

Sachbericht zum Verwendungsnachweis

Kurzbericht

Zuwendungsempfänger: Verein der Zuckerindustrie e. V. Institut für Zuckerrübenforschung (IfZ) Prof. Dr. Anne-Katrin Mahlein Holtenser Landstraße 77 37079 Göttingen Projektbearbeiter: Jonas Bömer boemer@ifz-goettingen.de	Förderkennzeichen: 28-D-K1.08C-20
---	-----------------------------------

Vorhabenbezeichnung: „Einsatz von Künstlicher Intelligenz und optischen Sensoren bei der Sortenbeschreibung des Bundessortenamtes in der Register- und Wertprüfung im Rahmen der Sortenzulassung bei Zuckerrüben“

Laufzeit des Vorhabens: 03.03.2021 – 02.03.2024

Für die Zulassung neuer Zuckerrübensorten zum kommerziellen Vertrieb prüft das Bundessortenamt die Unterscheidbarkeit, Homogenität und Beständigkeit unter anderem anhand morphologischer Merkmale der Zuckerrüben. Ziel des Projekts „RegisTer“ war die Entwicklung automatisierter Routinen zur Charakterisierung und Bewertung von Zuckerrübensorten durch neue, digitale Technologien. Durch die Verwendung von Drohnen, optischen Sensoren und künstlicher Intelligenz sollten die bisherigen Feldbonituren des Bundessortenamtes unterstützt und bekannte sowie neue, digitale Registermerkmale und Werteeigenschaften automatisch extrahiert werden. Dieser Ansatz der digitalen Phänotypisierung kombiniert Elemente der Bereiche Computer-Vision und Robotik, um mithilfe von RGB-Kamerasensoren und 3D-Laserscannern geometrische Parameter sowie Farbinformationen der Sorten zu erfassen und nachgelagert zu verarbeiten. Hierfür stehen moderne maschinelle Lernverfahren für die Analyse von Pflanzen zur Verfügung, um Einzelpflanzen und ihre Organe zu erkennen und zu analysieren. Das Projekt zielt darauf ab, die Effizienz und Präzision in der Züchtung und Bewertung von Zuckerrübensorten zu steigern. Die Durchführung des Verbundprojekts erfolgte durch eine Kooperation der Projektpartner Pheno-Inspect GmbH, Universität Bonn, Bundessortenamt und Institut für Zuckerrübenforschung (IfZ).

Das IfZ war federführend bei der Untersuchung der 3D-Information für phänotypische Merkmale tätig. Hierfür wurde im ersten Projektjahr ein Messaufbau für die Vermessung der Registerprüfungen des Bundessortenamtes mithilfe eines terrestrischen Laserscanners etabliert. Der Messaufbau wurde durch ein speziell an die Anforderungen der Feldversuche angepassten Scanplan vervollständigt. Das Messverfahren wurde 2021 erfolgreich etabliert und in den folgenden Projektjahren kontinuierlich weiterentwickelt. Im Jahr 2023 wurde der Laserscanner zusätzlich in eine mobile Roboterplattform integriert, welche eine effiziente und präzise Datenerfassung von großen Flächen in kurzer Zeit ermöglicht. Die RTK-gestützte Roboterplattform erhöht insofern die Praxistauglichkeit des verwendeten Sensors und erlaubt dessen Integration in bestehende Arbeitsabläufe von Feldbonituren.

Insgesamt konnten als Grundlage qualitativ hochwertige und umfangreiche Datensätze mit 3D-Zeitreihendaten von Zuckerrüben in Feld- und Gewächshausversuchen, einschließlich Referenzdaten erfasst werden. So wurden in den Jahren 2021 und 2022 die Registerprüfungen des Bundessortenamtes regelmäßig und in enger zeitlicher Absprache mit den Projektpartnern erfasst. Zusätzlich wurden über die Projektlaufzeit am IfZ eigenständig zwei Gewächshaus- sowie Feldversuche durchgeführt, an denen alle Projektpartner beteiligt waren. Über den gesamten Projektverlauf erfolgte ein enger Austausch zur Methodenentwicklung, Akquise von Projektdaten und Interpretation von Ergebnissen zwischen den Projektpartnern.

Auf Basis der erhobenen Daten der Gewächshausversuche wurde im Jahr 2021 eine Parametrisierung des Blattapparates von Einzelpflanzen entwickelt. Hierzu wurde eine automatische Verarbeitungspipeline für 3D-Punktwolken von Sortenversuchen aufgesetzt, die die Extraktion der Einzelpflanzen aus der Projektpunktwolke, die Beseitigung von Messfehlern

sowie die Parametererhebung umfasst. Beispielhaft können die Pflanzenhöhe und -breite, konvexe Hülle, und die projizierte Blattfläche automatisch ermittelt werden. Im Projektjahr 2022 wurden insgesamt vier neue Einzelpflanzenmerkmale entwickelt, die auf verschiedene Weise Aufschluss über den Wachstumstyp der Einzelpflanze geben.

Durch die im Projekt aufgenommenen zeitlich hochaufgelösten 3D-Datensätze wurden im Jahr 2022 erste Zeitreihenanalysen der Parameterentwicklung möglich. Die entwickelte Pipeline für die Parametrisierung des Blattapparates wurde genutzt, um Einzelpflanzenmerkmale über die Zeit zu erfassen und den Entwicklungsverlauf morphologischer Parameter von Zuckerrüben darzustellen und zu analysieren. Es wurde deutlich, dass verschiedene Genotypen unterschiedliche Entwicklungsverläufe der erhobenen morphologischen Parameter aufweisen, sodass der Verlauf der Entwicklung eines morphologischen Merkmals selbst als Merkmal fungieren kann.

Im Bereich der 3D-Phänotypisierung von Pflanzen stellt die Referenzierung der erfassten morphologischen Parameter eine anspruchsvolle, aber grundlegend wichtige Aufgabe dar. Die Kombination von optischen Sensoren und einer nachgelagerten computergestützten Auswertung ermöglicht die Erhebung neuartiger Einzelpflanzenparameter. Zu diesem Zweck wurde im Jahr 2021 mittels 3D-Druck ein Referenzmodell einer Zuckerrübenpflanze mit bekannten morphologischen Parametern angefertigt, welches mit den Projektpartnern der Universität Bonn und Partnern aus dem Exzellenzcluster PhenoRob validiert wurde. Das Modell wurde über die restliche Projektzeit in die Datenaufnahmen integriert.

Im Projektjahr 2023 wurde abschließend der Beitrag hochauflösender 3D-Sensoren zur Analyse und Bewertung von Sortenunterschieden bei Zuckerrüben untersucht. Diese Analyse wurde auf Ebene der Einzelblätter, Einzelpflanzen und Parzellenebene durchgeführt. Dafür erfolgte auf Einzelblattebene ein Vergleich zwischen zweidimensionalen und dreidimensionalen Messverfahren zur Bestimmung der Blattlänge. Hierbei erwiesen sich beide Methoden als hochpräzise und vergleichbar, wobei die dreidimensionalen Ansätze den Vorteil bieten, nicht-invasiv zu sein und somit eine detaillierte Analyse der Blattgeometrie über Zeitreihen zu ermöglichen. Auf der Einzelpflanzenebene wurde die Beziehung zwischen der gebildeten Biomasse des Blattapparates und der Anzahl der Punkte im 3D-Modell untersucht. Es wurde festgestellt, dass die Biomasse mit hoher Genauigkeit aus den 3D-Daten abgeleitet werden kann. Auf Parzellenebene wurden verschiedene phänotypische Parameter analysiert. Die Analyse ergab, dass geometrischen Parameter auf Parzellenebene signifikante Unterschiede zwischen Zuckerrübensorten aufzeigen.

Das Projekt „RegisTer“ hat deutliche Fortschritte in der automatischen 3D-Phänotypisierung von Zuckerrüben erzielt. Hierzu zählt die Etablierung eines praxistauglichen Messsystems mithilfe eines hochpräzisen Laserscanners, die Automatisierung der morphologischen Parametererfassung und die Etablierung und Referenzierung neuer morphologischer Parameter zur Unterscheidung von Zuckerrüben. Die gesammelten Daten bilden eine wertvolle

Grundlage für zukünftige agronomische Studien und die Weiterentwicklung von Phänotypisierungsansätzen für Züchter und die Sortenzulassung des Bundessortenamtes.

Sachbericht zum Verwendungsnachweis

Eingehende Darstellung

Zuwendungsempfänger:

Verein der Zuckerindustrie e. V.

Institut für Zuckerrübenforschung (IfZ)

Prof. Dr. Anne-Katrin Mahlein

Holtenser Landstraße 77

37079 Göttingen

Projektbearbeiter:

Jonas Bömer

boemer@ifz-goettingen.de

Förderkennzeichen: 28-D-K1.08C-20

Vorhabenbezeichnung: „Einsatz von Künstlicher Intelligenz und optischen Sensoren bei der Sortenbeschreibung des Bundessortenamtes in der Register- und Wertprüfung im Rahmen der Sortenzulassung bei Zuckerrüben“

Laufzeit des Vorhabens: 03.03.2021 – 02.03.2024

1 Status der ursprünglich definierten Projektarbeiten

1.1 Etablierung des Messsystems

Um die für das Projekt benötigten 3D-Datensätze aufzunehmen, wurde für die Vegetationsperiode 2021 ein zuverlässiger Messaufbau (Abbildung 1A) und ein objektives Messprotokoll etabliert. Wie im terrestrischen Laserscanning (TLS) üblich, wurde der für die Datenaufnahme angeschaffte Faro S70 Laserscanner aufrecht auf einem Stativ in ca. zwei Metern Höhe montiert. Da TLS-Systeme den direkten Nahbereich unter sich nicht erfassen können, wurde der Scanner für eine Messung jeweils unmittelbar am Rand der Parzelle positioniert. Die Aufnahmeparameter des Laserscanners wurden in mehreren Vorversuchen erprobt, angepasst und in Hinblick auf den Einsatz des Scanners im Feld optimiert. Hierbei wurde beachtet, dass für die Generierung der relevanten 3D-Modelle lediglich Messdaten aus einem Umkreis von zehn Metern um den Scanner verwendet werden, um eine hohe Auflösung der Punktwolke zu gewährleisten. Die Auflösung wurde auf einen Punktabstand von 3,5 mm in einer Entfernung von zehn Metern eingestellt.

Für die Anfertigung eines möglichst vollständigen 3D-Modells mit geringem Verdeckungsgrad ist eine Datenaufnahme von verschiedenen Standpunkten aus erforderlich. Daher wurde für jeden Versuch ein individueller Scanplan entwickelt, der die Position des Laserscanners und der verwendeten Messziele beschreibt. Die Zielzeichen (Abbildung 1 A u. B, weiße Kugeln) dienen der späteren manuellen Registrierung der Einzelscans, da die räumlichen Begebenheiten einer landwirtschaftlich genutzten Fläche nur wenige Fixpunkte und Flächen bereitstellen, an denen eine automatische Registrierung mit der nötigen Präzision durchgeführt werden kann. Aus diesem Grund wurden Zielzeichen in sphärischer Form verwendet. Diese haben gegenüber planaren Zielzeichen den Vorteil, dass sie aus jedem Blickwinkel erkannt werden. Somit konnten sie nicht nur am Rand, sondern auch innerhalb der gescannten Fläche aufgestellt werden.

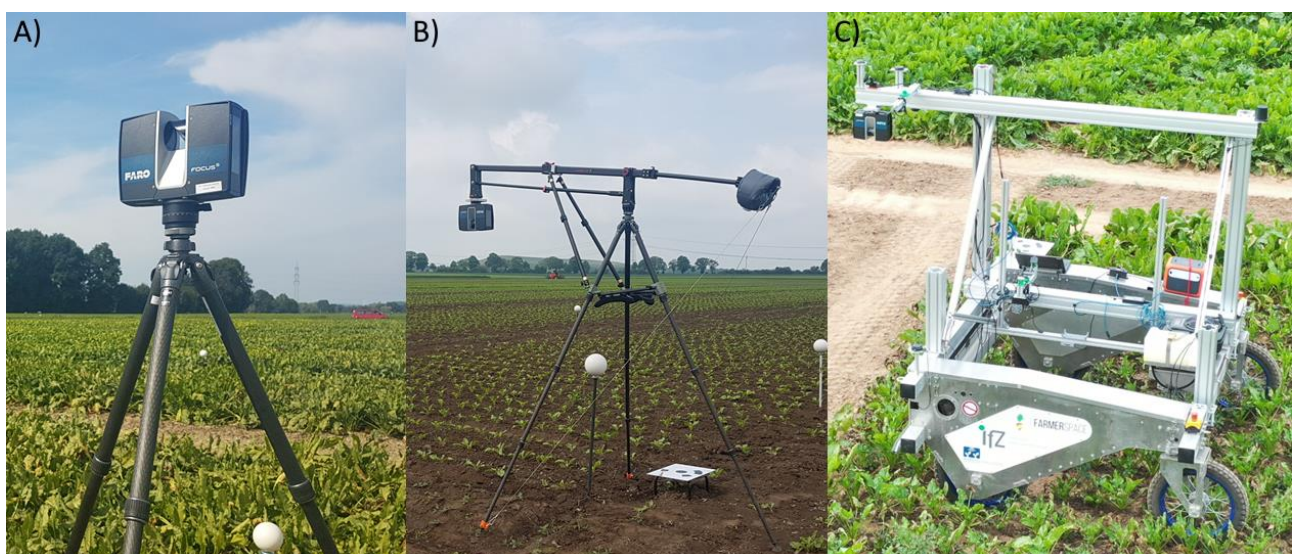


Abbildung 1: Im Projekt entwickelte Messsysteme für Feld- und Gewächshausmessungen bestehend aus dem Faro S70 Laserscanner montiert an A) einem Dreibeinestativ, B) einem Auslegearm und C) einer GPS-gesteuerten mobilen Trägerplattform. Das in A) dargestellte Messsystem wurde in der Feldsaison 2021 verwendet. B) zeigt den Aufbau des Messsystems mit Zielzeichen, welches in zwei Gewächshausversuchen im Jahr 2021 und 2022 sowie in der Feldsaison 2022 zum Einsatz kam. Die in C) abgebildete mobile Trägerplattform wurde im Feldversuch 2023 in Göttingen zur Datenaufnahme verwendet.

Durch die Kombination eines robusten Messaufbaus und individueller Scanpläne wurde eine sehr hohe Genauigkeit in der Modellierung der gesamten Projektpunktwolke erreicht. Die durchschnittlichen Abstandsfehler unter einzelnen Scans eines Projekts beliefen sich auf 1-2 mm in horizontaler und vertikaler Richtung. In der Feldsaison 2021 wurden mit dem beschriebenen Messsystem an vier Terminen in der Beständigkeitsprüfung und an zwei Terminen in der Erbkomponentenprüfung des Projektpartners Bundessortenamt (BSA) Daten aufgenommen (Abbildung 2).

Obwohl das Ziel der Etablierung eines Messsystems bereits erfüllt war, wurde für die weitere Datenaufnahme in Gewächshausversuchen im Jahr 2021 und 2022 sowie für die Feldsaison 2022 der bereits etablierte Messaufbau für den speziellen Einsatzzweck in der 3D-Phänotypisierung optimiert (Abbildung 1 B). Dafür wurde der Laserscanner kopfüber an einem Auslegearm montiert, was einen besseren Blickwinkel des Laserscanners auf die untersuchten Pflanzen ermöglicht. Somit führt der optimierte Messaufbau des Versuchsjahres 2022 zu vollständigeren und genaueren 3D-Modellen. Der optimierte Messaufbau eliminiert den „blinden Fleck“ unterhalb des Scanners und verbesserte den Blickwinkel auf die Pflanzen, da der Scanner direkt über diesen positioniert werden konnte. Durch den somit geringeren Verdeckungsgrad steigt die Qualität der generierten Punktwolken. Durch die Veränderung des Messaufbaus war keine Anpassung der bisherigen Scaneinstellungen notwendig und auch die Scanpläne der jeweiligen Versuche konnten mit minimalen Anpassungen übernommen werden. Durch die Montage von Schulterpolstern am Stativ ist der Messaufbau mobil und von einer Einzelperson leicht zu bedienen und zu bewegen.

Mit dem optimierten Messsystem wurden an neun bzw. zehn Terminen Daten in zwei Gewächshausversuchen (2021 und 2022) aufgenommen (Abbildung 2). Zudem wurde in der Feldsaison 2022 ein Feldversuch in Göttingen durchgeführt und an zehn weiteren Terminen während der Vegetationsperiode Daten aufgenommen. Die Feldversuche des BSA wurden an jeweils sechs Terminen vermessen. Die im Projekt gewonnenen Erfahrungen und Erkenntnisse bezüglich des Einsatzes von terrestrischen Laserscannern in der Pflanzenphänotypisierung wurden in Kooperation mit Partnern der ETH Zürich im Rahmen der Konferenz „ISPRS Geospatial Week 2023“ vorgestellt und veröffentlicht¹.

Auch im Projektjahr 2023 wurde der Messaufbau weiter optimiert. Diesmal lag der Fokus der Optimierungen auf einer besseren Anpassung der Datenaufnahme an reale Bedingungen im praktischen Feldeinsatz. Die Verwendung einer GPS-gesteuerten mobilen Trägerplattform (Farming Revolution GmbH, in Kooperation mit dem Digitalen Experimentierfeld FarmerSpace) ermöglichte einen wesentlich höheren Flächendurchsatz in einer geringeren Zeit, welcher bei einem Einsatz in praktischen Sortenversuchen unabdingbar ist. Zu diesem Zweck wurde der Laserscanner kopfüber an einem Ausleger an der Front der mobilen Trägerplattform montiert (Abbildung 1C). Die Steuerung

¹ Medic, T., Bömer, J., & Paulus, S. (2023). Challenges and Recommendations for 3d Plant Phenotyping in Agriculture Using Terrestrial Lasers Scanners. ISPRS Annals of the Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences, 10, 1007-1014. <https://doi.org/10.5194/isprs-annals-X-1-W1-2023-1007-2023>

der Trägerplattform erfolgt über ein mobiles Endgerät, welches über einen erzeugten WLAN-Hotspot verbunden wird. Die Position der Trägerplattform kann über Echtzeitkinematik (RTK) präzise bestimmt werden. Gefahrene Strecken können somit genau verfolgt und abgespeichert werden, sodass diese jederzeit mit einer hohen Wiederholungsgenauigkeit erneut abgefahren werden können. Die Trägerplattform ist für einen effizienten und nutzerfreundlichen Einsatz in Sortenversuchen geeignet.

Anders als bei den Messaufbauten der vorangegangenen Jahre wurden keine einzelnen dreidimensionalen Scans erfasst, welche im Anschluss zu einem zusammenhängenden 3D-Modell zusammengefügt werden müssen. Stattdessen wurde ein kontinuierliches, zweidimensionales Höhenprofil des Bestandes vor der Plattform erfasst. Mit Hilfe der bekannten konstanten Vorwärtsbewegung der Trägerplattform wurden die Höhenprofile im Anschluss zu einem zusammenhängenden 3D-Modell zusammengesetzt. Die Integration von RTK-Positionsdaten und Daten einer inertialen Messeinheit konnte aufgrund von Zeitmangel nicht durchgeführt werden. Neben den bereits erwähnten Vorteilen des höheren Flächendurchsatzes in geringerer Zeit sind die durch den beschriebenen Ablauf aufgenommenen Daten von besserer Verwertbarkeit als Daten von stationären 3D-Scans. Ein Grund hierfür ist die bei stationären Scans radial abnehmende Datenqualität und -vollständigkeit, welche dem Messverfahren des Scanners geschuldet ist.

Um den neuen Messaufbau unter realen Bedingungen testen zu können, wurde durch das IfZ in Kooperation mit den Projektpartnern in der Vegetationsperiode 2023 ein Feldversuch am Standort Göttingen durchgeführt. Zweck dieses Feldversuchs war neben der Erprobung der vorgestellten mobilen Trägerplattform für den terrestrischen Laserscanner vorrangig die Möglichkeit zur invasiven Probenentnahme im Verlauf der Vegetationsperiode, welche für die Erfüllung der Meilensteine des Projektjahres 2023 notwendig war. Der Feldversuch und die erhobenen Daten werden in Abschnitt 1.5 eingehend erläutert. Über die Vegetationsperiode verteilt konnten mit dem vorgestellten mobilen Messaufbau zu zwölf Zeitpunkten verschiedene Daten im Feldversuch erhoben werden (Abbildung 2). Neben dem terrestrischen Laserscanner wurden vergleichend zudem zwei weitere Low-Cost-

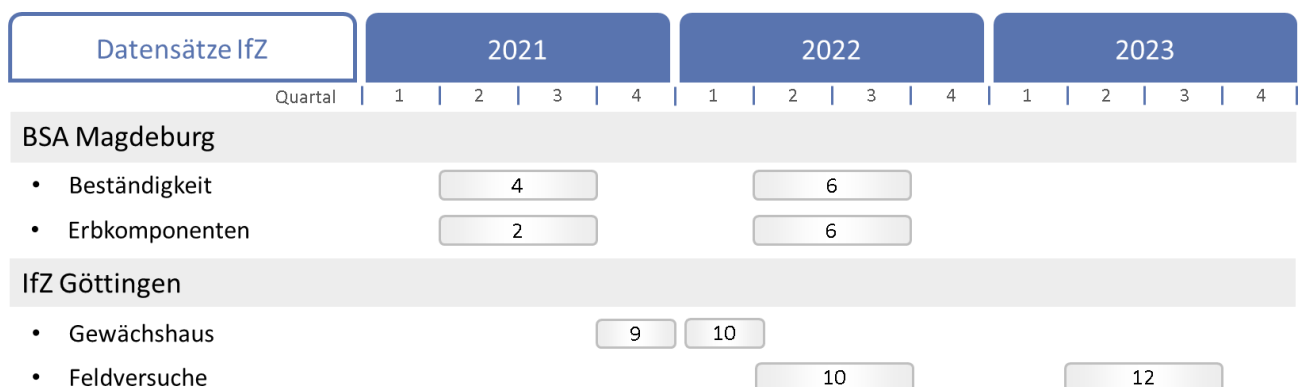


Abbildung 2: Übersicht über die durchgeführten Datenerhebungen in der Projektlaufzeit in verschiedenen Versuchen. Neben dem FARO S70 wurden in den Versuchen in Göttingen vergleichend weitere 3D-Messsysteme verwendet sowie invasive Probenentnahmen durchgeführt. In den Feldversuchen wurden zusätzlich regelmäßig Luftaufnahmen mit einem RGB und einem multispektralen Sensor angefertigt sowie zum Zeitpunkt des Reihenschlusses eine visuelle Bonitur durch das Bundessortenamt durchgeführt.

Sensoren an der mobilen Trägerplattform eingesetzt. Zusätzlich zur 3D-Datenerhebung wurden Bilddaten im RGB- sowie NIR-Spektralbereich erhoben und eine invasive Entnahme einzelner Pflanzen aus zuvor festgelegten Parzellen durchgeführt. Die Entnahme dieser Proben stellte Referenzdaten für automatische Messungen von Form- und Größenparametern bereit und war für die Erfüllung des in Abschnitt 1.5 erläuterten Meilensteins essenziell. Aufgrund der invasiven Vorgehensweise konnte sie nicht in den bestehenden Sortenversuchen des BSA durchgeführt werden. Um dennoch einen vollständigen Datensatz von 3D-Daten und visuellen Boniturdaten zu erhalten, wurde der Feldversuch in Göttingen durch die Experten des Bundessortenamtes mit geringem zeitlichem Abstand zu den Messungen des IfZ bonitiert.

Auch der weiterentwickelte und optimierte mobile Messaufbau ist geeignet, um die für das Projekt RegisTer benötigten hochpräzisen Datensätze zu erheben und weist durch seine Mobilität die nötigen Eigenschaften für zukünftige Anwendungen und Fragestellungen auf. Der Arbeitsauftrag wurde planmäßig im ersten Projektjahr abgeschlossen. Im Laufe der Projektphase wurde der Messaufbau wie beschrieben stetig optimiert und konnte 2023 erfolgreich für die praxisnahe Nutzung in Freilandversuchen von Zuckerrüben angepasst werden.

Während der Projektlaufzeit wurde eine große Anzahl von Datensätzen gesammelt, die eine breite Vielfalt aufweisen. Sie reichen von Einzelmessungen in kontrollierten Szenarien im Gewächshaus bis hin zu Zeitreihenmessungen im Freiland. Die gewonnenen Datensätze bilden die Grundlage für eine avisierte Ableitung von Phänotypisierungsparametern (Abbildung 2). Aufgrund der Vielfalt der Datensätze und pandemiebedingter Verzögerungen in den Arbeitsabläufen in den Jahren 2021 und 2022 konnten nicht alle erhobenen Datensätze bearbeitet und ausgewertet werden.

1.2 Validierung der Modellierung und der automatischen Parametererhebung

Im Projektjahr 2021 wurde das Arbeitspaket der Validierung in zwei Unterpakete aufgeteilt. Das erste Unterpaket befasste sich mit der Validierung der Modellierung der Projektpunktwolke, bestehend aus den Einzelscans des Laserscanners, während das zweite die automatische Parametererhebung überprüfte.

Für die Validierung der Punktwolkenmodellierung wurden die ebenfalls zur Registrierung genutzten sphärischen Messziele verwendet. Die Ziele weisen genau definierte Durchmesser auf, durch die die Registrierung der Einzelscans überprüft werden kann. Die für diese Aufgabe genutzte Software „Faro Scene“ stellt außerdem weitere Validierungstools zur Verfügung. Durch die Software werden für jedes Scanprojekt neben Zielstatistiken (horizontale und vertikale Fehler, Abstandsfehler, Winkelfehler) ebenfalls Scanpunktstatistiken in Form des Punktfehlers sowie der Überlappung zwischen den Einzelscans berechnet. Diese unterschiedlichen statistischen Methoden werden für jede Projektpunktwolke einzeln berechnet und ermöglichen eine präzise Modellierung der Versuchsflächen, welche je nach Bedarf über die Software manuell korrigiert wird. Durch eine Kombination von automatisch und manuell durchgeführten Arbeitsschritten kann somit eine sehr präzise Modellierung der Projektpunktwolke erreicht werden. Der durchschnittlich erreichte

euklidische Abstandfehler von Projektpunktwolken liegt daher zwischen 1 - 2 mm, unabhängig davon ob die Scans im Freiland oder im Gewächshaus durchgeführt wurden.

Für die Validierung der automatischen Parametererhebung wurde mittels 3D-Druck eine Referenzpflanze einer Zuckerrübe hergestellt, die durch bekannte morphologische Parameter eine mehrfache Überprüfung von 3D-Messungen ermöglicht. Dafür wurde eine der hergestellten Referenzpflanzen regelmäßig in die Messungen in den durchgeführten Gewächshaus- und Feldversuchen integriert (Abbildung 3). Somit konnte ein Datensatz erhoben werden, der durch mehrere Einzelmessungen der Referenzpflanze aus verschiedenen Blickwinkeln und Positionen die Verlässlichkeit der automatischen Parametererhebung validiert. Die Ergebnisse zeigen, dass die Erhebung einfacher Einzelpflanzenparameter (z.B. Höhe oder Breite) mit einer sehr hohen Präzision erfolgen kann. Die durchschnittliche Messabweichung beträgt hier nur ca. 1 mm. Bei komplizierter zu berechnenden Einzelpflanzenparametern wie z.B. dem Volumen der konvexen Hülle oder der projizierten Blattfläche sind die durchschnittlichen Abweichungen zum Referenzmesswert größer. Dies ist jedoch wahrscheinlich nicht auf strukturelle Fehler in der Erhebung dieser Parameter zurückzuführen, sondern vielmehr auf ein unvollständiges 3D-Modell der Referenzpflanze.

Um die Beständigkeit der Referenzpflanze zu validieren, wurde sie im Projektjahr 2022 in die laufenden Feld- und Gewächshausversuche integriert und mehrfach vermessen. Die Ergebnisse zeigen, dass die Referenzpflanze formstabil ist und nur geringe Abweichungen aufweist, selbst nach längerer Nutzung und unter verschiedenen Umwelteinflüssen. Über den Einsatz von 3D-Druck für eine präzise und nachvollziehbare Erhebung von geometrischen Parametern in der Pflanzenphänotypisierung wurde im Jahr 2024 ein wissenschaftlicher Artikel im Fachjournal GigaScience veröffentlicht².

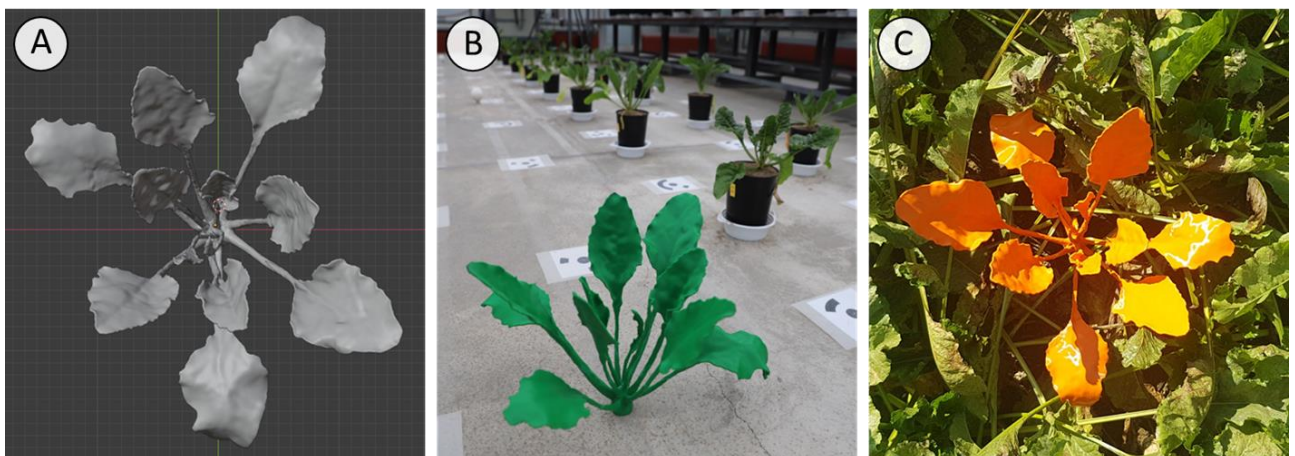


Abbildung 3: Bearbeitetes 3D-Modell der druckbaren Referenzpflanze auf Basis von LiDAR-Scans (A). B) zeigt eine gedruckte Referenzpflanze im Gewächshausversuch, C) innerhalb einer Versuchspartelle in einem Feldversuch.

² Bömer J, Esser F, Marks EA, Rosu RA, Behnke S, Klingbeil L, et al. A 3D printed plant model for accurate and reliable 3D plant phenotyping. GigaScience; 2024. <https://doi.org/10.1093/gigascience/giae035>

1.3 Einfache Parametrisierung des Blattapparates

Auf Grundlage der mit dem Laserscanner erstellten 3D-Modelle von Einzelpflanzen aus den Gewächshausversuchen des IfZ konnte 2021 eine automatisierte Pipeline für die einfache Parametrisierung des Blattapparates entwickelt werden. Die Pipeline umfasst die Extraktion der Einzelpflanzen aus der Projektpunktwolke, die Beseitigung von Messfehlern sowie die Merkmalerhebung. Die erhobenen Merkmale sind in Abbildung 4 dargestellt. Konkret können die Pflanzhöhe und -breite, die konvexe Hülle und die projizierte Blattfläche ermittelt werden. Weitaus komplexere Parameter können nach der erfolgreichen Segmentierung der Einzelblätter erhoben werden (Abbildung 4 F - I). Im Projektjahr 2022 wurden dafür insgesamt vier neue Einzelpflanzenmerkmale entwickelt. Es wurde eine Methode entwickelt, die Punktverteilung im 3D-Modell einer Einzelpflanze über die XY-Ebene (Abbildung 4 F) sowie über die Z-Achse (Abbildung 4 G) zu beschreiben. Die Punktverteilung in diesen Ebenen spiegelt bei niedrigem Verdeckungsgrad der Punktwolke die Biomasseverteilung der Pflanze wider. Auch die Merkmale der Alpha-Shape Oberfläche (Abbildung 4 H) und der Voxel Parameter (Abbildung 4 I) sollen Unterschiede in den Wachstumsformen verschiedener Genotypen beschreiben. Dies wird im Fall der Alpha-Shape Oberfläche durch eine Vernetzung der Punktwolke mit ansteigender Maschengröße erreicht. Bei der Erhebung der Voxel Parameter (Anzahl, Oberfläche, Volumen der Voxel) wird dies durch eine stetig stärker werdende „Verpixelung“ der Punktwolke erreicht. Alle neu entwickelten Merkmale geben auf verschiedene Weise Aufschluss über den Wachstumstyp der Einzelpflanze und wurden im Rahmen des Seminars „Terrestrisches Laserscanning 2022“ des DVW e. V. – Gesellschaft für Geodäsie,

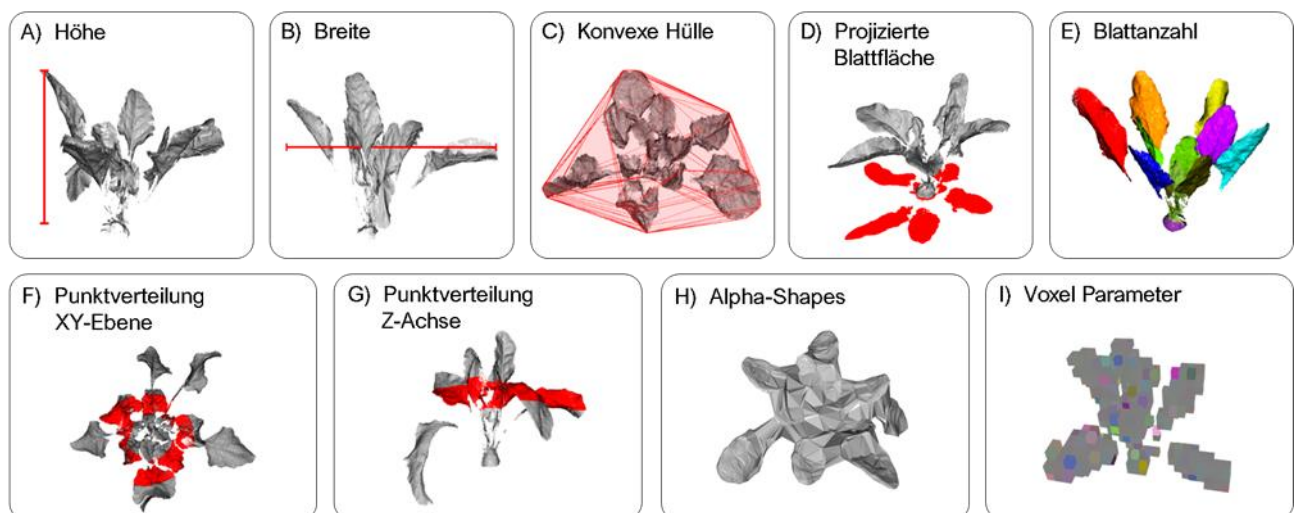


Abbildung 4: Phänotypische Merkmale, welche von der 3D-Punktwolke einer Zuckerrübenpflanze abgeleitet werden können. Die A) Pflanzhöhe und B) -breite, C) konvexe Hülle und die D) projizierte Blattfläche gehören zu den einfach zu erhebenden Merkmalen. Nach erfolgreicher Segmentierung der Punktwolke können komplexere Merkmale wie E) die Blattanzahl erhoben werden. Merkmale F) und G) geben einen Einblick in die Punktverteilung über verschiedene Betrachtungsebenen. Die Merkmale H) Alpha-Shape Oberfläche und I) Voxel Parameter geben jeweils Aufschluss über die Dichte der Punktwolke.

Sachbericht zum Verwendungsnachweis RegisTer – (28-D-K1.08C-20) – IfZ Geoinformation und Landmanagement veröffentlicht³ und ebenfalls auf der 16. Zuckerrüben Tagung in Göttingen im Jahr 2023 präsentiert.

Zusammenfassend lässt sich sagen, dass auf Basis von Punktwolken von Einzelpflanzen eine einfache Parametrisierung des Blattapparates einzelner Pflanzen durch eine Pipeline erfolgen kann. Merkmale, welche die grundlegende geometrische Struktur der Pflanze beschreiben, können zuverlässig und automatisch erhoben werden.

1.4 Zeitreihenanalysen und Erkennung von 3D Sortenunterschieden innerhalb der Vegetationsentwicklung

Für die Erkennung von Sortenunterschieden innerhalb der Vegetationsentwicklung wurden die in Abschnitt 1.3 entwickelten Einzelpflanzenparameter genutzt. Durch die zuverlässige Etablierung der automatischen Parameterextraktion konnten für alle Einzelpflanzenparameter Zeitreihenanalysen durchgeführt werden und Sortenunterschiede innerhalb der Vegetationsentwicklung erkannt werden. In Kombination mit den erhobenen zeitlich hochauflösenden Datensätzen konnte eine objektive Zeitreihenanalyse der Parameterentwicklung durchgeführt werden. In Abbildung 5 werden ausgewählte Einzelpflanzenparameter und deren Entwicklung im Zeitverlauf dargestellt. Die Daten stammen aus den durchgeführten Gewächshausversuchen. Bei allen Parametern können neben unterschiedlichen absoluten Messwerten an den verschiedenen Zeitpunkten der Datenaufnahme teils deutliche Unterschiede in der Entwicklung des jeweiligen Merkmals festgestellt werden.

Ein Beispiel hierfür ist die Entwicklung der Einzelpflanzenhöhe (Abbildung 5 A) der Genotypen 1 und 4. Während Genotyp 1 sein Maximum in der Ausprägung dieses Merkmals bereits 64 Tage nach der Aussaat erreicht und anschließend leicht reduziert, entwickelt sich die Einzelpflanzenhöhe bei Genotyp 4 zunächst langsamer und erreicht erst 78 Tage nach der Aussaat ihr Maximum. Dieses liegt jedoch deutlich über dem von Genotyp 1. Eine vollkommen gegenteilige Parameterentwicklung ist bei Genotyp 5 festzustellen, welcher am ersten Messtermin den höchsten absoluten Messwert der Einzelpflanzenhöhe aller Genotypen aufweist. Anschließend verringert sich dessen Höhe im Verlauf des Experiments kontinuierlich.

Als weiteres Beispiel konnten auch bei der Verteilung der Punkte einer Punktwolke über die Z-Achse deutliche Unterschiede erkannt werden. In Abbildung 5 B ist die Punktverteilung für die obersten 20 % einer Punktwolke in Prozent dargestellt. Bei diesem Parameter sind, neben deutlichen absoluten Unterschieden in der Parameterausprägung zu Beginn der Messungen, zwei Trends im Entwicklungsverlauf erkennbar. Die Werte für die Genotypen 2, 6, und 8 zeigen über den gesamten Messzeitraum einen konstant schwach abfallenden Trend. Im Gegensatz dazu fällt der Wert der Punktverteilung bei den Genotypen 1, 3, 5, und 7 nach dem ersten Messtermin teils sehr stark ab.

³ Bömer J, Paulus S, Mahlein A-K. Nutzung von Laserscans zur Ableitung von Sortenbeschreibungsmerkmalen in Zuckerrüben. *Terrestrisches Laserscanning 2022 (TLS 2022)*, Band 104; 105-125. 2022.

https://geodaesie.info/images/schriftenreihe/downloads/DVW_104_2022_TLS_2022_FINAL_221122.pdf.

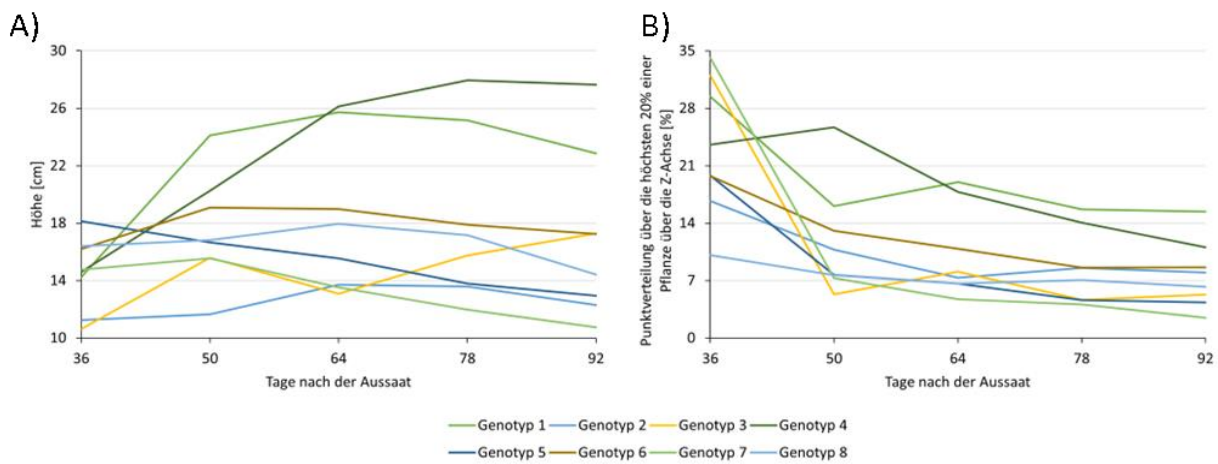


Abbildung 5: 3D-Sortenunterschiede verschiedener Zuckerrübengenotypen im Zeitverlauf (36 - 92 Tage nach der Aussaat) für die Merkmale Höhe (A) und Punkteverteilung über die Z-Achse (B).

Anschließend zeigen auch diese Genotypen einen schwach abfallenden Trend. Diese deutliche Veränderung der Parameterausprägung wird nur durch eine Betrachtung der gesamten Zeitreihe von 3D-Messungen möglich.

Die aufgeführten Beispiele deuten darauf hin, dass verschiedene Zuckerrübengenotypen nicht nur anhand absoluter Messwerte eines Zeitpunktes unterschieden werden können. Die Generierung von 4D-Datensätzen (3D-Datensätze + zeitliche Komponente) und eine anschließende Zeitreihenanalyse mit Fokus auf die Ausprägung und Veränderung von Sortenunterschieden innerhalb der Vegetationsentwicklung können potenziell wichtige Informationen über geometrische Eigenschaften verschiedener Genotypen liefern.

1.5 Entwicklung von Einzelpflanzen und Abschätzung des Beitrages der Geometrie zur Beschreibung von Sortenunterschieden im Vergleich zu RGB

Um die Entwicklung von Einzelpflanzen zu untersuchen sowie eine differenzierte Abschätzung des Beitrages der Geometrie zur Beschreibung von Sortenunterschieden im Vergleich zu RGB vornehmen zu können, musste zuerst die Betrachtungsebene definiert werden, auf der die Abschätzung getätigt wird. Hochauflösende 3D-Sensoren, wie der im Projekt genutzte Laserscanner, ermöglichen die Betrachtung verschieden aufgelöster Ebenen für die Beschreibung von Sortenunterschieden. Von der detaillierten Formanalyse einzelner Blätter über die Beschreibung der Entwicklung einzelner Pflanzen bis hin zur Strukturanalyse ganzer Versuchspartzen können dank der im Projekt erhobenen hochaufgelösten 3D-Datensätze unterschiedliche Betrachtungsebenen analysiert und die Entwicklung von Einzelpflanzen verfolgt sowie eine präzise Abschätzung des Beitrages der Geometrie zur Beschreibung von Sortenunterschieden im Vergleich zu RGB vorgenommen werden.

Jede der genannten Ebenen bietet durch die unterschiedliche Skala der Betrachtung vielfältige Möglichkeiten einen Beitrag der Geometrie sowie die Entwicklung von Einzelpflanzen abzuleiten. Um eine möglichst vollumfängliche Betrachtung zu gewährleisten, wurden für die Ebenen der Einzelblätter, Einzelpflanzen und Versuchspartzen individuelle Experimente durchgeführt, die

zusammengefasst eine breit aufgestellte Abschätzung des Beitrages der Geometrie zur Beschreibung von Sortenunterschieden im Vergleich zu RGB ermöglichen. Die durchgeführten Analysen und deren Ergebnisse werden in den folgenden Abschnitten 1.5.1 bis 1.5.3 detailliert erläutert.

Um eine repräsentative Datengrundlage für die folgenden Analysen bereitzustellen, wurde im Projektjahr 2023 ein Feldversuch am Standort Göttingen (51°33'40.8"N 9°54'47.8"E) durchgeführt, welcher auch von den Projektpartnern Pheno-Inspect und Universität Bonn zur Datenaufnahme genutzt wurde (Abbildung 6). Der Feldversuch umfasst 16 verschiedene Zuckerrübensorten, die in drei Wiederholungen in Parzellen der Größe 12,0 x 5,4 m angebaut wurden. Die Auswahl der angebauten Sorten erfolgte in Absprache mit den Projektpartnern des BSA sowie dem Züchtungsunternehmen KWS SAAT. Es wurden gezielt Sorten ausgewählt, welche eine möglichst differenzierte phänotypische Ausprägung von in den Zulassungsprüfungen des BSA manuell gemessenen oder bonitierten geometrischen Merkmalen aufweisen. Hierzu gehören beispielsweise die Blattlänge oder die Blatthaltung. Für die Datenaufnahme mit dem Laserscanner wurde die neu entwickelte mobile Messmethode unter Verwendung der in Abbildung 1 C dargestellten automatisierten Trägerplattform genutzt. Diese Methode ist in Abschnitt 1.1 beschrieben. Somit konnten an mehreren aufeinanderfolgenden Zeitpunkten erfolgreich präzise Datensätze erhoben werden (Abbildung 2), welche die bisher im Projektverlauf aufgenommenen Datensätze vervollständigen. Die Analyse der in Projektjahr 2023 erhobenen Daten auf verschiedenen Betrachtungsebenen ist Gegenstand der folgenden Abschnitte.

1.5.1 Einzelblattebene

Für die Abschätzung des Beitrages der Geometrie zur Beschreibung von Sortenunterschieden im Vergleich zu RGB auf der Blattebene wurde ein Vergleich der Erhebung des Merkmals Blattlänge durch zwei- bzw. drei-dimensionale Messverfahren durchgeführt. Dafür wurden Einzelpflanzen zuerst dreidimensional und im direkten Anschluss invasiv durch ein zweidimensionales Messverfahren vermessen. Dieses Merkmal ist von praktischer Relevanz, da es ebenfalls in den Sortenprüfungen des Bundessortenamtes manuell erhoben wird. Die Daten für diesen Versuch wurden im oben beschriebenen Feldversuch in Projektjahr 2023 erhoben. Hierzu wurden insgesamt vier Zuckerrübensorten ausgewählt, aus deren Versuchspartzen nach der dreidimensionalen

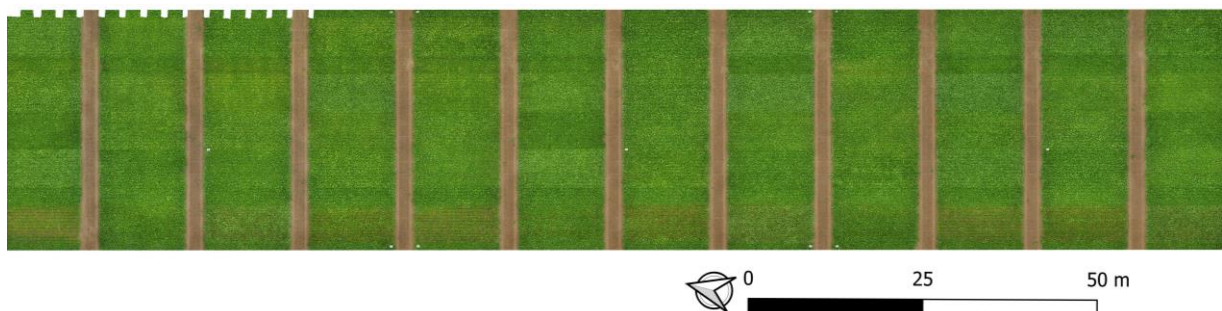


Abbildung 6: Zusammengesetztes Luftbild des in der Saison 2023 durchgeführten Feldversuchs am Institut für Zuckerrübenforschung in Göttingen.

Datenaufnahmen mit der optimierten mobilen Messplattform invasiv die Blätter von drei Einzelpflanzen entnommen werden konnten.

Da die zweidimensionalen Einzelblattmessungen als Referenzmessungen genutzt werden sollen, musste ein zuverlässiges und präzises zweidimensionales Messverfahren etabliert und evaluiert werden. Das entwickelte Messverfahren nutzt eine gebräuchliche Spiegelreflexkamera, um im Feld Aufnahmen der Einzelblätter anzufertigen (siehe Abbildung 7). Durch die Aufnahme eines Kalibrationsbildes (Schachbrettmuster) und die Berechnung einer Transformationsmatrix können die Aufnahmen der Einzelblätter nachträglich automatisiert bearbeitet werden. In diesen Schritt werden Aufnahmewinkel und Objektivverzerrung korrigiert, sodass das aufgenommene Einzelblatt verzerrungsfrei dargestellt werden kann und die noch zu erhebende Blattlänge nicht verfälscht wird (Abbildung 7 A und B). Im Anschluss wurde durch eine nachgelagerte Bildbearbeitung eine Blattmaske erstellt. Die Extraktion der Blattlänge wird durch die Erkennung des Stilansatzes und der Blattspitze ermöglicht (Abbildung 7 C). Zur Evaluierung des Messverfahrens wurden 50 Einzelblätter von Zuckerrübenpflanzen zuerst händisch mit Hilfe eines Lineals vermessen, und anschließend durch das beschriebene Messverfahren vermessen. Die digital erhobenen Blattlängenmessungen korrelieren hochsignifikant mit den händischen Messwerten mit einem Korrelationskoeffizienten von 0,99 und einem mittleren Abweichungsquadrat von 0,31 cm. Das etablierte System für die Erstellung von zweidimensionalen Referenzmessungen der Blattlänge kann demnach als hochgenau beschrieben werden und bildet eine gute Basis für den angestrebten Vergleich mit dreidimensionalen Blattlängenmessungen.

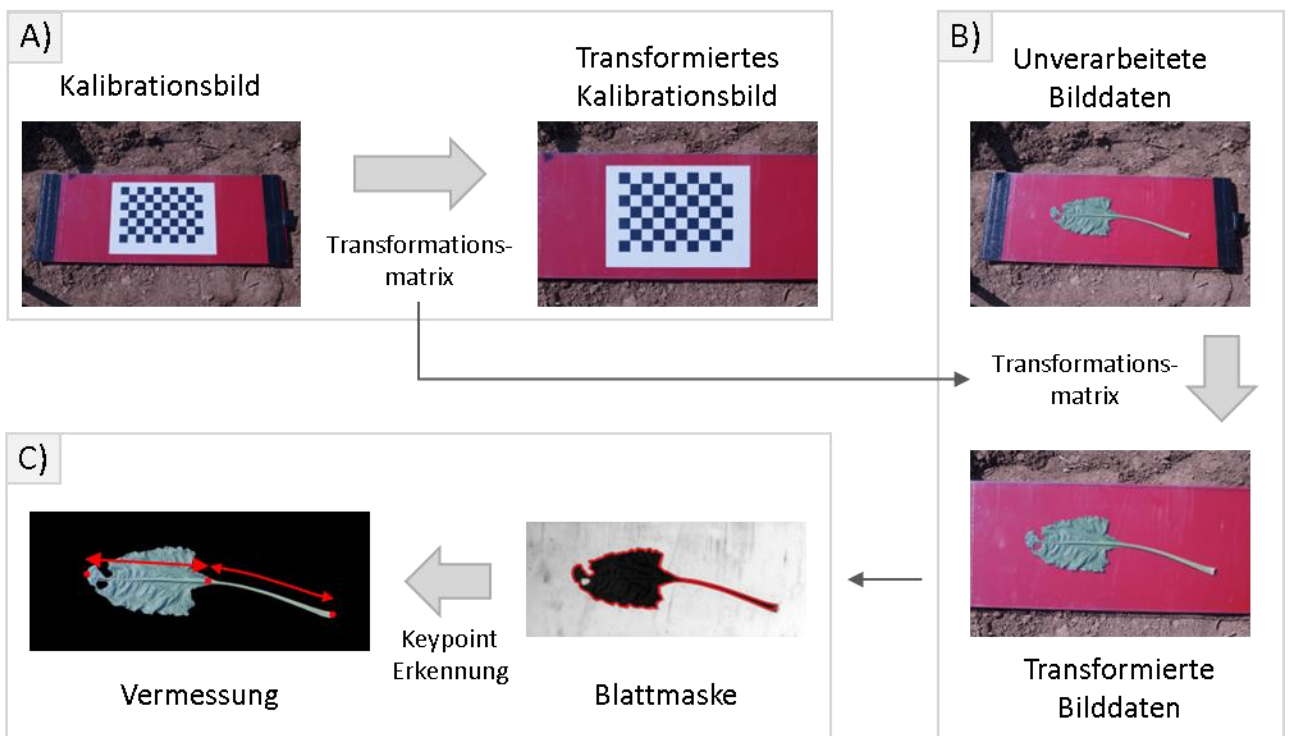


Abbildung 7: Workflow für die automatisierte zweidimensionale Vermessung der Blattlänge, welche als Referenzmessung dient. Zuerst wird eine Transformationsmatrix für die Korrektur der Bilddaten berechnet (A). Im Anschluss werden die Bilddaten transformiert (B). Durch die Erstellung von Blattmasken werden Keypoints erkannt, mit denen einzelne Blätter vermessen werden (C).

Die dreidimensionalen Daten für den Vergleich der Messergebnisse wurden unter Verwendung des in Abschnitt 1.1 beschriebenen, neuen mobilen Messverfahrens erhoben und sind in Abbildung 8 dargestellt. Zuerst wurden die für den Versuch geernteten Einzelpflanzen im 3D-Modell des Versuchsfelds identifiziert und extrahiert. Im Anschluss wurden die Einzelpflanzen manuell gelabelt, sodass die 3D-Punktwolken der Einzelblätter einer Pflanze den dazugehörigen zweidimensionalen Messwerten zugeordnet werden konnten. Als nächstes wurde die dreidimensionale Blattlänge manuell sowie automatisch erhoben, wodurch das Potential einer automatisierten Merkmalerhebung besser abgeschätzt werden kann.

Für die manuelle Erhebung der dreidimensionalen Blattlänge wurde die Open-Source-Software CloudCompare zur Verarbeitung und Visualisierung von 3D-Punktwolken genutzt. Durch händisches Annotieren einzelner Messpunkte wurde der Pfad des Stängels nachgebildet und anschließend vermessen (Abbildung 8). Die automatische Erhebung der dreidimensionalen Blattlänge wurde durch die Projektpartner der Universität Bonn durchgeführt. Dafür wurde ein dreidimensionales Blattmodell an die Punktwolkendaten der Einzelblätter angepasst und entsprechend verformt. Die geometrischen Eigenschaften des Blattes inklusive der Blattlänge wurden im Anschluss aus dem Blattmodell extrahiert.

Die Ergebnisse des Vergleichs der zweidimensionalen Referenzmessungen und der manuell bzw. automatisch extrahierten dreidimensionalen Blattlängenmessungen sind in Abbildung 9 dargestellt. Es wurde eine Korrelationsanalyse durchgeführt, um den Zusammenhang der unterschiedlichen Messmethoden zu überprüfen. Dabei ergab sich eine starke positive Beziehung, die darauf hindeutet, dass zweidimensionale und dreidimensionale Messmethoden der Blattlänge von Zuckerrüben konsistent vergleichbare Ergebnisse liefern. Die manuelle Erhebung der dreidimensionalen Blattlänge weist einen geringfügig höheren Korrelationskoeffizienten ($R^2=0,89$) auf als die automatisch erhobene Blattlänge ($R^2=0,83$). Dies ist auf die exakte händische Annotation des Stängels zurückzuführen. Im Gegensatz zur automatischen Merkmalerhebung ist die manuelle Erhebung jedoch arbeitsintensiv und zeitaufwändig.

Die Ergebnisse des Versuchs zeigen, dass die zweidimensionale Erhebung des Merkmals Blattlänge durch dreidimensionale Messverfahren und eine automatische Merkmalerhebung

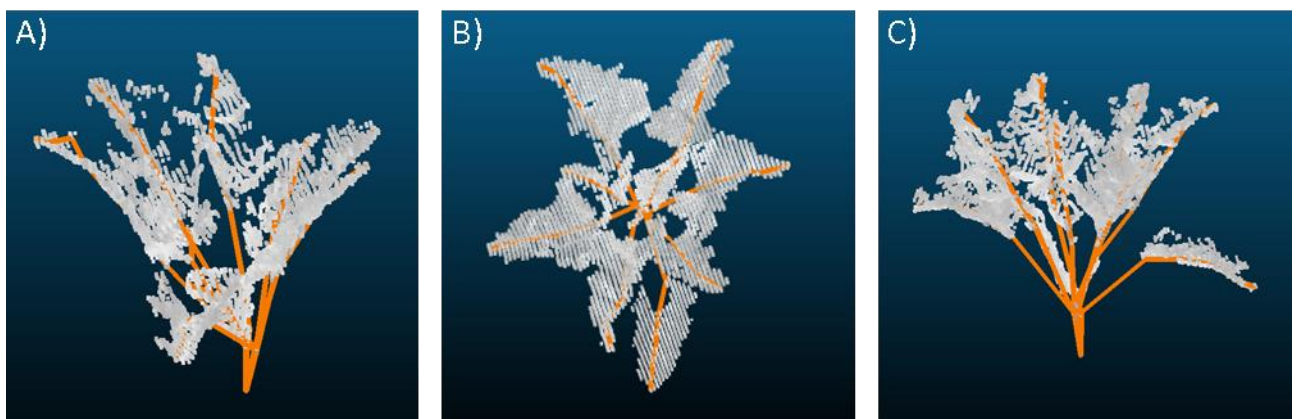


Abbildung 8: Punktwolke einer Einzelpflanze aus drei verschiedenen Blickwinkeln (A: isometrisch, B: nadir, C: lateral). Die orangenen Linien repräsentieren die gemessene Strecke zur Ermittlung der Blattlänge für jedes Einzelblatt.

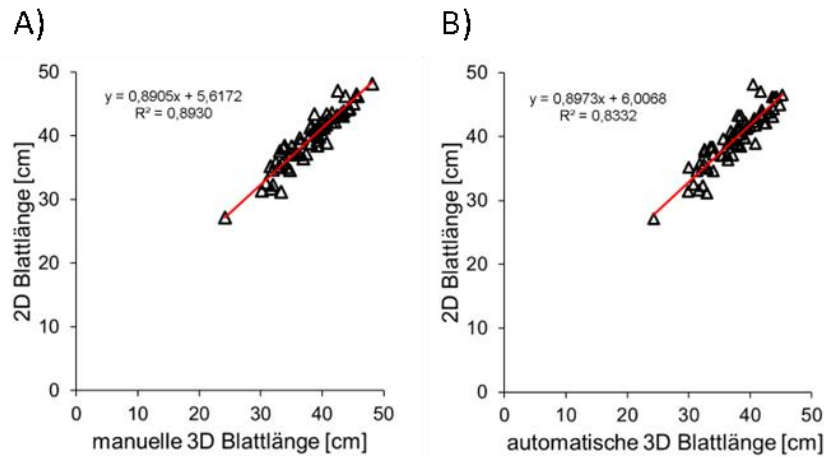


Abbildung 9: Korrelationsdiagramm zwischen der 2D Blattlänge und der manuell erhobenen 3D-Blattlänge (A) und der 2D Blattlänge und der automatisch erhobenen 3D-Blattlänge (B) (n=65).

präzise nachgeahmt werden kann. Das dreidimensionale Messverfahren bietet zudem mehrere Vorteile. Neben einem deutlich höheren Durchsatz an Einzelpflanzen bzw. Einzelblättern in geringerer Zeit arbeitet das entwickelte Verfahren nicht invasiv. Dem zufolge müssen keine Pflanzen aus einer Versuchsparzelle entnommen werden, was einen Einsatz in den elementaren Sortenzulassungsversuchen des Bundessortenamts ermöglicht. Die genannten Eigenschaften der dreidimensionalen Messverfahren deuten allgemein auf eine hohe Praxistauglichkeit hin. Zusätzlich wird durch nicht-invasive Messverfahren die Erhebung von Zeitreihen und eine damit einhergehenden Zeitreihenanalyse ermöglicht. Die Veränderung eines morphologischen Merkmals über die Zeit kann wichtige Informationen für die Differenzierung verschiedener Zuckerrübenotypen bereitstellen, wie bereits in Abschnitt 1.4 erläutert. Im Gegensatz zu zweidimensionalen Messverfahren ermöglicht die nicht-invasive Vorgehensweise von 3D-Sensoren somit potenziell die Erhebung neuartiger temporal-morphologischer Merkmale.

1.5.2 Einzelpflanzenebene

Um die Entwicklung von Einzelpflanzen sowie den Beitrag der Geometrie zur Beschreibung von Sortenunterschieden im Vergleich zu RGB auf Einzelpflanzenebene zu analysieren, wurde im Projektjahr 2023 ein weiteres Experiment durchgeführt. Ziel war die Prüfung der Beziehung von Frisch- bzw. Trockengewicht des Blattapparats und der Anzahl an Punkten in dessen 3D-Modell zu verschiedenen Zeitpunkten im Verlauf der Vegetationsentwicklung von Zuckerrüben. Die Entwicklung der oberirdischen Biomasse ist in der Pflanzenzüchtung sowie in der praktischen Landwirtschaft von Bedeutung. Durch die Überwachung des Blattapparates lassen sich Rückschlüsse auf die Entwicklung und den allgemeinen Gesundheitszustand der Pflanze ziehen. Um die volle Photosyntheseleistung zu erbringen und einen hohen Zuckerertrag zu erreichen, ist ein gesunder und voll ausgebildeter Blattapparat entscheidend. Im Hinblick auf eine bestmögliche Unkrautunterdrückung ist eine schnelle Entwicklung des Blattapparates von Vorteil. Zur Untersuchung des Blattapparates werden heutzutage in großem Maßstab zweidimensionale Messverfahren eingesetzt, die sich in vielen Phänotypisierungsszenarien bewährt haben. Die Erfassung der dreidimensionalen Struktur des Blattapparates ist jedoch nur mithilfe von 3D-

Sensoren möglich. Die nachfolgende Analyse zeigt ein Konzept für die Ableitung der gebildeten oberirdischen Biomasse bei Zuckerrüben aus 3D-Daten.

Für die Modellentwicklung und als Referenz wurden vier Sorten aus dem Feldversuch in Göttingen zu drei Zeitpunkten in der Vegetationsperiode mit ca. 14 Tagen Abstand invasiv beerntet. Hierfür wurden jeweils zwölf Einzelpflanzen dreidimensional vermessen und anschließend für die Bestimmung von Frisch- und Trockenmasse entnommen. Für die dreidimensionale Datenaufnahme wurde der optimierte mobile Messaufbau verwendet. Die Punktwolken der Einzelpflanzen wurden manuell extrahiert und auf einen gleichmäßigen Punktabstand von 2 mm gerastert. Durch den entstandenen Datensatz konnte die Beziehung von Frisch- und Trockengewicht und der Anzahl an Punkten im 3D-Modell durch eine Korrelationsanalyse analysiert werden (Abbildung 10).

Die Ergebnisse zeigen zu allen drei Zeitpunkten eine gute bis sehr gute Korrelation der erhobenen Merkmale. Zudem ist eine hohe Übereinstimmung der Korrelationen zwischen entweder Frisch- oder Trockenmasse und der Anzahl an Punkten im 3D-Modell erkennbar. Es ist kein eindeutiger Trend zugunsten einer Gewichtsangabe festzustellen, sodass bei zukünftigen Anwendungen der Methodik lediglich die leichter zu erhebende Frischmasse erhoben werden sollte.

Des Weiteren wurde beobachtet, dass der Korrelationskoeffizient zum zweiten Messtermin hin stark ansteigt und zum dritten Messtermin wieder leicht sinkt. Es wird angenommen, dass unter Verwendung des vorgestellten Messsystems die gebildete Biomasse einer Pflanze in frühen Entwicklungsstadien der Zuckerrübe zu gering ist, um eine hohe Korrelation mit den Punkten im dazugehörigen 3D-Modell zu erreichen. Zum zweiten Messtermin ist eine deutliche

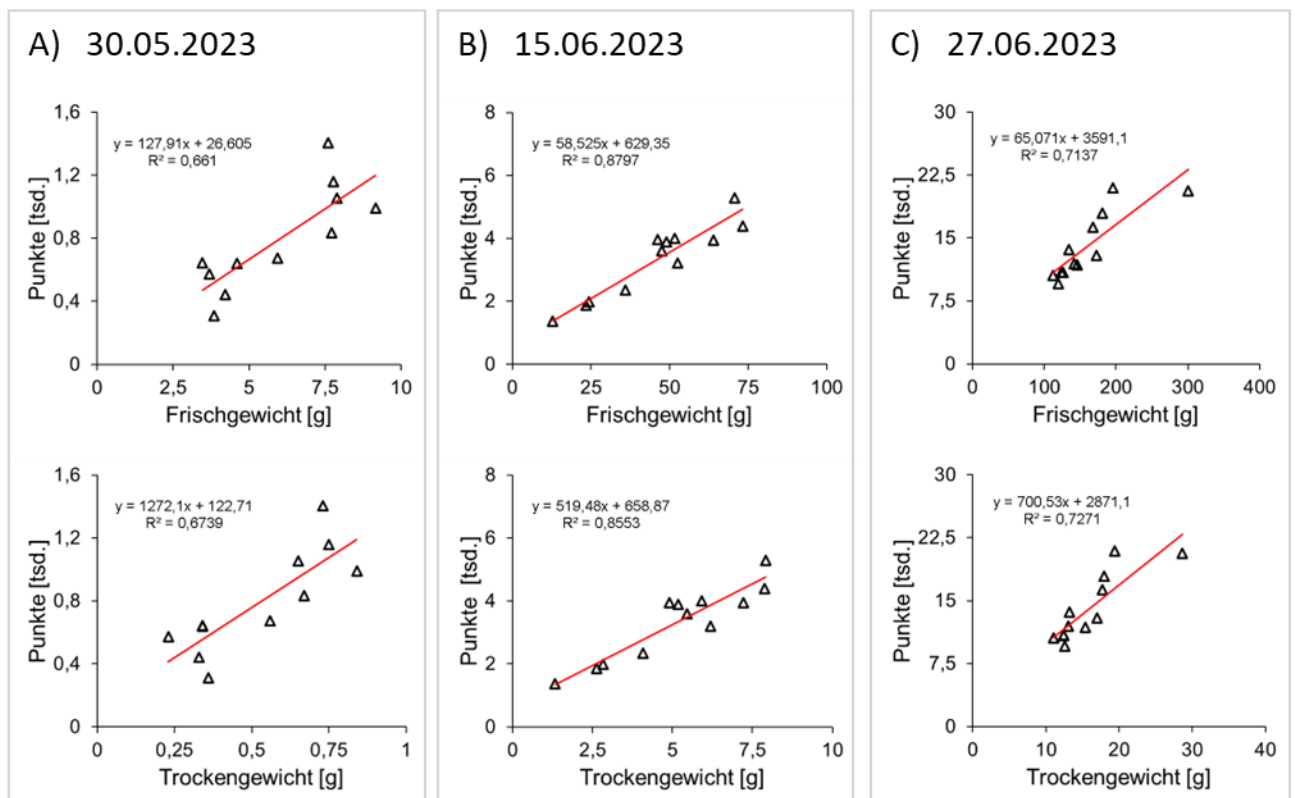


Abbildung 10: Korrelation von Trocken- bzw. Frischgewicht und der Anzahl von Punkten im 3D-Modell von Zuckerrübenpflanzen zu drei verschiedenen Zeitpunkten in der Vegetationsperiode (n = 12).

Gewichtszunahme der Einzelpflanzen festzustellen, womit mehr Pflanzenmasse für die 3D-Rekonstruktion zur Verfügung steht und der durchschnittliche Fehler der Rekonstruktion sinkt. Dadurch kann eine höhere Abhängigkeit des Frisch- bzw. Trockengewicht des Blattapparats und der Anzahl an Punkten in dessen 3D-Modell festgestellt werden. Zum dritten Messtermin ist erneut eine Gewichtszunahme zu verzeichnen, jedoch ist der Korrelationskoeffizient niedriger als am zweiten Messtermin. Dies ist mit hoher Wahrscheinlichkeit auf die steigende Komplexität des Blattapparates und dem damit verbundenen höheren Verdeckungsgrad des 3D-Modells zurückzuführen.

Die stark signifikante Korrelation der Pflanzenbiomasse des Blattapparates und der Punkte im dazugehörigen 3D-Modell am zweiten Messzeitpunkt verdeutlicht, dass die Biomasse des Blattapparates von Zuckerrüben mit hoher Genauigkeit aus einem 3D-Modell des Blattapparates abgeleitet werden kann. Die niedrigere Korrelation der Parameter an früheren und späteren Messzeitpunkten zeigt jedoch, dass die Stärke der Korrelation über die Vegetationsperiode variiert und von der eingesetzten Messtechnik abhängig ist. Die durchgeführte Korrelationsanalyse zeigt, dass die Entwicklung von Zuckerrübeneinzelpflanzen zu verschiedenen Zeitpunkten sowie in der Zeitreihe effektiv und mit hohem Durchsatz überwacht und analysiert werden kann und veranschaulicht eine Einsatzmöglichkeit von 3D-Sensoren für die Beschreibung von Unterschieden in der Geometrie von Zuckerrübeneinzelpflanzen.

1.5.3 Parzellenebene

Die Parzellenebene wurde als räumlich größte Betrachtungsebene gewählt, um den Beitrag der Geometrie zur Beschreibung von Sortenunterschieden im Vergleich zu RGB abzuschätzen. Ziel der nachfolgenden Analyse ist die Untersuchung der Eignung von 3D-Parametern auf Parzellenebene für eine Unterscheidung von Zuckerrübensorten. Hierfür wurden Datensätze aus dem Feldversuch in Göttingen genutzt, welche mit dem mobilen Messaufbau erhoben wurden.

Für die Analyse wurden alle 16 Sorten aus dem Feldversuch in Göttingen zum Zeitpunkt des Reihenschlusses untersucht. Für die dreidimensionale Datenaufnahme wurde der optimierte mobile Messaufbau verwendet. Nach der Zusammensetzung der Rohdaten konnten die einzelnen Parzellen auf Grundlage ihrer Koordinaten automatisch extrahiert werden. Um eine größere Anzahl von Wiederholungen für die statistische Analyse zu erhalten, wurden die einzelnen Parzellen des Feldversuchs jeweils in drei Teilparzellen der Größe 4,0 x 5,4 m aufgeteilt.

Für die Erhebung morphologischer Merkmale auf Parzellenebene musste nach der standardisierten Beseitigung von Messfehlern und -ausreißern der Boden maskiert werden. Für diesen Zweck wurde ein lineares Klassifizierungsmodell trainiert, welches anhand der Position und der Laser-Intensität eines Punktes eine Zuordnung des Punktes in die Klassen „Boden“ oder „Pflanze“ vornimmt. Die Ergebnisse dieses Modells sind in Abbildung 11 A dargestellt. Nach der Beseitigung des Bodens blieben nur die Punkte der Klasse „Pflanze“ im 3D-Modell des Plots erhalten (Abbildung 11 B). Dieses Modell stellt die Datenbasis für die nachfolgende Analyse dar.

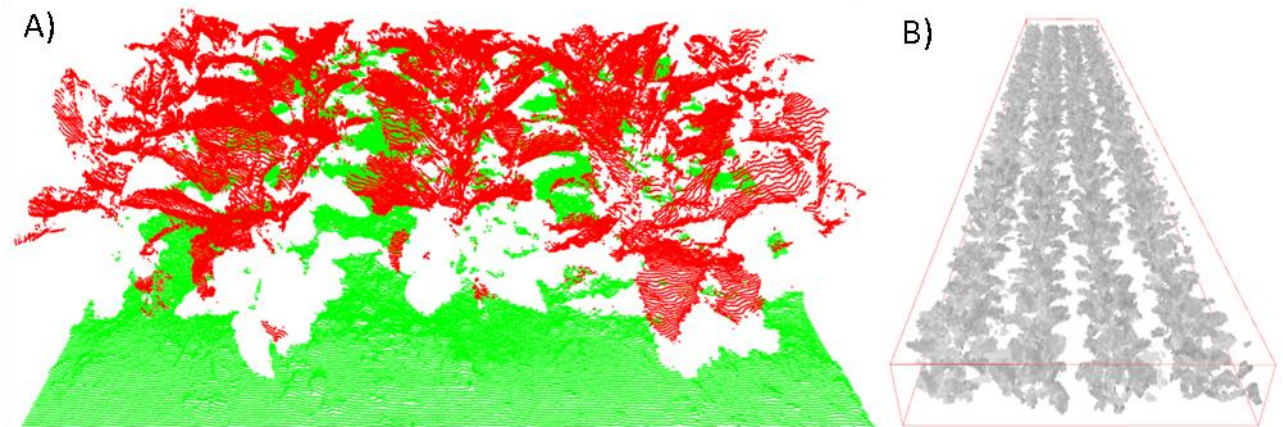


Abbildung 11: Illustration des Boden-Pflanze-Klassifikators (A) (Boden: grün, Pflanze: rot) und einer Versuchsparzelle nach Anwendung des Klassifikators (B).

Zur Unterscheidung der verschiedenen Sorten wurden aus den Parzellen drei phänotypische Parameter extrahiert. Als erstes wurde die maximale Höhe der Parzelle als Mittelwert der höchsten 5% aller Messpunkte der Parzelle berechnet. Zudem wurde die mittlere Höhe der Parzelle als Mittelwert aller Messpunkte berechnet. Als letztes wurde ein neuer Parameter entwickelt, welcher die Verteilung und Häufigkeit der Blatthaltung beschreibt. Dafür wurden die Normalen der Punktwolke berechnet und die Verteilung der Winkel zur Z-Achse im kartesischen Koordinatensystem als Histogramm geplottet. Anschließend wurde die Steigung der Geraden zwischen der niedrigsten und höchsten Verteilung berechnet.

Auf Grundlage der extrahierten Parzellenparameter wurden die 16 Sorten im Anschluss einer Varianzanalyse (ANOVA) unterzogen. Die Ergebnisse zeigen, dass es bei allen drei Parametern signifikante Unterschiede zwischen den Mittelwerten der 16 untersuchten Zuckerrübensorten gibt (Signifikanzlevel $p=0,05$). Um festzustellen, welche der Sorten sich voneinander unterscheiden, wurde ein Post-Hoc-Test (Tukey HSD) durchgeführt. Die Ergebnisse sind in Abbildung 12 dargestellt. Obwohl die ANOVA-Ergebnisse signifikante Unterschiede zwischen den Sorten zeigen und viele der Tukey HSD-Vergleiche diese Unterschiede bestätigen, gibt es einige Sorten, die sich nicht signifikant voneinander unterscheiden. Die Gruppierungen der Mittelwerte zeigt eine gewisse Überlappung zwischen den Sorten, was darauf hindeutet, dass nicht alle Sorten perfekt trennbar sind. Die Unterschiede sind signifikant genug, um zu erkennen, dass es bei allen drei untersuchten Parametern verschiedene Sorten gibt, aber nicht alle Sorten unterscheiden sich statistisch signifikant voneinander und können voneinander getrennt werden.

1.5.4 Fazit

Die durchgeführten Experimente und Analysen auf unterschiedlichen Betrachtungsebenen zeigen, dass die Verwendung geometrischer Daten zur Erfassung von Sortenunterschieden sowie zur Beobachtung der Entwicklung von Zuckerrüben eingesetzt werden kann und gegenüber einer herkömmlichen Analyse mit RGB-Daten in einigen Fällen Vorteile bietet. 3D-Sensoren liefern präzise und umfassende Informationen über die Pflanzenstruktur und arbeiten dabei nicht invasiv, was die Generierung von Zeitreihen und die Neuentwicklung von zeitlich-dynamischen Parametern zur Sortenbeschreibung ermöglicht. Erst durch diese Zeitreihendaten wird eine detaillierte und

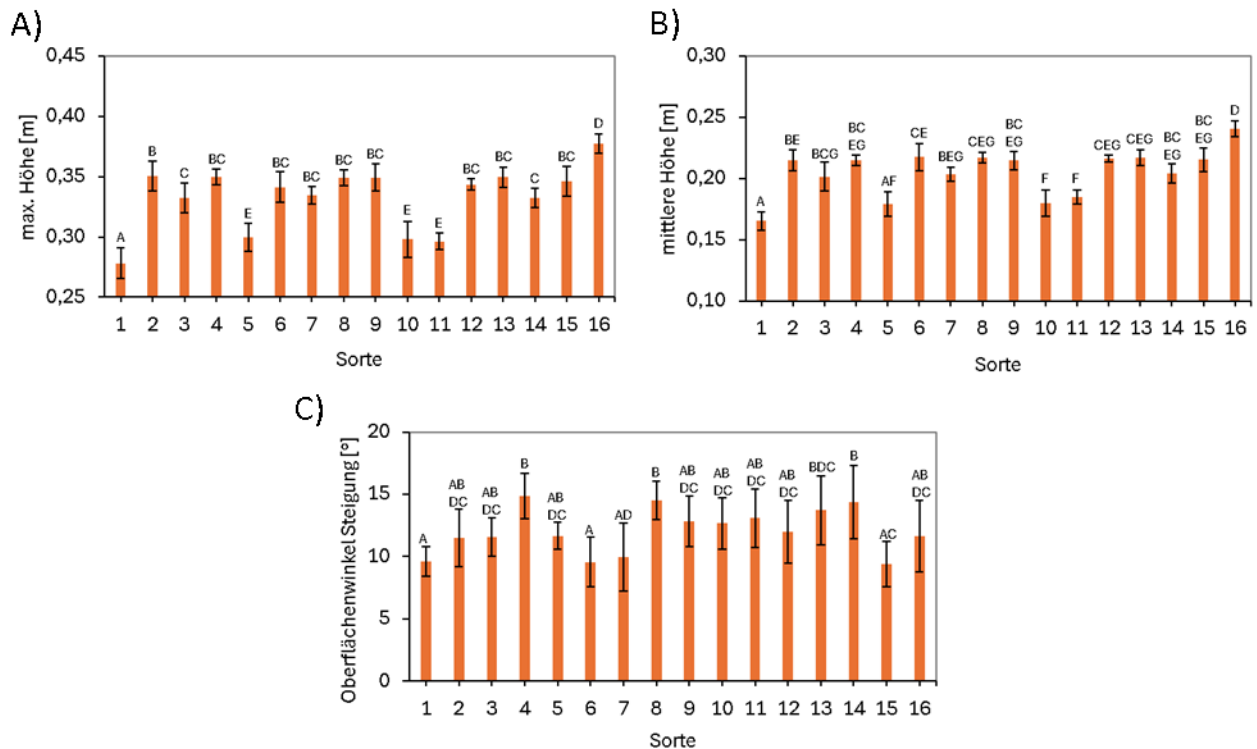


Abbildung 12: Extrahierte Parzellenparameter für die 16 analysierten Zuckerrübensorten (A: maximale Höhe, B: mittlere Höhe, C: Steigung der Oberflächenwinkelverteilung). Buchstaben indizieren eine Gruppenzugehörigkeit nach dem Tukey HSD -Test (n=9).

präzise Analyse der Entwicklung von Einzelpflanzen oder ganzen Pflanzenbeständen möglich. Die Vielfalt der durchgeführten Experimente belegt die Vielzahl an Einsatzmöglichkeiten zur Erfassung geometrischer Parameter für die Sortenunterscheidung.

Auf Einzelblattebene konnte gezeigt werden, dass die Präzision einer dreidimensionalen Merkmalerhebung sehr hoch und mit einer optimierten zweidimensionalen Vermessung vergleichbar ist. Demnach können detaillierte Parameter für eine Sortenunterscheidung aus einer geometrischen Darstellung des Blattapparates präzise erhoben werden. Einer der größten Vorteile ist, dass die Parameter nicht invasiv erhoben werden. Das Experiment validiert und verdeutlicht die Wichtigkeit des Einsatzes von 3D-Sensoren zur Erhebung der Geometrie des Blattapparates für die Sortenunterscheidung von Zuckerrüben.

Auf Einzelpflanzenebene wurde durch eine Analyse der Beziehung zwischen gebildeter Biomasse und Anzahl der Punkte im 3D-Modell gezeigt, dass anhand der Geometrie zu verschiedenen Zeitpunkten im Vegetationsverlauf der Entwicklungsstand des Blattapparates von Zuckerrübeneinzelpflanzen überwacht werden kann.

Auf Parzellenebene wird durch die durchgeführte Analyse deutlich, dass geometrische Parameter, welche aus Pflanzenbeständen abgeleitet wurden, für eine Sortenunterscheidung genutzt werden können. Parameter wie die maximale und mittlere Pflanzenhöhe sowie die Blattwinkelverteilung zeigen signifikante Unterschiede zwischen mehreren Zuckerrübensorten. Diese Parameter sind nicht durch zweidimensionale RGB-Sensoren abzuleiten.

Insgesamt ermöglichen hochaufgelöste 3D-Datensätze eine präzise und umfassende Analyse von Sortenunterschieden, indem sie detaillierte morphologische Merkmale und deren zeitliche Veränderungen erfassen können. Dies ist wertvoll für die klassische Pflanzenzüchtung, die

Sortenzulassung, sowie die praktische Landwirtschaft, da geometrischen Daten eine hohe Genauigkeit und vielseitige Anwendungsmöglichkeiten bieten. Der Beitrag der dreidimensionalen Geometrie zur Beschreibung von Sortenunterschieden erweist sich als wertvoller und vielseitiger Bestandteil einer umfänglichen Sortenbeschreibung, welcher neben zweidimensionalen RGB-Methoden zu einer besseren und automatisierten Sortenunterscheidung herangezogen werden sollte.

2 Arbeits- und Zeitplanung

Ein Überblick über die bearbeiteten Meilensteine ist in Abbildung 13 dargestellt. Der Abbildung ist zudem der Arbeitsstand zum Ende der Projektlaufzeit zu entnehmen. Die Meilensteine i) und iii) wurden bereits im Projektjahr 2021 erfolgreich abgeschlossen und gemäß 1.1 bzw. 1.3 im Projektjahr 2022 und 2023 erweitert. Die Erweiterungen ergaben sich unmittelbar aus im Projekt gewonnenen Erkenntnissen und stellen eine deutliche Optimierung der bisherigen Ergebnisse da. Der Meilenstein ii) konnte aufgrund fehlender Langzeitdatensätze im Projektjahr 2021 nicht vollständig bearbeitet werden. Das Arbeitspaket wurde im anschließenden Projektjahr 2022 bearbeitet und leicht verzögert abgeschlossen. Die Meilensteine iv) und v) wurden auf Grundlage der im Projektjahr 2021 und 2022 erhobenen Datensätze erfolgreich bearbeitet und in geplanten Zeitrahmen abgeschlossen. Die Meilensteine vi) und vii) wurden in den Projektjahren 2023 und 2024 bearbeitet. Aufgrund der Durchführung eines eigenen Feldversuchs und der sich anschließenden Datenverarbeitung wurden die Meilensteine mit leichter Verzögerung im Projektjahr 2024 vor Projektende abgeschlossen.

Alle Meilensteine wurden bis zum Projektende bearbeitet und erfolgreich abgeschlossen. Die vorgesehene Kooperation mit den Projektpartnern in den Arbeitspaketen AP 1 bis AP 5 erfolgte zielorientiert und planmäßig. Das IfZ brachte sich gemäß Projektplan ein.

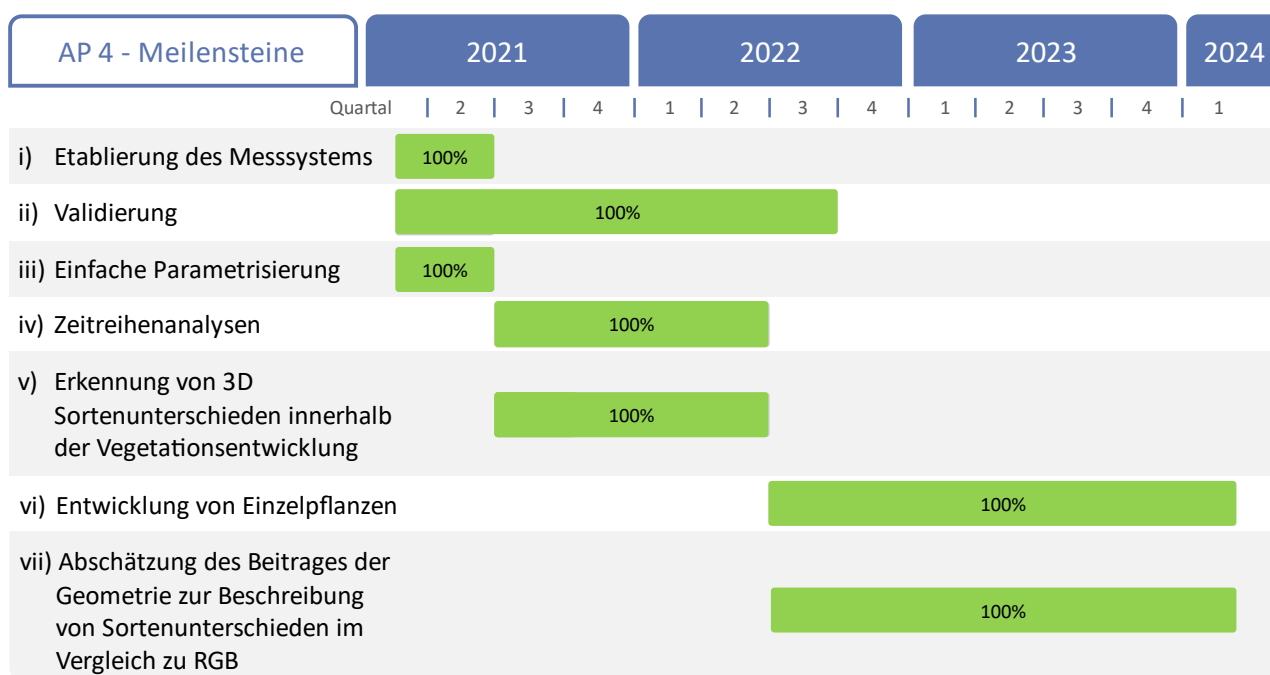


Abbildung 13: Meilensteine des Arbeitspakets 4 mit Bearbeitungsstand, aufgezeigt über die Projektlaufzeit.

3 Während der Projektlaufzeit bekannt gewordene Ergebnisse von dritter Seite

Bei allen durchgeführten Recherchen sind bisher keine Ergebnisse von dritter Seite zur Beschreibung von Sortenunterschieden und Registermerkmalen von Zuckerrübensorten mittels 3D-Sensormessungen bekannt geworden, die für die Durchführung des Vorhabens relevant sind.

4 Notwendigkeit und Angemessenheit der geleisteten Projektarbeiten

Die vom IfZ vor allem im Arbeitspaket 4 zu leistenden Arbeiten waren im Hinblick auf die Ziele sorgfältig geplant und vorbereitet und konnten daher alle bis zum Projektende abgeschlossen werden. Technische Herausforderungen wurden im engen Austausch mit den Projektpartnern reflektiert und bewältigt. Die Verzögerungen in der Fertigstellung einiger Arbeitspakete (vgl. Abschnitt 2) erfolgte aufgrund notwendiger Anpassungen bzw. Intensivierung der vorher geplanten Projektarbeiten mit dem Zweck einer angemesseneren Bearbeitung der Meilensteine. Aufgrund der durchgeführten Anpassungen wurden keine Verzögerungen anderer geplanter Projektarbeiten hervorgerufen.

5 Wichtigste Positionen des zahlenmäßigen Nachweises

- 34,57 Personenmonate Doktorand: Durchführung, Betreuung und Auswertung der Ergebnisse von Feld- und Gewächshausversuchen, Messungen und Analysen, Vorbereitung von Veröffentlichungen und Präsentationen, Zwischen- und Schlussberichten.
- 12 Personenmonate Technische Assistenz: Unterstützung bei der Versuchsanlage und -betreuung, Durchführung von digitalen und manuellen Messungen, Zusammensetzen und Annotieren von 3D-Daten zur Parameterextraktion und Generierung von Referenzdaten
- Hilfswissenschaftler: Unterstützung bei der Prozessierung und der manuellen Aufbereitung sowie Annotierung der gesammelten Daten, Unterstützung bei der Etablierung automatischer Verarbeitungspipelines
- Gegenstände bis 800 €: Tablets zur Bonitur in Feldversuchen, Grafikkarten zur Darstellung von rechenintensiven 3D-Inhalten, Speichermedien (u.A. Festplatten, SSD-Karten), Reflektionsstandard zur Kalibrierung multispektraler Kameras, Drohnenakkus, Low-cost 3D-Sensor zum Sensorvergleich, Tragbare Powerstation zum Betrieb von Sensoren an der mobilen Messplattform, Softwarelizenz Bildkonverter, Stativarm für den modifizierten Messaufbau des Projektjahres 2022
- Sonstige allgem. Verwaltungsausgaben: Ausgaben für Versuchsanlagen inkl. dazugehörigem Verbrauchsmaterial, Materialien für Versuchskonstruktionen, Zubehör für 3D-Drucker, Publikationskosten
- Dienstreisen: jährliche Projekttreffen inkl. Gemeinsamer Datenaufnahme, Fahrten zur Versuchsbetreuung und Datenaufnahme zu den Feldversuchen des BSA, Teilnahme am IIRB Congress 2022 und 2024, Teilnahme Intergeo Berlin 2023, Teilnahme an der X-Kit Abschlussveranstaltung 2024

- Gegenstände über 800 €: 3D-Drucker zur Erstellung einer 3D Referenzpflanze sowie der Messaufbauten, 3D Laser Scanner zur Datenaufnahme inkl. Software für 3D Laser Scanner, Messzielen und Stativ, Kalibrierkugel zur Kalibrierung des Laserscanners, NAS-System zum Speichern der Datensätze, Multispektraler 3D Scanner zur Datenaufnahme in Feldversuchen, Trägheitsnavigationssystem für die mobile Messplattform, Laptop zur Interaktion mit der mobilen Messplattform, Intel NUC zur Datenspeicherung an der mobilen Messplattform, High-End-Workstation zur Zusammensetzung der Einzelscans des Laserscanner