

Genauigkeitsaspekte bei Messsystemen
mit Nahbereichslaserscannern
zum Pflanzenmonitoring

Inaugural-Dissertation

zur

Erlangung des akademischen Grades

Doktor der Ingenieurwissenschaften (Dr.-Ing.)

der

Landwirtschaftlichen Fakultät

der

Rheinischen Friedrich-Wilhelms-Universität Bonn

vorgelegt von

M.Sc. Jan Dupuis

aus Bonn

Bonn 2017

Von der Landwirtschaftlichen Fakultät der Universität Bonn zur Erlangung der Doktorwürde genehmigte
Dissertation.

Referent: Univ.–Prof. Dr.–Ing. Heiner Kuhlmann

Korreferenten: Univ.–Prof. Dr.–Ing. Maria Hennes

Univ.–Prof. Dr.–Ing. habil. Thomas Wunderlich

Tag der mündlichen Prüfung: 01. September 2017

Publikation: Diese Dissertation ist auf dem Hochschulschriftenserver der ULB Bonn
http://hss.ulb.uni-bonn.de/diss_online elektronisch publiziert.

Genauigkeitsaspekte bei Messsystemen mit Nahbereichslaserscannern zum Pflanzenmonitoring

Zusammenfassung

Die Analyse der dreidimensionalen Struktur von Pflanzen sowie deren zeitliche Veränderung stellen einen wesentlichen Aspekt in der Pflanzenphänotypisierung dar. Zum Einsatz kommen dabei in der Regel nichtinvasive Sensoren, die eine flächenhafte Abtastung der Pflanzenoberfläche ermöglichen. Ein Messsystem, welches sich in der nahen Vergangenheit als besonders geeignet herausgestellt hat, ist die Kombination eines Laserlinienscanner mit einem portablen Koordinatenmessgerät in Form eines Messarms. Dieses ermöglicht eine weitestgehend vollständige, berührungslose und hoch präzise Erfassung der äußeren Geometrie von Pflanzen insbesondere in jungen Wachstumsstadien. Jüngste Forschungsarbeiten weisen jedoch darauf hin, dass die erreichbare Messgenauigkeit insbesondere durch die Interaktion des Lasers mit der Blattoberfläche negativ beeinflusst wird. Möchte man jedoch die gesamte Pflanze und insbesondere die Blätter als Volumenobjekt erfassen, so ist eine hohe Genauigkeit der resultierenden Punktwolke unabdingbar. Daraus ergibt sich schließlich die zentrale Fragestellung der vorliegenden Dissertation:

„Ist es möglich, mit einem Messsystem bestehend aus Messarm und Laserlinienscanner Blätter als Volumenobjekt zu erfassen und die Blattdicke zu messen?“

Um die Blattdicke zu erfassen, müssen die Messunsicherheiten der Einzelsensoren des eingesetzten Messsystems bekannt sein und, wenn möglich, in einer angepassten Messstrategie minimiert werden. Methodisch unterteilt sich die Arbeit daher in die folgenden Schwerpunkte:

- Die Genauigkeit von Messarmen hängt maßgeblich mit der Genauigkeit deren Kalibrierparameter zusammen, welche die geometrische Konstruktion des Messarms beschreiben. Es wird daher ein neuer Kalibrieransatz für Messarme präsentiert, der sowohl eine statistische Bewertung der geschätzten Parameter als auch eine statistische Bewertung der Beobachtungen mithilfe der Konfigurationsanalyse zulässt. Die Erkenntnisse der Kalibrierung dienen letztlich dazu, den Messaufbau und die Messstrategie zur Blattdickenbestimmung bestmöglich anzupassen, um die Messunsicherheiten des Messarms zu minimieren.
- Um die Messunsicherheiten von Laserlinienscannern bewerten zu können, erfolgen instrumentelle Genauigkeitsuntersuchungen unter Laborbedingungen. Dabei wird insbesondere der Einfluss nicht angepasster Sensoreinstellungen wie der Belichtungszeit sowie der Einfluss semitransparenter Materialien auf die Distanzbestimmung untersucht und quantifiziert.
- Blätter verfügen über besondere optische Eigenschaften, die die Messungen mit einem Laserlinienscanner beeinflussen können. Im Rahmen einer empirischen Untersuchung erfolgt eine Bewertung dieses Einflusses auf Messungen mit Laserlinienscannern mit unterschiedlicher Wellenlänge. Dafür werden einzelne Blattschichten und Blattbestandteile separat gemessen und die Punktwolken sowohl anhand der Geometrie als auch anhand der Signalintensität ausgewertet. Somit lassen sich insbesondere Aussagen über den Ursprung des reflektierten Signals treffen.
- Basierend auf den Erkenntnissen der Einzeluntersuchungen erfolgt im letzten Schritt eine empirische Studie zur Blattdickenbestimmung bei Nutzpflanzen. Der Messaufbau und die Messstrategie der Einzelsensoren werden so angepasst, dass deren Messunsicherheiten minimal werden. Verbleibende Abweichungen der Blattdicke lassen sich somit auf die Eigenschaften der Blattoberfläche zurückführen.

In ihrer Gesamtheit stellt die vorliegende Dissertation eine detaillierte Genauigkeitsanalyse von Messsystemen mit Nahbereichslaserscannern dar mit dem Fokus, die Blattdicke von Nutzpflanzen zu bestimmen. Die gewonnenen Erkenntnisse sind jedoch auch über den Anwendungsbereich der Phänotypisierung hinaus gültig und zeigen auf, wie durch eine geschickte Anpassung der Messstrategie die Genauigkeit von Nahbereichslaserscanningsystemen steigerbar ist.

Accuracy aspects of measuring systems featuring close-up laser scanners used for the monitoring of plants

Abstract

Analyzing the three dimensional shape of plants and monitoring its temporal change has become an important part for plant phenotyping. Therefore, measuring systems are used that enable a non-invasive and area-based acquisitions of the plant surface. A particular measuring system that has demonstrated its applicability in the recent past, comprises a coordinate measuring arm and a close-up laser scanner. It enables a non-invasive acquisition of the plant's geometry resulting in a nearly occlusion-free and highly precise point cloud. However, recent studies indicated that the interaction of the laser and the plant is not negligible. Consequently, the accuracy of the point cloud seems to be lower compared to measurements of man-made objects. On the contrary, measuring the three dimensional shape of leaves, i.e. the leaf thickness, requires a high accuracy of the resulting point cloud. Therefore, this dissertation is motivated by the question:

„Is it possible to measure leaf thickness with a measuring system comprising a coordinate measuring arm and a triangulation-based laser line scanner?“

Measuring the leaf thickness requires a detailed knowledge of the measuring uncertainties of the single sensors and, if possible, a measuring strategy that minimizes these uncertainties. Therefore, this dissertation is divided into the following main tasks:

- The accuracy of coordinate measuring arms strongly depends on the accuracy of the calibration parameters describing the geometric construction of the measuring arm. Hence, a new calibration approach is developed that enables a statistical evaluation of the estimated calibration parameters as well as a statistical evaluation of each observation using the configuration analysis. The knowledge of this investigations can be used to improve the measuring setup and strategy and to guarantee a high measuring accuracy for the leaf thickness estimation.
- To examine the measurement uncertainties of laser line scanners, metrological investigations of the measuring accuracy are performed under laboratory conditions. These are mainly focused on the impact of non-adjusted sensor properties, i.e. the exposure time, and the impact of semi-transparent materials on the distance measurement.
- Leaves provide special optical properties that may influence measurements performed with laser line scanner. This impact is investigated empirically using laser line scanners with different wavelengths. Therefore, separated leaf tissues and leaf tissue contents are measured and evaluated based on the geometry as well as on the intensity of the received laser signal. Thus, it is possible to locate the origin of the backscattered laser ray.
- The final part of this dissertation describes an empirical investigation of leaf thickness measurements. Based on the findings of the metrological investigations of the separated sensors, the measuring setup as well as the measuring strategy are adapted in order to minimize the uncertainties of the laser scanner and the measuring arm. Remaining deviations of the leaf thickness can, therefore, be attributed to the optical properties of the leaf surface.

Finally, this dissertation represents a detailed accuracy investigation of measuring systems featuring close-up laser scanners. It is mainly focused on the derivation of the leaf thickness, but the findings are generally applicable for these kind of measuring systems. It is shown how the measuring accuracy can be increased by a skillful adaption of the measuring setup and the measuring strategy.

Inhaltsverzeichnis

Vorwort	1
1 Motivation	3
1.1 Zielsetzung der Dissertation	3
1.2 Aufbau der Arbeit	6
2 Stand der Forschung	7
2.1 Genauigkeitsanalyse und Kalibrierung von Messarmen	7
2.2 Genauigkeitsanalyse von Nahbereichslaserscannern	9
2.3 Nahbereichslaserscanning von Pflanzen	9
3 Messtechnische Grundlagen	11
3.1 Der Messarm	11
3.1.1 Mathematische Beschreibung des Messarms	11
3.1.2 ROMER Infinite 2.0 Messarm	12
3.1.3 Genauigkeitsaspekte bei Messarmen	13
3.2 Der Laserlinienscanner	16
3.2.1 Grundlegendes Messprinzip von Laserlinienscannern	16
3.2.2 Im Rahmen dieser Arbeit eingesetzte Laserscanner	17
3.2.3 Genauigkeitsaspekte bei Laserlinienscannern	18
3.3 Das Blatt als Messobjekt	21
3.3.1 Komplexität der Pflanzenstruktur	21
3.3.2 Bewegungen der Pflanze	22
3.3.3 Optische Eigenschaften der Blätter	22
3.4 Auswirkung auf die Blattdickenbestimmung	23
4 Zusammenfassung der relevanten Veröffentlichungen	25

5	Herausstellung der wichtigsten Aspekte der Einzeluntersuchungen	31
5.1	Untersuchung der Messunsicherheiten des Messarms	31
5.1.1	Methodik zur Kalibrierung von Messarmen	31
5.1.2	Bewertung des Ausgleichungsansatzes	34
5.1.3	Ergebnisse der Konfigurationsanalyse	37
5.1.4	Auswirkung auf die Bestimmung der Blattdicke	40
5.2	Messunsicherheiten des Laserscanners unter Laborbedingungen	40
5.2.1	Messunsicherheiten bedingt durch die Einstellungen des Sensors	41
5.2.2	Messunsicherheiten bedingt durch das Eindringen in die Objektstruktur	42
5.3	Messunsicherheiten des Laserscanners verursacht durch die Blattoberfläche	43
5.3.1	Messbarkeit der Epidermis	43
5.3.2	Einfluss des Chlorophylls auf das Messsignal	45
5.3.3	Anwendungsfall Blattoberfläche	46
5.3.4	Einfluss des Auftreffwinkels	47
5.3.5	Auswirkung auf die Bestimmung der Blattdicke	47
6	Empirische Untersuchungen zur Blattdickenmessung	49
6.1	Anpassung der Messstrategie des Messarms	49
6.1.1	Empirische Untersuchung des optimierten Messaufbaus	49
6.2	Anpassung der Messstrategie des Laserscanners	51
6.3	Empirische Genauigkeit des Gesamtsystems unter optimierten Messbedingungen	51
6.4	Ermittlung der Blattdicke bei Nutzpflanzen	52
6.5	Diskussion der Messergebnisse	55
7	Kritik und weiterführende Überlegungen	57
7.1	Weiterentwicklung der Messarmkalibrierung	57
7.2	Einschränkungen des kombinierten Messsystems	58
7.3	Optimierte Nutzung von Nahbereichslaserscannern zum Pflanzenmonitoring	59
8	Fazit und Ausblick	61
9	Aufüstung weiterer Veröffentlichungen	63
	Verzeichnisse	65
	Abbildungsverzeichnis	65
	Abkürzungsverzeichnis	69
	Literaturverzeichnis	71

Vorwort

Die vorliegende kumulative Dissertation stellt die messtechnischen Untersuchungen von Nahbereichslaserscanningsystemen dar. Dabei beziehen sich die Untersuchungen schwerpunktmäßig auf den Einsatz der Messsysteme im Bereich der Pflanzenphänotypisierung. Die Dissertation beruht auf den folgenden vier Veröffentlichungen, von denen alle einer Peer-Review-Begutachtung unterzogen wurden:

- Veröffentlichung A:
Dupuis, J., Holst, C., & Kuhlmann, H. (2016). Laser Scanning Based Growth Analysis of Plants as a New Challenge for Deformation Monitoring. *Journal of Applied Geodesy*, 10(1), 37–44
- Veröffentlichung B:
Dupuis, J., Holst, C., & Kuhlmann, H. (2017a). Improving the Kinematic Calibration of a Coordinate Measuring Arm using Configuration Analysis. *Precision Engineering*, (Available online 5 May 2017)
- Veröffentlichung C:
Dupuis, J. & Kuhlmann, H. (2014). High-Precision Surface Inspection: Uncertainty Evaluation within an Accuracy Range of 15 μ m with Triangulation-based Laser Line Scanners. *Journal of Applied Geodesy*, 8(2), 109–118
- Veröffentlichung D:
Dupuis, J., Paulus, S., Mahlein, A.-K., Kuhlmann, H., & Eichert, T. (2015). The impact of different leaf surface tissues on active 3D laser triangulation measurements. *Photogrammetrie, Fernerkundung, Geoinformation*, 2015(6), 437–447
- Veröffentlichung E:
Dupuis, J., Holst, C., & Kuhlmann, H. (2017b). Measuring Leaf Thickness with 3D Close-up Laser Scanners: Possible or not? *Journal of Imaging*, 3(2)

Der Autor der vorliegenden Dissertation hat in jeder dieser Veröffentlichungen den wesentlichen Beitrag geleistet.

1. Motivation

Der weltweite Bedarf an Nahrungsmitteln steigt aufgrund der stetig wachsenden Weltbevölkerung kontinuierlich an. Bereits im Jahre 2050 rechnen Experten mit einer Gesamtbevölkerung von rund 9.7 Milliarden Menschen [United Nations (Department of Economic and Social Affairs Population Division), 2015]. Im gleichen Zuge erschweren sich die Voraussetzungen für die landwirtschaftliche Nahrungsmittelproduktion. Die wachsende Bevölkerung wird zwangsläufig zu einer Ausweitung von Siedlungsflächen und folglich zu einer Abnahme landwirtschaftlicher Nutzfläche führen. Zusätzlich verursacht der Klimawandel erschwerte Bedingungen für den Anbau von Nutzpflanzen. Steigende Temperaturen, längere Trockenperioden und die Zunahme extremer Wetterphänomene verändern die Anbaubedingungen und mindern den landwirtschaftlichen Ertrag [Peltonen-Sainio et al., 2010]. Folglich gilt es, Anpassungsmaßnahmen zu entwickeln, die eine effektive Nutzung der vorhandenen Nutzfläche garantieren. Ein wesentlicher Aspekt dieser Anpassungsstrategien ist die Züchtung und Etablierung stressresistenter und ertragreicher Nutzpflanzensorten [Peltonen-Sainio et al., 2010]. Ziel ist es, durch genetische Anpassung und Selektion den Ertrag zu steigern und die notwendige Fläche an produktivem Land pro Kopf weiter zu verkleinern [Phillips, 2010].

Die Pflanzenzüchtung hat auf diesem Weg in den vergangenen Jahrzehnten signifikante Fortschritte gemacht und ist in der Lage, verschiedene Genotypen zu typisieren und zu selektieren [Fiorani & Schurr, 2013]. Diese Genotypen enthalten den genetischen Bauplan der Pflanze und steuern somit deren grundsätzliche Eigenschaften [Weiler & Nover, 2008]. Das endgültige äußere Erscheinungsbild einer Pflanze, der sogenannte Phänotyp, entsteht als Kombination des Genotyps und spezifischen Umwelteinflüssen während des Wachstums. Ein wesentlicher Punkt auf dem Weg hin zu resistenten und ertragreichen Nutzpflanzen ist daher eine objektive Bewertung der Phänotypen unter Berücksichtigung von Umweltbedingungen. Für die Pflanzenzüchtung ist daher die objektive Bewertung dieses Phänotyps sowohl hinsichtlich funktioneller als auch struktureller Parameter von großem Interesse. Dieser Prozess wird als Phänotypisierung bezeichnet.

Lange Zeit basierte die Phänotypisierung auf manuellen und somit subjektiven Messungen sowie häufig auf der alleinigen Bewertung des Ertrags [Furbank & Tester, 2011]. Um diesen Prozess zu optimieren und objektivieren, haben in den letzten Jahren eine Vielzahl an Sensoren Einzug in die Phänotypisierung gehalten [Li et al., 2014]. Neben Verfahren zur funktionellen Beschreibung der Phänotypen, wie bspw. durch Fluoreszenz-, Thermal- oder Hyperspektralaufnahmen [Mahlein, 2015], steht auch die Analyse der dreidimensionalen Struktur der Pflanzen im Fokus [Fiorani & Schurr, 2013; Li et al., 2014]. Moderne nicht-destruktive Sensorik ermöglicht es dabei, die Veränderung der Pflanzenstruktur über einen längeren Zeitraum hinweg zu beobachten und Wachstumsverläufe zu dokumentieren [Paulus et al., 2014c]. So lassen sich bspw. Veränderungen der Wachstumsrate direkt mit Umwelteinflüssen verknüpfen und die Resistenz eines Genotyps bewerten.

Die Erfassung der dreidimensionalen Struktur erfolgt auf verschiedenen Skalenebenen, die vom einzelnen Organ [Cai et al., 2013; Paulus et al., 2013], über ganze Pflanzen [Paulus et al., 2014c] bis hin zur Oberflächenstruktur ganzer Bestände [Næsset & Bjerknes, 2001; Ehlert et al., 2008] reichen. Zum Einsatz kommen dabei verschiedene Arten von Sensoren, wie bspw. Stereokamerasysteme [Biskup, 2009], Time-of-Flight Kameras [Busemeyer et al., 2013] und 3D-Laserscanner [Paulus et al., 2014c; Hosoi et al., 2011]. Die Laserscanner bieten dabei den Vorteil, unabhängig von der Beleuchtung gleichbleibende Ergebnisse zu liefern. Darüber hinaus verfügen Nahbereichslaserscanningsysteme, wie sie bspw. bei Paulus et al. [2014c] Anwendung finden, über eine sehr hohe Genauigkeit und Punktauflösung, was insbesondere bei der Phänotypisierung auf Organebene die Datenauswertung begünstigt.

1.1 Zielsetzung der Dissertation

Die vorliegende Dissertation befasst sich thematisch zwar mit dem Thema der Pflanzenphänotypisierung bzw. dem Pflanzenmonitoring auf Organebene, hat jedoch nicht das Ziel, explizite phänotypische Parameter

abzuleiten und zu bewerten. Der Fokus liegt vorrangig auf der Genauigkeitsanalyse von Messsystemen mit Nahbereichslaserscannern, die in jüngster Zeit vermehrt im Bereich der Phänotypisierung Anwendung finden [Wagner et al., 2010; Paulus et al., 2014c; Behmann et al., 2015]. Dabei steht insbesondere die Frage im Fokus, inwieweit neben der dreidimensionalen Form von Stängeln [Paulus et al., 2014a] oder Wurzeln [Keightley & Bawden, 2010] Blätter als Volumenobjekt abgebildet werden können.

Aus Sicht des Nahbereichslaserscannings stellen Pflanzen eine neue und besondere Klasse von Messobjekten dar, die messtechnisch einige Herausforderungen birgt. So verfügen Pflanzen je nach Art über eine sehr komplexe geometrische Struktur. Um die Gesamtstruktur dennoch möglichst vollständig abbilden zu können, muss die Aufnahmegeometrie des Laserscanningsystems flexibel steuerbar sein. Möchte man das Blatt analog zu Stängeln und Wurzeln als Volumenobjekt erfassen, ist zum Einen aufgrund der komplexen Geometrie eine hohe räumliche Auflösung und zum Anderen eine hohe geometrische Genauigkeit unerlässlich. Ein Messsystem, das diese Anforderungen erfüllt und bereits erfolgreich im Bereich des Pflanzenmonitoring eingesetzt wurde [Wagner et al., 2010; Paulus et al., 2014c], ist eine Kombination aus Messarm und Nahbereichslaserscanner (vgl. Abbildung 1.1).



Abbildung 1.1: Nahbereichslaserscanningsystem bestehend aus ROMER Infinite 2.0 Messarm und Perceptron ScanWorks-V5 Laserlinienscanner

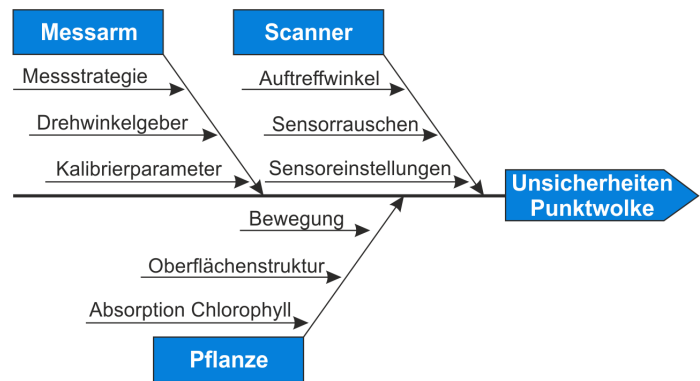


Abbildung 1.2: Die Messunsicherheiten der Punktwolke setzen sich aus den Messunsicherheiten der Einzelsensoren sowie Pflanzenoberfläche zusammen.

Derartige industrielle Messsysteme bieten eine hohe Flexibilität bei gleichzeitig sehr hoher Messgenauigkeit von $< 0,1 \text{ mm}$. Dabei wird der 2D-Linienscanner manuell über die Pflanzenoberfläche bewegt und dessen Position und Orientierung mithilfe des Messarms verfolgt. Die einzelnen über den Messarm miteinander verknüpften Scanlinien bilden gemeinsam die 3D-Punktwolke.

Die Kombination der Sensoren Messarm und Laserscanner führt zu einer positiven Schnittmenge der Eigenschaften der Einzelsensoren. So ergänzt der Laserscanner den vom Grundsatz her taktile Messarm zu einem berührungslos arbeitenden Messsystem, während der Messarm den 2D-Laserscanner um die dritte Dimension erweitert. Dabei ist jedoch zu beachten, dass sich sowohl die Messunsicherheiten des Messarms als auch die Messunsicherheiten des Scanners in der Genauigkeit der resultierenden Punktwolke niederschlagen (Abbildung 1.2). Neben diesen Messunsicherheiten der Einzelsensoren beeinflusst auch die Pflanzenoberfläche selbst die Genauigkeit der Punktwolke. Jüngste Untersuchungen haben gezeigt, dass die Interaktion von Laser und Blattoberfläche nicht zu vernachlässigen ist [Paulus et al., 2014b]. Gemäß dem „Guide to the expression of uncertainty in measurement“ (GUM) [JCGM, 2008a] addieren sich unkorrelierte, zufällige Messunsicherheiten quadratisch, wodurch sich die Unsicherheit der Punktwolke u_{PW} im einfachsten Fall über

$$u_{PW}^2 = u_{Messarm}^2 + u_{Scanner}^2 + u_{Pflanze}^2 \quad (1.1)$$

berechnet, mit dem Erweiterungsfaktor ($k = 1$).

Ist das Ziel der Messung die Erfassung der Blätter als Volumenobjekt, bedeutet dies, dass Blattober- und Blattunterseite individuelle Punktwolken darstellen müssen, die sich mit statistischer Sicherheit trennen lassen. Ausgehend von einer Blattdicke weniger Zehntelmillimeter erfordert dies, dass die Gesamtunsicherheit aus Gleichung (1.1) und somit auch die einzelnen Unsicherheitsfaktoren so klein werden, dass $u_{PW} < 0,1 \text{ mm}$ resultiert. Dies erfordert eine detaillierte Kenntnis sowohl über die Größenordnung und die Ursache der Messunsicherheiten als auch über deren Auswirkungen auf den Messprozess und somit auf die erreichbare Genauigkeit.

Die vorherrschende Fragestellung dieser Dissertation lautet somit:

„Ist es möglich, mit einem Messsystem bestehend aus Messarm und Laserlinienscanner Blätter als Volumenobjekt zu erfassen und die Blattdicke zu messen?“

Allgemein stellt die Blattdicke den Abstand der Punktwolken von Blattober- und Blattunterseite dar, sodass sich die Unsicherheit der Blattdickenbestimmung über $u_{BD} = \sqrt{2} \cdot u_{PW}$ ergibt. Basierend auf der Fortpflanzung der Messunsicherheiten (Gleichung (1.1)) lassen sich letztlich die folgenden Aufgabenschwerpunkte ableiten:

1. Welche Messunsicherheiten kommen aus der Systemkomponente Messarm und wie wirken sich diese auf die Genauigkeit des Gesamtsystems aus?

Aus der Theorie ist bekannt (vgl. Abschnitt 3.1), dass die Messunsicherheiten des Messarms hauptsächlich aus Abweichungen der Kalibrierparameter hervorgehen. Diese Kalibrierparameter beschreiben die geometrische Konstruktion des Messarms. Weichen sie von den „wahren“ Werten ab, so führt dies zu systematischen Messabweichungen der Scannerposition und -orientierung. Da der Messarm jeden Messpunkt mit unendlich verschiedenen Armposen (Definition Armpose siehe Abschnitt 3.1) antasten kann, wirken sich auch Abweichungen der Kalibrierparameter in Abhängigkeit der Armpose unterschiedlich auf die 3D Koordinaten aus. Folglich gibt es für jede Messgröße eine optimale Messanordnung, bei der die systematischen Abweichungen minimal werden. Da die Kalibrierparameter jedoch seitens des Herstellers nicht zugänglich sind und keine Genauigkeitsinformation vorliegt, gilt es einen Kalibrieransatz zu entwickeln mit dem die Kalibrierparameter des Messarms geschätzt und deren Genauigkeit bewertet werden kann. Auf diese Weise lässt sich die Auswirkung jedes einzelnen Modellparameters auf die Genauigkeit des Gesamtsystems abschätzen und eine optimale Messkonfiguration zur Bestimmung der Blattdicke ermitteln.

2. Welche Messunsicherheiten kommen aus der Systemkomponente Scanner und wie wirken sich diese auf die Genauigkeit des Gesamtsystems aus?

Die im Rahmen dieser Dissertation eingesetzten Sensoren sind Laserlinienscanner, die nach dem Lichtschnittverfahren arbeiten (vgl. Abschnitt 3.2). Diese Sensoren bilden eine auf die Objektoberfläche projizierte Laserlinie auf eine lichtempfindliche Sensormatrix ab und ermitteln darüber die zweidimensionale Kontur (Abstand und Position auf der Laserlinie) der Objektoberfläche. Aus der Theorie ist bekannt (vgl. Abschnitt 3.2), dass insbesondere die Genauigkeit der Abstandsermittlung maßgeblich von der Ausprägung der Laserlinie auf der Empfangsmatrix abhängt. In einem ersten Schritt gilt es daher zu bewerten, inwieweit sich die Sensoreinstellungen wie bspw. die Belichtungszeit auf die Abbildung der Laserlinie und somit auf die Präzision der Abstandsmessung auswirken. Neben dem Sensor selbst beeinflusst bei laserbasierten Messsystemen die Oberfläche die erreichbare Genauigkeit [Donges & Noll, 1993; Gordon, 2008]. Daher gilt es, in einem zweiten Schritt zu untersuchen, welcher Einfluss durch semitransparente Materialien wie bspw. Marmor oder Keramik entsteht.

Die für die Bestimmung notwendigen messtechnischen Untersuchungen sind dabei losgelöst vom Pflanzenmonitoring und sollen den Unsicherheitshaushalt unter kontrollierten Bedingungen aufdecken und quantifizieren.

3. Welchen Einfluss hat die Blattoberfläche auf die Genauigkeit des Laserscanners?

Diese Fragestellung knüpft an die vorangegangene Frage an und stellt einen wesentlichen Teil der Genauigkeitsuntersuchung des Laserscanners dar. Im Gegensatz zu künstlichen Objekten verfügen Blätter über besondere optische Eigenschaften. Aufgrund der Semitransparenz der Blattschichten dringt der Laser in die Blattstruktur ein und interagiert dort mit den photoaktiven Bestandteilen (Chlorophyll) des Mesophylls (vgl. Abschnitt 3.3). Jüngste Untersuchungen haben in diesem Zusammenhang gezeigt, dass die Vollständigkeit der Punktwolke, erfasst mit einem Nahbereichslaserscanningsystem, stark durch diese Eigenschaften beeinflusst wird [Paulus et al., 2014b]. Welche Effekte dabei auftreten und wie diese die Genauigkeit der Punktwolke beeinflussen ist jedoch weitestgehend unbekannt. Es gilt daher experimentell zu untersuchen, inwieweit die Blattoberfläche selbst bzw. deren optische Eigenschaften das Messsignal und damit die Genauigkeit der Punktwolke beeinflussen.

4. Wie lässt sich die Messstrategie zur Blattdickenbestimmung auf Basis der messtechnischen Untersuchungen optimieren?

Aus den aus den Aufgabenpunkten 1.-3. gewonnenen Erkenntnissen ist dann in einem letzten Schritt zu untersuchen, inwieweit die Messunsicherheiten durch eine angepasste Messstrategie eliminiert bzw. minimiert werden können. Hierzu erfolgen empirische Studien sowohl mit künstlichen Prüfkörpern als auch mit realen Nutzpflanzen. Somit lässt sich die Genauigkeit der Dickenbestimmung quantifizieren und ggf. verbleibende Unsicherheitsaspekte aufdecken.

1.2 Aufbau der Arbeit

Die vorliegende Arbeit ist eine kumulative Dissertation basierend auf fünf relevanten Publikationen, welche die in Abschnitt 1.1 beschriebenen Aufgabenschwerpunkte thematisieren. Die allgemeine Struktur folgt ebenfalls dieser Aufteilung und unterteilt die Darstellung in den Kapiteln 2-5 in die Einzelsensoren Messarm und Scanner sowie die Pflanze als Untersuchungsobjekt. In Kapitel 6 werden die gewonnenen Erkenntnisse schließlich zusammengeführt.

Aus dieser Struktur ergibt sich somit folgender Aufbau. Kapitel 2 gibt eine Einführung in den wissenschaftlichen Kontext und gliedert die Dissertation thematisch ein. Da der Fokus dieser Arbeit auf der Genauigkeitsanalyse des eingesetzten Messsystems liegt, liefert Kapitel 3 die messtechnischen Grundlagen für die Einzelsensoren sowie deren theoretisches Unsicherheitsbudget und beschreibt die optischen Eigenschaften der Blattoberfläche im Hinblick auf deren Erfassung mithilfe eines Laserlinienscanners. Kapitel 4 fasst die relevanten Veröffentlichungen und die darin beschriebenen Untersuchungen kurz zusammen, bevor deren wichtigste Aspekte für die Einzelsensoren sowie die Blattoberfläche in Kapitel 5 noch einmal besonders herausgestellt werden. Darauf aufbauend beschreibt Kapitel 6 eine empirische Untersuchung der Blattdickenbestimmung unter optimierter Messkonfiguration. In Kapitel 7 werden die sich aus den Ergebnissen der Einzeluntersuchungen aufgeworfenen Fragestellungen aufgegriffen und zukünftige Forschungsfragen präsentiert. Die Arbeit schließt mit einem Fazit in Kapitel 8.

2. Stand der Forschung

Aus der Zielsetzung (vgl. Abschnitt 1.1) ist bereits ersichtlich, dass die vorliegende Dissertation Berührungspunkte mit drei unterschiedlichen Themengebieten aufweist. Die Genauigkeitsanalyse und Kalibrierung des Messarms bewegen sich hauptsächlich im Themenbereich der „Large Volume Metrology“, wobei die Parametrisierung als auch die Kalibrierung des Messarms Analogien zur Kalibrierung von Industrierobotern aufweisen. Die Genauigkeitsanalyse des Laserscanners fällt thematisch in das Themengebiet des terrestrischen Laserscannings, wobei aufgrund der Funktionsweise der Laserlinienscanner ebenfalls Berührungspunkte mit der Koordinatenmesstechnik auftreten. Bei allen Fragestellungen besteht der Bezug zum Themengebiet der Pflanzenphänotypisierung.

Die folgenden Abschnitte geben einen Überblick über den wissenschaftlich Kontext der jeweiligen Themenschwerpunkte und gliedern die Arbeit thematisch ein.

2.1 Genauigkeitsanalyse und Kalibrierung von Messarmen

In der Literatur findet sich eine Vielzahl an Ansätzen zu den Themen Überprüfung und Kalibrierung von Messarmen. Basierend auf dem internationalen Vokabular der Messtechnik [JCGM, 2008b] des Joint Committee for Guides in Metrology (JCGM) unterscheidet man in der Messtechnik jedoch strikt zwischen den Vorgängen der Überprüfung (*engl.* verification) und der Kalibrierung (*engl.* calibration) von Messmitteln. Die Überprüfung stellt demnach lediglich eine objektive Beweisführung dar, ob ein Messinstrument vorgegebene Genauigkeitsvorgaben erfüllt oder nicht. Die Kalibrierung hingegen bildet einen Zusammenhang zwischen einer messbaren Größe einer Maßverkörperung inklusive deren Unsicherheit und dem angezeigten Messwert des Instruments, um dieses in einem zweiten Schritt mathematisch zu korrigieren. Demzufolge liefert die Überprüfung lediglich eine ja-nein-Aussage dazu, ob das zu prüfende Messsystem innerhalb seiner Spezifikation arbeitet oder nicht. Im Falle eines Nichterfüllens gibt sie jedoch keinerlei Auskünfte über die Ursache der vorliegenden Messabweichungen. Die Kalibrierung hingegen liefert als Ergebnis bspw. eine Kalibrierfunktion oder Kalibrierparameter, mit deren Hilfe sich die Messwerte korrigieren lassen, die aber unter Umständen auch Rückschlüsse auf Unsicherheitsquellen zulassen.

Aufgrund der Ähnlichkeit von Messarmen und Industrierobotern basieren die gängigen Ansätze zur Kalibrierung auf den Modellen und Lösungsalgorithmen der Roboterarmkalibrierung (vgl. z.B. [Roth et al., 1987; Elatta et al., 2004]), unterscheiden sich jedoch in der Messprozedur. Die mathematische Modellierung von Messarmen erfolgt dabei i.d.R. über die sogenannte Denavit-Hartenberg-Transformation (DH-Transformation) [Hartenberg & Denavit, 1955] (vgl. Abschnitt 3.1) in ihrer ursprünglichen Form, vgl. auch [Furutani et al., 2004; Santolaria et al., 2008; Gao et al., 2009b; Ostrowska et al., 2014]. Die Kalibrierparameter sind somit die Transformationsparameter der DH-Transformation, die sogenannten Denavit-Hartenberg-Parameter (DH-Parameter). Für die Kalibrierung von Industrierobotern werden in der Regel eine Vielzahl von Roboterpositionen angefahren und das angezeigte Koordinatentriple mit einem Sollkoordinatentriple verglichen [Elatta et al., 2004]. Die Erzeugung der Sollkoordinaten erfolgt dabei meist über externe Sensoren wie bspw. Lasertracker [Nubiola & Bonev, 2013] oder kartesische Koordinatenmessgeräte (KMG) [Driel et al., 1993]. Die Übertragung dieses Ansatzes gestaltet sich jedoch aufgrund der hohen Genauigkeit des Messarms und unter Berücksichtigung der Rückführbarkeit [Kunzmann et al., 1990; Woschitz & Heister, 2015] schwierig. Demnach muss jedes zu kalibrierende Messmittel mit einem Referenzsystem höherer Ordnung verglichen werden. Innerhalb dieser Kalibrierhierarchie vergrößert sich die Messunsicherheit in jeder Stufe entsprechend den Unsicherheiten des Referenzsystems [Hoffmann, 2004]. Insbesondere beim Lasertracker liegt die Genauigkeit in der gleichen Größenordnung wie beim Messarm, weshalb eine Kalibrierung mittels Lasertracker nicht zielführend wäre. Dennoch gibt es Ansätze, bei denen über Multilateration mit vier Lasertrackern Sollkoordinaten geschaffen werden, aus denen sich anschließend Sollstrecken ableiten lassen, die schließlich in das funktionale Modell zur Schätzung der Kalibrierparameter einfließen [Santolaria et al., 2014].

Ein Kalibrieransatz für Messarme, der ebenfalls externe Messinstrumente nutzt, geht zurück auf Kovač & Frank [1999, 2001]. Das entwickelte Messequipment erzeugt mithilfe einer hochgenauen Linearführung und einem Lasermesssystem Referenzstrecken mit einer Genauigkeit im Bereich weniger Mikrometer, die zur Kalibrierung des Messarms genutzt werden.

Nachteil bei dem Einsatz externer Sensorik ist i.d.R. der hohe messtechnische Aufwand sowie der teils stark eingeschränkte Arbeitsbereich, der zur Kalibrierung nutzbar ist. Aus diesem Grund haben sich Kalibrieransätze durchgesetzt, die in Teilen auf den Messabläufen der Annahme- und Bestätigungsprüfungen für KMG [DIN EN ISO 10360-2:2001, 2001] und für Messarme [ASME, 2004; VDI, 2009; DIN EN ISO 10360-12:2014, 2014] beruhen. Diese nutzen unter anderem Längenmaßverkörperungen, um die volumetrische Genauigkeit eines Messarms zu überprüfen. Dafür werden die Messstellen der Maßverkörperung angetastet und die daraus ermittelten Längen mit den nominalen Längen verglichen. Verwendet man diese Messungen und die Abweichungen zum Soll der Maßverkörperung sowie die Unsicherheiten des Sensors und der Maßverkörperung, so lassen sich die DH-Parameter des Messarms bestimmen. Da die Maßverkörperungen selbst i.d.R. über eine Zertifizierung eines akkreditierten Kalibrierdienstleisters verfügen, ist auch die Rückführbarkeit der geschätzten Parameter gewährleistet [Hoffmann, 2004].

Ein Ansatz, der auf der Nutzung von Kugelnormalen basiert, geht auf Furutani et al. [2003, 2004] zurück. Um die DH-Parameter eines Messarms mit sechs Freiheitsgraden („Degree of Freedom“ (DoF)) zu schätzen, werden die Kugelnormale mit bekannten räumlichen Abständen in unterschiedlicher Anzahl und Ausrichtung im Messvolumen des Messarms platziert und taktil vermessen. Über einen nicht näher spezifizierten Kleinste-Quadrate Ansatz erfolgt die Schätzung der Kalibrierparameter. Dabei zeigt sich, dass die Position der Kugelnormale im Messvolumen einen Einfluss auf die Schätzung der DH-Parameter hat.

Santolaria et al. [2008] präsentieren einen alternativen Ansatz, der auf der Messung einer Längenmaßverkörperung in Form eines Kugelstabs beruht. Mithilfe eines speziell entwickelten Tasters ist es möglich, die Kugelmittelpunkte der Maßverkörperung direkt anzutasten und sich somit die redundante Charakteristik des Messarms (vgl. Abschnitt 3.1) zu Nutze zu machen. Der für die Schätzung der DH-Parameter verwendete Ausgleichungsansatz minimiert eine Zielfunktion, die sowohl die Längenmessabweichungen bezüglich einer Längenmaßverkörperung enthält als auch Einzelpunktvarianzen, die aus Mehrfachmessungen abgeleitet werden. Dies führt dazu, dass die Beobachtungen der Drehwinkelgeber nicht explizit im funktionalen Modell auftauchen. Zusätzlich greift die Optimierung auf den Levenberg-Marquardt Algorithmus [Marquardt, 1963] zurück, um Singularitäten in der Designmatrix zu umgehen, die aus der geometrischen Konstruktion des Messarms hervorgehen [Dupuis et al., 2017a].

Parallel dazu wurden Ansätze entwickelt, die allein auf der Messung von Einzelpunkten in Form von Kegelbohrungen beruhen [Gao et al., 2009b,a, 2016]. Im Gegensatz zu dem zuvor beschriebenen Algorithmus werden dabei jedoch konstruktionsbedingte linear abhängige Kalibrierparameter identifiziert und von der Schätzung ausgeschlossen. Die Ansätze nutzen sowohl eine Optimierung im Sinne der Kleinsten-Quadrate [Gao et al., 2016] als auch alternative Algorithmen, wie den „modified simulated annealing algorithm“ [Gao et al., 2009b] oder die „particle swarm optimization“ [Gao et al., 2009a]. Wieder andere Publikationen nutzen generische Algorithmen [Light et al., 2011] oder stochastische Approximation [Sultan & Puthiyaveetil, 2012].

Alle genannten Ansätze liefern im Ergebnis Modellparameter, welche die Genauigkeit des Messarms verbessern, es fehlt ihnen jedoch an einer strikten statistischen Bewertung der Optimierungsansätze und der geschätzten Parameter. Zudem erscheint die Auswahl der Messpositionen häufig willkürlich und es fehlt an Bewertungskriterien, wie sie bspw. bei der Kalibrierung von Industrierobotern eingesetzt werden [Borm & Meng, 1991; Daney, 2005]. Da die Genauigkeit des Messarms jedoch maßgeblich mit der Genauigkeit der DH-Parameter zusammenhängt (vgl. Abschnitt 3.1.3), gilt es im Rahmen der vorliegenden Dissertation einen Kalibrieransatz zu entwickeln, der eine qualitative Bewertung der geschätzten DH-Parameter zulässt. Somit lässt sich die Auswirkung der Parameter auf eine 3D Koordinate abschätzen und in die Messplanung integrieren.

2.2 Genauigkeitsanalyse von Nahbereichslaserscannern

Die dreidimensionale Erfassung von Freiformflächen ist längst nicht nur für industrielle Problemstellungen von Interesse sondern findet auch vermehrt in Bereichen wie der Pflanzenphänotypisierung Anwendung. Dabei ist es häufig der Fall, dass Oberflächen nicht taktil messbar sind sondern einer berührungslosen Erfassung bedürfen, was den Einsatz laserbasierter Sensoren begünstigt. In den vergangenen Jahren haben sich insbesondere die Nahbereichslaserscanner immer größerer Beliebtheit und technischem Fortschritt erfreut [Cheng & Menq, 1995; Sansoni et al., 2009; Bi & Wang, 2010]. Insbesondere die Laserlinienscanner ermöglichen es, in Kombination mit kartesischen KMG [Cheng & Menq, 1995] oder Messarmen [Romer Inc., 2009b] große Flächen in kurzer Zeit mit hoher Genauigkeit zu erfassen. Die erreichbare Genauigkeit hängt dabei jedoch, vergleichbar mit terrestrischen Laserscannern [Gordon, 2008], von einer Vielzahl von Einflussfaktoren ab. Aus diesem Grund befassen sich eine Reihe von Studien mit der Analyse von Messunsicherheiten bei Laserlinienscannern [Businaki et al., 1992; Xi et al., 2001; Van Gestel et al., 2009; Vukašinović et al., 2010, 2011, 2012; Isheil et al., 2011; Muralikrishnan et al., 2012].

Inwieweit die Aufnahmeconfiguration das Messergebnis beeinflusst, wurde bspw. von Vukašinović et al. [2010, 2011, 2012] untersucht. Die Studien analysieren den Einfluss verschiedener Auftreffwinkel und Scanabstände sowie der Objektfarbe auf die resultierende Punktwolke eines Laserlinienscanners kombiniert mit einem kartesischen KMG. Über eine Prädiktionsfunktion gelang es, die Punktdichte sowie das Messrauschen in Abhängigkeit der Oberfläche und Aufnahmegeometrie vorherzusagen.

Ähnliche Untersuchungen zum Einfluss der Aufnahmegeometrie wurden von Xi et al. [2001] und Isheil et al. [2011] durchgeführt. Sie ermittelten den Einfluss des Scanabstands und des Auftreffwinkels des Lasers auf die Genauigkeit der Punktwolke anhand einer Kombination aus Ebenen- und Kugelnormal und entwickelten eine Kalibrierfunktion zur Minimierung der verursachten Messabweichungen.

Einen Ansatz zur Bestimmung der Präzision von Laserlinienscanner unter verschiedenen Aufnahmegeometrien lieferte Van Gestel et al. [2009]. Mithilfe eines einfachen Ebenennormals, das unter verschiedenen Einfallswinkeln und Scanabständen gemessen wurde, wurde die Präzision auf einfache Weise überprüft.

Alle genannten Verfahren haben gemeinsam, dass sie rein die Einflüsse durch Veränderungen der Aufnahmegeometrie unter der Annahme betrachten, dass alle Sensoreinstellungen optimal an eine für Laserscanning optimierte Oberfläche angepasst sind. Insbesondere jedoch mit Blick auf die Erfassung von Blattoberflächen ist es unerlässlich, zu untersuchen, inwieweit nicht für Laserscanner optimierte Oberflächen die Genauigkeit der Punktwolke beeinflussen. Muralikrishnan et al. [2012] zeigte bspw. anhand eines 1D-Lasertriangulationstasters, dass verschiedene Materialien durchaus einen signifikanten Einfluss auf die Genauigkeit von Laserscannern haben können. Darüber hinaus hat sich gezeigt, dass sich durch Veränderungen des Chlorophyllgehalts bei Blättern die optischen Eigenschaften der Oberfläche verändern [Paulus et al., 2014b], wodurch eine optimale Anpassung des Sensors nicht immer gegeben ist.

Für die vorliegende Dissertation ergibt sich somit die Fragestellung, inwieweit sich nicht an die Oberfläche angepasste Sensoreinstellungen wie die Belichtungszeit auf die Genauigkeit der Punktwolke auswirken. Darüber hinaus gilt es mit Blick auf die Messung der Blattdicke zu überprüfen, in welchem Maße die Oberflächenbeschaffenheit - insbesondere die Semitransparenz von Materialien - systematische Messabweichungen in Form eines Eindringeffekts verursacht.

2.3 Nahbereichslaserscanning von Pflanzen

Nahbereichslaserscanning hat sich in den vergangenen Jahren zu einem festen Bestandteil in der Pflanzenphänotypisierung entwickelt. Der Nahbereich bezeichnet dabei ein Messvolumen und eine räumliche Auflösung der eingesetzten Sensorik, die es ermöglichen, die Geometrie einzelner Pflanzenorgane (Blätter, Stängel oder Wurzeln) abzubilden [Paulus, 2017]. Zum Einsatz kommen sowohl passive Sensoren wie

Stereokamerasysteme [Biskup, 2009] als auch aktive Sensoren wie Structured-Light Scanner [Bellasio et al., 2012], Time-of-Flight Kameras [Alenyà et al., 2011] und die ebenfalls in dieser Arbeit eingesetzten Laserlinienscanner [Hanan et al., 2004; Loch et al., 2005; Ehlert et al., 2008; Wagner et al., 2010; Cai et al., 2013; Paulus et al., 2014c; Strothmann et al., 2017]. Die Anwendungen sind dabei ebenso vielfältig wie die eingesetzten Sensoren, wobei der eingesetzte Sensor immer auf die jeweilige Aufgabenstellung anzupassen ist.

Im Vordergrund steht beim Nahbereichslaserscanning i.d.R. die Erfassung und Digitalisierung der Pflanzen- bzw. Blattoberfläche [Hanan et al., 2004], um daraus mathematische Repräsentationen in Form von Triangulationen oder parametrischen Funktionen des Blatts abzuleiten [Loch et al., 2005]. Welche Informationen aus einer Laserscanneraufnahme abgeleitet werden können, hängt dabei maßgeblich von der verwendeten Aufnahmegeometrie ab. Ehlert et al. [2008] beschreibt bspw. einen Ansatz zu Ermittlung der Bewuchshöhe von Nutzpflanzen aus Lasermessungen in Nadirrichtung. Ein weiterer Ansatz mit vertikaler Laserausrichtung findet sich in Strothmann et al. [2017] mit dem Ziel, Nutzpflanzen und Unkraut im Feld zu klassifizieren. Mithilfe eines Triangulationsscanners mit verschiedenen Wellenlängen kann sowohl die Form als auch das Reflexionsverhalten bei verschiedenen Wellenlängen analysiert werden. Neben diesen Feldanwendungen können Aufbauten mit Nadirausrichtung des Laserscanners auch zur Beschreibung des zeitlichen Verlaufs von Blattstrukturen genutzt werden [Cai et al., 2013]. Mithilfe zweier orthogonal zueinander ausgerichteter horizontaler Linearantriebe und eines in Nadirrichtung blickenden Lasertriangulationssensors erhält man ebenfalls ein 2,5D-Abbild der Blattoberfläche und kann somit die zeitliche Veränderung bspw. durch Welken verfolgen. Alle drei gezeigten Ansätze liefern jedoch lediglich eine 2,5D-Aufnahme der Pflanzenstruktur, da bedingt durch die fixe Aufnahmegeometrie eine vollständige Erfassung der 3D-Struktur nicht möglich ist.

Für eine dreidimensionale Erfassung der Pflanzenstruktur ist es daher unerlässlich, die Aufnahmegeometrie des Scanner, d.h. dessen Position und Orientierung im Raum, zu verändern. Dabei muss die Registrierung der Einzelscans mindestens die gleiche Genauigkeit aufweisen wie der eingesetzte Laserscanner. Ein Ansatz, der sich insbesondere bei Laserlinienscannern durchgesetzt hat, ist die Kombination mit einem Messarm [Wagner et al., 2010; Paulus et al., 2014c]. Durch die hohe Flexibilität des Messarms lässt sich die Position und Orientierung des Scanners nahezu beliebig verändern und man erhält in Echtzeit eine registrierte Punktwolke mit Genauigkeiten im Bereich weniger Zehntel- bis Hundertstelmmillimeter. Mithilfe eines solchen Messsystems ist es möglich, sowohl die dreidimensionale Kleinstruktur von Wurzeln [Wagner et al., 2010] als auch die Oberfläche von Blättern oder die dreidimensionale Form der Stängel einer Pflanze zu erfassen [Paulus et al., 2014c].

Da derartige Sensoren im Vergleich zu den traditionellen meist manuellen Messungen in der Theorie eine deutlich höhere Genauigkeit versprechen, werden sie meist ohne weitere Betrachtung von möglichen Messabweichungen eingesetzt. Es hat sich jedoch gezeigt, dass die Messunsicherheiten, verursacht durch die Pflanzenoberfläche, durchaus einen großen Einfluss auf die resultierende Punktwolke [Paulus et al., 2014b] und dadurch auch auf die ermittelten phänotypischen Parameter [Dupuis et al., 2016] haben. Daher ist es unerlässlich die Messunsicherheiten der eingesetzten Sensoren beim Einsatz im Pflanzenmonitoring zu kennen und in der Messstrategie zu berücksichtigen.

In der vorliegenden Dissertation gilt es daher zu untersuchen, in welchem Maße die Oberflächenbeschaffenheit von Blättern sowie die einzelnen Blattschichten und deren Bestandteile (vgl. Abschnitt 3.3.3) die Genauigkeit der Scannermessung beeinflussen. Dabei spielen insbesondere der Einfluss auf die Signalintensität und systematische Messabweichungen, verursacht durch die Semitransparenz der Blattschichten, eine entscheidende Rolle.

3. Messtechnische Grundlagen

Dieses Kapitel befasst sich sowohl mit den messtechnischen Grundlagen der einzelnen Komponenten des Messsystems als auch mit den Eigenschaften von Blättern als Messobjekt. Im Fokus stehen dabei neben den Funktionsprinzipien auch die möglichen Quellen für Messunsicherheiten.

3.1 Der Messarm

Messarme, auch bezeichnet als Gelenkarm-Koordinatennessgeräte [VDI, 2009], stellen eine spezielle Klasse der KMG dar. Ähnlich wie Industrieroboter bestehen sie meist aus mehreren Armelementen und einer Tastspitze, die über Drehgelenke miteinander verbunden sind. Die Anzahl der Gelenke, auch die Anzahl der Freiheitsgrade (DoF), variiert in der Regel je nach Einsatzgebiet zwischen sechs (taktile) und sieben (scannend). In den Gelenken sind präzise Drehwinkelgeber verbaut, welche die Stellung jedes Gelenks erfassen. Über die bekannte geometrische Konstruktion des Arms lässt sich die Koordinate der Tastspitze über eine kinematische Kette berechnen. Anders als die meisten geodätischen Messinstrumente ist der Messarm ein sogenanntes redundantes Messsystem [Sladek et al., 2013]. Dies bedeutet, dass der Messarm einen Punkt innerhalb des Messvolumens ohne Veränderung des Standpunkts aus unendlich verschiedenen Richtungen antasten kann, was es ihm ermöglicht, auch komplexe dreidimensionale Strukturen aus einer Messposition zu erfassen. Die dafür eingenommenen Armstellungen, d.h. die Kombinationen aller sieben Winkelstellungen, und die sich daraus ergebenden Tasterposition und -orientierungen werden im Folgenden als Armposen bezeichnet.

3.1.1 Mathematische Beschreibung des Messarms

Das Messprinzip eines Messarms entspricht grundsätzlich dem eines einseitig angeschlossenen räumlichen Polygonzugs [Weckenmann, 2012], wobei die Distanzen konstruktiv durch die Armelemente vorgegeben sind. Dies bedeutet, dass das Basisbezugssystem des Messarms, gelagert im Standfuß des Arms, sukzessive über die einzelnen Gelenke bis in die Tastspitze transformiert wird. Die Lage der einzelnen Bezugssysteme in den Gelenken ist in Abbildung 3.1 **A** dargestellt. Als Ergebnis erhält man die Koordinate der Tastspitze (Kugelmittelpunkt) und deren Orientierung mit Bezug zum Basisbezugssystem. Um ein einheitliches Vorgehen für verschiedene Messarmtypen zu garantieren, nutzt man für die Transformation zwischen zwei Gelenken die Konventionen von Denavit und Hartenberg [Hartenberg & Denavit, 1955]. Diese beschreiben die kinematische Kette eines 7 DoF Messarms als Aneinanderreihung von Transformationen zwischen den einzelnen Gelenken über

$$\mathbf{P}_{Arm} = \mathbf{T}_0^1 \mathbf{T}_1^2 \mathbf{T}_2^3 \mathbf{T}_3^4 \mathbf{T}_4^5 \mathbf{T}_5^6 \mathbf{T}_6^7 \mathbf{X}_{Taster} \quad . \quad (3.1)$$

Darin beschreibt \mathbf{X}_{Taster} die Länge und Exzentrizität der Tastspitze und \mathbf{T}_i^{i+1} die Transformation zwischen zwei aufeinanderfolgenden Gelenken. Jede dieser Transformationen besteht ihrerseits wiederum aus vier Elementartransformationen, deren Parameter die geometrischen Konstruktion des Messarms beschreiben:

$$\begin{aligned} \mathbf{T}_i^{i+1} &= Rot_z(\bar{\Theta}_i) \cdot Trans_z(d_i) \cdot Trans_x(a_i) \cdot Rot_x(\alpha_i) \\ &= \begin{bmatrix} \cos(\bar{\Theta}_i) & -\sin(\bar{\Theta}_i)\cos(\alpha_i) & \sin(\bar{\Theta}_i)\sin(\alpha_i) & a_i\cos(\Theta_i) \\ \sin(\bar{\Theta}_i) & \cos(\bar{\Theta}_i)\cos(\alpha_i) & -\cos(\bar{\Theta}_i)\sin(\alpha_i) & a_i\sin(\Theta_i) \\ 0 & \sin(\alpha_i) & \cos(\alpha_i) & d_i \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \end{aligned} \quad (3.2)$$

Unter der Annahme, dass die z-Achse der transformierten Bezugssysteme immer in Richtung der Rotationsachsen zeigt, ergibt sich folgende geometrische Interpretation der Transformationsparameter [Spong et al., 2006]:

- Θ_i ist die Rotation um den Messwert des Drehwinkelgebers um die z-Achse
- d_i ist eine Translation in z-Richtung um die Länge eines Armelements (Abb. 3.1 A)
- a_i ist eine Translation in x-Richtung und beschreibt die Exzentrizität der Rotationsachsen (Abb. 3.1 C)
- α_i ist der Rotationswinkel um die x-Achse zwischen zwei aufeinanderfolgenden Rotationsachsen (Abb. 3.1 C)

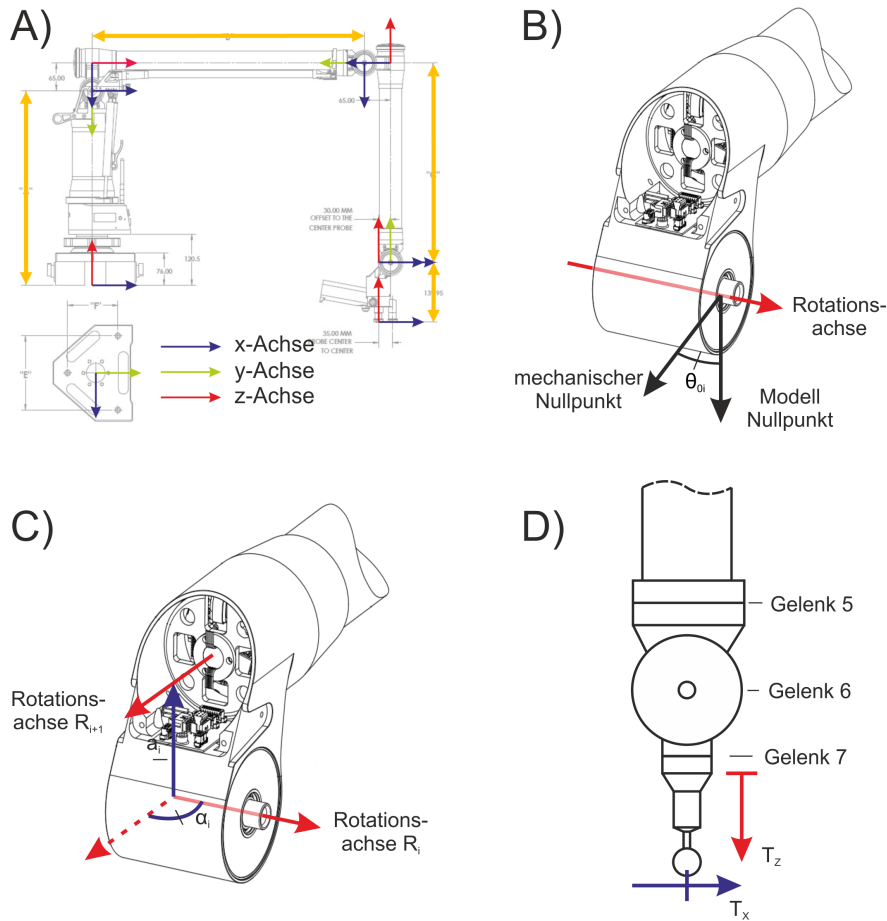


Abbildung 3.1: Grafische Darstellung der Denavit-Hartenberg-Parameter. **A)** Lage und Orientierung der Bezugssysteme für jedes Gelenk des ROMER Infinite 2.0 und die Armlängen (gelb), **B)** Nullpunkt des Drehwinkelgebers, **C)** Exzentrizität und Richtung der Rotationsachse, **D)** Offset des Tasters. Bildquellen: [Romer Inc., 2008; Tait, 2012] (modifiziert)

Diese Transformationsparameter, im weiteren Verlauf auch als Denavit-Hartenberg-Parameter (DH-Parameter) bezeichnet, beschreiben das mathematische Modell des Messarms. Der Parameter Θ_i gibt darin die Winkelstellung des *iten* Gelenks an und entspricht somit der Beobachtung eines Drehwinkelgebers. Dieser hat sowohl in der Realität als auch im kinematischen Modell einen Nullpunkt, der aufgrund der beliebigen Einbaulage des Drehwinkelgebers eine Verdrehung aufweisen kann (Abbildung 3.1 B). Diese Verdrehung $\Theta_{0,i}$ gilt es, additiv in Gleichung (3.2) zu berücksichtigen.

3.1.2 ROMER Infinite 2.0 Messarm

Der im Rahmen dieser Dissertation eingesetzte Messarm des Typs Infinite 2.0 der Firma ROMER mit einem sphärischen Messvolumen mit einem Durchmesser von 2,8 m (Abbildung 1.1) verfügt über sieben

Gelenkachsen und entspricht einer typischen 2-2-3 Konfiguration (Abbildung 3.2), d.h. zwei Rotationsachsen am Schultergelenk (1 & 2), zwei am Ellbogengelenk (3 & 4) und drei am Handgelenk (5, 6 & 7). Die Doppelrohrkonstruktion der Armelemente aus Kohlefaser soll sowohl geometrische als auch thermische Stabilität gewährleisten [Romer Inc., 2009a]. Mit den verbauten Haidenhain Drehwinkelgebern sind laut Hersteller folgende Genauigkeiten zu erreichen:

- Einzelpunktreproduzierbarkeit: $0,045 \text{ mm (mpe)}$
- Volumetrische Genauigkeit: $0,064 \text{ mm (mpe)}$

Die Genauigkeitsangaben entsprechen dabei maximal zulässigen Abweichungen, „maximum permissible error“ (mpe), die angelehnt an die ASME B89.4.22-2004 über die sogenannte „range/2“ Methode für Abweichungen in x-, y-, und z-Richtung bestimmt werden [Romer Inc., 2008]. Für die Einzelpunktreproduzierbarkeit ist bspw. ein Punkt in unterschiedlichen Armposen zu messen und die maximale Abweichungsspanne zum Mittelwert in x-, y-, und z-Richtung zu berechnen und durch zwei zu teilen. Die ermittelten Werte dürfen die maximal zulässige Abweichung von $0,045 \text{ mm}$ nicht überschreiten. Da dies nur partiell der mathematischen Vorgehensweise der ASME B89.4.22 - 2004 entspricht, erfolgt eine Anpassung des Grenzwertes der Spezifikation. Die ASME Richtlinie beschreibt die Einzelpunktabweichung als maximale vektorielle Abweichung zum Mittelwert aller Messungen in verschiedenen Armposen. Demnach liegt die maximal zulässige Einzelpunktabweichung für den ROMER nach ASME bei $0,078 \text{ mm (mpe)}$.

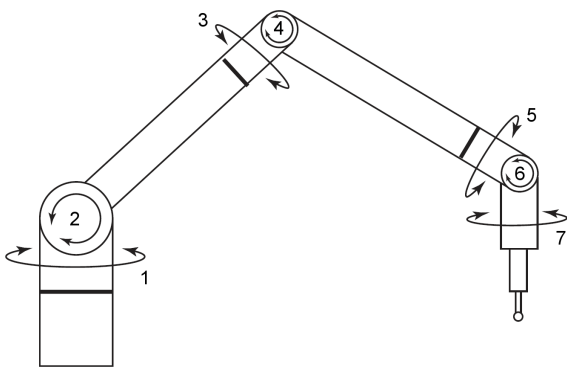


Abbildung 3.2: Typische 2-2-3 Konfiguration eines Messarms mit den Rotationsachsen bzw. Gelenken 1 bis 7. Bildquelle: [ASME, 2004] (modifiziert).

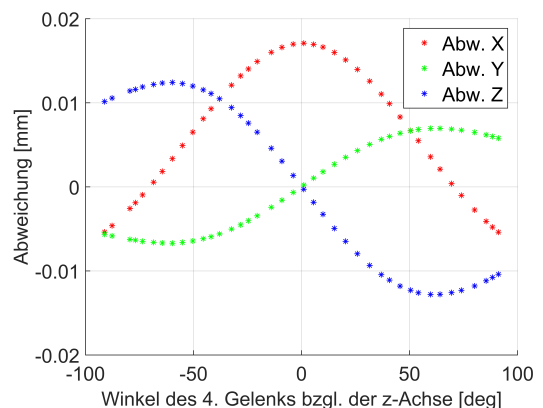


Abbildung 3.3: Abweichungen in x-, y- und z-Richtung einer Einzelpunktmessung von der mittleren Koordinate des Messpunkts, verursacht durch eine Abweichung in Θ_3 .

3.1.3 Genauigkeitsaspekte bei Messarmen

Grundsätzlich gibt es bei Messarmen drei Quellen für Messunsicherheiten:

1. zufällige und systematische Messunsicherheiten der Drehwinkelgeber,
2. systematische Abweichungen der DH-Parameter von der geometrischen Konstruktion des Messarms und
3. dynamische Effekte, wie Deformationen des Arms durch Temperatur oder äußere Kräfte (zeitlich veränderlich).

Dank der stabilen Kohlefaser Doppelrohrkonstruktion des Messarms werden insbesondere die dynamischen Effekte minimiert und werden daher im Rahmen dieser Dissertation als nicht signifikant angenommen [Hexangon Metrology GmbH, 2009].

Wie bereits im vorangegangenen Abschnitt beschrieben, entspricht das Messprinzip dem eines einseitig angeschlossenen, räumlichen Polygonzugs mit bekannten Distanzen. Die Drehwinkelgeber messen dabei die Brechungswinkel zwischen den einzelnen Gelenken. Abweichungen in den Brechungswinkeln führen folglich zu einer Verschwenkung des gesamten nachfolgenden Zugs. Somit ist ersichtlich, dass der Einfluss eines Drehwinkelgebers auf die Genauigkeit der 3D-Koordinate mit zunehmenden Abstand zur Basis abnimmt. Ebenso ist zu erwarten, dass gestreckte Armposen, bei denen der Messpunkt sehr weit von der Basis entfernt liegt, aufgrund des längeren Hebels zu ungenaueren Messungen führen.

Im Rahmen dieser Dissertation wird angenommen, dass die Drehwinkelgeber seitens des Herstellers kalibriert sind und keine systematischen Messabweichungen enthalten. Folglich verbleiben lediglich das Messrauschen des Sensors sowie ggf. Abweichungen durch Spiel in den Kugellagern der Drehgelenke, was beides als zufällig angesehen werden kann. Somit ist auch die Auswirkung auf die 3D-Koordinate zufällig.

Maßgeblich für die Genauigkeit der 3D-Koordinaten ist die Genauigkeit des kinematischen Modells, sprich die Genauigkeit der DH-Parameter. Wie im vorherigen Abschnitt beschrieben, spiegeln die DH-Parameter die geometrische Konstruktion des Messarms wider. Weichen diese nun von den „wahren Werten“ ab, führt dies zu einer fehlerhaften Berechnung des kinematischen Modells und somit zu einer Abweichung der 3D-Koordinate. Dabei ist ersichtlich, dass eine Abweichung in einem der DH-Parameter jede Messung in gleicher Weise beeinflusst und daher zu einer systematischen Messabweichung führt. Abbildung 3.3 zeigt die Achsabweichungen einer Einzelpunktmessung, bei der ein fixer Messpunkt (Kegelbohrung) aus unterschiedlichen Armposen angetastet wird. Im Falle eines idealen kinematischen Modells sollten alle Messpunkte lediglich zufällige Abweichungen zur mittleren Koordinate aufweisen, verursacht durch das Messrauschen der Drehwinkelgeber. Die Abweichungen eines DH-Parameter hingegen verursachen den in Abbildung 3.3 zu erkennende Verlauf. Es ist ersichtlich, dass sich die Auswirkung einer Abweichung im kinematischen Modell mit der Armpose und somit auch der Position des Messpunkts verändert. Die dargestellten Abweichungen beziehen sich dabei auf die Achsen des Basisbezugssystems (Abbildung 3.1 **A**), wodurch Punkte in unterschiedlichen Bereichen des Messbereichs nur schwer vergleichbar sind. Um die Vergleichbarkeit zu verbessern, erfolgt eine Transformation der Abweichungen in ein lokales, messpunktbezogenes Bezugssystem (Abbildung 3.4). Dafür wird das Basisbezugssystem in den Messpunkt transformiert, sodass dessen z-Achse (z_{local}) parallel zur z-Achse des Basisbezugssystems steht und die y-Achse (y_{local}) diese schneidet. Die x-Achse (x_{local}) ergänzt das lokale Bezugssystem zu einem Rechtssystem (Abbildung 3.4). Diese Art der Darstellung ermöglicht es, die Abweichungen in Radial- (Δy_{lokal}), Tangential- (Δx_{lokal}) und Vertikalabweichungen (Δz_{lokal}) aufzuteilen.

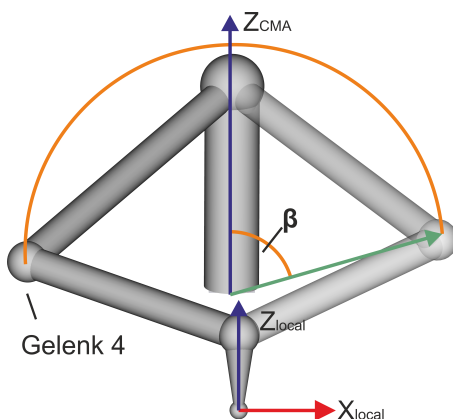


Abbildung 3.4: Lokales Koordinatensystem zur Beschreibung von Radial-, Tangential- und Vertikalabweichungen

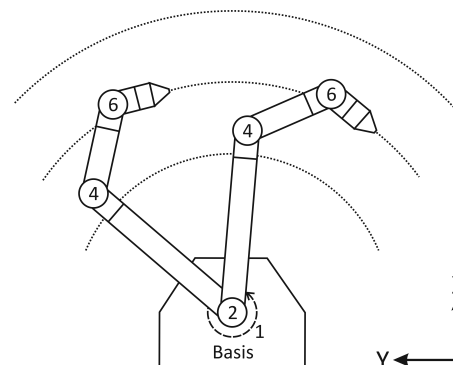


Abbildung 3.5: Punkte auf einem ebenen Kreis um die Vertikalachse können mit fast identischer Armpose angetastet werden.

Ferner ermöglicht diese Darstellung, die Abweichungen in Abhängigkeit der Armpose zu beschreiben. Dafür wird die Position des vierten Gelenks (vgl. Abbildungen 3.2 und 3.4) in die xz -Ebene des lokalen Koordinatensystems projiziert und der Winkel β zur Vertikalachse berechnet (Abbildung 3.4).

Mithilfe dieser Darstellung lässt sich eine weitere Besonderheit von Messarmen verdeutlichen. Betrachtet man Punkte, die auf gleicher Höhe liegen, sprich die gleiche z -Koordinate aufweisen, und den gleichen horizontalen Abstand zur z -Achse haben, so lässt sich zeigen, dass diese Punkte mit der gleichen Armpose messbar sind (Abbildung 3.5). Lediglich das erste Gelenk ist um einen bestimmten Winkel verdreht. Unter der Annahme, dass die Drehwinkelgeber nur zufällige Abweichungen aufweisen, ergeben sich für Punkte auf einem ebenen Kreis um die Basis identische systematische Abweichungen. Zur Verdeutlichung dieser Eigenschaft sind in Abbildung 3.6 Einzelpunktabweichungen, verursacht durch eine simulierte Abweichung eines DH-Parameters, sowohl im armfesten als auch im lokalen, punktfesten Bezugssystem für zwei Messpunkte mit gleicher Höhe und gleichem Abstand zur Basis jedoch in unterschiedlichen Bereichen des Messvolumens (vergleichbar zu Abbildung 3.5) dargestellt.

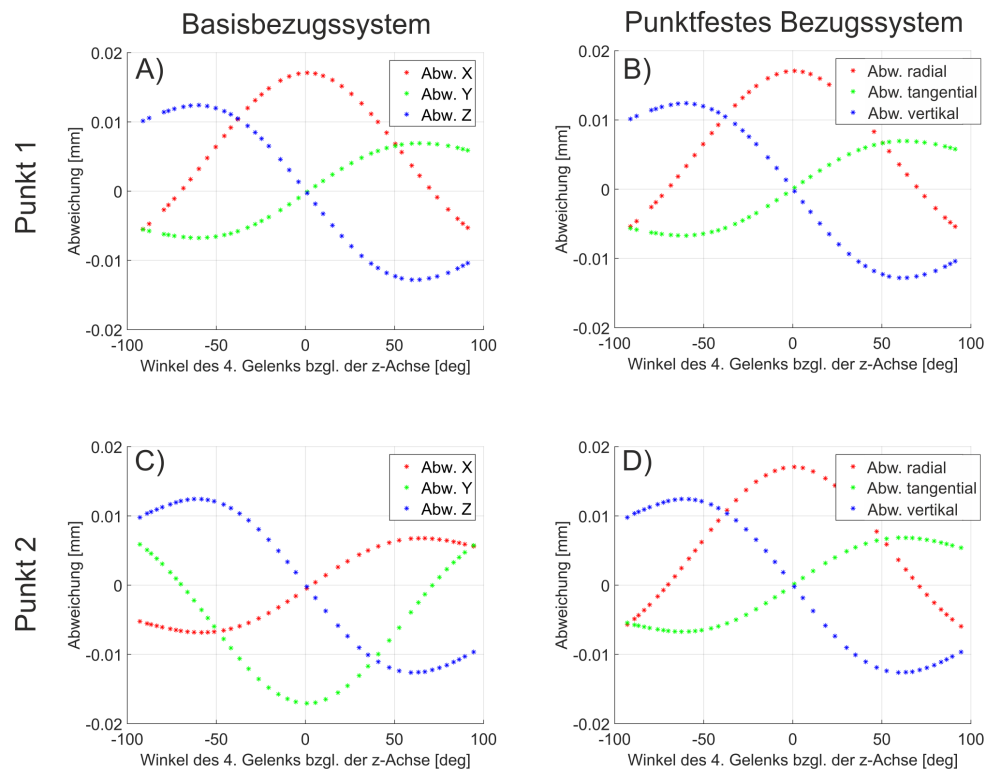


Abbildung 3.6: Einzelpunktabweichungen verursacht durch eine Abweichung im DH-Parameter Θ_3 dargestellt im Basis- und punktfesten Bezugssystem. **A)** Punkt 1 im Basisbezugssystem, **B)** Punkt 1 im punktfesten Bezugssystem, **C)** Punkt 2 im Basisbezugssystem, **D)** Punkt 2 im punktfesten Bezugssystem.

Durch die relative Veränderung der Lage des Messpunkts im Vergleich zum armfesten Bezugssystem beschreiben die Messabweichungen einen unterschiedlichen Verlauf in x -, y - und z -Richtung (**A** & **C**). Transformiert in das punktfeste Bezugssystem zeigt sich hingegen, dass der Verlauf der Abweichungen in Radial-, Tangential- und Vertikalrichtung gleich ist (**B** & **D**).

Zusammenfassend lässt sich festhalten, dass zum Einen die Messunsicherheiten der Drehwinkelgeber (hier nur zufällige Abweichungen) und zum Andern Abweichungen der DH-Parameter von der geometrischen Konstruktion des Messarms die erreichbare 3D-Genauigkeit beeinflussen. Dabei verursachen insbesondere Abweichungen der DH-Parameter systematische Messabweichungen, die sich je nach Armpose unterschiedlich auf die Koordinate der Tastspitze auswirken. Wie bereits in Abschnitt 2.1 beschrieben, sind die DH-Parameter das Ergebnis einer Kalibrierung und können somit nur mit einer endlichen Genauigkeit bestimmt werden. Die verbleibenden Abweichungen zum „wahren“ Modell, gegeben durch die geometrische

Konstruktion des Messarms, verursachen folglich systematische Messabweichungen, welche die Genauigkeit aller 3D-Punkte beeinflussen. Abschnitt 5.1 beschreibt in diesem Zusammenhang einen neuen Kalibrieransatz und bewertet die darüber geschätzten DH-Parameter. Daraus lassen sich dann Aussagen über die erreichbare Genauigkeit und eine optimale Messstrategie für die Bestimmung der Blattdicke treffen.

3.2 Der Laserlinienscanner

Nahbereichslaserscanner, die in Kombination mit einem Messarm oder einem kartesischen KMG verwendet werden, sind in der Regel triangulationsbasierte Laserlinienscanner. Diese verfügen über einen kleinen Messbereich bei gleichzeitig hoher Genauigkeit im Bereich weniger Hundertstelmillimeter. Die folgenden Abschnitte stellen das allgemeine Messprinzip, die im Rahmen dieser Dissertation eingesetzten Sensoren und deren Unsicherheitsbudget dar.

3.2.1 Grundlegendes Messprinzip von Laserlinienscannern

Laserlinienscanner arbeiten nach dem Prinzip des Lichtschnittverfahrens (Abbildung 3.7), welches eine Verallgemeinerung des 1D-Triangulationsverfahrens darstellt [Donges & Noll, 1993]. Dabei wird über eine spezielle Optik eine Laserlinie auf die Oberfläche projiziert, von dort zurückgestreut und über eine Empfangsoptik auf eine lichtempfindliche Sensormatrix (charge-coupled device (CCD) oder complementary metal-oxide-semiconductor (CMOS)) abgebildet. Die Auswerteeinheit ermittelt aus der Form der Laserlinie auf der Sensormatrix die zweidimensionale Punktwolke der Oberfläche (Scanlinie), wobei jedem Punkt ein Abstandswert (Z) und die dazugehörige Position innerhalb der Laserlinie (Y) zugeordnet wird (Abbildung 3.8).

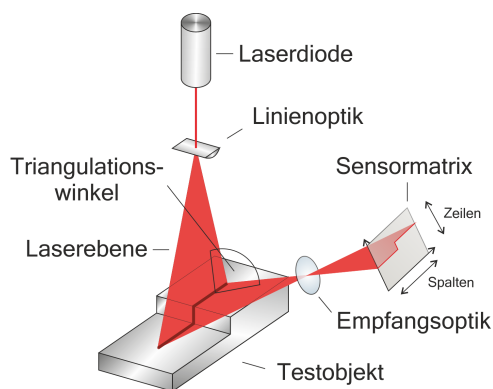


Abbildung 3.7: Prinzipskizze des Lichtschnittverfahrens

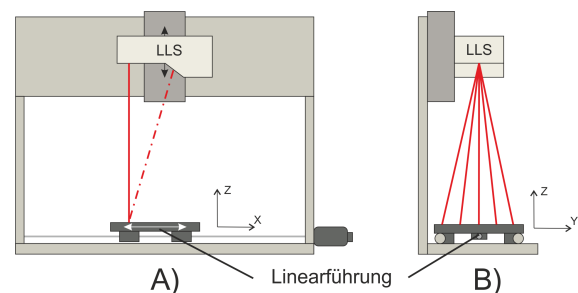


Abbildung 3.8: Messsystem bestehend aus Linearführung und Laserlinienscanner (LLS) in Frontal- (A) und Seitenansicht (B). Dieser Messaufbau kann sowohl mit dem scanCONTROL 2700-100 als auch mit dem gapCONTROL 2911-100 verwendet werden.

Dabei sind die Zeilen der Sensormatrix mit der Abstandsmessung verknüpft, während die Spalten die Anzahl an Messpunkten je Scanlinie festlegen (Abbildung 3.7). Die eigentliche Abstandsberechnung basiert auf der Ermittlung des Schwerpunkts der Laserlinie. Im Optimalfall entspricht die Intensitätsverteilung quer zur abgebildeten Laserlinie einer Gaußfunktion [Donges & Noll, 1993], die auf mehreren Pixelreihen abgebildet ist (Abbildung 3.9). Die Intensität beschreibt dabei die Menge des empfangenen Lichts eines Sensorelements im Vergleich zur maximal möglichen Lichtmenge. Die Schwerpunktberechnung erfolgt dabei im einfachsten Fall über ein intensitätsgewichtetes, spaltenweises Mittel, wobei sich in der Literatur auch alternative Ansätze finden lassen [Naidu & Fisher, 1996; Forest et al., 2003]. Damit ist ersichtlich, dass die Qualität der Schwerpunktbestimmung und folglich auch die Abbildungsqualität der Laserlinie auf der Empfangsmatrix direkten Einfluss auf die Genauigkeit der Abstandsmessung hat. Um diesbezüglich eine Scharfabbildung der Laserlinie über den gesamten Messbereich zu garantieren, muss die Ausrichtung der Sensormatrix die „Scheimpflugbedingung“ erfüllen [Donges & Noll, 1993]. Diese besagt, dass sich für eine Scharfabbildung die Objekt-, die

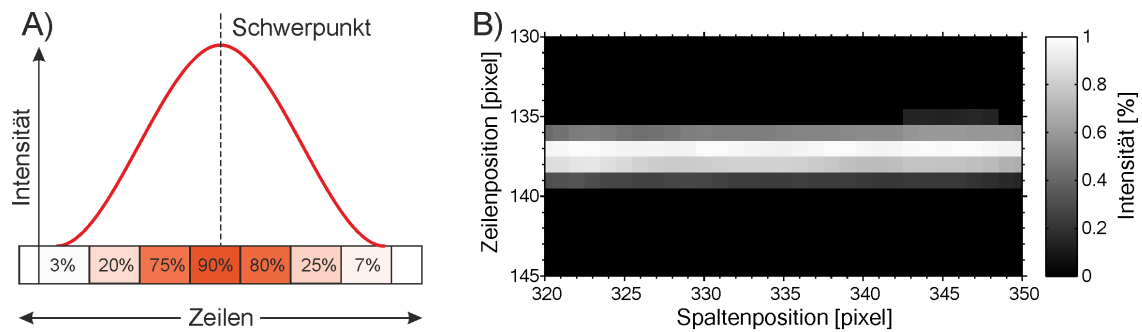


Abbildung 3.9: A) Querschnitt der Laserlinie mit optimaler Intensitätsverteilung, B) Ausschnitt der Sensormatrix eines Laserlinienscanners unter optimalen Messbedingungen.

Objektiv- und die Bildebene in einer gemeinsamen Geraden schneiden müssen.

Grundsätzlich handelt es sich bei Laserlinienscannern um relativ messende Sensoren, mit denen lediglich eine Abstandänderung zu erfassen ist. Über eine Kalibrierung seitens des Hersteller ist es jedoch möglich, die Messungen auf einen Referenzpunkt zu beziehen, um eine Absolutmessung zu erhalten. Zusätzlich gilt es zu beachten, dass die Sensoren über einen Blindbereich oberhalb und unterhalb des eigentlichen Messbereichs verfügen, in dem keine Messungen möglich sind, da die Laserlinie nicht auf der Sensormatrix abgebildet wird.

3.2.2 Im Rahmen dieser Arbeit eingesetzte Laserscanner

Im Rahmen dieser Dissertation kommen drei verschiedene Laserlinienscanner zum Einsatz, wobei einer allein in Kombination mit dem Messarm und die anderen im Kombination mit einer Linearführung verwendet werden.

Perceptron ScanWorks-V5

Der Perceptron ScanWorks-V5 Laserlinienscanner ist speziell für den Einsatz mit portablen Messarmen konzipiert und ist über eine mechanische Aufnahme mit dem Messarm zu verbinden. Der Sensor verfügt über zwei lichtempfindliche Sensorelemente und ermöglicht so Messungen in einem Sichtbereich von $140 \times 110 \text{ mm}^2$ (Breite \times Tiefe max.). Der mittlere Messabstand beträgt dabei 100 mm . Die beiden Sensorelemente ermöglichen eine Auflösung von bis zu 7640 Punkten je Scanlinie bei einer Messgenauigkeit von $\sigma = 0,012 \text{ mm}$ und einer maximalen Messfrequenz von 60 Hz [Perceptron Inc., 2006]. Der Scanner verfügt über eine externe Auswerteeinheit, in der die Messungen der Empfangssensoren ausgewertet und mit der Armpose verknüpft werden. Die Steuerung der Sensoreinstellungen, wie bspw. der Belichtungszeit, erfolgt dabei automatisch, über vordefinierte Messprofile oder manuell. Leider beschränkt sich der Informationsgehalt der Messung auf die reinen 3D-Koordinaten sowie die Position und Orientierung des Scanners im Raum, d.h. ein Zugriff auf die Sensormatrix oder Intensitätswerte der Empfangssensorik ist nicht möglich.

Micro-Epsilon scanCONTROL 2700-100 und gapCONTROL 2911-100 BL

Die beiden Laserlinienscanner der Firma Micro-Epsilon sind nicht für den Einsatz mit dem Messarm konzipiert und werden daher in Kombination mit einer Linearführung verwendet (Abbildung 3.8). Beiden Sensoren arbeiten ebenfalls nach dem Prinzip des Lichtschnittverfahrens und verfügen über einen Messbereich von ungefähr $100 \times 100 \text{ mm}^2$ (Breite \times Tiefe in Messbereichsmittle), unterscheiden sich jedoch hinsichtlich Laserfarbe, Auflösung und Genauigkeit. Der scanCONTROL arbeitet mit einer Wellenlänge von 658 nm (rot) und ermöglicht laut Hersteller eine Präzision von $\sigma = 0,015 \text{ mm}$ bei einer Auflösung von 640 Punkten

je Scanlinie und einer maximalen Profillfrequenz von 100 Hz . Demgegenüber verfügt der gapCONTROL über eine Wellenlänge von 405 nm (blau) und ermöglicht eine Präzision von $\sigma = 0,012\text{ mm}$. Durch eine größere Sensormatrix steigt die Auflösung auf 1280 Punkte je Scanlinie bei einer höheren Messfrequenz von 300 Hz . Im Vergleich zum Perceptron bieten beide Sensoren die Möglichkeit, zusätzliche Informationen wie die Intensität oder die Breite der Laserlinie auszulesen. Dies ermöglicht es, das empfangene Signal bei unterschiedlichen Sensoreinstellungen oder bei verschiedenen Oberflächen detailliert zu analysieren und so Ursachen für Messunsicherheiten zu identifizieren.

3.2.3 Genauigkeitsaspekte bei Laserlinienscannern

Die folgenden Ausführungen basieren weitestgehend auf den theoretischen Grundlagen der Lasertriangulation und des Lichtschnittverfahrens (vgl. [Donges & Noll, 1993]).

Die primäre Messgröße bei Laserlinienscannern ist die Intensität der belichteten Sensorelemente, aus der über eine spaltenweise Schwerpunktbestimmung die Position der Laserlinie auf der Sensormatrix und schließlich der Abstand bestimmt wird. Somit ist ersichtlich, dass die Genauigkeit der Distanzbestimmung direkt mit der Ausprägung der empfangenen Laserlinie zusammenhängt. Donges & Noll [1993] nennen in diesem Zusammenhang physikalische Einflussfaktoren wie bspw. den Strahlverlauf und Abbildungsfehler der Empfangsoptik. Da es sich bei den eingesetzten Sensoren jedoch um kommerzielle und somit kalibrierte Messsysteme handelt, wird angenommen, dass derartige Einflüsse minimal sind. Somit lässt sich das Unsicherheitsbudget von Laserlinienscannern in die drei weiteren Aspekte aufteilen:

1. Messunsicherheiten bedingt durch die Einstellungen des Sensors und dessen Rauschen,
2. Messunsicherheiten bedingt durch die Eigenschaften des Messobjekts und
3. Messunsicherheiten bedingt durch eine Veränderung der Aufnahmegeometrie.

Messunsicherheiten bedingt durch die Einstellungen des Sensors und dessen Rauschen

Wie bereits in Abschnitt 3.2.1 angedeutet, hängt die Genauigkeit der Abstandbestimmung direkt von der Abbildung der Laserlinie auf dem CCD-Flächensensor ab. Ausgehend von einer diffus streuenden Oberfläche mit homogenen Rückstreuungseigenschaften und einer konstanten Leistung des ausgesandten Lasers, lässt sich die Abbildung der Laserlinie auf der Empfangsmatrix über die Belichtungszeit steuern. Für die Genauigkeit spielt insbesondere die Intensität der abgebildeten Laserlinie und deren Verteilung eine entscheidende Rolle. Abbildung 3.9 **A** zeigt eine optimale Intensitätsverteilung der Laserlinie im Querschnitt. Dabei ist zu erkennen, dass die Laserlinie über mehrere Zeilen der Sensormatrix verläuft und eine gauß'sche Verteilung aufweist. Somit lässt sich über ein intensitätsgewichtetes Mittel der Schwerpunkt der Laserlinie spaltenweise mit Subpixelgenauigkeit bestimmen [Naidu & Fisher, 1996].

Weicht man von einer optimalen Belichtungszeit ab und belichtet die Sensormatrix zu kurz, so verringert sich auf der einen Seite die Intensität aller belichteter Pixel und man erhält auf der anderen Seite eine schmalere Laserlinie (Abbildung 3.10 **A**). Da jedes CCD-Element über ein Systemrauschen verfügt, welches sich wiederum aus dem Photonenrauschen (Shot Noise), dem Dunkelstromrauschen (Dark Current Noise) und dem Rauschen der elektronischen Weiterverarbeitung (Readout Noise) zusammensetzt, führt die verringerte Intensität zu einem schlechteren Signal-Rausch-Verhältnis [Luhmann, 2010], insbesondere in den schwächer belichteten Nebenseiten. Verstärkt wird dieser Effekt durch die Tatsache, dass sowohl das Photonenrauschen als auch das Dunkelstromrauschen poissonverteilt sind und das Rauschen daher proportional zur Wurzel der Anzahl an empfangenen Photonen η ist [Hering & Martin, 2006]:

$$\sigma_{shot} = \sqrt{\eta} \quad . \quad (3.3)$$

Das schlechtere Signal-Rausch-Verhältnis beeinflusst folglich auch die Schwerpunktbestimmung. Belichtet man die CCD-Matrix hingegen zu lang, so kommt es zu einer Überbelichtung einzelner oder mehrerer Pixel (Abbildung 3.10 **B**) und infolgedessen zu einer Ausbreitung von Ladungen in benachbarte Pixel

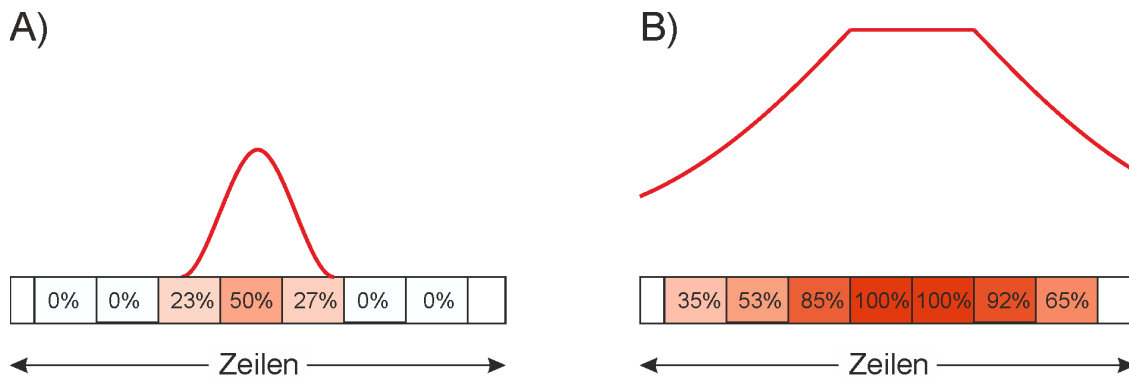


Abbildung 3.10: Intensitätsverteilung der Laserlinie im Querschnitt bei **A)** zu kurzer Belichtungszeit und **B)** zu langer Belichtungszeit.

(blooming) [Luhmann, 2010]. Da jedes Pixel nur eine bestimmte Menge an Ladung aufnehmen kann, ist die Verteilungsfunktion der Intensität nach oben hin begrenzt und entspricht bei einer Überbelichtung nicht mehr der Normalverteilung. Je nach Ausbreitungsrichtung des Blooming-Effekts (i.d.R. in Spaltenrichtung) kommt es zu einer systematischen Abweichung in der Schwerpunktbestimmung. In welcher Form und Größenordnung sich diese Abweichungen auf die Messungen mit einem Laserlinienscanner auswirken ist jedoch weitestgehend unbekannt. Daher wurde im Rahmen dieser Dissertation eine Untersuchung mit den oben genannten Scannern der Firma Mirco-Epsilon durchgeführt und deren Ergebnisse in Abschnitt 5.2 detailliert dargestellt.

Messunsicherheiten bedingt durch die Eigenschaften des Messobjekts

Bei laserbasierten Messsystemen haben die Form und die optischen Eigenschaften der Objektfläche einen starken Einfluss auf die Messgenauigkeit. So führen bspw. stark unterschiedlich reflektierende Bereiche eines Objekts bei gleichbleibender Belichtungszeit zu einer Über- oder Unterbelichtung von Teilen der Scanlinie, was zu Messabweichungen führen kann.

Ein Aspekt, dem insbesondere in Hinsicht auf die Vermessung von Pflanzen bzw. Blättern eine besondere Bedeutung zukommt, ist der vom terrestrischen Laserscanning bekannte Einfluss poröser oder semitransparenter Materialien [Gordon, 2008]. Bei Materialien wie Styropor, Marmor oder Keramik kommt es ebenso wie bei Blättern (vgl. Abschnitt 3.3) zu einem Eindringen des Lasers in die Objektstruktur. Dieses Eindringen verursacht eine Streuung des Laserstrahls und führt in Folge sowohl zu einer breiteren, stark verrauschten Laserlinie (Abbildung 3.11) als auch zu einer Verschiebung des Schwerpunkts auf der Sensormatrix.

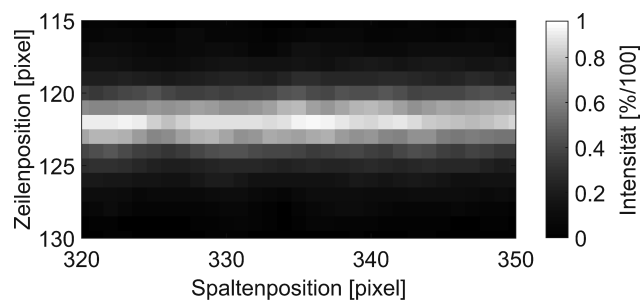


Abbildung 3.11: Ausschnitt der CCD-Matrix bei der Messung einer Marmorebene.

Die Konsequenz ist zum Einen ein erhöhtes Messrauschen und eine systematisch zu lange Distanzbestimmung. Welche Größenordnungen diese Abweichungen - sowohl die zufälligen als auch die systematischen - aufweisen, ist bei Laserlinienscannern weitestgehend unbekannt und wurde daher in zwei für diese Dissertation relevanten Veröffentlichung behandelt (vgl. Veröffentlichung **C** [Dupuis & Kuhlmann, 2014] und

Veröffentlichung **D** [Dupuis et al., 2015]). Die Ergebnisse dieser Untersuchungen sind in Abschnitt 5.2 sowohl für künstliche Objekte als auch Blätter detailliert beschrieben.

Dabei gilt es zu beachten, dass die gemessene Eindringtiefe, d.h. die systematische Abweichung in der Distanzbestimmung nicht der tatsächlichen Eindringtiefe des Lasers entspricht. So ist bspw. aus der Dermatologie bekannt, dass rotes Licht (630 nm) bis zu 2 mm tief in menschliche Haut eindringen kann [Barolet, 2008]. Es ist jedoch höchst unwahrscheinlich, dass in dieser Tiefe reflektiertes Licht mit ausreichender Intensität auf die Sensormatrix des Laserscanners zurückkehrt, da es auf dem Rückweg erneut die Objektstruktur passieren muss. Daher wird im Folgenden der Begriff der „messbaren Eindringtiefe“ für die systematische Abweichung der Distanzmessung verwendet.

Messunsicherheiten bedingt durch eine Veränderung der Aufnahmegeometrie

Vom terrestrischen Laserscanning ist bekannt, dass eine schlechte Aufnahmegeometrie bzw. ein flacher Auftreffwinkel des Lasers die Genauigkeit der reflektorlosen Distanzmessung verringern können [Kern, 2003; Gordon, 2008]. Ähnliches gilt ebenso bei Laserlinienscannern. Dabei lässt sich die Aufnahmegeometrie in drei Komponenten unterteilen (vgl. Abbildung 3.12):

1. den Scanabstand d , sprich den Abstand zwischen Scanner und Objekt,
2. den Auftreffwinkel α innerhalb der Laserebene und
3. den Auftreffwinkel β orthogonal zur Laserebene.

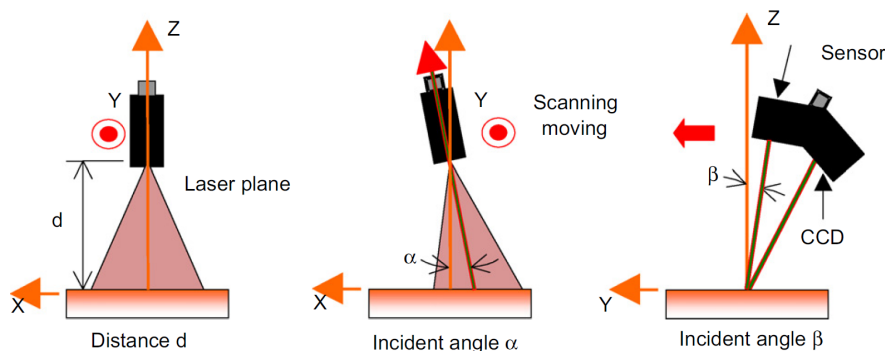


Abbildung 3.12: Beschreibung der Aufnahmegeometrie von Laserlinienscannern. **links:** Scanabstand; **mitte:** Auftreffwinkel α innerhalb der Laserebene; **rechts:** Auftreffwinkel β orthogonal zur Laserebene. Bildquelle: [Isheil et al., 2011]

Der Scanabstand beeinflusst dabei wegen des Gauß'schen Strahlverlaufs hauptsächlich die Breite der Laserlinie auf der Objektoberfläche [Donges & Noll, 1993]. Ähnliches gilt auch für den Auftreffwinkel α innerhalb der Laserebene. Dieser verursacht eine Veränderung des Scanabstands innerhalb der Laserlinie, was wiederum zu einer unterschiedlichen Breite innerhalb der Laserlinie führt. Isheil et al. [2011] hat indessen in einer empirischen Studie gezeigt, dass die Auswirkung des Scanabstands und des Auftreffwinkels α keinen signifikanten Einfluss auf die Genauigkeit der Distanzbestimmung haben.

Demgegenüber verursacht der Auftreffwinkel β eine systematische Abweichung der Distanzbestimmung [Xi et al., 2001; Isheil et al., 2011]. Eine mögliche Ursache könnte die Verschiebung des Intensitätsmaximums der Laserlinie sein, ähnlich wie es auch bei punktförmigen Laserstrahlen der Fall ist [Kern, 2003]. Sicher ist hingegen, dass der Auftreffwinkel β die Signalintensität beeinflusst. Da das Streuverhalten der meisten Oberflächen diffus mit einer spiegelnden Komponente ist [Hecht, 2014], verändert der Auftreffwinkel β die Signalintensität auf der Sensormatrix. Betrachtet man die Aufnahmegeometrie in Abbildung 3.12 rechts und nimmt an, die Oberfläche habe eine spiegelnde Komponente, so würde ein großer Teil des Signals gemäß dem optischen Gesetz „Einfallswinkel gleich Ausfallswinkel“ [Meschede, 2008] von der Sensormatrix weg reflektiert und die Signalintensität nimmt ab. Folglich müsste, um ein optimales Signal-Rausch-Verhältnis zu

bewahren, die Belichtungszeit in Abhängigkeit der Aufnahmegeometrie angepasst werden.

Da Blätter über eine natürliche Struktur verfügen, ändert sich die Aufnahmegeometrie sowohl bei jeder Scanlinie als auch innerhalb ein und derselben Scanlinie. Zusätzlich ändert sich aufgrund der handgeführten Bewegung des kombinierten Messsystems die Aufnahmegeometrie mit jeder Scanlinie geringfügig. Folglich sind Messunsicherheiten und Schwankungen der Signalintensität nicht zu vermeiden. Inwieweit dies Einfluss auf die Blattdickenbestimmung hat, wird in Abschnitt 6 näher betrachtet.

3.3 Das Blatt als Messobjekt

In diesem Abschnitt soll die Pflanze und insbesondere das Blatt als Messobjekt für Messsysteme mit Nahbereichslaserscannern betrachtet werden. Im Fokus stehen dabei in erster Linie deren optische Eigenschaften und deren theoretischer Einfluss auf Messungen mittels Laserlinienscannern. Grundsätzlich gibt es drei Besonderheiten bei Pflanzen, die bei der messtechnischen Erfassung zu berücksichtigen sind (vgl. Veröffentlichung A [Dupuis et al., 2016]):

1. Die Komplexität der Pflanzenstruktur,
2. Bewegungen der Pflanze während des Messprozesses und
3. die besonderen optischen Eigenschaften der Blätter.

3.3.1 Komplexität der Pflanzenstruktur

Die Komplexität der Pflanze beeinflusst in erster Linie die Vollständigkeit der resultierenden Punktwolke. Überlappungen von Blättern oder die Verdeckung von Teilen des Stamms führen meist zu einer unvollständig erfassten Punktwolke, aber auch hinsichtlich der volumetrischen Erfassung der Blätter entstehen Einschränkungen aufgrund der Pflanzenstruktur. So ist je nach Aufbau und Wachstumsstadium einer Pflanze nicht zwangsläufig gewährleistet, dass sowohl die Blattober- als auch Blattunterseite vollständig messbar sind.

Neben Einschränkungen der Vollständigkeit stellt sich die Fragen: „Was ist das Objekt?“, oder spezifischer: „Welcher Detailgrad wird für die gestellte Aufgabe benötigt?“.

Einige Pflanzenarten, wie bspw. die Tomate, verfügen über feine Härchen auf der Oberfläche, die sogenannten Trichome (Abbildung 3.13).

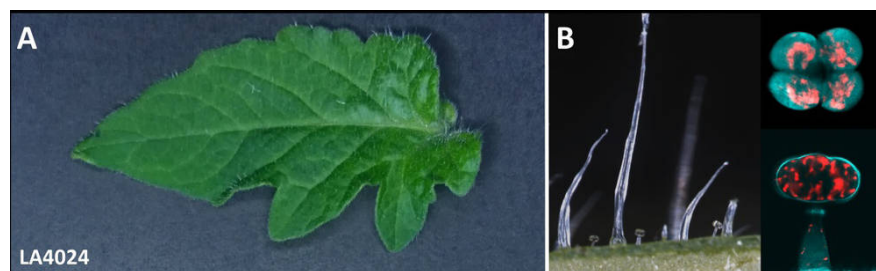


Abbildung 3.13: Trichome eines Tomatenblatts (*Solanum lycopersicum*) in Originalgröße (A) und als mikroskopische Aufnahme (B). Bildquelle: [Balcke et al., 2017] (modifiziert).

Möchte man nun das Volumen der Blätter erfassen, stellt sich die Frage, ob die Trichome zur Blattoberfläche gehören oder nicht. Hinzu kommt, dass die Größe der Trichome im Bereich des Auflösungsvermögens des Laserscanners liegt und diese aus transparenten epidermalen Zellen bestehen [Weiler & Nover, 2008]. Somit sind diese nicht zuverlässig messbar und werden in der Objektdefinition nicht weiter berücksichtigt. Experimente mit Tomatenpflanzen haben jedoch gezeigt, dass die Trichome vermehrt als Einzelpunkte, vergleichbar zu Ausreißern, in der Punktwolke wiederzufinden sind. Demzufolge müssen diese in der Datenverarbeitung oder in den Auswertelgorithmen in geeigneter Form berücksichtigt werden.

Ähnliches gilt auch für feine Blattstrukturen wie bspw. Blattadern. Diese werden aufgrund der hohen Genauigkeit der Laserlinienscanner erfasst und sind daher bei der Auswertung zu berücksichtigen.

3.3.2 Bewegungen der Pflanze

Anders als die meisten künstlichen Objekte können Pflanzen während der Messung nicht zwangsläufig als statisch angesehen werden. Die Bewegungen lassen sich dabei in die Eigenbewegung [Gilroy, 2008] und Bewegungen verursacht durch Luftzirkulation unterteilen.

Die Eigenbewegungen der Pflanze entstehen auf der einen Seite aufgrund des Wachstums der Pflanze und auf der anderen Seite durch die Reaktion auf sich verändernde Umwelteinflüsse. Während das Wachstum i.d.R. einen langsamen Prozess darstellt (wenige mm pro Tag), kann die Reaktion der Pflanze auf Umwelteinflüsse durchaus schneller ablaufen. Untersuchungen an Rübenpflanzen, die für die Messungen aus dem Gewächshaus in ein Messlabor transportiert wurden, haben bspw. gezeigt, dass die Reaktion auf die Umgebungsänderung in Form eines kontinuierlichen Absenkens der Blätter in den Messdaten des kombinierten Laserscanningsystems sichtbar sind. Beim wiederholten Messen eines Blattes innerhalb weniger Minuten entstanden mehrere Punktwolken mit einem Abstand von Zehntelmillimeter bis Millimeter (Abbildung 3.14).

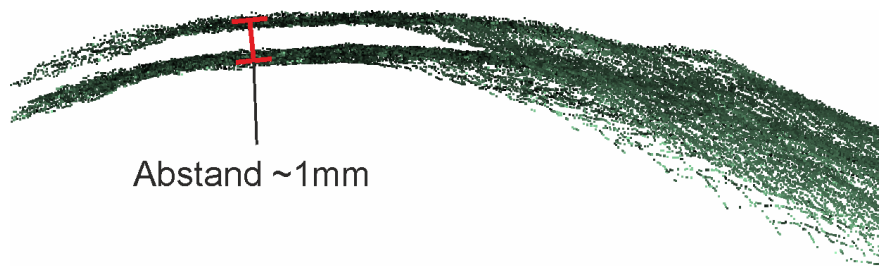


Abbildung 3.14: Ausschnitt zweier Punktwolken eines Rübenblatts gescannt im Abstand weniger Minuten.

Demgegenüber verursachen Luftbewegungen hochfrequente Schwingungen der Blätter. Diese Luftbewegungen können entweder durch natürliche Luftzirkulation, durch die Bewegung des Scanners oder durch den Beobachter verursacht werden. Aufgrund der geringen Amplitude der Schwingung liegt die Größe der Bewegung im Bereich weniger Hunderstelmmillimeter und zeigt sich in der Punktwolke meist als erhöhtes Messrauschen. Während sich letzte Bewegung durch Einspannen oder Fixieren der Blätter minimieren lässt, findet eine Eigenbewegung der Pflanze immer statt, wobei Größenordnung und Geschwindigkeit jedoch von der Pflanzenart und den Umweltbedingungen abhängen. Wie sich dies auf die Bestimmung der Blattdicke auswirken kann, ist in Abschnitt 6 am Beispiel eines welkenden Weinblatts dargestellt.

3.3.3 Optische Eigenschaften der Blätter

Einen wesentlichen Faktor bei der Vermessung von Blättern mit Nahbereichslaserscannern stellen die besonderen optischen Eigenschaften der Blätter dar. Wie in Paulus et al. [2014b] gezeigt, besteht ein Blatt aus drei Schichten, die alle unterschiedliche optische Eigenschaften aufweisen (Abbildung 3.15). Aus Richtung des Lasers betrachtet ist die erste Schicht die Cuticula. Diese Wachsschicht liegt oberhalb der Epidermis und schützt das Blatt vor Wasserverlusten [Weiler & Nover, 2008]. Die Cuticula kann aus optischer Sicht als semitransparent mit spiegelnder Komponente bezeichnet werden [Vogelmann, 1993; Paulus et al., 2014b]. Das bedeutet, dass ein Teil des einfallenden Laserlichts gemäß dem Reflexionsgesetz reflektiert wird, während der verbleibende Teil die Cuticula durchdringt und die Epidermis erreicht. Somit ist die Cuticula nur unter bestimmten Aufnahmegeometrien messbar, nämlich genau dann, wenn der Auftreffwinkel β dem halben Triangulationswinkel entspricht (vgl. Abbildung 3.7).

Die Epidermis bildet die eigentliche Zellabschlusschicht des Blattes [Weiler & Nover, 2008]. Sie gilt in der Theorie als vollständig transparent [Paulus et al., 2014b] und ermöglicht somit dem Laser das darunterliegende Mesophyll zu erreichen.

Das Mesophyll enthält die photoaktiven Bestandteile der Blätter. Das dort angereicherte Chlorophyll ist für die Photosynthese zuständig und verfügt daher über die Eigenschaft, einfallendes Licht zu absorbieren [Weiler & Nover, 2008]. Die Stärke der Absorption hängt dabei maßgeblich von der Wellenlänge ab [Rascher et al., 2010]. Anhand des Absorptionsspektrums eines Winterweizenblattes lässt sich erkennen (Abbildung

3.16), dass im Bereich des sichtbaren Lichts insbesondere die Wellenlängen blau und rot fast vollständig absorbiert werden.

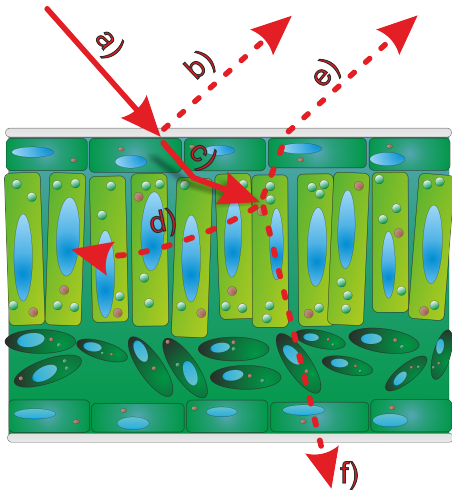


Abbildung 3.15: Theoretischer Aufbau eines Blattes und das Reflexionsverhalten eines Blattes: **a)** einfallendes Laserlicht, **b)** teilweise Reflexion an der Cuticula, **c)** Transmission durch die Epidermis, **d)** Absorption durch Chlorophyll, **e)** Rückstreuung an Zellwänden, **f)** vollständige Transmission. Bildquelle: [Paulus et al., 2014b].

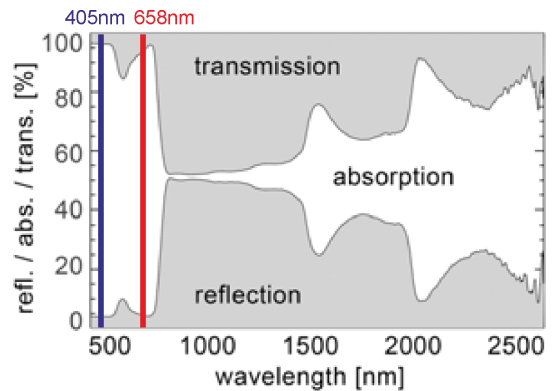


Abbildung 3.16: Spektrale Charakteristik eines Winterweizenblatts (*Triticum aestivum* L.) aufgeteilt in Absorption, Reflexion und Transmission. Bildquelle: [Rascher et al., 2010] (modifiziert)

Für die Vermessung von Blättern mit Nahbereichslaserscannern mit dem Ziel, das Blatt als Volumenobjekt zu erfassen, ergeben sich daraus folgende messtechnische Besonderheiten. Zum Einen führt die Semitransparenz bzw. Transparenz von Cuticula und Epidermis zu einem Eindringen des Lasers in die Blattstruktur. Zum Andern erfolgt eine Abschwächung des Lasers durch das Chlorophyll. Beide Effekte beeinflussen nach Abschnitt 3.2 die erreichbare Messgenauigkeit und verursachen sowohl systematische Messabweichungen als auch ein erhöhtes Messrauschen. Eine Quantifizierung dieser Einflüsse erfolgt in Veröffentlichung **D** [Dupuis et al., 2015] und ist in Abschnitt 5.3 detailliert dargestellt.

3.4 Auswirkung auf die Blattdickenbestimmung

Die vorangegangenen Abschnitte betrachteten die Einflüsse des Messarms, des Laserscanners und der Blattoberfläche auf die resultierende Punktwolke und deren Genauigkeit. Die zentrale Fragestellung dieser Dissertation ist die Beantwortung der Frage, ob sich die Blattdicke mit einem Messsystem mit Nahbereichslaserscanner bestimmen lässt und welche Messunsicherheiten das Ergebnis beeinflussen. Am Beispiel des vorgestellten Messsystems, bestehend aus Messarm und Laserlinienscanner, ergibt sich bereits aus den theoretischen Vorüberlegungen, dass es eine Vielzahl an möglichen - teils zufälligen, teils systematischen - Messabweichungen der Einzelsensoren gibt. Nach Gleichung 1.1 beeinflussen alle Messunsicherheiten der Einzelsensoren sowie die Messunsicherheiten, die sich aus der Blattoberfläche ergeben, die Punktwolken von Blattober- und Blattunterseite und somit auch die Genauigkeit der Blattdickenbestimmung.

Für den Messarm hat sich gezeigt (Abschnitt 3.1), dass dessen Genauigkeit zum Einen vom Messrauschen der Drehwinkelgeber und zum Anderen von Abweichungen der DH-Parameter von der tatsächlichen geometrischen Konstruktion des Messarms abhängt. Dabei ist ersichtlich, dass die Auswirkung abweichender DH-Parameter mit Veränderung der Armpose variieren. Da für die Erfassung von Blattober- und Blattunterseite die Armpose zwangsläufig verändert werden muss, wirken sich evtl. vorhandene Abweichungen

der DH-Parameter von der tatsächlichen geometrischen Konstruktion auf die Bestimmung der Blattdicke aus. Wie groß diese Abweichungen ausfallen und welche Auswirkung dies auf die 3D Koordinate hat, soll anhand einer Kalibrierung (Abschnitt 5.1 und Veröffentlichung **B**) gezeigt werden. Eine Anpassung der Messstrategie zur Bestimmung der Blattdicke erfolgt in Abschnitt 6 und Veröffentlichung **E**.

Auch beim Scanner konnten bereits in der Theorie einige Aspekte identifiziert werden, die sich negativ auf die Genauigkeit der Blattickenbestimmung auswirken. So ist insbesondere der Einfluss einer nichtangepassten Belichtungszeit und das Eindringen in die Blattstruktur für die Blattickenbestimmung relevant. Welche Größenordnung diese Messunsicherheiten haben und wie dies das Messergebnis von Blattscans beeinflusst ist in Abschnitt 5.3 und den Veröffentlichungen **C** und **D** beschrieben.

4. Zusammenfassung der relevanten Veröffentlichungen

In diesem Kapitel werden die für die vorliegende kumulative Dissertation relevanten Veröffentlichungen thematisch gegliedert und zusammengefasst. Eine detaillierte Beschreibung der relevanten Teilaspekte und Ergebnisse erfolgt in Kapitel 5.

Das Thema der Dissertation ist die Genauigkeitsuntersuchung von Messsystemen mit Nahbereichslaserscannern mit Hinblick auf deren Einsatz im Pflanzenmonitoring. Dabei steht die Beantwortung der Frage im Fokus, ob die Blattdicke mit Nahbereichslaserscanningsystemen messbar ist. Die Schwerpunkte dieser Arbeit lassen sich dabei in fünf Blöcke gliedern, wobei allen Blöcken jeweils eine begutachtete (*peer-review*) Veröffentlichung zuzuordnen ist (Abbildung 4.1).

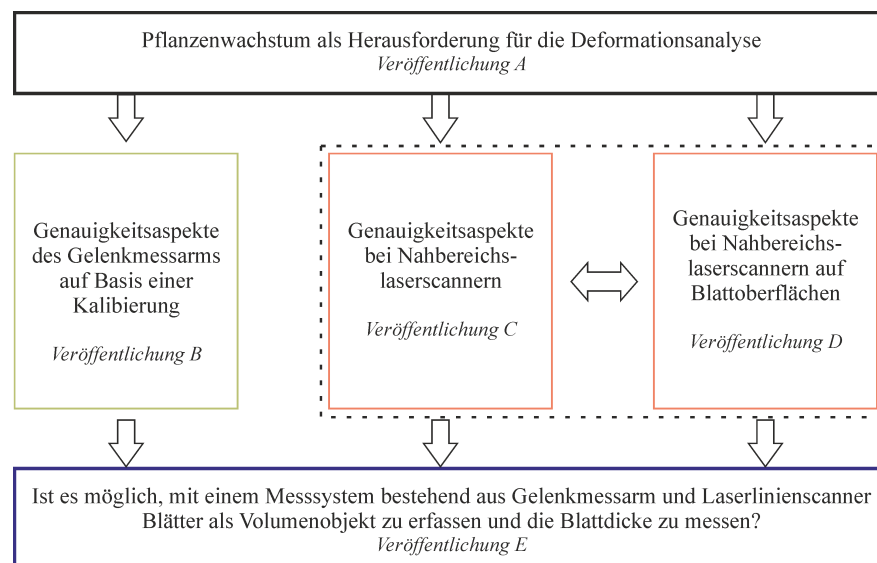


Abbildung 4.1: Struktur der vorliegenden Dissertation und Zuordnung der relevanten Veröffentlichungen.

Den übergeordneten Block bildet der Themenschwerpunkt „*Pflanzenwachstum als Herausforderung für die Deformationsanalyse*“ publiziert in der Veröffentlichung **A**. Diese dient der Einführung in die Thematik und präsentiert die Pflanze im Rahmen einer geodätischen Deformationsanalyse. Dabei stehen insbesondere die messtechnischen Besonderheiten des eingesetzten Messsystems und die daraus resultierenden Abweichungen in der Datenanalyse im Fokus.

Die folgenden drei Blöcke stellen den eigentlichen Kern dieser Arbeit dar und befassen sich mit den Genauigkeitsaspekten von Nahbereichslaserscanningsystemen sowohl auf Basis rein instrumenteller Untersuchungen als auch auf Basis von Pflanzenmessungen. Ziel der Untersuchungen ist die Identifikation von Messunsicherheiten, die entweder durch den Sensor selbst, den Messprozess oder die Objekt Oberfläche hervorgerufen werden.

Der letzte Block dient dazu die Ergebnisse der Einzeluntersuchungen zu verbinden und die Frage zu beantworten: „Lässt sich die Blattdicke mit dem vorgestellten Nahbereichslaserscanningsystem bestimmen?“ Die darin durchgeführten empirischen Untersuchungen nutzen die Erkenntnisse aus den Veröffentlichungen **B-D**, um eine optimierte Messstrategie für das kombinierte Messsystem zu entwickeln. Zusätzlich erfolgt eine empirische Genauigkeitsanalyse, anhand derer sich die Genauigkeit einer Dickenbestimmung sowohl bei Verwendung zertifizierter Lehren als auch auf Blattoberflächen ableiten lässt.

Veröffentlichung A

- Dupuis, J., Holst, C., & Kuhlmann, H. (2016). Laser Scanning Based Growth Analysis of Plants as a New Challenge for Deformation Monitoring. *Journal of Applied Geodesy*, 10(1), 37–44

Die Veröffentlichung thematisiert die Wachstumsanalyse von Pflanzen als neue Herausforderung für die Deformationsanalyse. Im Speziellen wird dabei auf die messtechnischen Randbedingungen, verursacht durch die Besonderheiten von Pflanzen als Messobjekt (Abschnitt 3.3), und die daraus resultierenden Schwierigkeiten bei der Auswertung der Messdaten eingegangen. Die Veröffentlichung dient somit als Einführung in die Thematik des Laserscannings von Pflanzen im Nahbereich. Anhand des phänotypischen Parameters der Blattfläche sind die Auswirkungen der messtechnischen Besonderheiten von Pflanzen auf die Qualität der Wachstumsanalyse dargestellt.

Zunächst wird die Datenerfassung mit dem Nahbereichslaserscanningsystem bestehend aus Messarm und Laserscanner beschrieben. Dabei stehen insbesondere die in Abschnitt 3.3 beschriebenen drei Punkte 1) Komplexität der Pflanzenstruktur, 2) Bewegungen der Pflanze während des Messprozesses und 3) die besonderen optischen Eigenschaften der Blätter im Fokus und wie diese in der Theorie die Punktwolken von Blattmessungen beeinflussen können. Basierend auf diesen Überlegungen erfolgt eine Abschätzung, wie sich die Unsicherheiten in der Punktwolke auf die Blattflächenberechnung und somit die Wachstumsanalyse der Blätter auswirken.

Der empirische Teil der Studie untersucht die Genauigkeit der Flächenberechnung auf Basis der in der Literatur [Paulus et al., 2013, 2014c,b] gängigen Herangehensweise mithilfe von Normalen mit hoher Flächengenauigkeit und anhand von Blättern mehrerer Tomatenpflanzen. Dabei stellt sich heraus, dass die Flächenberechnung aufgrund der Unsicherheiten der Punktwolke große Schwankungen aufweist und dadurch eine genaue Wachstumsanalyse bei Blättern nur bedingt oder gar nicht möglich ist.

Der wesentliche Beitrag der Veröffentlichung zur vorliegenden Dissertation ist die Analyse des Messprozesses und die Identifikation von Messunsicherheiten, die durch die Blattoberfläche entstehen. Darüber hinaus zeigt sie, dass diese Messunsicherheiten maßgeblich die Genauigkeit der phänotypischen Parameter beeinflussen.

Sowohl die Analyse des Messprozesses als auch die Erfassung, Auswertung und Interpretation der Messdaten wurde primär durch den Autor dieser Dissertation durchgeführt.

Veröffentlichung B

- Dupuis, J., Holst, C., & Kuhlmann, H. (2017a). Improving the Kinematic Calibration of a Coordinate Measuring Arm using Configuration Analysis. *Precision Engineering*, (Available online 5 May 2017)

Wie bereits aus Abschnitt 3.1.3 bekannt, ist der Großteil der Messunsicherheiten des Messarms auf Abweichungen der DH-Parameter von der tatsächlichen geometrischen Konstruktion des Messarms zurückzuführen. Um die Auswirkungen dieser Abweichungen auf die Genauigkeit einer abgeleiteten Messgröße wie der Blattdicke bewerten zu können, bedarf es detaillierter Kenntnis über die Genauigkeit dieser Kalibrierparameter. Die in diesem Zusammenhang in der Literatur beschriebenen Kalibrieransätze (vgl. Abschnitt 2.1) liefern zwar einen vollständigen Satz an DH-Parametern, bieten jedoch keine Möglichkeiten diese statistisch zu bewerten. Daher ist das Ziel der Veröffentlichung **B**, einen Kalibrieransatz für Messarme zu entwickeln, der eine statistische Bewertung der geschätzten Parameter zulässt.

Vergleichbar zu den Ansätzen in der Literatur verwendet der Kalibrieransatz Messungen einer zertifizierten Längenmaßverkörperung mit Kegelbohrungen, die es dem Messarm ermöglichen, die Endpunkte der Längen mit verschiedenen Armposen anzutasten. Die Maßverkörperung kann dafür in nahezu beliebiger Position und Orientierung innerhalb des Messvolumens positioniert werden. Der funktionale Zusammenhang beschreibt die Koordinate des Messpunkts als Funktion der DH-Parameter und der Beobachtungen der

Drehwinkelgeber. Die zertifizierten Längen der Maßverkörperung fließen als Pseudobeobachtung inkl. Varianz in die Ausgleichung mit ein. Aufgrund der Nichttrennbarkeit von Parametern und Beobachtungen erfolgt die Ausgleichung in einem strengen Gauß-Helmert Modell (GHM) (vgl. Abschnitt 5.1.1). Die Bewertung des Ausgleichungsansatzes basierend auf den Parametergenauigkeiten und unabhängiger Prüfmessungen zeigt, dass die Genauigkeit des Messarms nach der Kalibrierung weitestgehend innerhalb der Spezifikationen des Herstellers liegt, jedoch Restsystematiken in den Prüfmessungen vorhanden sind (vgl. Abschnitt 5.1.2).

Neben der Schätzung der DH-Parameter und der Bewertung derer Genauigkeit standen folgende Fragen in Fokus der Untersuchungen:

- Ist die Schätzung der Kalibrierparameter erwartungstreu?
- Gibt es Messpositionen die einen höheren Einfluss auf die Kalibrierung haben?
- Lässt sich die Anzahl der Längennormalpositionen und somit der Aufwand der Kalibrierung verringern?

Die Bewertung der Erwartungstreue erfolgt auf Basis simulierter Beobachtungen. Diese werden auf Basis eines fiktiven kinematischen Modells des Messarms berechnet und dem Ausgleichungsansatz varianzfrei übergeben. Bei vorliegender Erwartungstreue sollte dieser die Sollparameter im Rahmen der Rechengenauigkeit reproduzieren. In der Publikation zeigen die Ergebnisse jedoch signifikante Abweichungen zum Sollmodell. Wie sich nach der Veröffentlichung herausgestellt hat, sind diese Abweichungen jedoch einem Fehler in den simulierten Daten geschuldet. Dieser Punkt wird daher noch einmal ausführlich in Abschnitt 5.1.2 dargestellt und diskutiert.

Der Einfluss einer Messung auf die Parameterschätzung kann mithilfe der Einflussfaktoren beschrieben werden, die sich aus der Konfigurationsanalyse ergeben [Förstner, 1987]. Angewandt auf die Schätzung der DH-Parameter zeigt sich, dass insbesondere radial und vertikal zum Messarm ausgerichtete Positionen des Längennormals einen verhältnismäßig höheren Einfluss aufweisen (vgl. Abschnitt 5.1.3). Basierend auf diesen Erkenntnissen erfolgt eine erneute Schätzung der Armparameter mit reduzierter Anzahl an Messposition in einem Teilbereich des Messvolumens, wobei die Genauigkeit des Messarms im Vergleich zu allen Messpositionen nahezu gleich bleibt (vgl. Abschnitt 5.1.3).

Die Veröffentlichung **B** konnte somit aufzeigen, dass die Kalibrierung des Messarms auf Basis des GHMs grundsätzlich erfolgreich ist. Die Restsystematiken in den Kalibriermessungen weisen jedoch darauf hin, dass die geschätzten DH-Parameter nicht die tatsächliche geometrische Konstruktion des Messarms repräsentieren. Dies kommt nach Abschnitt 3.1.3 insbesondere dann zum Tragen, wenn die Armpose während einer Messung stark verändert wird. Für die Zielsetzung der Dissertation bedeutet dies, dass bei hohen Genauigkeitsanforderungen, wie beispielsweise der Ermittlung der Blattstärke, die Variation der Armpose möglichst gering gehalten werden muss, was eine Anpassung der Messstrategie erfordert (vgl. Veröffentlichung **E** und Abschnitt 6.1).

Der wesentliche wissenschaftliche Fortschritt der Publikation ist der neu entwickelte Ansatz zur Kalibrierung von Messarmen und die statistische Bewertung der Beobachtungen mittels Konfigurationsanalyse. Die Grundidee des Ansatzes wurde von allen drei Autoren gemeinsam entwickelt und anschließend vom Autor dieser Dissertation umgesetzt, implementiert und weiterentwickelt. Die Kalibrierergebnisse und die Ergebnisse der Konfigurationsanalyse wurden gemeinsam mit C. Holst bewertet und interpretiert. Alle Messungen sowie die Simulation von Messdaten erfolgten durch den Erstautor selbst.

Veröffentlichung C

- Dupuis, J. & Kuhlmann, H. (2014). High-Precision Surface Inspection: Uncertainty Evaluation within an Accuracy Range of $15\mu\text{m}$ with Triangulation-based Laser Line Scanners. *Journal of Applied Geodesy*, 8(2), 109–118

Die Publikation beschreibt die Untersuchung des Laserlinienscanners hinsichtlich Präzision und möglichen Messunsicherheiten unter Laborbedingungen und liefert somit den Anteil des Scanners u_{Scanner}^2 an der Gesamtunsicherheit in Gleichung (1.1). Im Fokus stehen dabei die Auswirkung der Sensoreinstellungen auf die Präzision der Messung sowie die Messabweichungen, die durch die Oberflächeneigenschaften oder Unstetigkeiten der Oberfläche entstehen. Die instrumentellen Untersuchungen erfolgen dabei nicht mit dem Perceptron-V5 Scanner des Messarms, sondern greifen auf den scanCONTROL 2700-100 als alternativen Sensor zurück. Dies ist nötig, da der Perceptron-V5 ausschließlich in Kombination mit dem Messarm einsetzbar ist und lediglich 3D-Koordinaten im Bezugssystem des Messarms liefert, wodurch die Messunsicherheiten beider Sensoren nicht trennbar sind. Der scanCONTROL arbeitet hingegen in Kombination mit einer Linearführung (vgl. Abbildung 3.8) mit bekannten Messunsicherheiten und bietet zusätzliche Messinformationen wie bspw. die Intensität (vgl. Abschnitt 3.2.2).

Folgende zwei Aspekte sind insbesondere bei der Erfassung von Blättern bzw. der Blattdicke relevant:

1. Die Auswirkung einer nicht angepassten Belichtungszeit und
2. der Einfluss semitransparenter Materialien.

Wie bereits in Abschnitt 3.2.1 beschrieben, erfolgt die Distanzbestimmung auf Basis einer spaltenweisen Schwerpunktbestimmung der auf der Sensormatrix abgebildeten Laserlinie. Folglich hängt die Genauigkeit der Distanzbestimmung maßgeblich mit der Abbildungsqualität der Laserlinie zusammen (vgl. Abschnitt 3.2.3). Steuern lässt sich diese Abbildung über die Belichtungszeit der CCD-Matrix. Um den Einfluss der Belichtungszeit auf die Präzision der Abstandsmessung zu quantifizieren, erfolgen Messungen eines Ebenheitsnormals mit einer maximalen Ebenheitsabweichung von maximal $1,5\ \mu\text{m}$. Somit lassen sich die Auswirkungen von zu kurzen und zu langen Belichtungszeiten im Vergleich zur optimalen Belichtungszeit auf die Distanzbestimmung quantifizieren (vgl. Abschnitt 5.2.1).

Eine wesentliche Eigenschaft von Blättern ist die Semitransparenz der einzelnen Blattschichten (vgl. Abschnitt 3.3.3). Dies führt dazu, dass der Laser in die Objektstruktur eindringt. Beim terrestrischen Laserscanning bewirkt dieser Effekt eine systematische Abweichung der Distanzmessung sowie einen Anstieg des Messrauschens [Gordon, 2008]. Inwieweit und in welcher Größenordnung sich das Eindringen auf die Distanzbestimmung bei Laserlinienscannern auswirkt, ist in der Literatur jedoch weitestgehend unbehandelt. Aus diesem Grund erfolgen im Rahmen dieser Veröffentlichung Messungen zweier Ebenheitsnormale, die in exakt der gleichen Entfernung zum Scanner positioniert sind. Eines der Normale verfügt dabei über eine diffus streuende, das andere über eine semitransparente Oberfläche. Daraus lassen sich sowohl systematische Einflüsse auf die Distanzmessung aus dem vertikalen Abstand der beiden Ebenen als auch Auswirkungen auf das Rauschverhalten über die Residuen der Ebenenschätzung ableiten (vgl. Abschnitt 5.2.2).

Die in Abschnitt 5.2 detailliert aufgeführten Untersuchungsergebnisse können letztendlich belegen, dass sowohl die Sensoreinstellungen in Form der Belichtungszeit als auch die optischen Eigenschaften der Oberfläche einen signifikanten Einfluss auf die Genauigkeit der Distanzbestimmung eines Laserlinienscanners haben. Die gewonnenen Erkenntnisse dienen folgend als Grundlage für die Studien zum Verhalten von Laserlinienscannern auf Blattoberflächen (vgl. Veröffentlichung D).

Veröffentlichung D

- Dupuis, J., Paulus, S., Mahlein, A.-K., Kuhlmann, H., & Eichert, T. (2015). The impact of different leaf surface tissues on active 3D laser triangulation measurements. *Photogrammetrie, Fernerkundung, Geoinformation*, 2015(6), 437–447

Die Veröffentlichung **D** untersucht den Einfluss der verschiedenen Blattschichten bzw. deren Bestandteile auf die Messergebnisse eines Laserlinienscanners und beschreibt den Anteil $u_{P_{flanze}}^2$ an der Gesamtunsicherheit in Gleichung (1.1). Aus der Theorie ist bekannt, dass Blätter aus einzelnen Blattschichten bestehen, die alle unterschiedliche optische Eigenschaften aufweisen (vgl. Abschnitt 3.3.3). Anhand dreier Experimente soll die Frage beantwortet werden, inwieweit diese Eigenschaften die Genauigkeit einer Messung mit einem Laserlinienscanner beeinflussen.

Für die messtechnischen Untersuchungen wurde das Messsystem aus Veröffentlichung **C** eingesetzt und um einen weiteren Laserlinienscanner mit einer Wellenlänge von 405 nm (blau) ergänzt (vgl. Abschnitt 3.2). Die Verwendung eines weiteren Scanners ermöglicht es, den Einfluss der Blattoberflächen in Abhängigkeit der Wellenlänge zu analysieren. Für einen Teil der Untersuchungen wird - wie auch schon in Veröffentlichung **C** - auf die Intensität als weitere Beobachtungsgröße zurückgegriffen. Eine detaillierte Darstellung der Messaufbauten und Ergebnisse findet sich in Abschnitt 5.3.

Das erste Experiment befasst sich mit der Frage, inwieweit die Epidermis für die eingesetzten Laserlinienscanner als transparent anzusehen ist. Mithilfe eines speziellen Messaufbaus, bei dem einzelne Epidermisschichten in steigender Anzahl auf einem Glasträger aufgeschichtet wurden (vgl. Abschnitt 5.3.1 und Abbildung 5.11) lässt sich der Eindringeffekt visualisieren. Der Glasträger ist mit einem für den Laser undurchdringlichen Streifenmuster versehen. Ist die Epidermis für den Laserscanner nicht messbar, so wird das Signal teils von den Streifen des Glasträgers und teils von der darunterliegenden Oberfläche reflektiert. Zeigt sich also in der Punktwolke das Streifenmuster, so ist dies ein Indiz für die Transparenz der Epidermis.

Um den Einfluss des Chlorophylls im Mesophyll (vgl. Abschnitt 3.3.3) auf die Signalintensität zu quantifizieren, erfolgen im zweiten Experiment Messungen von reinen Chlorophyll, welches in unterschiedlichen Konzentrationen in Filterpapier eingebracht wurde (vgl. Abschnitt 5.3.2). Bei konstanter Belichtungszeit der Sensormatrix lässt sich so der Einfluss unterschiedlicher Chlorophyllgehalte auf die Signalintensität und auf das Rauschverhalten der Distanzbestimmung abschätzen.

Das dritte Experiment soll die aus den zwei vorherigen Experimenten erhaltenen Ergebnisse am realen Blatt verifizieren (vgl. Abschnitt 5.3.3). Dafür erfolgen Messungen eines Blattes mit alterungsbedingt unterschiedlichen Chlorophyllgehalten. Über die Intensität als zusätzliche Messgröße kann sowohl die Transparenz der Epidermis als auch der Einfluss des Chlorophylls untersucht werden.

Die in Abschnitt 5.3 dargestellten Ergebnisse der Experimente können letztlich die in Abschnitt 3.4 beschriebenen theoretischen Messunsicherheiten von Laserlinienscannern auf Blattoberflächen bestätigen. Zusätzlich ergeben sich durch die Integration der Intensität in die Auswertung erweiterte Anwendungsmöglichkeiten wie bspw. die intensitätsbasierte Detektion von Krankheitssymptomen.

Den wesentlichen wissenschaftlichen Fortschritt dieser Publikation stellt die Analyse der Scannermessungen und die daraus abgeleiteten Messunsicherheiten beim Nahbereichslaserscanning von Blättern dar. Sowohl die Messung als auch die Auswertung und Interpretation der Messdaten erfolgte hauptsächlich durch den Autor dieser Dissertation, wobei er beratende Unterstützung durch Stefan Paulus und Thomas Eichert erhielt. Die Bereitstellung des Pflanzenmaterials erfolgte durch Thomas Eichert. Anne-Katrin Mahlein lieferte und interpretierte die Schnittbilder der Blätter im Mikroskop.

Veröffentlichung E

- Dupuis, J., Holst, C., & Kuhlmann, H. (2017b). Measuring Leaf Thickness with 3D Close-up Laser Scanners: Possible or not? *Journal of Imaging*, 3(2)

Diese Veröffentlichung führt die instrumentellen Untersuchungen der Veröffentlichungen **B-D** zusammen und bearbeitet empirisch die zentrale Fragestellung dieser Dissertation. Dafür erfolgt zum Einen eine instrumentelle Untersuchung des Gesamtsystems unter Verwendung zertifizierter Lehren und Normale ($u_{Messarm}^2 + u_{Scanner}^2$ aus Gleichung (1.1) enthalten) sowie zum Andern eine empirische Studie zur Blattdickenbestimmung (alle Anteile aus Gleichung (1.1) enthalten) anhand dreier verschiedener Nutzpflanzenarten (Weizen, Wein und Zuckerrübe).

Auf Basis der Erkenntnisse der Veröffentlichungen **B-D** lässt sich eine optimale Messkonfiguration für das Gesamtsystem ableiten (vgl. Abschnitt 6.1). Dabei werden die Messstrategie des Messarms sowie die Einstellungen des Sensors so angepasst, dass $u_{Messarm}^2$ und $u_{Scanner}^2$ minimal werden.

Bei der messtechnischen Genauigkeitsuntersuchung des Gesamtsystems geht es hauptsächlich darum, zu verifizieren, ob das Messsystem in der Lage ist, Dicken in der Größenordnung weniger Zehntelmillimeter zu erfassen. Die Untersuchung teilt sich in zwei Experimente, wobei das erste Experiment die Genauigkeit des Messarms (vgl. Abschnitt 6.1) und das zweite Experiment die Genauigkeit von Messarm und Scanner in Kombination (vgl. Abschnitt 6.3) unter Verwendung des optimierten Messaufbaus verifizieren soll. Die Verwendung zertifizierter Lehren und Normale mit guten optischen Oberflächeneigenschaften ermöglicht es dabei, die Unsicherheiten des Scanners, die durch die Objektoberfläche verursacht werden, so gering wie möglich zu halten. Auf Basis dieser Messergebnisse lässt sich somit die Genauigkeit des Gesamtsystems abschätzen und ermitteln, bis zu welcher Grenze sich Dicken mit statistischer Sicherheit bestimmen lassen.

Unter Verwendung der selben Messkonfiguration erfolgen abschließend die empirischen Untersuchungen zur Blattdickenbestimmung. Alle Voruntersuchungen haben bestätigt, dass die Genauigkeit des Gesamtsystems ausreicht um die Blattdicke mit statistischer Sicherheit zu erfassen und Abweichungen allein aus den Unsicherheiten der Blattoberfläche $u_{Pflanze}^2$ stammen. Da Blätter in ihrer Struktur und Dicke je nach Wachstumsstadium stark variieren und es daher keine Referenzwerte für die Blattdicke gibt, werden die Messungen des Laserscanningsystems mit manuellen, invasiven Messungen eines Bügelmikrometers verglichen (vgl. Abschnitt 6.4).

Die in Kapitel 6 detailliert beschriebenen Untersuchungsergebnisse liefern somit die abschließende Bewertung für die Blattdickenbestimmung mittels Nahbereichslaserscanningsystemen und zeigen auf, welche Messunsicherheiten die tatsächliche Blattdickenbestimmung maßgeblich beeinflussen.

Den wesentlichen wissenschaftlichen Beitrag dieser Publikation stellt die empirische Untersuchung der Blattdickenmessung dar und die daraus ableitbaren Messunsicherheiten, die durch die Blattoberfläche verursacht werden. Die Konzeption des Messaufbaus sowie die Durchführung, Ausführung und Interpretation der Messungen wurden durch den Autor dieser Dissertation durchgeführt.

5. Herausstellung der wichtigsten Aspekte der Einzeluntersuchungen

Das primäre Ziel dieser Dissertation ist die Beschreibung des Unsicherheitsbudgets von Messsystemen mit Nahbereichslaserscannern im Hinblick auf deren Einsatz zum Pflanzenmonitoring. Im speziellen gilt es dabei, die Frage zu beantworten, ob es möglich ist, das Blatt als Volumenobjekt zu beschreiben, d.h. die Blattdicke messtechnisch zu erfassen. Die für die Beantwortung dieser Fragestellung angefertigten Veröffentlichungen wurden im vorangegangenen Kapitel zusammengefasst. Die folgenden Abschnitte greifen die durchgeführten Untersuchungen auf und stellen die wichtigsten Aspekte detailliert dar.

Aus den Kapiteln 1 und 3 geht hervor, dass die Kombination aus Messarm und Laserlinienscanner eine positive Schnittmenge der Systemeigenschaften bildet, sich jedoch die Messunsicherheiten beider Sensoren quadratisch aufsummieren. Zusätzlich entstehen Messunsicherheiten des Laserscanners bedingt durch die optischen Eigenschaften der Blattoberfläche (vgl. Abschnitt 3.3.3). Die Gesamtunsicherheit besteht folglich aus den Unsicherheiten von Messarm, Scanner und Pflanzenoberfläche (vgl. Gl. (1.1)). Die nachfolgenden Abschnitte behandeln daher zunächst die einzelnen Unsicherheitsfaktoren separat und führen diese in Kapitel 6 zusammen.

5.1 Untersuchung der Messunsicherheiten des Messarms

Wie bereits in Abschnitt 3.1 beschrieben resultieren die Messunsicherheiten des Messarms auf der einen Seite aus den Abweichungen der Drehwinkelgeber und auf der anderen Seite aus Abweichungen der DH-Parameter von der tatsächlichen Geometrie des Messarms. Hinsichtlich der Drehwinkelgeber wird vorausgesetzt, dass diese seitens des Herstellers in geeigneter Weise kalibriert wurden und somit keine systematischen Messabweichungen vorliegen (vgl. Abschnitt 3.1.3).

Die DH-Parameter hingegen beschreiben die geometrische Konstruktion des Arms. Weichen diese von der tatsächlichen Geometrie des Arms ab, so entsteht eine systematische Messabweichung der 3D-Koordinate (vgl. Abbildung 3.3). Somit ist ersichtlich, dass die Messgenauigkeit des Arm direkt mit der Genauigkeit der DH-Parameter zusammenhängt. Da der Hersteller weder die Parameter selbst noch deren Genauigkeit publiziert, gilt es diese im Rahmen einer Kalibrierung zu bestimmen und zu bewerten.

5.1.1 Methodik zur Kalibrierung von Messarmen

Der im Rahmen dieser Dissertation neu entwickelte Kalibrieransatz und dessen Bewertung mithilfe der Konfigurationsanalyse stellen einen methodischen Fortschritt gegenüber den bisher aus der Literatur bekannten Ansätzen dar (vgl. Abschnitt 2.1) und sollen daher an dieser Stelle detailliert erläutert werden. Der Ansatz basiert auf dem Prinzip der Kleinste-Quadrate Schätzung und integriert, anders als die Ansätze in der Literatur, explizit die Beobachtungen der Drehwinkelgeber im funktionalen Modell. Ähnlich zu den Ansätzen in der Literatur beruht das funktionale Modell auf der redundanten Charakteristik des Messarms (vgl. Abschnitt 3.1) und beschreibt einen 3D-Punkt \mathbf{p}_i als Funktion der DH-Transformation, der mit einer beliebigen Anzahl an Armposen messbar ist:

$$\mathbf{p}_i = f(\mathbf{x}_{DH}, \Theta_{i,j,1...7}) \cdot \quad (5.1)$$

Darin beschreiben \mathbf{x}_{DH} die 31 DH-Parameter (vgl. Abschnitt 3.1.1) und $\Theta_{i,j,1...7}$ eine beliebige Armpose j des i ten Messpunkts. Da die „wahren“ DH-Parameter unbekannt sind, sind auch die Koordinaten des 3D-Punkts unbekannt und stellen ebenfalls zu schätzende Parameter dar. Der Parametervektor \mathbf{x}_i enthält folglich die

DH-Parameter sowie die unbekanntenen Punktparameter. Somit ergibt sich das endgültige, in die x-, y- und z-Achse aufgeteilte, funktionale Modell zu

$$\begin{aligned} f_x(\mathbf{x}_{DH}, \Theta_{i,j,1\dots 7}) - \mathbf{p}_{x,i} &= 0 \\ f_y(\mathbf{x}_{DH}, \Theta_{i,j,1\dots 7}) - \mathbf{p}_{y,i} &= 0 \\ f_z(\mathbf{x}_{DH}, \Theta_{i,j,1\dots 7}) - \mathbf{p}_{z,i} &= 0. \end{aligned} \quad (5.2)$$

Die Nichttrennbarkeit von Parametern und Beobachtungen führt schließlich auf das GHM:

$$\mathbf{B} \cdot (\mathbf{v} - \hat{\mathbf{v}}) + \mathbf{A} \cdot (\hat{\mathbf{x}}_{i+1} - \hat{\mathbf{x}}_i) + f(\mathbf{1} + \hat{\mathbf{v}}, \hat{\mathbf{x}}_i) = \mathbf{0}. \quad (5.3)$$

Die Verwendung der strikten Formulierung des GHMs erfordert sowohl ein Update der Parameterzuschläge $\Delta \hat{\mathbf{x}}_i = \hat{\mathbf{x}}_{i+1} - \hat{\mathbf{x}}_i$ als auch der Verbesserungen $\hat{\mathbf{v}}$ in jedem Iterationsschritt. Folglich werden die Bedingungsmatrix \mathbf{B} und Designmatrix \mathbf{A} an der Stelle der approximierten Parameter und approximierten Beobachtungen ausgewertet:

$$\mathbf{B} = \left. \frac{\partial f}{\partial \mathbf{1}} \right|_{\mathbf{1} + \hat{\mathbf{v}}, \hat{\mathbf{x}}_i} \quad \mathbf{A} = \left. \frac{\partial f}{\partial \mathbf{x}} \right|_{\mathbf{1} + \hat{\mathbf{v}}, \hat{\mathbf{x}}_i}. \quad (5.4)$$

Betrachtet man die geometrische Konstruktion und das mathematische Modell des Messarms (vgl. Abschnitt 3.1.1), so lässt sich zeigen, dass eine Skalierung aller Längenparameter nicht zu Abweichungen in Gleichung (5.1) führt und somit einen Datumsdefekt verursachen würde. Aus diesem Grund werden zusätzlich Restriktionen an die Punktparameter gestellt, die den räumlichen Abstand bestimmter 3D-Punkte zueinander festlegen. Messtechnisch lässt sich dies durch die Nutzung einer zertifizierten Längenmaßverkörperung mit Kegelbohrungen realisieren. Die Kegelbohrungen des Normals ermöglichen das Antasten eines 3D-Punkts mit verschiedenen Armposen. Um die Genauigkeitsangabe der Längen selbst in die Ausgleichung einfließen zu lassen, bietet sich die Nutzung von Pseudobeobachtungen anstelle von Restriktionen an.

Eine ausführliche mathematische Beschreibung des Lösungsansatzes sowie ein Verfahren zur Identifikation von linear abhängigen Parametern kann der Veröffentlichung **A** [Dupuis et al., 2017a] entnommen werden.

Analyse der Konfiguration der Ausgleichung

Ziel der Optimierung ist es, die Kalibrierparameter mit minimaler Varianz und Kovarianz zu schätzen, dabei jedoch den Aufwand für die Erzeugung der Messwerte gering zu halten. Insbesondere der letzte Punkt bekommt bei der Kalibrierung von Messarmen ein höheres Gewicht. Bei der Kalibrierung mittels Längennormal kann dieses in beliebig vielen Positionen und Ausrichtungen im Messvolumen platziert und mit unendlich verschiedenen Armposen angetastet werden. Da jede Normalposition jedoch einen hohen messtechnischen Aufwand erfordert, stellt sich die Frage, ob sowohl bestimmte Positionen und Ausrichtungen des Normals als auch explizite Armposen einen höheren Einfluss auf die Schätzung der DH-Parameter aufweisen.

Eine Möglichkeit, den Einfluss einer Beobachtung auf die Parameterschätzung zu bewerten, ist die Konfigurationsanalyse [Förstner, 1987]. Anhand der Einflussfaktoren, die das Komplement zu den Redundanzanteilen darstellen, ist es möglich, jeder Beobachtung einen Wert zuzuordnen, der den Beitrag der jeweiligen Beobachtung zur Parameterschätzung beschreibt. Die Konfigurationsanalyse wurde bereits erfolgreich zur Kalibrierung terrestrischer Laserscanner [Holst & Kuhlmann, 2014] und kinematischer Laserscanningssysteme [Heinz et al., 2015] sowie im Rahmen der Planung von Very Long Baseline Interferometry (VLBI) Sessions [Leek, 2014] eingesetzt.

Im Allgemeinen erfolgt die Berechnung der Einflussfaktoren mithilfe der Kovarianzmatrix der Verbesserungen $\Sigma_{\hat{\mathbf{v}}\hat{\mathbf{v}}}$ und der Kovarianzmatrix der Beobachtungen $\Sigma_{\mathbf{11}}$ über

$$h_i = 1 - [\Sigma_{\hat{\mathbf{v}}\hat{\mathbf{v}}\Sigma_{\mathbf{11}}^{-1}}]_{i,i}; \quad i = 1 \dots 7 \cdot n. \quad (5.5)$$

Dabei ist erkennbar, dass sich diese auf jede Beobachtung beziehen, sprich den Einfluss jeder einzelnen Winkelbeobachtung auf die Schätzung beschreiben. Da jedoch für die Analyse nicht die Beobachtung jedes Drehwinkelgebers selbst entscheidend ist sondern vielmehr die Armpose als Kombination aller sieben Drehwinkelgeber, muss ein Übergang in den Bedingungsraum erfolgen. Dafür wird das GHM auf ein Gauß-Markov Modell (GMM) zurückgeführt (vgl. [Mikhail, 1976]), sodass jede Beobachtung eine Armstellung beschreibt, aufgeteilt in die drei Achskomponenten (vgl. Gl. (5.2)). Mit Hilfe der Substitution

$$\Delta \bar{\mathbf{l}} = -\mathbf{w} = \mathbf{B}\hat{\mathbf{v}} - f(\mathbf{1} + \hat{\mathbf{v}}, \hat{\mathbf{x}}_i) \quad (5.6)$$

erhält man die Normalgleichungen zu

$$\left(\mathbf{A}^T \Sigma_{\bar{\mathbf{l}}}^{-1} \mathbf{A} \right) \Delta \hat{\mathbf{x}} = \mathbf{A}^T \Sigma_{\bar{\mathbf{l}}}^{-1} (-\mathbf{w}), \quad (5.7)$$

und schließlich die Kovarianzmatrix der ausgeglichenen Verbesserungen über

$$\Sigma_{\hat{\mathbf{v}}\hat{\mathbf{v}}} = \Sigma_{\bar{\mathbf{l}}} - \mathbf{A} \Sigma_{\hat{\mathbf{x}}\hat{\mathbf{x}}} \mathbf{A}^T. \quad (5.8)$$

Analog zu Gleichung (5.5) können nun mithilfe von $\Sigma_{\hat{\mathbf{v}}\hat{\mathbf{v}}}$ und $\Sigma_{\bar{\mathbf{l}}}$ die Einflussfaktoren für jede Armstellung berechnet werden.

Die unter Verwendung von $\Sigma_{\hat{\mathbf{v}}\hat{\mathbf{v}}}$ berechneten Einflussfaktoren quantifizieren den Einfluss jeder Armpose auf die Schätzung aller Parameter, sprich der DH-Parameter sowie der Punktkoordinaten. Um nun den Einfluss der Armpose auf die DH-Parameter separat bewerten zu können, gilt es, den Einfluss der Punktparameter zu eliminieren. Dies erfolgt über eine Elimination der Punktparameter aus den Beobachtungsgleichungen. Dafür werden der Parametervektor und die Designmatrix im GMM wie folgt aufgeteilt:

$$\Delta \bar{\mathbf{l}} + \bar{\mathbf{v}} = \left(\mathbf{A}_1 \mid \mathbf{A}_2 \right) \cdot \begin{pmatrix} \Delta \hat{\mathbf{x}}_1 \\ \Delta \hat{\mathbf{x}}_2 \end{pmatrix} \quad \text{mit} \quad \Sigma_{\bar{\mathbf{l}}}. \quad (5.9)$$

Darin enthält $\Delta \hat{\mathbf{x}}_1$ die Zuschläge der DH-Parameter mit dem zugehörigen Teil der Designmatrix \mathbf{A}_1 . Die Elimination der Parameter in $\Delta \hat{\mathbf{x}}_2$ erfolgt durch eine Projektion der Designmatrix \mathbf{A}_1 in den Spaltenorthogonalraum von \mathbf{A}_2 über

$$\tilde{\mathbf{A}}_1 = \mathbf{P}_{\mathbf{A}_2}^\perp \cdot \mathbf{A}_1, \quad (5.10)$$

mit dem orthogonalen Projektor

$$\mathbf{P}_{\mathbf{A}_2}^\perp = \mathbf{I} - \mathbf{A}_2 (\mathbf{A}_2^T \Sigma_{\bar{\mathbf{l}}}^{-1} \mathbf{A}_2)^{-1} \mathbf{A}_2^T \Sigma_{\bar{\mathbf{l}}}^{-1}. \quad (5.11)$$

Allgemein lassen sich die Verbesserungen des GMM über

$$\hat{\mathbf{v}} = \mathbf{P}_{\mathbf{A}}^\perp \Delta \bar{\mathbf{l}} = (\mathbf{I} - \mathbf{P}_{\mathbf{A}}) \Delta \bar{\mathbf{l}} \quad (5.12)$$

berechnen, wobei $\mathbf{P}_{\mathbf{A}}$ den Projektor in den Spaltenraum von \mathbf{A} darstellt. Da

$$\mathbf{P}_{\mathbf{A}} = \mathbf{P}_{\tilde{\mathbf{A}}_1} + \mathbf{P}_{\mathbf{A}_2} \quad (5.13)$$

gilt [Teunissen, 2000], ergibt sich der Vektor der ausgeglichenen Verbesserungen im aufgeteilten Modell zu

$$\hat{\mathbf{v}} = \left(\mathbf{P}_{\tilde{\mathbf{A}}_1}^\perp - \mathbf{P}_{\mathbf{A}_2} \right) \Delta \bar{\mathbf{l}}. \quad (5.14)$$

Aus der Anwendung des Varianzfortpflanzungsgesetzes folgt für die Kovarianzmatrix der ausgeglichenen Verbesserungen

$$\begin{aligned} \Sigma_{\hat{\mathbf{v}}\hat{\mathbf{v}}} &= \left[\mathbf{P}_{\tilde{\mathbf{A}}_1}^\perp - \mathbf{P}_{\mathbf{A}_2} \right] \Sigma_{\bar{\mathbf{l}}} \left[\mathbf{P}_{\tilde{\mathbf{A}}_1}^\perp - \mathbf{P}_{\mathbf{A}_2} \right]^T \\ &= \underbrace{\mathbf{P}_{\tilde{\mathbf{A}}_1}^\perp \Sigma_{\bar{\mathbf{l}}} \mathbf{P}_{\tilde{\mathbf{A}}_1}^\perp}_{\Sigma_{\hat{\mathbf{v}}_1 \hat{\mathbf{v}}_1}} - \mathbf{P}_{\tilde{\mathbf{A}}_1}^\perp \Sigma_{\bar{\mathbf{l}}} \mathbf{P}_{\mathbf{A}_2} - \mathbf{P}_{\mathbf{A}_2} \Sigma_{\bar{\mathbf{l}}} \mathbf{P}_{\tilde{\mathbf{A}}_1}^\perp + \mathbf{P}_{\mathbf{A}_2} \Sigma_{\bar{\mathbf{l}}} \mathbf{P}_{\mathbf{A}_2}. \end{aligned} \quad (5.15)$$

Die Matrix $\Sigma_{\hat{\mathbf{v}}_1 \hat{\mathbf{v}}_1}$ enthält darin die Anteile der Kovarianzmatrix, die sich auf die Kalibrierparameter des Messarms beziehen. Eingesetzt in Gleichung (5.5) erhält man die Einflussfaktoren, die den Einfluss jeder Armstellung auf die DH-Parameter beschreiben.

Die Ergebnisse der Konfigurationsanalyse und die daraus resultierenden Schlussfolgerungen für die Auswahl der Längennormalpositionen sind in Abschnitt 5.1.3 dargestellt.

5.1.2 Bewertung des Ausgleichungsansatzes

In diesem Abschnitt erfolgt die Bewertung des Ausgleichungsansatzes und der geschätzten Parameter anhand simulierter und realer Messdaten. Der Algorithmus zur Simulation der Messdaten (vgl. Veröffentlichung **B** [Dupuis et al., 2017a]) basiert auf realen Messungen, weshalb die Messkonfiguration für den simulierten und realen Datensatz nahezu identisch ist. Dieser enthält insgesamt 43 Längennormalpositionen, die im gesamten Messvolumen in unterschiedlicher Ausrichtung (radial, tangential, vertikal und diagonal) und Höhe verteilt sind (Abbildung 5.1). Ausgehend von dieser Messkonfiguration enthält der Datensatz 82 Distanzen, 125 Einzelpunkte, 8083 Armposen und 56581 Beobachtungen der sieben Drehwinkelgeber.

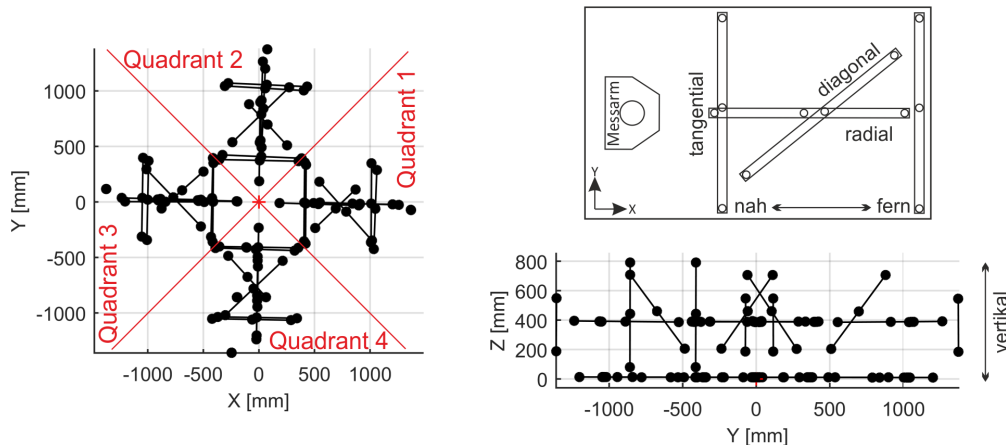


Abbildung 5.1: Positionen und Ausrichtungen des Längennormals für die simulierten und realen Messdaten. Die Quadranten teilen das gesamte Messvolumen in vier Teilbereiche auf.

Die für die Kalibrierung verwendete Maßverkörperung ist ein Längennormal mit drei Kegelbohrungen und zertifizierten Sollabständen von $d_{Soll} = [361,8993 ; 349,2024 ; 711,1017] \text{ mm} \pm 0,00075 \text{ mm}$ (1σ). Das Normal ist aus Stahl gefertigt und verfügt über einen thermischen Ausdehnungskoeffizienten von $11,5 \times 10^{-6} \frac{1}{K}$. Da die Abstände alle auf einer Raumgeraden liegen und sich die Gesamtlänge aus der Summe der Einzelabstände ergibt, werden für die Kalibrierung lediglich ein kurzer und der längste Abstand verwendet, da sonst lineare Abhängigkeiten entstehen.

Bewertung des Ausgleichungsansatzes mithilfe simulierter Beobachtungen

Eine Möglichkeit, den neuen Ausgleichungsansatz zu bewerten, ist die Nutzung simulierter Messdaten. Mithilfe varianzfreier sowie mit künstlichem Rauschen versehener simulierter Beobachtungen der Drehwinkelgeber und einem vorgegebenen kinematischen Modell lässt sich die Erwartungstreue der Ausgleichung beurteilen. Dafür werden die simulierten Beobachtungen als Eingangsgrößen in das Ausgleichungsmodell gegeben und getestet, ob die geschätzten Parameter $\hat{\mathbf{x}}$ von den Sollparametern \mathbf{x}_{Soll} der Simulation abweichen. Der Signifikanztest basiert auf der Testgröße

$$T = \frac{1}{h} (\hat{\mathbf{x}} - \mathbf{x}_{Soll})^T \Sigma_{\hat{\mathbf{x}}\hat{\mathbf{x}}} (\hat{\mathbf{x}} - \mathbf{x}_{Soll}) \sim \mathcal{F} \quad , \quad (5.16)$$

wobei diese der Fisher-Verteilung \mathcal{F} folgt. Der Test nutzt somit die vollständige Kovarianzmatrix $\Sigma_{\hat{\mathbf{x}}\hat{\mathbf{x}}}$ der ausgeglichenen Parameter. Ist die Testgröße $T \leq f_{h,r,1-\alpha}$ liegen keine signifikanten Abweichungen der geschätzten Parameter vor [Heunecke et al., 2013]. Der Quantilwert $f_{h,r,1-\alpha}$ hängt dabei von der Anzahl der zu testenden Parameter h , der Redundanz r sowie der Irrtumswahrscheinlichkeit $\alpha = 1\%$ ab.

In Veröffentlichung **B** [Dupuis et al., 2017a] wird der Ansatz aufgrund von Abweichungen vom Sollmodell als nicht erwartungstreu beschrieben. Dies ist jedoch auf einen Programmierfehler in den simulierten

Messdaten zurückzuführen, der im Anschluss an die Publikation korrigiert wurde.

Bei Verwendung varianzfreier simulierter Beobachtungen entsprechen die geschätzten Parameter im Rahmen der Rechengenauigkeit den Parametern des Sollmodells mit maximalen Abweichungen in der Größenordnung von 10^{-17} mm.

Im nächsten Schritt werden die simulierten Beobachtungen der Drehwinkelgeber sowie die Sollabstände mit einem zufällig erzeugten weißen Rauschen von $\sigma_{Enc} = 4''$ für die Gelenkwinkel und $\sigma_D = 0,75 \mu\text{m}$ für die Sollabstände versehen und als Eingangsgrößen in die Ausgleichung gegeben. Aus einer Gesamtanzahl von 200 Realisierungen dieses Zufallsprozess ergibt sich, dass basierend auf Gleichung (5.16) keine Realisierung eine signifikante Abweichung der ausgeglichenen Parameter hervorruft. Folglich kann der entwickelte Ansatz als erwartungstreu angesehen werden. Dies lässt sich ebenfalls anhand simulierter Einzelpunktprüfungen nach ASME bestätigen. Die mittlere Einzelpunktabweichung für alle 200 Realisierungen des Zufallsprozesses liegen bei unter einem Mikrometer und die maximale Abweichung bei $1,7 \mu\text{m}$.

Bewertung des Ausgleichungsansatzes anhand realer Messdaten

Basierend auf den in Abbildung 5.1 gezeigten Messdaten, erfolgt in diesem Abschnitt eine Bewertung des Ausgleichungsansatzes für reale Messungen. Der Vergleich der geschätzten DH-Parameter mit dem Sollmodell der simulierten Beobachtungen hat gezeigt, dass die Schätzung der DH-Parameter erwartungstreu ist. Da kein reales Sollmodell für den Messarm existiert, erfolgt die Bewertung der realen Kalibrierung mithilfe unabhängiger Prüfmessungen. Wie bereits in Abschnitt 2.1 beschrieben existieren anerkannte Richtlinien zur Annahme- und Bestätigungsprüfung von Messarmen [VDI, 2009; ASME, 2004]. An diese angelehnt wurden sowohl eine Einzelpunktprüfung (vergleichbar Single Point Articulation Performance (Test) (SPAT) [ASME, 2004]) an 11 unabhängigen Messpositionen als auch eine Längenprüfung an 17 unabhängigen Normalpositionen durchgeführt, ausgewertet und mit den Genauigkeitsangaben des Herstellers verglichen. Als Näherungswerte für die Ausgleichung dienen die Geometrieparameter aus einer technischen Zeichnung des Messarms [Romer Inc., 2008].

Tabelle 5.1: Ergebnisvergleich des SPAT Tests und der Längenprüfung nach ASME vor und nach der Kalibrierung. Die DH-Parameter vor der Kalibrierung entsprechen den Näherungswerten, abgegriffen aus einer technischen Zeichnung des Messarms.

	vor Kalibrierung [mm]	nach Kalibrierung [mm]	Spezifikation des Herstellers [mm]
$\delta_{SPAT,max}$	2,577	0,072	0,078
$2 RMS_{SPAT}$	2,618	0,056	—
δD_{max}	3,965	0,121	—
$2 RMS_{vol}$	3,168	0,084	—
$range/2_{vol}$	3,274	0,098	0,064

Tabelle 5.1 zeigt die Ergebnisse der Prüfmessungen vor und nach der Kalibrierung im Vergleich zu den Herstellerangaben. Dabei ist offensichtlich, dass sich die Genauigkeit des Messarms durch die Kalibrierung signifikant verbessert. Ebenso zeigt sich, dass die maximale Einzelpunktabweichung $\delta_{SPAT,max}$ nach der Kalibrierung innerhalb der Spezifikation des Herstellers liegt. Die Abweichung $range/2_{vol}$ der Längenprüfung ist jedoch außerhalb der Spezifikation. Betrachtet man die Ergebnisse der einzelnen Längenprüfungen separat (Abbildung 5.2), so fällt auf, dass 3 aus 17 geprüften Längen deutlich oberhalb der zulässigen Abweichung des Herstellers liegen. Bei der Analyse der dazugehörigen Längennormalpositionen lässt sich feststellen, dass jeweils mindestens einer der Endpunkte des Normals einen geringeren Abstand zur Basis des Arms aufweist als die nächste Kalibrierposition. Somit liegt die Prüfmessung nicht mehr vollständig im kalibrierten Messbereich, wodurch die geschätzten Parameter keine Gültigkeit haben. Gleiches lässt sich bspw. feststellen, wenn ausschließlich Normalpositionen auf der Höhe $Z = 0$ verwendet werden. Prüfmessungen, bei denen die Endpunkte des Normals ober- oder unterhalb des kalibrierten Bereichs liegen,

zeigen ebenfalls erhöhte Abweichungen zum Soll. Dies lässt darauf schließen, dass die Ausgleichung in einem lokalen Minimum endete.

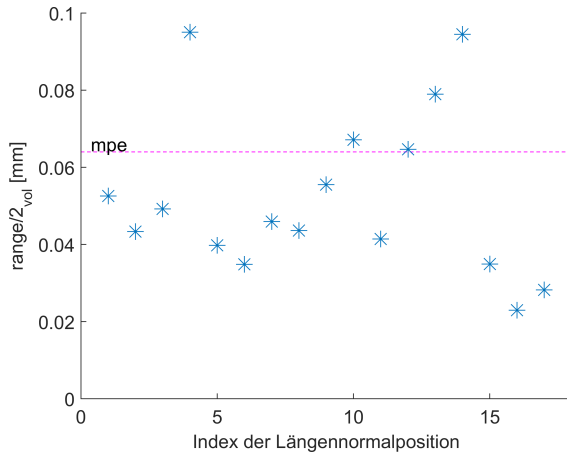


Abbildung 5.2: Längenmessabweichungen von 17 Prüflängen im Vergleich zum Herstellerlimit

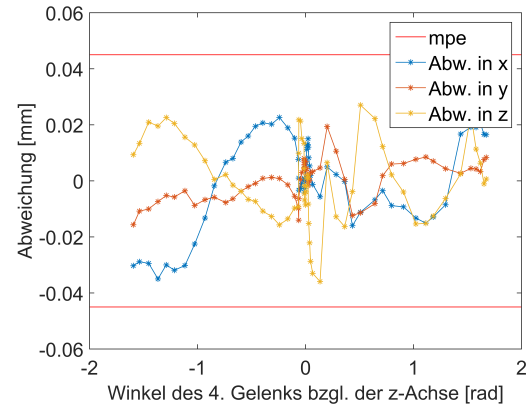


Abbildung 5.3: Abweichungen einer Einzelpunktmessung nach der Kalibrierung aufgeteilt in die Achskomponenten

Trotz des Einhaltens der Herstellerspezifikation lassen sich bei Betrachtung einer einzelnen Einzelpunktprüfung im Detail systematische Abweichungen in allen drei Achskomponenten erkennen (vgl. Abbildung 5.3). Der zum Teil periodische Verlauf weist auf Abweichungen der DH-Parameter von der tatsächlichen geometrischen Konstruktion hin (vgl. dazu Abbildung 3.3). Dies hat zur Folge, dass Messungen mit stark variierender Armpose als ungenauer einzustufen sind als Messungen gleichbleibender bzw. ähnlicher Armpose.

Zusammenfassend lässt sich festhalten, dass die Kalibrierung des Messarms erfolgreich war. Einschränkungen resultieren lediglich aus der Lokalität der Lösung, d.h. liegen Messungen außerhalb des kalibrierten Bereichs, haben die Kalibrierparameter keine Gültigkeit. Einschränkungen zu dieser Aussage ergeben sich in Abschnitt 5.1.3. Darüber hinaus zeigt sich, dass trotz der Erwartungstreu des Ausgleichungsansatzes systematische Abweichungen in den unabhängigen Prüfmessungen vorhanden sind. Diese resultieren aus Abweichungen der geschätzten DH-Parameter von der tatsächlichen Geometrie des Messarms und wirken sich insbesondere bei Messungen mit starker Variation der Armpose auf die Messgenauigkeit aus. Einen Anhaltspunkt woher diese Restabweichungen stammen, soll der folgende Abschnitt anhand einer Sensitivitätsanalyse geben.

Sensitivitätsanalyse des Ausgleichs

Die Ergebnisse der unabhängigen Prüfmessungen bei Verwendung realer Messdaten haben gezeigt, dass bei der Einzelpunktprüfung systematische Messabweichungen in den Messungen vorhanden sind. Diese liegen zwar innerhalb der Herstellerspezifikation, weisen jedoch darauf hin, dass die geschätzten DH-Parameter nicht der tatsächlichen geometrischen Konstruktion des Messarms entsprechen, obwohl sich der Ansatz bei Verwendung simulierter Messdaten erwartungstreu zeigt. Die Simulationsergebnisse in Veröffentlichung **B** [Dupuis et al., 2017a] weisen darauf hin, dass die Ausgleichung sehr sensitiv gegenüber Abweichungen von den Soll-Distanzen zu sein scheint. Daher soll in diesem Abschnitt mittels Sensitivitätsanalyse (vgl. dazu [Schwieger, 2005]) die Eingangsgröße der Soll-Distanzen anhand simulierter Daten getestet werden.

Als Datengrundlage kommen die selben simulierten Beobachtungen wie für die Prüfung der Erwartungstreu zum Einsatz, wobei die Winkelbeobachtungen mit $\sigma_{Enc} = 4''$ und die Distanzen mit $\sigma_d = 0,75 \mu m$ normalverteilt verrauscht wurden. Zusätzlich erhalten nun die Distanzen einen gleichverteilten Zuschlag im Intervall $\delta_d \in [-0,008 mm, 0,008 mm]$. Dieser Zuschlag entspricht einer temperaturbedingten Ausdehnung des Längennormals bei $\pm 1^\circ C$.

Die Simulation umfasst 200 Realisierungen, wobei jeweils die normalverteilten Zuschläge der Beobachtungen und die gleichverteilten Zuschläge der Soll-Distanzen verändert werden. Die Auswertung des Signifikanztests

(Gl. (5.16)) zeigt, dass in allen Fällen die geschätzten Parameter signifikante Abweichungen zu den Sollparametern aufweisen. Zusätzlich durchgeführte simulierte Einzelpunktprüfungen weisen zudem maximale Abweichungen von bis zu $0,006 \text{ mm}$ auf, was in etwa drei bis vier mal so viel ist wie bei den Simulationen zur Erwartungstreue. Abbildung 5.4 zeigt zudem, dass die Abweichungen der Einzelpunktprüfung, vergleichbar zu den realen Messdaten, einen systematischen Verlauf zeigen jedoch mit geringerem Maximalausschlag.

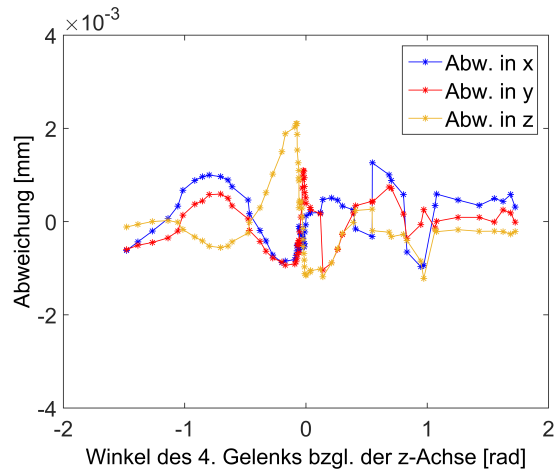


Abbildung 5.4: Abweichungen einer Einzelpunktmessung für simulierte Beobachtungen der Sensitivitätsanalyse.

Daraus lässt sich schlussfolgern, dass der Ausgleichsalgorithmus sensitiv auf Abweichungen der Solldistanzen reagiert. Diese können bei einer realen Anwendung sowohl durch Änderungen der Temperatur als auch durch Antastabweichungen der Kegelbohrungen hervorgerufen werden und sind somit tendenziell größer als die hier angesetzten $\delta_{d,max} = \pm 8 \mu\text{m}$.

Zusammenfassung der Bewertung

Die vorangegangenen Abschnitte zeigen, dass die Schätzung der DH-Parameter auf Basis simulierter Beobachtungen erwartungstreu ist. Sowohl varianzfreie als auch mit künstlichem weißen Rauschen behaftete Beobachtungen verursachen keine signifikanten Abweichungen von den Sollparametern der Simulation.

Bei Verwendung realer Messdaten zeigt sich, dass die Prüfmessungen weitestgehend innerhalb der Herstellerspezifikation liegen, sich jedoch systematische Effekte in den Prüfmessungen zeigen. Diese sind mit größter Wahrscheinlichkeit auf Abweichungen der DH-Parameter von der tatsächlichen geometrischen Konstruktion zurückzuführen. Die Ergebnisse der Sensitivitätsanalyse können dies bestätigen. Abweichungen der Solldistanzen, hervorgerufen bspw. durch temperaturbedingte Ausdehnung des Längennormals oder Antastabweichungen, verursachen signifikante Abweichungen der geschätzten Parameter und führen in Folge zu ähnlichen systematischen Effekten.

Letztlich verbleiben systematische Abweichungen in den DH-Parameter, die insbesondere bei starker Variation der Armpose zum Tragen kommen. Inwieweit dies die Ermittlung der Blattdicke beeinflusst ist in Abschnitt 5.1.4 dargestellt.

5.1.3 Ergebnisse der Konfigurationsanalyse

Im Folgenden sind die Ergebnisse der in Abschnitt 5.1.1 dargestellten Konfigurationsanalyse sowie deren Auswirkung auf die Auswahl der Längennormalpositionen beschrieben.

Abbildung 5.5 zeigt die Einflussfaktoren einer Messung einer Kegelbohrung des Längennormals bei variierender Armstellung in Abhängigkeit vom Winkel des vierten Gelenks (vgl. Abschnitt 3.1). Zunächst

fällt auf, dass die Einflussfaktoren absolut gesehen sehr klein sind, was maßgeblich der hohen Redundanz (~ 24000 Bedingungsgleichungen und 23 Parameter) des Ausgleichs geschuldet ist. Dies führt dazu, dass, wie in Holst [2015] beschrieben, die relative Änderung der Einflussfaktoren von Bedeutung ist, anstelle des sonst üblicherweise maßgeblichen Absolutwerts.

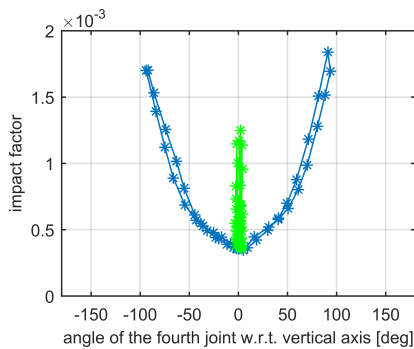


Abbildung 5.5: Veränderung der Einflussfaktoren durch Armbewegung. **Blau:** Variation der Armstellung; **Grün:** Variation der Tasterorientierung

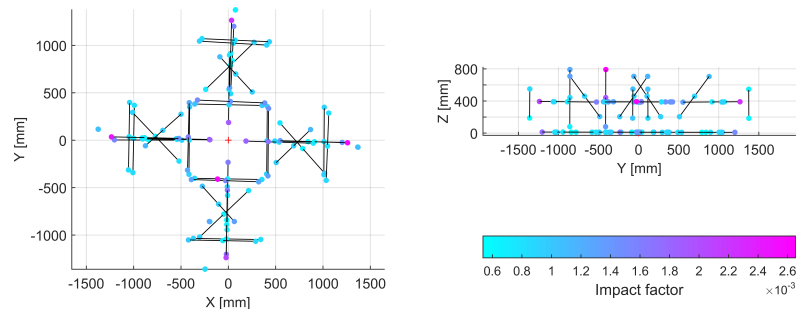


Abbildung 5.6: Mittlere Einflussfaktoren für jeden Messpunkt einer Kalibrierung

Demnach lässt sich anhand der blauen Kurve in Abbildung 5.5 erkennen, dass der Einfluss von Armposen mit großen Winkeln, sprich Armposen, bei denen das vierte Gelenk (vgl. Abbildung 3.2) zur Seite hin geneigt ist, um den Faktor fünf größer ist als bei vertikalen Armposen. Darüber hinaus geht daraus hervor, dass die Veränderung der Tasterorientierung (Abbildung 5.5 (grün)) ebenfalls den Einfluss einer Messung auf die Parameterschätzung beeinflusst. Da dieses Verhalten bei allen Messpositionen in ähnlicher Form auftritt, lässt sich schlussfolgern, dass insbesondere die Extremlagen des Arms das Schätzergebnis stärker beeinflussen und somit im Rahmen einer Kalibrierung bevorzugt gemessen werden sollten.

Abbildung 5.6 zeigt den mittleren Einfluss jedes Messpunkts der Kalibrierung, wobei Punkte, die mit einer Linie verbunden sind, zu einer Position des Längennormals gehören. Anhand der Farbgebung lässt sich erkennen, dass insbesondere Punkte, die sehr nah an der Basis des Arms oder sehr weit entfernt liegen oder eine sehr große z-Komponente aufweisen, einen vergleichsweise hohen Einfluss haben. Darüber hinaus wird deutlich, dass diese Punkte überwiegend zu radial oder vertikal ausgerichteten Längennormalpositionen gehören. Punkte von tangential zum Messarm oder diagonal ausgerichteten Normalpositionen zeigen hingegen keinen erhöhten Einfluss auf die Schätzung. Dies lässt sich damit begründen, dass Punkte, die auf einem ebenen Kreis um den Ursprung liegen, gleiche systematische Messabweichungen zeigen (vgl. Abbildungen 3.5 und 3.6). Bei einer horizontalen Ausrichtung des Längennormals tangential zum Messarm liegen dessen Endpunkte nahezu auf einem ebenen Kreis und tragen somit kaum neue Informationen zur Kalibrierung bei. Anders ist dies bei radial und vertikal ausgerichteten Normalpositionen. Hier weist jeder Messpunkt unterschiedliche systematische Messabweichung, hervorgerufen durch Abweichungen der DH-Parameter, auf und trägt damit mehr zu deren Schätzung bei. Alle genannten Charakteristiken der Einflussfaktoren zeigen sich nahezu symmetrisch in allen Bereichen des Messvolumens.

Anhand der Ergebnisse lässt sich schlussfolgern, dass sowohl die Armstellung als auch die Ausrichtung des Längennormals die Schätzung der DH-Parameter beeinflusst. So zeigt sich, dass zum Einen extreme Armposen und zum Anderen radial und vertikal ausgerichtete Längennormalpositionen einen vergleichsweise hohen Einfluss auf die Schätzung der DH-Parameter aufweisen. Da die Redundanzanteile im Schnitt alle bei $\sim 99\%$ liegen und jede Messung somit sehr gut kontrolliert ist, könnte man die Anzahl der Messwerte und somit den Aufwand einer Messung dahingehend reduzieren, dass man nur Beobachtungen bzw. Messpositionen und Armposen mit höherem Einflussfaktor in die Schätzung aufnimmt. Ferner lässt sich aufgrund der Symmetrie der Einflussfaktoren und basierend auf den Erkenntnissen aus Abbildung 3.6,

dass Punkte mit gleicher Höhe und gleichem Abstand zur Basis gleiche systematische Messabweichungen aufweisen, schlussfolgern, dass eine vollständige 360° Abdeckung des Messvolumens nicht notwendig ist. Vielmehr ist der Schwerpunkt darauf zu legen, das Messvolumen in radialer und vertikaler Richtung abzudecken, da sich in dieser Ausrichtung die Armpose und somit auch die Auswirkung von Abweichungen in den DH-Parametern ändern. Um diese Hypothese zu prüfen, werden im folgenden Abschnitt Kalibrierungen mit reduzierter Anzahl an Längennormalpositionen durchgeführt und die geschätzten Parameter anhand unabhängiger Prüfmessungen verifiziert.

Verringerung der Normalpositionen

Die folgenden Schätzungen der DH-Parameter basieren auf den Erkenntnissen der Analyse der Messarmgeometrie sowie den Erkenntnissen der Konfigurationsanalyse und nutzen eine reduzierte Anzahl an Längennormalpositionen. Dafür werden aus dem vollständigen Datensatz zunächst Normalpositionen herausgezogen, die alle innerhalb des ersten Quadranten des Messbereichs liegen (vgl. Abbildung 5.6). Die Bewertung erfolgt wie in Abschnitt 5.1.2 auf Basis unabhängiger Prüfmessungen. Die dafür verwendeten Normalpositionen entsprechen den Prüfmessungen aus Abschnitt 5.1.2 und sind im gesamten Messvolumen verteilt. Nach Santolaria et al. [2008] und basierend auf den Erkenntnissen aus Abschnitt 5.1.2 sollten die Normalpositionen, die außerhalb des kalibrierten Bereichs, d.h. außerhalb des ersten Quadranten liegen, größere Abweichungen zum Soll aufweisen, als Prüfpositionen im kalibrierten Bereich des Messvolumens. Die Ergebnisse zeigen hingegen, dass bei der Einzelpunktprüfung keine signifikanten Unterschiede zur Kalibrierung mit allen Normalpositionen auftreten. Die maximale Abweichung, berechnet nach ASME [2004], beträgt $\delta_{SPAT,max,Q1} = 0,071 \text{ mm}$ und entspricht somit der in Abschnitt 5.1.2 erhaltenen Einzelpunktgenauigkeit. Demgegenüber zeigt die Längenprüfung sogar eine geringfügige Verbesserung (Abbildung 5.7).

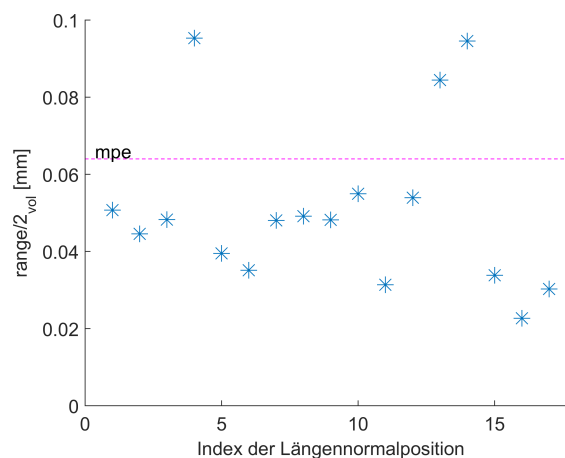


Abbildung 5.7: Längenmessabweichungen von 17 Prüflängen im Vergleich zum Herstellerlimit einer Kalibrierung ausschließlich im ersten Quadranten

Die beiden Prüflängen (10 & 12), die zuvor knapp oberhalb der zulässigen Abweichung lagen (vgl. Abbildung 5.2), befinden sich nun innerhalb der Herstellerspezifikation. Ein Grund für die Verbesserung könnte auf Normalpositionen zurückzuführen sein, bei denen durch bspw. ungenaue Antastung Abweichungen von den Sollängen auftreten und die im Zuge der Reduzierung der Normalpositionen weggefallen sind. Die drei Normalpositionen außerhalb des kalibrierten Bereichs zeigen hingegen keine signifikanten Veränderungen. Eine weitere Reduzierung der Kalibrierpositionen in der Weise, dass ausschließlich radial und vertikal ausgerichtete Normalpositionen im ersten Quadranten genutzt werden, hat keine weiteren signifikanten Änderungen der Genauigkeiten zur Folge.

Zusammenfassend lässt sich daher feststellen, dass eine vollständige Abdeckung des Messvolumens

für eine erfolgreiche Kalibrierung nicht zwingend notwendig ist. Die Ergebnisse belegen, dass Normalpositionen vorzugsweise in radialer und vertikaler Ausrichtung des Messvolumens positioniert werden sollten. Im vorliegenden Experiment ließ sich die Anzahl der Normalpositionen von ursprünglich 43 auf 6 Normalpositionen und somit der messtechnische Aufwand um ca. 85% reduzieren, ohne Verluste in der Genauigkeit zu verzeichnen.

Alle zuvor genannten Ergebnisse und Erkenntnisse lassen sich auf die Kalibrierung von Messarmen anderer Hersteller übertragen und wurden erfolgreich an einem Messarm mit 6 DoF des Typs Titanium der Firma Faro getestet.

5.1.4 Auswirkung auf die Bestimmung der Blattdicke

Der im Rahmen dieser Dissertation entwickelte Kalibrieransatz für Messarme konnte letztlich belegen, dass die DH-Parameter nur mit begrenzter Genauigkeit schätzbar sind. Es verbleiben Abweichungen der geschätzten Parameter von der tatsächlichen Geometrie des Messarms. Dies führt dazu, dass jede Messung durch systematische Abweichungen beeinflusst wird, diese jedoch alle innerhalb der vorgegebenen Genauigkeitsgrenzen des Herstellers liegen. Die Abweichungen kommen dennoch besonders bei einer starken Veränderung der Armpose während der Messung zum Tragen. Umgekehrt bedeutet dies, dass Messungen mit gleicher bzw. ähnlicher Armpose den gleichen systematischen Messabweichungen unterliegen. Leitet man aus diesen Messungen bspw. einen Abstand oder eine Dicke ab, so fallen die systematischen Messabweichung durch Differenzbildung bei gleicher Armpose heraus bzw. werden bei ähnlicher Armpose minimal. Folglich sollte bei hohen Genauigkeitsanforderungen die Messkonfiguration derart angepasst werden, dass sich die Armpose während der Messung so wenig wie möglich verändert.

Übertragen auf die Erfassung der Blattdicke bedeutet dies, dass die zu messende Zielgröße, sprich der Vektor, der die Blattdicke beschreibt, möglichst tangential zum Messarm ausgerichtet ist. Somit erhält man für Blattober- und Blattunterseite eine sehr ähnliche Armstellung und folglich eine hohe Messgenauigkeit.

Eine modellbasierte Abschätzung der systematischen Messabweichungen, verursacht durch die Unsicherheit der DH-Parameter und deren Auswirkung auf die Blattdicke, ist an dieser Stelle nicht realisierbar, da keine Sollparameter für den Messarm vorliegen. Somit ist nicht ersichtlich, welche Parameter tatsächlich von der geometrischen Konstruktion des Messarms abweichen, sodass sich die Auswirkung Blattdicke nicht modellieren lässt. Jedoch liefern die Voruntersuchungen in Abschnitt 3.1.3 sowie die Erkenntnisse aus Abschnitt 5.1 Aussagen zur Messqualität unter bestimmten Messkonfigurationen, sodass die Messstrategie für die Blatttickbestimmung optimal anpassbar ist. Diese Anpassung wird in Kapitel 6 und der Veröffentlichung E [Dupuis et al., 2017b] im Detail beschrieben und anhand empirischer Messdaten verifiziert.

5.2 Messunsicherheiten des Laserscanners unter Laborbedingungen

Dieser Abschnitt präsentiert die Ergebnisse der Genauigkeitsuntersuchung eines Laserlinienscanners unter kontrollierten Messbedingungen und unter Verwendung spezieller Prüfkörper. Diese Prüfkörper verfügen über definierte und zertifizierte geometrische Eigenschaften und ermöglichen es somit, die erfassten 3D-Punktwolken mit einem Sollmodell zu vergleichen und Genauigkeitsaussagen zu tätigen. Alle durchgeführten Untersuchungen erfolgen mit dem in Abbildung 3.8 vorgestellten Messsystem und garantieren daher eine konstante und reproduzierbare Messgeometrie. Die Untersuchungsergebnisse dienen somit als Grundlage für die in Abschnitt 5.3 durchgeführten Untersuchungen zur Blattvermessung.

Die folgenden Ausführungen basieren auf den für die Blattmessung relevanten Untersuchungen der Veröffentlichung C [Dupuis & Kuhlmann, 2014].

5.2.1 Messunsicherheiten bedingt durch die Einstellungen des Sensors

Wie bereits in Abschnitt 3.2.3 beschrieben hängt die Form und Intensitätsverteilung der empfangenen Laserlinie maßgeblich mit der Belichtungszeit der Sensormatrix zusammen. Das im Folgenden beschriebene Experiment untersucht den Zusammenhang von Belichtungszeit und Präzision der Distanzbestimmung am Beispiel des Laserlinienscanners scanCONTROL 2700-100 (vgl. Abschnitt 3.2.2). Dafür wird eine weiße, diffus streuende Referenzebene mit einer maximalen, zertifizierten Ebenheitsabweichung von $1,5 \mu\text{m}$ wiederholt bei unterschiedlicher Belichtungszeit gescannt. Der Messaufbau garantiert dabei, dass die Auftreffwinkel α und β (vgl. Abbildung 3.12) orthogonal sind, sprich die Laserebene orthogonal zur Referenzebene steht. Anschließend erfolgt eine Approximation der erfassten Punktwolke durch eine Ebene im GHM (vgl. Veröffentlichung C [Dupuis & Kuhlmann, 2014]). Anhand der Residuen der Ebenenschätzung lässt sich die Präzision der Distanzbestimmung bewerten.

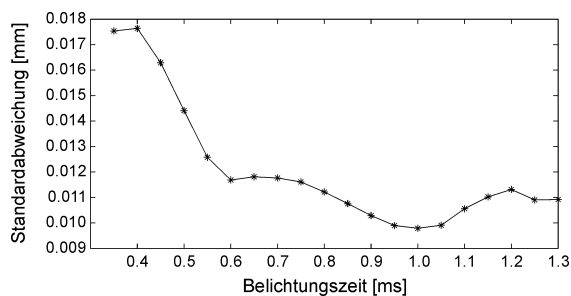


Abbildung 5.8: Standardabweichung der Residuen der Ebenenmessung bei variierender Belichtungszeit der Sensormatrix.

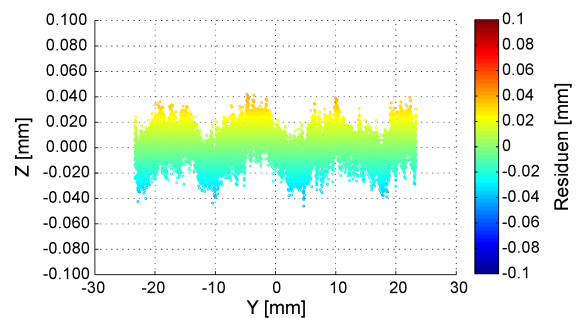


Abbildung 5.9: Residuen der Ebenenschätzung einer Punktwolke, die mit zu langer Belichtungszeit aufgezeichnet wurde. Die Punktwolke wurde der Anschaulichkeit halber in die y-z-Ebene rotiert.

Abbildung 5.8 stellt die Standardabweichungen der Residuen in Abhängigkeit der Belichtungszeit dar. Dabei ist ersichtlich, dass die Standardabweichung bei einer Belichtungszeit von einer Millisekunde ein Minimum von $0,010 \text{ mm}$ erreicht. Sowohl kürzere als auch längere Belichtungszeiten verursachen demnach eine verringerte Präzision der Distanzbestimmung. Betrachtet man die maximale Intensität der Laserlinie bei einer Belichtungszeit von einer Millisekunde, so zeigt sich, dass diese knapp unterhalb der Sättigungsgrenze der Sensormatrix bei 92% liegt. Niedrigere Intensitäten bei kürzeren Belichtungszeiten führen zu einem höheren Messrauschen der Distanzbestimmung. Der nichtlineare Anstieg des Messrauschens lässt sich dabei über das poissonverteilte Systemrauschen des CCDs erklären (vgl. Abschnitt 3.2.3), das insbesondere bei niedriger Intensität ein höheres Gewicht bekommt.

Anders ist dies bei zu langen Belichtungszeiten. In Abbildung 5.8 zeigt sich, dass lediglich die Standardabweichung geringfügig ansteigt. Betrachtet man hingegen die Residuen im Detail (Abbildung 5.9), so lassen sich systematische Abweichungen der Distanzmessung erkennen. Ursache für diese Systematik ist die Überbelichtung der Sensormatrix. Wie in Abbildung 3.10 dargestellt entspricht die Intensitätsverteilung keiner Normalverteilung mehr, was in Folge die Schwerpunktbestimmung und somit die Distanzbestimmung beeinflusst. Eine Ursache für das periodische Verhalten konnte anhand der durchgeführten Messungen nicht gefunden werden, es zeigte jedoch in gleicher Weise bei allen unabhängigen Messreihen.

Zusammenfassend lässt sich festhalten, dass die Präzision der Distanzbestimmung maßgeblich von der Belichtungszeit der Sensormatrix beeinflusst wird. Während eine Unterbelichtung lediglich ein erhöhtes Messrauschen verursacht, führt eine Überbelichtung beim verwendeten Sensor zu systematischen Messabweichungen. Folglich sollte die Belichtungszeit bei Messobjekten mit variierendem Reflexionsverhalten an die am besten reflektierende Oberfläche angepasst werden, um Überbelichtungen und somit systematische Messabweichungen zu vermeiden.

5.2.2 Messunsicherheiten bedingt durch das Eindringen in die Objektstruktur

Wie in Abschnitt 3.1.3 dargelegt, verursachen semitransparente Materialien aufgrund des Eindringens des Lasers in die Objektstruktur eine Streuung der Laserlinie sowie eine Verschiebung des Schwerpunkts auf der Sensormatrix. Die Folge sind sowohl ein erhöhtes Messrauschen als auch eine systematische Messabweichung. In den folgenden Experimenten soll die Auswirkung der Eindringeffekte am Beispiel des scanCONTROL 2700-100 (vgl. Abschnitt 3.2.2) quantifiziert werden.

Das erste Experiment untersucht die Auswirkung des Eindringens auf das Messrauschen. Dafür wird eine Referenzebene aus Marmor unter optimaler Belichtungszeit gescannt und erneut die Residuen einer Ebenenschätzung analysiert. Die Ergebnisse zeigen, dass aufgrund des Eindringens die Breite der Laserlinie von 4 Pixel auf 10 Pixel und die Standardabweichung der Residuen von $0,010\text{ mm}$ auf $0,015\text{ mm}$ ansteigt.

Um eine systematische Abweichung aufzudecken, ist ein veränderter Messaufbau notwendig (Abbildung 5.10), der es ermöglicht ein Objekt mit Eindringeffekt und eines ohne Eindringeffekt in exakt der selben Distanz zum Scanner zu messen.

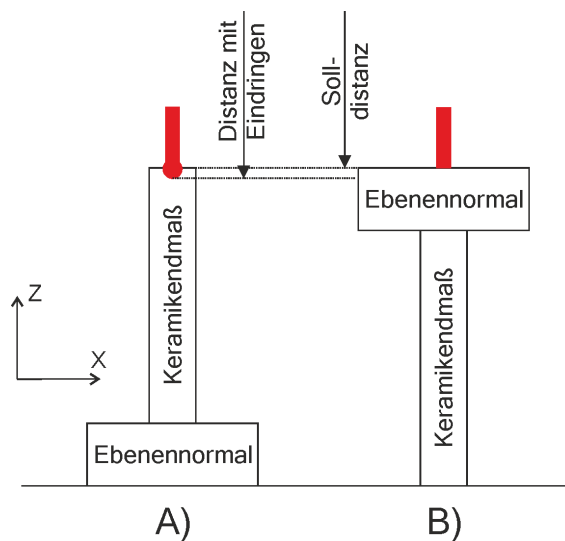


Abbildung 5.10: Messaufbau zur Quantifizierung des messbaren Eindringeffekts.

Dafür wird das in Abschnitt 5.2.1 verwendete Ebenennormal (diffus streuend) auf ein Keramikendmaß (semitransparent) aufgesetzt und mehrere Scanlinien aufgezeichnet (Abbildung 5.10 B). Die Messung mit Eindringeffekt erfolgt in umgekehrter Reihenfolge (Abbildung 5.10 A). Durch die hohe Oberflächengüte von Endmaß und Ebenennormal sind die Oberflächen beider Ausstellungen in exakt der gleichen Distanz zum Scanner. Abweichungen der Distanzbestimmung sind folglich auf den messbaren Eindringeffekt des Scanners zurückzuführen. Die Ergebnisse einer mehrfachen Messung beider Aufstellungen zeigen eine systematische Distanzabweichung von $0,03\text{ mm}$.

Zusammenfassend lässt sich festhalten, dass semitransparente Oberflächen sowohl zufällige als auch systematische Messabweichungen verursachen. Inwieweit ein messbarer Eindringeffekt auf Blättern auftritt und inwieweit das Chlorophyll die Signalintensität beeinflusst ist im folgenden Abschnitt detailliert dargestellt.

5.3 Messunsicherheiten des Laserscanners verursacht durch die Blattoberfläche

Die folgenden Abschnitte befassen sich mit der Messgenauigkeit von Laserlinienscannern bei der Vermessung von Pflanzenoberflächen. Dabei steht nicht die Quantifizierung der einzelnen Unsicherheitsfaktoren im Fokus, da diese bei Blättern in der Regel von einer Vielzahl von Faktoren abhängen und daher variieren können. Vielmehr wird gezeigt, an welchen Stellen und unter welchen Bedingungen Messunsicherheiten entstehen und in welcher Art und Weise diese die Messung beeinflussen. Ziel der Analysen ist die Optimierung der Messstrategie des Laserscanners für die Bestimmung der Blattdicke.

Die folgenden Ausführungen basieren größtenteils auf den Erkenntnissen der Veröffentlichung **D** [Dupuis et al., 2015], nutzen jedoch zusätzlich die in Abschnitt 5.2 beschriebenen und in Veröffentlichung **C** [Dupuis & Kuhlmann, 2014] publizierten Ergebnisse der Genauigkeitsanalyse von Laserscannern.

Wie bereits in Abschnitt 3.3 dargestellt, bestehen Blätter aus den Schichten Cuticula, Epidermis und dem Mesophyll (vgl. Abbildung 3.15). Jede dieser Blattschichten verfügt über besondere optische Eigenschaften, die maßgeblich das Reflexionsverhalten beeinflussen. Um die Auswirkungen dieser Eigenschaften auf die Messungen besser beurteilen zu können, betrachten die folgenden Abschnitte die einzelnen Blattschichten separat. Für die Untersuchungen wurden beide Laserlinienscanner der Firma Micro-Epsilon eingesetzt, wobei einer der Sensoren mit einem Laser der Wellenlänge 658 nm (rot) und der andere mit einem Laser der Wellenlänge von 405 nm (blau) ausgestattet ist (vgl. Abschnitt 3.2.2). Damit lassen sich mögliche Unterschiede im Reflexionsverhalten untersuchen.

5.3.1 Messbarkeit der Epidermis

In der Theorie gilt die Epidermis als vollständig transparent [Rascher et al., 2010] und sollte somit für Laserscanner nicht messbar sein [Paulus et al., 2014b]. Um diese Hypothese zu überprüfen, wird ein Experiment durchgeführt, bei dem die Epidermis eines Lauchs (*Allium porrum* L.) separat, ohne Einfluss von Cuticula und Mesophyll gescannt wird. Die besondere Struktur des Lauchs ermöglicht dabei eine weitestgehend zerstörungsfreie Extraktion der Epidermis. Aus der Theorie [Gordon, 2008; Donges & Noll, 1993] und den Erkenntnissen in Abschnitt 5.2.2 geht hervor, dass die Transparenz der Epidermis bei Blättern, vergleichbar zu Marmor oder Keramik, einen messbaren Eindringeffekt verursachen sollte. Um dies zu belegen und abzuschätzen, wie stark der messbare Eindringeffekt auftritt, erfolgt eine Aufschichtung mehrerer Epidermisschichten auf gläsernen Mikroskopträgern, die mit einem für den Laser undurchdringlichen Streifenmuster versehen sind (Abbildung 5.11). Die Messung erfolgt mit dem in Abbildung 3.8 dargestellten Messaufbau mit beiden Laserscannern unter verschiedenen Belichtungszeiten der Sensormatrix.

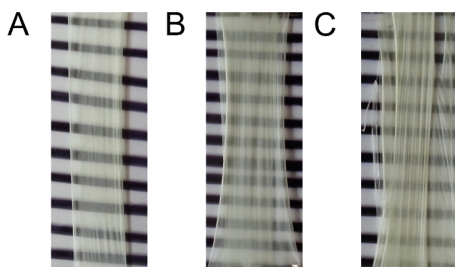


Abbildung 5.11: Messaufbau zur Untersuchung der Messbarkeit der Epidermis. **A:** eine Epidermisschicht, **B:** zwei Epidermisschichten, **C:** drei Epidermisschichten

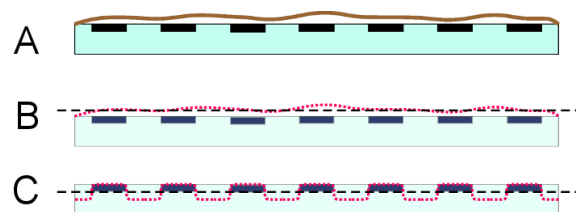


Abbildung 5.12: Theoretische Ergebnisse der Epidermismessungen. Die schwarz gestrichelte Linie beschreibt das Ergebnis der Ebenenschätzung. **A:** Messaufbau, **B:** Ergebnis ohne messbaren Eindringeffekt, **C:** Ergebnis mit messbarem Eindringeffekt

Um einen möglichen messbaren Eindringeffekt sichtbar zu machen, wird eine ausgleichende Ebene in die Punktwolke geschätzt und deren Residuen analysiert (Schätzung basierend auf dem Ansatz in Dupuis &

Kuhlmann [2014]). Abbildung 5.12 zeigt die theoretisch möglichen Ergebnisse.

Fall **A** skizziert den Messaufbau im Querschnitt. Die Epidermis liegt auf der Glasoberfläche und verfügt über eine gewisse Struktur. Der Fall **B** veranschaulicht das Ergebnis eines Scans, wenn kein messbarer Eindringeffekt vorliegt. In diesem Fall repräsentiert die Punktwolke die Struktur der Epidermis, welche sich ebenfalls in den Residuen der Ebenenschätzung erkennen lässt. Demgegenüber spiegelt der Fall **C** das Ergebnis mit messbarem Eindringeffekt wider. Dabei beschreibt die Punktwolke nicht mehr die Epidermisoberfläche, sondern das Streifenmuster des Glasträgers. Somit zeigt sich in den Residuen nicht die Struktur der Epidermis sondern die regelmäßige Struktur des Streifenmusters. Die Größenordnung der Residuen gibt zusätzlichen Aufschluss über die Stärke des messbaren Eindringeffekts.

Abbildung 5.13 zeigt die Punktwolken der Scans beider Laserscanner rotiert in die x-y-Ebene und farbcodiert über die Residuen der Ebenenschätzung. Die Analyse beider Laserscanner im Vergleich offenbart, dass im Falle einer Epidermisschicht das Streifenmuster in den Residuen beider Scanner erkennbar ist (Abbildung 5.13 **A** und **D**). Es unterscheidet sich jedoch in der Größe der Residuen. Während beim Scanner mit rotem Laser die Residuen in der Größenordnung von $\pm 0,5 \text{ mm}$ liegen, sind sie beim Scanner mit blauem Laser deutlich geringer. Dies lässt darauf schließen, dass die messbare Eindringtiefe beim Scanner mit rotem Laser größer ist als beim Scanner mit blauem Laser. Die Ergebnisse für zwei und drei Epidermisschichten bestätigen diese Annahme (Abbildung 5.13 **B-C** und **E-F**). Das Streifenmuster ist hier nur in den Residuen des Scanners mit rotem Laser zu erkennen, während die Punktwolke des Scanners mit blauem Laser ausschließlich die Struktur der Epidermisschichten beschreibt. Beide Scanner zeigen darüber hinaus, dass die messbare Eindringtiefe mit zunehmender Belichtungszeit ansteigt [Dupuis et al., 2015]. Durch die längere Belichtungszeit ist die Sensormatrix in der Lage, ein schwächeres Signal tiefer liegender Reflexionsquellen zu erfassen, was zu einer Verschiebung des Schwerpunkts der Laserlinie und folglich zu einer größeren Eindringtiefe führt.

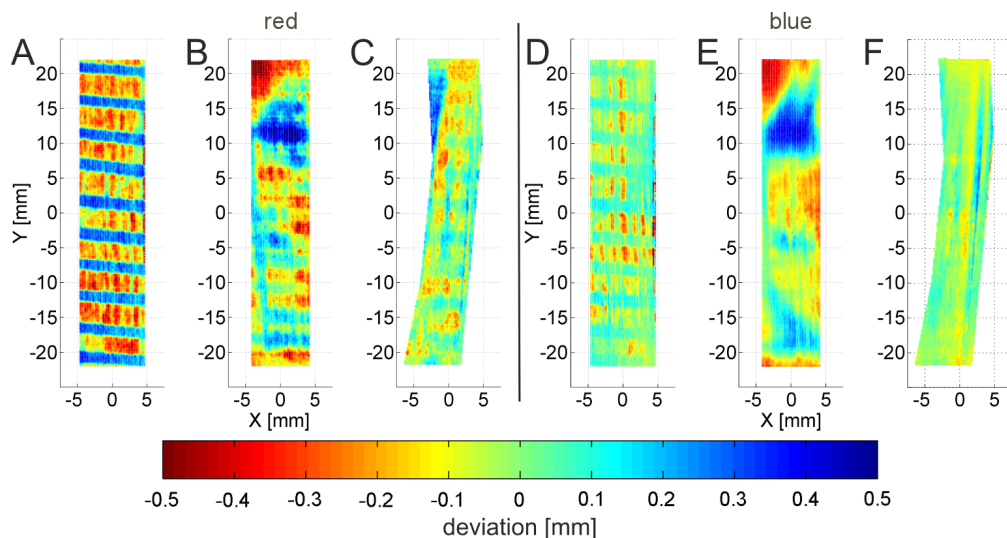


Abbildung 5.13: Punktwolken der Epidermismessungen beider Laserscanner eingefärbt über die Größe der Residuen der Ebenenschätzung. **A** und **D**: eine Epidermis; **B** und **E**: zwei Epidermisschichten; **C** und **F**: drei Epidermisschichten

Die Experimente belegen, dass beide Laserscanner einen messbaren Eindringeffekt verursachen, dieser jedoch für den Scanner mit blauem Laser deutlich kleiner ausfällt. Aus messtechnischer Sicht führt das Eindringen zu einer systematischen Messabweichung der Distanzbestimmung sowie zu erhöhtem Messrauschen bedingt durch die Streuung der Laserlinie (vgl. Abschnitt 5.2.2). Folglich beschreibt die Punktwolke nicht mehr die tatsächliche Objektoberfläche.

5.3.2 Einfluss des Chlorophylls auf das Messsignal

Das zuvor beschriebene Experiment belegt, dass die Epidermis insbesondere mit dem roten Laser nicht messbar ist und das empfangene Signal somit größtenteils aus dem Mesophyll stammt. Aus der Theorie ist bekannt, dass das dort angereicherte Chlorophyll Licht absorbiert (vgl. Abbildung 3.16). Inwieweit dies das Messsignal der Laserscanner beeinflusst und welche Auswirkungen dies auf die Messung hat, soll ein Experiment mit chlorophyllgetränktem Filterpapier zeigen. Dafür wird reines Chlorophyll aus den Blättern eines Schwertfarns (*Nephrolepis exaltata* (L.) Schott) extrahiert und in unterschiedlicher Konzentration in Filterpapier eingelassen (Abbildung 5.14 oben).

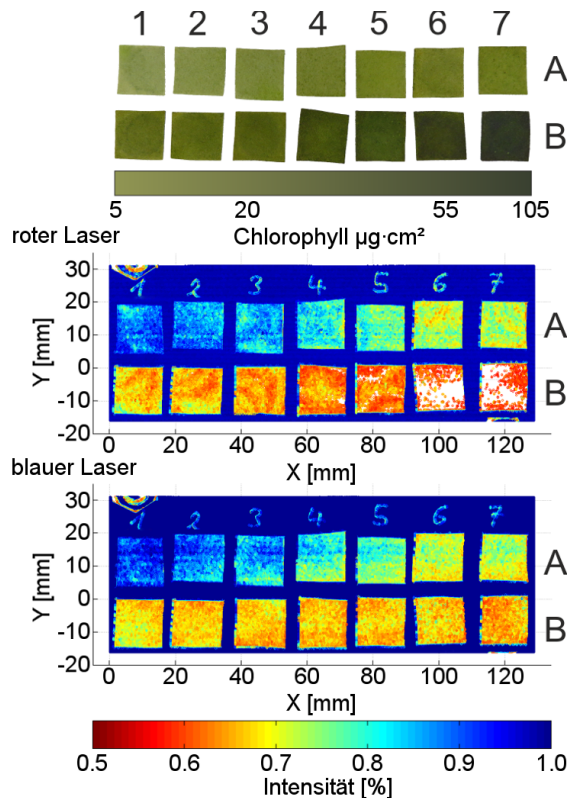


Abbildung 5.14: Experiment zum Einfluss des Chlorophylls auf Laserscannermessungen. **oben:** Messobjekt bestehend aus Filterpapier mit unterschiedlichen Chlorophyllkonzentrationen; **mitte:** Über die Intensität eingefärbte Punktwolke des roten Lasers; **unten:** Über die Intensität eingefärbte Punktwolke des blauen Lasers

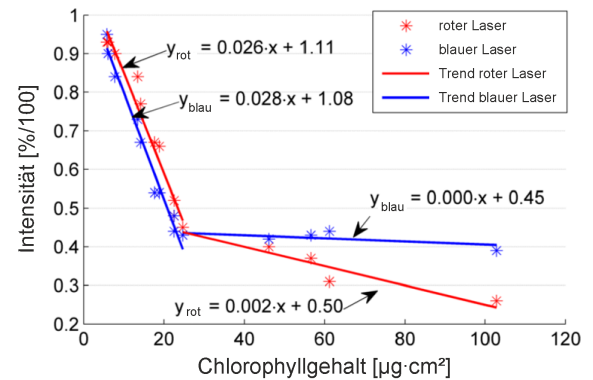


Abbildung 5.15: Abnahme der Intensität mit steigender Chlorophyllkonzentration für den roten und blauen Laser.

Die Analyse der Messungen erfolgt zunächst auf Basis der Intensität (vgl. Abschnitt 3.2.1), die als zusätzliche Messinformation zur Verfügung steht. Die Belichtungszeit beider Laserscanner wurde vorab so angepasst, dass die mittlere Intensität bei niedrigster Chlorophyllkonzentration im optimalen Bereich von 92% liegt (vgl. Abschnitt 3.2.3). Abbildung 5.14 (mitte und unten) zeigt die über die Intensität farbcodierten und in die x-y-Ebene rotierten Punktwolken beider Laserscanner. Wie erwartet zeigt sich bei beiden Sensoren ein linear abfallender Trend der Intensität mit zunehmendem Chlorophyllgehalt. Unterschiede zeigen sich erst ab einer Konzentration von ca. $23 - 50 \mu\text{g}/\text{cm}^2$. Während die Intensität des Scanners mit rotem Laser weiter abnimmt, jedoch mit geringerer Steigung, bleibt die Intensität beim Scanner mit blauem Laser annähernd konstant (Abbildung 5.15). Grund dafür ist das unterschiedliche Eindringverhalten der beiden Laserfarben (vgl. Abschnitt 5.3.1) in Kombination mit der Verteilung des Chlorophylls innerhalb des Filterpapiers. Da

das Filterpapier selbst eine gewisse Dicke hat und sich das Chlorophyll im Filterpapier verteilt, interagiert der blaue Laser messbar nur mit der obersten Schicht Chlorophyll, während der rote Laser tiefer eindringt und somit mit mehr Chlorophyll interagieren kann. Folglich führt das unterschiedliche Eindringverhalten auch zu einer unterschiedlichen Beeinflussung durch das Chlorophyll.

Basierend auf den Erkenntnissen aus Abschnitt 5.2.1 beeinflusst die Intensität die Unsicherheiten der Distanzbestimmung. Betrachtet man in diesem Zusammenhang das Rauschen der Punktwolke des Scanners mit rotem Laser, so zeigt sich zusätzlich, dass durch die verringerte Intensität die zufälligen Abweichungen von rund $0,02\text{ mm}$ für die geringste auf bis zu $0,1\text{ mm}$ für die höchste Konzentration ansteigen. Ist der Chlorophyllgehalt zu hoch, kommt es ohne Anpassung der Belichtungszeit zu einem nicht auswertbaren Messsignal und folglich zu Datenlücken in der Punktwolke.

Die Experimente mit reinem Chlorophyll können letztlich belegen, dass die Intensität beider Laserfarben in gleicher Weise abnimmt und Unterschiede lediglich durch das unterschiedliche Eindringverhalten verursacht werden. Aus messtechnischer Sicht führt die Abnahme der Intensität zu einer Steigerung des Messrauschens [Dupuis & Kuhlmann, 2014]. Sofern der Chlorophyllgehalt gemessener Blätter konstant ist, kann man diesem Effekt über die Anpassung der Belichtungszeit entgegenwirken. Bei Blättern mit unterschiedlichen Chlorophyllkonzentrationen (vgl. Abschnitt 5.3.3) muss man jedoch das erhöhte Messrauschen in Kauf nehmen, um Überbelichtungen und somit systematische Messabweichungen (vgl. Abschnitt 3.2), in Bereichen mit wenig Chlorophyll zu vermeiden.

5.3.3 Anwendungsfall Blattoberfläche

Um die Ergebnisse der separierten Blattschichten und -bestandteile zu validieren, werden Messungen an Blättern mit unterschiedlichem Alterungsgrad durchgeführt. Durch die Alterung des Blattes verändert sich der Chlorophyllgehalt [Weiler & Nover, 2008], wodurch das Blatt die Farbe von grün, über gelb hin zu braun verändert (vgl. Abbildung 5.16 A).

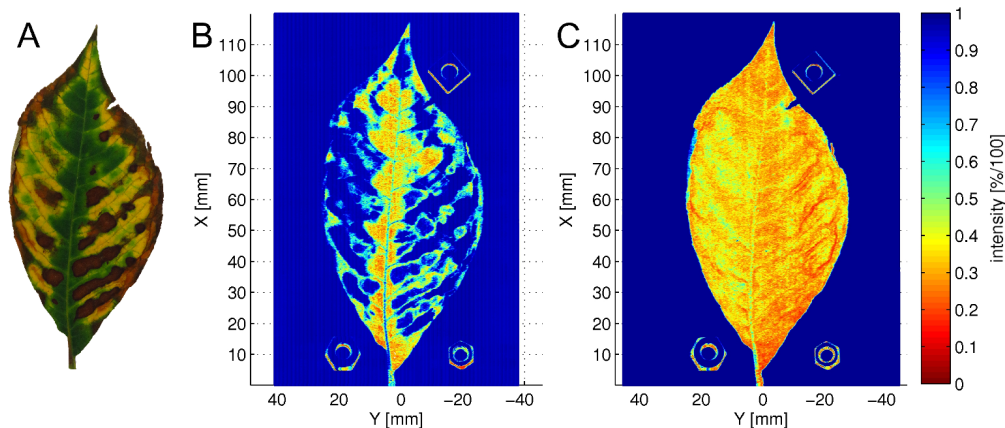


Abbildung 5.16: Blatt einer Strauchkastanie (*Aesculus parviflora* Walter) mit unterschiedlichen Alterungsgraden. **A:** RGB-Bild; **B:** Punktwolke eingefärbt über die Intensität des roten Lasers; **C:** Punktwolke eingefärbt über die Intensität des blauen Lasers

Da sich die Abnahme des Chlorophylls innerhalb des Mesophylls abspielt, sollten sich die Unterschiede nur bei einem vorliegenden Eindringeffekt in der Intensität der Messung widerspiegeln. Betrachtet man unter dieser Maßgabe die über die Intensität farbcodierte, in die x-y-Ebene rotierte Punktwolken beider Laserscanner, so lässt sich feststellen, dass lediglich das Intensitätsbild des Scanners mit rotem Laser die Chlorophyllunterschiede zeigt (Abbildung 5.16 B). Die Intensität des Scanners mit blauem Laser hingegen lässt diese Unterschiede nicht erkennen (Abbildung 5.16 C). Folglich stammt das empfangene Signal des Scanner mit rotem Laser aus dem Mesophyll, während das Signal des anderen Scanners von der Blattoberfläche stammt. Aus messtechnischer Sicht hat somit die Punktwolke des Scanners mit blauem Laser eine höhere geometrische Genauigkeit, da keine oder lediglich eine sehr kleine systematische Messabweichung vorliegt.

5.3.4 Einfluss des Auftreffwinkels

Eine Eigenschaft des eingesetzten Messsystems ist die konstante Aufnahmegeometrie (vgl. Abbildung 3.8). Zudem wurden alle getesteten Objekte in den Veröffentlichungen **C** und **D** [Dupuis & Kuhlmann, 2014; Dupuis et al., 2015] so positioniert, dass sie möglichst flach unter konstantem Auftreffwinkel messbar waren. Wie in Abschnitt 3.2.3 beschrieben führt jedoch die Veränderung des Auftreffwinkels β (vgl. Abbildung 3.12) zu einer Beeinflussung der Signalintensität, sofern die Oberfläche nicht vollständig diffus streut. Da die Cuticula ihrerseits über eine spiegelnde Komponente verfügt [Vogelmann, 1993; Paulus et al., 2014b], ändert sich auch bei Blättern die Signalintensität abhängig vom Auftreffwinkel. Um diesen Effekt zu verdeutlichen, ist in Abbildung 5.17 die Punktwolke eines stark strukturierten Rübenblattes mit konstantem Chlorophyllgehalt dargestellt, die sowohl mit der Intensität als auch mit dem Auftreffwinkel farbcodiert wurde.



Abbildung 5.17: Punktwolke eines Rübenblattes eingefärbt mit der Intensität (**links**) und mit dem Auftreffwinkels des Lasers (**rechts**).

Dabei ist deutlich zu erkennen, dass sich bei Auftreffwinkeln deutlich unter 90° die Signalintensität verringert. Es lässt sich schlussfolgern, dass nicht nur die Menge an Chlorophyll die Signalintensität beeinflusst sondern auch die Änderung der Aufnahmegeometrie des Scanners, verursacht durch die natürliche Struktur der Blätter. Ferner bedeutet dies, dass der Einfluss des Auftreffwinkels sich nicht nur auf die Signalintensität bezieht, sondern auch den Ursprung der Reflexion und somit das Eindringverhalten beeinflusst. Bei einer hohen Intensität wird folglich ein Großteil der Laserstrahlung an der Cuticula reflektiert und von der Sensormatrix empfangen. Demzufolge verschiebt sich der Schwerpunkt der Laserlinie und die ermittelte Distanz entspricht unter Umständen der Blattoberfläche. Niedrigere Intensitäten sprechen dafür, dass das empfangene Signal aus tieferen Blattschichten stammt und somit nicht die eigentliche Blattoberfläche beschreibt. Dieser Aspekt wird in Abschnitt 6.5 nochmals am Beispiel eines Rübenblatts aufgegriffen.

5.3.5 Auswirkung auf die Bestimmung der Blattdicke

Zusammenfassend konnten die Experimente belegen, dass die Vermessung von Blattoberflächen mit Nahbereichslaserscannern mit rotem Laser, wie auch dem Perceptron ScanWorks-V5, wegen der besonderen optischen Eigenschaften problematisch sind. Die Semitransparenz des Blattgewebes führt dazu, dass der Laser die Blattschichten durchdringt und nur teilweise aus verschiedenen Tiefen der Blattstruktur zurückgeworfen wird. Dieses Eindringverhalten bewirkt auf der einen Seite eine systematische Verschiebung der Laserlinie

auf dem Empfangssensor und somit eine systematisch zu lange Distanzbestimmung. Auf der anderen Seite wird die Laserlinie durch das Eindringen gestreut, was eine Zunahme des Messrauschens zu Folge hat. Darüber hinaus absorbiert das im Blatt vorhandene Chlorophyll einen Großteil des einfallenden Laserlichts, was zusätzlich zu einem deutlichen Rückgang der empfangenen Signalintensität und somit erhöhtem Messrauschen führen kann. Letztlich wird die Signalintensität zusätzlich durch den Auftreffwinkel der Laserebene auf die Blattoberfläche beeinflusst, was aufgrund der natürlichen Oberflächenstruktur der Blätter zu einer sich verändernden Signalintensität während der Messung und einem variierenden Reflexionsursprung führen kann.

Übertragen auf die Messung der Blattdicke ist daher anzunehmen, dass das Messergebnis durch den Eindringeffekt in der Weise beeinflusst wird, dass die ermittelte Blattdicke abnimmt und nicht der tatsächlichen Blattdicke entspricht. Dies lässt sich zwar durch Verkürzen der Belichtungszeit theoretisch verringern mit dem Ergebnis eines schlechteren Signal-Rausch-Verhältnisses. Da dieses jedoch lediglich das zufällige Messrauschen erhöht, wäre es denkbar, diesen Anstieg in Kauf zu nehmen, um die systematische Abweichung des Eindringens zu verkleinern. Demgegenüber stehen jedoch die Untersuchungen zum Auftreffwinkel. Diese haben ergeben, dass die Intensität durch die natürliche Struktur des Blattes stark beeinflusst bzw. meist verringert wird. Wählt man eine kürzere Belichtungszeit der Sensormatrix, um die systematische Abweichung des Eindringeffekts zu verringern, kann dies zu einer Unterbelichtung der Sensormatrix und dadurch zu Datenlücken in der Punktwolke führen (vgl. Abbildung 5.14 Mitte **B 6** & **7**). Zusätzlich hat das erhöhte Messrauschen zur Folge, dass sich die gemessenen Punktwolken von Blattober- und Blattunterseite je nach tatsächlicher Blattdicke nicht mit statistischer Sicherheit trennen lassen.

Alle genannten Einflussfaktoren ließen sich durch den Einsatz eines Laserscanners mit blauem Laser verringern, da dieser aufgrund der kürzeren Wellenlänge weniger tief in die Blattstruktur eindringt und folglich eine höhere geometrische Genauigkeit aufweist. Zusätzlich wird dieser nicht durch das Chlorophyll beeinflusst, was zu einer konstanten Intensitätsverteilung und geringerem Messrauschen führt. Nähere Untersuchungen hierzu waren leider nicht möglich, da zum Zeitpunkt der Experimente zur Blattdickenbestimmung (Februar 2017) eine Kombination des eingesetzten Messarms mit einem Scanner mit blauem Laser nicht verfügbar war.

6. Empirische Untersuchungen zur Blattdickenmessung

Das vorangegangene Kapitel untersuchte die einzelnen Komponenten des Nahbereichslaserscanningsystems separat, um die individuellen Messabweichungen aufzudecken mit dem Ziel, eine für die Blattdickenmessung optimale Messstrategie zu entwickeln. Basierend auf diesen Erkenntnissen beschreiben die folgenden Abschnitte eine empirische Studie zum Thema Blattdickenmessung und sollen letztlich die zentrale Frage dieser Dissertation beantworten. Die empirischen Untersuchungen erfolgen auf Basis der Gerätekombination RO-MER Infinite 2.0 Messarm und Perceptron V5 Laserscanner. Die Messungen haben dabei nicht den Anspruch, reale Messbedingungen im Gewächshaus oder im Feld darzustellen. Vielmehr steht hier die messtechnische Machbarkeit unter optimierten Messbedingungen im Fokus. Alle Ausführungen und Untersuchungen basieren auf der für diese Dissertation relevanten Veröffentlichung **E** [Dupuis et al., 2017b].

An dieser Stelle sei angemerkt, dass für die Berechnung der 3D Punktwolke nicht die in Veröffentlichung **B** [Dupuis et al., 2017a] bzw. Abschnitt 5.1 geschätzten Kalibrierparameter für den Messarm zum Einsatz kommen. Die Auswerteeinheit des Perceptron Laserscanners greift intern auf die im Messarm hinterlegten und für den Nutzer nicht zugänglichen Kalibrierparameter des Herstellers zu. Die eigene Kalibrierung dient somit dem Verständnis der systematischen Abweichungen und liefert die Grundlage für die Optimierung der Messstrategie. Zur Verifizierung der Übertragbarkeit auf die Herstellerkalibrierung erfolgen empirische Untersuchungen anhand zertifizierter Prüfnormale. Wie bereits in Abschnitt 5.1.4 beschrieben, ist eine methodische Genauigkeitsabschätzung auf Basis der geschätzten DH-Parameter nicht möglich, da keine Sollwerte für die Geometrie des Messarms vorliegen.

6.1 Anpassung der Messstrategie des Messarms

Die Kalibrierung des Messarms (vgl. Abschnitt 5.1) verdeutlicht, dass die Schätzung der DH-Parameter zwar erwartungstreu ist, jedoch die geschätzten Parameter nicht exakt die geometrische Konstruktion des Messarms repräsentieren. Dies führt dazu, dass unabhängige Prüfmessungen nach der Kalibrierung systematische Abweichungen aufweisen (vgl. Abbildung 5.3), die durch eine starke Veränderung der Armpose während der Prüfung hervorgerufen werden. Dies bedeutet im Umkehrschluss, dass für eine präzise Abstands- oder Dickenmessung die Armpose so wenig wie möglich zu verändern ist, da so alle systematischen Abweichung in gleicher Weise wirken und bei Differenzbildung herausfallen. Dies lässt sich hauptsächlich durch eine geschickte Positionierung des Messobjekts realisieren.

Im Grunde stellt die Bestimmung der Blattdicke die Erfassung des Abstands zwischen Blattober- und Blattunterseite dar. Wie bereits in Abschnitt 3.1 in der Theorie beschrieben und durch die Konfigurationsanalyse bestätigt (vgl. Abschnitt 5.1) liefern Punkte, die auf einem ebenen Kreis um die Vertikalachse liegen, gleiche systematische Messabweichungen, da sie mit den gleichen Armposen messbar sind. Folglich sollten für eine Abstandsmessung die Endpunkte des Abstandsvektors in gleicher Höhe (z -Koordinate) und im gleichen Abstand zur Vertikalachse liegen. Für die Blattdickenbestimmung bedeutet dies, dass das Blatt möglichst radial zum Messarm ausgerichtet sein sollte, sodass der Vektor, welcher die Blattdicke beschreibt, tangential zum Messarm liegt (Abbildung 6.1). Bei einer solchen Messanordnung müssen für einen Scan der Blattober- und Blattunterseite lediglich das erste und fünfte Gelenk stark verändert werden. Die restliche Armpose bleibt nahezu identisch.

6.1.1 Empirische Untersuchung des optimierten Messaufbaus

Um die optimierte Messstrategie zu überprüfen und die Auswirkung einer sich verändernden Armpose für die Herstellerkalibrierung zu illustrieren, werden taktile Abstandsmessungen an einem Parallelendmaß mit

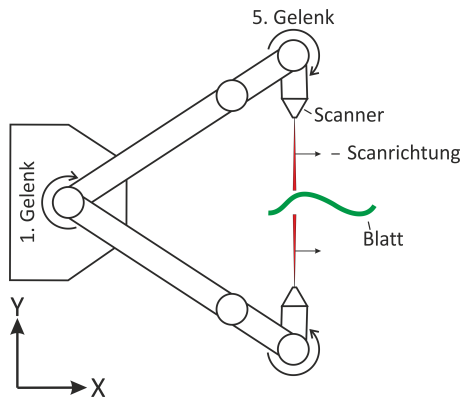


Abbildung 6.1: Optimierter Messaufbau zur Erfassung der Blattdicke

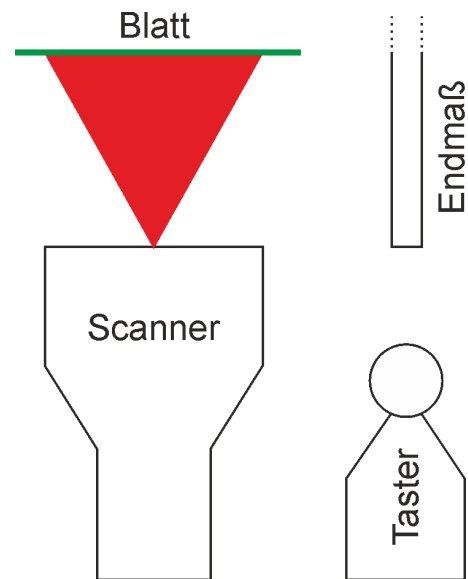


Abbildung 6.2: Das Endmaß gleicht die unterschiedliche Länge von Taster und Laserscanner aus, um ähnliche Messbedingungen zu schaffen.

einer nominalen Länge von $100 \text{ mm} \pm 0,1 \mu\text{m}$ durchgeführt. Die Nutzung eines Parallelendmaßes soll dabei den größeren Messabstand des Scanners in Teilen ausgleichen (Abbildung 6.2). Somit ist gewährleistet, dass die Armposen bei den taktilen Messungen ähnlich zu den Armposen beim Scanning sind. Beide Messflächen des Endmaßes werden mit minimaler Variation der Armpose mit mehreren Messpunkten taktil erfasst. Um die Auswirkung einer nicht angepassten Messstrategie zu simulieren, erfolgt eine zusätzliche Messreihe, bei der alle Gelenkachsen stark verändert werden. In einem Soll-Ist Vergleich werden die nominale Länge des Endmaßes mit den aus den Messungen abgeleiteten Längen verglichen. Die Längenberechnung basiert dabei auf dem Abstand aller Punkte der einen Seite zur Ebene der anderen Seite, geschätzt im GHM und umgekehrt, vgl. [Dupuis et al., 2017b]. Tabelle 6.1 zeigt die aus den Messreihen ermittelte mittlere Abweichung zum Soll sowie deren Standardabweichung.

Tabelle 6.1: Abweichungen der mit dem Messarm ermittelten Längen im Vergleich zur Solllänge des Parallelendmaßes.

geringe Armbewegung		starke Armbewegung	
Soll - Ist	Standardabw.	Soll - Ist	Standardabw.
$\Delta d = 0,014 \text{ mm}$	$\sigma_{\Delta d} = 0,003 \text{ mm}$	$\Delta d = 0,055 \text{ mm}$	$\sigma_{\Delta d} = 0,015 \text{ mm}$

Es zeigt sich eindeutig, dass sowohl die Abweichung zum Soll als auch die Standardabweichung des Abstands bei starker Veränderung der Armpose ansteigt. Zudem ist die Abweichung zum Soll bei der Messung mit wenig Armbewegung deutlich geringer als die vom Hersteller zulässige Maximalabweichung von $mpe_{VOL} = 0,064 \text{ mm}$. Diese Ergebnisse spiegeln exakt das in Veröffentlichung **B** [Dupuis et al., 2017a] dargestellte Verhalten wider und bestätigen somit die Übertragbarkeit der Erkenntnisse.

Die empirischen Untersuchungen zur Messgenauigkeit des Messarms können somit belegen, dass mit dem vorgeschlagenen Messaufbau und der optimierten Messstrategie Abstandsmessungen mit einer Genauigkeit im Bereich weniger Hundertstelmillimeter möglich sind, wenn eine starke Variation der Armpose während der Messung weitestgehend vermieden wird.

6.2 Anpassung der Messstrategie des Laserscanners

Die in den Veröffentlichungen **C** [Dupuis & Kuhlmann, 2014] und **D** [Dupuis et al., 2015] durchgeführten und in den Abschnitten 5.2 und 5.3 beschriebenen Experimente mit Nahbereichslaserscannern haben ergeben, dass sich die systematische Abweichung verursacht durch den Eindringeffekt bei Scannern mit rotem Laser nicht eliminieren lässt (vgl. Abschnitt 5.3.5). Um dennoch eine möglichst hohe Genauigkeit der Blattdickenbestimmung zu erzielen und zu gewährleisten, dass sich die Punktwolken von Blattober- und Blattunterseite mit statistischer Sicherheit trennen lassen, wird die Belichtungszeit der Sensormatrix vor jeder Messung an die jeweilige Oberflächenbeschaffenheit angepasst. Im Rahmen der empirischen Untersuchungen wird dafür der in der Herstellersoftware vorgegebene Algorithmus verwendet.

Darüber hinaus ist während der Messung darauf zu achten, die Aufnahmegeometrie, sprich den Auftreffwinkel der Laserebene, möglichst konstant zu halten, um Variationen der Signalintensität zu vermeiden.

6.3 Empirische Genauigkeit des Gesamtsystems unter optimierten Messbedingungen

Um die Messgenauigkeit des kombinierten Messsystems unter verschiedenen Messbedingungen zu quantifizieren, erfolgen Messungen an dünnen Lehren mit bekannter Dicke unter Verwendung des optimierten Messaufbaus aus Abbildung 6.1. Um den Einfluss einer nicht angepassten Messstrategie zu verdeutlichen, wird erneut bei einer Messreihe die Armpose, d.h. alle Gelenkachsen, während der Messung stark variiert. Im Zuge der empirischen Genauigkeitsuntersuchungen ergab sich eine systematische Messabweichung des Gesamtsystems von $\delta d_{sys} = -0,156 \text{ mm} \pm 0,024 \text{ mm}$, die auf den Scanner zurückzuführen sind (vgl. Veröffentlichung **E** [Dupuis et al., 2017b]). Diese wurde anhand mehrerer Messreihen in unterschiedlichen Bereichen des Messvolumens bestimmt und bewirkt, dass alle ermittelten Dicken um den genannten Betrag zu groß gemessen werden. Aufgrund der Konstanz dieser Abweichung in unterschiedlichen Messreihen in verschiedenen Bereichen des Messvolumens ist sie bei allen folgenden Ergebnissen und Analysen bereits rechnerisch berücksichtigt.

Tabelle 6.2 zeigt die Ergebnisse des Soll-Ist Vergleichs zweier Messreihen einer Lehre mit einer nominalen Dicke von $d_{soll} = 0,3 \text{ mm} \pm 0,012 \text{ mm}(mpe)$ mit geringer und starker Variation der Armpose.

Tabelle 6.2: Abweichungen der mit dem Gesamtsystem ermittelten Dicke im Vergleich zur Solldicke der Lehre.

geringe Armbewegung		starke Armbewegung	
Soll - Ist	Standardabw.	Soll - Ist	Standardabw.
$\Delta d = -0,006 \text{ mm}$	$\sigma_{\Delta d} = 0,025 \text{ mm}$	$\Delta d = 0,026 \text{ mm}$	$\sigma_{\Delta d} = 0,032 \text{ mm}$

Dabei zeigt sich, dass, wie bei den taktilen Messungen (vgl. Tabelle 6.1), sowohl die Abweichung vom Soll als auch die Streuung der Messreihe bei geringer Armbewegung geringfügig kleiner ausfallen. Das Experiment kann somit belegen, dass durch Anpassung des Messaufbaus und der Messstrategie eine Steigerung der Messgenauigkeit möglich ist. Es ist jedoch auch ersichtlich, dass auch im Falle einer geringen Variation der Armpose während der Messung die Standardabweichung der Dicke größer ist als bei den taktilen Messungen. Diese, durch den Scanner verursachte Messunsicherheit gilt es wie folgt bei der Dickenbestimmung zu berücksichtigen.

Betrachtet man in diesem Zusammenhang die einzelnen gescannten Ebenen im Detail, so zeigt sich, dass die Messpunkte mit einer Standardabweichung von $\sigma_E = 0,021 \text{ mm}$ um die ausgeglichene Ebene streuen. Für eine Bestimmung der Dicke ist es notwendig, dass sich die Punktwolken beider Seiten mit statistischer Sicherheit trennen lassen. Unter Annahme einer Irrtumswahrscheinlichkeit von 5% und unter Berücksichtigung der Genauigkeit der empirisch bestimmten systematischen Messabweichung δd_{sys} in

Veröffentlichung **E** [Dupuis et al., 2017b], ergibt sich nach Anwendung des Varianzfortpflanzungsgesetzes für die Dicke

$$d = \| \mathbf{P}_{\text{Oberseite}} - \mathbf{P}_{\text{Unterseite}} \| + \delta d_{\text{sys}}, \quad (6.1)$$

wobei $\mathbf{P}_{\text{Oberseite}}$ und $\mathbf{P}_{\text{Unterseite}}$ korrespondierende Punkte der beiden Punktwolken darstellen, eine Dicke von $d = 0,074 \text{ mm}$, die sich mit statistischer Sicherheit bestimmen lässt.

Die Länge der verwendeten Lehren beträgt rund 70 mm , wobei die getroffenen Aussagen auch für längere Proben gelten. Dabei muss lediglich gewährleistet sein, dass der Vektor, der die Dicke beschreibt, tangential zum Messarm ausgerichtet ist, sodass korrespondierende Punkte oder Regionen in der Punktwolke mit möglichst ähnlicher Armpose messbar sind.

6.4 Ermittlung der Blattdicke bei Nutzpflanzen

Die vorangegangenen empirischen Untersuchungen zur Messgenauigkeit des Gesamtsystems konnten belegen, dass das Messsystem prinzipiell in der Lage ist, Dicken im Bereich $d > 0,074 \text{ mm}$ mit statistischer Sicherheit zu bestimmen. Die Untersuchungen der Abschnitte 5.2 und 5.3 weisen jedoch darauf hin, dass durch den Eindringeffekt in Kombination mit einem erhöhtem Messrauschen eine genaue Blattdickenbestimmung trotzdem nicht möglich ist. Um diese Aussagen zu verifizieren und die Charakteristik einer Blattdickenmessung mit einem präzisen Nahbereichslaserscanningsystem darzustellen, werden Scans an den drei Nutzpflanzentypen Weizen (*Triticum aestivum* L.), Weinrebe (*Vitis vinifera* L.) und Zuckerrübe (*Beta vulgaris* L.) durchgeführt, ausgewertet und mit manuellen Messungen mit einem Bügelmikrometer verglichen. Die Messungen des Bügelmikrometers dienen dabei nicht als Referenzwerte sondern lediglich als Vergleichswerte, da sie aufgrund der Messkraft tendenziell zu klein und nicht von übergeordneter Genauigkeit sind. Alternative Methoden, wie bspw. die Analyse von Querschnitten der Blätter unter einem Mikroskop, bedürften einer aufwändigen Präparation der Blätter, wie bspw. Dehydrieren und fixieren in Harz [Mahlein et al., 2012], wodurch ebenfalls die Blattdicke in unbekannter Weise beeinflusst wird.

Alle Messungen erfolgen mithilfe des in Abbildung 6.1 dargestellten Messaufbaus und werden über einen Punkt-zu-Mesh Vergleich ausgewertet (vgl. Veröffentlichung **E** [Dupuis et al., 2017b]). Zur besseren Vergleichbarkeit der taktile erfassten und aus dem Scan abgeleiteten Werte erfolgt eine Mittelung der Blattdicken des Scanners auf einer Kreisfläche, die dem Durchmesser des Messfühlers des Bügelmikrometers entspricht.



Abbildung 6.3: Erzeugung von Vergleichswerten für die Blattdicke mit einem Bügelmikrometer. Die roten Punkte markieren die gewählten Messstellen.

Ergebnisse der Weizenblätter

Abbildung 6.4 zeigt exemplarisch das Ergebnis einer Blattdickenbestimmung eines Weizenblattes. Anhand der Farbgebung und des Histogramms lässt sich erkennen, dass die mittlere Blattdicke im Bereich von

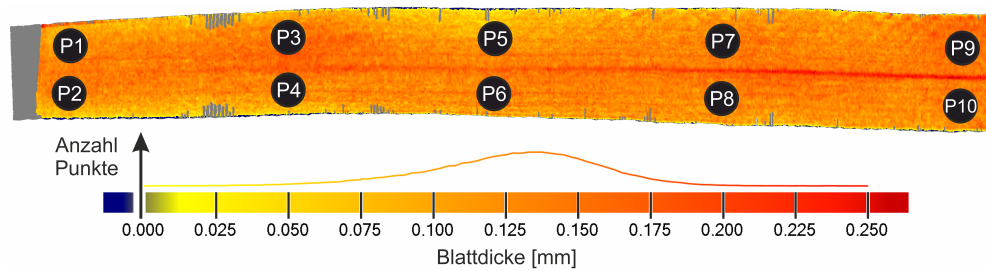


Abbildung 6.4: Über die Dickenwerte farbcodierte Punktwolke der Oberseite eines Weizenblatts. Die graue Fläche stellt die Vermaschung der Punktwolke der Unterseite dar.

Tabelle 6.3: Vergleich der invasiven Dickenmessungen mit den Ergebnissen des Laserscannings des Weizenblattes auf Abbildung 6.4. Einheit: [mm].

Methode	P1	P2	P3	P4	P5	P6	P7	P8	P9	P10
Bügelmikrometer	0,160	0,160	0,160	0,170	0,170	0,180	0,180	0,190	0,200	0,200
Laserscanner	0,117	0,100	0,128	0,113	0,063	0,111	0,111	0,123	0,117	0,133
Differenz	0,043	0,060	0,032	0,057	0,107	0,069	0,069	0,067	0,083	0,067

0,13 mm liegt. Vergleicht man die mit dem Laserscanner ermittelte Blattdicke mit der taktilen Messung (Tabelle 6.3), so zeigt sich, dass die gescannte Blattdicke durchweg kleiner ist. Für den gesamten Datensatz (10 Blätter zu je 5 Wiederholungsmessungen) ergibt sich eine gemittelte systematische Abweichung zu den taktilen Messungen von $\Delta d_{Weizen} = 0,068 \text{ mm} \pm 0,015 \text{ mm} (1\sigma)$. Gemessen an der Standardabweichung ist diese systematische Abweichung bei Weizenblättern konstant, wodurch sich relative Änderungen der Blattstärken aufdecken lassen. So zeigt sich anhand der Farbgebung sowie der Messwerte in Tabelle 6.3, dass die Blattstärke leicht zur linken Seite hin, sprich in Richtung Blattspitze, abnimmt.

Ergebnisse der Weinrebenblätter

Im Gegensatz zu den Weizenblättern zeigt sich die ermittelte Blattstärke bei Weinblättern weniger homogen (vgl. Tabelle 6.4). Es ist deutlich erkennbar, dass die blau eingefärbten Bereiche des Blattes negative Werte für die Blattstärke aufweisen (Abbildung 6.5 links). Da die manuell erfasste Blattstärke in diesen Bereichen nicht in gleichem Maße schwankt, scheint dieser Effekt auf die optische Messmethode zurückzuführen zu sein. Abbildung 6.5 rechts zeigt die eingefärbte Punktwolke des gleichen Blattes, gescannt im Abstand von ca. 10 min. Es ist deutlich zu erkennen, dass sich die ermittelte Blattstärke insbesondere in dem unteren und dem oberen Bereich des Blattes verändert hat. Der Grund dafür ist eine Veränderung der Aufnahmegeometrie. Durch das Abtrennen des Blattes von der Pflanze fängt dieses an zu welken und die Ränder beginnen sich zu wölben. Dies wiederum führt zu einer veränderten Aufnahmegeometrie des Scanners, sprich des Auftreffwinkels β des Lasers auf die Blattoberfläche, was seinerseits die Blattstärke beeinflusst.

Tabelle 6.4: Vergleich der invasiven Dickenmessungen mit den Ergebnissen des Laserscannings des Weinblattes aus Abbildung 6.5. Einheit: [mm].

Methode	P1	P2	P3	P4	P5	P6	P7	P8
Bügelmikrometer	0,170	0,180	0,180	0,190	0,170	0,190	0,200	0,200
Laserscanner	-0,063	0,023	0,034	0,044	0,046	0,055	0,072	0,005
Differenz	0,233	0,157	0,146	0,146	0,124	0,135	0,128	0,195

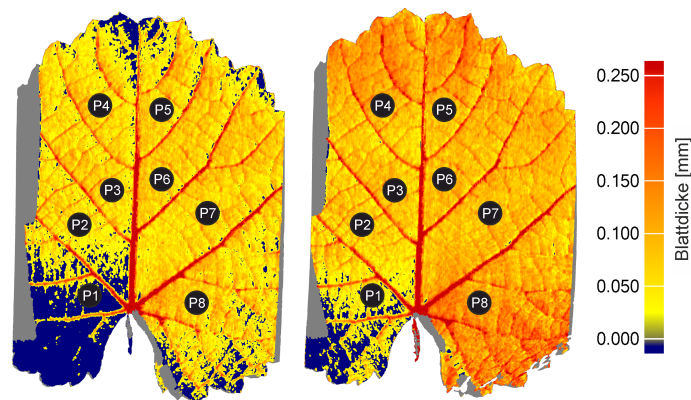


Abbildung 6.5: Mit Dickenwerten eingefärbte Punktwolken eines Weinblatts, gescannt im Abstand von ca. 10 min. Die grauen Flächen stellen die Vermaschungen der Punktwolken der Unterseiten dar.

Ergebnisse der Rübenblätter

Ein ähnlicher Effekt lässt sich auch im Falle der Rübenblätter beobachten. Diese weisen von Natur aus eine stark strukturierte Oberfläche auf, was sich augenscheinlich in der ermittelten Blattdicke widerspiegelt (Abbildung 6.6 rechts). Die Auswertung der Punktwolken ergibt eine Streuung der Blattdicke im Bereich von 0,158 mm bis 0,336 mm, während die manuellen Vergleichsmessungen lediglich im Wertebereich von 0,28 mm bis 0,31 mm variieren (vgl. Tabelle 6.5). Neben der Blattdicke zeigt Abbildung 6.6 links die über den Auftreffwinkel β farbcodierte Punktwolke des Rübenblattes. Der Auftreffwinkel berechnet sich dabei aus der bekannten Position und Orientierung des Scanners im Bezugssystem des Messarms und der Normalenvektoren der Punktwolke (vgl. Veröffentlichung **E** [Dupuis et al., 2017b]). Beim Vergleich der beiden Punktwolken zeigt sich, dass in Bereichen mit positivem Auftreffwinkel (Abbildung 6.6 links, gelb) die ermittelte Blattdicke maximal ist (Abbildung 6.6 rechts, rot). In Bereichen mit negativem Auftreffwinkel (Abbildung 6.6 links, blau) ist die ermittelte Blattdicke hingegen minimal (Abbildung 6.6 rechts, gelb). Da sich dieser Effekt bei allen zehn gescannten Blättern in gleicher Weise zeigt, lässt sich schlussfolgern, dass die Blattdicke maßgeblich durch den Auftreffwinkel beeinflusst wird.

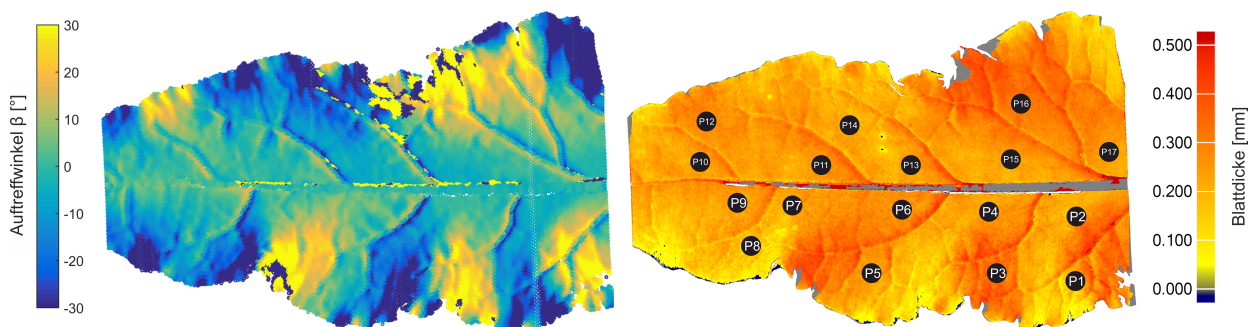


Abbildung 6.6: Vergleich des Auftreffwinkels des Lasers mit den ermittelten Werten für die Blattdicke.

Tabelle 6.5: Vergleich der invasiven Dickenmessungen mit den Ergebnissen des Laserscannings des Rübenblattes aus Abbildung 6.6. Einheit: [mm].

Methode	P1	P2	P3	P4	P5	P6	P7	P8	P9	P10	P11	P12	P13	P14	P15	P16	P17
Bügelmikrometer	0,300	0,300	0,290	0,300	0,310	0,310	0,310	0,290	0,300	0,290	0,300	0,280	0,300	0,290	0,300	0,310	0,290
Laserscanner	0,208	0,215	0,336	0,238	0,238	0,263	0,232	0,158	0,230	0,228	0,245	0,281	0,233	0,206	0,223	0,320	0,233
Differenz	0,092	0,085	-0,046	0,062	0,072	0,047	0,078	0,132	0,070	0,062	0,055	-0,001	0,067	0,084	0,077	-0,010	0,057

6.5 Diskussion der Messergebnisse

Die Ergebnisse der Blattdickenbestimmung im Vergleich zu den manuellen, taktilen Messungen haben gezeigt, dass die ermittelte Blattdicke in fast allen Fällen kleiner war und je nach Blattart größere oder kleinere Streuungen auftreten. Aufgrund der optimierten Messstrategie ($u_{\text{Messarm}}^2 \rightarrow \min$ und $u_{\text{Scanner}}^2 \rightarrow \min$) und den Ergebnissen der empirischen Genauigkeitsuntersuchung des Messsystems lässt sich schlussfolgern, dass die systematische Abweichungen und die Streuung der Blattdicke auf die Unsicherheiten aus der Interaktion von Scanner und Blattoberfläche (u_{Blatt}^2) zurückzuführen sind.

Der Effekt, dass die Blattdicke zu klein gemessen wird, begründet sich dabei durch den Eindringeffekt des Lasers und die damit verbundene zu lange Distanzbestimmung. Im Falle der Weizenblätter stellt sich diese systematische Abweichung als konstant dar, was maßgeblich auf die gleichmäßige Aufnahmegeometrie zurückzuführen ist. Da Weizenblätter von Natur aus über eine geringe Struktur verfügen und diese durch das Abtrennen und Fixieren der Blätter zusätzlich geglättet wird, ändert sich auch der Auftreffwinkel des Lasers auf die Blattoberfläche nur minimal während der Messung.

Anders ist dies bei den Blättern der Zuckerrübe und Weinrebe. Diese haben eine markante Struktur, die sich auch durch die Fixierung der Blätter nicht vollständig glätten lässt. Somit ändert sich sowohl für jede Scanlinie als auch innerhalb einer Scanlinie die Aufnahmegeometrie. Dies spiegelt sich in der ermittelten Blattdicke wider. Wie bereits in Abschnitt 5.3.4 angedeutet, lässt sich dieser Effekt den optischen Eigenschaften der Cuticula zuschreiben. Durch die Veränderung des Auftreffwinkels wird unterschiedlich viel Laserstrahlung von der Cuticula auf die Sensormatrix zurückgeworfen, was sich in einer Veränderung der Intensität manifestiert (vgl. Abbildung 5.17). Dies bewirkt in Folge, dass bei einem positiven Auftreffwinkel β viel Signal von der Cuticula empfangen wird, und die Punktwolke die tatsächliche Blattoberfläche beschreibt, und zu vergleichbaren Messergebnissen wie bei der manuellen Messung führt. Im umgekehrten Fall, d.h. negativem Auftreffwinkel β , wird der Großteil der Laserstrahlung durch die Cuticula von der Sensormatrix weg reflektiert. Die verbleibende Laserstrahlung durchdringt die Cuticula und kehrt in abgeschwächter Form aus tieferen Blattschichten zur Sensormatrix zurück. Dies führt naturgemäß zu kleineren Blattdickenwerten.

Zusammenfassend lässt sich somit festhalten, dass eine genaue Bestimmung der Blattdicke mit dem eingesetzten Nahbereichslaserscanningsystem bei allen drei untersuchten Nutzpflanzenarten nicht möglich ist.

Je nach Fragestellung ist die absolute Dicke aus Sicht der Pflanzenphänotypisierung nur von untergeordnetem Interesse. Möchte man bspw. Unterschiede verschiedener Genotypen einer Pflanzenart aufdecken, genügt theoretisch der relative Blattdickenunterschied. Unter der Annahme einer optimalen Messkonfiguration, identischer Belichtungszeiten, eines konstanten Eindringverhaltens und einer identischen Aufnahmegeometrie ließen sich mithilfe des eingesetzten Messsystems mit Nahbereichslaserscanner relative Unterschiede der Blattdicke theoretisch erfassen. Dem steht jedoch die natürliche Struktur der Blätter entgegen. Diese führt unweigerlich dazu, dass die ermittelte Blattdicke streut und somit keine eindeutige Vergleichbarkeit mehr gegeben ist.

7. Kritik und weiterführende Überlegungen

Der Fokus der vorliegenden Dissertation liegt auf der Beantwortung der Frage, ob es möglich ist, mit einem industriellen Nahbereichslaserscanningsystem, bestehend aus Messarm und Laserlinienscanner, Blätter als Volumenobjekt zu erfassen und die Blattdicke zu bestimmen. Dafür erfolgten messtechnische Untersuchungen sowohl der Einzelkomponenten als auch eine empirische Studie zum Thema Blattdickbestimmung mit dem Gesamtsystem. Dabei ergaben sich an einigen Stellen Besonderheiten der Messsysteme und des Messobjekts. Die folgenden Abschnitte greifen bestimmte Aspekte erneut auf, bewerten diese und betten sie in weiterführende Überlegungen zur Optimierung der Methodik, Messgenauigkeit und Interpretierbarkeit der Ergebnisse ein.

7.1 Weiterentwicklung der Messarmkalibrierung

Der im Rahmen der vorliegenden Dissertation entwickelte Kalibrieransatz für Messarme (vgl. Abschnitt 5.1) konnte seine grundsätzliche Eignung anhand simulierter und realer Messdaten belegen. Trotz der Erwartungstreue des Schätzalgorithmus zeigten sich jedoch im Rahmen unabhängiger Prüfmessungen Restsystematiken, die auf Abweichungen der geschätzten DH-Parameter von der tatsächlichen geometrischen Konstruktion des Messarms zurückzuführen sind und sich insbesondere bei starker Veränderung der Armpose auf die erreichbare Genauigkeit auswirken. Mithilfe der Sensitivitätsanalyse (vgl. Abschnitt 5.1.2) konnte belegt werden, dass der Ausgleichsansatz sensitiv gegenüber kleinen Abweichungen der Sollabstände reagiert. So führten bereits Abweichungen der Sollabstände im Bereich von $\pm 8 \mu\text{m}$, was einer temperaturbedingten Längenausdehnung des Normal bei $\pm 1^\circ\text{C}$ entspricht, bei Verwendung simulierter Beobachtungen (nur weißes Rauschen) zu signifikanten Abweichungen der geschätzten Parameter, wodurch sich ein Teil der Restsystematiken erklären lässt. Alle Kalibriermessungen erfolgten in einem nicht klimatisierten Messlabor, wobei die Raumtemperatur während der gesamten Messung bei $20^\circ\text{C} \pm 1^\circ\text{C}$ lag. Folglich wäre es sinnvoll, die tatsächliche Materialtemperatur des Längennormals während der Messung zu erfassen und in Form einer Korrektur an die Sollabstände des Normals anzubringen und so in die Ausgleichung zu integrieren.

Neben temperaturbedingten Veränderungen der Sollabstände wirken sich auch Antastabweichungen der Kegelbohrungen auf die Genauigkeit der geschätzten Parameter aus. Diese können sowohl in Form einzelner Ausreißer als auch mit systematischem Charakter auftreten. Letztere entstehen dabei meist bei vertikalen Normalpositionen sowie bei außergewöhnlichen Armposen und Tasterorientierungen. Erfolgt der Druck auf die Kegelbohrung nicht von oben, kommt es unter Umständen zu einer kleinen Verschiebung der Tasterkugel in der Kegelbohrung und folglich zu einer systematischen Abweichung von der Sollabstand. Beide Formen von Antastabweichungen wirken sich letztendlich auf die Genauigkeit der DH-Parameter aus. Obwohl der Kalibrierdatensatz im Vorfeld manuell hinsichtlich derartiger Fehlmessungen durchsucht und einzelne Messungen sowie ganze Messpunkte entfernt wurden, ließen sich Antastabweichungen in den Messdaten nicht ausschließen. Mithilfe einer robusten Ausgleichung ließen sich allerdings wenigstens die Ausreißer aus den Messdaten herausfiltern. Dafür könnten mittels der Redundanzanteile (vgl. Abschnitt 5.1.1) normierte Verbesserungen berechnet und die Messungen mit den größten Werten sukzessive aus der Ausgleichung ausgeschlossen werden, vgl. bspw. [Niemeier, 2008].

Weiteres Verbesserungspotential ergibt sich zudem bei der Simulation von Messdaten. Der in Abschnitt 5.1 eingesetzte und in Veröffentlichung **B** [Dupuis et al., 2017a] beschriebene Simulationsalgorithmus nutzt reale Messdaten als Näherungswerte, um das unterbestimmte Gleichungssystem der inversen Kinematik zu lösen. Damit erhält man zwar varianzfreie Beobachtungen für vorgegebene DH-Parameter, die Normalpositionen sind jedoch nicht frei wählbar. Die Konfigurationsanalyse hat offenbart, dass es bestimmte Messpunkte,

Normalpositionen und Armposen gibt, die einen verhältnismäßig höheren Einfluss auf die Schätzung der DH-Parameter haben. Mithilfe einer von realen Messdaten unabhängigen Simulation wäre es folglich möglich, jede beliebige Position und Orientierung des Längennormals im Messvolumen zu simulieren und dessen Einfluss auf die Parameterschätzung zu berechnen, um auf diese Weise die ideale Messkonfiguration zu ermitteln.

Bei Messarmen führt die inverse Kinematik i.d.R. auf ein unterbestimmtes Gleichungssystem. Aus einer gegebenen Position und vorgegebenen DH-Parameter gilt es, die zugehörigen Beobachtungen der Drehwinkelgeber zu berechnen (Inverse von Gleichung (5.1)). Weiterhin gilt es zu beachten, dass die Gelenke 2,4 und 6 (vgl. Abbildung 3.2) jeweils über Endanschläge verfügen und dass der Messablauf einem bestimmten Muster folgt, bei dem das vierte Gelenk von der einen in die andere Extremstellung gebracht wird. Mathematisch führt dies auf ein Optimierungsproblem unter Ungleichungsnebenbedingungen, bei dem die Position des Tasters sowie die Lage des vierten Gelenks im Raum vorgegeben sind.

Das im Rahmen dieser Dissertation verwendete kinematische Modell des Messarms beschreibt diesen lediglich als Funktion der DH-Parameter und der normalverteilten Winkelbeobachtungen. Systematische Messabweichungen der Drehwinkelgeber sowie Deformationen der Armelemente wurden ausgeschlossen. Daher ist nicht auszuschließen, dass die verbleibenden Abweichungen der DH-Parameter teilweise das Resultat einer unzureichenden Modellierung sein könnten. Als Konsequenz ließen sich Funktionen der systematischen Messabweichungen der Drehwinkelgeber, wie bspw. eine Exzentrizität der Rotationsachse oder Kreisteilungsabweichungen (vgl. [Deumlich & Staiger, 2002]), in das funktionale Modell aufnehmen. Dabei ist jedoch zu hinterfragen, inwieweit die Hinzunahme weiterer Parameter lineare Abhängigkeiten erzeugt bzw. bestehende Abhängigkeiten beeinflusst. Dementsprechend wäre vorrangig zu untersuchen, ob die Aufnahme zusätzlicher Parameter aus mathematischer Sicht sinnvoll ist.

7.2 Einschränkungen des kombinierten Messsystems

Wie eingangs von Kapitel 6 beschrieben erfolgt bei der kombinierten Nutzung von Scanner und Messarm ein Übergang auf die Kalibrierung des Herstellers, deren Parameter für den Nutzer nicht zugänglich sind. Dieser Umstand ist der Tatsache geschuldet, dass das Messsystem lediglich 3D-Punkte sowie die Lage und Orientierung des Scanners in seinem Bezugssystem ausgibt, jedoch weder die einzelnen Beobachtungen der Drehwinkelgeber noch die rohen Beobachtungen des Laserscanners. Die empirischen Genauigkeitsuntersuchungen belegen zwar die Übertragbarkeit der Erkenntnisse aus Abschnitt 5.1, dennoch sind die Analysemöglichkeiten eingeschränkt.

Dies machte sich insbesondere bei der in Veröffentlichung **E** [Dupuis et al., 2017b] aufgedeckten systematischen Messabweichung des kombinierten Messsystems bemerkbar (vgl. Abschnitt 6.3). Der Soll-Ist-Vergleich hat gezeigt, dass die ermittelten Dicken der Lehren im Schnitt um $\delta d_{sys} = -0,156 \text{ mm} \pm 0,024 \text{ mm}$ von den Sollmaßen abweichen. Da diese Systematik nur bei Anwendungen mit Scanner auftritt, lässt sich die Systematik diesem zuordnen. Eine mögliche Ursache liegt in der gemeinsamen Kalibrierung von Scanner und Messarm. Dabei wird in einer vorgegebenen Prozedur und unter Verwendung eines Kugelnormals (vgl. [Romer Inc., 2009a]), die Transformationsmatrix zwischen Scanner und Messarm bestimmt (vgl. „hand-eye“ Kalibrierung [Ma & Hu, 2014]). Die Kugel wird dafür aus fünf Richtungen - drei horizontal verteilte Aufnahmen und zwei Aufnahmen von oben - mit jeweils einer Scanlinie erfasst. Die Qualität der Kalibrierung lässt sich lediglich anhand einer mittleren und einer Maximalabweichung bewerten. Eigene Untersuchungen haben gezeigt, dass bei der Schätzung einer Kugel aus wenigen Scanlinien, die lediglich aus einer Richtung aufgenommen wurden, der geschätzte Mittelpunkt in Blickrichtung des Scanners nach hinten verschoben und der Radius zu groß geschätzt wird. Aufgrund der asymmetrischen Verteilung der Aufnahmen - zwei mal von oben, jedoch keine Aufnahme von unten - lässt sich vermuten, dass sich dieser Effekt auch auf die Kalibrierung des Scanners auswirkt. Ohne Zugriff auf die Messdaten des Scanners und die Winkelbeobachtungen des Messarms lässt sich diese Aussage jedoch nicht endgültig verifizieren und bedarf weiterer Untersuchungen bzw., bei Bewahrheitung, der Entwicklung einer alternativen Kalibrierprozedur.

7.3 Optimierte Nutzung von Nahbereichslaserscannern zum Pflanzenmonitoring

Die messtechnischen Untersuchungen der Laserscanner bei deren Einsatz auf Blattoberflächen konnten darlegen, dass die verschiedenen Laserfarben (rot: 658 nm; blau: 405 nm) unterschiedlich von der Blattoberfläche beeinflusst werden. So zeigte der Scanner mit rotem Laser ein messbares Eindringverhalten, was wiederum die gemessene Signalintensität und somit auch die Genauigkeit der resultierenden Punktwolke beeinflusste. Die Intensität des empfangenen Signals hängt dabei von den Faktoren Laserleistung, Belichtungszeit, Chlorophyllgehalt und Auftreffwinkel des Lasers auf die Blattoberfläche ab (vgl. Abschnitt 5.3). Anders zeigte sich das Verhalten des Scanners mit blauem Laser. Dieser verfügt über einen deutlich kleineren nicht signifikanten Eindringeffekt, wodurch eine höhere geometrische Genauigkeit der Punktwolke erreicht wird. Die Signalintensität ist dabei unbeeinflusst vom Chlorophyllgehalt des Blattes.

Trotz der geringeren geometrischen Genauigkeit des Scanners mit rotem Laser ergab sich durch die Intensität als weitere Messgröße ein höherer Informationsgehalt der Messung. Infolge der messbaren Interaktion zwischen Laser und Chlorophyll zeigten sich physiologische Veränderungen von Blättern, bspw. hervorgerufen durch Alterung oder Krankheit der Pflanze, in der Intensität des empfangenen Lasersignals (vgl. Abbildung 5.16). Abseits der Genauigkeitsanalyse eröffnet die Auswertung der Signalintensität damit Wege für die Phänotypisierung in Form einer Detektion von Blattveränderungen oder Blattkrankheiten (vgl. dazu Veröffentlichung **D**).

Die unterschiedliche Interaktion verschiedener Laserfarben mit der Blattoberfläche spricht für eine gemeinsame Nutzung mehrerer Laserfarben in einem Messsystem, wie bspw. vorgestellt von Wei et al. [2012] und Strothmann et al. [2014, 2017]. Durch die Nutzung kurzer und langer Wellenlängen des Lasers lässt sich eine kombinierte Punktwolke mit hoher geometrischer Genauigkeit und zusätzlichem Informationsgehalt erzeugen. Zu beachten ist dabei jedoch ebenfalls die beschriebene Abhängigkeit der Intensität vom Auftreffwinkel des Lasers auf die Blattoberfläche. Für eine eindeutige Interpretation bedarf es daher zunächst einer radiometrischen Korrektur der Intensität in Abhängigkeit des Auftreffwinkels. Ein gängiger Ansatz zur Beschreibung der geometrieabhängigen Reflektanz einer Oberfläche ist die „bidirectional reflectance distribution function“ (BRDF), zu Deutsch „bidirektionale Reflektanzverteilungsfunktion“ [Bousquet et al., 2005]. Diese beschreibt das Verhältnis von einfallendem zu zurückgestreutem Signal eines Objekts in Abhängigkeit der Wellenlänge, der Einfallrichtung des Lasers und der Beobachtungsrichtung. Eine direkte Ableitung der BRDF aus Scannermessungen ist jedoch nicht realisierbar, da zum Einen die Menge der empfangenen Laserstrahlung von der Belichtungszeit der Sensormatrix abhängt und zum Anderen sowohl eine präzise Solllösung für die Geometrie als auch für die Verteilung des Chlorophylls im Blatt fehlen. Inwieweit vorhandene Funktionen ggf. teilweise auf die Messung mit einem Laserscanner übertragbar sind, gilt es daher zu untersuchen.

Stehen weder alternative Laserfarben noch Korrekturfunktionen zur Verfügung, wie es bei dem eingesetzten Nahbereichslaserscanningsystem der Fall ist, könnte gleichwohl durch geschickte Anpassung der Messstrategie und Berücksichtigung der Aufnahmegeometrie eine Verbesserung der Genauigkeit einer Blattdickenmessung erreichbar sein. Die Ergebnisse in Abbildung 6.6 haben gezeigt, dass unter bestimmten Auftreffwinkeln die Blattdicke in gleicher Größenordnung oder sogar oberhalb der invasiven Messung lag. Bei diesen Konstellationen wird der Großteil des einfallenden Laserlichts an der Cuticula in Richtung der Empfangsoptik des Scanners reflektiert. Das ausgewertete Signal entspricht somit der Blattoberfläche, was folglich zu einem minimierten Eindringeffekt führt. Erfasst man die Blattoberfläche mehrfach aus verschiedenen Aufnahmerichtungen, d.h. unter verschiedenen Auftreffwinkeln der Laserebene, lassen sich ggf. Bereiche mit „guter“ Aufnahmegeometrie herausfiltern und isoliert auswerten. Dabei gilt es jedoch darauf zu achten, die Armpose für alle Scans so wenig wie möglich zu verändern, da ansonsten systematische Abweichungen des Messarms das Ergebnis beeinflussen. Das Verfahren könnte man in Anlehnung an die vom GPS bekannte Elevationsmaske als Auftreffwinkelmaske bezeichnen, bei der nur Regionen mit definierter Aufnahmegeometrie ausgewertet werden.

8. Fazit und Ausblick

Die vorliegende Dissertation beschreibt die Genauigkeitsuntersuchung eines Nahbereichslaserscanningsystems. Im Fokus steht dabei die Beantwortung der Fragestellung:

„Ist es möglich, mit einem Messsystem bestehend aus Gelenkmessarm und Laserlinienscanner Blätter als Volumenobjekt zu erfassen und die Blattdicke zu messen?“

Sowohl die Untersuchungen der Einzelsensoren als auch die empirische Untersuchung der Blattdickenbestimmung mit dem kombinierten Messsystem können letztlich belegen, dass diese Frage grundsätzlich mit „Nein“ zu beantworten ist. Mit Blick auf die in der Zielsetzung aufgeworfenen Fragen lassen sich die folgenden Aspekte für die Messunsicherheiten der Einzelsensoren besonders hervorheben:

1. Messunsicherheiten der Systemkomponente Messarm

Mithilfe des neu entwickelten Kalibrieransatzes lässt sich belegen, dass die geschätzten DH-Parameter nicht der tatsächlichen geometrischen Konstruktion des Messarms entsprechen. Obwohl der Messarm nach der Kalibrierung innerhalb der Genauigkeitsspezifikation des Herstellers arbeitet, zeigen sich bei starker Veränderung der Armpose systematische Messabweichungen. Für die Blattdickenbestimmung lassen sich durch geschickte Ausrichtung des Messobjekts und Anpassen der Messstrategie diese systematischen Abweichungen minimieren. Die empirischen Genauigkeitsuntersuchungen des Messarms belegen in diesem Zusammenhang, dass dessen Messgenauigkeit unter optimierten Messbedingungen für eine Bestimmung der Blattdicke ausreichend ist.

2. Messunsicherheiten der Systemkomponente Scanner

Die festgestellten Messunsicherheiten bei Laserlinienscannern stammen hauptsächlich aus nicht angepassten Sensoreinstellungen sowie aus der Beschaffenheit der zu messenden Oberfläche.

Die maßgebliche Stellgröße bei den Sensoreinstellungen ist die Belichtungszeit der Sensormatrix. Die Untersuchungen haben ergeben, dass zu kurze Belichtungszeiten zu einem erhöhten Messrauschen der Distanzbestimmung führen, und dass das optimale Signal-Rausch-Verhältnis bei einer Intensität der Laserlinie von 92% vorliegt. Demgegenüber führen zu lange Belichtungszeiten zu einer Überbelichtung einzelner Sensorelemente, woraus systematische Messabweichungen der Distanzbestimmung resultieren.

Bezüglich der Objektoberfläche hat sich insbesondere deren Semitransparenz für Laserlinienscanner als problematisch herausgestellt. Das dadurch verursachte Eindringen des Lasers in die Objektstruktur führt auf der einen Seite zu einer systematisch zu langen Distanzmessung und auf der anderen Seite zu erhöhtem Messrauschen.

3. Einfluss der Blattoberfläche auf die Messunsicherheiten des Laserscanners

Aufgrund der besonderen optischen Eigenschaften von Blättern bekommen die unter 2. genannten Aspekte besondere Bedeutung beim Pflanzenmonitoring. Die Untersuchungen der einzelnen Blattschichten und -bestandteile sowie die intensitätsbasierte Analyse von Blattmessungen konnten belegen, dass insbesondere Laser mit einer Wellenlänge im Bereich von 650 nm (rot) in die Blattstruktur eindringen und dort mit dem vorhandenen Chlorophyll interagieren. Dies führt unweigerlich zu einer systematisch zu langen der Distanzbestimmung sowie zu erhöhtem Messrauschen durch die Abschwächung des Messsignals. Zusätzlich zeigte sich, dass ein durch die natürliche Struktur der Blätter veränderter Auftreffwinkel des Lasers zu einem veränderten Reflexionsverhalten der Blattoberfläche führt, wodurch sich sowohl die Intensität als auch der Ursprung der empfangenen Laserlinie verändern.

4. Ergebnisse der empirischen Blattdickenbestimmung

Trotz Berücksichtigung der Messunsicherheiten der Punkte 1.-3. in einem optimierten Messaufbau und einer angepassten Messstrategie zeigten die empirisch ermittelten Blattdicken signifikante Abweichungen im Vergleich zu manuellen Messungen. Dabei wurde die Blattdicke mit dem Nahbereichslaserscanningsystem fast immer zu klein gemessen. Zusätzlich ließen sich starke Variationen der Blattdicke

innerhalb der Blätter feststellen, die im schlechtesten Fall sogar in negativen Blattdickenwerten resultierten. Dies bedeutet, dass die Punktwolke der Blattoberseite unterhalb derer der Blattunterseite liegt. Lediglich im Fall der Weizenblätter zeigte sich die Abweichung zu den Vergleichsmessungen als relativ konstant, was eine Bestimmung relativer Dickenunterschiede ermöglicht.

Zusammenfassend lässt sich daher festhalten, dass die Blattdickenbestimmung mit einem Nahbereichslaserscanningsystem, bestehend aus Messarm und Laserlinienscanner mit rotem Laser, nicht direkt möglich ist. Dabei begrenzen insbesondere die Messunsicherheiten des Laserlinienscanners, verursacht durch die Blattoberfläche, die erreichbare Messgenauigkeit. Insbesondere die systematische Messabweichung, verursacht durch den Eindringeffekt des Lasers, und deren Abhängigkeit vom Auftreffwinkel haben sich letztlich als dominant herausgestellt. Trotz optimierter Messbedingungen und Sensoreinstellungen aller Systemkomponenten war es letztlich nicht möglich, die tatsächliche Blattdicke zu bestimmen.

Im Rahmen dieser Dissertation konnten somit die instrumentellen Genauigkeitsgrenzen von Nahbereichslaserscanningsystemen mit rotem Laser beim Pflanzenmonitoring aufgezeigt werden. Weitere Verbesserungen der Blattdickenbestimmung sind folglich nur mithilfe alternativer Laserfarben (bspw. blau) oder durch Anpassung der Auswertestrategie und -methodik möglich. Bei letzteren gilt es in erster Linie, die Aufnahmegeometrie des Scanners, die sich aus der Geometrie der Oberfläche sowie der Position und Orientierung des Scanners ergibt, in die Auswertung zu integrieren. Im Rahmen der empirischen Blattdickenbestimmung hat sich gezeigt, dass unter bestimmten Auftreffwinkeln der Laserebene die Blattdicke vergleichbare Werte wie der eingesetzte Vergleichssensors liefert. Erfasst man das Blatt unter verschiedenen Aufnahmekonfigurationen und nutzt lediglich die zuvor genannten Regionen, ließe sich ggf. die Blattdicke auch mit Messsystemen mit rotem Laser bestimmen.

Die durchgeführten Untersuchungen erfolgten alle mit dem Ziel der Blattdickenbestimmung, lassen sich jedoch auf beliebige Anwendungen von Messsystemen mit Nahbereichslaserscannern extrapolieren. Die Kalibrierung und die daraus gewonnenen Erkenntnisse für die Messunsicherheiten von Messarmen sind über das Thema dieser Dissertation hinaus allgemein gültig. Dabei gilt, dass bei sehr hohen Genauigkeitsforderungen die Armpose während der Messung so wenig wie möglich zu verändern ist, was durch eine geschickte Positionierung des Messobjekts realisiert werden kann. So gilt es bspw. bei Abstandsbestimmungen, das Messobjekt selbst bzw. den Messarm in Relation zum Messobjekt so zu positionieren, dass die Endpunkte des Abstandvektors möglichst auf einer Höhe und im gleichen Abstand zur Basis des Messarms liegen. Dadurch reduziert sich die Veränderung der Armpose auf ein Minimum, was folglich zu einer hohen Messgenauigkeit führt.

Gleiches gilt für alternative Anwendungen von Laserlinienscannern. Dabei gilt es zu beachten, die Belichtungszeit der Sensormatrix immer auf die jeweilige Objekt Oberfläche anzupassen. Darüber hinaus sollte bei semitransparenten Materialien die systematische Abweichung, verursacht durch den Eindringeffekt des Lasers, beachtet werden. Wenn möglich ist in diesem Fall auf einen Laserscanner mit einer kürzeren Wellenlänge zurückzugreifen, da sich damit der Eindringeffekt deutlich reduzieren und die geometrische Genauigkeit steigern lässt.

Letztlich zeigte sich auch die Intensität als zusätzliches Analysewerkzeug. Über die Analyse der Signalintensität können bspw. Aussagen über die Genauigkeit der Punktwolke sowie über die Beschaffenheiten der Oberfläche getroffen werden. Obwohl die Intensität lediglich ein relatives Maß ist und maßgeblich von der Belichtungszeit abhängt, lassen sich bspw. farbliche oder auch strukturelle Veränderungen der Oberfläche detektieren.

9. Auflistung weiterer Veröffentlichungen

Dieses Kapitel gibt einen Überblick über weitere Veröffentlichungen an denen der Autor dieser Dissertation beteiligt war. Diese stehen entweder nicht in direktem Zusammenhang mit dem behandelten Thema oder stellen lediglich Koauthorschaften dar.

- Paulus, S., Dupuis, J., Mahlein, A.-K., & Kuhlmann, H. (2013). Surface feature based classification of plant organs from 3D laserscanned point clouds for plant phenotyping. *BMC Bioinformatics*, 14(1), 238
- Dupuis, J., Paulus, S., Behmann, J., Plümer, L., & Kuhlmann, H. (2014). A multi-resolution approach for an automated fusion of different low-cost 3D sensors. *Sensors*, 14(4), 7563–7579
- Paulus, S., Schumann, H., Kuhlmann, H., & Léon, J. (2014c). High-precision laser scanning system for capturing 3D plant architecture and analysing growth of cereal plants. *Biosystems Engineering*, 121, 1–11
- Paulus, S., Dupuis, J., Riedel, S., & Kuhlmann, H. (2014a). Automated Analysis of Barley Organs Using 3D Laser Scanning: An Approach for High Throughput Phenotyping. *Sensors*, 14(7), 12670–12686
- Holst, C., Dupuis, J., Paulus, S., & Kuhlmann, H. (2014). Flächenhafte Deformationsanalysen mit terrestrischen und Nahbereichslaserscannern - eine Gegenüberstellung anhand von Beispielen. *Allgemeine Vermessungs Nachrichten*, 7, 260–272
- Behmann, J., Mahlein, A.-K., Paulus, S., Dupuis, J., Kuhlmann, H., Oerke, E.-C., & Plümer, L. (2015). Generation and application of hyperspectral 3D plant models: methods and challenges. *Machine Vision and Applications*, 27(5), 611–624
- Roscher, R., Behmann, J., Mahlein, A.-K., Dupuis, J., Kuhlmann, H., & Plümer, L. (2016). Detection of Disease Symptoms on Hyperspectral {3D} Plant Models. In *ISPRS Annals of Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences* (S. 89–96)

Abbildungsverzeichnis

1.1	Nahbereichslaserscanningsystem bestehend aus ROMER Infinite 2.0 Messarm und Perceptron ScanWorks-V5 Laserlinienscanner	4
1.2	Die Messunsicherheiten der Punktwolke setzen sich aus den Messunsicherheiten der Einzelsensoren sowie Pflanzenoberfläche zusammen.	4
3.1	Grafische Darstellung der Denavit-Hartenberg-Parameter. A) Lage und Orientierung der Bezugssysteme für jedes Gelenk des ROMER Infinite 2.0 und die Armlängen (gelb), B) Nullpunkt des Drehwinkelgebers, C) Exzentrizität und Richtung der Rotationsachse, D) Offset des Tasters. Bildquellen: [Romer Inc., 2008; Tait, 2012] (modifiziert)	12
3.2	Typische 2-2-3 Konfiguration eines Messarms mit den Rotationsachsen bzw. Gelenken 1 bis 7. Bildquelle: [ASME, 2004] (modifiziert).	13
3.3	Abweichungen in x-, y- und z-Richtung einer Einzelpunktmessung von der mittleren Koordinate des Messpunkts, verursacht durch eine Abweichung in Θ_3	13
3.4	Lokales Koordinatensystem zur Beschreibung von Radial-, Tangential- und Vertikalabweichungen	14
3.5	Punkte auf einem ebenen Kreis um die Vertikalachse können mit fast identischer Armpose angetastet werden.	14
3.6	Einzelpunktabweichungen verursacht durch eine Abweichung im DH-Parameter Θ_3 dargestellt im Basis- und punktfesten Bezugssystem. A) Punkt 1 im Basisbezugssystem, B) Punkt 1 im punktfesten Bezugssystem, C) Punkt 2 im Basisbezugssystem, D) Punkt 2 im punktfesten Bezugssystem.	15
3.7	Prinzipskizze des Lichtschnittverfahrens	16
3.8	Messsystem bestehend aus Linearführung und Laserlinienscanner (LLS) in Frontal- (A) und Seitenansicht (B). Dieser Messaufbau kann sowohl mit dem scanCONTROL 2700-100 als auch mit dem gapCONTROL 2911-100 verwendet werden.	16
3.9	A) Querschnitt der Laserlinie mit optimaler Intensitätsverteilung, B) Ausschnitt der Sensormatrix eines Laserlinienscanners unter optimalen Messbedingungen.	17
3.10	Intensitätsverteilung der Laserlinie im Querschnitt bei A) zu kurzer Belichtungszeit und B) zu langer Belichtungszeit.	19
3.11	Ausschnitt der CCD-Matrix bei der Messung einer Marmorebene.	19
3.12	Beschreibung der Aufnahmegeometrie von Laserlinienscannern. links: Scanabstand; mitte: Auftreffwinkel α innerhalb der Laserebene; rechts: Auftreffwinkel β orthogonal zur Laserebene. Bildquelle: [Isheil et al., 2011]	20
3.13	Trichome eines Tomatenblatts (<i>Solanum lycopersicum</i>) in Originalgröße (A) und als mikroskopische Aufnahme (B). Bildquelle: [Balcke et al., 2017] (modifiziert).	21
3.14	Ausschnitt zweier Punktwolken eines Rübenblatts gescannt im Abstand weniger Minuten.	22

3.15	Theoretischer Aufbau eines Blattes und das Reflexionsverhalten eines Blattes: a) einfallendes Laserlicht, b) teilweise Reflexion an der Cuticula, c) Transmission durch die Epidermis, d) Absorption durch Chlorophyll, e) Rückstreuung an Zellwänden, f) vollständige Transmission. Bildquelle: [Paulus et al., 2014b].	23
3.16	Spektrale Charakteristik eines Winterweizenblatts (<i>Triticum aestivum</i> L.) aufgeteilt in Absorption, Reflexion und Transmission. Bildquelle: [Rascher et al., 2010] (modifiziert)	23
4.1	Struktur der vorliegenden Dissertation und Zuordnung der relevanten Veröffentlichungen. . .	25
5.1	Positionen und Ausrichtungen des Längennormals für die simulierten und realen Messdaten. Die Quadranten teilen das gesamte Messvolumen in vier Teilbereiche auf.	34
5.2	Längenmessabweichungen von 17 Prüflängen im Vergleich zum Herstellerlimit	36
5.3	Abweichungen einer Einzelpunktmessung nach der Kalibrierung aufgeteilt in die Achskomponenten	36
5.4	Abweichungen einer Einzelpunktmessung für simulierte Beobachtungen der Sensitivitätsanalyse.	37
5.5	Veränderung der Einflussfaktoren durch Armbewegung. Blau: Variation der Armstellung; Grün: Variation der Tasterorientierung	38
5.6	Mittlere Einflussfaktoren für jeden Messpunkt einer Kalibrierungsmessung	38
5.7	Längenmessabweichungen von 17 Prüflängen im Vergleich zum Herstellerlimit einer Kalibrierung ausschließlich im ersten Quadranten	39
5.8	Standradabweichung der Residuen der Ebenenmessung bei variierender Belichtungszeit der Sensormatrix.	41
5.9	Residuen der Ebenenschätzung einer Punktwolke, die mit zu langer Belichtungszeit aufgezeichnet wurde. Die Punktwolke wurde der Anschaulichkeit halber in die y-z-Ebene rotiert. .	41
5.10	Messaufbau zur Quantifizierung des messbaren Eindringeffekts.	42
5.11	Messaufbau zur Untersuchung der Messbarkeit der Epidermis. A: eine Epidermisschicht, B: zwei Epidermisschichten, C: drei Epidermisschichten	43
5.12	Theoretische Ergebnisse der Epidermismessungen. Die schwarz gestrichelte Linie beschreibt das Ergebnis der Ebenenschätzung. A: Messaufbau, B: Ergebnis ohne messbaren Eindringeffekt, C: Ergebnis mit messbarem Eindringeffekt	43
5.13	Punktwolken der Epidermismessungen beider Laserscanner eingefärbt über die Größe der Residuen der Ebenenschätzung. A und D: eine Epidermis; B und E: zwei Epidermisschichten; C und F: drei Epidermisschichten	44
5.14	Experiment zum Einfluss des Chlorophylls auf Laserscannermessungen. oben: Messobjekt bestehend aus Filterpapier mit unterschiedlichen Chlorophyllkonzentrationen; mitte: Über die Intensität eingefärbte Punktwolke des roten Lasers; unten: Über die Intensität eingefärbte Punktwolke des blauen Lasers	45
5.15	Abnahme der Intensität mit steigender Chlorophyllkonzentration für den roten und blauen Laser.	45
5.16	Blatt einer Strauchkastanie (<i>Aesculus parviflora</i> Walter) mit unterschiedlichen Alterungsgraden. A: RGB-Bild; B: Punktwolke eingefärbt über die Intensität des roten Lasers; C: Punktwolke eingefärbt über die Intensität des blauen Lasers	46

5.17	Punktvolke eines Rübenblattes eingefärbt mit der Intensität (links) und mit dem Auftreffwinkels des Lasers (rechts).	47
6.1	Optimierter Messaufbau zur Erfassung der Blattdicke	50
6.2	Das Endmaß gleich die unterschiedliche Länge von Taster und Laserscanner aus, um ähnliche Messbedingungen zu schaffen.	50
6.3	Erzeugung von Vergleichswerten für die Blattdicke mit einem Bügelmikrometer. Die roten Punkte markieren die gewählten Messstellen.	52
6.4	Über die Dickenwerte farbcodierte Punktvolke der Oberseite eines Weizenblatts. Die graue Fläche stellt die Vermaschung der Punktvolke der Unterseite dar.	53
6.5	Mit Dickenwerten eingefärbte Punktvolken eines Weinblatts, gescannt im Abstand von ca. 10 <i>min</i> . Die grauen Flächen stellen die Vermaschungen der Punktvolken der Unterseiten dar.	54
6.6	Vergleich des Auftreffwinkels des Lasers mit den ermittelten Werten für die Blattdicke.	54

Abkürzungsverzeichnis

KMG Koordinatenmessgerät

CCD charge-coupled device

CMOS complementary metal-oxide-semiconductor

DoF "Degree of Freedom"

GHM Gauß-Helmert Modell

GMM Gauß-Markov Modell

VLBI Very Long Baseline Interferometry

SPAT Single Point Articulation Performance (Test)

DH-Parameter Denavit-Hartenberg-Parameter

DH-Transformation Denavit-Hartenberg-Transformation

BRDF „bidirectional reflectance distribution function“

mpe „maximum permissible error“

JCGM Joint Committee for Guides in Metrology

GUM „Guide to the expression of uncertainty in measurement“

Literaturverzeichnis

- Alenyà, G., Dellen, B., & Torras, C. (2011). 3D modelling of leaves from color and ToF data for robotized plant measuring. In *Proceedings - IEEE International Conference on Robotics and Automation* (S. 3408–3414).
- ASME (2004). B89.4.22 - 2004: Methods for Performance Evaluation of Articulated Arm Coordinate Measuring Machines.
- Balcke, G., Bennewitz, S., Bergau, N., Athmer, B., Henning, A., Majovsky, P., Jiménez-Gómez, J. M., Hoehenwarter, W., & Tissier, A. F. (2017). Multiomics of tomato glandular trichomes reveals distinct features of central carbon metabolism supporting high productivity of specialized metabolites. *The Plant Cell*.
- Barolet, D. (2008). Light-Emitting Diodes (LEDs) in Dermatology. *Seminars in cutaneous medicine and surgery*, 27(4), 227–238.
- Behmann, J., Mahlein, A.-K., Paulus, S., Dupuis, J., Kuhlmann, H., Oerke, E.-C., & Plümer, L. (2015). Generation and application of hyperspectral 3D plant models: methods and challenges. *Machine Vision and Applications*, 27(5), 611–624.
- Bellasio, C., Nedbal, L., Science, E., Change, G., Republic, C., Republic, C., & Street, D. (2012). Computer Reconstruction of Plant Growth and Chlorophyll Fluorescence Emission in Three Spatial Dimensions. *Sensors*, 12, 1052–1071.
- Bi, Z. & Wang, L. (2010). Advances in 3D data acquisition and processing for industrial applications. *Robotics and Computer-Integrated Manufacturing*, 26(5), 403–413.
- Biskup, B. (2009). *Determination of structural parameters of single plants and canopies using 3D techniques*. Dissertation, Heinrich-Heine-Universität Düsseldorf.
- Borm, J.-H. & Meng, C.-H. (1991). Determination of Optimal Measurement Configurations for Robot Calibration Based on Observability Measure. *The International Journal of Robotics Research*, 10(1), 51–63.
- Bousquet, L., Lachéradé, S., Jacquemoud, S., & Moysa, I. (2005). Leaf BRDF measurements and model for specular and diffuse components differentiation. *Remote Sensing of Environment*, 98(2), 201–211.
- Bussemeyer, L., Mentrup, D., Möller, K., Wunder, E., Alheit, K., Hahn, V., Maurer, H. P., Reif, J. C., Würschum, T., Möller, J., Rahe, F., & Ruckelshausen, A. (2013). Breedvision - A multi-sensor platform for non-destructive field-based phenotyping in plant breeding. *Sensors*, 13(3), 2830–2847.
- Businaki, M., Levine, A., & Stevenson, W. H. (1992). Performance Characteristics of Range Sensors utilizing Optical Triangulation. In *Aerospace and Electronics Conference, 1992. NAECON 1992., Proceedings of the IEEE 1992 National*, Vol. 3 (S. 1230–1236).
- Cai, X., Sun, Y., Zhao, Y., Damerow, L., Schulze Lammers, P., Sun, W., Lin, J., Zheng, L., & Tang, Y. (2013). Smart detection of leaf wilting by 3D image processing and 2D Fourier transform. *Computers and Electronics in Agriculture*, 90, 68–75.
- Cheng, W.-l. & Menq, C.-h. (1995). Integrated Laser/CMM System for the Dimensional Inspection of Objects Made of Soft Material. *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, 10, 36–45.
- Daney, D. (2005). Choosing Measurement Poses for Robot Calibration with the Local Convergence Method and Tabu Search. *The International Journal of Robotics Research*, 24(6), 501–518.
- Deumlich, F. & Staiger, R. (2002). *Instrumentenkunde der Vermessungstechnik*. Herbert Wichmann Verlag, Heidelberg, 9. auflage. Auflage.
- DIN EN ISO 10360-12:2014 (2014). Geometrische Produktspezifikation (GPS) - Annahme- und Bestätigungsprüfung für Koordinatenmesssysteme (KMS) - Teil 12: Koordinatenmessgeräte (KMG) mit Gelenkausleger (ISO/DIS 10360-12:2014).
- DIN EN ISO 10360-2:2001 (2001). Normenreihe - Annahmeprüfung und Bestätigungsprüfung für Koordinatenmessgeräte (KMG).
- Donges, A. & Noll, R. (1993). *Lasermesstechnik. Grundlagen und Anwendungen*. Hüthig Verlag, Heidelberg.

- Driel, M. R., Swayze, W., & Potter, S. (1993). Full Pose Calibration Of A Robot Manipulator Using A Coordinate Measuring Machine. *International Journal Advanced Manufacturing Technology*, 8(1), 34–41.
- Dupuis, J., Holst, C., & Kuhlmann, H. (2016). Laser Scanning Based Growth Analysis of Plants as a New Challenge for Deformation Monitoring. *Journal of Applied Geodesy*, 10(1), 37–44.
- Dupuis, J., Holst, C., & Kuhlmann, H. (2017a). Improving the Kinematic Calibration of a Coordinate Measuring Arm using Configuration Analysis. *Precision Engineering*, (Available online 5 May 2017).
- Dupuis, J., Holst, C., & Kuhlmann, H. (2017b). Measuring Leaf Thickness with 3D Close-up Laser Scanners: Possible or not? *Journal of Imaging*, 3(2).
- Dupuis, J. & Kuhlmann, H. (2014). High-Precision Surface Inspection: Uncertainty Evaluation within an Accuracy Range of 15 μ m with Triangulation-based Laser Line Scanners. *Journal of Applied Geodesy*, 8(2), 109–118.
- Dupuis, J., Paulus, S., Behmann, J., Plümer, L., & Kuhlmann, H. (2014). A multi-resolution approach for an automated fusion of different low-cost 3D sensors. *Sensors*, 14(4), 7563–7579.
- Dupuis, J., Paulus, S., Mahlein, A.-K., Kuhlmann, H., & Eichert, T. (2015). The impact of different leaf surface tissues on active 3D laser triangulation measurements. *Photogrammetrie, Fernerkundung, Geoinformation*, 2015(6), 437–447.
- Ehlert, D., Horn, H. J., & Adamek, R. (2008). Measuring crop biomass density by laser triangulation. *Computers and Electronics in Agriculture*, 61(2), 117–125.
- Elatta, A., Gen, L., Zhi, F., & Daoyuan, Y. (2004). An overview of robot calibration. *Information Technology*, 3(1), 74–78.
- Fiorani, F. & Schurr, U. (2013). Future scenarios for plant phenotyping. *Annual review of plant biology*, 64, 267–291.
- Forest, J., Teixidor, J. M., Salvi, J., & Cabruja, E. (2003). A Proposal for Laser Scanners Sub-pixel Accuracy Peak Detector. In *Workshop on European Scientific and Industrial Collaboration* (S. 525–532).
- Förstner, W. (1987). Reliability analysis of parameter estimation in linear models with applications to mensuration problems in computer vision. *Computer Vision, Graphics, and Image Processing*, 40(3), 273–310.
- Furbank, R. T. & Tester, M. (2011). Phenomics - technologies to relieve the phenotyping bottleneck. *Trends in Plant Science*, 16(12), 635–644.
- Furutani, R., Shimojima, K., & Takamasu, K. (2003). Kinematical calibration of articulated CMM using multiple simple artifacts. In *XVII IMEKO World Congress Metrology in the 3rd Millennium* (S. 1798–1801). Dubrovnik, Croatia.
- Furutani, R., Shimojima, K., & Takamasu, K. (2004). Parameter calibration for non-cartesian CMM. *VDI Berichte*, 1860, 317 – 326.
- Gao, G., Wang, W., Lin, K., & Chen, Z. (2009a). Kinematic calibration for articulated arm coordinate measuring machines base on particle swarm optimization. In *2009 Second International Conference on Intelligent Computing Technology and Automation*, Vol. 1 (S. 189–192).
- Gao, G., Wang, W., Lin, K., & Chen, Z. (2009b). Structural parameter identification for articulated ARM coordinate measuring machines. In *2009 International Conference on Measuring Technology and Mechatronics Automation*, Vol. 2 (S. 128–131).
- Gao, G., Zhang, H., Wu, X., & Guo, Y. (2016). Structural Parameter Identification of Articulated Arm Coordinate Measuring Machines. *Mathematical Problems in Engineering*, 2016, 1–10.
- Gilroy, S. (2008). Plant Tropisms. *Current Biology*, 18(7), R275–R277.
- Gordon, B. (2008). *Zur Bestimmung von Messunsicherheiten terrestrischer Laserscanner*. Dissertation, Technischen Universität Darmstadt.
- Hanan, J., Loch, B., & McAleer, T. (2004). Processing laser scanner plant data to extract structural information. In *4th International Workshop on Functional-Structural Plant Models* (S. 9–12). Montpellier.
- Hartenberg, R. S. & Denavit, J. (1955). A kinematic notation for lower-pair mechanisms based on metrics. *Transactions of the ASME. Journal of Applied Mechanics*, 22, 215–221.
- Hecht, E. (2014). *Optik*. München: de Gruyter, 6. Auflage.

- Heinz, E., Eling, C., Wieland, M., Klingbeil, L., & Kuhlmann, H. (2015). Development, Calibration and Evaluation of a Portable and Direct Georeferenced Laser Scanning System for Kinematic 3D Mapping. *Journal of Applied Geodesy*, 9(4), 227–243.
- Hering, E. & Martin, R. (2006). *Photonik - Grundlagen, Technologie und Anwendung*. Springer-Verlag Berlin Heidelberg, 1. Auflage.
- Heunecke, O., Kuhlmann, H., Welsch, W., Eichhorn, A., & Neuner, H. (2013). *Auswertung geodätischer Überwachungsmessungen, Handbuch Ingenieurgeodäsie*. Wichmann, Heidelberg, 2. Auflage.
- Hexangon Metrology GmbH (2009). ROMER Infinite 2.0 - Neue Maßstäbe in Ergonomie und Genauigkeit.
- Hoffmann, D. (2004). *Handbuch der Messtechnik*. Carl Hanser Verlag München Wien, 2. Auflage.
- Holst, C. (2015). *Analyse der Konfiguration bei der Approximation ungleichmäßig abgetasteter Oberflächen auf Basis von Nivellements und terrestrischen Laserscans*. Dissertation, Universität Bonn.
- Holst, C., Dupuis, J., Paulus, S., & Kuhlmann, H. (2014). Flächenhafte Deformationsanalysen mit terrestrischen und Nahbereichslaserscannern - eine Gegenüberstellung anhand von Beispielen. *Allgemeine Vermessungs Nachrichten*, 7, 260–272.
- Holst, C. & Kuhlmann, H. (2014). Aiming at self-calibration of terrestrial laser scanners using only one single object and one single scan. *Journal of Applied Geodesy*, 8(4), 295–310.
- Hosoi, F., Nakabayashi, K., & Omasa, K. (2011). 3-D modeling of tomato canopies using a high-resolution portable scanning lidar for extracting structural information. *Sensors*, 11(2), 2166–74.
- Isheil, A., Gonnet, J.-P., Joannic, D., & Fontaine, J.-F. (2011). Systematic error correction of a 3D laser scanning measurement device. *Optics and Lasers in Engineering*, 49(1), 16–24.
- JCGM (2008a). Evaluation of measurement data — Guide to the expression of uncertainty in measurement.
- JCGM (2008b). International vocabulary of metrology - Basic and general concepts and associated terms (VIM).
- Keightley, K. E. & Bawden, G. W. (2010). 3D volumetric modeling of grapevine biomass using Tripod LiDAR. *Computers and Electronics in Agriculture*, 74(2), 305–312.
- Kern, F. (2003). *Automatisierte Modellierung von Bauwerksgeometrien aus 3D-Laserscanner-Daten*. Dissertation, Technische Universität zu Braunschweig.
- Kovač, I. & Frank, A. (1999). Methods For Calibration And Testing Of Flexible Arm Measuring Devices. In V. Chiles & D. Jenkinson (Hrsg.), *Laser Metrology & Machine Performance IV*, Vol. 23 (S. 1–10). WIT Press.
- Kovač, I. & Frank, A. (2001). Testing and calibration of coordinate measuring arms. *Precision Engineering*, 25(2), 90–99.
- Kunzmann, H., Trapet, E., & Wäldele, F. (1990). A Uniform Concept for Calibration, Acceptance Test, and Periodic Inspection of Coordinate Measuring Machines Using Reference Objects. *CIRP annals: manufacturing technology*, 39(1), 561–564.
- Leek, J. (2014). *The application of impact factors to scheduling VLBI Intensive sessions with twin telescopes*. Dissertation, Universität Bonn.
- Li, L., Zhang, Q., & Huang, D. (2014). A review of imaging techniques for plant phenotyping. *Sensors*, 14(11), 20078–20111.
- Light, T. V., Gorlach, I. A., Elizabeth, P., & Wzl, W. (2011). Measuring Arm Calibration. In *Proceedings of the European Computing Conference (ECC '11)* (S. 222–227). Paris, France: WSEAS Press.
- Loch, B. I., Belward, J. A., & Hanan, J. S. (2005). Application of Surface Fitting Techniques for the Representation of Leaf Surfaces. In *International Congress on Modelling and Simulation Advances and Applications for Management and Decision Making* (S. 1272–1278). Melbourne.
- Luhmann, T. (2010). *Nahbereichsphotogrammetrie*. Wichmann Verlag, 3. Auflage.
- Ma, S. & Hu, Z. (2014). Hand-Eye Calibration. In K. Ikeuchi (Hrsg.), *Computer Vision: A Reference Guide* (S. 355–358). Boston, MA: Springer US.
- Mahlein, A.-K. (2015). Plant Disease Detection by Imaging Sensors - Parallels and Specific Demands for Precision Agriculture and Plant Phenotyping. *Plant Disease*, 100(1), 1–5.

- Mahlein, A.-K., Oerke, E.-C., Steiner, U., & Dehne, H.-W. (2012). Recent advances in sensing plant diseases for precision crop protection. *European Journal of Plant Pathology*, 133(1), 197–209.
- Marquardt, D. W. (1963). An algorithm for least-squares estimation of nonlinear parameters. *Journal of the society for Industrial and Applied Mathematics*, 11(2), 431–441.
- Meschede, D. (2008). *Optik, Licht und Laser*. Vieweg + Teubner, Wiesbaden, 3. Auflage.
- Mikhail, E. (1976). *Observations and least squares*. IEP-A Dun-Donnelley Publisher.
- Muralikrishnan, B., Ren, W., Everett, D., Stanfield, E., & Doiron, T. (2012). Performance evaluation experiments on a laser spot triangulation probe. *Measurement*, 45(3), 333–343.
- Næsset, E. & Bjercknes, K.-O. (2001). Estimating tree heights and number of stems in young forest stands using airborne laser scanner data. *Remote Sensing of Environment*, 78(3), 328–340.
- Naidu, D. K. & Fisher, R. B. (1996). A Comparative Analysis of Algorithms for Determining the Peak Position of a Stripe to Sub-pixel Accuracy. *Image Technology, Advances in Image Processing, Multimedia and Machine Vision*, (S. 385–404).
- Niemeier, W. (2008). *Ausgleichsrechnung - Statistische Auswertemethoden*. de Gruyter, 2. Auflage.
- Nubiola, A. & Bonev, I. A. (2013). Absolute calibration of an ABB IRB 1600 robot using a laser tracker. *Robotics and Computer-Integrated Manufacturing*, 29(1), 236–245.
- Ostrowska, K., Gaska, A., & Śladek, J. (2014). Determining the uncertainty of measurement with the use of a Virtual Coordinate Measuring Arm. *International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, 71(1-4), 529–537.
- Paulus, S. (2017). *Potentiale von Laserscannern zur Phänotypisierung von Pflanzen für den Einsatz im Hochdurchsatz-Screening*. Dissertation, Universität Bonn.
- Paulus, S., Dupuis, J., Mahlein, A.-K., & Kuhlmann, H. (2013). Surface feature based classification of plant organs from 3D laserscanned point clouds for plant phenotyping. *BMC Bioinformatics*, 14(1), 238.
- Paulus, S., Dupuis, J., Riedel, S., & Kuhlmann, H. (2014a). Automated Analysis of Barley Organs Using 3D Laser Scanning: An Approach for High Throughput Phenotyping. *Sensors*, 14(7), 12670–12686.
- Paulus, S., Eichert, T., Goldbach, H. E., & Kuhlmann, H. (2014b). Limits of Active Laser Triangulation as an Instrument for High Precision Plant Imaging. *Sensors*, 14(2), 2489–2509.
- Paulus, S., Schumann, H., Kuhlmann, H., & Léon, J. (2014c). High-precision laser scanning system for capturing 3D plant architecture and analysing growth of cereal plants. *Biosystems Engineering*, 121, 1–11.
- Peltonen-Sainio, P., Jauhainen, L., Trnka, M., Olesen, J. E., Calanca, P., Eckersten, H., Eitzinger, J., Gobin, A., Kersebaum, K. C., Kozyra, J., Kumar, S., Dalla Marta, A., Micale, F., Schaap, B., Seguin, B., Skjelvag, A. O., & Orlandini, S. (2010). Coincidence of variation in yield and climate in Europe. *Agriculture, Ecosystems and Environment*, 139(4), 483–489.
- Perceptron Inc. (2006). Perceptron ScanWorks-V5 datasheet.
- Phillips, R. L. (2010). Mobilizing science to break yield barriers. *Crop Science*, 50(Suppl1), 99–108.
- Rascher, U., Damm, A., Linden, S. V. D., Okujeni, A., Pieruschka, R., Schickling, A., & Hostert, P. (2010). Sensing of photosynthetic activity of crops. In *Precision Crop Protection - the Challenge and Use of Heterogeneity* (S. 87–99). Springer Netherlands.
- Romer Inc. (2008). Romer / Cimcore Product Data Sheet, Infinite 2.0 7th Axis Portable Coordinate Measuring Machine.
- Romer Inc. (2009a). Arm Utilities User Guide.
- Romer Inc. (2009b). ROMER Messarme: Mobile KMG für Forschung, Entwicklung, Produktion und Montage.
- Roscher, R., Behmann, J., Mahlein, A.-K., Dupuis, J., Kuhlmann, H., & Plümer, L. (2016). Detection of Disease Symptoms on Hyperspectral {3D} Plant Models. In *ISPRS Annals of Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences* (S. 89–96).
- Roth, Z. S., Mooring, B. W., & Ravani, B. (1987). An Overview of Robot Calibration. *IEEE Journal on Robotics and Automation*, 3(5), 377–385.

- Sansoni, G., Trebeschi, M., & Docchio, F. (2009). State-of-The-Art and Applications of 3D Imaging Sensors in Industry, Cultural Heritage, Medicine, and Criminal Investigation. *Sensors*, 9(1), 568–601.
- Santolaria, J., Aguilar, J. J., Yagüe, J. A., & Pastor, J. (2008). Kinematic parameter estimation technique for calibration and repeatability improvement of articulated arm coordinate measuring machines. *Precision Engineering*, 32(4), 251–268.
- Santolaria, J., Majarena, A. C., Samper, D., Brau, A., & Velázquez, J. (2014). Articulated arm coordinate measuring machine calibration by laser tracker multilateration. *The Scientific World Journal*, 2014, 1–11.
- Schwieger, V. (2005). *Nicht-lineare Sensitivitätsanalyse gezeigt an Beispielen zu bewegten Objekten*. Habilitationsschrift, Universität Stuttgart.
- Sladek, J., Ostrowska, K., & Gaeska, A. (2013). Modeling and identification of errors of coordinate measuring arms with the use of a metrological model. *Measurement*, 46(1), 667–679.
- Spong, M. W., Hutchinson, S., & M., V. (2006). *Robot Modeling and Control*. John Wiley & Sons, New York.
- Strothmann, W., Ruckelshausen, A., & Hertzberg, J. (2014). Multiwavelength laser line profile sensing for agricultural crop characterization. In *SPIE Photonics Europe* (S. 91411K–91411K): International Society for Optics and Photonics.
- Strothmann, W., Ruckelshausen, A., Hertzberg, J., Scholz, C., & Langsenkamp, F. (2017). Plant classification with In-Field-Labeling for crop/weed discrimination using spectral features and 3D surface features from a multi-wavelength laser line profile system. *Computers and Electronics in Agriculture*, 134, 79–93.
- Sultan, I. A. & Puthiyaveetil, P. (2012). Calibration of an articulated CMM using stochastic approximations. *International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, 63(1-4), 201–207.
- Tait, H. (2012). CMM with modular functionality. U.S. Patent No. 8,151,477.
- Teunissen, P. J. G. (2000). *Adjustment Theory: An Introduction*. VSSD, Delft, The Netherlands, 1. Auflage.
- United Nations (Department of Economic and Social Affairs Population Division) (2015). World Population Prospects: Key findings & advanced tables, Revision 2015.
- Van Gestel, N., Cuypers, S., Bleys, P., & Kruth, J.-P. (2009). A performance evaluation test for laser line scanners on CMMs. *Optics and Lasers in Engineering*, 47(3-4), 336–342.
- VDI (2009). VDI/VDE 2617 Part 9, Acceptance and reverification test for articulated arm coordinate measuring machines.
- Vogelmann, T. (1993). Plant Tissue Optics. *Annual Review of Plant Physiology and Plant Molecular Biology*, 44(1), 231–251.
- Vukašinić, N., Bračun, D., Možina, J., & Duhovnik, J. (2010). The influence of incident angle, object colour and distance on CNC laser scanning. *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, 50(1-4), 265–274.
- Vukašinić, N., Bračun, D., Možina, J., & Duhovnik, J. (2011). A new method for defining the measurement-uncertainty model of CNC laser-triangulation scanner. *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, 58(9-12), 1097–1104.
- Vukašinić, N., Možina, J., & Duhovnik, J. (2012). Correlation between Incident Angle, Measurement Distance, Object Colour and the Number of Acquired Points at CNC Laser Scanning. *Strojniški vestnik – Journal of Mechanical Engineering*, 58(1), 23–28.
- Wagner, B., Gärtner, H., Ingensand, H., & Santini, S. (2010). Incorporating 2D tree-ring data in 3D laser scans of coarse-root systems. *Plant and Soil*, 334(1-2), 175–187.
- Weckenmann, A. (2012). *Koordinatenmesstechnik - Flexible Strategien für funktions- und fertigungsge-rechtes Prüfen*. Carl Hanser Verlag München Wien, 2. Auflage.
- Wei, G., Shalei, S., Bo, Z., Shuo, S., Faquan, L., & Xuewu, C. (2012). Multi-wavelength canopy LiDAR for remote sensing of vegetation: Design and system performance. *ISPRS Journal of Photogrammetry and Remote Sensing*, 69, 1–9.
- Weiler, E. & Nover, L. (2008). *Allgemeine und molekulare Botanik*. Georg Thieme Verlag, Stuttgart, New York, 1. Auflage.

- Woschitz, H. & Heister, H. (2015). Überprüfung und Kalibrierung der Messmittel in der Geodäsie. In W. Freeden & R. Rummel (Hrsg.), *Handbuch der Geodäsie* (S. 1–59). Springer Berlin Heidelberg, 1. Auflage.
- Xi, F., Liu, Y., & Feng, H.-Y. (2001). Error Compensation for Three-Dimensional Line Laser Scanning Data. *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, 18(3), 211–216.