurde anhand der erfassten Koordinaten der ausgelegten Passpunkte auf das erste Orthomosaik georeferenziert. Dies ermöglicht die spätere Zuordnung von Rohdaten und Handbonitur. Die Erstellung der dichten Punktwolken erfolgte mit Qualität = hoch und Filtermodus = sanft. Die aus den dichten Punktwolken generierten digitalen Höhenmodelle wiesen jeweils eine Bodenauflösung von 2 mm/px auf. Abschließend erfolgte der Export der beiden erstellten Orthomosaik für die weitere Prozessierung als GeoTiff mit einer Bodenauflösung von 1 mm/px.

Deskriptive Analyse der Sichtbarkeitsrate maschinell abgelegter Maiskörner

Die Beantwortung der Forschungsfrage (1) zur Höhe der Sichtbarkeitsrate der Maiskörner bei offenem Saatschlitz im Vergleich zur Überlebensrate von Maispflanzen erfolgt in dieser Arbeit auf deskriptive Weise. Als Prüfmerkmal dient die Sichtbarkeitsrate der Maiskörner pro Reihe in einer zehn Meter langen Boniturzone in der Mitte der 55 m langen Versuchsstreifen (Abbildung 3). In dieser waren zwischen 48 und 59 Maiskörner pro Reihe durch die EKS ausgelegt worden, was durchschnittlichen Distanzen zwischen den Maiskörnern von 20,83 bis 16,95 cm entspricht. Die Sichtbarkeitsrate der Maiskörner ergibt sich aus der Gesamtzahl aller gelegten Maiskörner abzüglich der Maiskörner, die aus der Reihe verrollt und der Maiskörner, die durch Zusammenfallen des Saatschlitzes von Erde verschüttet wurden im Verhältnis zur Gesamtzahl aller gelegten Maiskörner (Gleichung 1):

$$\text{Sichtbarkeitsrate} = \frac{\text{alle Maiskörner} - \text{verrollt} - \text{verschüttet}}{\text{alle Maiskörner}} \quad (\text{Gl. 1})$$

Die Gesamtzahl aller Maiskörner sowie die Anzahl der verrollten Maiskörner pro Versuchsstreifen konnten manuell in QGIS-3.28.4 anhand der Farbmarkierungen im Orthomosaik des zweiten Drohnenfluges gezählt werden (QGIS Association, <https://www.qgis.org/>). Als Referenzzählung zur Ermittlung der verschütteten Maiskörner wurde das Orthomosaik der Rohdatenerfassung in QGIS in der Skalierung 1:2 visualisiert und die Mitte der sichtbaren Maiskörner von Hand in einem Punktlayer als Vektordatenformat dokumentiert und anschließend ausgezählt. Die deskriptive Analyse der Anzahl an verrollten, verschütteten und sichtbaren Körner pro Versuchsglied erfolgte in R-4.3.2 (R Core Team, <https://www.r-project.org/>). Als Zielwert für die Sichtbarkeitsrate der Maiskörner wird 90 % festgelegt, was der gesetzlich festgelegten minimalen Keimfähigkeit von am Markt gehandeltem Maissaatgut entspricht (Anlage 3, SaatV). In Feldversuchen wurden Feldaufgänge zwischen 86 und 96 % beobachtet (NIELSEN 1993, VOIT et al. 2010, BOUTEN et al. 2019).

Entwicklung eines Segmentierungsalgorithmus für Maiskörner

Vorverarbeitung der Bildfarbe in den Farbraum CIELab

Die von der Drohne aufgenommenen Bilder liegen im RGB-Farbraum vor. Für eine robuste Segmentierungsleistung im Außenbereich ist die Unabhängigkeit von wechselnden Belichtungsintensitäten sowie ein möglichst hoher Kontrast zwischen Hintergrund und Zielobjekt notwendig (GOLZARIAN et al. 2012, GNÄDINGER and SCHMIDHALTER 2017, MARDANISAMANI and ERAMIAN 2022). Im 8-Bit RGB-Modell besteht jedes Pixel aus drei Werten zwischen 0 und 255 für die Farbkomponenten rot (R), grün (G) und blau (B). Aufgrund seiner hohen Belichtungsempfindlichkeit ist das RGB-Modell nicht für robuste Segmentierungsergebnisse im Außenbereich geeignet (GOLZARIAN et al. 2012, RIEHLE et al. 2020).

Ein häufig erfolgreich für die robuste Segmentierung von Kulturpflanzen eingesetzter Farbraum ist CIELab (GARCÍA-MARTÍNEZ et al. 2020, RIEHLE et al. 2020, PATHAK et al. 2022). Dieser wurde von der Commission Internationale de l'éclairage (CIE) für industrielle Zwecke entwickelt, um Farbe möglichst vergleichbar mit der menschlichen Wahrnehmung darzustellen (HERNÁNDEZ-HERNÁNDEZ et al. 2016). Da der Farbraum die Leuchtkraft in einem von den Farbwerten unabhängigen Kanal isoliert, ermöglicht er eine von Belichtungsfluktuationen unabhängigere Segmentierung (RIEHLE et al. 2020). Durch die nicht lineare Transformation des RGB-Farbraums werden die zwei chromatischen Kanäle

a^* und b^* ausgegeben. Die a^* -Skala steht für den Farbverlauf von rot zu grün, die b^* -Skala für den Farbverlauf von gelb zu blau (HERNÁNDEZ-HERNÁNDEZ et al. 2016, GARCÍA-MARTÍNEZ et al. 2020).

Für die Konvertierung des RGB-Farbraums in den CIELab-Farbraum erfolgt zunächst durch Gleichung 2 eine Transformation in den CIEXYZ-Farbraum (COMMISSION INTERNATIONALE DE L'ÉCLAIRAGE 2007):

$$\begin{bmatrix} X \\ Y \\ Z \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 0,490 & 0,310 & 0,200 \\ 0,177 & 0,813 & 0,011 \\ 0,000 & 0,010 & 0,990 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} R \\ G \\ B \end{bmatrix} \quad (\text{Gl. 2})$$

Die Leuchtkraft L^* wird aus dem CIEXYZ Farbraum durch die Gleichung 3 transformiert:

$$L^* = \begin{cases} 116 \left(\frac{Y}{Y_n} \right)^{\frac{1}{3}} - 16, & \text{wenn } \frac{Y}{Y_n} > 0,008856 \\ 903,3 \left(\frac{Y}{Y_n} \right)^{\frac{1}{3}}, & \text{wenn } \frac{Y}{Y_n} < 0,008856 \end{cases} \quad (\text{Gl. 3})$$

die a^* -Skala und die b^* -Skala ergeben sich aus den Gleichungen 4 und 5:

$$a^* = 500 \left[f \left(\frac{X}{X_n} \right) - f \left(\frac{Y}{Y_n} \right) \right] \quad (\text{Gl. 4})$$

$$b^* = 200 \left[f \left(\frac{Y}{Y_n} \right) - f \left(\frac{Z}{Z_n} \right) \right] \quad (\text{Gl. 5})$$

wobei gilt:

$$f(t) = \begin{cases} \frac{1}{t^3}, & \text{wenn } t > 0,008856 \\ 7,787t + \frac{16}{116}, & \text{wenn } t < 0,008856 \end{cases} \quad (\text{Gl. 6})$$

X_n , Y_n und Z_n ergeben sich aus der verwendeten Weißlicht-Farbe. In dieser Arbeit wurde D65, stellvertretend für indirektes Tageslicht, verwendet (COMMISSION INTERNATIONALE DE L'ÉCLAIRAGE 2007). Die Anwendung der Transformation auf das Orthomosaik der Rohdatenerfassung erfolgte mit der Funktion `convertColor()` des R-Packages `grDevices` (v4.4.1, R Core Team). Voruntersuchungen zeigten, dass die a^* -Skala für die Detektion von Maiskörnern besonders gut geeignet ist. Sie ist weitestgehend unabhängig von der Leuchtkraft, grüne Pflanzenreste werden durch den Ausschluss negativer Werte automatisch entfernt und die konventionelle Beize der genutzten Maiskörner grenzt sich im roten Farbbereich vom Boden ab. Abbildung 4 verdeutlicht dies durch eine Gegenüberstellung der Einzelbänder der Farbräume RGB und CIELab für zwei stichprobenartig ausgewählte Ausschnitte aus den maschinell ausgelegten Testparzellen. Dabei wird ein Ausschnitt bei direkter Sonneneinstrahlung explizit einem Ausschnitt bei bewölkter Witterung gegenübergestellt.

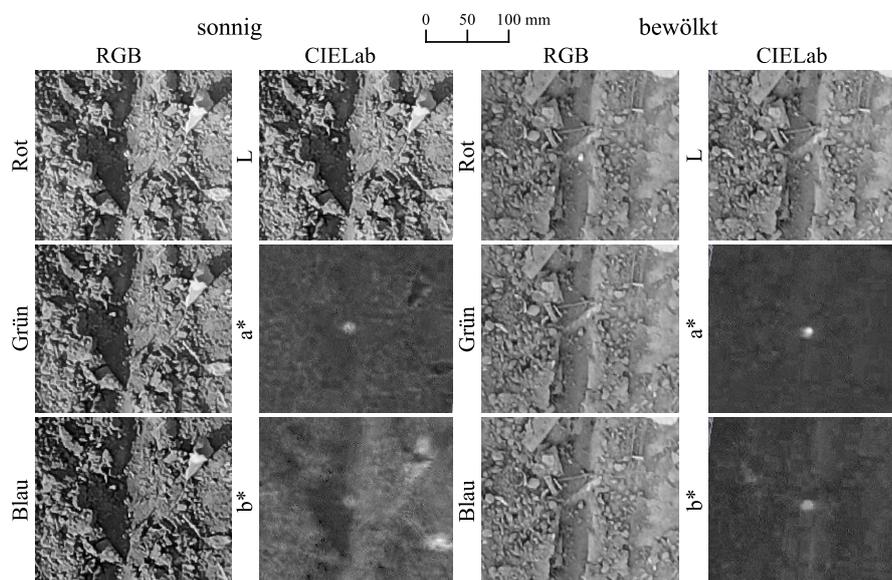


Abbildung 4: Vergleich der Farbräume RGB und CIE Lab für zwei zufällig ausgewählte Ausschnitte in den maschinell ausgelegten Testparzellen, differenziert nach Aufnahme bei sonniger und bewölkter Witterung (eigene Daten in Anlehnung an MIDTIBY and PASTUCHA (2022))

Bildprozessierung

Das Ziel der Bildprozessierung ist eine zuverlässige Klassifizierung von Maiskörnern und Boden durch

- (1) die Minimierung unnötiger Datenmengen und Störfaktoren,
- (2) die Anwendung eines teilautomatischen Schwellenwertverfahrens für eine grobe Vorklassifizierung mit hoher Sensitivität, ohne die Notwendigkeit von Trainingsdaten,
- (3) die Anwendung eines einfachen Nachbearbeitungsverfahrens zur Optimierung der Klassifizierungsleistung.

(1) Minimierung unnötiger Datenmengen und Störfaktoren:

Die Grundlage für die Minimierung der in die Analyse eingehenden Datenmengen ist die GIS-basierte Versuchsplanung und die Nutzung eines RTK-GNSS-Lenksystems bei der Versuchsanlage. Durch die Information über die Position der Säagregate in Relation zur Traktormitte konnten die ausgesäten Versuchsstreifen pro Säagregat auf eine Breite von acht Zentimetern zugeschnitten werden. Hierfür wurden die R-Packages *sf* (v1.0.17; Pebesma, <https://doi.org/10.32614/CRAN.package.sf>) und *terra* (v1.7.78; Hijmans, <https://doi.org/10.32614/CRAN.package.terra>) verwendet.

(2) Teilautomatisches Schwellenwertverfahren:

Nach Schritt 1 erfolgte, wie im vorherigen Kapitel beschrieben, die Transformation des RGB-Farbraums in den CIE Lab-Farbraum. Negative Pixelwerte im genutzten a^* -Kanal repräsentieren grüne Biomasse und wurden durch den Ausschluss negativer Werte aus der Analyse entfernt. Nach einer Umwandlung der positiven Pixelwerte in das Integer-Datenformat durch Multiplikation mit 1.000.000 und Rundung auf ganze Zahlen wurde ein Schwellenwert für zwei Klassen mit dem Otsu-Algorithmus berechnet (OTSU 1979). Dazu wurde das R-Package *autothresholdr* genutzt (v1.4.2; Landini et al., <https://doi.org/10.32614/CRAN.package.autothresholdr>). Durch die Division mit 1.000.000 wurden sowohl die a^* -Kanalwerte wie auch der Otsu-Schwellenwert zurück in das Originalformat konvertiert. Pixelwerte über dem Schwellenwert entsprechen den vorhergesagten Pixeln für Maiskörner, Pixel-

werte unter dem Schwellenwert werden als Boden klassifiziert. Aufgrund von sich potenziell ändernden Belichtungsbedingungen während des Drohnenfluges wurde ein separater Otsu-Schwellenwert pro Überfahrt der EKS errechnet und angewendet.

(3) Optimierung der Klassifikationsleistung:

Vergleichbare Arbeiten zeigen, dass es aufgrund des geringen Anteils an Mais Kornpixeln an der Gesamtpixelanzahl, einer krümeligen Bodenoberfläche und schwankenden Belichtungsqualitäten zu einer schwankenden Anzahl an falsch positiv (FP) und falsch negativ (FN) klassifizierten Pixeln kommen kann (ZHANG et al. 2018, MIDTIBY and PASTUCHA 2022). Für eine Verbesserung der Klassifizierungsleistung wurde daher ein Filter als Nachbearbeitungsverfahren auf das binäre Orthomosaik angewendet. Grundlage bildete ein Schwellenwert für die minimal notwendige Anzahl zusammenhängender Pixel in vier Richtungen für die Klasse Mais Korn. Alle als Mais Korn klassifizierten Gruppen, mit einer geringeren Anzahl als der Schwellenwert, wurden dem Boden zugeordnet. Der Schwellenwert kann grundsätzlich manuell durch iterierendes Probieren und qualitatives Bewerten des Ergebnisses approximiert werden. Als Orientierung dient dann die Anzahl an Pixeln pro Mais Korn, die sich aus der verwendeten GSD und der Fläche eines repräsentativen Mais Korn ableiten lässt. In dieser Arbeit erfolgte die Schwellenwertschätzung über die Minimierung falsch positiv (FP) und falsch negativ (FN) klassifizierter Mais Körner in den von Hand ausgelegten Testparzellen zur Segmentierungserprobung. Abschließend wurde durch die Berechnung des Zentroids einer jeden Pixelgruppe der Klasse Mais Korn eine Konvertierung aus dem Rasterformat in das Vektorformat durchgeführt. Diese Datei wurde für die Berechnung der Anzahl segmentierter Mais Körner sowie der Analyse ihrer kartierten Position verwendet.

Auswertung der Segmentierungsleistung des Algorithmus

Die Überprüfung der Leistungsfähigkeit des Algorithmus in Bezug auf die Erkennung von Mais Körnern erfolgte durch den Vergleich mit der digitalen Handzählung der sichtbaren Mais Körner. Die ausgewerteten Mais Körner wurden durch sechs Überfahrten mit je vier Reihen ausgelegt. Die Ausrichtung der Hauptflugbahn des Drohnenfluges erfolgte parallel. Dies diente der Analyse der Auswirkungen von Belichtungsschwankungen durch wechselhafte Witterung. Jede Überfahrt wurde daher in der Auswertung als ein Belichtungsszenario betrachtet.

Für die Auswertung wurde die Genauigkeit (engl. precision; der Anteil der korrekt erkannten Mais Körner an allen erkannten Mais Körnern) und die Sensitivität (engl. recall; der Anteil der korrekt erkannten Mais Körner an allen Mais Körnern) der Segmentierung über die Gleichungen 7 und 8

$$\text{Genauigkeit} = \frac{TP}{TP + FP} \quad (\text{Gl. 7})$$

$$\text{Sensitivität} = \frac{TP}{TP + FN} \quad (\text{Gl. 8})$$

mit TP, FP und FN für die Anzahl richtig positiv, falsch positiv und falsch negativ klassifizierter Mais Körner, berechnet. Für eine gemeinsame Betrachtung der beiden Evaluierungsparameter wurde der F1-Score als der gewichtete Mittelwert aus Genauigkeit und Sensitivität mit der Gleichung 9 verwendet (CSURKA et al. 2013):

$$F1 - Score = \frac{2 * Genauigkeit * Sensitivität}{Genauigkeit + Sensitivität} \quad (Gl. 9)$$

Auswertung der Kartierungsleistung des Algorithmus

Die Überprüfung der Leistungsfähigkeit des Algorithmus in Bezug auf die Kartierung von Maiskörnern erfolgte durch den Vergleich mit der digitalen Handkartierung der Maiskornmitte durch die visuelle Interpretation des Rohdaten-Orthomosaiks.

Für die Auswertung wurde die Wurzel der mittleren Fehlerquadratsumme (engl. root mean square error (*RMSE*)) der Koordinaten aus dem Koordinatenbezugssystem UTM32 in der Einheit Millimeter über die Gleichungen 10, 11 und 12

$$RMSE_x[mm] = \sqrt{\frac{1}{n} \sum_{i=1}^n (x_{i(pred)} - x_{i(obs)})^2} * 1000 \quad (Gl. 10)$$

$$RMSE_y[mm] = \sqrt{\frac{1}{n} \sum_{i=1}^n (y_{i(pred)} - y_{i(obs)})^2} * 1000 \quad (Gl. 11)$$

$$RMSE_{xy}[mm] = \sqrt{RMSE_x^2 + RMSE_y^2} \quad (Gl. 12)$$

mit

$x_{i(pred)}$ und $y_{i(pred)}$ als Ost- bzw. Nordkoordinate des i^{ten} vorhergesagten Maiskorns,
 $x_{i(obs)}$ und $y_{i(obs)}$ als Ost- bzw. Nordkoordinate des i^{ten} digital bonitierten Maiskorns,
 n als Anzahl der zu überprüfenden Maiskörner,
 i als ganzer Zahl in der Sequenz von 1 bis n ,

berechnet (ASPRS MAP ACCURACY STANDARDS WORKING GROUP 2015). Die Auswertungsmethodik gilt als valide unter der Annahme, dass die Verteilung der Einzelresiduen einer Normalverteilung ähnelt und der mittlere Fehlerwert im Vergleich zur Zielgenauigkeit relativ gering ist (ASPRS MAP ACCURACY STANDARDS WORKING GROUP 2015). Als Zielwert für die horizontale Genauigkeit wurde in dieser Arbeit die zweifache GSD, also zwei Millimeter, angestrebt.

Ergebnisse und Diskussion

Zunächst wird der Einfluss der Prüffaktoren Aussaatgeschwindigkeit, Rückverfestigung und Block auf die Sichtbarkeitsrate von Maiskörnern bei maschineller Ablage dargelegt. Anschließend werden die Ergebnisse der teilautomatischen Segmentierung und Kartierung von Maiskörnern analysiert und diskutiert.

Sichtbarkeitsrate von Maiskörnern bei maschineller Ablage

In 13 von 24 Versuchsreihen wurde kein Verrollen der Maiskörner aus dem Saatschlitz beobachtet. In acht Fällen verrollte ein Maiskorn und in drei Fällen verrollten zwei Maiskörner (Abbildung 5). Damit

liegt der Anteil nicht verrollter Körner zwischen 96 und 100 %. Es lässt sich visuell kein Muster in Bezug auf ein Einwirken der Prüffaktoren Geschwindigkeit, Rückverfestigung oder Block erkennen.

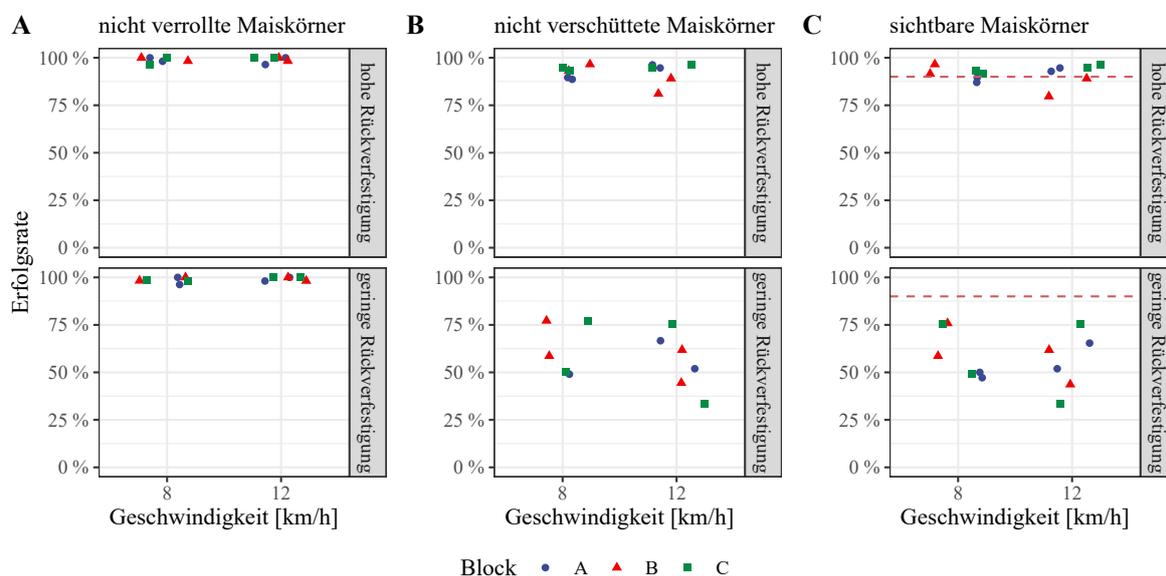


Abbildung 5: Anteil nicht verrollter (A), nicht verschütteter (B) und demnach sichtbarer Maiskörner (C) in Abhängigkeit von den Prüffaktoren Geschwindigkeit, Verdichtungsstufe und Block (eine zufällige horizontale Verschiebung der Punkte wurde hinzugefügt, um Punkte mit gleichem Wert differenzieren zu können; die gestrichelte Linie markiert die Zielsetzung einer Sichtbarkeitsrate von $\geq 90\%$)

In Bezug auf die Verschüttung der Maiskörner mit Erde zeigt sich eine Differenzierung. Bei hoher Rückverfestigung werden Sichtbarkeitsraten zwischen 81 und 97 % beobachtet, bei geringer Rückverfestigung fallen die Sichtbarkeitsraten mit 33 bis 77 % geringer aus. Im Prüffaktor Geschwindigkeit zeigt sich bei hoher Rückverfestigung kein erkennbares Muster. Bei geringer Rückverfestigung lässt sich eine geringere Sichtbarkeitsrate mit zunehmender Streuung bei der Erhöhung der Geschwindigkeit von 8 auf 12 km/h beobachten.

Die Sichtbarkeitsrate von Maiskörnern zeigt als kombiniertes Maß verrollter Maiskörner und der Anzahl verschütteter Maiskörner keine abweichenden Beobachtungen. Die als Zielsetzung definierte Sichtbarkeitsrate von 90 % wird bei geringer Rückverfestigung in keinem Fall erreicht. Bei hoher Rückverfestigung wird sie in vier von zwölf Reihen nicht erreicht. Die restlichen acht Sichtbarkeitsraten befinden sich mit einer Spanne von 91 bis 97 % innerhalb des angestrebten Zielbereichs.

Aus der deskriptiven Analyse der Rate der sichtbaren Ablage von Maiskörnern durch eine EKS in diesem Feldversuch lassen sich drei Schlussfolgerungen ziehen:

(1) Nur ein geringer Anteil der Maiskörner verspringt aus dem acht Zentimeter breiten Bereich des digital erfassten Saatschlitzes. Folglich hat Verspringen im Vergleich zur Verschüttung nur einen geringen Einfluss auf die finale Sichtbarkeitsrate. Ein Verrollen der Maiskörner innerhalb des Saatschlitzes nach Verlassen des Säschares konnte nicht bewertet werden. Wie von PANNING et al. (2000) beschrieben, umfassen die Funktionen von EKS jedoch auch das Bedecken des Saatkorns mit Erde. Das Verrollen der Maiskörner im Saatschlitz ist in diesem Prozess durch die Bodenbedingungen und die Fahrgeschwindigkeit beeinflusst (PANNING et al. 2000). Da die Bodenbedingungen durch die durchgeführte Rückverfestigung in diesem Versuch verändert wurden, sollte dieser Umstand in

Folgearbeiten genauer untersucht werden, um einen potenziellen Einfluss des Verrollens in der Reihe auf die finale Position der Maiskörner besser bewerten zu können.

(2) In Bezug auf die Geschwindigkeit der EKS wurde im Voraus vermutet, dass die Rate sichtbar abgelegter Körner mit steigender Geschwindigkeit sinkt. In der deskriptiven Analyse konnte dies jedoch nur bei geringer Rückverfestigung beobachtet werden. Eine fortführende Arbeit mit größerer Datengrundlage zu erhöhten Fahrgeschwindigkeiten ist notwendig, um die Unabhängigkeit der vorgestellten Methodik von der Fahrgeschwindigkeit der EKS weiter abzusichern.

(3) Die Zielsetzung einer Rate sichtbarer Maiskörner von $\geq 90\%$, abgeleitet aus der zur Zulassung notwendigen Keimfähigkeit und in Feldversuchen beobachteten Auflaufraten, konnte unter der Voraussetzung der hohen Rückverfestigung in acht von zwölf Messreihen erreicht werden. Das Unterschreiten in den vier weiteren Stichproben fiel gering aus. Damit ist die sichtbare Ablage von Maiskörnern im offenen Saatschlitz mit digitaler Erfassung per Drohne, bei manueller Zählung in einem Geoinformationssystem, als ebenso zuverlässig zu beurteilen wie das aktuell angewandte Zählen von aufgelaufenen Maispflanzen. Für die Etablierung der Methodik als mögliche Grundlage für einen Prüfraumen von EKS muss weiterhin das Ziel verfolgt werden, die Bodenbedingungen und die Rückverfestigungsmaßnahmen zu optimieren und dadurch die Rate sichtbarer Maiskörner weiter zu erhöhen.

Die Leistung der automatischen Maiskornsegmentierung

Der entwickelte Segmentierungsalgorithmus für Maiskörner wurde sowohl auf die händisch ausgelegten Testparzellen mit Doppelstellen als auch auf den maschinell ausgelegten Streifenversuch angewendet. Ersteres diente dem Erkenntnisgewinn, welcher Schwellenwert für den Pixelfilter zu einem hinreichenden Aussieben von falsch positiv (FP) erkannten Maiskörnern führt, ohne dass tatsächlich vorhandene Maiskörner fälschlicherweise negativ (FN) klassifiziert werden. Zudem kann die Robustheit bei der Differenzierung von Doppelstellen überprüft werden.

In den Testparzellen mit einzelnen Maiskörnern steigt wie erwartet mit der Erhöhung des Schwellenwertes die Anzahl falsch negativ klassifizierter Maiskörner an, während die Anzahl falsch positiver sinkt (Abbildung 6). Bei Doppelstellen verbessert sich die Segmentierungsleistung mit zunehmendem Abstand der Maiskörner zueinander. Direkt aneinander liegende Maiskörner mit 0 cm Abstand werden über alle Schwellenwerte hinweg als einzelne Maiskörner klassifiziert, was die stagnierende Anzahl falsch negativer Fehler von 60 zeigt. Ab einem Abstand von zwei Zentimetern ist die Anzahl falsch negativ klassifizierter Maiskörner mit der bei einzelnen Maiskörnern vergleichbar. Bei niedrigen Schwellenwerten zeigt sich in allen Varianten eine erhöhte Anzahl falsch positiver Fehler. Das Sinken der falsch positiven Fehler auf null, bei einer Erhöhung des Filterschwellenwertes, bestätigt die Fähigkeit des Filters Artefakte aus dem binären Raster herauszufiltern. Bei einzelnen Maiskörnern und ab zwei Zentimetern Abstand wird die minimale Anzahl an Fehlerwerten mit Filterschwellenwerten zwischen 80 und 100, mit einem Minimum bei 90 erreicht. Folglich wurde für die Anwendung des Algorithmus auf die maschinell ausgelegten Streifen ein Schwellenwert für den Filteralgorithmus von 90 eingesetzt.

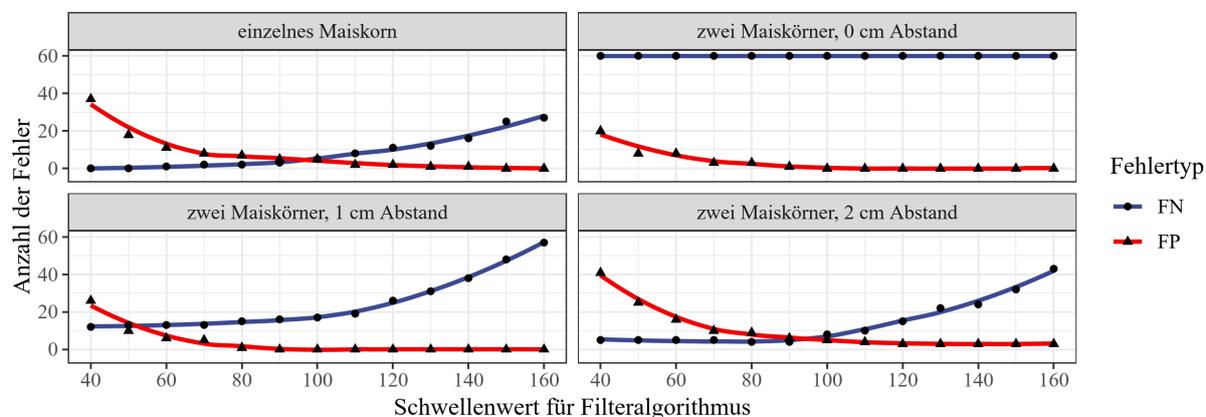


Abbildung 6: Die Validierungsergebnisse der Maiskornsegmentierung in den händisch angelegten Testparzellen in Abhängigkeit vom Schwellenwert für den Filteralgorithmus, differenziert nach den vier Faktorstufen zur Überprüfung der Anwendbarkeit auf Doppelstellen

Tabelle 1 zeigt die Validierungsergebnisse des Segmentierungsalgorithmus bei der Anwendung auf die maschinell ausgelegten Versuchsstreifen mit hoher Rückverfestigung. Nur in diesen ist, wie im vorherigen Kapitel beschrieben, eine akzeptable Sichtbarkeitsrate von $\geq 90\%$ erreicht worden. Als Referenz für die Validierung dient die digitale händische Zählung der sichtbar ausgelegten Maiskörner. Die Validierungsergebnisse differenzieren deutlich in Abhängigkeit von der vorherrschenden Belichtung während der Drohnenaufnahme. Am schlechtesten fallen die Ergebnisse in den Belichtungsszenarien 1 und 4 aus. Die visuelle Betrachtung des Orthomosaiks zeigt, dass während der Befliegung zu diesen Zeitpunkten eine direkte Sonneneinstrahlung vorhanden war. Dies spiegelt sich in den höchsten Mittelwerten und Standardabweichungen für den a^* -Kanal wider. Die Otsu-Schwellenwerte sind mit 3,60 und 3,92 ebenfalls die höchsten. Die Anzahl der falsch positiven Maiskörner ist deutlich erhöht, was zu einer sehr niedrigen Genauigkeit führt. Da in Belichtungsszenario 1 zudem 61% der Maiskörner nicht erkannt wurden, ist die Sensitivität mit 0,39 über alle Szenarien hinweg am niedrigsten, was zu einem sehr niedrigen F1-Score von 0,11 führt. In den anderen Szenarien ist die Sensitivität mit Werten $\geq 0,96$ sehr hoch, was auf die geringe Anzahl nicht erkannter Maiskörner zurückzuführen ist. Die Belichtungsszenarien 3 und 5 weisen mit 0,67 und 0,62 mittlere Genauigkeiten auf, da es eine erhöhte Anzahl an fälschlicherweise als Maiskorn klassifizierten Pixeln gibt. Dies führt zu mittleren F1-Scores von 0,68 bzw. 0,62. Die Szenarien 2 und 6, mit gleichmäßiger Bewölkung während der Datenaufnahme, weisen sehr hohe F1-Scores von $\geq 0,95$ auf.

Tabelle 1: Validierungsergebnisse für die Segmentierung von Maiskörnern bei hoher Rückverfestigung pro Überfahrt bzw. Belichtungsszenario, geordnet nach sinkendem F1-Score

Szenario	a*-Kanal		Otsu	TP ³⁾	FP ³⁾	FN ³⁾	Sensitivität	Genauigkeit	F1-Score
	M ¹⁾	SD ²⁾							
6	1,57	1,90	2,68	111	3	0	1,00	0,97	0,99
2	1,67	2,27	3,48	107	10	1	0,99	0,91	0,95
3	1,78	2,15	3,25	110	54	2	0,98	0,67	0,80
5	1,69	2,20	3,30	105	64	4	0,96	0,62	0,76
4	2,25	2,43	3,92	83	212	15	0,85	0,28	0,42
1	2,23	2,31	3,60	35	494	55	0,39	0,07	0,11

¹⁾ M = arithmetisches Mittel ²⁾ SD = Standardabweichung ³⁾ TP = richtig positiv, FP = falsch positiv, FN = falsch negativ

Zusammenfassend lässt sich sagen, dass die entwickelte Methodik in der Lage ist, Maiskörner teilautomatisiert zu segmentieren, was eine Erleichterung der sonst von Hand durchzuführenden Bonitur darstellt (VONG et al. 2021, PATHAK et al. 2022). Die häufig in der teilautomatisierten Segmentierung von Pflanzen auftretenden Probleme durch Pflanzenreste oder Beikraut sowie dem Überlappen von Pflanzenbestandteilen treten in der vorgestellten Methodik nicht auf (GOLZARIAN et al. 2012, GNÄDINGER and SCHMIDHALTER 2017, GARCÍA-MARTÍNEZ et al. 2020, PATHAK et al. 2022). Dies ist einerseits dem Umstand zu verdanken, dass die Erfassung der Maiskörner direkt im Anschluss an die Anlage des Versuchs erfolgen kann. Beikräuter haben somit keine Zeit zu keimen. Andererseits werden durch das Nutzen der positiven Werte des a*-Kanals des CIELab-Farbraums automatisch alle grünen Pflanzenbestandteile aus der Auswertung ausgeschlossen.

Die Belichtungsszenarien 1 und 4 mit F1-Scores von $\leq 0,42$ müssen hingegen als ungenügendes Ergebnis bewertet werden. Die schlechte Leistung, trotz der Anwendung eines pro Szenario errechneten Otsu-Schwellenwertes, lässt sich mit der Sonneneinstrahlung während der Datenaufnahme in Verbindung bringen. Dies deutet darauf hin, dass trotz der Extrahierung der Leuchtkraft in den L-Kanal des CIELab-Farbraums eine Restlichtkomponente den a*-Kanal beeinflusst. Das dadurch verursachte Rauschen verringert die Differenz zwischen den Pixelwerten für die Klasse Maiskörner und der Klasse Boden. Dieses Klassifizierungsszenario von zwei Gruppen mit geringer Wertdifferenz wurde von WANG et al. (2020) als einer der Schwachpunkte des Otsu-Algorithmus beschrieben. Hinzu kommt eine in allen Belichtungsszenarien beobachtete unimodale Verteilung des a*-Kanals, welche auf dem geringen Anteil der Maiskorn-Pixel im Vergleich zu den Boden-Pixeln beruht. Dies stellt ebenfalls eine Herausforderung für die Schwellenwertbildung mit dem Otsu-Algorithmus dar, der für bimodale Verteilungen konzipiert wurde (OTSU 1979). Die von WANG et al. (2020) beschriebenen Weiterentwicklungen des Otsu-Algorithmus könnten zu einer höheren Genauigkeit der Methodik bei wechselnden Witterungsverhältnissen führen und sollten als Alternativen untersucht werden. Auch grundsätzlich andere Schwellenwertverfahren könnten über das genutzte R-Package `autothresholdr` abgerufen und erprobt werden (LANDINI et al. 2017). Zukünftige Arbeiten sollten zudem weiterhin darauf setzen, den Anteil von Bodenpixeln, die in die Segmentierung eingehen, durch den Einsatz georeferenzierter Versuchsplanung, Anlage des Versuchs mit RTK-GNSS-Lenksystemen und anschließendes Zuschneiden des Orthomosaiks auf die Saatzeilen zu reduzieren.

Die Leistung der automatischen Maiskornkartierung

Die Prüfparameter $RMSE_x$, $RMSE_y$ und $RMSE_{xy}$ dienen zur Leistungsbewertung des Algorithmus in Bezug auf seine Fähigkeit, die georeferenzierte Position von Maiskörnern zu errechnen. Zur Überprüfung der Validität der Anwendung der Prüfparameter dienen die Residuen zwischen der vorhergesagten und digital bonitierten Maiskornkoordinate je Belichtungsszenario (Abbildung 7). Es ist zu beobachten, dass die Verteilung in allen Szenarien – ausgenommen Szenario 1 und 4 – einer Normalverteilung ähnelt. Auf der Ost-Achse von Szenario 1 gibt es eine hohe Streuung der Residuen, was zu einer flachen Verteilung führt. Der mittlere Fehler von Szenario 1 ist mit $-1,44$ mm auf der Ost-Achse in Richtung Westen und mit $+1,58$ mm auf der Nord-Achse in Richtung Norden verschoben. Die mittleren Fehler der anderen Belichtungsszenarien liegen auf der Ost-Achse zwischen $-0,61$ mm und $+0,01$ mm und auf der Nord-Achse zwischen $-0,37$ mm und $+0,34$ mm. Damit sind alle mittleren Fehler innerhalb der festgelegten Zielgenauigkeit von zwei Millimetern und die Validität der Prüfparameter gegeben (ASPRS MAP ACCURACY STANDARDS WORKING GROUP 2015).

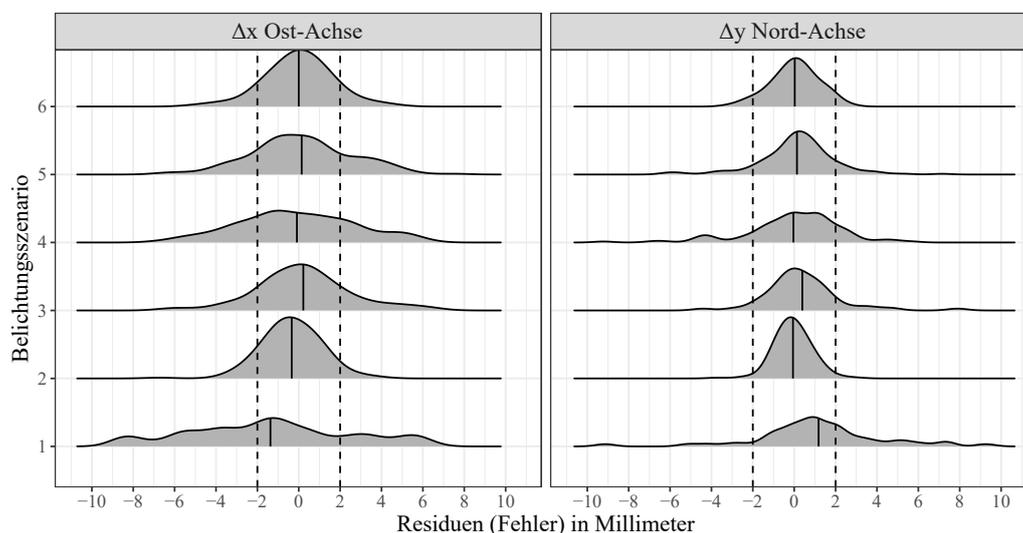


Abbildung 7: Die Verteilungen der Residuen der vorhergesagten Maiskornkoordinate im Vergleich zur Maiskornkoordinate aus der digitalen Handbonitur pro Belichtungsszenario (die gestrichelten Linien markieren die festgelegte Zielgenauigkeit von zwei Millimetern, die durchgezogene Linie zeigt den mittleren Fehler jeder Verteilung)

Die Kartierungsleistung des entwickelten Algorithmus wird durch die horizontalen Wurzeln der mittleren Fehlerquadratsumme auf der Ost- bzw. Nord-Achse berichtet (Tabelle 2). Die schlechteste lineare horizontale Kartierungsgenauigkeit wurde in Szenario 1 mit einem $RMSE_{xy}$ von 5,05 mm erzielt. Dieser Wert entsteht durch den im Vergleich aller Szenarien maximal beobachteten Fehler auf der Ost-Achse ($RMSE_x = 3,96$ mm), sowie dem maximal beobachteten Fehler auf der Nord-Achse ($RMSE_y = 3,12$ mm). Die beste horizontale Kartierungsgenauigkeit wurde im Szenario 2 mit einem $RMSE_{xy}$ von 1,72 mm erzielt. Dieses Szenario liegt damit als einziges im Bereich der festgelegten Zielgenauigkeit von zwei Millimetern. Über der festgelegten Zielgenauigkeit, jedoch mehr als 1,45 mm kleiner als der höchste $RMSE_{xy}$ von Szenario 1 sind die $RMSE_{xy}$ der Szenarien 6, 3, 5 und 4 mit 2,03 mm, 2,60 mm, 3,08 mm und 3,60 mm. Über alle Belichtungsszenarien hinweg lässt sich feststellen, dass die Wurzel der mittleren Fehlerquadratsumme auf der Ost-Achse ($RMSE_x$) im arithmetischen Mittel 0,54 mm höher ist als die auf der Nord-Achse ($RMSE_y$), bei einer Standardabweichung von 0,19 mm.

Tabelle 2: Validierungsergebnisse für die Kartierung von Maiskörnern pro Überfahrt bzw. Belichtungsszenario, geordnet nach aufsteigendem $RMSE_{xy}$ in mm

Szenario	$RMSE_x$ ¹⁾ in mm	$RMSE_y$ ²⁾ in mm	$RMSE_{xy}$ ³⁾ in mm
2	1,43	0,95	1,72
6	1,68	1,13	2,03
3	2,01	1,65	2,60
5	2,49	1,82	3,08
4	2,71	2,36	3,60
1	3,96	3,12	5,05

¹⁾ $RMSE_x$ = horizontal lineare Wurzel der mittleren Fehlerquadratsumme auf der Ost-Achse

²⁾ $RMSE_y$ = horizontal lineare Wurzel der mittleren Fehlerquadratsumme auf der Nord-Achse

³⁾ $RMSE_{xy}$ = horizontal lineare Wurzel der mittleren Fehlerquadratsumme auf der Ost- und Nord-Achse

Das schlechte Abschneiden der Belichtungsszenarien 1 und 4 in Bezug auf die Maiskornsegmentierung im vorherigen Kapitel findet sich auch in der Kartierung der Maiskörner wieder. Folglich scheint eine starke Belichtung während der Datenaufnahme per Drohne ebenfalls negative Auswirkungen auf die korrekte Kartierung der Maiskörner zu haben. Dies lässt sich durch eine stärkere Reflektanz der rötlichen Maiskörner bei direkter Sonneneinstrahlung erklären, welche den a^* -Kanal der umgebenden Pixel erhöht. Die Anzahl der segmentierten Pixel pro Maiskorn steigt, was zu einer ungenaueren Kartierung der Maiskornmitte führt.

Die über alle Belichtungsszenarien beobachteten höheren Residuen auf der Ost-Achse im Vergleich zur Nord-Achse lassen sich ebenfalls durch die Reflektanz der Maiskornumgebung erklären. Durch die entlang der Nord-Achse ausgerichtete Versuchsanlage ist der Saatschlitz des Maiskorns entlang der Nord-Achse ebenerdig. Durch die flache Bodenstruktur in Nord-Süd-Richtung gibt es eine geringere Anzahl an Bodenpixeln, welche die rötliche Reflektanz des Maiskornes reflektieren. Auf der Ost-Achse befinden sich hingegen die Wände des Saatschlitzes und bieten mehr Reflektionsfläche. Dadurch sind die segmentierten Maiskornpixelgruppen oval in Ost-West-Richtung ausgedehnt. Dies führt bei der Errechnung der Zentroide zu einer erhöhten Ungenauigkeit entlang der Ost-Achse.

Trotz der beiden genannten Einschränkungen ist die angewandte Methodik sehr gut für die teilautomatisierte Kartierung von Maiskörnern geeignet. Auch wenn die festgelegte Zielgenauigkeit von zwei Millimetern (der doppelten GSD) nur in einem Szenario erreicht wurde, sind die Fehler im Vergleich zur teilautomatisierten Kartierung über die Erkennung von Maispflanzen gering. So erreichte SHUAI et al. (2019), durch Anwendung der von ZHANG et al. (2018) entwickelten Methodik, bei der Bestimmung der Pflanzenkoordinaten über die Segmentierung von Maispflanzen einen $RMSE_{xy}$ von 17 bis 26 mm. Unter Annahme des größtmöglichen Fehlers bei der Kartierung zweier Maiskörner in dieser Arbeit von 5,05 mm ergibt sich bei der Überprüfung der Distanz der Maiskörner zueinander ein maximaler Fehler von 10 mm ($= 2 \times \max(RMSE_{xy}) = 2 \times 5$ mm). Bei der Kartierungsmethodik von SHUAI et al. (2019) liegt der maximale Fehler bei 52 mm ($= 2 \times \max(RMSE_{xy}) = 2 \times 26$ mm). Auch ZHANG et al. (2018) erreichten während der Methodenentwicklung lediglich Genauigkeiten bei der Distanzberechnung von circa 30 mm. Der Hauptgrund hierfür liegt laut den Autoren an der für die Berechnung des Austrittspunktes der Pflanze aus dem Boden notwendigen Annahme einer mittleren Höhe für den gesamten Maisbestand. Damit ist für die korrekte Erfassung der Maiskornkoordinate zur Prüfung der Ablagegenauigkeit einer EKS die direkte Kartierung von Maiskörnern der indirek-

ten Kartierung über die Errechnung der Maispflanzenmitte vorzuziehen. Ob diese Aussage auch auf Kulturpflanzen mit kleineren und andersfarbigen Saatkörnern wie bspw. Zuckerrüben oder Raps übertragbar ist, sollte Gegenstand der Weiterentwicklung der Methodik sein.

Schlussfolgerungen

Die präzise Aussaat mit einer Einzelkornsämaschine ist im Maisanbau ein wichtiger technischer Einflussfaktor zur Ertragsoptimierung geworden. Die stetige Weiterentwicklung in der Einzelkornsätechnik stellt in der Folge auch eine Herausforderung für die Weiterentwicklung aktueller Prüfverfahren dar. Bezogen auf das von der DLG in Deutschland angewandte Prüfverfahren für EKS im Feldeinsatz konnten drei mögliche Ansatzpunkte festgestellt werden: (1) Das Prüfverfahren kann von der Abstandsmessung innerhalb einer Reihe zu einer georeferenzierten Erfassung der Ablagekoordinaten abgeändert werden. Dies ermöglicht erweiterte Auswertungsmöglichkeiten über die Einzelreihe hinweg, um die Standraumverteilung im Ganzen, bspw. bei Gleichstandsaat, objektiv beurteilen zu können. (2) Fernerkundungstechniken, wie drohnengetragene Sensoren, bieten die Möglichkeit, von einer stichprobenartigen Kontrolle hin zu einem skalierbaren Messverfahren mit Georeferenzierung zu kommen. So können auch neue Techniken von Einzelkornsämaschinen wie das Variieren der Aussaatmenge, die automatische Reihenabschaltung und die Auswertung von Telemetriedaten überprüft werden. (3) Die Vereinzelnleistung einer EKS im Feldeinsatz kann durch die Betrachtung der abgelegten Saatkörner anstelle der aufgelaufenen Pflanzen transparenter von der Überlebensrate der Pflanzen abgegrenzt werden.

Aus den Ansatzpunkten zur Verbesserung des aktuellen DLG-Prüfrahmens wurde in dieser Arbeit eine Methodik zur Überprüfung von EKS im Feldeinsatz abgeleitet und überprüft. Durch den Einsatz einer Drohne mit RGB-Sensor konnten Maiskörner, die von einer EKS mit einem offenem Saatschlitz ausgelegt wurden, teilautomatisiert und georeferenziert segmentiert und kartiert werden. Dabei stellte sich heraus, dass eine hohe Rückverfestigung des tonig-lehmigen Bodens in ausreichender Breite und mit gleichmäßiger Bodenoberfläche eine Sichtbarkeit der Maiskörner – bei manueller Sichtung des Orthomosaiks – von >90 % sicherstellen kann. Für die Etablierung dieser Methodik als Grundlage eines zukünftigen Prüfrahmens für EKS ist davon auszugehen, dass die weitere Erprobung von Rückverfestigungsmaßnahmen zu einer noch höheren Rate sichtbarer Maiskörner beitragen wird. Die Erhöhung der Fahrgeschwindigkeit der EKS von 8 auf 12 km/h zeigte in dieser Arbeit bei hoher Rückverfestigung keine negativen Effekte auf die Sichtbarkeitsrate. Das zeigt die potenzielle Eignung dieser Methodik für praxisnahe Fahrgeschwindigkeiten bei der Prüfung von EKS mit einer Fangrolle wie der eingesetzten Precea 4500-2CC Super. Folgeuntersuchungen, die sich mit der Rückverfestigung des Bodens beschäftigen, sollten dennoch auch höhere Fahrgeschwindigkeiten sowie die Eignung für alternative EKS-Systeme überprüfen.

Der entwickelte Segmentierungsalgorithmus zur Teilautomatisierung der Auswertung durch Anwendung des Otsu-Schwellenwerts auf den a^* -Kanal des CIELab-Farbraums mit anschließender Filterung nach Flächengröße ermöglichte die Segmentierung sichtbar abgelegter Maiskörner mit einer Sensitivität von $\geq 0,96$ und einer Genauigkeit von $\geq 0,62$. Dies gilt jedoch nur unter der Bedingung gleichmäßiger Belichtungsverhältnisse durch eine bewölkte Witterung und bei einem minimalen Abstand der Maiskörner von zwei Zentimetern. Während die Sensitivität in diesen Fällen als ausreichend betrachtet werden kann, sollte die Genauigkeit weiter verbessert werden. Eine Erprobung alternativer Schwellenwertverfahren sowie weiterer Filteralgorithmen könnten hier weitere Verbesserungen

erzielen. Auch die Robustheit des Algorithmus bei Doppelstellen mit Abständen der Maiskörner von weniger als zwei Zentimetern könnte auf diese Weise optimiert werden. Im Vergleich zu anderen Ansätzen der Pflanzenpositionserfassung per Drohne besteht der Vorteil, dass die entwickelte Methodik keine Anforderungen an ein einzuhaltendes Wachstumszeitfenster stellt. Die Versuchsanlage und Datenaufnahme im Prüfverfahren sind innerhalb eines Tages durchführbar, was eine verbesserte Planbarkeit nach aktuellen Witterungsverhältnissen bedeutet. Auch mit Hinblick auf die korrekte, georeferenzierte Kartierung der Ablagekoordinaten zeigen sich Vorteile gegenüber einer pflanzenbasierten Kartierung: Die Koordinaten sind einfacher zu berechnen, es werden keine Annahmen zur mittleren Höhe des Pflanzenbestandes benötigt und mit einem $RMSE_{xy}$ zwischen 1,7 und 5,1 mm ist die Kartierung deutlich genauer als vergleichbare Arbeiten zur pflanzenbasierten Kartierung. Beachtet werden muss jedoch, dass sich das Verrollen der Maiskörner bei stark rückverfestigtem Boden vom Verrollen durch Verschließen des Saatschlitzes mit Erde unterscheiden könnte. Hier besteht ebenfalls weiterer Forschungsbedarf. Insgesamt zeigt sich ein hohes Potenzial zur Aktualisierung der aktuellen Prüfverfahren für EKS im Feldeinsatz mit Mais durch die georeferenzierte Kartierung von Maiskörnern mit Hilfe von drohnengetragener RGB-Sensorik, um neue technische Funktionen der EKS überprüfen zu können. Gegenstand der Weiterentwicklung dieser Methodik sollte dabei auch die Übertragbarkeit auf Kulturpflanzen mit kleineren und andersfarbigen Saatkörnern sein.

Literatur

- ASPRS Map Accuracy Standards Working Group (2015): ASPRS Positional Accuracy Standards for Digital Geospatial Data. Photogrammetric Engineering & Remote Sensing 81(3), pp. 1–26, <https://doi.org/10.14358/PERS.81.3.A1-A26>
- Assefa, Y.; Vara Prasad, P.V.; Carter, P.; Hinds, M.; Bhalla, G.; Schon, R.; Jeschke, M.; Paszkiewicz, S.; Ciampitti, I.A. (2016): Yield Responses to Planting Density for US Modern Corn Hybrids: A Synthesis-Analysis. Crop Science 56(5), pp. 2802–2817, <https://doi.org/10.2135/cropsci2016.04.0215>
- Bouten, M.; Meinel, T.; Kath-Petersen, W. (2019): Untersuchung des Einflusses einer diskontinuierlichen Ablage der P-Unterfußdüngung bei Mais – erste einjährige Ergebnisse von Feldversuchen. Landtechnik 74(1/2), S. 25–35, <https://doi.org/10.1515/lt.2019.3202>
- Bozdoğan, A.M. (2008): Seeding uniformity for vacuum precision seeders. Scientia Agricola 65(3), pp. 318–322, <https://doi.org/10.1590/S0103-90162008000300013>
- Budde, M.B. (2016): Erfassung und Bewertung der Einzelung von Feinstsämereien in Einzelkornsäegeräten. Dissertation, Universität Bonn
- Bullock, D.G.; Nielsen, R.L.; Nyquist, W.E. (1988): A Growth Analysis Comparison of Corn Grown in Conventional and Equidistant Plant Spacing. Crop Science 28(2), pp. 254–258, <https://doi.org/10.2135/cropsci1988.0011183X002800020015x>
- Commission internationale de l'éclairage (CIE) (2007): Colorimetry. Understanding the CIE system, Vienna, Austria, <https://doi.org/10.25039/TR.015.2018>
- Csurka, G.; Larlus, D.; Perronnin, F. (2013): What is a good evaluation measure for semantic segmentation? In: Proceedings of the British Machine Vision Conference 2013, Ed. BMVA Press
- Deutsche Landwirtschafts-Gesellschaft e.V. (DLG) (1991): DLG-Prüfrahmen für Einzelkornsäegeräte. Groß-Umstadt
- Duncan, W.G. (1984): A Theory to Explain the Relationship Between Corn Population and Grain Yield 1. Crop Science 24(6), pp. 1141–1145, <https://doi.org/10.2135/cropsci1984.0011183X002400060032x>
- García-Martínez, H.; Flores-Magdaleno, H.; Khalil-Gardezi, A.; Ascencio-Hernández, R.; Tijerina-Chávez, L.; Vázquez-Peña, M.A.; Mancilla-Villa, O.R. (2020): Digital Count of Corn Plants Using Images Taken by Unmanned Aerial Vehicles and Cross Correlation of Templates. Agronomy 10(4), p. 469, <https://doi.org/10.3390/agronomy10040469>
- Gnädinger, F.; Schmidhalter, U. (2017): Digital Counts of Maize Plants by Unmanned Aerial Vehicles (UAVs). Remote Sensing 9(6), p. 544, <https://doi.org/10.3390/rs9060544>

- Golzarian, M.R.; Lee, M.-K.; Desbiolles, J.M.A. (2012): Evaluation of Color Indices for Improved Segmentation of Plant Images. *Transactions of the ASABE* 55(1), pp. 261–273, <https://doi.org/10.13031/2013.41236>
- Götz, S.; Bernhardt, H. (2010): Produktionsvergleich von Gleichstandsamt und Normalsamt bei Silomais. *Landtechnik* 65(2), S. 107–110, <https://doi.org/10.15150/lt.2010.604>
- Griepentrog, H.W. (1999): Zur Bewertung der Flächenverteilung von Saatgut. *Agrartechnische Forschung* 5(3), S. 117–124
- Griepentrog, H.W.; Nrreemark, M.; Nielsen, H.; Blackmore, B.S. (2005): Seed Mapping of Sugar Beet. *Precision Agriculture* 6(2), pp. 157–165, <https://doi.org/10.1007/s11119-005-1032-5>
- Hengl, T. (2006): Finding the right pixel size. *Computers & Geosciences* 32(9), pp. 1283–1298, <https://doi.org/10.1016/j.cageo.2005.11.008>
- Hernández-Hernández, J.L.; García-Mateos, G.; González-Esquivá, J.M.; Escarabajal-Henarejos, D.; Ruiz-Canales, A.; Molina-Martínez, J.M. (2016): Optimal color space selection method for plant/soil segmentation in agriculture. *Computers and Electronics in Agriculture* 122, pp. 124–132, <https://doi.org/10.1016/j.compag.2016.01.020>
- Hoff, D.J.; Mederski, H.J. (1960): Effect of Equidistant Corn Plant Spacing on Yield. *Agronomy Journal* 52(5), pp. 295–297, <https://doi.org/10.2134/agronj1960.00021962005200050019x>
- International Organization for Standardization (ISO) (1984): ISO 7256-1:1984 Sowing equipment – Test methods, Part 1: Single seed drills (precision drills), <https://www.iso.org/standard/13910.html>, Zugriff am 22.01.2024
- Kachman, S.D.; Smith, J.A. (1995): Alternative Measures of Accuracy in Plant Spacing for Planters Using Single Seed Metering. *Transactions of the ASAE* 38(2), pp. 379–387, <https://doi.org/10.13031/2013.27843>
- Landesamt für Bergbau, Energie und Geologie Niedersachsen (2023): Bodenkarte 1 : 50 000 (BK 50). https://www.lbeg.niedersachsen.de/karten_daten_publicationen/karten_daten/boden/bodenkarten/bodenkarte_150000/bodenkarte-1-50-000-bk50-655.html, Zugriff am 06.12.2023
- Landini, G.; Randell, D.A.; Fouad, S.; Galton, A. (2017): Automatic thresholding from the gradients of region boundaries. *Journal of Microscopy* 265(2), pp. 185–195, <https://doi.org/10.1111/jmi.12474>
- Mardanisamani, S.; Eramian, M. (2022): Segmentation of vegetation and microplots in aerial agriculture images: A survey. *The Plant Phenome Journal* 5(1), e20042, <https://doi.org/10.1002/ppj2.20042>
- Midtiby, H.S.; Pastucha, E. (2022): Pumpkin Yield Estimation Using Images from a UAV. *Agronomy* 12(4), p. 964, <https://doi.org/10.3390/agronomy12040964>
- National Aeronautics and Space Administration (NASA) (2019): What is Remote Sensing? <https://www.earthdata.nasa.gov/learn/backgrounders/remote-sensing>, Zugriff am 29.01.2024
- Nielsen, R.L. (1993): Stand Establishment Variability in Corn. In: *Proceedings of the 1993 Crop Production and Protection Conference*, 12.02.1993, Iowa State University, Digital Press
- Otsu, N. (1979): A Threshold Selection Method from Gray-Level Histograms. *IEEE Transactions on Systems, Man, and Cybernetics* 9(1), pp. 62–66, <https://doi.org/10.1109/tsmc.1979.4310076>
- Panning, J.W.; Kocher, M.F.; Smith, J.A.; Kachman, S.D. (2000): Laboratory And Field Testing Of Seed Spacing Uniformity For Sugarbeet Planter. *Applied Engineering in Agriculture* 16(1), pp. 7–13, <https://doi.org/10.13031/2013.4985>
- Pathak, H.; Igathinathane, C.; Zhang, Z.; Archer, D.; Hendrickson, J. (2022): A review of unmanned aerial vehicle-based methods for plant stand count evaluation in row crops. *Computers and Electronics in Agriculture* 198, S. 107064, <https://doi.org/10.1016/j.compag.2022.107064>
- Riehle, D.; Reiser, D.; Griepentrog, H.W. (2020): Robust index-based semantic plant/background segmentation for RGB-images. *Computers and Electronics in Agriculture* 169, p 105201, <https://doi.org/10.1016/j.compag.2019.105201>
- SaatV (2022): Saatgutverordnung in der Fassung der Bekanntmachung vom 8. Februar 2006 (BGBl. I S. 344), die zuletzt durch Artikel 1 der Verordnung vom 13. Juli 2022 (BGBl. I S. 1186) geändert worden ist
- Sangoi, L. (2001): Understanding Plant Density Effects on Maize Growth and Development. An Important Issue to Maximize Grain Yield. *Ciência Rural* 31(1), pp. 159–168, <https://doi.org/10.1590/S0103-84782001000100027>
- Schuchmann, G.H. (2019): DLG-Testmethoden und Entwicklungstrends im Bereich der Sätechnik. [https://www.dlr-eifel.rlp.de/Internet/global/themen.nsf/341173a1418617d1c1256f49003f5306/2E89FDA5B65DBC97C1258399003BB5D1/\\$FILE/Georg%20Horst%20Schumann%20-%20DLG-Testmethoden%20und%20Entwicklungstrends%20im%20Bereich%20der%20S%C3%A4technik%20\(AT%2017\).pdf](https://www.dlr-eifel.rlp.de/Internet/global/themen.nsf/341173a1418617d1c1256f49003f5306/2E89FDA5B65DBC97C1258399003BB5D1/$FILE/Georg%20Horst%20Schumann%20-%20DLG-Testmethoden%20und%20Entwicklungstrends%20im%20Bereich%20der%20S%C3%A4technik%20(AT%2017).pdf), Zugriff am 29.01.2024

- Shuai, G.; Martinez-Feria, R.A.; Zhang, J.; Li, S.; Price, R.; Basso, B. (2019): Capturing Maize Stand Heterogeneity Across Yield-Stability Zones Using Unmanned Aerial Vehicles (UAV). *Sensors* 19(20), p. 4446, <https://doi.org/10.3390/s19204446>
- Thorp, K.R.; Steward, B.L.; Kaleita, A.L.; Batchelor, W.D. (2007): Using Aerial Hyperspectral Remote Sensing Imagery to Estimate Corn Plant Stand Density. *Transactions of the ASABE* 51(1), pp. 311–320, <https://doi.org/10.13031/2013.24207>
- Voit, B.; Schnellhammer, R.; Eder, J.; Killermann, B. (2010): Einfluss von Keimfähigkeit und Triebkraft auf den Feldaufgang und Ertrag bei Mais. In: *Züchtung und Genressourcen gegen abiotische Stressfaktoren, markergestützte Selektion in der Praxis*. 60. Tagung, 24.–26. November 2009, Irdning, Lehr- und Forschungsanstalt für Landwirtschaft Raumberg-Gumpenstein, S. 125–128
- Vong, C.N.; Conway, L.S.; Zhou, J.; Kitchen, N.R.; Sudduth, K.A. (2021): Early corn stand count of different cropping systems using UAV-imagery and deep learning. *Computers and Electronics in Agriculture* 186, p. 106214, <https://doi.org/10.1016/j.compag.2021.106214>
- Wang, Y.; Lv, H.; Deng, R.; Zhuang, S. (2020): A Comprehensive Survey of Optical Remote Sensing Image Segmentation Methods. *Canadian Journal of Remote Sensing* 46(5), pp. 501–531, <https://doi.org/10.1080/07038992.2020.1805729>
- Woli, K.P.; Burras, C.L.; Abendroth, L.J.; Elmore, R.W. (2014): Optimizing Corn Seeding Rates Using a Field's Corn Suitability Rating. *Agronomy Journal* 106(4), pp. 1523–1532, <https://doi.org/10.2134/agronj14.0054>
- Zhang, J.; Basso, B.; Price, R.F.; Putman, G.; Shuai, G. (2018): Estimating plant distance in maize using Unmanned Aerial Vehicle (UAV). *PLoS ONE* 13(4), e0195223, <https://doi.org/10.1371/journal.pone.0195223>

Autoren

Steffen Konnemann, M.Sc., und **Eike Hunze, M.Sc.**, waren wissenschaftliche Mitarbeiter und **Prof. Dr.-Ing. Frank Beneke** ist Leiter der Abteilung Agrartechnik an der Georg-August-Universität Göttingen, Gutenbergstr. 33, 37075 Göttingen, Deutschland. E-Mail: steffen.konnemann@uni-goettingen.de

Hinweise und Danksagungen

Dank gilt Herrn **Georg Horst Schuchmann**, Projektleiter Landtechnik beim DLG-Fachzentrum Landwirtschaft, für die Bereitstellung von Informationen zum aktuell angewandten DLG-Prüfrahmen für Einzelkornsäugeräte sowie für seine kritische Einordnung der Ergebnisse in Bezug auf ihre Übertragbarkeit in die Praxis.

Im Rahmen dieser Arbeit konnte auf Vorarbeiten aus dem Projekt „FarmerSpace“ zurückgegriffen werden. Die Förderung des Vorhabens „FarmerSpace“ erfolgt aus Mitteln des Bundesministeriums für Ernährung und Landwirtschaft (BMEL) aufgrund eines Beschlusses des deutschen Bundestages. Die Projektträgerschaft erfolgt über die Bundesanstalt für Landwirtschaft und Ernährung (BLE) im Rahmen des Programms zur Innovationsförderung (Förderkennzeichen: 28DE104A18).