

Genauigkeitsuntersuchungen zum Einsatz
einer Time of Flight Kamera für die
Vermessung von
Grundstücksentwässerungsanlagen

Der Fakultät für Bauingenieurwesen und Umweltwissenschaften der
Universität der Bundeswehr München
zur Erlangung des akademischen Grades eines

Dr.-Ing.

eingereichte Dissertation

von

Dipl.-Ing. Philipp Striegl

Promotionsausschuss:

- Vorsitzender: Univ.-Prof. Dr.-Ing. Wilhelm Caspary
1. Berichterstatter: Univ.-Prof. Dr.-Ing. Wolfgang Reinhardt
2. Berichterstatter: Univ.-Prof. Dr.-Ing. Otto Heunecke
3. Berichterstatter: Univ.-Prof. Dr.-Ing. Thomas Wunderlich

Tag der Prüfung: 25.10.2016

Neubiberg, November 2016

Zusammenfassung

Aus undichten Kanalisationssystemen austretende Abwässer können eine große Gefahr für Mensch und Umwelt darstellen. Aus diesem Grund müssen die Abwassersysteme inspiziert und Schäden repariert werden. Dies betrifft auch die Abwassersysteme, die die Gebäude mit den Hauptkanälen verbinden, die sogenannten Grundstücksentwässerungsanlagen (GEA). Schäden in GEA können mit Hilfe hochtechnisierter TV-Rohrinspektionseinheiten lokalisiert und behoben werden. Da oftmals keine Pläne über den Verlauf der GEA existieren, ist der Einsatz von speziellen Inspektionssystemen hilfreich, die neben der Inspektion den meist unbekanntesten Verlauf des Rohrsystems in Lage und Höhe vermessen, um Schäden punktuell und dadurch zeit- und kostensparend reparieren zu können.

Bei der Vermessung von GEA können Schwimmwinkel der Inspektionseinheit bezüglich der mittleren Rohrachse auftreten. Diese führen zu einer Verringerung der Genauigkeit bei der Vermessung des Verlaufs von GEA.

Der Einsatz von Time of Flight Kameras (ToF-Kamera) bietet prinzipiell die Möglichkeit, Informationen über das Vorliegen von Schwimmwinkeln zu gewinnen.

Zur Bestimmung von Schwimmwinkeln aus den Aufnahmen einer ToF Kamera werden die Verfahren RANdom SAMple Consensus (RANSAC), Hough-Transformation sowie ein speziell für den Anwendungsfall entwickelte, Verfahren, das 2D Zylinder-Fitting eingesetzt. Das Ziel ist eine Aussage über die mögliche Genauigkeit zu erhalten, mit der diese Verfahren Schwimmwinkel aus Aufnahmen einer ToF-Kamera bestimmen können.

Spezielle Charakteristika bei Aufnahmen im Rohr, bedingt durch den Einfluss von Mehrwegeeffekten oder der Aufnahmeposition der ToF-Kamera, werden vorgestellt und die Auswirkungen auf die Genauigkeit bei der Bestimmung von Schwimmwinkeln untersucht. Die durchgeführten Untersuchungen zeigen, dass die Bestimmung von Schwimmwinkeln, aufgrund des kombinierten Auftretens von Mehrwegeeffekten und asymmetrischen Punktverteilungen, einem systematischen Fehler unterliegt. Entsprechende Korrekturansätze, wie die Korrektur von Mehrwegeeffekten mittels radiometrischer Modelle sowie die Analyse optimaler Aufnahmebereiche werden vorgestellt und bezüglich ihres Verbesserungspotentials bei der Bestimmung von Schwimmwinkeln überprüft. Die Ergebnisse der Untersuchung zeigen, dass das 2D Zylinder-Fitting das zu bevorzugende Verfahren bei der Bestimmung von Schwimmwinkeln im gegebenen Anwendungsfall ist.

Des Weiteren wird untersucht, mit welcher Genauigkeit die Winkel von Bögen direkt aus den Aufnahmen einer ToF-Kamera mittels der Verfahren RANSAC und Hough-Transformation bestimmt werden können. Diese Information kann in zukünftigen Filtermodellen zur Stabilisierung und Verbesserung der Genauigkeit bei der Dokumentation von GEA verwendet werden. Verschiedene Eigenschaften der jeweiligen Aufnahmesituation, die die Auswertung beeinflussen, werden vorgestellt und diskutiert.

Die Untersuchungen bestätigen, dass die direkte Bestimmung von Bogenwinkeln mit den Verfahren grundsätzlich möglich ist. Sind die Winkel der Bögen jedoch zu groß, können keine brauchbaren Ergebnisse mehr gewonnen werden. Die Genauigkeit der Ergebnisse liegt bei beiden Verfahren in einem Größenbereich, der vergleichbar ist mit dem des 2D Zylinder-Fitting bei der Bestimmung von Schwimmwinkeln.

Abstract

Escaping wastewater from leaky sewage networks represent a high risks for humans and the environment. For this reason, these networks have to be inspected and also the existing damages have to be located and repaired. This also applies to house drainage system (HDS), which connects buildings and other facilities with the main sewer.

Damages in HDS can be localized and repaired with TV inspection units. Because of the circumstance that usually there are no available plans of the HDS, the determination of the exact course of the sewage network respectively the position of the damages is not a simple task. To avoid a high amount of work and high costs for the repairing, the use of special inspection systems, which measure the position and height of the HDS, is recommendable. The appearance of an angle of deviation of the inspection unit related to the middle of the tubular axle during the survey of HDS results reduced of the accuracy of the documentation of the sewage network. Information about present angles of deviation may be gathered with the use of Time of Flight Cameras (ToF-Cameras).

Methods like the RANdom SAmple Consensus (RANSAC), the Hough-Transformation and a special method developed for this application, the 2D Cylinder-Fitting, are used to determine angles of deviation in pictures of a ToF-Camera. The objective is to obtain information about the possible accuracy of the determination of angles of deviation by the mentioned methods.

Because of multipath effects or through the special exposure position, pictures in pipes with ToF-Cameras have special characteristics. The influence of these characteristics to the accuracy in determining the angle of deviation is analyzed. The evaluation shows that there is a systematic error because of the combined occurrence of multipath effects and the asymmetric point distributions.

Relevant correction approaches, such as the correction of multipath effects by radiometric models and the analysis of optimal recording regions will be presented and their potential for improvement in determining angles of deviation is analyzed.

The results show that the 2D cylinder fitting is the preferable method for the determination of angles of deviation in the prevailing application.

Furthermore it is examined how accurate angle of curves can be directly determined from the images of a ToF-Camera using the methods RANSAC and Hough-Transformation. This information can be used in future filter models to stabilize and improve the accuracy of the documentation of HDS. Various properties of the recording situation that affect the evaluation are presented and discussed.

The investigations confirm the principle possibility of the direct determination of angles of curves with both methods. If the angles of curves are too large, however no useful results are achievable. The accuracy of the results is with both methods in a corresponding dimension to the determination of angles of deviation with the 2D cylinder fitting.

Inhaltsverzeichnis

1	Einleitung und Motivation	1
1.1	Dokumentation von Grundstücksentwässerungsanlagen (GEA)	2
1.1.1	Aufbau von GEA	2
1.1.2	Kanalinspektion und Kanaldokumentation	3
1.1.3	Stand der Technik bei der Dokumentation	5
1.2	Messtechnische Herausforderungen bei direkten Messverfahren	7
1.2.1	Schwimmwinkel	7
1.2.2	Driftrate des INS	11
1.3	Zielsetzung der Dissertation	12
1.3.1	Konzepte zur Gewinnung von Zusatzinformationen durch Aufnahmen einer ToF-Kamera	14
1.3.2	Genauigkeitsanforderungen im Rahmen des Anwendungsfalls	15
2	Stand der Wissenschaft	17
2.1	Inspektion und Vermessung von Abwasserkanälen	17
2.2	Verfahren zur Extraktion von Kreiszyllindern	19
2.3	Rohrsysteme von Industrieanlagen	22
2.4	Korrektur von Mehrwegeeffekten bei Aufnahmen mit einer ToF-Kamera	23
3	Grundlagen	25
3.1	Eingesetzte Hardware	25
3.1.1	MESA Imaging SR4000	25
3.1.2	Positioniersystem	28
3.2	Verwendete Auswerteverfahren	31
3.2.1	Oberflächennormale	31
3.2.2	RANSAC	34
3.2.3	Hough-Transformation	37

3.2.4	Verfahren zur Korrektur von Mehrwegeffekten	40
4	Konzept zur Bestimmung der äußeren Orientierung	51
4.1	Konzeptioneller Ablauf	51
4.1.1	Bestimmung der Zylinderachse in der Punktwolke	52
4.1.2	Bestimmung der äußeren Orientierung mittels der Zylinderachse . .	53
4.1.3	Transformation der äußeren Orientierung ins lokale Koordinatensystem	54
4.1.4	Genauigkeitsanforderung bei der Bestimmung der äußeren Orientierung	57
4.2	2D Zylinder-Fitting	58
4.3	Eigenschaften von Aufnahmen im Rohr mit der SR4000	63
4.3.1	Verteilung der Messpunkte	63
4.3.2	Aufweitung der Punktwolke aufgrund von Mehrwegeffekten	72
4.3.3	Konsequenzen für die Durchführung der Versuche	77
4.4	Versuchsaufbau und -durchführung	79
4.4.1	Versuchsaufbau	79
4.4.2	Versuchsdurchführung	82
5	Genauigkeitsuntersuchungen zur Bestimmung der äußeren Orientierung	85
5.1	Voruntersuchung zur Bestimmung der äußeren Orientierung mittels simulierter Aufnahmen	89
5.2	Analyse der Genauigkeit bei realen Aufnahmen an der Nullposition	98
5.2.1	Innere Genauigkeit	98
5.2.2	Absolute Genauigkeit	101
5.3	Auswirkung der Änderung der äußeren Orientierung auf die Genauigkeit .	104
5.3.1	Auswirkung von Lagewinkeln auf die Bestimmung der äußeren Orientierung	104
5.3.2	Auswirkung von Lageabweichungen auf die Bestimmung der äußeren Orientierung	113
5.3.3	Auswirkungen von Kombinationen aus Lagewinkel und Lageabweichung auf die Bestimmung der äußeren Orientierung	119
5.4	Zusammenfassung – Bestimmung der äußeren Orientierung	123
6	Korrektur von Mehrwegeffekten bei der Bestimmung der äußeren Orientierung	127
6.1	Erklärungsansatz für das Auftreten systematischer Fehler	127

6.2	Korrektur von Mehrwegeffekten	130
6.2.1	Radiometrische Modelle	132
6.2.2	Voruntersuchung zur Korrektur von Mehrwegeffekten	134
6.3	Ergebnisse der Auswertung mit einer Mehrwegkorrektur	141
6.3.1	Versuche mit Änderung des voreingestellten Lagewinkels	141
6.3.2	Versuche mit Änderung der voreingestellten Lageabweichung	144
6.4	Zusammenfassung – Korrektur von Mehrwegeffekten	147
7	Optimale Aufnahmebereiche bei der Bestimmung der äußeren Orientierung	149
7.1	Optimaler Aufnahmebereich einer Punktwolke	149
7.2	Vorgehen zur Analyse des optimalen Aufnahmebereichs	150
7.3	Ergebnisse der Auswertung mit einer Analyse des optimalen Aufnahmebereichs	152
7.3.1	Versuche mit Änderung des voreingestellten Lagewinkels	152
7.3.2	Versuche mit Änderung der voreingestellten Lageabweichung	156
7.4	Zusammenfassung – Analyse des optimalen Aufnahmebereichs	159
8	Versuche zur Bestimmung der Winkel von Bögen	161
8.1	Einführung	161
8.1.1	Theoretische Überlegungen	162
8.1.2	Konzept zur Bestimmung von Bogenwinkeln	164
8.1.3	Versuchsaufbau	165
8.1.4	Versuchsdurchführung	166
8.2	Ergebnisse	167
8.3	Zusammenfassung – Bestimmung der Winkel von Bögen	171
9	Resümee	173
10	Zukünftige Arbeiten und Ausblick	179
	Literatur	185
	Anhänge	193
A	Simulation	193

B Äußere Orientierung	197
B.1 Änderung des Lagewinkels	197
B.2 Änderung der Lageabweichung	217
B.3 Kombinierte Änderung von Lagewinkel und Lageabweichung	235
C Mehrwegkorrektur	239
C.1 Änderung des Lagewinkels	239
C.2 Änderung der Lageabweichung	245
D Analyse des optimalen Aufnahmebereichs	249
D.1 Änderung des Lagewinkels	249
D.2 Änderung der Lageabweichung	255

Kapitel 1

Einleitung und Motivation

Nachdem der Zustand der öffentlichen Kanalnetze in den letzten Jahren im Fokus der Abwasserbranche gestanden hatte, findet aktuell ein Wandel statt. Die Lage sowie der Zustand des öffentlichen Kanalsystems sind heutzutage weitreichend bekannt. Aufgrund von rechtlichen Bestimmungen durch die Europäische Union (Richtlinie über die Behandlung von kommunalem Abwasser 91/271/EWG) rücken die privaten Kanalnetze, die Gebäude mit den öffentlichen Hauptkanälen verbinden (siehe Abbildung 1.1), in den Interessenbereich der Abwasserbranche. Diese privaten Kanalnetze werden auch als Hausanschlüsse oder Grundstücksentwässerungsanlagen (GEA) bezeichnet. In Fachkreisen wird die Gesamtlänge der GEA in Deutschland auf 1.500.000 Kilometer geschätzt. Experten gehen davon aus, dass unbekannte Schadstellen in diesem Bereich ein großes Risiko für Mensch und Umwelt darstellen können ([Dohmann 1999] und [Bauer et al. 2009]). Aus diesem Grund müssen diese privaten Kanalnetze inspiziert, auftretende Schäden lokalisiert und anschließend nachhaltig saniert werden. Detaillierte Beschreibungen des Aufbaus von Abwasserkanälen, im Speziellen auch von GEA sowie mögliche auftretende Schadensbilder finden sich in [Dohmann 1999].

Um großflächige und kostenintensive Grabungsarbeiten bei den Reparaturen zu vermeiden, sollte die Position der Schadstelle so genau wie möglich bekannt sein. Aus diesem Grund ist es erstrebenswert, während einer Inspektion auch eine Vermessung des Kanalverlaufs in Lage und Höhe durchzuführen. Die Vermessung eines Kanalverlaufs wird im Folgenden auch als Dokumentation bezeichnet.

Von Experten im Bereich der Kanalsanierung wird oftmals eine Lagegenauigkeit von ca. 0,5 m und eine Höhengenaugigkeit von 0,1 m gefordert [Bauer et al. 2009]. Der qualitative Begriff "Genauigkeit" wird in [Bauer et al. 2009] nicht näher definiert. Aus diesem Grund wird angenommen, dass es sich bei diesen Genauigkeitsangaben um eine Standardabweichung

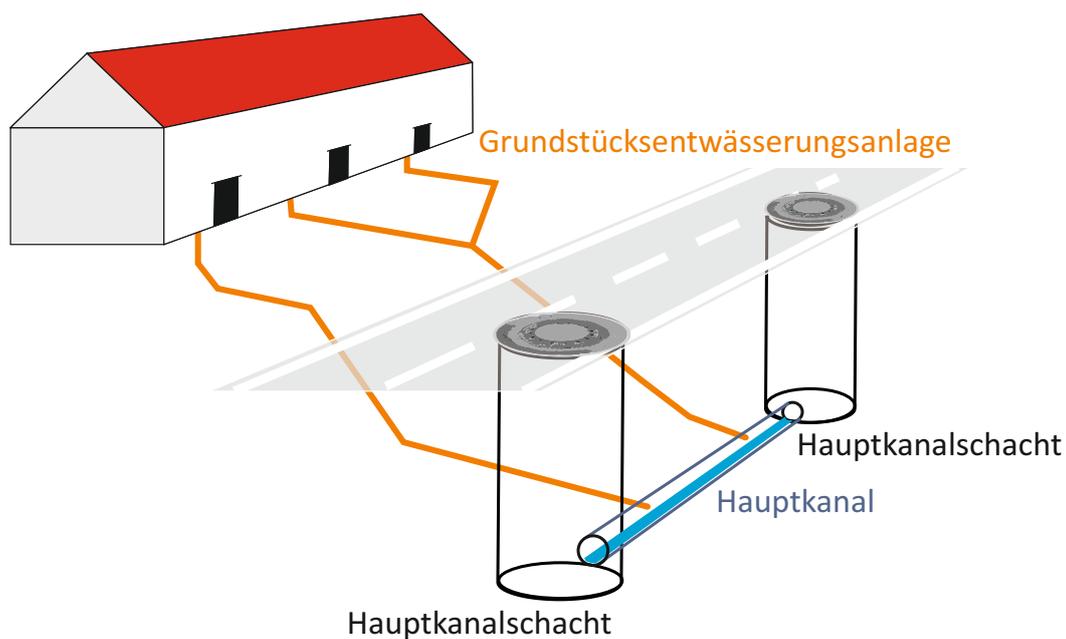


Abbildung 1.1: Schematische Skizze einer einfachen Grundstücksentwässerungsanlage.

chung im Sinne einer Normalverteilung handelt. Das heißt die Wahrscheinlichkeit, dass die Anforderungen eingehalten werden, liegt bei 68,3% .

Die geforderte Genauigkeit stellt eine Herausforderung dar, da es sich bei GEA häufig um komplexe Entwässerungssysteme handelt. Geprägt durch eine Vielzahl an Geraden, Bögen und Abzweigungen sind sie keinesfalls mit den Freispiegelkanälen der öffentlichen Entwässerungsanlagen zu vergleichen.

Die Schwierigkeit bei der Vermessung von GEA liegt vor allem darin, dass diese sich in der Regel im Untergrund befinden und die Rohre mit nur ca. 10-20 cm Durchmesser schwer zugänglich sind [Striegl et al. 2010].

1.1 Dokumentation von Grundstücksentwässerungsanlagen (GEA)

1.1.1 Aufbau von GEA

GEA werden meist aus Kanalgrundrohren, kurz KG-Rohren, zusammengesetzt. Diese bestehen aus nicht-temperaturbeständigem, weichmacherfreiem Polyvinylchlorid (PVC-U). Die Anforderungen für Rohre, Formstücke und das Rohrleitungssystem sowie die Maße und Grenzabmaße sind in der Norm DIN EN 1401-1 [DIN 2009a] festgelegt. Die Anforder-

rungen an die Bauausführung von Abwasserkanälen wird durch die Norm DIN EN 1401-3 [DIN 2009b] geregelt. Die beim Bau von GEA verwendeten genormten Elemente können in zwei verschiedene Kategorien unterteilt werden:

- Rohre (gerade)
- Formstücke
 - Bögen
 - Abzweige
 - Sonderelemente

Laut [DIN 2009a] sind die bevorzugten Nenn-Winkel für Bögen 15° , 30° , 45° , $67^\circ 30'$ oder $87^\circ 30'$ bis 90° und für Abzweige 45° , $67^\circ 30'$ oder $87^\circ 30'$ bis 90° . Abbildung 1.2 zeigt die am häufigsten verwendeten Arten von Elementen bei der Installation einer GEA.

Der Winkel zwischen zwei geraden KG-Rohren entspricht meist aber nicht exakt dem angegebenen Winkel des verwendeten Bogens oder der Abzweigung. Praktische Versuche haben gezeigt, dass der Winkel um mehrere Grade von der Angabe des Bogens abweichen kann. Diese Abweichung entsteht durch das Spiel zwischen den einzelnen Steckelementen beim Zusammensetzen des Rohrsystems.

Laut den Herstellern der KG-Rohre dürfen nur gerade Rohre gekürzt werden. Formstücke dürfen wegen des Risikos des Verlustes an Dichtigkeit nicht bearbeitet werden. Gespräche mit Mitarbeitern von Entwässerungsbetrieben haben aber ergeben, dass in der Praxis oftmals Formstücke verändert werden, um sie entsprechend der örtlichen Gegebenheiten installieren zu können. Es kann somit bei einer Inspektion nicht davon ausgegangen werden, dass nur genormte und unveränderte Formstücke beim Bau einer GEA verwendet werden. Ältere GEA können auch aus anderen Materialien aufgebaut sein. Die in dieser Arbeit durchgeführten Untersuchungen und gewonnenen Erkenntnisse beziehen sich ausschließlich auf GEA, die mit KG-Rohren zusammengesetzt sind.

1.1.2 Kanalinspektion und Kanaldokumentation

Eine Inspektion einer GEA erfolgt meist mittels einer mit einer TV-Kamera ausgestatteten Inspektionseinheit. Dieses Vorgehen wird oft auch als TV-Inspektion bezeichnet. Sie ermöglicht eine ganzheitliche Beurteilung des Zustands bzw. einzelner Schäden einer GEA. Es ist bei einer Inspektion durchaus möglich, den Aufbau einer GEA, also die räumliche Abfolge der verbauten Elemente und der darin befindlichen Schadstellen abzuleiten. Damit kann jedoch nicht der geometrische Verlauf einer GEA, also die Lage der Rohre oder



Abbildung 1.2: Beispiele für typische Elemente einer GEA: Rohr, Abzweig und Bogen.

der Schadstellen bezüglich eines Koordinatensystems bestimmt werden. Dazu wird eine explizite Vermessung einer GEA benötigt. Diese wird, wie schon erwähnt, auch als Dokumentation einer GEA bezeichnet.

Nach [Bauer 2005] bringt die Bestimmung des geometrischen Verlaufs mehrere Vorteile mit sich:

Position von Schadstellen: Die Kenntnis der Lage und Höhe einer GEA ist für eine sachgerechte Sanierungsberatung und Sanierungsplanung unabdingbar. Mit Hilfe einer Vermessung kann die Geometrie einer GEA in einem lokalen oder landesweiten Koordinatensystem erfasst werden. Dies ermöglicht die Positionsbestimmung von markanten Stellen, wie Schadstellen im Leitungsverlauf. Für einzuleitende Sanierungsmaßnahmen ist dies von großem Nutzen. Anhand der gemessenen Koordinaten der Schadstellen können Baumaßnahmen örtlich begrenzt und dadurch kostengünstig durchgeführt werden.

Echtzeitdarstellung des Inspektionsverlaufs: Die Echtzeitdarstellung der aktuellen Position der Inspektionseinheit während einer Dokumentation, beispielsweise auf einer Stadtgrundkarte, sowie die Darstellung des schon erfassten Verlaufs einer GEA, gibt dem Inspekteur eine Orientierungshilfe. Es können somit definierte Arbeitsaufträge, wie die Untersuchung einer Anschlussleitung bis zu einer Grundstücksgrenze oder Hauswand,

ausgeführt werden. Des Weiteren ergibt sich die Möglichkeit, im Rahmen der Inspektion eine Zuordnung von Leitungen zu einem bestimmten Objekt (Grundstück, Haus, Straßenablauf) durchzuführen.

Bestandsdokumentation: Durch die Bestandsdokumentation von GEA besteht die Möglichkeit, die Anschlusskanäle mit in die Planung der öffentlichen Kanalisation einzu beziehen. Insbesondere der Höhenverlauf von Hausanschlussleitungen ist für die Tiefenlage des öffentlichen Kanalsystems verantwortlich. Durch die 3D-Information besteht zum Teil die Möglichkeit, die Tiefenlage eines öffentlichen Kanals nach oben zu korrigieren. Bei notwendigen Baumaßnahmen können so Kosten aufgrund der geringeren Tiefe eingespart werden. Des Weiteren besteht die Möglichkeit, Anfragen von Versorgungsunternehmen hinsichtlich freier Verlegetrassen anhand der vorhandenen Lageinformationen zu beantworten.

Kanalsanierungsplanung: Die ausschlaggebenden Informationen für die Erstellung eines Sanierungskonzepts sind der Zustand und die Lage des Kanals. Diese bilden die Grundlage für technische und wirtschaftliche Entscheidungen. Interessant sind dabei zum Beispiel folgende Fragestellungen: In welcher Tiefe liegt ein Anschlusskanal? Liegt er in der unbefestigten Vorgartenfläche oder in der gepflasterten Garageneinfahrt? Diese Informationen sind bei der Entscheidungsfindung für ein wirtschaftliches Sanierungskonzept unumgänglich. Darüber hinaus können die Kosten bei Erneuerung und/oder Sanierung von gemeinsam genutzten Entwässerungskanälen aufgrund der gewonnenen Kenntnis über die Lage dem jeweiligen Eigentümer zugeordnet werden [Bauer 2005; Striegl et al. 2010].

1.1.3 Stand der Technik bei der Dokumentation

Konventionelle geodätische Messtechniken wie GPS, Tachymetrie oder Laserscanning sind zur Dokumentation von GEA grundsätzlich nicht geeignet. Es ist unmöglich, diese Systeme bei im Untergrund befindlichen, oftmals nur 10-20 cm großen Rohrsystemen einzusetzen. In Deutschland befinden sich zurzeit verschiedene Inspektionssysteme mit unterschiedlichen Vorgehensweisen zur Dokumentation einer GEA in Anwendung. Diese können grob in zwei Kategorien unterteilt werden: Indirekte und direkte Messverfahren. Zu der ersten Kategorie gehören die aktive und passive Magnetfeldortung oder Sonden zur Bestimmung des GEA Verlaufs von der Oberfläche aus [Günthert et al. 2008; Reinhardt et al. 2009].

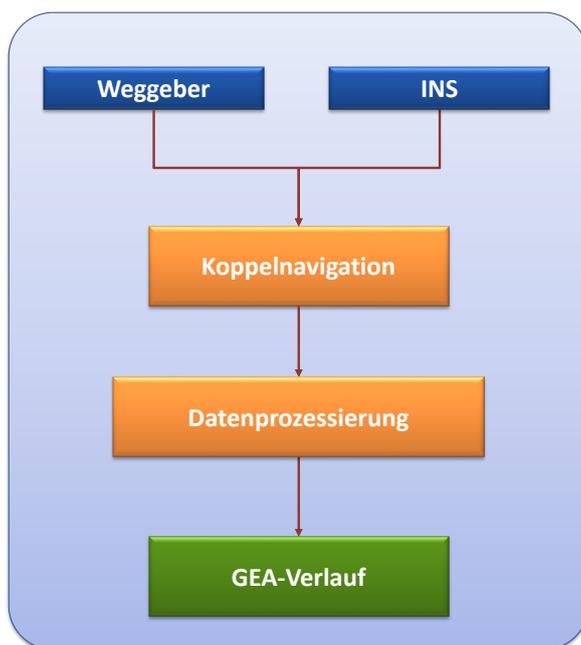


Abbildung 1.3: Schematische Darstellung des Messprozesses von geoASYS

Zu den direkten Messverfahren gehören Systeme, die mittels in der Inspektionseinheit integrierter Sensorik den Verlauf direkt während einer Inspektion dokumentieren. Die direkte Erfassung beinhaltet die Bestimmung der Winkel von Bögen bzw. Abzweigungen sowie die zurückgelegte Wegstrecke. Ein solches Inspektionssystem ist das an der Universität der Bundeswehr München in Zusammenarbeit mit der Firma JT-Elektronik entwickelte System geoASYS. geoASYS ist mit einem Inertialen Navigationssystem (INS) und Odometer (Weggeber oder Wegsensor) ausgestattet und berechnet mittels der Koppelnavigation (engl.: dead reckoning) aus den erfassten Daten den Verlauf einer GEA in Lage und Höhe [Heister et al. 2007].

Die Koppelnavigation ist ein in der Luft- und Schifffahrt bekanntes Navigationsverfahren. Mittels der erfassten Richtungs- und Streckenmessungen kann von einem bekannten Ausgangspunkt aus kontinuierlich die momentane Position berechnet werden [Klußmann et al. 2012]. Eine einfache schematische Darstellung des Messprozesses von geoASYS beinhaltet Abbildung 1.3. Der dazugehörige Formelapparat befindet sich in Abbildung 1.4.

Laborversuche und Praxistests mit geoASYS haben gezeigt, dass eine Systemkonfiguration aus INS und Odometer mit anschließender Datenprozessierung (Filterung etc.) grundsätzlich in der Lage ist, die gestellten Anforderungen an die Genauigkeit (Standardabweichung von 0,5 m in der Lage und 10 cm in der Höhe) der Dokumentation zu erfüllen. Entsprechend der Spezifikation von geoASYS gilt dies für Rohrsysteme mit einer Länge bis zu circa

25-30 m [Heister et al. 2007]. Eine detailliertere Beschreibung der verschiedenen Messverfahren zur Dokumentation von GEA und im Speziellen des Systems geoASYS finden sich in [Reinhardt et al. 2009].

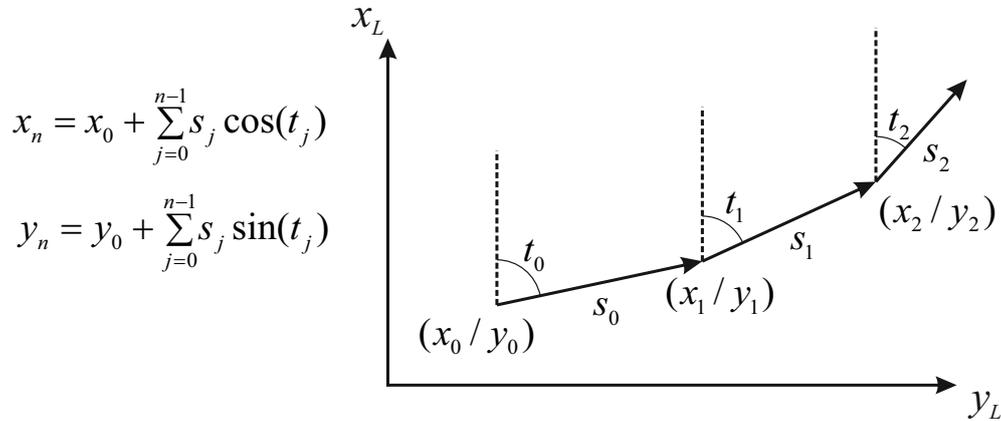


Abbildung 1.4: 2D-Positionsbestimmung mittels der Koppelnavigation in einem lokalen Koordinatensystem (KS_L) ausgehend von einem bekannten Ausgangspunkt und einer bekannten Ausgangsrichtung.

Es hat sich gezeigt, dass mit zunehmender Länge und Komplexität des Rohrsystems die bestehende Systemkonfiguration nicht mehr ausreicht, um den GEA Verlauf mit der geforderten Genauigkeit dokumentieren zu können [Striegl et al. 2010]. Aus diesem Grund muss durch den Einsatz zusätzlicher Sensorik versucht werden, bestehende Herausforderungen bei der Dokumentation von GEA zu beheben. In dieser Arbeit werden die Möglichkeiten zur Verbesserung der Dokumentationsgenauigkeit bei direkten Messverfahren mittels des Einsatzes optischer Messsysteme, hier einer Time of Flight Kamera (ToF-Kamera), untersucht.

1.2 Messtechnische Herausforderungen bei direkten Messverfahren

1.2.1 Schwimmwinkel

Eine der messtechnischen Herausforderungen bei der Dokumentation von GEA sind sogenannte Schwimmwinkel. Diese führen zu Fehlmessungen bei der Dokumentation des Lage- und Höhenverlaufs von GEA.

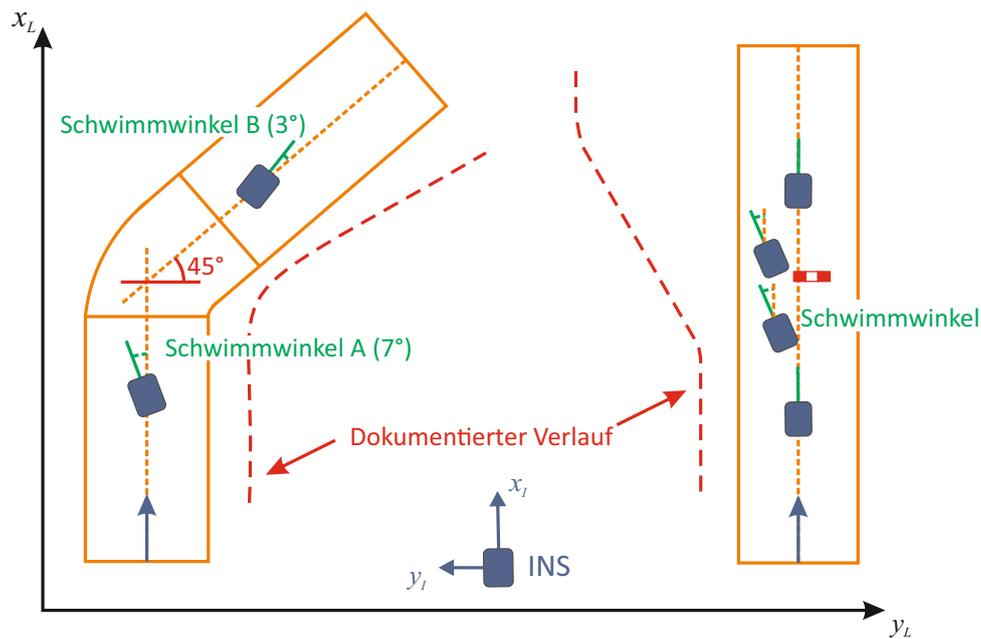


Abbildung 1.5: Schwimmwinkeln bei der Befahrung eines Bogens (links) sowie eines geraden Rohres (rechts).

Bei der Befahrung des Rohrsystems kann es vorkommen, dass sich die im Verhältnis zum Rohrdurchmesser wesentlich kleinere Inspektionseinheit bezüglich der mittleren Rohrachse verdreht. Dies geschieht durch die Umfahrung von Hindernissen oder durch spezielle Manöver des Inspektors (siehe Abbildung 1.5). Die Abweichung der Orientierung der Inspektionseinheit von der mittleren Rohrachse wird als Schwimmwinkel bezeichnet. Dieser wird direkt vom INS erfasst und geht als Fehlmessung in den Messprozess mit ein und beeinflusst somit die Qualität der Dokumentation des Rohrverlaufs. Schwimmwinkel können nicht mit der bestehenden Messkonfiguration erfasst werden. Um sie zu bestimmen, müssen zusätzliche Sensoren, wie beispielsweise eine ToF-Kamera, eingesetzt werden.

Bei einem Schwimmwinkel handelt es sich grundsätzlich um eine Winkelangabe mit Bezug zum lokalen Horizont. Diese lässt sich in den Lageverlauf und Höhenverlauf beeinflussenden Komponenten zerlegen. Die Auswirkungen eines Schwimmwinkels auf den dokumentierten Lageverlauf einer GEA in einem lokalen Koordinatensystem (KS_L) soll kurz demonstriert werden: Wie in Abbildung 1.5 links dargestellt, tritt vor der Befahrung eines 45° Bogens ein Schwimmwinkel A von 7° auf. Dies bedeutet, dass die Inspektionseinheit nicht entlang der mittleren Rohrachse des geraden Rohrelements ausgerichtet ist, sondern um 7° von dieser abweicht. Erfolgt die Befahrung des Bogens, registriert das INS die Richtungsänderungen der Inspektionseinheit. Dabei geht der Schwimmwinkel direkt in die Messung mit ein und führt in diesem Fall zu einer inkorrekten Erhöhung des Bogenwinkels. Dasselbe Problem

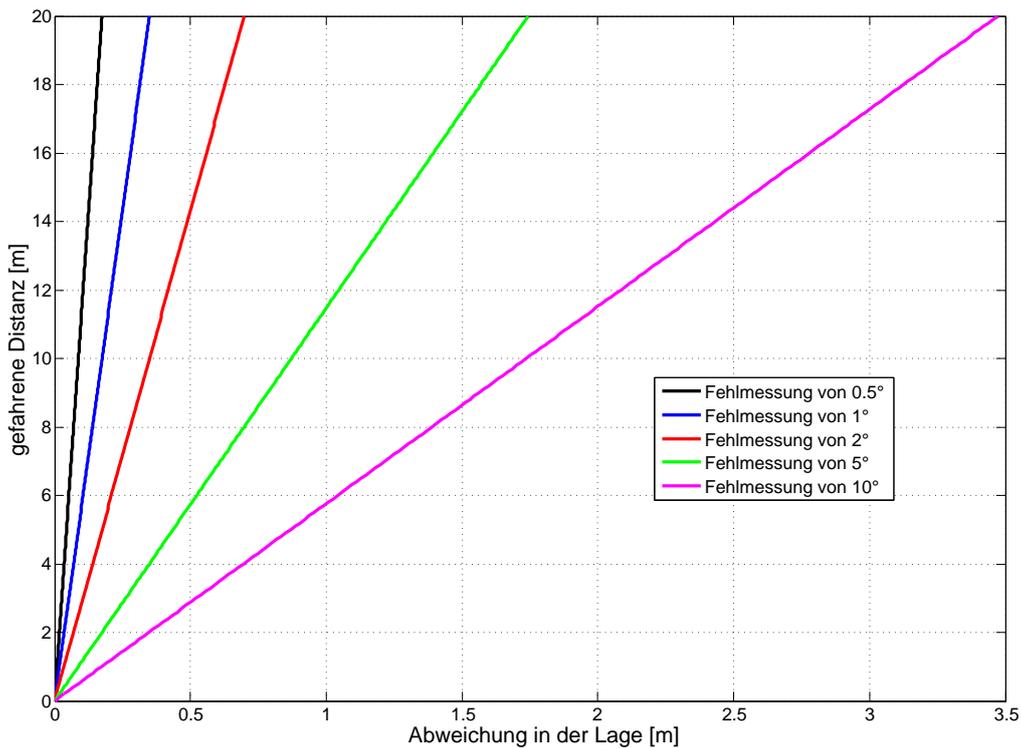


Abbildung 1.6: Auswirkung von Fehlern bei der Bestimmung der Winkel von Bögen bzw. Abzweigungen auf die Lagegenauigkeit im weiteren Verlauf der Dokumentation.

kann auch bei der Ausfahrt aus dem Bogen auftreten. Dies ist in Abbildung 1.5 durch den Schwimmwinkel B dargestellt. Dieser beträgt in dem dargestellten Fall 3° und geht ebenfalls direkt in die INS Messungen mit ein. Unter der Annahme, dass die INS Messungen fehlerfrei sind, also keine Drift oder sonstigen Messungenauigkeiten bestehen, liefert die Winkelmessung für den 45° Bogen aufgrund der beiden Schwimmwinkel eine Winkelmessung von 49° . Dieses Ergebnis setzt sich aus der Addition des Schwimmwinkels A (7°) und des Bogenwinkels (45°) sowie der Subtraktion des Schwimmwinkels B (3°) zusammen. Aufgrund der Schwimmwinkel kommt es somit bei der Bestimmung des Bogenwinkels zu einer Abweichung von 4° zum korrekten Wert. Dies wirkt sich auf die Dokumentation des Lageverlaufs aus (siehe rote Linie in Abbildung 1.5 links).

Aufgrund von Schwimmwinkeln kann es auch bei der Befahrung von geraden Rohren zu Fehlmessungen kommen. Verursacht die Umfahrung eines Hindernisses einen Schwimmwinkel, wird dieser direkt vom INS erfasst und führt bei den Ergebnissen der Koppelnavigation zu einer Abbiegung im dokumentierten Rohrverlauf (rote Linie in Abbildung 1.5 rechts). Dasselbe Problem existiert auch bei der Dokumentation des Höhenverlaufes einer GEA. Die mögliche erreichbare Genauigkeit von direkten Messverfahren zur Geometriebestimmung

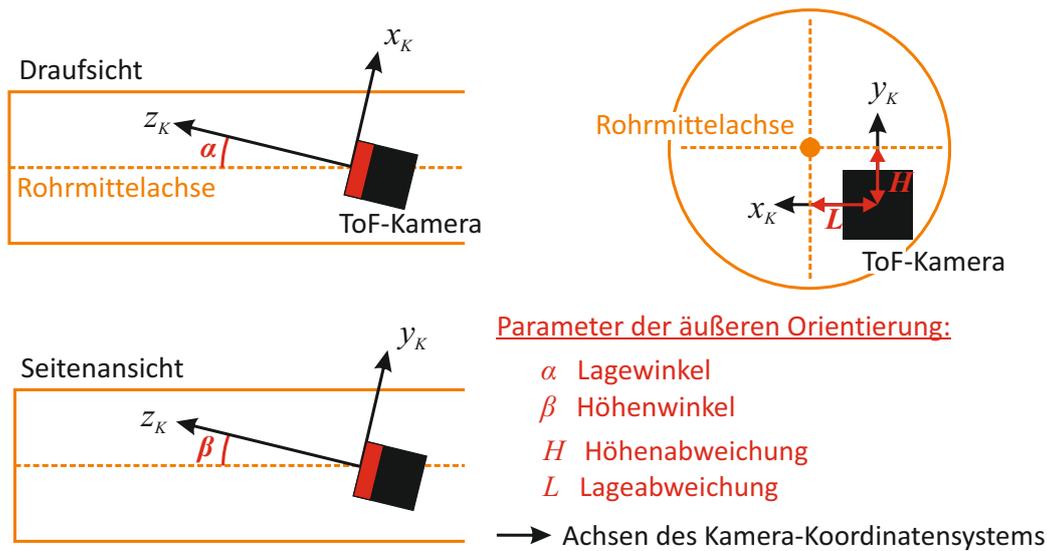


Abbildung 1.7: Äußere Orientierung der Inspektionseinheit (ToF-Kamera) zur mittleren Rohrachse

mung von GEA wird durch Schwimmwinkel reduziert. Um eine Vorstellung über die Konsequenzen von Fehlmessungen bei der Bestimmung von Bögen oder Abzweigungen zu bekommen, sind in Abbildung 1.6 die Auswirkungen von verschiedenen Größenordnungen an Fehlern bei der Bestimmung des Winkels eines Bogens auf die Lagegenauigkeit des weiteren Verlaufs der Dokumentation dargestellt.

Ein Fehler bei der Bestimmung des Bogenwinkels von 2° führt nach einer darauf folgenden Befahrung eines geraden Rohrelements von 14 m Länge, schon zu einer Lageabweichung von 0,5 m. Bei der Befahrung von komplexen und räumlich ausgedehnten GEA kann die geforderte Lagegenauigkeit so sehr schnell überschritten werden.

Um Schwimmwinkel berechnen und korrigieren zu können, muss die Lage und Orientierung der mit der Inspektionseinheit adaptierten ToF-Kamera zum Rohr bestimmt werden. Die Lage und Orientierung der ToF-Kamera im Verhältnis zur mittleren Rohrachse bei einer Aufnahme wird im Weiteren als äußere Orientierung bezeichnet [Striegl et al. 2014].

Mittels der INS Messungen kann die äußere Orientierung in die Lage- und Höhenverlauf beeinflussenden Komponenten des Schwimmwinkels transformiert werden. Die Vorgehensweise wird in Abschnitt 4.1 beschrieben.

Die Komponenten der äußeren Orientierung sind der Lage- und Höhenwinkel sowie die Lage- und Höhenabweichung der ToF-Kamera. Diese sind in Abbildung 1.7 dargestellt.

1.2.2 Driftrate des INS

Wie schon in Abschnitt 1.1 erwähnt, verwenden direkte Messverfahren zur Dokumentation von GEA, INS und Odometer Sensorik zur Dokumentation des Rohrverlaufs. Während einer Befahrung werden durchgehend Messdaten von diesen beiden Sensoren erfasst.

Das INS misst die für die Koppelnavigation benötigten Richtungsänderungen der Inspektionseinheit. Die Richtungsänderungen werden durch die drei Euler-Winkel: Pitch-, Roll- und Yaw-Winkel definiert (siehe Abbildung 1.8). Bei der Koppelnavigation erfolgt die Berechnung des Lageverlaufs mittels der Yaw-Winkelmessungen und die Berechnung des Höhenverlaufs mittels der Pitch-Winkelmessungen. Das Odometer erfasst die zurückgelegte Strecke. Aufgrund der geringen Durchmesser von GEA muss die Dimension der Inspek-

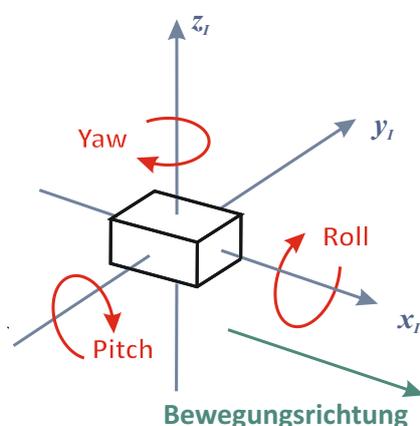


Abbildung 1.8: Anordnung von Beschleunigungs- und Winkelgeschwindigkeitssensoren bei einem INS.

tionseinheit klein gehalten werden. Aus diesem Grund können aktuell nur MEMS (Micro Electro Mechanical Systems) INS in die Inspektionseinheiten integriert werden. Diese zeichnen sich durch eine geringe Größe, aber auch durch hohe Driftraten aus. Die hohen Driftraten entstehen durch die Integration von Messfehlern bei den Beschleunigungs- und Winkelgeschwindigkeitsmessungen des INS [Titterton et al. 2004].

Pitch- und Roll-Winkel unterliegen grundsätzlich einer geringen Drift, da die dazugehörigen Winkelgeschwindigkeitsmessungen durch die mit den Beschleunigungssensoren gemessene Erdbeschleunigung korrigiert werden können.

Beim Yaw-Winkel ist eine Korrektur durch die Erdbeschleunigung nicht möglich. MEMS INS sind aus diesem Grund häufig mit Magnetfeld-Sensoren ausgestattet, um die Drift des Yaw-Winkels korrigieren zu können. Der Einsatz von Magnetfeld-Sensoren ist aber bei Inspektionen von GEA nicht möglich, da durch in der Nähe verlegte Rohrsysteme aus Eisen die Magnetfeldmessungen gestört werden.

Die hohe Driftraten stellen wie die Schwimmwinkel eine messtechnische Herausforderung bei der Dokumentation von GEA dar. Die Auswirkungen auf die Dokumentation können durch bestimmte Vorgehensweisen jedoch vermindert werden. Das Inspektionssystem geo-ASYS versucht durch Zusatzinformationen vom Inspekteur, die Yaw-Winkel Messungen nur während der Befahrung von Bögen oder Abzweigungen zu verwenden, um die Messdauer und damit die auch Fehlmessungen bei der Dokumentation einer GEA so gering wie möglich zu halten.

1.3 Zielsetzung der Dissertation

Im Rahmen dieser Arbeit soll untersucht werden, ob durch den Einsatz einer ToF-Kamera Zusatzinformationen gewonnen werden können, welche die Genauigkeit der Dokumentation von GEA verbessern. Die Arbeit beschäftigt sich primär mit den Möglichkeiten der Bestimmung und Korrektur der im vorherigen Abschnitt vorgestellten Schwimmwinkel. Es werden dabei die folgenden Fragestellungen verfolgt:

1. Können Zusatzinformationen zur Korrektur der Schwimmwinkel gewonnen werden?
2. Mit welcher Genauigkeit können diese Zusatzinformationen bestimmt werden?

Eine weitere Thematik ist die Gewinnung von Informationen über die Winkel von Bögen aus den Aufnahmen einer ToF-Kamera. Die gewonnenen zusätzlichen Informationen könnten, wie in Abbildung 1.9 dargestellt, bei Weiterentwicklungen von direkten Messsystemen mit Hilfe von Algorithmen wie einem Kalman-Filter [Heunecke et al. 2013] in den Messprozess integriert werden. Letztere ist aber nicht Gegenstand dieser Untersuchungen.

Als optisches Messsystem wird eine ToF-Kamera eingesetzt. ToF-Kameras kommen im Bereich der industriellen Bildverarbeitung oder der Robotik zum Einsatz. Je nach Modell sind die Ausmaße von ToF-Kameras relativ klein, sodass sie in Rohrsystemen ab einem Durchmesser von circa 15 cm verwendet werden können. Für jedes Pixel des integrierten Sensorchips erfolgt eine Distanzmessung bezüglich der aufgenommenen Szene. Mittels der Distanzmessungen kann eine dreidimensionale Punktwolke der aufgenommenen Szene berechnet werden.

Die Distanzmessungen aller Pixel erfolgen bei einer Aufnahme zur gleichen Zeit. Dies hat den Vorteil, dass die komplette Szene mit einer Aufnahme erfasst wird. Die ToF-Kamera kann somit während einer Inspektion kontinuierlich 3D-Aufnahmen liefern, die dann im Post-Processing ausgewertet werden.

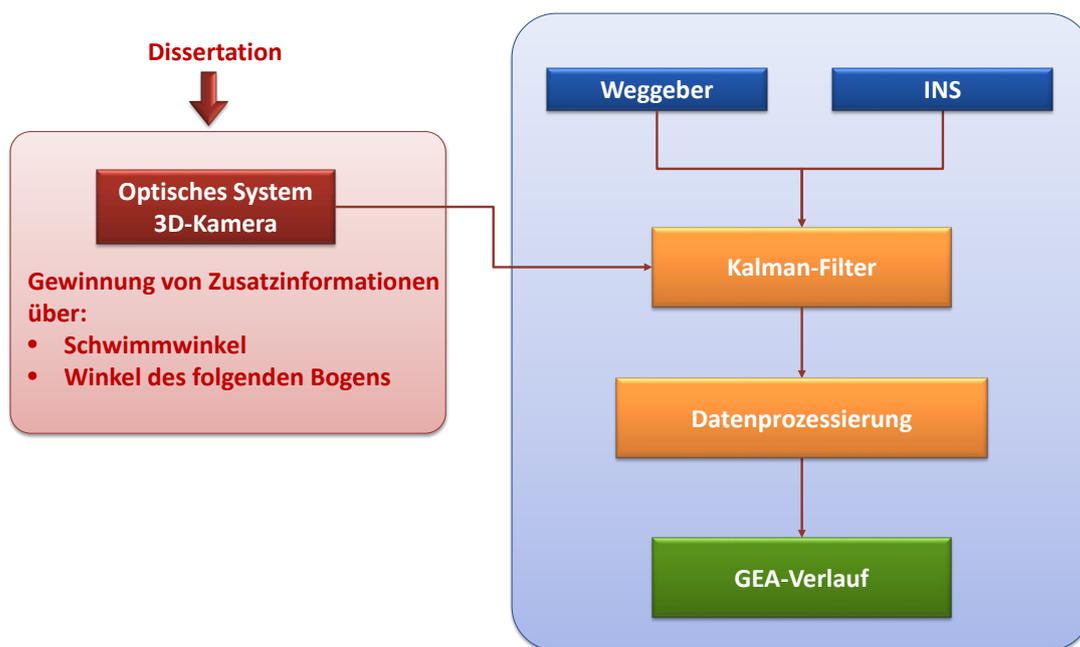


Abbildung 1.9: Zielsetzung der Dissertation

Die Inspektion einer GEA erfolgt je nach Komplexität des Rohrsystems meist im Stop-and-Go Modus. Die Vortriebsgeschwindigkeit während einer Inspektion ist somit grundsätzlich nicht konstant. Je nach Vortriebsart liegt die Geschwindigkeit in einem Bereich von circa 0,15 m bis maximal 0,5 m pro Sekunde [Döll 2015b]. Aufgrund der geringen Geschwindigkeit und der relativ hohen Bildfrequenzen von ToF-Kameras ist die Erfassung des Rohrsystems auch in der Bewegung möglich, ohne die Aufnahme signifikant zu verfälschen. Die hier verwendete ToF-Kamera erreicht eine Bildfrequenz von circa 31.5 fps (frames per second) bei einer Integrationszeit von 3,3 ms [MESA Imaging AG 2013].

Gerade bei Aufnahmen im Rohr ist bei ToF-Kameras mit einem hohen Grad an Mehrwegeeffekten zu rechnen. In der vorliegenden Arbeit wird an Hand von Laborversuchen ermittelt, ob aus den 3D-Aufnahmen geeignete Zusatzinformationen abgeleitet werden können. Dabei sind die Auswirkungen von Mehrwegeeffekten zu berücksichtigen.

Die Durchführung der Laborversuche erfolgt mit handelsüblichen KG-Kanalrohren aus PVC-Material mit einem Durchmesser von 15 cm. Einflüsse von in der Realität auftretenden Verschmutzungen oder Spritzwasser werden nicht berücksichtigt. Praxisbezogene Aspekte wie die bautechnische Integration der Sensorik in einer Inspektionseinheit, die Echtzeiterfassung der Sensordaten oder der Feuchtigkeitsschutz werden ebenfalls nicht betrachtet.

1.3.1 Konzepte zur Gewinnung von Zusatzinformationen durch Aufnahmen einer ToF-Kamera

Grundsätzlich müssen zuerst die prinzipielle Eignung der ToF-Kamera und der entwickelten Konzepte zur Gewinnung von Zusatzinformationen unter Laborbedingungen geprüft werden. Sollte die Eignung anhand der gewonnenen Ergebnisse bestätigt werden, sind die Voraussetzungen für den praktischen Einsatz in weiteren Schritten zu klären. Letzteres ist aber nicht Gegenstand dieser Arbeit.

Informationen über Schwimmwinkel: Die Gewinnung von Informationen über die äußere Orientierung der ToF-Kamera und damit der Schwimmwinkel erfolgt unter Verwendung der aufgenommenen Punktwolke des Rohrsystems. Aufnahmen von geraden Rohren liefern eine zylinderförmige Punktwolke. Mit Hilfe von robusten Verfahren wie dem RAN-SAC Algorithmus oder der HOUGH-Transformation können Kreiszyylinder in Punktwolken detektiert werden. Die bestimmte Zylinderachse stellt im Idealfall die mittlere Rohrachse des geraden Rohrelements dar. Anhand der Lage der bestimmten Zylinderachse im räumlichen Bezug zum Kamerakoordinatensystem lässt sich die äußere Orientierung der Kamera zum Rohr bestimmen und daraus Informationen über vorliegende Schwimmwinkel ableiten. Auf die Vorgehensweise zur Bestimmung der äußeren Orientierung wird in Kapitel 4 eingegangen. Ist die relative Lage der ToF-Kamera zum INS bekannt und unveränderlich, können durch die Bestimmung der Schwimmwinkel die INS Messungen direkt korrigiert werden.

Informationen über den Winkel eines folgenden Bogens: Bei Aufnahmen im Nahbereich vor Bögen besteht die Möglichkeit, die Winkel der Bögen direkt aus einer Aufnahme abzuleiten. Dazu muss mittels der im vorherigen Abschnitt genannten Verfahren eine Segmentierung der Punktwolke erfolgen. Das Ziel ist die Bestimmung der Zylinderachsen der vor und nach dem Bogen befindlichen geraden Rohrelemente. Die Achsen der detektierten Zylinder werden anschließend miteinander verschnitten. Der berechnete Schnittwinkel entspricht dem Winkel des zu bestimmenden Bogens (siehe Abbildung 1.10).

Bei der Bestimmung der Winkel von Bögen aus den Messungen einer ToF-Kamera ist von Vorteil, dass die Ergebnisse unabhängig von Messungen des INS sind. Aufgrund der Drift des INS sind Messungen von Bögen grundsätzlich fehlerbehaftet. Die Größe des Fehlers hängt direkt von der Messdauer ab. Die Ergebnisse der Schnittwinkelberechnung können in Filteralgorithmen verwendet werden, um die INS Messungen bezüglich Plausibilität zu prüfen, zu verbessern oder eventuell sogar ganz zu ersetzen.

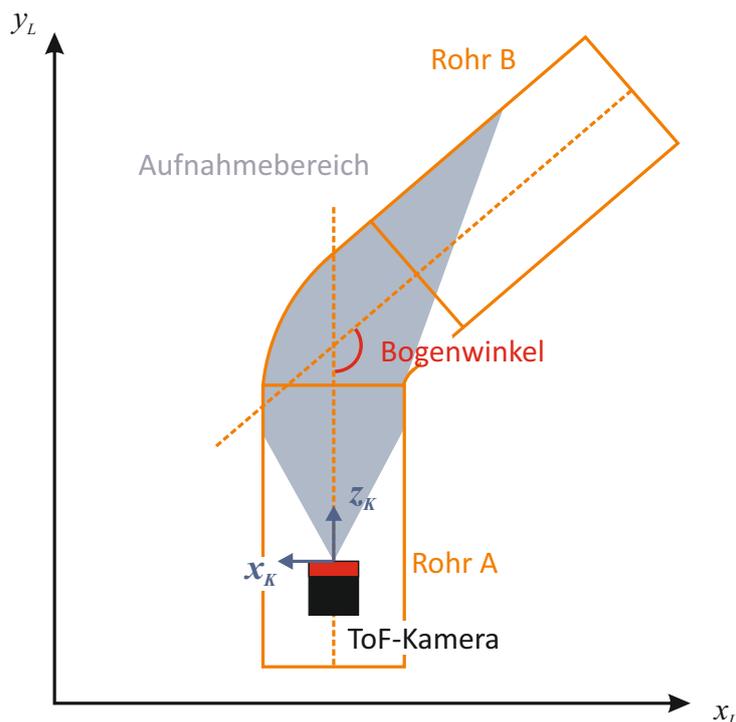


Abbildung 1.10: Winkelbestimmung eines Bogens durch Verschneidung der Zylinderachsen zweier Segmente

1.3.2 Genauigkeitsanforderungen im Rahmen des Anwendungsfalls

Anforderungen bei der Bestimmung von Schwimmwinkeln: Bei der Bestimmung von Schwimmwinkeln trägt grundsätzlich jedes Verfahren, das in der Lage ist, Schwimmwinkel zu bestimmen, zu einer Verbesserung der Genauigkeit bei. Dies soll kurz ein theoretisches Beispiel zeigen: Selbst wenn ein Schwimmwinkel von 10° nur als Schwimmwinkel von 8° bestimmt und entsprechend korrigiert wird, führt dies in der Gesamtheit zu einem Genauigkeitsgewinn bei der Dokumentation von GEA. Die letztendliche Verbesserung hängt also von der Genauigkeit der Verfahren zur Bestimmung von Schwimmwinkeln ab. Bei einer Fehlmessung eines Bogens von 1° würde die Genauigkeitsanforderung für den darauf folgenden, dokumentierten Lageverlauf bis zu einer Messdistanz von circa 30 m eingehalten werden. Diese Länge entspricht der aktuellen Spezifikation des Systems geoASYS (siehe Abschnitt 1.1.3). Um die Spezifikation auch beim Auftreten von Schwimmwinkeln einhalten zu können, müssen diese folglich mit einer Genauigkeit von mindestens 1° oder besser bestimmt werden. Aus diesem Grund ist eine Bestimmung von Schwimmwinkeln mit einer Genauigkeit von 1° wünschenswert.

Anforderungen bei der Bestimmung von Winkeln des nachfolgenden Bogens:

Grundsätzlich ist es von Vorteil, wenn durch ein zweites, vom INS unabhängiges Verfahren die Bestimmung der Winkel von Bögen erfolgt (siehe Abschnitt 1.2). Liegt die Genauigkeit der Schnittwinkelbestimmung im gleichen Genauigkeitsbereich wie die der INS Messungen, können diese zur Plausibilitätsüberprüfung verwendet werden. Ist die Genauigkeit höher, kann sie zur Korrektur oder sogar stellvertretend für die INS Messung eingesetzt werden. Wie auch bei der Bestimmung der Schwimmwinkel ist eine Genauigkeit von 1° bei der Bestimmung der Winkel von Bögen für die Dokumentation einer GEA erstrebenswert.

Kapitel 2

Stand der Wissenschaft

Im Weiteren stellt der erste Abschnitt wissenschaftliche Arbeiten oder Projekte vor, die sich mit der Entwicklung von Inspektionsverfahren für Rohrsysteme beschäftigen. Der Schwerpunkt liegt hierbei auf Ansätzen, bei denen auch eine Positionierung der Inspektionseinheit erfolgt.

Der zweite Abschnitt gibt einen Überblick über wissenschaftliche Arbeiten, die sich explizit mit der Bestimmung von Zylindern in Punktwolken befassen. Einzelne Arbeiten beschäftigen sich im Speziellen mit der Dokumentation von Rohrsystemen in Industrieanlagen anhand von Laserscanner-Daten. Das Vorgehen zur Dokumentation von Industrieanlagen ähnelt dem hier vorgestellten Anwendungsfall und ist daher von besonderem Interesse. Im dritten Abschnitt werden wissenschaftliche Arbeiten zur Korrektur von Mehrwegeffekten, wie sie auch bei den Aufnahmen im Rohr vorkommen, vorgestellt.

2.1 Inspektion und Vermessung von Abwasserkanälen

Bezüglich des hier vorgestellten Anwendungsfalls und der damit verbundenen Themenstellung sind bisher keine wissenschaftlichen Arbeiten bekannt, die sich explizit mit der Genauigkeit der Gewinnung der vorgestellten Zusatzinformationen mittels einer ToF-Kamera in GEA befassen.

Die im Folgenden vorgestellten zwei Projekte haben jedoch eine ähnliche Themenstellung. Es handelt sich um das EU Projekt “PipeGuard” und das Projekt “Inspektions- und Reinigungsroboter für Abwasserkanäle”.

Bei dem Projekt “PipeGuard” handelt sich um ein Projekt des “Research and Innovation Programm” der EU (FP7), das sich in den Jahren von 2012 bis 2014 mit der Entwicklung eines Inspektions- und Vermessungssystems von Abwasserkanälen bis zu einem Durchmes-

ser von minimal 100 mm beschäftigte. Projektpartner war unter anderem der Hersteller des geoASYS Systems, JT Elektronik, und das Fraunhofer-Institut für Produktionstechnik und Automatisierung (IPA). Der Schwerpunkt bei diesem Projekt lag auf der Detektion von Verschmutzungen oder Beschädigungen des Rohrsystems mittels eines Ultraschallmesssystems. Bei dem entwickelten System war geplant, neben einer optischen Kamera auch eine Stereo High Dynamic Range (HDR) Kamera einzusetzen, mit deren Aufnahmen des Rohrsystems die Lokalisation der Inspektionseinheit unterstützt werden sollte [Krause 2014]. Aufgrund von Problemen mit der Datenverarbeitung kam die HDR Kamera aber bisher nicht zum praktischen Einsatz [Döll 2015a].

Das Projekt “Inspektions- und Reinigungsroboter für Abwasserkanäle” des Fraunhofer-Institut für Fabrikbetrieb und -automatisierung (IFF) bezieht sich primär auf Abwasserkanäle mit größeren Durchmessern. Es beinhaltet die Entwicklung eines Roboters zur Schadenserkennung und -vermessung sowie zur Reinigung von Abwasserkanälen. Die Entwicklung ist speziell auf ein großes Wasserbauvorhaben angepasst, den Abwasserkanal für den Fluss Emscher. Auch hier werden optische Systeme sowie ein Ultraschallmesssystem zur Erkennung von Schäden eingesetzt. Die Positionsbestimmung des Roboters im Abwasserkanal erfolgt in diesem Fall durch ein visuelles Tracking von Schadensmustern [Schenk 2009].

Des Weiteren existieren verschiedene Veröffentlichungen, die sich schon in den 1990er Jahren mit der Entwicklung von Inspektionssystemen für Abwasserkanäle beschäftigt haben. Im Folgenden werden einige ausgewählte Arbeiten vorgestellt, deren Schwerpunkte aber meist auf der Entwicklung von vollständig autonomen Inspektionssystemen liegen. Die erfassten Daten der eingesetzten Sensoren werden primär für die automatische Schadenserkennung, Steuerung sowie grobe Positionierung der Inspektionseinheit verwendet. Die Genauigkeit der Dokumentation des Rohrsystems spielte meist keine Rolle.

Eine der bekanntesten Arbeiten ist das in den 1990er Jahren durchgeführte “MAKRO” Projekt [Rome et al. 1999]. Dieses basiert auf schon vorangegangenen Erfahrungen und Veröffentlichungen der Autoren [Kirchner et al. 1997]. Das Ziel ist die Entwicklung eines autonomen Abwasser-Roboters zur Inspektion von Abwassersystemen mit einem Durchmesser von 10-15 cm. Der Roboter ist mit jeweils zwei Infrarotsensoren, Laserprojektoren, Kameras sowie einer Ultraschalleinheit ausgestattet. Die Bestimmung der gefahrenen Strecke erfolgte über den Radabgriff. Schwerpunkte des Projekts sind die automatische Erfassung und Positionierung von markanten Punkten (engl.: landmarks) und Schadstellen sowie die automatische Schadenserkennung.

Im Jahr 2002 veröffentlichten [Duran et al. 2002] eine Arbeit, die einen Gesamtüberblick über den Stand der Technik der verschiedenen Sensor-Technologien bei der Inspektion von Abwassersystemen liefert.

Im Jahr 2007 stellten [Nassiraei et al. 2007] ein Konzept für eine vollständig autonome Inspektionseinheit für Abwassersysteme namens “KANTARO” vor. Der Schwerpunkt dieser Arbeit lag ebenfalls auf der Entwicklung eines autonomen Inspektionssystems, das eigenständig Rohrsysteme mit einem Durchmesser von 20-30 cm befährt. Ausgestattet mit einer fisheye Kamera und einem 2D Laserscanner kann das System, wie beim “MAKRO” Projekt, autonom navigieren und Landmarken wie Schächte und Zuläufe detektieren. Des Weiteren werden die erfassten Daten der Sensoren ebenfalls zur Schadensdetektion verwendet.

Im Jahr 2009 stellten [Bauer et al. 2009] das System geoASYS vor. Der Schwerpunkt dieses Systems liegt speziell auf der Vermessung des Rohrleitungssystems. Wie schon in den vorherigen Kapiteln erwähnt, verwendet das System ein INS und ein Odometer sowie Zusatzinformationen durch den Inspekteur zur Berechnung des Verlaufs des Kanalsystems.

2.2 Verfahren zur Extraktion von Kreiszyklindern

Mit der Entwicklung der Laserscanner- und Computer-Technologie und die damit verbundene einfache Erstellung großer Punktwolken haben in den letzten Jahren auch die Verfahren zur Extraktion von Primitiven wie Ebenen, Sphären, Kegel oder Zylinder an Bedeutung gewonnen. Bei den drei zuletzt genannten Primitiven handelt es sich um sogenannte Quadriken, also Oberflächen zweiter Ordnung.

In den 1980er und 1990er Jahren befassten sich wissenschaftliche Publikationen mit der Extraktion von Primitiven aus Entfernungsdaten (engl.: range data), wie sie mittels der Stereoskopie gewonnen werden. Zu den bekannteren Arbeiten zählt diejenige von [Holies et al. 1981]. Die Autoren verwenden die von [Fischler et al. 1981] vorgestellte Technik “Random Sample Consensus” (RANSAC), um Zylinder in Distanzbildern zu extrahieren. Auch die bereits 1962 von Paul V.C. Hough entwickelte Hough-Transformation wird in der Arbeit von [Hebert et al. 1982] eingesetzt, um Ebenen, Zylinder und Kegel zu extrahieren. In [Hoover et al. 1996] werden verschiedene Segmentierungsalgorithmen für Distanzbilder verglichen. [Petitjean 2002] gibt ebenfalls einen guten Überblick über verschiedene Publikationen, die sich mit der Extraktion von Zylindern in Punktwolken beschäftigen. Genannt seien an dieser Stelle die Arbeiten von [Newman et al. 1993] oder [Grimson et al. 1993]. Durch die Weiterentwicklung der terrestrischen Laserscanner-Technologie verlagerte sich

das wissenschaftliche Interesse im Bereich der Extraktion von Primitiven in Distanzbildern hin zu unorganisierten 3D-Punktwolken.

In der Literatur werden verschiedene Verfahren vorgestellt, um Zylinder in Punktwolken zu extrahieren. Diese können laut [T. S. Rabbani et al. 2005] in zwei Gruppen unterteilt werden: Verfahren, die eine Vorsegmentierung der Rohdaten benötigen und Verfahren, die Rohdaten ohne Vorprozessierung verarbeiten können. Zur erst genannten Gruppe zählen zum Beispiel die Arbeiten von [Lukács et al. 1998], [Marshall et al. 2001] und [El-Halawany et al. 2011]. Nach einer Vorsegmentierung der Punktwolke erfolgt eine Einpassung (engl.: fitting) der Primitiven meist mit Hilfe einer Ausgleichung nach dem Prinzip der kleinsten Quadrate. Die Qualität der Segmentierung ist hier von großer Bedeutung. Welche Auswirkung eine schlechte Segmentierung und damit verbundene Ausreißer auf den Ausgleichungsalgorithmus haben können, wird in [Björck 1996] und [Press 1988] dargestellt. Bei der zweiten Gruppe handelt es sich um Methoden, die versuchen, durch die Verwendung robuster Fitting-Methoden eine Vorsegmentierung zu umgehen. Die zwei wohl bekanntesten Vertreter dieser Gruppe sind der erwähnte RANSAC-Algorithmus und die Hough-Transformation. Robust bedeutet in diesem Zusammenhang, dass die Algorithmen auch bei einer großen Anzahl von Outliern, also nicht den Zylinder darstellende Punkte, verlässliche Ergebnisse liefern [Schnabel et al. 2007]. Oftmals erfolgt auch bei dieser zweiten Gruppe eine anschließende Ausgleichung der zum Zylinder zugeordneter Punkte nach dem Prinzip der kleinsten Quadrate, um die Parameter des Zylinders genauer zu bestimmen. Auf die Genauigkeit der Verfahren, mit der die Zylinderachse bestimmt werden kann, wird in den meisten Veröffentlichungen nicht eingegangen. Nur bei den Arbeiten von [T. S. Rabbani et al. 2004] und [T. Rabbani et al. 2004] erfolgt ein Vergleich zwischen der bestimmten Lage von Rohrelementen in Industrieanlagen zu dem in einem CAD(computer-aided design)-Programm geplanten Soll-Zustand.

RANSAC-Algorithmus: [Chaperon et al. 2001] verwenden den RANSAC-Algorithmus zur Bestimmung der Richtung der Zylinderachse mit Hilfe der Gaußschen Sphäre. Die Oberflächennormalen der Punkte eines Zylinders beschreiben in der Gaußschen Sphäre im Idealfall einen Großkreis. Dieser Großkreis kann auch als Verschneidung einer Ebene mit der Gaußschen Sphäre interpretiert werden. Das Gaußsche Bild eines Zylinders entspricht somit einer Ebene, deren Normale der Richtung der Zylinderachse entspricht. [Schnabel et al. 2007] stellten in ihrer Arbeit eine Methode zur Extraktion von Zylindern und anderen verschiedenen Primitiven in großen unorganisierten Punktwolken vor. Das Vorgehen zur Bestimmung der Zylinderparameter unterscheidet sich ein wenig zu [Chaperon et al. 2001]. Die Zylinderparameter werden bei [Schnabel et al. 2007] direkt anhand zweier Punk-

te und deren zugehörigen Oberflächennormalen ohne Betrachtung der Gaußschen Sphäre bestimmt.

In [Beder et al. 2006] werden Verfahren zur Bestimmung von Zylinderparametern ohne die Verwendung von Oberflächennormalen vorgestellt.

Im Zusammenhang mit dem RANSAC-Algorithmus müssen auch dessen Abwandlungen erwähnt werden, die natürlich allgemeine Gültigkeit besitzen und nicht nur bei der Bestimmung von Zylindern verwendet werden können. Bekannte Abwandlungen sind der Locally Optimized RANSAC (LO RANSAC) nach [Chum et al. 2003] sowie der M-estimator Sample and Consensus (MSAC) oder Maximum Likelihood Estimation Sample and Consensus (MLE SAC) nach [Torr et al. 1998] bzw. [Torr et al. 2000]. Die beiden Letztgenannten versuchen die Qualität des sogenannten “Consensus Set” zu evaluieren, um die geschätzten Modelle besser bewerten zu können. Der “Consensus Set” entspricht der Menge der Punkte, die das aktuelle Modell unterstützen. Diese werden auch als Inlier bezeichnet.

Die Abwandlung LO RANSAC erweitert den RANSAC-Algorithmus um ein Ausgleichungsverfahren nach der Bestimmung des “Consensus Set”. Dadurch wird die Qualität des jeweiligen aktuell geschätzten Modells verbessert und mit diesem anschließend nochmals der “Consensus Set” bestimmt. Dies führt zu einer Verbesserung der Robustheit und Genauigkeit des RANSAC Algorithmus.

Hough-Transformation: In [Vosselman et al. 2004], [T. S. Rabbani et al. 2005] und [T. S. Rabbani 2006] wird die direkte Extraktion von parametrisierten Oberflächen mittels einer 3D-Hough-Transformation vorgestellt. Die 3D-Hough-Transformation ist eine Erweiterung der von Paul V.C. Hough ([Hough 1962]) entwickelten Hough-Transformation zur Bestimmung von Geraden oder Kreisen in Gradientenbildern. Es handelt sich um eine nicht-iterative Vorgehensweise zur Detektion von Clustern im Parameterraum. Der Parameterraum wird oftmals auch als Hough-Raum bezeichnet. Die Bestimmung von Zylindern erfolgt bei der Hough-Transformation in zwei Schritten: Zuerst wird die Richtung der Zylinderachse bestimmt und dann die Lage (Aufpunkt) und der Radius des Zylinders. Die Bestimmung der Richtung der Zylinderachse erfolgt bei der Hough-Transformation mittels der Oberflächennormalen in der Gaußschen Sphäre. Der Unterschied zu [Chaperon et al. 2001] liegt in der vorangehenden Transformation der Oberflächennormalen in den Parameterraum. Laut [T. S. Rabbani et al. 2005] hat die Hough-Transformation gegenüber RANSAC den Vorteil, dass auch Zylinder mit identischer Ausrichtung der Zylinderachse, aber verschiedenen Radien, bei der Detektion unterschieden werden können. Die Nachteile liegen bei den im Vergleich zu RANSAC langen Rechenzeiten und dem hohen Speicherbedarf. Um die Rechenzeit zu minimieren und gleichzeitig die Robustheit der Hough-Transformation

bei der Detektion einer großen Anzahl an vorkommenden Zylindern zu erhöhen, stellen [Su et al. 2010] einen iterativen Ansatz mit Cluster-Funktionalität vor. Dabei wird die Hough-Transformation mehrmals mit zunehmender Auflösung des Hough-Raums in den Bereichen mit hohen Akkumulationswerten durchgeführt.

[Lari et al. 2013] stellen einen Ansatz vor, der den Nachteil des RANSAC-Algorithmus bezüglich der Detektion von Zylindern mit identischer Ausrichtung, aber unterschiedlichen Radien aufheben soll. Dabei werden Zylinder zuerst im 3D-Raum detektiert und anschließend durch eine Segmentierung in einem Parameterraum extrahiert.

2.3 Rohrsysteme von Industrieanlagen

In den letzten Jahren beschäftigen sich verschiedene Veröffentlichungen mit der ganzheitlichen Bestimmung der Topologie und Geometrie von Rohrsystemen in Industrieanlagen. Dieser Anwendungsfall ähnelt dem hier vorgestellten. Der Unterschied zwischen beiden ist eigentlich nur die Aufnahmeart. Industrieanlagen werden meist mittels Laserscanner-Messungen von verschiedenen Standpunkten aus aufgenommen. In dem hier vorgestellten Fall erfolgt die Aufnahme mit einer ToF-Kamera innerhalb eines Rohres. Das Ergebnis ist jeweils eine Punktwolke des Rohres, in einem Fall von der Außenseite und im anderen Fall von der Innenseite des Rohres.

Der wichtigste Unterschied liegt in der Organisation der Punktwolke. Bei der Laserscanner-Messung ist im Idealfall der gesamte Rohrverlauf homogen durch Punkte dargestellt. Dagegen liegt bei Aufnahmen mit einer ToF-Kamera innerhalb eines Rohres immer eine inhomogene Punktverteilung vor. Das heißt, mit dem Abstand zur ToF-Kamera nimmt auch die Punktdichte ab. Des Weiteren kommt es im Vergleich zu Laserscanner-Messungen häufig vor, dass nur Teilbereiche des Rohres aufgenommen werden können. Dies erschwert die korrekte Bestimmung von Zylindern in der Punktwolke.

Laut den Veröffentlichungen von [Nourse et al. 1980] und [Petitjean 2002] können 85% der aufgenommenen Objekte in einer Industrieanlage durch Primitiven approximiert werden. Heutige Arbeiten beschäftigen sich unter anderem mit der automatisierten Modellierung des Rohrverlaufs von Industrieanlagen, um Kosten und Zeit zu sparen. Dies beinhaltet die Modellierung der Rohrelemente inklusive der Bestimmung der korrekten Verknüpfung zwischen den einzelnen Elementen des Rohrsystems. Zu nennen sind hierbei die Arbeiten von [Lee et al. 2013] und [Kawashima et al. 2013].

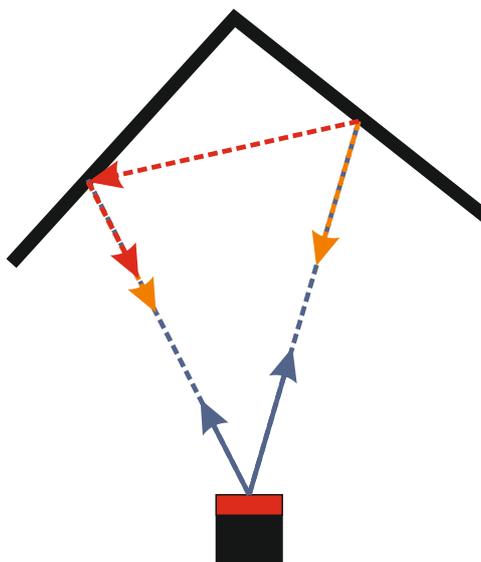


Abbildung 2.1: Schematische Darstellung der Entstehung von Mehrwegeffekten

2.4 Korrektur von Mehrwegeffekten bei Aufnahmen mit einer ToF-Kamera

Mit der Entwicklung der ToF-Kamera Technologie haben sich kontinuierlich auch wissenschaftliche Arbeiten mit der Kalibrierung bzw. Korrektur von äußeren und inneren Störeinflüssen bei ToF-Kameras beschäftigt. Zu nennen sind an dieser Stelle die Arbeiten von [Luan 2001], [Kahlmann 2007], [Fuchs et al. 2007], [Fuchs 2012], [Frank et al. 2009] und [Karel et al. 2010].

Es existieren aber auch Störeinflüsse bei Kameraaufnahmen, die nicht durch eine Kalibrierung behoben werden können, da sie von der Art der aufgenommenen Szenerie abhängen. Dazu gehören auch Fehlmessungen aufgrund des Mehrwegempfangs (engl.: Multipath). Dieser wird auch als Mehrwegeffekt bezeichnet. Bei der aktiven Beleuchtung einer Szene mit elektromagnetischen Wellen kann es, wie in Abbildung 2.1 dargestellt, vorkommen, dass das ausgesendete Signal nicht nur über den direkten Weg reflektiert wird, sondern sich mit anderen Rückstrahlungen überlagert. Diese Überlagerung führt in Folge zu fehlerhaften Distanzmessungen.

Bei realen Messungen handelt es sich meist nicht um ein einzelnes Objekt das Mehrwegeffekte hervorruft, sondern um eine Kombination aus einer Vielzahl von Mehrwegeffekten verschiedenster Objekte. Dies muss bei Korrekturansätzen berücksichtigt werden.

Es existieren verschiedene Ansätze zur Korrektur von Mehrwegeffekten bei ToF-Kameras.

Die bekanntesten lassen sich in zwei Kategorien unterteilen:

- Bestimmung der Mehrwegeeffekte durch Änderung der Modulationsfrequenz der ToF-Kamera
- Bestimmung der Mehrwegeeffekte durch Verwendung eines radiometrischen Modells

Die erste Kategorie verwendet mehrere Aufnahmen einer Szene mit unterschiedlichen Modulationsfrequenzen der ToF-Kamera, um Bildbereiche, die von Mehrwegeeffekten betroffen sind, zu bestimmen und den dadurch entstandenen Fehler der einzelnen Distanzmessungen zu korrigieren. Zu nennen sind in diesem Zusammenhang die Arbeiten von [Dorrington et al. 2011], [Fuchs 2012], [Godbaz et al. 2012], [Kadambi et al. 2013], [Godbaz et al. 2013] oder [Bhandari et al. 2014].

Die zweite Kategorie von Ansätzen verwendet radiometrische Modelle zur Bestimmung des durch Mehrwegeeffekte entstandenen Fehlers bei den Distanzmessungen. Zu nennen sind in diesem Zusammenhang vor allem die Arbeiten von [Fuchs 2010], [Fuchs 2012] und [Jiménez et al. 2012], [Jiménez et al. 2014]. Diese Ansätze benötigen im Gegensatz zur ersten Kategorie nur eine Aufnahme zur Bestimmung des durch Mehrwegeeffekte bedingten Distanzfehlers. Laut [Bhandari et al. 2014] besteht aber aufgrund oftmals verwendeter hypothetischer Annahmen in den radiometrischen Modellen nur eine eingeschränkte Anwendbarkeit.

Der große Vorteil der Ansätze der zweiten Kategorie liegt im gegebenen Anwendungsfall darin, dass nur eine Aufnahme für die Korrektur benötigt wird. Aufgrund der Bewegung der Inspektionseinheit kann nicht gewährleistet werden, dass bei zwei aufeinander folgenden Aufnahmen die gleiche Szene abgebildet wird.

Für die folgenden Untersuchungen sind vor allem die Verfahren zur Bestimmung von Zylinderachsen in Punktwolken und zur Korrektur von Mehrwegeeffekten relevant.

Der implementierte RANSAC Algorithmus zur Bestimmung der Zylinderachse orientiert sich an den Arbeiten von [Holies et al. 1981] und [Schnabel et al. 2007]. Die Erweiterung zum LO RANSAC erfolgt entsprechend der Veröffentlichung von [Chum et al. 2003].

Die Implementierung der Hough-Transformation richtet sich nach dem Vorgehen von [T. S. Rabbani et al. 2005]. Die Erstellung der Hough-Räume erfolgt entsprechend der Arbeiten von [Rusin 1998] und [Lutton et al. 1994].

Des Weiteren werden Verfahren zur Korrektur von Mehreffekten mittels radiometrischer Modelle bezüglich des Einsatzes im gegebenen Anwendungsfall untersucht. Es handelt sich um die Arbeiten von Fuchs [Fuchs 2010, 2012] und Jimenez [Jiménez et al. 2014; Jiménez et al. 2012].

Kapitel 3

Grundlagen

Im Folgenden werden die verwendeten mathematischen Verfahren und die eingesetzten Hardwarekomponenten erläutert. Der erste Abschnitt beinhaltet die Vorstellung der bei den Versuchen verwendeten ToF-Kamera sowie der manuellen Positioniersysteme zur Simulation von verschiedenen äußeren Orientierungen in einem Rohr. Im zweiten Abschnitt werden die mathematischen Grundlagen des RANSAC Algorithmus und der Hough-Transformation zur Bestimmung von Zylindern in Punktwolken sowie zweier Verfahren zur Korrektur von Mehrwegeeffekten bei Aufnahmen mit einer ToF-Kamera vorgestellt.

3.1 Eingesetzte Hardware

3.1.1 MESA Imaging SR4000

Die ToF-Kamera SwissRanger 4000 (SR4000) der Firma MESA Imaging ist eine auf dem sogenannten Continuous Wave Modulation (CWS) Verfahren basierende ToF-Kamera [Lange et al. 1999]. Bei diesem Verfahren wird die aufzunehmende Szenerie kontinuierlich mittels einer NIR (near infrared) Beleuchtungseinheit aktiv beleuchtet. Anhand der Phasenverschiebung zwischen dem ausgehenden und dem von der Szene reflektierten Signal kann die zurückgelegte Distanz berechnet werden. Die im Folgenden dargestellte mathematische Vorgehensweise zur Berechnung der Distanzen wird beispielsweise in [Chiabrando et al. 2009] detailliert beschrieben.

Messprinzip der SR4000: Aus den Distanzmessungen können unter Verwendung eines Lochkamera-Modells und der Kalibrierparameter der ToF-Kamera dreidimensionale Koordinaten der Szene im Kamerakoordinatensystem berechnet werden. Bei den durchgeführten

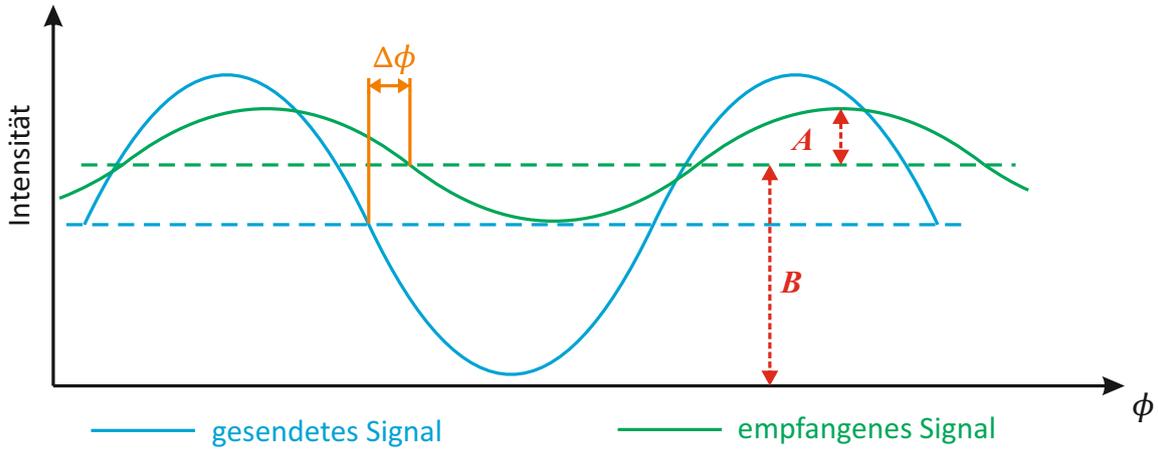


Abbildung 3.1: Amplitude A , Intensität B und Phasenverschiebung $\Delta\phi$ des eingehenden Signals nach [Chiabrando et al. 2009].

Aufnahmen wurden die vom Hersteller mitgelieferten Kalibrierparameter der ToF-Kamera verwendet. Die Berechnungen erfolgen für jedes Pixel des Sensor-Chips der SR4000. Die Distanz d berechnet sich anhand der Phasenverschiebung $\Delta\phi$ zwischen dem ausgehenden und eingehenden Signal nach Formel 3.1.

$$d = \frac{c\Delta\phi}{4\pi f_m} \quad (3.1)$$

c entspricht dabei der Lichtgeschwindigkeit und f_m der eingestellten Modulationsfrequenz der ToF-Kamera.

Zur Berechnung der Phasenverschiebung $\Delta\phi$ werden vier Abtastungen $c(\tau_0) \dots c(\tau_3)$ pro Zyklus des eingehenden Signals verwendet. Anhand der Abtastungen kann die mittlere Intensität B und die Amplitude A (siehe Abbildung 3.1) des eingehenden Signals nach den folgenden Formeln berechnet werden:

$$A = \frac{\sqrt{(\tau_0 - \tau_2)^2 + (\tau_1 - \tau_3)^2}}{2} \quad (3.2)$$

$$B = \frac{\tau_0 + \tau_1 + \tau_2 + \tau_3}{4} \quad (3.3)$$

$$\Delta\phi = \arctan\left(\frac{\tau_0 - \tau_2}{\tau_1 - \tau_3}\right) \quad (3.4)$$

Die Amplitude kann zur Erstellung eines Grauwertbilds oder zur Prüfung der Qualität der jeweiligen Messung verwendet werden [Lange et al. 1999].

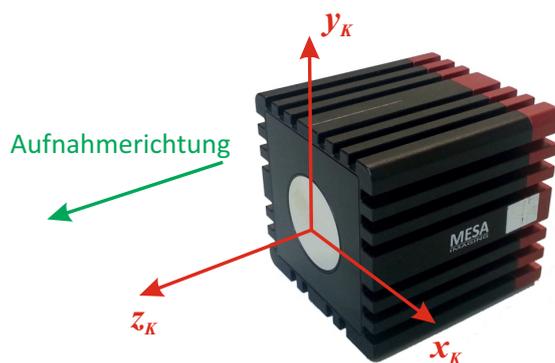


Abbildung 3.2: Vom Hersteller definierter Ursprung des Koordinatensystem der SR4000.

Es ist zu beachten, dass das Kamerakoordinatensystem der SR4000 nicht mit den oftmals in der Literatur beschriebenen Koordinatensystemen von Lochkamera-Modellen übereinstimmt, bei denen sich der Ursprung im sogenannten Projektionszentrum befindet. Der Ursprung des Kamerakoordinatensystems der SR4000 befindet sich laut Hersteller am Schnittpunkt der optischen Achse mit der Vorderseite des Kameragehäuses [MESA Imaging AG 2013]. Die Lage des Koordinatensystems ist in Abbildung 3.2 dargestellt.

Spezifikation der SR4000: Der Sensor-Chips der SR4000 hat eine Auflösung von 144×176 Pixel und erfasst somit pro Aufnahme 25.344 Distanzmessungen sowie die dazugehörigen Koordinaten im Kamerakoordinatensystem. Bei der hier verwendeten Kamera handelt es sich um ein Modell mit Standard-Blickfeld. Der horizontale Öffnungswinkel beträgt 43° und der vertikale Öffnungswinkel 34° . Die Brennweite beträgt $0,01$ m [MESA Imaging AG 2011]. Das Gehäuse hat eine Dimension von $65 \times 65 \times 68$ mm und ermöglicht damit einen Einsatz der ToF-Kamera in Rohrsystemen ab einem Durchmesser von 15 cm. Bei kleineren Durchmessern gestaltet sich die Befahrung von Bögen mit großen Winkeln schwierig. Die Genauigkeit der Distanzmessung beträgt laut Hersteller $\pm 0,01$ m. Voruntersuchungen haben gezeigt, dass diese Genauigkeit für den hier vorgestellten Anwendungsfall ausreichend ist [Hansen 2009]. Der Messbereich für Distanzmessungen liegt bei $0,1 - 5$ m. Die maximale Messdistanz ist abhängig von der eingestellten Modulationsfrequenz f_m . Bei einer Modulationsfrequenz von 30 MHz beträgt die maximale Messdistanz $4,997$ m [MESA Imaging AG 2011]. Die Angaben des Herstellers wurden durch die Arbeiten von [Chiabrando et al. 2010], [Lichti et al. 2010] oder [Piatti et al. 2012] verifiziert.

Des Weiteren wurde geprüft, inwiefern PVC Materialien, wie sie bei der Herstellung von KG-Rohren verwendet werden, die Qualität der Messung beeinflussen. Die Untersuchungen

haben keine Einschränkungen bezüglich des Einsatzes der SR4000 ergeben [Weber 2010]. Die wichtigsten Spezifikationen der SR4000 sind in Tabelle 3.1 zusammengefasst. Die gewonnenen Erkenntnisse können auf ToF-Kameras mit entsprechenden Spezifikationen übertragen werden. Ein Aufnahme der Kamera liefert Amplituden und Distanzmessungen in

Tabelle 3.1: Spezifikationen und Einstellungen der SR4000 [MESA Imaging AG 2011]

Spezifikationen:	
Auflösung	144 (V) x 176 (H)
Genauigkeit	$\pm 0,01$ m
Messbereich Distanzmessung	0,1 - 5 m
Horizontaler Öffnungswinkel	43°
Vertikaler Öffnungswinkel	34°
Brennweite	0,01 m
Pixelabstand	40 μ m
Wellenlänge der Belichtungseinheit	850 nm
Gewicht	470 g
Gehäusedimension	65 x 65 x 68 mm
Einstellungen:	
Integrationszeit	1ms
Modulationsfrequenz	30 MHz
Median Filter	ausgeschaltet
Adaptive Neighborhood Filter	eingeschaltet
Conv Gray (Grauwertbild)	ausgeschaltet

Matrixdarstellung sowie die dreidimensionalen Koordinaten im Kamerakoordinatensystem. In Abbildung 3.3 sind die Distanzmessungen sowie die Punktwolke einer Aufnahme mit der SR4000 im Rohr dargestellt.

Die durchgeführten Untersuchungen erfolgten mit den in Tabelle 3.1 aufgelistete Einstellungen der SR4000.

3.1.2 Positioniersystem

Für die Durchführung der Versuche wurde ein mechanisches Positioniersystem für die SR4000 entwickelt, mit dem unter Laborbedingungen Lagewinkel und Lageabweichungen innerhalb eines Rohres simuliert werden können. Das System besteht aus einem Drehtisch DT65 (siehe Abbildung 3.4) und einem Messtisch MT605-50 (siehe Abbildung 3.5) der Firma OWIS.

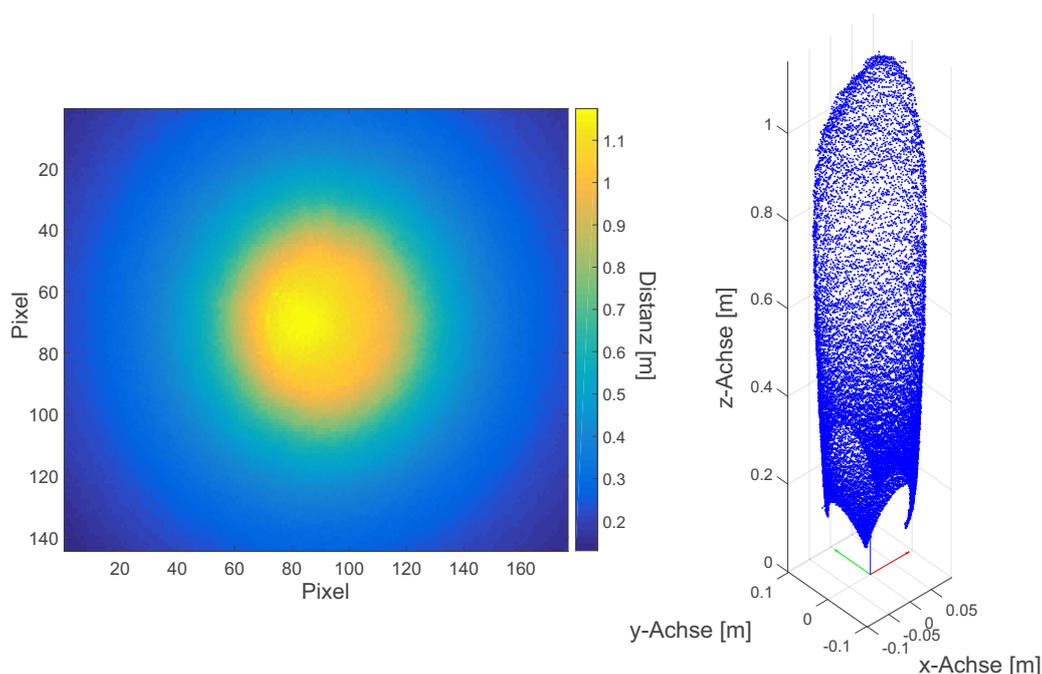


Abbildung 3.3: Distanzbild (links) und Punktwolke (rechts) einer Aufnahme mit der SR4000 im Rohr (KS_K).

Drehtisch DT65: Der Aufbau des DT65 setzt sich aus einem Präzisions-Wälzlager sowie einem spielarmen Schneckengetriebe zusammen. Dies ermöglicht eine unbegrenzte Anzahl an Drehungen des Drehtellers. Die Skalenteilung des Drehtellers beträgt 2° . Die Teilung des Drehknopfes beträgt $0,6$ mrad. Es sind mit dem DT65 somit Einstellungen im Bereich von zwei Grad-Minuten möglich. Einstellungen im Bereich von einer Grad-Minute können anhand der Position zwischen zwei Skalenstrichen geschätzt werden. Die Einstellempfindlichkeit liegt laut Hersteller bei $97 \mu\text{rad}$ [OWIS 2015].

Messtisch MT605-50: Der MT605-50 ist ein Messtisch mit einer verbauten Kreuzrollenführung, mit dem lineare Bewegungen entlang einer Achse möglich sind. Der Messweg beträgt maximal 50 mm. Die Einstellung des Messwegs ist in $10 \mu\text{m}$ möglich. Laut Hersteller beträgt die Einstellempfindlichkeit $2 \mu\text{m}$ [OWIS 2015].

Kombination aus DT65 und MT605-50: Der Drehtisch DT65 ist auf den Messtisch MT605-50 montiert. In Abbildung 3.6 sind das System sowie die Einstellungsmöglichkeiten abgebildet. Durch Änderung der Einstellungen am MT605-50 können Lageabweichungen der ToF-Kamera bezüglich der mittleren Rohrachse simuliert werden. Mit dem DT65 können Schwimm- bzw. Lagewinkel im Rohr nachgestellt werden. Bei der Simula-



Abbildung 3.4: Drehtisch DT65 der Firma OWIS.

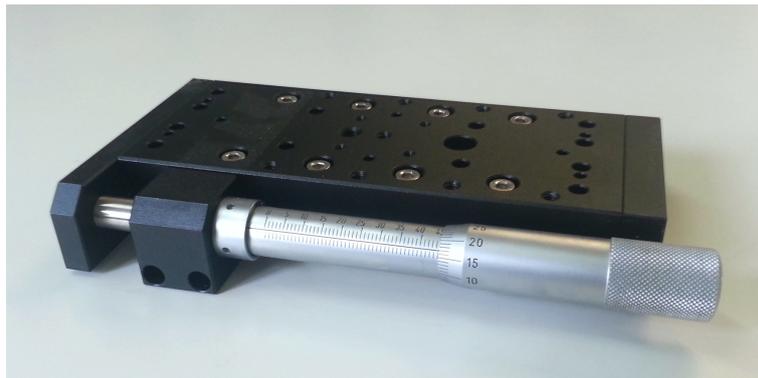


Abbildung 3.5: Messtisch MT605-50 der Firma OWIS.

tion einer Aufnahme mit einem Schwimmwinkel der ToF-Kamera muss die Lage des Ursprungs des Kamerakoordinatensystems zur Drehachse berücksichtigt werden (siehe Skizze in Abbildung 3.6 rechts). Aufgrund der Montagevorrichtung fällt der Ursprung der y-Achse des Kamerakoordinatensystems nicht mit der Drehachse des Drehtisches zusammen. Aus diesem Grund kommt es bei der Simulation eines Schwimmwinkels immer zu einer ungewollten Verschiebung des Ursprungs der ToF-Kamera bezüglich der mittleren Rohrachse. Diese muss bei den Versuchen berechnet und mit dem MT605-50 korrigiert werden. Auf die Installation und Einmessung des Positioniersystems wird in Kapitel 4.4 noch im Detail eingegangen.

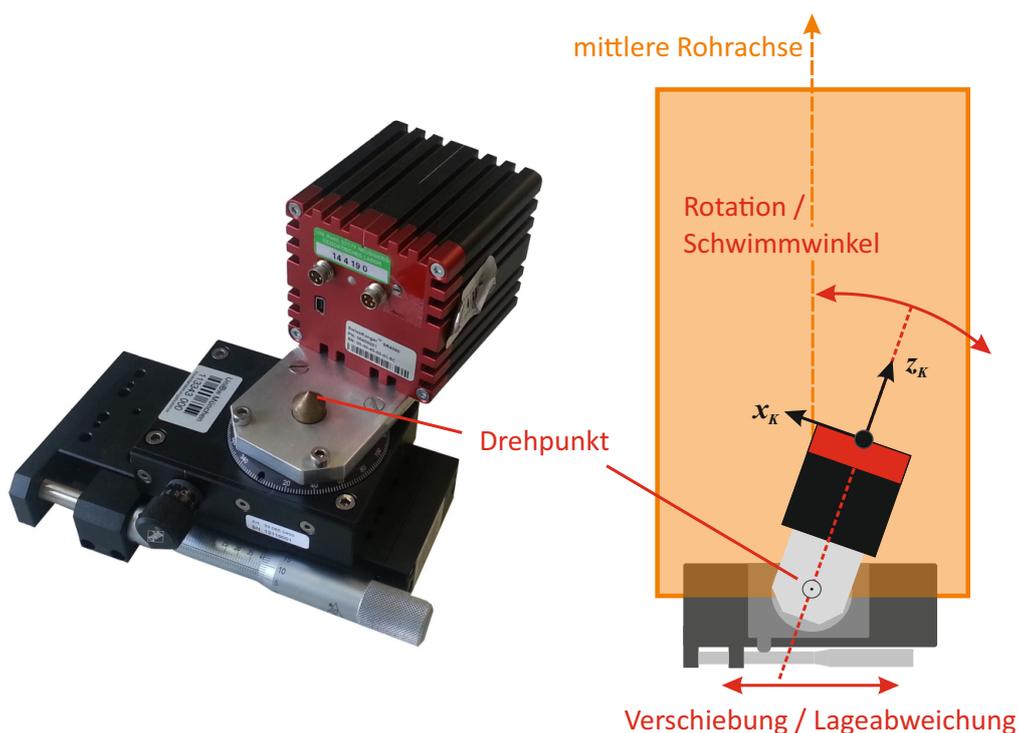


Abbildung 3.6: Mögliche Bewegungen der SR4000 im Rohr mittels einer Kombination aus DT65 und MT605-50.

3.2 Verwendete Auswerteverfahren

3.2.1 Oberflächennormale

Die beiden in Kapitel 1.3 vorgestellten Verfahren RANSAC und Hough-Transformation benötigen zur Bestimmung der Zylinderparameter Oberflächennormalen. Diese beschreiben die Lage bzw. Orientierung der theoretischen Oberfläche am jeweiligen Messpunkt in der aufgenommenen Szene. In [Klasing et al. 2009] sind verschiedene Ansätze zur Bestimmung der Oberflächennormalen aufgelistet. Diese Arbeit verwendet das in [Rusu 2009] und [Klasing et al. 2009] beschriebene Vorgehen zur Bestimmung der Oberflächennormalen basierend auf einem statistischen Optimierungsansatz mittels der Principal Component Analysis (PCA) [Berkmann et al. 1994].

Verfahren zur Bestimmung der Oberflächennormale

Der erste Schritt bei diesem Verfahren ist die Bestimmung der n nächsten Nachbarn zu dem Punkt, dessen Oberflächennormale bestimmt werden soll. In [Rusu 2009] wird die Bestimmung der nächsten Nachbarn mit Hilfe der euklidischen Distanz als sehr rechenintensive

Methode beschrieben. Aus diesem Grund werden auch alternative Ansätze vorgestellt, die versuchen, die nächsten Nachbarn zu schätzen. [Rusu 2009] weist auch auf die Problematik der Wahl des optimalen Faktors n . Dieser wirkt sich direkt auf die Qualität der Normalenbestimmung aus.

Nach der Bestimmung der nächsten Nachbarn erfolgt die Berechnung des Schwerpunkts \vec{x}_s nach der Formel (3.5). Der Messpunkt, für den die Oberflächennormale bestimmt werden soll, geht dabei nicht in die Berechnung des Schwerpunkts ein [Berkmann et al. 1994].

$$\vec{x}_s = \frac{1}{n} \cdot \sum_{i=1}^n \vec{x}_i \quad (3.5)$$

Aus dem berechneten Schwerpunkt und den Koordinaten der Nachbarpunkte wird eine sogenannte lokale Oberflächen-Kovarianzmatrix C nach Formel (3.6) erstellt. Bei dieser Kovarianzmatrix handelt es sich um eine symmetrisch, positiv semidefinite Matrix. Dementsprechend können die drei reellen Eigenwerte und Eigenvektoren relativ einfach berechnet werden. Die zwei Eigenvektoren mit den größten Eigenwerten spannen eine Ebene auf, die eine Näherung für die Oberflächen-Tangentialebene darstellt [Liang et al. 1990]. Da die Eigenvektoren orthogonal zueinander liegen, entspricht der dritte Eigenvektor automatisch der Normalen der genäherten Tangentialebene und hat dementsprechend auch den kleinsten Eigenwert [Rusu 2009].

$$C = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n (\vec{x}_i - \vec{x}_s) \cdot (\vec{x}_i - \vec{x}_s)^T \quad (3.6)$$

Im Weiteren beschreibt [Rusu 2009] die Möglichkeit, die Normalen \vec{n} bezüglich eines festen Standpunkts s zu orientieren. Dazu muss jede Normale so orientiert werden, dass sie die Gleichung (3.7) erfüllt:

$$\vec{n}_i \cdot (s - \vec{x}_i) > 0 \quad (3.7)$$

Als Standpunkt wird in diesem Fall immer der Ursprung des Kamerakoordinatensystems verwendet. Abbildung 3.7 zeigt den Unterschied zwischen nicht orientierten (linke Abbildung) und zum Ursprung orientierten Oberflächennormalen (rechte Abbildung). Dieses Vorgehen vereinfacht die weiteren Berechnungen bei der Bestimmung von Mehrwegeeffekten.

Die Bestimmung der nächsten Nachbarn erfolgt anhand der Nachbarschaftsbeziehungen auf dem Sensorchip. Aufnahmen innerhalb eines Rohres beinhalten kaum komplexe dreidimensionale Strukturen, aus diesem Grund ist dieses Vorgehen vertretbar. Der Vorteil liegt

in der wesentlich schnelleren Berechnung der Oberflächennormalen als bei der Bestimmung der nächsten Nachbarn anhand der euklidischen Distanz.

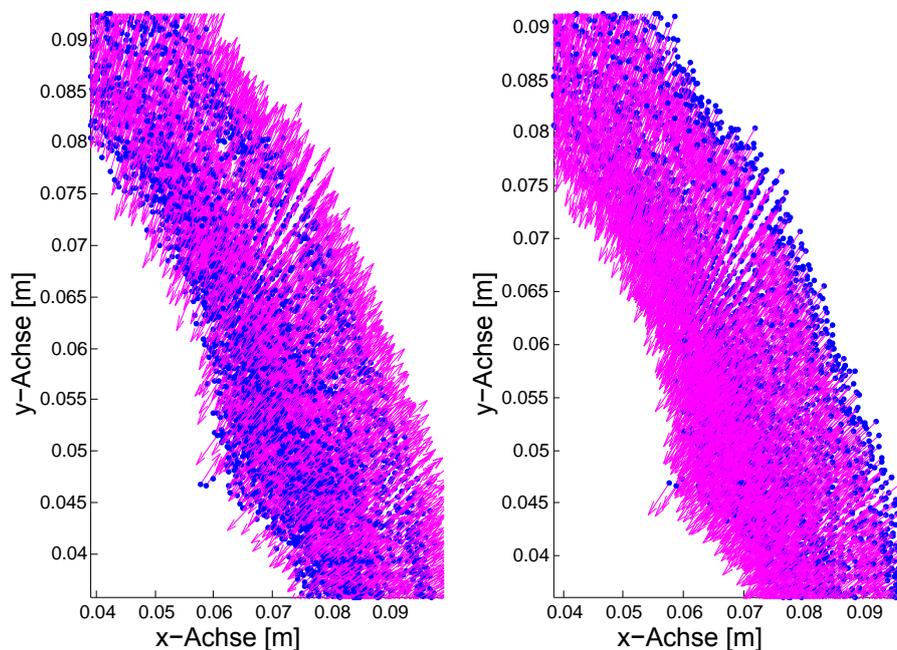


Abbildung 3.7: Teilabschnitt der Punktwolke eines Rohres (blau) mit dazugehörigen berechneten Oberflächennormalen (magenta). Das linke Bild zeigt einen Abschnitt mit nicht orientierten Normalen, das rechte den gleichen Abschnitt mit zum Ursprung orientierten Oberflächennormalen.

Anzahl der einzubeziehenden Nachbarn

Die Anzahl der einbezogenen Nachbarn n hat Auswirkungen auf die Qualität der Bestimmung der Oberflächennormalen. n wird auch häufig als Skalierungsfaktor bezeichnet. Die Wahl des am besten passenden Skalierungsfaktors ist direkt abhängig von der aufgenommenen Szene sowie von der jeweiligen Punktdichte und Punktverteilung in der Aufnahme. In [Rusu 2009] ist dies anhand der Aufnahme eines Würfels dargestellt. Die Kanten eines Würfels sind bei der Verwendung eines geringen Skalierungsfaktors relativ scharf abgegrenzt. Wird hingegen eine größere Anzahl an Nachbarpunkten zur Normalenbestimmung verwendet, werden die Kanten verschliffen (siehe Abbildung 3.8). Ein weiterer wichtiger Aspekt bei der Wahl des Skalierungsfaktors ist die Robustheit gegenüber Fehlmessungen. Bei einem geringen Skalierungsfaktor wirken sich einzelne Fehlmessungen wesentlich stärker auf die Qualität der Normalenbestimmung aus als bei einem größeren Skalierungsfaktor.

Aufnahmen in einem runden Rohr beinhalten kaum kantenähnliche Strukturen, dementsprechend besteht auch nicht die Gefahr des Verschleifens von Strukturen in der aufgenommenen Szene. Die Anzahl der einbezogenen Nachbarpunkte kann daher durchaus höher angesetzt werden. Die Auswirkungen von eventuell vorhandenen Messfehlern auf die Normalenbestimmung wird so verringert. Voruntersuchungen haben gezeigt, dass die Verwendung der 25 nächsten Nachbarpunkte im gegebenen Anwendungsfall qualitative gute Ergebnisse bei der Normalenbestimmung liefert.

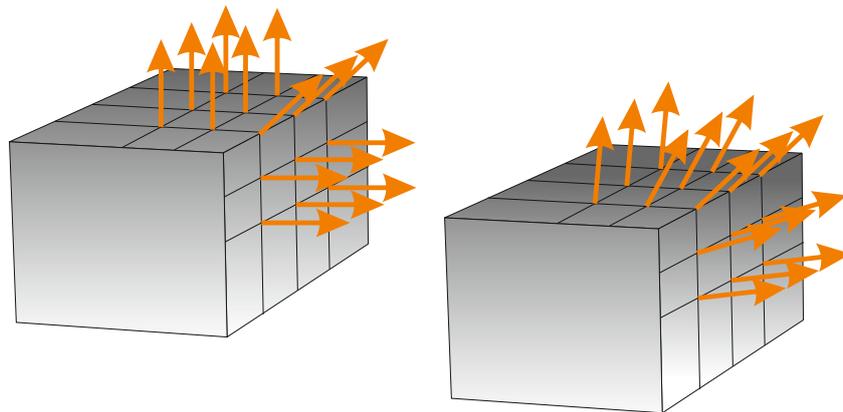


Abbildung 3.8: Auswirkung des Skalierungsfaktors auf die Normalenbestimmung im Bereich von Kanten. Rechts: Normalenbestimmung mit einer geringen Anzahl an Nachbarpunkten. Links: Normalenbestimmung mit einer größeren Anzahl an Nachbarpunkten.

3.2.2 RANSAC

Der RANSAC Algorithmus ist ein vielfach einzusetzender robuster Algorithmus zur Schätzung von Modellparametern. In diesem Fall entsprechen die Modellparameter den Zylinderparametern, die anhand der aufgenommenen Punktwolke bestimmt werden. Das Modell wird anhand einer zufälligen Auswahl (Stichprobe) von zwei Punkten der Punktwolke geschätzt und dann bezüglich seiner Qualität bewertet. Dieser Vorgang wird solange wiederholt, bis eine Wahrscheinlichkeitsfunktion das aktuelle Modell als „korrekt“ einstuft. Der RANSAC Algorithmus selbst wurde 1980/81 von [Fischler et al. 1981] vorgestellt. Die erste Beschreibung der Verwendung von RANSAC zur Bestimmung von Zylindern erfolgte kurz darauf durch [Holies et al. 1981]. Das hier verwendete Vorgehen zur Bestimmung der Zylinderparameter orientiert sich an [Schnabel et al. 2007]. Im Folgenden wird kurz das Vorgehen zur Bestimmung der Zylinderparameter mittels RANSAC dargestellt.

Bestimmung der Zylinderparameter

1. Aufstellung des Modells
 - (a) Aus der Punktwolke werden zufällig zwei Punkte (P_1, P_2) ausgewählt und deren zugehörige Oberflächennormalenvektoren (\vec{n}_1, \vec{n}_2) bestimmt. Die Kombination aus Punkt und Oberflächennormalenvektor beschreibt jeweils eine Normale.
 - (b) Bestimmung der Orientierung a des Zylinders durch Bildung des Kreuzprodukts aus den beiden Oberflächennormalenvektoren $\vec{n}_1 \times \vec{n}_2 = a$.
 - (c) Projektion der beiden Normalen entlang a in die Ebene $a \cdot x = 0$.
 - (d) Bestimmung des Schnittpunkts c der beiden projizierten Normalen. Dieser entspricht dem Aufpunkt des Zylinders.
 - (e) Der Radius entspricht der Distanz von einem der projizierten Punkte zum Schnittpunkt c .

2. Bestimmung in Abhängigkeit von einem vordefinierten Grenzwert, wie viele Punkte der Punktwolke das aktuelle Modell unterstützen. Diese Punkte werden als "Inlier" bezeichnet.

3. Prüfung, ob das aktuell bestimmte Modell besser als die bisherigen Modelle ist. Dies erfolgt in Abhängigkeit von der Anzahl der Inlier. Unterstützen das aktuelle Modell mehr Inlier als bei den vorherigen Modellen, wird das aktuelle Modell als das beste Modell beibehalten, ansonsten wird es verworfen.

Diese Schritte werden wiederholt, bis ein vordefiniertes Abbruchkriterium erfüllt ist. Die Inlier des besten Modells gehen anschließend in eine Ausgleichung nach dem Prinzip der kleinsten Quadrate ein, um die Qualität der bestimmten Zylinderparameter zu verbessern. Als Ausgleichungsverfahren wird hier der Levenberg-Marquard-Algorithmus verwendet [Madsen et al. 2004; Nash 1979].

Darüber hinaus wird eine Erweiterung des RANSAC Algorithmus eingesetzt, der schon in Kapitel 2 erwähnte LO RANSAC nach [Chum et al. 2003]. Dieser beinhaltet im Vergleich zum eben beschriebenen Vorgehen noch zwei zusätzliche Arbeitsschritte. Nach der Bestimmung der Inlier (Punkt 2 der Auflistung) erfolgt eine Ausgleichung der Zylinderparameter mit den das Modell unterstützenden Inliern. Mit den ausgeglichenen Zylinderparametern werden anschließend nochmals die Inlier bestimmt. Dieses Vorgehen erhöht die Qualität der Modelle und damit auch der bestimmten Zylinderparameter.

Grenzwerte und Abbruchkriterien

Die Prüfung, ob ein Punkt der Punktwolke dem Modell entspricht und damit als Inlier gewertet wird, erfolgt in Abhängigkeit von zwei Parametern: der Distanzabweichung d_{euclid} und der Normalenabweichung d_{norm} . Im Folgenden wird das Vorgehen in der Open Source Bibliothek “Point Cloud Library” (www.pointclouds.org) vorgestellt. Die Distanzabweichung d_{euclid} beschreibt den Abstand eines Punktes zum Zylindermantel auf der Lotlinie zur Zylinderachse. Die Normalenabweichung d_{norm} beschreibt die Divergenz einer Oberflächennormalen zur Lotlinie. Diese wird im Bogenmaß berechnet und kann so auch als Distanz angesehen werden. Um die beiden Distanzen zu gewichten, wird der Gewichtungsfaktor ζ eingeführt. Die damit berechnete Distanz muss unterhalb eines vorgegebenen Grenzwertes t liegen, um als Inlier eingestuft zu werden (Formel 3.8).

$$\zeta \cdot d_{norm} + (1 - \zeta) \cdot d_{euclid} < t \quad (3.8)$$

Die Wahl des Grenzwertes bzw. Gewichtungsfaktors ist von verschiedenen Faktoren, wie der Genauigkeit oder Verteilung der Messpunkte abhängig. Aus diesem Grund müssen die Parameter mit Bezug zum jeweiligen Anwendungsfall bestimmt werden.

Bei den durchgeführten Voruntersuchungen hat sich gezeigt, dass bei einer getrennten Betrachtung der Distanzabweichung d_{euclid} und der Normalenabweichung d_{norm} ohne Gewichtung, die Bestimmung der Inlier korrekter erfolgt. Aus diesem Grund werden zwei Grenzwerte definiert: Einer für die Distanzabweichung t_D und einer für die Normalenabweichung t_N . Überschreitet ein Messpunkt bei der Prüfung einen der beiden Grenzwerte, wird er nicht als Inlier gewertet.

Das Abbruchkriterium bei RANSAC Algorithmen kann entweder als feste Anzahl von Iterationen definiert oder mittels einer Wahrscheinlichkeitsfunktion geschätzt werden. In [Fischler et al. 1981] wird mit Hilfe einer Wahrscheinlichkeitsfunktion die Anzahl der benötigten Iterationen n nach folgender Formel berechnet:

$$n \geq \frac{\log(1 - p)}{\log(1 - (1 - \epsilon)^s)} \quad (3.9)$$

Hierbei steht p für die Wahrscheinlichkeit, mindestens einmal eine von Ausreißern, also Punkten die das Modell nicht unterstützen, freie Teilmenge aus der Punktwolke zu erhalten. ϵ beschreibt den relativen Anteil an Ausreißern und wird beim ersten Durchlauf geschätzt und danach bei jeder Iteration in Abhängigkeit vom Modell neu berechnet. s gibt die Anzahl der Punkte an, die zur Modellbildung benötigt werden.

3.2.3 Hough-Transformation

In [T. S. Rabbani et al. 2005] wird die Bestimmung von Zylindern in Punktwolken mittels der Hough-Transformation beschrieben. Dieses Verfahren kann in zwei getrennt voneinander zu betrachtende Arbeitsschritte gegliedert werden:

1. Bestimmung der besten Zylinderorientierung mittels einer Hough-Transformation der Oberflächennormalen.
2. Bestimmung von Aufpunkt und Radius mittels einer Hough-Transformation unter Verwendung der Punkte, die im ersten Schritt der besten Zylinderorientierung zugeordnet worden sind (Inlier der Orientierung).

Das hier beschriebene Vorgehen orientiert sich an [T. S. Rabbani et al. 2005] und soll im folgenden Abschnitt kurz erläutert werden.

Bestimmung der Zylinderorientierung

Zur Bestimmung der Zylinderorientierung muss zuerst ein sogenannter Dual- oder auch Hough-Raum geschaffen werden, der die möglichen Parameter für die Zylinderorientierung enthält. Es handelt sich in diesem Fall um eine Hemisphäre mit dem Radius 1 und in Abhängigkeit von Länge und Breite gleich verteilten Akkumulationspunkten (siehe Abbildung 3.9 rechts). Die Erstellung des Hough-Raums erfolgt nach der sogenannten “Approximative Uniform Sampling Methode” [Lutton et al. 1994; T. S. Rabbani 2006; Rusin 1998]. Die Auflösung des Hough-Raums, also die verwendeten Inkremente für Länge und Breite, sollte der gewünschten Genauigkeit zur Bestimmung der Zylinderorientierung entsprechen. Ausgehend von der Tatsache, dass sich die Oberflächennormalen eines Zylinders in der Gaußschen-Sphäre als Kreis darstellen, wird nun jeder Oberflächennormale ein Großkreis zugeordnet. Die Oberflächennormale bildet die Normale der Ebene in der dieser Großkreis liegt (siehe Abbildung 3.9 links). Die Zylinderorientierung entspricht im Idealfall dem Schnittpunkt aller Großkreise (siehe Abbildung 3.9 Mitte). Um diesen Schnittpunkt zu bestimmen, werden für jeden Großkreis die Schnittpunkte mit dem Hough-Raum berechnet. Jeder von einem Großkreis geschnittene Akkumulationspunkt des Hough-Raums wird um eins erhöht. Wurde dies mit allen Großkreisen der Oberflächennormalen durchgeführt, kann anhand des Akkumulationspunktes mit dem größten Wert die Zylinderorientierung direkt abgeleitet werden. Alle Punkte, deren zugehöriger Großkreis den Akkumulationspunkt mit dem größten Wert schneidet, werden als Inlier der Orientierung bezeichnet.

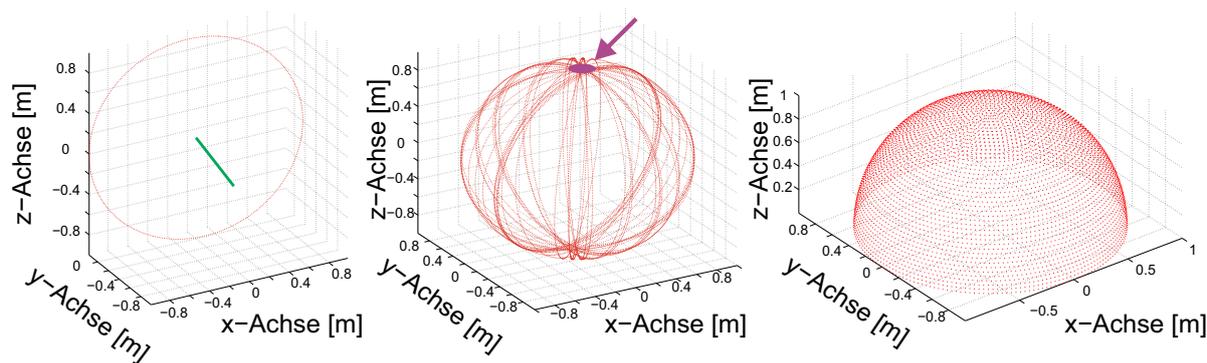


Abbildung 3.9: Bestimmung der Zylinderorientierung. Links: einzelner Großkreis mit dazugehöriger Oberflächennormale (grün). Mitte: mehrere Großkreise mit Schnittpunkt im Bereich des Pols (markiert durch Pfeil). Rechts: mit “Approximative Uniform Sampling Methode” erstellter Hough-Raum.

Bestimmung von Aufpunkt und Radius eines Zylinders

Die Bestimmung des Aufpunktes und des Radius des Zylinders erfolgt unter Verwendung der im vorherigen Schritt bestimmten Inlier. Diese Punkte werden auf eine Ebene uv mit einer der Zylinderorientierung entsprechenden Normalen projiziert und dann in die xy -Ebene transformiert (siehe Abbildung 3.10 links).

Zur Bestimmung des Aufpunktes und des Radius wird wieder ein Hough-Raum erstellt. Dazu wird ein einfaches Punktraster über die xy -Ebene gelegt. Die Punkte dieses Rasters dienen als Akkumulationspunkte. Um die projizierten und transformierten Inlier der Orientierung werden nun sukzessiv Kreise mit verschiedenen Radien gelegt und mit den Akkumulationspunkten verschnitten (siehe Abbildung 3.10 rechts).

Die Akkumulationspunkte werden für jeden Kreisradius entsprechend der Anzahl der Verschnidungen erhöht. Als nächstes wird im Hough-Raum nach dem stärksten Akkumulationspunkt gesucht. Der zu diesem Punkt assoziierte Radius entspricht dem Zylinderradius. Da sich die Akkumulationspunkte in der xy -Ebene befinden, können die x - und y -Koordinaten für den Aufpunkt direkt aus dem Hough-Raum abgeleitet werden. Am Schluss erfolgt eine Rücktransformation des Aufpunktes in die uv -Ebene.

Das Vorgehen lässt sich anhand Abbildung 3.10 (rechts) verdeutlichen: In der xy -Ebene sind um die projizierten und transformierten Punkte Kreise mit drei verschiedenen Radien (blau, grün und rot) eingezeichnet. Wie anhand der Abbildung ersichtlich, schneiden sich die grünen Kreise in der Mitte des Zylinders. An dieser Stelle liegt somit der Akkumulationspunkt mit dem höchsten Wert. Der Zylinderradius entspricht dem Radius der grünen Kreise und anhand der Position des Akkumulationspunktes lässt sich die Lage des Auf-

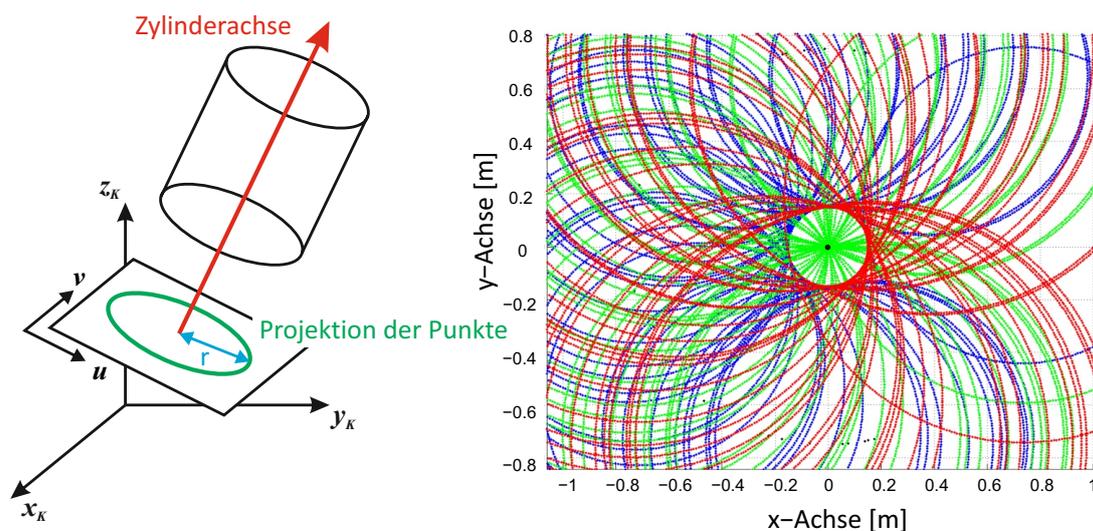


Abbildung 3.10: Bestimmung von Aufpunkt und Radius bei der Hough-Transformation. Links: Skizze der Projektion der Punkte in die uv -Ebene. Rechts: Darstellung der um die projizierten und transformierten Punkte gebildeten Kreise.

punktes ableiten. Wie auch bei der Bestimmung der Orientierung können die Inlier, also die dem maximalen Akkumulationspunkt zugewiesenen Punkte, bestimmt werden. Diese werden als Inlier der gesamten Hough-Transformation bezeichnet.

Die Auflösung der Radien sowie des Punktrasters müssen entsprechend der gewünschten Genauigkeit, mit der Aufpunkt und Radius bestimmt werden sollen, angepasst werden.

Die Durchführung der Hough-Transformation kann, wie in [Su et al. 2010] beschrieben, in mehreren Stufen erfolgen, um den Rechenaufwand und damit die Rechenzeit zu minimieren. Zuerst wird eine Grobsuche der Zylinderparameter durchgeführt. Dazu wird zunächst eine größere Auflösung der Hough-Räume zur Bestimmung von Orientierung, Aufpunkt und Radius verwendet. Im nächsten Schritt erfolgt eine Feinsuche mit höherer Auflösung in einem bestimmten Bereich um die in der Grobsuche gefundenen Zylinderparameter. Die detailliertere Feinsuche kann in Abhängigkeit von der gewünschten Genauigkeit beliebig oft wiederholt werden.

Die bestimmten Inlier können anschließend wie bei RANSAC einer Ausgleichung nach dem Prinzip der kleinsten Quadrate zugeführt werden, um die Qualität der bestimmten Zylinderparameter zu verbessern.

Pufferbereiche

In den für diese Arbeit durchgeführten Versuchen hat sich gezeigt, dass bei einer hohen Auflösung der Hough-Räume (zum Beispiel 1° bei der Bestimmung der Orientierung oder

0,01 m bei der Bestimmung von Aufpunkt und Radius) oftmals nur eine sehr geringe Anzahl an Inliern den maximalen Akkumulationspunkten zugeordnet wird. Dementsprechend gehen auch nur sehr wenige Punkte in die Ausgleichung mit ein. In manchen Fällen sind dies nur bis zu 200 Punkte von den theoretisch möglichen 25.344 Punkten. Aus diesem Grund wird, wie auch in [T. S. Rabbani 2006] beschrieben, ein Puffer um die maximalen Akkumulationspunkte der Hough-Räume bei der Orientierung- sowie Aufpunkt- und Radiusbestimmung gelegt, um die Anzahl der Inlier zu erhöhen. Alternativ kann auch einfach die Auflösung der Hough-Räume verringert werden.

3.2.4 Verfahren zur Korrektur von Mehrwegeeffekten

Im Folgenden werden die in Kapitel 2 erwähnten Verfahren zur Korrektur von Mehrwegeeffekten (engl.: Multipath) nach [Fuchs 2012] und [Jiménez et al. 2012] vorgestellt. Da beide Verfahren radiometrische Mehrwegmodelle verwenden, sollen nachfolgend kurz die benötigten radiometrischen Grundgrößen sowie die Grundlagen der Mehrwegmodelle vorgestellt werden. Anschließend werden die verschiedenen Vorgehensweisen der beiden Ansätze kurz erläutert.

Strahlungsphysikalische (radiometrische) Grundgrößen

Unter Radiometrie wird grundsätzlich die Messung von elektromagnetischen Strahlungen verstanden. Die Radiometrie bezieht sich dabei auf das ganze elektromagnetischen Spektrum. Die folgende Beschreibung der Grundgrößen orientiert sich an den Arbeiten von [Mayer 2015], [Encarnaçao 1996] und [Hering et al. 2002].

Raumwinkel Ω : Bei der Berechnung des energetischen Einflusses einer Strahlungsquelle auf einen Strahlungsempfänger wird der Raumwinkel Ω bzw. sein Differential $d\Omega$ eingesetzt, um die Abhängigkeit der scheinbaren Größe einer Fläche von der Ausrichtung und dem Abstand zu einem bestimmten Punkt zu beschreiben. Der Raumwinkel wird als beleuchtete Fläche A_2 auf einer Kugel mit Radius r definiert. Der Mittelpunkt der Kugel ist die Lage der Strahlungsquelle S . Die Fläche A_2 ist der Strahlungsempfänger. Die Strahlung der Quelle trifft somit mit dem Raumwinkel $d\Omega = dA_2/r^2$ auf die Fläche A_2 (siehe Abbildung 3.11). Nach [Hering et al. 2002] entstehen keine nennenswerten Fehler, wenn eine ebene Empfängerfläche anstatt einer kugelförmigen Fläche verwendet wird, falls folgende Bedingung erfüllt ist: Der Abstand zwischen Strahlungsquelle und Fläche muss mindestens dem 10-fachen der größeren Querdimension von beiden entsprechen. Dieser Mindestabstand

wird auch als photometrische Grenzentfernung bezeichnet. Die SI-Einheit des Raumwinkels ist Steradian $1 \text{ sr} = 1 \text{ m}^2/\text{m}^2$. Erfüllt die Strahlung der Strahlungsquelle den ganzen Raum, beträgt der größtmögliche Raumwinkel $4\pi \text{ sr}$.

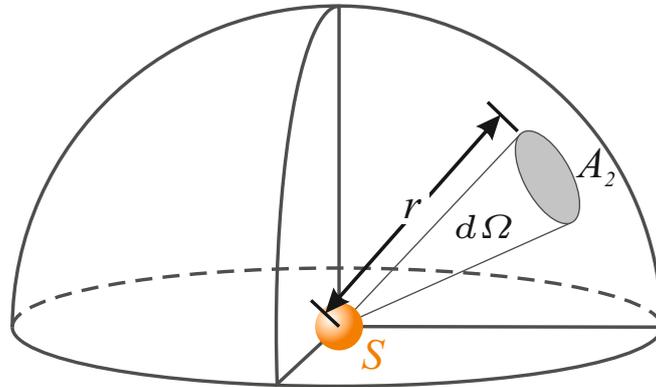


Abbildung 3.11: Komponenten der Raumwinkelberechnung.

Bei der Berechnung des Raumwinkels muss die Projektion der Fläche A_2 auf die Projektionsrichtung (Verbindungsgerade zwischen Strahlungsquelle S und der Fläche A_2) berücksichtigt werden. Die Formel für den Raumwinkel wird somit um den Kosinus des Winkels ε_2 zwischen der Oberflächennormalen und der Projektionsrichtung erweitert.

$$d\Omega = \frac{\cos \varepsilon_2}{r^2} dA_2 \quad (3.10)$$

Die Berechnung des Raumwinkels einer endlichen Fläche erfolgt durch die Integration, wie in Formel 3.11 beschrieben.

$$\Omega = \int_A \frac{\cos \varepsilon_2}{r^2} dA_2 \quad (3.11)$$

Strahlungsleistung Φ_e und Strahldichte L_e : Mittels radiometrischer Modelle werden die Einflüsse einer Strahlungsquelle auf einen Strahlungsempfänger abgeschätzt. Anhand der Strahlungsleistung Φ_e und der Strahldichte L_e können die übertragenen Energien bzw. Leistungen von einem Sender auf einen Empfänger berechnet werden.

Die Strahlungsleistung Φ_e , oder auch Strahlungsfluss genannt (engl.: radiant flux), beschreibt dabei die Strahlungsenergie (Photonen) pro Zeiteinheit (siehe 3.12).

$$\Phi_e = \frac{dQ_e}{dt} \quad (3.12)$$

Die Strahlungsleistung, die auf eine Fläche trifft, ist primär nicht direkt von der Form oder der Größe der Fläche abhängig, sondern vom Raumwinkel, den diese Fläche zur Strahlungsquelle einnimmt.

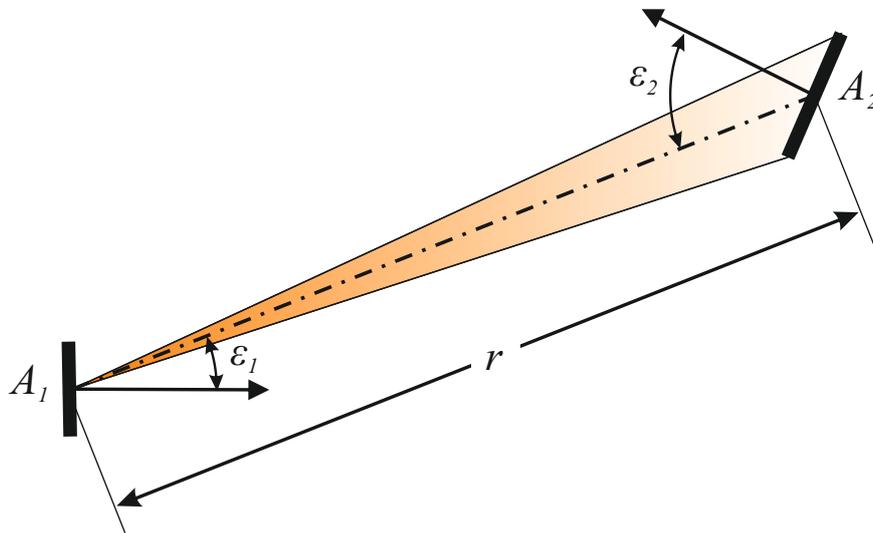


Abbildung 3.12: Räumliche Komponenten zwischen Strahlungsquelle und empfangender Fläche.

Die Strahlungsleistung lässt sich somit anhand der Strahlstärke I_e (engl.: intensity) und des jeweiligen Raumwinkels nach der Formel 3.13 berechnen.

$$\Phi_e = I_e \Omega \quad \text{oder} \quad I_e = \frac{\Phi_e}{\Omega} \quad [\text{Wsr}^{-1}] \quad (3.13)$$

Zur Beschreibung einer Strahlungsquelle, die grundsätzlich orts- und richtungsabhängig ist (siehe Abbildung 3.12), wird die sogenannte Strahldichte (engl.: radiance) L_e benötigt.

$$L_e = \frac{I_e}{A_1 \cos \varepsilon_1} \quad [\text{Wsr}^{-1} \text{m}^{-2}] \quad (3.14)$$

Photometrisches Grundgesetz: Durch Einsetzen der Gleichung 3.13 der Strahlungsintensität in Gleichung 3.14 der Strahldichte und Umstellen nach der Strahlungsleistung ergibt sich die Gleichung des photometrischen Grundgesetzes:

$$\Phi_e = L_e \frac{A_1 \cos \varepsilon_1 A_2 \cos \varepsilon_2}{r^2} \quad (3.15)$$

Das photometrische Grundgesetz bildet die Grundlage für die im Folgenden vorgestellten Ansätze zu Korrektur von Mehrwegeeffekten.

Radiometrische Mehrwegmodelle

Die Arbeiten von [Fuchs 2012] und [Jiménez et al. 2012] verwenden grundsätzlich sehr ähnliche Mehrwegmodelle. In beiden Fällen wird unter Verwendung eines Lochkamera-Modells der Einfluss der Mehrwegeffekte der gesamten aufgenommenen Szene auf jede einzelne Messung geschätzt. Die Berechnung erfolgt ausschließlich mittels der Distanz- und Amplitudenmessungen einer handelsüblichen ToF-Kamera. Eine detaillierte Beschreibung befindet sich in den genannten Arbeiten.

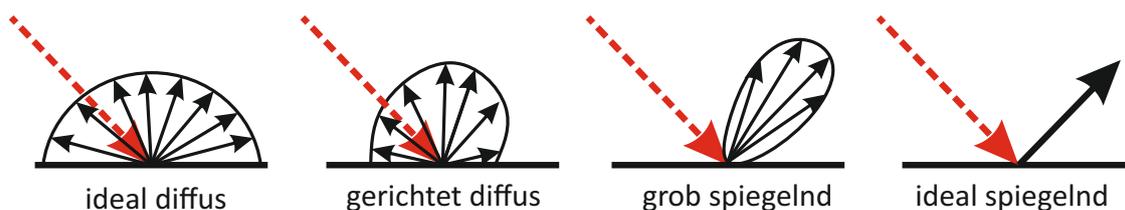


Abbildung 3.13: Verschiedene Kategorien der Reflexion nach [Encarnaço 1996].

Bei Mehrwegeffekten einer Distanzmessung handelt es sich grundsätzlich um einen eindimensionalen Fehler entlang der optischen Strahlrichtung (vom Sensor-Pixel über die Linse), der sich somit direkt auf die Qualität der Distanzmessung auswirkt. Die Mehrwegeffekte können bei jeder einzelnen Messung unterschiedlich groß sein. Die Quantität der Mehrwegeffekte hängt von verschiedensten Faktoren ab. Zu nennen sind der Einfluss der Struktur der aufgenommenen Szene bzw. die Aufnahmerichtung der ToF-Kamera im Bezug zur Szene.

Auch Reflexionseigenschaften der aufgenommenen Materialien können die Quantität der Mehrwegeffekte beeinflussen. In [Encarnaço 1996] werden die Reflexionseigenschaften in die in Abbildung 3.13 dargestellten Kategorien unterteilt. Die Reflexionseigenschaft eines Materials kann aber auch aus einer Kombination der genannten Eigenschaften bestehen. [Cohen et al. 1993] bezeichnen dies als bidirektionale Reflexion.

In den hier vorgestellten Modellen wird das Rückstrahlungsvermögen von diffus reflektierenden Flächen mittels des sogenannten Albedo-Faktors ρ definiert. Es handelt sich um einen dimensionslosen Faktor zwischen 0 und 1. 1 bedeutet, das Material reflektiert die eingehende Strahlung ohne Verluste, 0 bedeutet, die Strahlung wird vom Material vollständig absorbiert.

Die Bestimmung von Mehrwegeffekten ist somit von verschiedenen Parametern abhängig, die in der Realität oftmals nicht genau bekannt bzw. bestimmbar sind. Aus diesem Grund werden in den Mehrwegmodellen Annahmen getroffen, welche die Komplexität dieser ver-

einfachen. Die beiden wichtigsten für die hier verwendeten Mehrwegmodelle getroffenen Annahmen sind:

- Alle aufgenommenen Flächen verhalten sich wie ideale Lambert-Strahler, das heißt Licht wird diffus reflektiert.
- Es wird nur der richtungsabhängige Mehrwegeffekt einer Fläche auf eine andere betrachtet. Dies wird auch als Einwege-Mehrwegeffekt bezeichnet. In der Realität auftretende Mehrwegeffekte, die aufgrund von Reflexion über mehrere Flächen entstehen, werden in den Modellen somit nicht berücksichtigt. Es wird angenommen, dass die Auswirkungen dieser vernachlässigbar gering sind [Fuchs 2012].

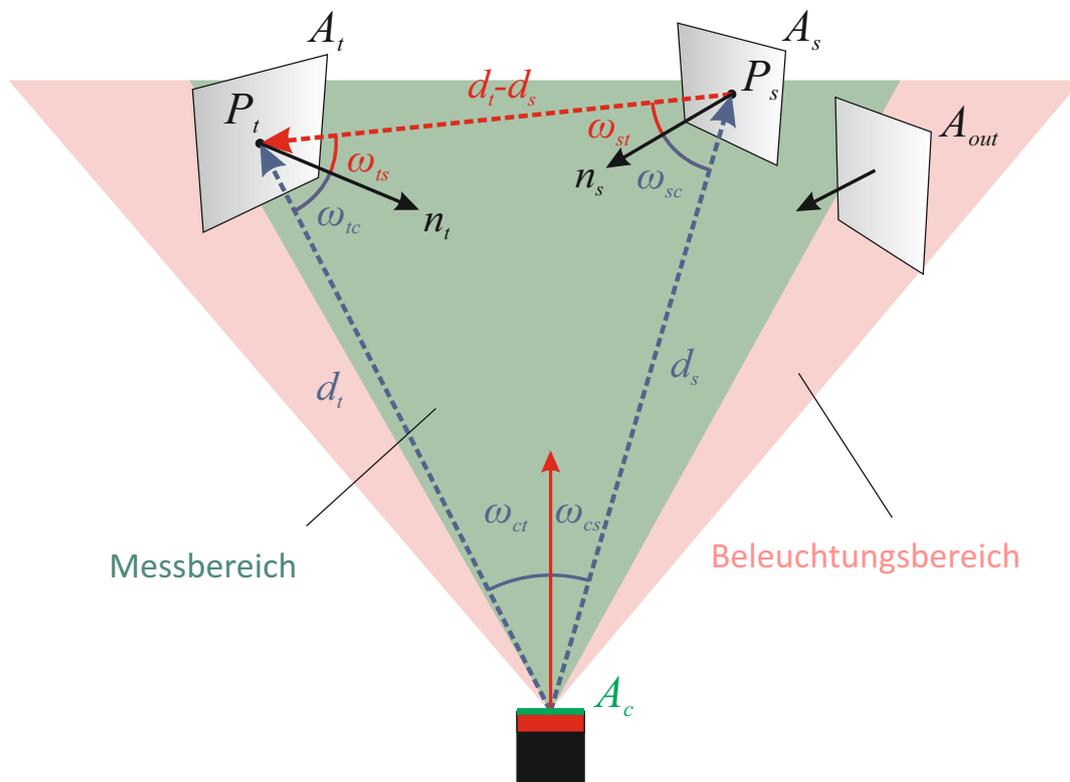


Abbildung 3.14: Mehrwegmodell der Verfahren (nach [Fuchs 2012]).

Abbildung 3.14 zeigt die grundlegenden Komponenten der verwendeten Mehrwegmodelle. Die Beleuchtungseinheit der Kamera mit der Fläche A_c beleuchtet die Flächen A_s und A_t . Die auf der Fläche A_s auftreffende Strahlung wird reflektiert und über $d_t - d_s$ in Richtung der Fläche A_t weitergeleitet. Die dort ankommende Strahlung geht teilweise als Mehrwegeffekt in die Distanzmessung d_t ein.

Grundsätzlich werden bei diesen Modellen für jeden Messpunkt P_t der Kamera die Mehrwegeeffekte aller in Sichtverbindung stehender Messpunkte unter Berücksichtigung deren lokaler Flächenorientierung bestimmt und die Distanzmessung d_t entsprechend der Summe aller Mehrwegeeffekte korrigiert.

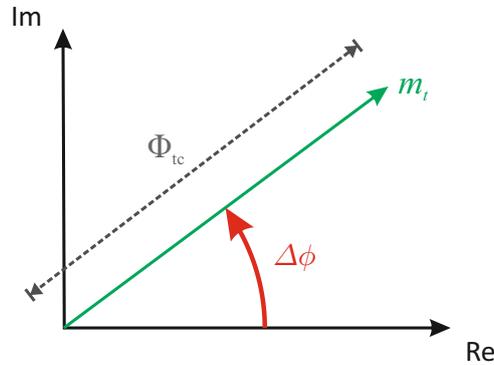


Abbildung 3.15: Darstellung einer Distanzmessung in komplexer Notation nach [Mure-Dubois et al. 2007].

Flächen wie A_{out} , die sich nicht im Messbereich der ToF-Kamera, aber im Beleuchtungsbereich der NIR Beleuchtungseinheit der Kamera befinden, werden in den Modellen nicht berücksichtigt. Wie schon in der obigen Auflistung beschrieben, betrachtet das Mehrwegmodell nur Einwege-Mehrwegeffekte. Der Mehrwegeffekt von Fläche A_{out} über Fläche A_s zu Fläche A_t wird somit nicht berücksichtigt.

Die Parameter des Modells sind direkte Ergebnisse aus den Aufnahmen der ToF-Kamera oder lassen sich daraus ableiten. Die Distanzmessungen d_t und d_s sowie die Messpunkte P_t und P_s sind direkte Ergebnisse der Aufnahme. Die Winkel ω_{ct} und ω_{cs} lassen sich anhand der Lage der Messpunkte zur ToF-Kamera bestimmen. Die Größe der Flächen A_t und A_s sowie die Richtung der Oberflächennormalen n_t und n_s können mittels der benachbarten Messpunkte bestimmt werden (siehe Kapitel 3.2.1). Anhand der Richtung der Oberflächennormalen können dann die Winkel ω_{tc} , ω_{sc} sowie mittels der Verbindungslinie $|d_t - d_s|$ die Winkel ω_{st} , ω_{ts} berechnet werden.

Die Berechnung der um den Mehrwegeffekt korrigierten Distanz erfolgt mittels der komplexen Notation des Messsignals nach [Mure-Dubois et al. 2007]. i wird im Folgenden zur Beschreibung des imaginären Anteils der komplexen Zahl verwendet.

Ein Messsignal $m(t)$ einer idealen Messung setzt sich dabei aus der vorgestellten Strahlungsleistung Φ_{tc} der Fläche zum jeweiligen korrespondierenden Pixel der Kamera und der distanzabhängigen Phasenverschiebung $\Delta\phi$ zusammen (Abbildung 3.15). $|d_t|$ beschreibt dabei die Länge der Distanzmessung d_t .

$$m(t) = \Phi_{tc} \exp(i\Delta\phi 2|d_t|) \quad \text{mit} \quad \Delta\phi = \frac{2\pi f_{mode}}{c} \quad (3.16)$$

Die Beschreibung einer durch Mehrwegeeffekt verfälschten Messung erfolgt nach folgender Notation:

$$\hat{m}(t) = m(t) + m^+(t, s) \quad (3.17)$$

Der Term $m^+(t, s)$ beschreibt den durch die Fläche A_s verursachten Mehrwegeeffekt auf die Messung $m(t)$ und kann wie folgt beschrieben werden.

$$m^+(t, s) = \Phi_{t,sc}^+ \exp(i\Delta\phi(|d_t| + |d_t - d_s| + |d_s|)) \quad (3.18)$$

Zur Berechnung von $\Phi_{t,sc}^+$ werden bei dem Ansatz nach [Fuchs 2012] die Grundlagen des im vorherigen Abschnitt eingeführten photometrischen Grundgesetzes (Gleichung 3.15) verwendet. [Jiménez et al. 2012] substituiert Φ_{tc} mit den jeweils zugehörigen Amplitudenmessungen der ToF-Kamera.

Das ‘‘wahre’’ Signal berechnet sich aus dem gemessenen Signal abzüglich der Menge Q aller durch Mehrwegeeffekte bedingten Signale .

$$m(t) = \hat{m}(t) - \sum_{j=1}^Q m^+(t, j) \quad (3.19)$$

Der größte Schwachpunkt der vorgestellten Mehrwegmodelle ist, dass zur Berechnung des Mehrwegeeffekts durch Mehrwegeeffekte verfälschte Messungen verwendet werden. Um die Mehrwegeeffekte schätzen zu können, ist aus diesem Grund eine iterative Vorgehensweise unvermeidbar.

Die Grundlagen der radiometrischen Berechnungen sowie die verwendeten Mehrwegmodelle sind bei den Arbeiten von [Fuchs 2012] und [Jiménez et al. 2012] vergleichbar. Die Berechnungsvorgänge zur Bestimmung der Mehrwegeeffekte unterscheidet sich bei den beiden Arbeiten hingegen und werden im Folgenden kurz dargestellt.

Verfahren nach Fuchs

Bei [Fuchs 2012] erfolgt die Schätzung des durch Mehrwege bedingten Fehlers entsprechend der vorgestellten radiometrischen Grundgrößen. Die Eingangsparameter für die Berechnung sind die Distanz- und Amplitudenmessungen, die intrinsischen Kameraparameter sowie die Strahldichte der NIR-Beleuchtungseinheit. Letztere wird im Preprocessing mittels einer Referenzmessung ermittelt, bei der eine Fläche mit bekanntem Albedo-Wert aufgenommen

wird. Dies kann ein weißes Blatt Papier mit einem Albedo-Wert von circa 0,9 sein. Die Korrektur der Mehrwegeeffekte folgt dem im nachfolgend dargestellten Ablauf:

1. Kantenfilterung in der aufgenommenen Szene
2. Bestimmung der Normalen für jeden Messpunkt
3. Berechnung der theoretischen Größe der umgebenden Fläche, die ein Pixel abdeckt
4. Berechnung der Strahldichte für die Flächen mittels der Amplitudenmessung
5. Berechnung des Albedo-Wertes der Flächen mit Hilfe der Referenzmessung
6. Berechnung der Strahlungsleistung der Mehrwegeeffekte für alle Messpunkte der Menge Q , welche die Messung des Punktes \hat{m} beeinflusst

Die Summe der berechneten Strahlungsleistung wird anschließend von der Amplitudenmessung abgezogen und es folgt eine Wiederholung der Berechnungsschritte 4–6 mit den verbesserten Amplitudenmessungen. Die neu berechneten Strahlungsleistung fließen in die Korrektur des Eingangssignals nach Gleichung 3.19 ein. Aus dem verbesserten Signal lässt sich die korrigierte Distanzmessung berechnen. Danach erfolgt eine Neuberechnung der Messpunkte im Kamerakoordinatensystem mittels der verbesserten Distanzmessungen. [Fuchs 2012] weist in seiner Arbeit explizit darauf hin, dass der Ansatz nur bei im Verhältnis zur Länge der Distanzmessung kleinen Fehlern aufgrund von Mehrwegeeffekten verwendbar ist.

Verfahren nach Jimenez et al.

[Jiménez et al. 2012] verwenden ein radiometrisches Modell, benutzen aber im Vergleich zu Fuchs einen vereinfachten Formelapparat zur Bestimmung der Mehrwegeeffekte. Der Winkel ω_{st} des von der Fläche A_s zur Fläche A_t gesendeten Signals (siehe Abbildung 3.14) bleibt unberücksichtigt. Dabei wird der radiometrische Formelapparat direkt auf die Amplitudenmessungen angewendet und es erfolgt keine formelle Umrechnung der Amplitudenmessungen in Strahlungsleistung bzw. Strahldichte. [Jiménez et al. 2012] arbeiten mit einem iterativen Minimierungs-Ansatz zur Kompensation der Mehrwegeeffekte. Die Beschreibung des durch den Mehrwegeeffekt entstandenen Fehlers erfolgt mittels einer Kostenfunktion cf_t . Die Kostenfunktion sowie die Amplituden und Distanzmessungen fließen in einen iterativen Optimierungsalgorithmus zur Berechnung der korrigierten Distanzmessungen ein. Die Optimierung erfolgt mittels eines Levenberg-Marquard-Algorithmus [Madsen et al. 2004; Nash 1979]. In den Abbildungen 3.16 und 3.17 ist der Ansatz skizzenhaft dargestellt.

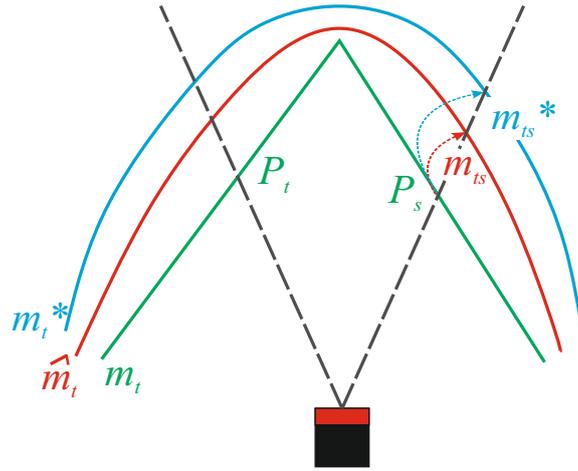


Abbildung 3.16: Komponenten des Mehrwegmodells am Beispiel einer einfachen Aufnahme einer Ecke (nach [Jiménez et al. 2012]).

Ausgehend von der Annahme, dass der Mehrwegeffekt Δp_t ein direkter Fehler der Distanzmessung ist, wird dieser als Multiplikationsfaktor λ_t , bezogen auf die gemessene Position \hat{p}_t , entsprechend der folgenden Formel eingeführt.

$$\hat{p}_t - \Delta p_t = \hat{p}_t(1 - \lambda_t) \quad (3.20)$$

Zusätzlich zur realen Messung \hat{m}_t wird eine zweite, künstlich mit einem Mehrwegeffekt verfälschte Messung \hat{m}_t^* eingeführt. Durch Minimierung des Phasenfehlers zwischen \hat{m}_t und \hat{m}_t^* kann die korrekte Messung nach der Formel 3.21 zurückgerechnet werden. $\Delta\phi(m)$ entspricht dabei der Phasenverschiebung des jeweiligen Signals:

$$\min \left(\sum_{i=1}^Q \|cf_t\|_2^2 \right) \quad (3.21)$$

mit

$$\begin{aligned} cf_t &= \Delta\phi(\hat{m}_t) - \Delta\phi(\hat{m}_t^*) \\ &= \Delta\phi(\hat{m}_t) - \Delta\phi \left(m_t^*(\lambda_t) + \sum_{j \in Q} m_{tj}^*(\lambda_t, \lambda_j) \right) \end{aligned}$$

Q definiert die Menge aller Messpunkte, deren Mehrwegeffekte Auswirkung auf die Messung des zu korrigierenden Messpunktes haben. Bei [Jiménez et al. 2012] werden nur Messpunkte in einem definierten Radius um den zu korrigierenden Punkt betrachtet. Mit durch den iterativen Optimierungsalgorithmus ausgeglichenem λ_t kann die verbesserte Distanz sowie die Lage der Messpunkte neu berechnet werden.

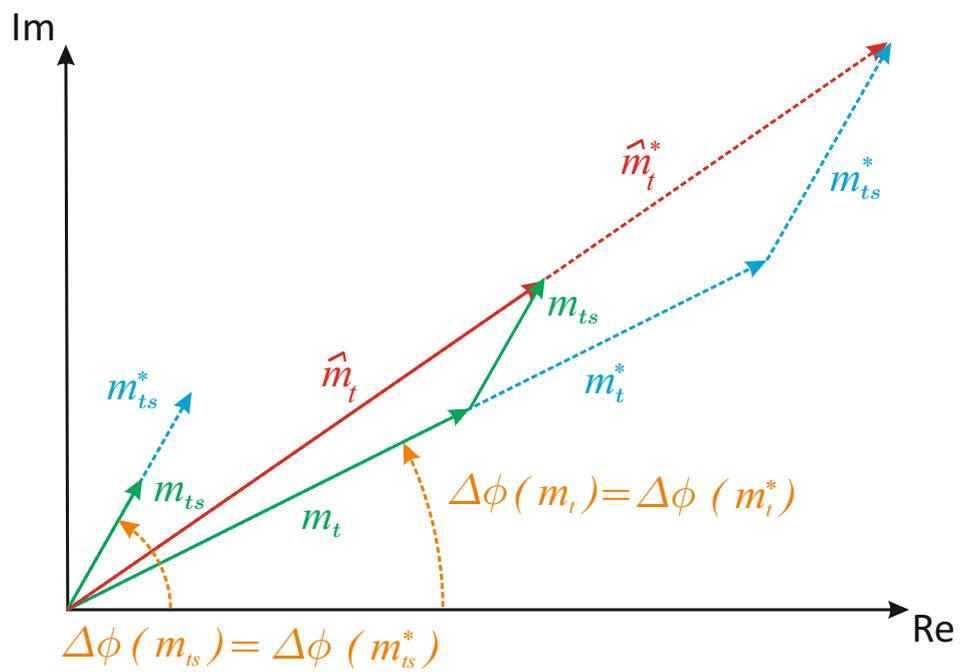


Abbildung 3.17: Phasendiagramm der verwendeten Signale im Mehrwegmodell nach [Jiménez et al. 2012].

Kapitel 4

Konzept zur Bestimmung der äußeren Orientierung

4.1 Konzeptioneller Ablauf

Im Rahmen dieser Arbeit wurde ein Konzept entwickelt, mit dem sich aus Aufnahmen einer ToF-Kamera Schwimmwinkel ableiten lassen. Der Ablauf zur Bestimmung von Schwimmwinkeln anhand einer Aufnahme erfolgt grundsätzlich nach dem in Abbildung 4.1 dargestellten Diagramm.

Das Ziel liegt in der Abschätzung der erreichbaren Genauigkeit mit der die Zylinderachse und daraus abgeleitet die äußere Orientierung bestimmt werden kann (Schritte 1-3 in Abbildung 4.1). Schritt 4, die Transformation der äußeren Orientierung in das lokale Koordinatensystem mittels der INS Messungen, wird nur theoretisch vorgestellt.

Die Neuerung zu den bestehenden Systemen ist der zusätzliche Einsatz einer ToF-Kamera, mit der Aufnahmen innerhalb eines Rohres durchgeführt werden. Zu jedem Zeitpunkt stehen somit auch dreidimensionale Punktwolken zur Verfügung. Anhand dieser können zu jedem Zeitpunkt Schwimmwinkel bestimmt werden.

Eine Grundvoraussetzung ist die feste und bekannte Lage des INS zur ToF-Kamera. Das Koordinatensystem der Kamera wird als KS_K bezeichnet. Das Koordinatensystem des INS erhält die Bezeichnung KS_I . Die Lage und Ausrichtung der beiden Koordinatensysteme wurde in den Abschnitten 3.1.1 und 1.2.2 vorgestellt. Die relative Lage und Ausrichtung dieser beiden Koordinatensysteme zueinander muss bekannt sein und darf sich während einer Inspektion nicht verändern.

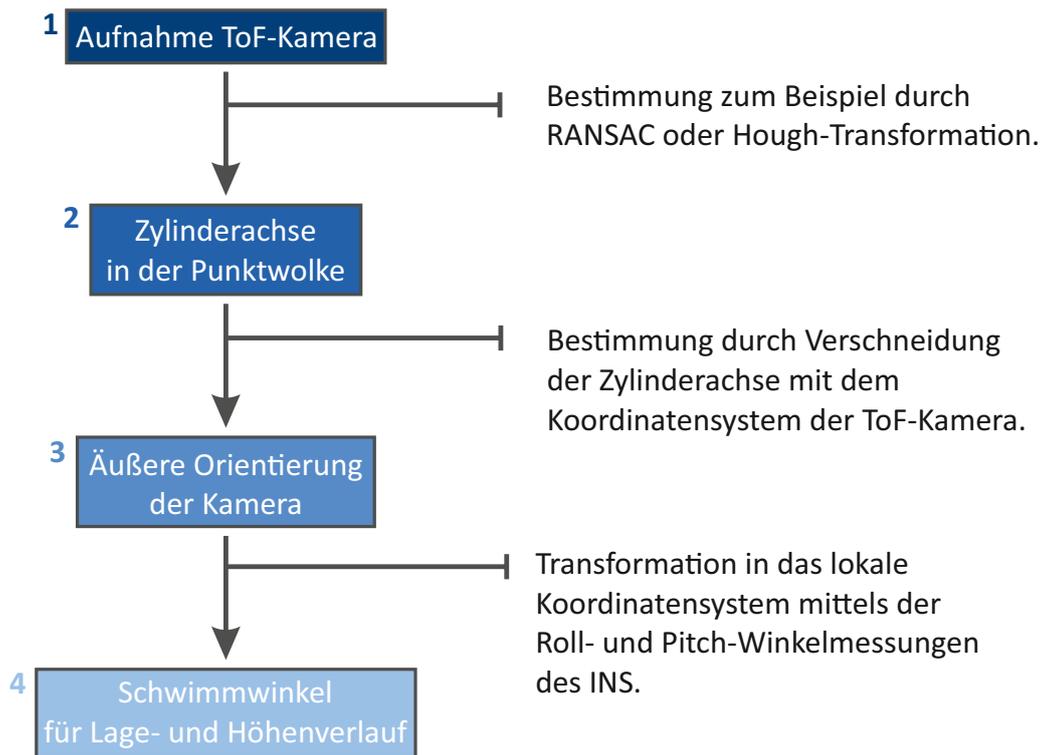


Abbildung 4.1: Konzeptioneller Ablauf zur Bestimmung der Schwimmwinkel aus den Aufnahmen einer ToF-Kamera.

4.1.1 Bestimmung der Zylinderachse in der Punktwolke

Die Aufnahme einer ToF-Kamera innerhalb eines geraden Rohres liefert eine zylinderförmige Punktwolke (siehe Abbildung 3.3). Der Schritt von Punkt 1 zu Punkt 2, die Bestimmung der Zylinderachse anhand der Punktwolke, erfolgt mittels der in Abschnitt 2.2 vorgestellten Verfahren RANSAC oder Hough-Transformation. Im Rahmen dieser Arbeit wurde ein weiteres Verfahren zur Bestimmung der Zylinderachse entwickelt, das im Abschnitt 4.2 vorgestellt wird.

Die Verfahren zur Bestimmung der Zylinderachse müssen robust bezüglich Fehlmessungen sein. Eine Fehlmessung kann zum einen durch einen Messfehler bei einer Distanzmessung entstehen. Zum anderen können Fehlmessungen aber auch durch die Aufnahme von Objekten entstehen, die nicht zum Rohr bzw. Zylinder gehören, in dem sich die Kamera aktuell befindet. Dies sind zum Beispiel Messpunkte, die ein im Anschluss befindlicher Bogen abbilden. Auch Messpunkte die Schäden, wie Verformungen oder Einstürze, abbilden sind als Fehlmessungen einzustufen.

Die durch die genannten Verfahren bestimmte Zylinderachse kann grundsätzlich durch sechs oder sieben Parameter definiert werden. Es handelt sich dabei um einen Aufpunkt-

vektor (3 Parameter), den Radius (1 Parameter) und um die Orientierung, die entweder durch zwei Winkel (2 Parameter) oder einen Orientierungsvektor (3 Parameter) beschrieben werden kann.

Im weiteren Vorgehen wird angenommen, dass die bestimmte Zylinderachse der mittleren Rohrachse des geraden Rohres entspricht. In der Theorie, also unter der Annahme einer fehlerfreien Aufnahme der ToF-Kamera sowie einer fehlerfreien Ableitung der Zylinderachse, ist dies auch korrekt. In der Praxis müssen aber die Messungenauigkeiten der ToF-Kamera sowie die Genauigkeit der Verfahren bei der Bestimmung der Zylinderachse berücksichtigt werden.

4.1.2 Bestimmung der äußeren Orientierung mittels der Zylinderachse

Die Bestimmung der Komponenten der äußeren Orientierung der Kamera zum Rohr erfolgt durch die Verschneidung der in der Punktwolke detektierten Zylinderachse mit dem Kamerakoordinatensystem (siehe Abbildung 4.2).

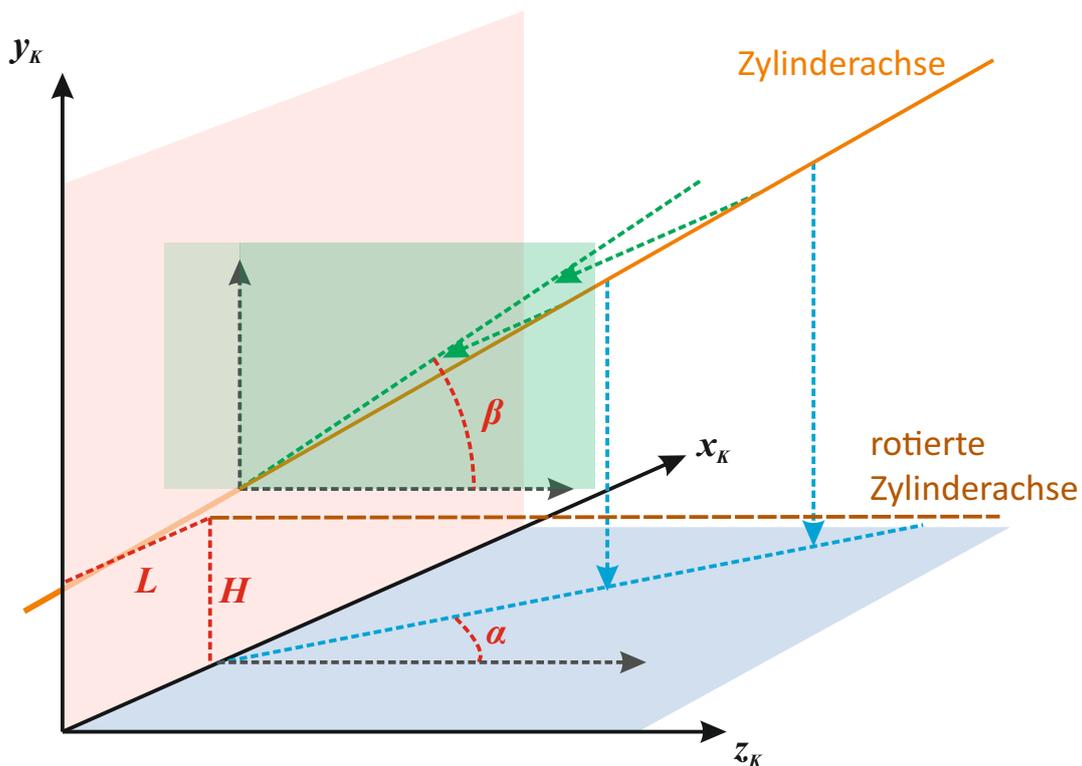


Abbildung 4.2: Bestimmung der Parameter der äußeren Orientierung durch Verschneidung der Zylinderachse mit dem Koordinatensystem der ToF-Kamera.

Der Lagewinkel α entspricht dem Schnittwinkel zwischen der z -Achse und der in die xz -Ebene projizierten Zylinderachse. Der Höhenwinkel β berechnet sich durch die Verschneidung der z -Achse mit der in die yz -Ebene projizierten Zylinderachse. Anschließend erfolgt die Rotation der Zylinderachse mit dem bestimmten Lage- und Höhenwinkel um die y_K -Achse bzw. x_K -Achse.

Die Lageabweichung L und Höhenabweichung H entsprechen dem x - bzw. y -Wert des Schnittpunktes der rotierten Zylinderachse mit der xy -Ebene. Die Bestimmung der Zylinderachse und die daraus resultierenden Parameter der äußeren Orientierung erfolgt immer im Bezug zum Kamerakoordinatensystem, unabhängig davon, wo sich die ToF-Kamera im Rohr befindet.

Die Ergebnisse der Genauigkeitsuntersuchung, mit der die Verfahren die Zylinderachse bestimmen können, werden in Kapitel 5 vorgestellt. Die im Nachfolgenden vorgestellte Transformation der äußeren Orientierung ins lokale Koordinatensystem wird nur theoretisch behandelt.

4.1.3 Transformation der äußeren Orientierung ins lokale Koordinatensystem

Für die korrekte Erfassung des Rohrverlaufs in Lage und Höhe müssen Schwimmwinkel detektiert und korrigiert werden. Schwimmwinkel lassen sich im einfachsten Fall direkt aus der äußeren Orientierung ableiten. Dies ist aber nur möglich, wenn sich die durch die x - und z -Achse des Kamerakoordinatensystems aufgespannte Ebene parallel zum lokalen Horizont (x - und y -Achse des lokalen Koordinatensystems) befindet. Ist dies nicht der Fall, muss die bestimmte äußere Orientierung in das lokale Koordinatensystem transformiert werden.

Dies soll ein Beispiel in Abbildung 4.3 demonstrieren. Befindet sich die Kamera nicht parallel zum lokalen Horizont, kann ein bestimmter Lagewinkel α nicht direkt für die Korrektur der Yaw-Winkelmessung des INS verwendet werden. Der Lagewinkel α muss zuerst in die Lage- und Höhenwinkelkomponenten im lokalen Koordinatensystem gesplittet und entsprechend transformiert werden. Liefert die Bestimmung der äußeren Orientierung einen Lagewinkel von 10° bei einer gleichzeitigen Roll-Winkelmessung des INS von 45° zum lokalen Koordinatensystem, so splittet sich der Lagewinkel im lokalen Koordinatensystem in einen Lage- und Höhenwinkel auf. Erst nach dieser Transformation können die Komponenten der äußeren Orientierung zur Korrektur von Schwimmwinkeln verwendet werden.

Dasselbe Problem ist auch bei Höhenwinkeln sowie bei Lage- bzw. Höhenabweichungen zu beachten. Auch hier kann die Transformation dazu führen, dass eine reine Lageabweichung im Kamerakoordinatensystem sich als eine Lage- und Höhenabweichung im lokalen Koordi-

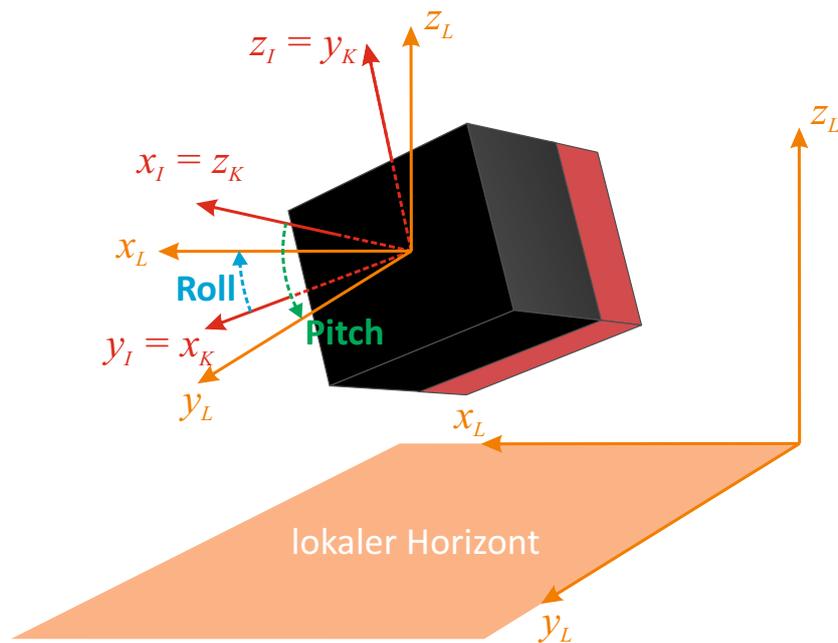


Abbildung 4.3: Roll- und Pitch-Winkel der ToF-Kamera zum lokalen Horizont.

natensystem darstellt. Aufgrund der festen Lage des INS und der ToF-Kamera zueinander können die Pitch- und Roll-Winkelmessungen zur Transformation der äußeren Orientierung in das lokale Koordinatensystem verwendet werden.

Die Roll- und Pitch-Winkel der INS-Messungen definieren die aktuelle Lage der ToF-Kamera zum lokalen Horizont, also der xy -Ebene des lokalen Koordinatensystems (siehe Abbildung 4.3). Der Pitch-Winkel beschreibt dabei die Abweichung vom lokalen Horizont in Bewegungs- bzw. Fahrtrichtung, der Roll-Winkel die Abweichung vom Horizont 90° zur Fahrtrichtung. Die hier vorgestellte Vorgehensweise erfolgt der Einfachheit halber unter zwei Annahmen:

- Die Achsen des Koordinatensystems KS_K fallen mit denjenigen des KS_I zusammen. Dabei werden die Achsen folgendermaßen zugeordnet:

KS_K		KS_I
z-Achse	\leftrightarrow	x-Achse
x-Achse	\leftrightarrow	y-Achse
y-Achse	\leftrightarrow	z-Achse

In der Realität ist dies natürlich kaum möglich, da der technische Aufbau der ToF-Kamera mit dem des INS kombiniert werden müsste. Aus diesem Grund müssen bei einer Umsetzung die Lage- und Richtungsabweichungen der Koordinatensysteme von

ToF-Kamera und INS bestimmt und in den Berechnungsprozess integriert werden. Dies führt zu einer Erhöhung der Komplexität der Berechnungsschritte und ist für die Vorstellung der grundsätzlichen Vorgehensweise nicht relevant.

- Es wird davon ausgegangen, dass Roll- und Pitch-Winkel sich im Bereich von maximal $\pm 90^\circ$ bewegen. Bei Werten im Bereich über 90° ist davon auszugehen, dass aufgrund der Schwerkraft das Inspektionssystem sich wieder in Richtung zur Rohrmitte bewegen würde (siehe Abbildung 4.4). Diese Annahme ermöglicht im weiteren Verlauf die Verwendung von Euler-Winkeln bei der Beschreibung der Rotationen, ansonsten müssten zur Beschreibung der Rotationen Quaternionen verwendet werden.

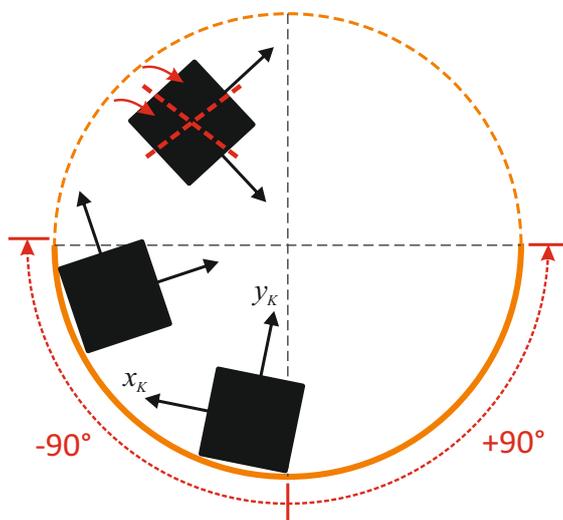


Abbildung 4.4: Skizze des theoretischen Bewegungsbereichs der Inspektionseinheit bezüglich des Roll-Winkels (Ansicht in das Rohr).

Mit den Pitch- (ω_P) und Roll-Winkelmessungen (ω_R) des INS können die bestimmte Zylinderachse transformiert und anhand der Verschneidung mit dem Kamerakoordinatensystem die Parameter der äußeren Orientierung bezüglich des lokalen Koordinatensystems berechnet werden. Die Transformation der Zylinderachse erfolgt im einfachsten Fall durch die Transformation zweier Punkte der Zylinderachse. Verwendet wird der Aufpunkt sowie ein zweiter Punkt, der sich durch Addition des Aufpunktes mit dem Richtungsvektor berechnen lässt. Die Transformation besteht aus einer Rotation um die z-Achse des Kamerakoordinatensystems mit dem Winkel ω_R sowie einer Rotation um die x-Achse mit dem Winkel ω_P . \mathbf{R}_z und \mathbf{R}_x sind die Drehmatrizen für links- oder rechtsdrehende Koordinatensysteme um die z- und x-Achse. Ein Punkt \vec{x}_p wird nach folgender Formel transformiert:

$$\begin{aligned}
\vec{x}'_p &= \mathbf{R}_z \mathbf{R}_x \vec{x}_p \\
&= \begin{pmatrix} \cos \omega_R & -\cos \omega_P \sin \omega_R & \sin \omega_P \sin \omega_R \\ \sin \omega_R & \cos \omega_P \cos \omega_R & -\sin \omega_P \cos \omega_R \\ 0 & \sin \omega_P & \cos \omega_P \end{pmatrix} \begin{bmatrix} x \\ y \\ z \end{bmatrix} \quad (4.1)
\end{aligned}$$

Aus den transformierten Punkten werden wiederum die transformierten Zylinderparameter ermittelt. Der transformierte Aufpunkt lässt sich direkt übernehmen, der neue Richtungsvektor errechnet sich aus der Subtraktion des Aufpunkts vom zweiten transformierten Punkt. Grundsätzlich könnte natürlich auch die gesamte Punktwolke vor der Zylinderachsenbestimmung transformiert werden, dies erfordert aber mehr Rechenaufwand.

Die transformierten Zylinderparameter bzw. die Zylinderachse wird anschließend mit dem Kamerakoordinatensystem verschnitten. Daraus werden die Parameter der äußeren Orientierung abgeleitet. Mit diesen transformierten Parametern kann direkt die Korrektur von Schwimmwinkeln bei der Berechnung der Lage des Rohrsystems erfolgen.

4.1.4 Genauigkeitsanforderung bei der Bestimmung der äußeren Orientierung

Die Genauigkeit, mit der Schwimmwinkel bestimmt bzw. korrigiert werden können, hängt von zwei Kriterien ab:

1. Von der Genauigkeit, mit der das INS die Pitch- und Roll-Winkel, also die Lage zum lokalen Horizont bestimmen kann.
2. Von der Genauigkeit, mit der die Zylinderachse respektive die äußere Orientierung ermittelt werden kann.

Die Transformation der äußeren Orientierung ins lokale Koordinatensystem mittels der Pitch- und Roll-Winkel wird nicht näher betrachtet. Aus diesem Grund wird die Genauigkeitsanforderung des Anwendungsfalls bezüglich der Bestimmung der Schwimmwinkel direkt auf die Genauigkeitsanforderung zur Bestimmung der äußeren Orientierung übertragen. Dies entspricht der theoretischen Annahme, dass Pitch- und Roll-Winkel fehlerfrei bestimmt werden können.

Die Anforderung des Anwendungsfalls an die Genauigkeit (Standardabweichung) für die Bestimmung von Lage- und Höhenwinkel beträgt somit 1° (siehe Abschnitt 1.3.2). Die Genauigkeitsanforderungen für die Bestimmung von Lage- und Höhenabweichung werden durch den Anwendungsfall selbst nicht eindeutig definiert. Unter Berücksichtigung der im

folgenden Abschnitt beschriebenen Ungenauigkeiten bei den Kreisprofilen von KG Rohren (siehe Abschnitt 4.4.1) werden die Genauigkeitsanforderungen für die Bestimmung von Lage- und Höhenabweichung auf 5 mm festgelegt.

4.2 2D Zylinder-Fitting

Zur einfachen Bestimmung der Zylinderachse und damit der äußeren Orientierung wurde ein speziell für den Anwendungsfall einsetzbares Verfahren entwickelt. Dieses wird im weiteren Verlauf als zweidimensionales Zylinder-Fitting (2D Zylinder-Fitting oder abgekürzt: 2D Z-F) bezeichnet. Im Gegensatz zu RANSAC oder der Hough-Transformation kann dieses Verfahren nur zur Bestimmung der Zylinderachse eingesetzt werden, wenn die Kamera sich innerhalb des aufzunehmenden Rohres befindet.

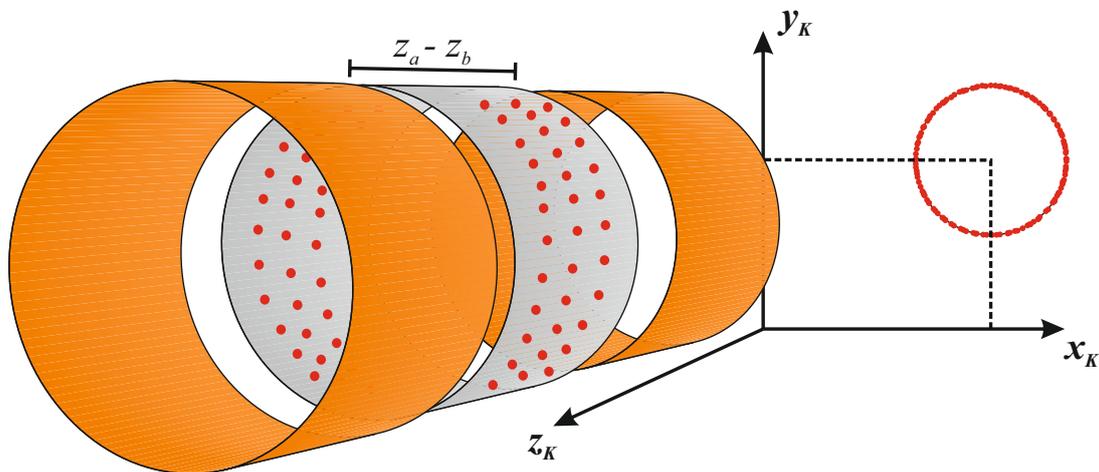


Abbildung 4.5: Projektion der Punkte eines Zylinderabschnitts (z -Komponente von $z_a - z_b$) in die xy -Ebene des Kamerakoordinatensystems.

Das 2D Zylinder-Fitting reduziert die dreidimensionale Problemstellung der Bestimmung der Zylinderachse in einer Punktwolke auf eine zweidimensionale. Dazu wird anhand der Distanzmessungen des KS_K die Punktwolke in Abschnitte $z_a - z_b$ (siehe Abbildung 4.5) mit einer vordefinierten Größe unterteilt. Die grundlegende Annahme bei diesem Verfahren ist, dass die x - und y -Koordinaten von Punkten mit identischen Distanzmessungen in der xy -Ebene näherungsweise einen Kreis beschreiben. Mittels eines Ausgleichsverfahrens können Radius und Mittelpunkt dieses Kreises bestimmt werden. Die xy -Koordinaten des Mittelpunkts entsprechen der Projektion eines Punktes der Zylinderachse dieses Zylinderabschnitts in die xy -Ebene. Die dritte Dimension wird durch Hinzufügen der mittleren z -Koordinaten des jeweiligen untersuchten Abschnitts wiederhergestellt.

Für jeden Zylinderabschnitt können somit, wie in Abbildung 4.6 dargestellt, ein Punkt der Zylinderachse sowie der Radius des Zylinders berechnet werden. Die Parameter der Zylinderachse können anschließend mittels einer robusten Regressionsanalyse bezüglich des für jeden Abschnitt bestimmten Punktes der Zylinderachse ermittelt werden. Der Radius wird durch Mittelung der Radien aller Zylinderabschnitte geschätzt.

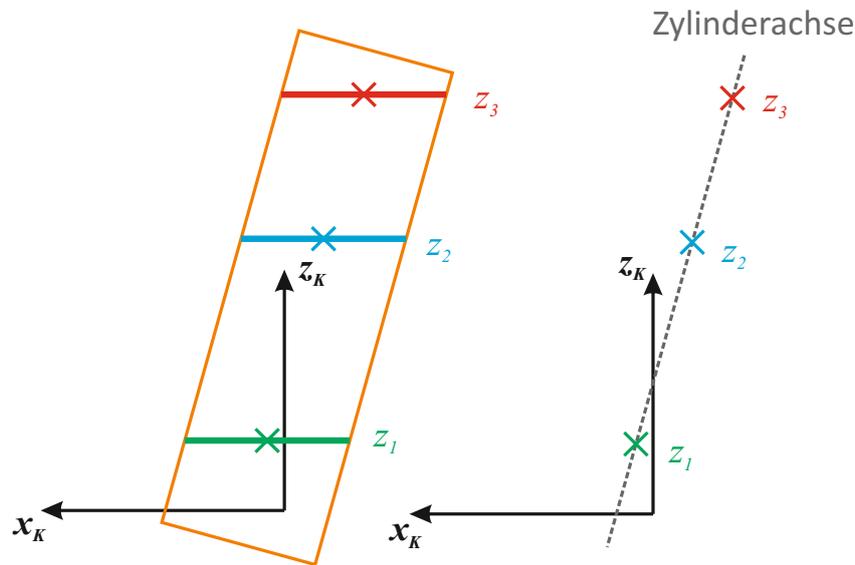


Abbildung 4.6: Zweidimensionale Darstellung (xz -Ebene) der Bestimmung der Zylinderachse anhand der Ergebnisse der Analysen verschiedener Zylinderabschnitte $z_1 - z_3$.

In Abbildung 4.6 ist die Vorgehensweise in der xz -Ebene des Kamerakoordinatensystems dargestellt. Die verschiedenen Abschnitte der z -Koordinaten sowie der bestimmte Kreismittelpunkt sind mit den Bezeichnungen z_1 bis z_3 gekennzeichnet.

Bei der Auswahl der Abschnittsgröße müssen verschiedene Aspekte berücksichtigt werden. Einer ist die abnehmende Punktdichte mit zunehmendem Abstand zur Kamera (siehe Abschnitt 4.3). Wird die Abschnittsgröße zu klein gewählt, beinhalten weiter von der ToF-Kamera entfernte Abschnitte eventuell zu wenige Messpunkte, um die Kreisparameter korrekt bestimmen zu können. Ein zu groß gewählter Abschnitt kann ebenfalls zu Ungenauigkeiten bei der Kreisbestimmung führen. Um dies zu veranschaulichen, sind in Abbildung 4.7 zwei Projektionen von Zylinderabschnitten mit unterschiedlichen Größen in der xy -Ebene des Kamerakoordinatensystems dargestellt. Der Lagewinkel der ToF-Kamera ist bei dieser Aufnahme auf 10° eingestellt.

Die linke Abbildung zeigt einen Zylinderabschnitt mit 2 cm Länge, die rechte einen mit 10 cm Länge. Bei Letzterem zeigt sich eine Streuung der Messpunkte um den ausgeglichenen Kreis (rote Linie). Dies entsteht aufgrund des vorliegenden Lagewinkels und der Größe des

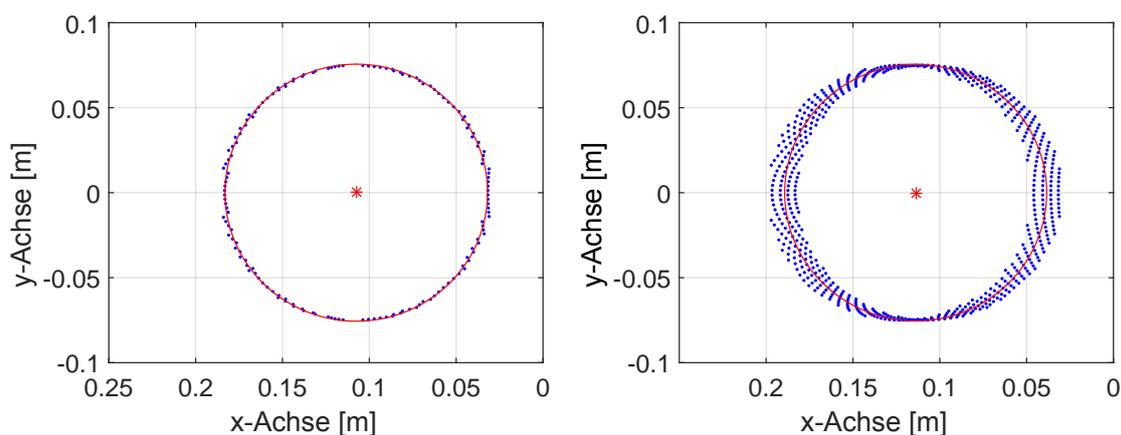


Abbildung 4.7: Projektion eines Zylinderabschnitt mit der Länge 10 cm (rechts) und eines mit der Länge 2 cm (links) in die xy-Ebene des Kamerakoordinatensystems.

Zylinderabschnitts. Im Idealfall ist die Streuung der Messpunkte symmetrisch verteilt und der Kreis kann korrekt bestimmt werden. In Kombination mit der Messungenauigkeit der ToF-Kamera kann diese Streuung aber auch zu Ungenauigkeiten bei der Kreisbestimmung führen. Aus diesem Grund sollte die Abschnittsgröße aufgrund der Punktdichte so groß und aufgrund der Streuung auch so klein wie möglich gewählt werden. Versuche mit verschiedenen Werten haben gezeigt, dass eine Abschnittsgröße von 1 cm gute und stabile Ergebnisse liefert.

Schwierigkeiten bereiten bei diesem Verfahren Zylinderabschnitte, die Messpunkte enthalten, die einen nachfolgenden Bogen oder eine Abzweigung abbilden. In Abbildung 4.8 (links) ist die Projektion des Zylinderabschnitts in der xy-Ebene des Kamerakoordinatensystems im Bereich eines Bogens dargestellt. Es handelt sich um eine Aufnahme in einem 60 cm langen Rohr mit einem angeschlossenen 90° Bogen. Der Lagewinkel der Kamera zum Rohr beträgt 10° . Wie anhand der linken Abbildung ersichtlich, ist es nicht mehr möglich, anhand der Projektion dieses Zylinderabschnittes einen Kreis zu bestimmen. Die rechte Abbildung zeigt die gesamte Punkt看ke in der xz-Ebene des Kamerakoordinatensystems. Die zur Bestimmung der Zylinderachse verwendeten Abschnitte der Punkt看ke sind in grün dargestellt. Der für jeden Zylinderabschnitt geschätzte Punkt der Zylinderachse ist in der Farbe Magenta eingezeichnet. In Bereichen des Bogens kommt es, wie zu erwarten war, zu erkennbaren Fehlbestimmungen (Abbildung 4.8 rechts).

Die robuste Regressionsanalyse kann den dadurch entstehenden Fehler bei der Bestimmung der Zylinderachse grundsätzlich minimieren. Des Weiteren kann die Qualität, mit welcher der Kreismittelpunkt eines Zylinderabschnittes bestimmt wird, verwendet werden,

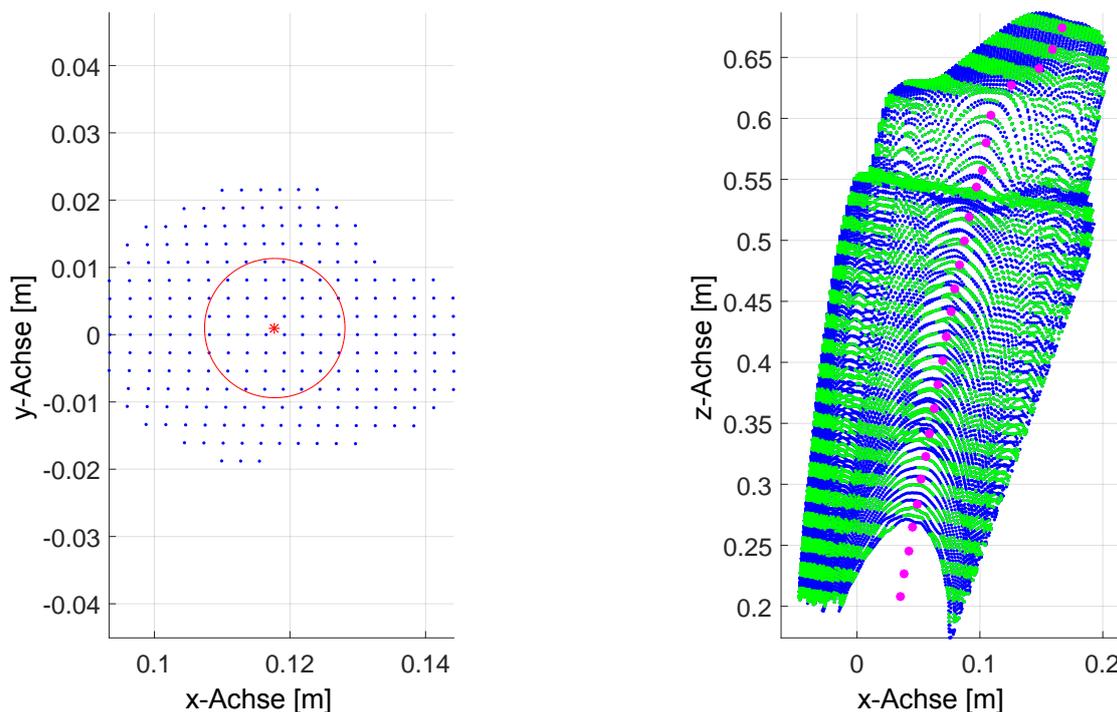


Abbildung 4.8: Links: Projektion der Messpunkte eines Zylinderabschnitts im Bereich eines 90° Bogens in die xy-Ebene. Rechts: Punktwolke (blau) eines 60 cm langen Rohres mit markierten Zylinderabschnitten (grün) und geschätzten Punkten der Zylinderachse (magenta).

um Abschnitte, die nicht den Zylinder repräsentieren, zu detektieren und zu entfernen. Qualitätskriterien können die bei der Ausgleichung berechnete Standardabweichung für die Koordinaten des Mittelpunktes und des Radius sein. Bei Zylinderabschnitten wie in Abbildung 4.8 links sind die Standardabweichungen deutlich höher als bei dem Zylinderabschnitt in Abbildung 4.7 links. Liegen die Standardabweichungen für die genannten Parameter über einem vordefinierten Grenzwert, dann wird der Zylinderabschnitt bei der Bestimmung der Zylinderachse nicht verwendet. Der Grenzwert für die Standardabweichung der x- und y-Komponenten des Mittelpunktes wird im Folgenden als $t_{Std_{MP}}$, der Grenzwert für die Standardabweichung des Radius als $t_{Std_{Rad}}$ bezeichnet. Ein weiteres Kriterium für die Qualität ist der Wert des bestimmten Radius in einem Zylinderabschnitt. Bei der Betrachtung der Abbildung 4.8 rechts ist deutlich erkennbar, wie der Radius der Zylinderabschnitte am Ende des Rohres aufgrund des dort befindlichen Bogens abnimmt. Aus diesem Grund wird ein Grenzwert t_{Rad} für den Radius eingeführt. Liegt dieser unterhalb des Grenzwerts, wird der betreffende Zylinderabschnitt ebenfalls herausgefiltert.

In Abbildung 4.9 sind die durch die Grenzwerte selektieren Zylinderabschnitte in der Farbe Rot dargestellt. Anhand der Abbildung ist ersichtlich, dass durch den Einsatz der Grenzwerte Zylinderabschnitte, welche die Bestimmung der Zylinderachse verfälschen könnten, korrekt eliminiert werden.

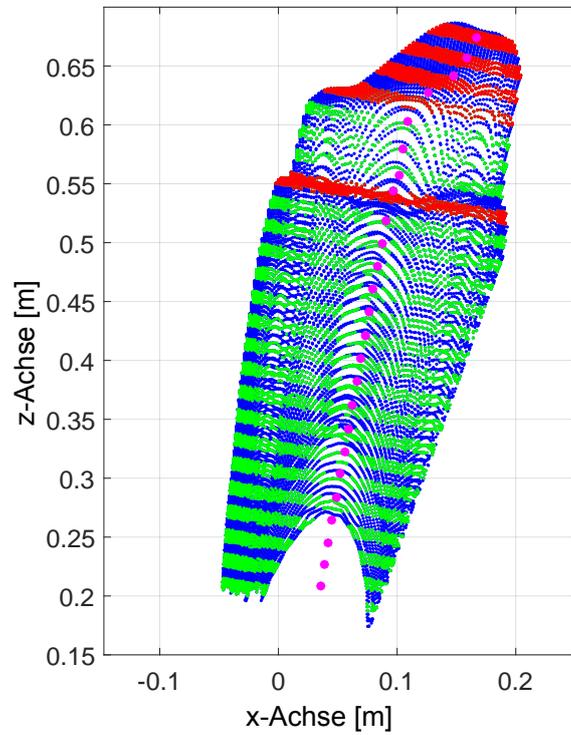


Abbildung 4.9: Darstellung der Punktwolke in der xz-Ebene. Rote Zylinderabschnitte bzw. Achspunkte werden aufgrund der Überschreitung der Grenzwerte bei der Bestimmung der Zylinderachse ignoriert, grüne Abschnitte bzw. Achspunkte werden bei der Bestimmung verwendet.

4.3 Eigenschaften von Aufnahmen im Rohr mit der SR4000

Die Aufnahmeposition innerhalb eines Rohres führt zu speziellen Charakteristika der Punktwolke, die sich auf die Genauigkeit der Bestimmung der äußeren Orientierung auswirken können. Diese werden im Folgenden kurz vorgestellt.

4.3.1 Verteilung der Messpunkte

Die Verteilung der Messpunkte lässt sich in zwei Kategorien unterteilen:

- Die Verteilung der Messpunkte bezüglich der Rohrachse. Diese beschreibt beispielsweise, ob die Messpunkte symmetrisch, also auf den Seiten bzw. der Ober- und Unterseite des Rohres gleich verteilt sind.
- Die Dichte der Messpunkte pro Flächeneinheit.

Beide Kategorien von Verteilung hängen von verschiedenen Faktoren ab. Die für diesen Anwendungsfall einflussreichsten sind:

- die Kameraspezifikation
- der Rohrdurchmesser
- die aktuelle äußere Orientierung

Die Parameter der Kameraspezifikation wie die Größe der Öffnungswinkel, die Brennweite oder die Abstände der Pixel auf dem Sensorchip beeinflussen direkt die Verteilung und Dichteverhältnisse der Messpunkte auf der Rohrwand. Auch der Rohrdurchmesser hat vor allem Einfluss auf die Dichteverhältnisse der Messpunkte. Beide Faktoren können grundsätzlich als konstant angesehen werden. Bei den Versuchen wird immer dasselbe Modell der SR4000 und damit immer eine identische Kameraspezifikation verwendet.

Da die Versuche immer mit der SR4000 innerhalb von Rohrsystemen mit 15 cm Durchmesser durchgeführt werden, ist bei den Laborversuchen auch der Rohrdurchmesser immer konstant. In der Realität kann es aber durchaus vorkommen, dass sich der Rohrdurchmesser bei einer Inspektion verändert und dies Auswirkungen auf die Verteilung der Dichte der Messpunkte nach sich zieht. Dies muss beim Betrieb eines Inspektionssystems durch entsprechende Voreinstellungen berücksichtigt werden.

Der zuletzt genannte Faktor, die aktuelle äußere Orientierung, hat den größten Einfluss auf die Verteilung der Messpunkte und damit auf die Bestimmung der äußeren Orientierung selbst.

Einfluss der Öffnungswinkel auf die Punktverteilung

Bei Betrachtung der Punktwolke einer entlang der Rohrachse ausgerichteten ToF-Kamera fällt auf, dass sich die am nächsten liegenden Messpunkte sich bezüglich der z-Koordinate nicht auf der Höhe des Ursprungs des Kamerakoordinatensystems befinden, sondern einen Abstand von circa 10 cm zum Ursprung aufweisen. Dies liegt an den Öffnungswinkeln der SR4000. Anhand der Darstellung in der xz- bzw. yz-Ebene kann die spezielle Verteilung der Punktwolke aufgrund der unterschiedlichen horizontalen und vertikalen Öffnungswinkel in Kombination mit dem Rohr betrachtet werden (siehe Abbildung 4.10).

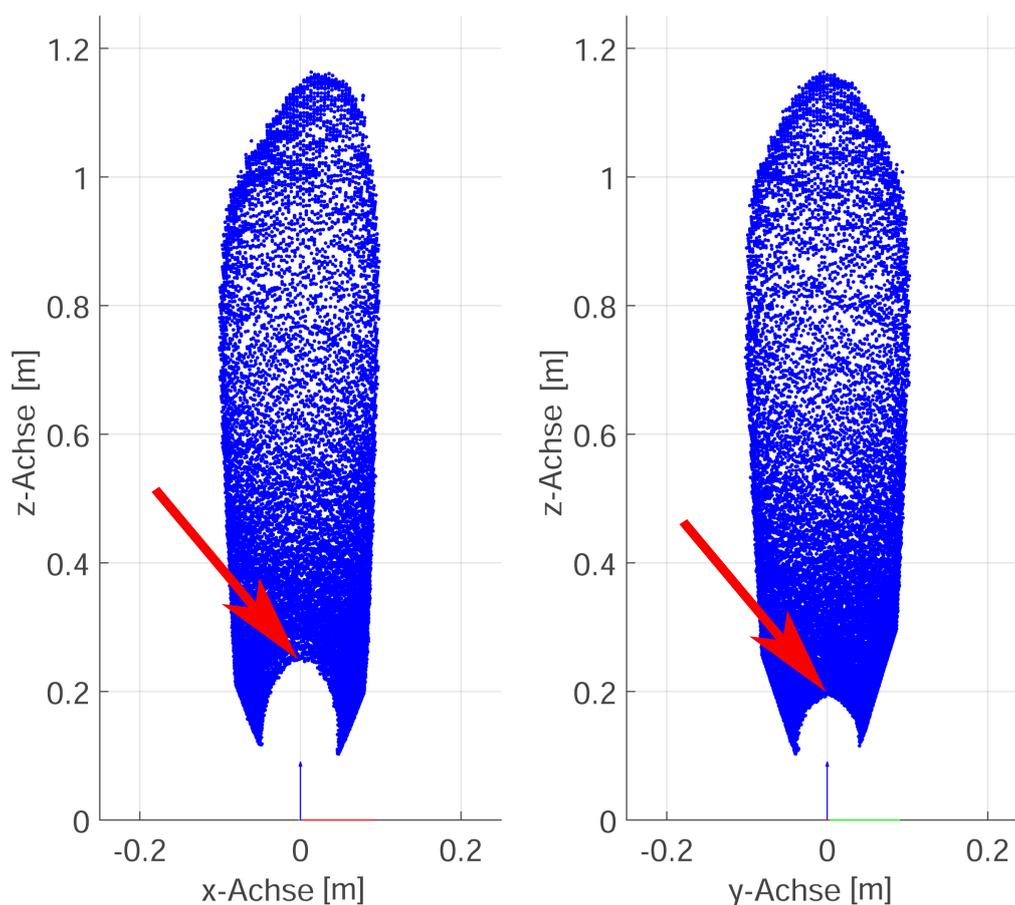


Abbildung 4.10: Punktwolke einer Aufnahme mit der SR4000 in einem 1 m langen Rohr. Darstellung in der xz- (links) bzw. yz-Ebene (rechts).

Aufgrund des geringeren Öffnungswinkels in vertikaler Richtung treffen in der xz -Ebene die Messpunkte mit größerem Abstand zum Ursprung auf, als in der yz -Ebene, die durch den horizontalen Öffnungswinkel beeinflusst wird (siehe rote Pfeile in Abbildung 4.10). Die spitzen Ausläufer werden von Betrachtern fälschlicherweise oft als Fehlmessungen eingeschätzt. Es handelt sich dabei aber um Messungen von Pixeln in den Eckbereichen des Sensor-Chips, also an den Maxima der horizontalen und vertikalen Öffnungswinkel. Die Kombination aus maximalen horizontalen- und vertikalen Öffnungswinkeln führt bei Aufnahmen im Rohr dazu, dass die Pixel an den Ecken des Sensors die kürzesten Distanzmessungen und dadurch in Folge die Messpunkte mit den geringsten Abständen zur ToF-Kamera liefern.

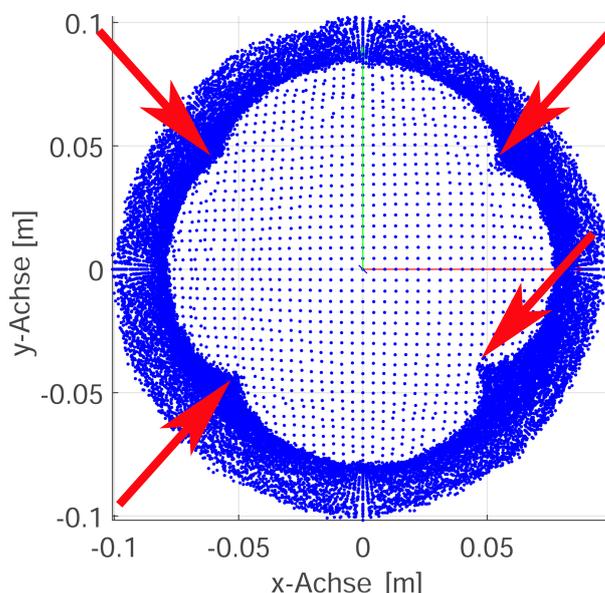


Abbildung 4.11: Punktwolke einer Aufnahme mit der SR4000 in einem 1 m langen Rohr. Darstellung in der xy -Ebene. Die roten Pfeile markieren die Messpunkte der kürzesten Distanzmessungen.

Bei Betrachtung der Aufnahme in der xy -Ebene (Abbildung 4.11, rote Pfeile) fällt auf, dass je kürzer die Distanzmessung ist, desto näher liegen die berechneten Messpunkte an der mittleren Rohrachse. Als Ursache dafür könnte die Verzeichnung der Kamera in Frage kommen. Da es sich aber nur um eine geringe Abweichung bei nur wenigen Messpunkten handelt, wurde die Ursache für die Krümmung nicht näher untersucht.

Zusammenfassend kann festgestellt werden, dass aufgrund der Öffnungswinkel der SR4000 Rohrabschnitte ab einem Abstand (z -Koordinate) von circa 20 cm vollständig zirkulär mit Messpunkten abgedeckt werden. Dies muss bei der Bestimmung der äußeren Orientierung berücksichtigt werden.

Inhomogene Dichte der Messpunkte in Abhängigkeit vom Abstand zur ToF-Kamera

Die Dichte der Messpunkte pro Flächeneinheit nimmt mit zunehmendem Abstand zur ToF-Kamera ab. Die ist durch den Aufbau der ToF-Kamera bedingt. Da der Abstand der Pixel auf dem Sensorchip gleich groß ist, die Längen der Distanzmessungen zur Mitte des Sensorchips aber zunehmen, vergrößert sich entsprechend der Abstand der Messpunkte auf der Rohrwand.

Mit Hilfe des in Abschnitt 4.2 beschriebenen 2D Zylinder-Fitting kann relativ einfach die Punktdichte pro Quadratzentimeter in Abhängigkeit vom Abstand zur Kamera bestimmt werden. Abbildung 4.12 zeigt die Abnahme der Punktdichte mit zunehmendem Abstand zur Kamera bei verschiedenen Rohrdurchmessern. Je nach Rohrdurchmesser geht ab einem Abstand von circa 1 bis 1,4 m die Punktdichte gegen 0 Punkte.

Problematisch kann die inhomogene Dichte der Messpunkte bei der Berechnung von Oberflächennormalen werden. Die Wahl der Anzahl der einzubeziehenden Nachbarn muss so erfolgen, dass auch im Bereich mit geringer Messpunktdichte eine korrekte Berechnung der Oberflächennormalen erfolgen kann.

In Abbildung 4.13 sind Aufnahmen in Rohren mit verschiedenen Längen abgebildet. Da die maximale Messdistanz der SR4000 circa 5 m beträgt, ist mit dem 5 m Rohr auch die maximale Messmöglichkeit der SR4000 ausgeschöpft. Anhand der Punktwolken der 2 und 5 m langen Rohre ist ersichtlich, dass ab einem Abstand von circa 1-1,2 m zum Ursprung des Kamerakoordinatensystems die relativ hohe Dichte der Messpunktverteilung abnimmt. Dies ist zwar grundsätzlich aufgrund der Messkonfiguration zu erwarten, jedoch ist auffällig, dass die Abnahme der Punktdichte beim 5 m und 2 m Rohr sehr abrupt erfolgt. Die Messpunktverteilung erscheint gerade beim 2 m Rohr in diesem Bereich sehr zufallsbedingt. Auch nimmt der Durchmesser des abgebildeten Rohres mit zunehmendem Abstand zur ToF-Kamera ab. Dieser Effekt entsteht, wenn die Distanzmessungen fälschlicherweise zu gering ausfallen. Das Ändern der Aufnahmeparameter, zum Beispiel die Erhöhung der Integrationszeit, konnte diesbezüglich keine Abhilfe schaffen. Anhand der Aufnahme im 5 m Rohr sind eindeutige Fehlmessungen zu erkennen (Abbildung 4.13, roter Pfeil). Messpunkte ab einem Abstand von circa 1-1,2 m zur ToF-Kamera, die eigentlich das Ende des Rohres abbilden sollten, können eine Art "Einstülpung" des Rohres aufweisen. Selbiger Effekt kann auch bei Rohrsystemen mit einem eingebauten Bogen mit kleinem Winkel (z.B. 15°) zwischen zwei gerade Rohren auftreten. Ursache für dieses Phänomen sind vermutlich Fehlmessungen aufgrund der ungünstigen Aufnahmesituation mit sehr spitzen Auftreffwinkeln der Signale an der Rohrwand in diesen Bereichen. Die genannten Fehlmessungen

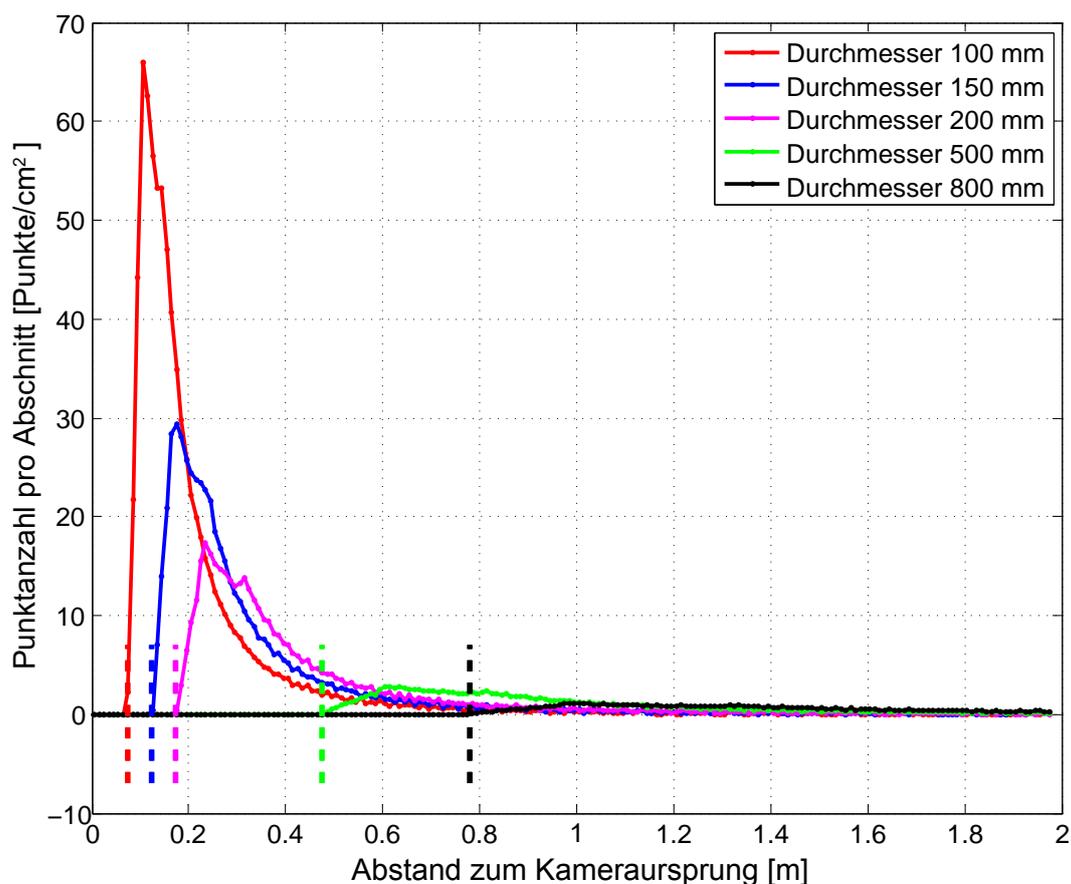


Abbildung 4.12: Abschätzung der Punktdichte (Punkte pro Quadratcentimeter) bei unterschiedlichen Rohrdurchmessern in Abhängigkeit vom Abstand (z-Komponente) zum Ursprung.

können je nach Menge, trotz robuster Algorithmen, die Ergebnisse der Bestimmung der äußeren Orientierung verfälschen und sollten, wenn möglich, eliminiert werden.

Die betroffenen Messpunkte haben im Verhältnis zu den korrekten Messungen meist relativ geringe Amplitudenwerte. Wie in [MESA Imaging AG 2013] beschrieben, sind geringe Amplitudenwerte ein Hinweis auf Unsicherheiten bei den Messergebnissen. Die SR4000 bietet grundsätzlich die Funktionalität, einen Amplituden-Grenzwert zu definieren. Distanzmessungen von Pixeln, deren Amplitudenwerte unter diesem Grenzwert liegen, erhalten den Wert 0 m und sind somit als Fehlmessungen zu erkennen. Die Filterung dieser Punkte erfolgt im Postprocessing. Dabei werden Messpunkte mit einem Amplituden-Wert unter 0,01 herausgefiltert. Bei den Aufnahmen innerhalb eines 1 m oder 60 cm langen Rohres treten die genannten Problemstellungen nicht auf. Beim 60 cm langen Rohr ist dafür der Übergang vom Rohr zum anschließenden Bogen als kantenähnliche Struktur in der Punktwolke

zu erkennen (Abbildung 4.13, rechte Punktwolke im Bereich von 0,5 - 0,55 m der z-Achse). Diese existieren nur bei Aufnahmen im 60 cm Rohr, da nur hier die kurze Entfernung zum Bogen eine Darstellung des Anschlusses ermöglicht. Bei der Auswertung wird versucht, die Verteilung der Messpunkte durch eine Filterung der Distanzmessungen zu homogenisieren. Die Filterung der Distanzmessung erfolgte grundsätzlich mittels eines Gauß-Filters, nur bei der Verwendung der Hough-Transformation kommt ein Mittelwertfilter zum Einsatz. Voruntersuchungen haben gezeigt, dass die Hough-Transformation bei der Verwendung eines Gauß-Filters Ergebnisse mit geringerer Wiederholgenauigkeit bei der Bestimmung der Zylinderachse liefert, als bei der Verwendung eines Mittelwertfilters. Ursache dafür sind vermutlich fehlerhaft bestimmte Normalen im Bereich mit kantenähnlichen Strukturen in der Punktwolke. Da bei der Hough-Transformation im Gegensatz zu RANSAC die Oberflächennormalen aller Messpunkte zur Bestimmung der Zylinderachse verwendet werden, wirken sich fehlerhaft bestimmte Oberflächennormalen auch stärker auf die Qualität des Ergebnisses aus (Verschiebung des höchsten Akkumulationspunktes, siehe Abschnitt 3.2.3). Da ein Mittelwertfilter im Verhältnis zum Gauß-Filter, bei gleicher Größe, Strukturen stärker glättet, ist dieser bei der Hough-Transformation zu bevorzugen. Nach der Filterung der Distanzmessungen werden die Messpunkte neu berechnet. Bei der Berechnung von Mehrwegeeffekten erfolgt auch eine entsprechende Filterung der Amplitudenmessungen. In Abbildung 4.14 ist die originale Punktwolke (blau) sowie die gefilterte Punktwolke (rot) einer Aufnahme im 60 cm langen Rohr dargestellt. Verwendet wurde ein Gauß-Filter mit einer Größe von 6x6 Pixeln. Es ist deutlich erkennbar, dass die Filterung zu einer besseren Verteilung der Messpunkte gerade im Bereich des Übergangs vom Rohr in den Bogen (Höhe 0,5 m bei der z-Achse) führt.

Asymmetrische Verteilung der Messpunkte in Abhängigkeit von der Aufnahmeposition

Bei einer Aufnahme entlang der mittleren Rohrachse besteht grundsätzlich eine relativ symmetrische Verteilung der Messpunkte und somit auch der Dichte auf der Rohrrinnenwand. Sobald die Lage bzw. Ausrichtung der Kamera von der Rohrmittelachse abweicht, also die Parameter der äußeren Orientierung nicht gleich null sind, wirkt sich dies direkt auf die Verteilung der Messpunkte aus. Dies soll anhand einer einfachen Skizze dargestellt werden. In Abbildung 4.15 sind drei Aufnahmen mit den jeweiligen Auswirkungen eines Lagewinkels und einer Lageabweichung auf den Aufnahmebereich dargestellt.

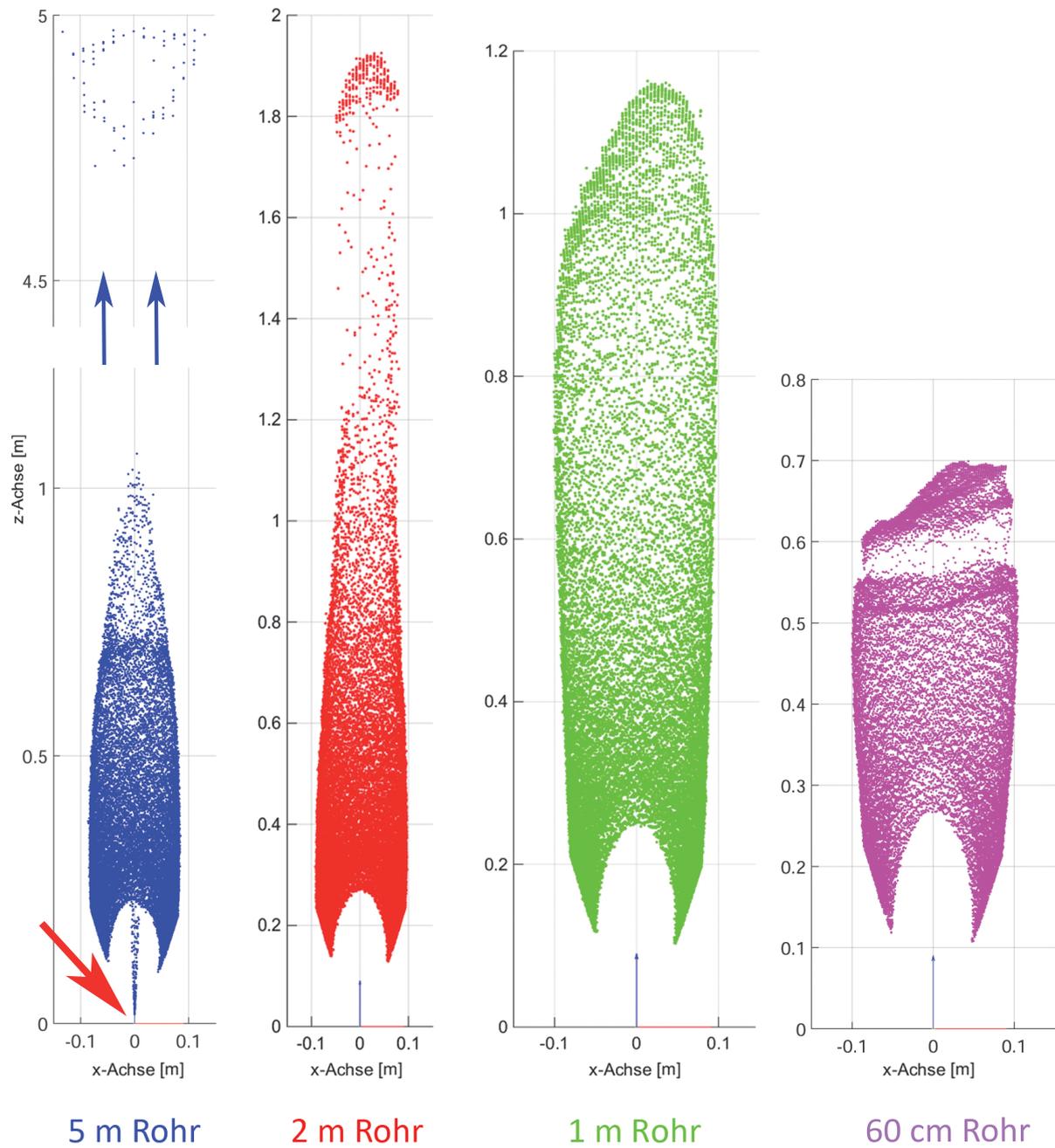


Abbildung 4.13: Aufnahmen mit der SR4000 in Rohren mit einem Durchmesser von 15 cm und unterschiedlichen Längen in der xz-Ebene. Am Ende der Rohre befindet sich jeweils ein 90° Bogen.

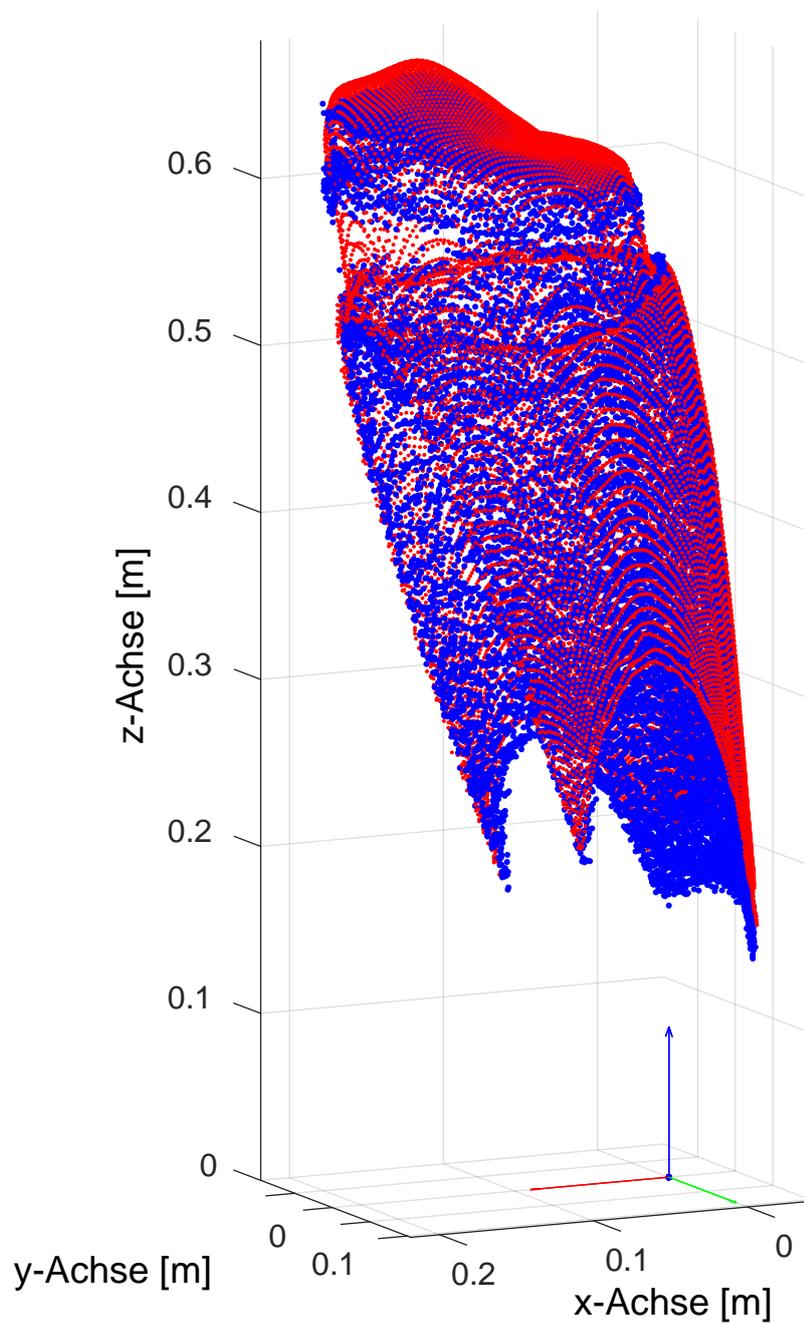


Abbildung 4.14: Originale (blau) und gefilterte (rot) Aufnahmen mit der SR4000 in einem 60 cm langen Rohren und angeschlossenem 90° Bogen. Aufgrund eines eingestellten Lagewinkels von 12° entsteht eine asymmetrische Verteilung der Messpunkte auf der Rohrwand.

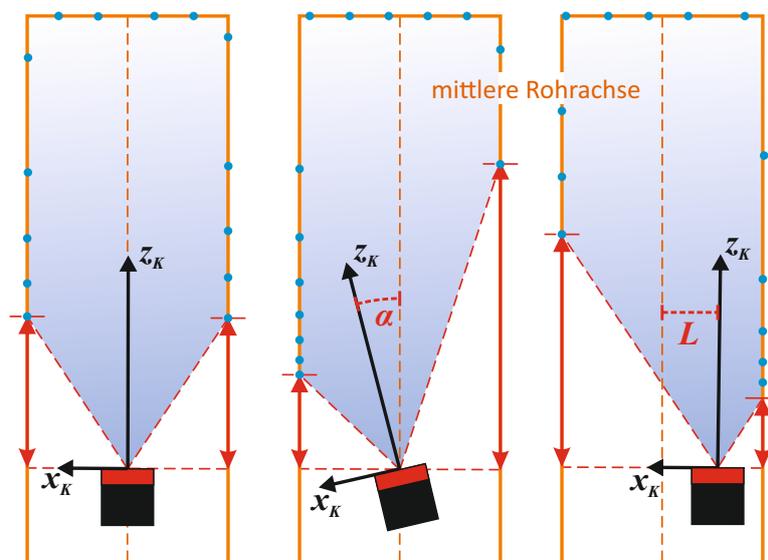


Abbildung 4.15: 2D Skizze möglicher Positionen einer ToF-Kamera bei Aufnahmen im Rohr. Links: Nullposition, Mitte: Aufnahme mit Lagewinkel α , Rechts: Aufnahme mit Lageabweichung L .

Links ist eine Aufnahme ohne eingestellte äußere Orientierung ($\alpha=\beta=L=H=0$), in der Mitte eine Aufnahme mit einem Lagewinkel α und rechts mit einer Lageabweichung L dargestellt. Die rot markierten Pfeile an den Rohrrändern markieren die Höhe der ersten Auftreffpunkte in z -Richtung zu beiden Seiten des Rohres. Die blaue Farbgebung sowie die Verteilung der blauen Punkte stellen die Abnahme der Punktdichte dar.

Eine Änderung des Lagewinkels α oder der Lageabweichung L führt automatisch zu einer Änderung der Verteilung der Messpunkte in der Aufnahme. Die Abstände zu den ersten Messpunkten sind auf beiden Seiten nicht mehr gleich groß. Auch die Punktverteilung auf dem Rohrelement verliert ihre Symmetrie. Bei einem eingestellten Lagewinkel der Kamera nach links trifft ein Großteil der Messpunkte auf der linken Rohrseite auf. Von der rechten Rohrseite wird nur noch ein kleiner Abschnitt erfasst. In der Abbildung 4.14 ist dieser Effekt auch anhand einer realen Aufnahme gut erkennbar. Selbiges, nur weniger ausgeprägt, tritt auch bei einer Lageabweichung der ToF-Kamera auf. Eine Kombination aus Lagewinkel und Lageverschiebung kann sich entsprechend stärker auf die Verteilung der Punktwolke auswirken. Erste Versuche haben gezeigt, dass dieses Ungleichgewicht bei der Punktverteilung die Genauigkeit der Auswertungsalgorithmen beeinflussen kann. Auf dieses Thema wird in Kapitel 5 eingegangen. Die Änderung der äußeren Orientierung der ToF-Kamera zum Rohrelement kann leicht dazu führen, dass die Distanzmessungen der äußeren Pixel des Sensors außerhalb des Messbereichs, also unter 10 cm liegen [MESA Imaging AG 2011]. Dies hat zur Folge, dass im Vergleich zur theoretisch korrekten Distanz zu große oder zu

kleine Distanzen gemessen werden [MESA Imaging / Gerald Dahlmann 2013] oder es zu einer Übersättigung der Pixel und damit zum Ausfall einzelner Messungen kommt. Gerade bei realen Messungen liegt die ToF-Kamera oftmals nicht genau entlang der mittleren Rohrachse ausgerichtet, sondern kann sich je nach Aufbau der Inspektionseinheit mehr in der Sohle des Rohres befinden. In diesem Fall kann bei einzelnen Pixeln relativ leicht, auch ohne große Änderung der äußeren Orientierung, die minimale Messdistanz unterschritten werden. Die Entfernung der Messergebnisse übersättigter Pixel lässt sich anhand der Amplitudenmessung realisieren. Haben diese den Wert 1, müssen die entsprechenden Messungen aus dem Auswerteprozess genommen werden.

4.3.2 Aufweitung der Punktwolke aufgrund von Mehrwegeeffekten

Die Positionierung der ToF-Kamera im Rohr führt zu einem erhöhten Einfluss von Mehrwegeeffekten auf die Aufnahmen. Die in [MESA Imaging AG 2013] empfohlenen Messkonfigurationen mit einem großen Abstand zu in Messrichtung verlaufenden Flächen zur Vermeidung von Mehrwegeeffekten können in dem hier beschriebenen Anwendungsfall nicht eingehalten werden (Abbildung 4.16).

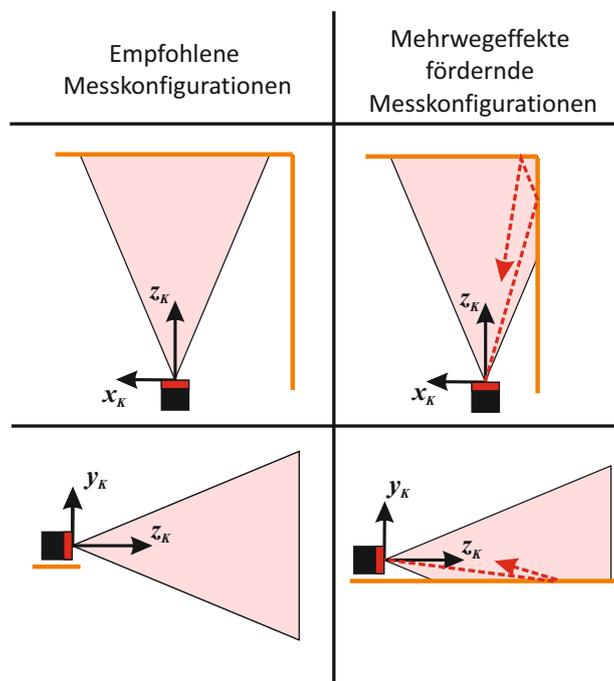


Abbildung 4.16: Skizze von verschiedenen Messkonfigurationen inklusive des Einflusses von möglichen Mehrwegeeffekten auf die Aufnahmen (nach [MESA Imaging AG 2013])

Es hat sich gezeigt, dass, bedingt durch die Messkonfiguration, Mehrwegeeffekte einen starken Einfluss auf die Gestalt der Punktwolke haben. Bei Betrachtung der in Abbildung 4.13 dargestellten Punktwolken fällt auf, dass sich der Durchmesser mit zunehmendem Abstand von der Aufnahme position bis zu einem bestimmten Punkt aufweitet und sich anschließend, je nach Rohrlänge, auch wieder verjüngen kann. Dieser Effekt wird im weiteren Verlauf als Aufweitung der Punktwolke bezeichnet. Ursache für die Aufweitung sind Distanzmessungen, die durch Mehrwegeeffekte beeinflusst werden und somit größer als die theoretisch korrekte Distanz sind. Das Phänomen der Aufweitung tritt auch, wie in [Fuchs 2012] beschrieben, bei Aufnahmen in einer Schachtel auf. [Fuchs 2012] bezeichnet dieses Phänomen daher als „balloned box“ Messungen. Auch die Rücksprache mit dem Hersteller der SR4000 bestätigte den Zusammenhang zwischen Aufweitung und Mehrwegeeffekten [Kubacki 2014]. Daher wurde untersucht, welche Faktoren bei Aufnahmen innerhalb des Rohres Mehrwegeeffekte verursachen können. Es hat sich gezeigt, dass drei Faktoren einen nachweisbaren Einfluss auf die Entstehung von Mehrwegeeffekten und damit auf die Aufweitung der Punktwolke besitzen:

- Der Abstand der Kamera zum nächsten folgenden Bogen
- Die Art bzw. der Winkel des nachfolgenden Bogens
- Material des Endstücks

Abstand zum nachfolgenden Bogen

Die Stärke der Mehrwegeeffekte hängt vom Abstand der ToF-Kamera zu dem nächstliegenden Bogen ab. Je länger der Abstand der ToF-Kamera zum folgenden Bogen ist, desto geringer sind die Auswirkungen von Mehrwegeeffekten auf die Aufnahme und desto geringer ist die Aufweitung der Punktwolke. Um die Aufweitung quantifizierbar und damit vergleichbar zu machen, wird an dieser Stelle das 2D Zylinder-Fitting zur Analyse der Aufweitung verwendet. Dazu wird für jeden ausgewerteten Zylinderabschnitt der Radius bestimmt und bezüglich der zugehörigen mittleren z-Koordinaten abgebildet. An den Verläufen der Radien ist die Aufweitung in Abhängigkeit vom Abstand zum Ursprung des Kamerakoordinatensystems ersichtlich. Die Größe der jeweiligen Zylinderabschnitte beträgt bei der Auswertung 3 cm. Befanden sich in einem Zylinderabschnitt weniger als 50 Punkte, wurde für diesen Abschnitt kein Radius bestimmt.

In Abbildung 4.17 sind die Ergebnisse der beschriebenen Analyse anhand der Aufnahmen in einem 60 cm, 1 m und 2 m langen Rohr dargestellt. Am Ende der Rohre befand sich immer ein in identische Richtung ausgerichteter 90° Bogen.

Die maximale Aufweitung beträgt beim 2 m Rohr im Verhältnis zum Soll-Radius von 7,5 cm circa 1,5 cm. Beim 1 m langen Rohr steigt die maximale Abweichung vom Soll-Wert auf circa 2 cm. Befindet sich der Bogen sehr nahe an der ToF-Kamera, wie beim 60 cm langem Rohr, kommt es zu einer maximalen Abweichung vom Soll-Radius von 2,5 cm.

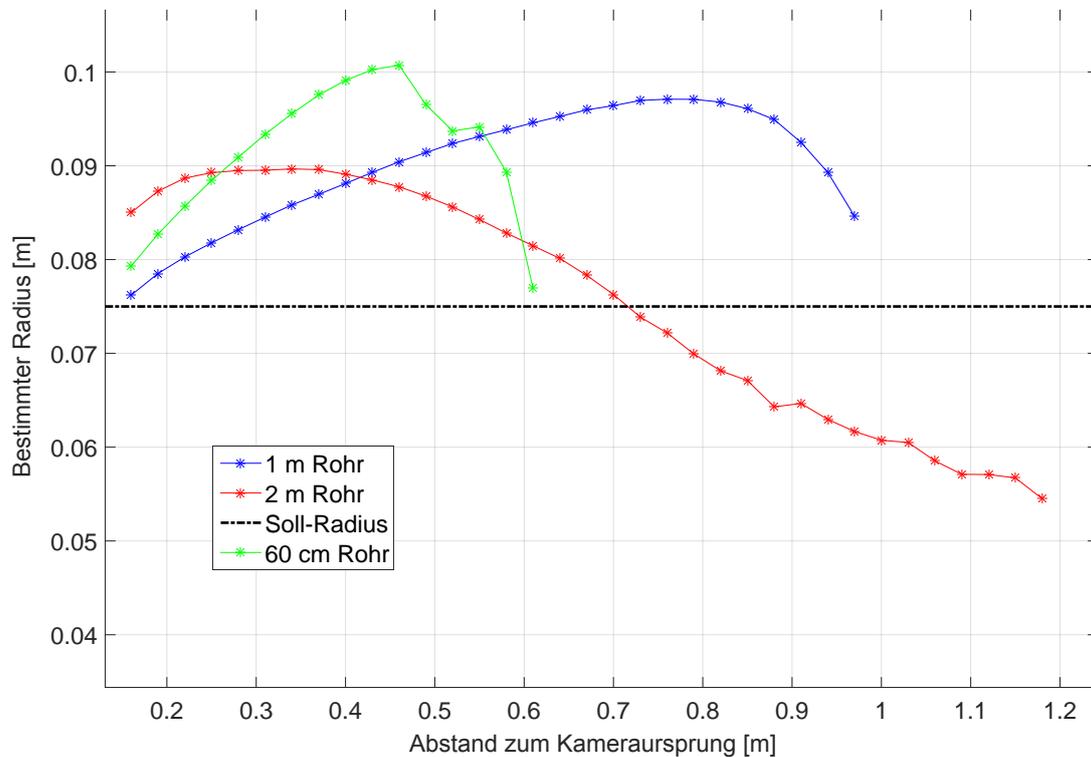


Abbildung 4.17: Darstellung der Aufweitung (Verlauf der Radien) in Abhängigkeit vom Abstand zum nachfolgenden 90° Bogen.

Je näher der folgende Bogen, desto größer ist der Einfluss von Mehrwegeeffekten auf die Distanzmessungen und damit auch auf die Aufweitung. Dieses Phänomen entsteht aufgrund der höheren Signalstärke der Mehrwegeeffekte, wenn sich der Bogen nahe der ToF-Kamera befindet. Die beeinflussenden Signale sind dadurch wesentlich stärker und führen zu größeren Abweichungen der einzelnen Distanzmessungen bezüglich der korrekten Distanz. Die Maxima der Aufweitung befinden sich nicht an einer identischen Position bezüglich des Abstands zum Bogen, sondern variieren je nach Rohrlänge. Bei allen Rohren handelt es sich nicht um einen kontinuierlich linearen Anstieg der Aufweitung. Es folgt zuerst immer ein Anstieg bis zum einem Maximum, danach nimmt die Aufweitung wieder ab. Beim 2 m Rohr kommt es ab 0,7 m Abstand zur ToF-Kamera sogar zu einer Umkehrung der Aufweitung. Ab diesem Punkt wird der Soll-Radius unterschritten. Dieser Effekt lässt sich auch

gut anhand der Punktwolke des 2 m Rohres in der Abbildung 4.13 erkennen. Ab 0,7 m Abstand nimmt die Dichte der Punkte kontinuierlich ab und die Messpunkte verschieben sich in Richtung der mittleren Rohrachse. Ab einem Abstand von 1,2 m konnten aufgrund der Unterschreitung der Mindestpunktzahl die Radien nicht mehr korrekt bestimmt werden, daher existieren ab diesem Wert auch keine Ergebnisse mehr.

Die Ursache für den abrupten Abfall des Radius im Bereich von 0,5 m Abstand zur Kamera bei der Auswertung des 60 cm langen Rohres ist die Steckverbindung zwischen Rohr und Bogen. Diese führt in der Punktwolke zur Abbildung einer kantenähnlichen Struktur und damit zu einem entsprechenden Abfall der Radien in diesem Bereich.

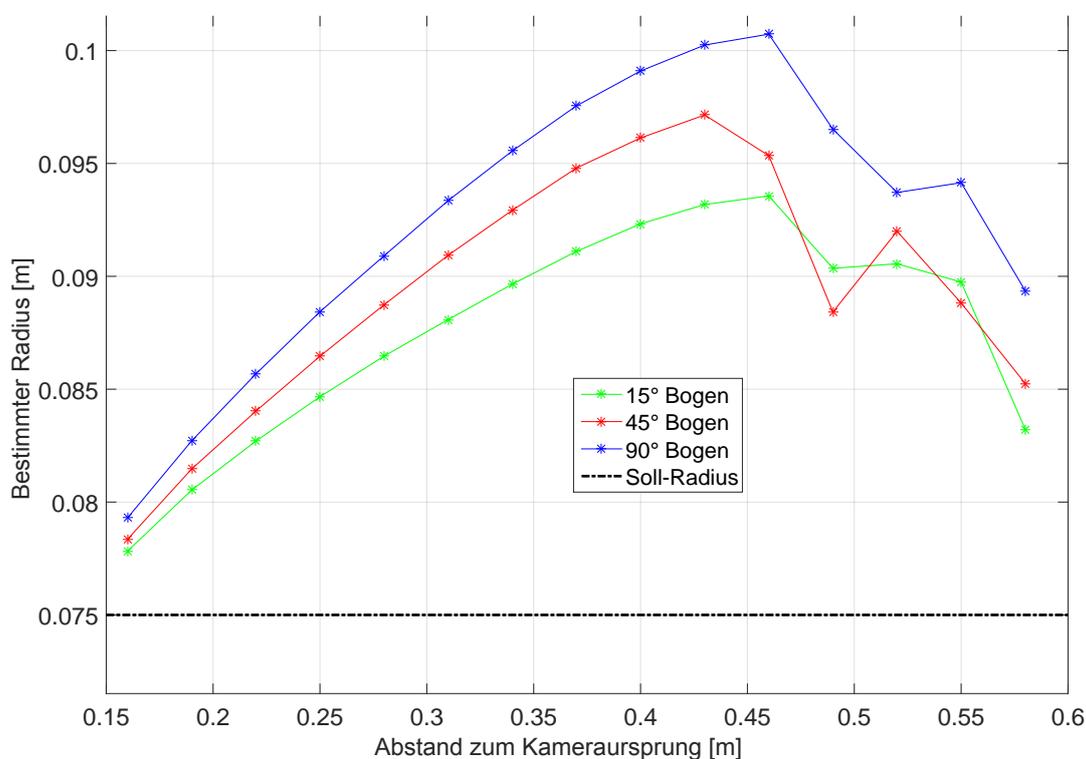


Abbildung 4.18: Darstellung der Aufweitung (Verlauf der Radien) in einem 60 cm langen Rohr in Abhängigkeit vom angeschlossenen Bogen.

Winkel des nachfolgenden Bogens

Um zu verifizieren, inwiefern die Größe des Bogenwinkels Einfluss auf die Mehrwegeeffekte hat, wurden Bögen mit den Winkeln 15°, 45°, und 90° bezüglich deren Auswirkungen auf die Aufweitung untersucht. Wie im vorherigen Abschnitt festgestellt, treten Mehrwegeeffekte bei kurzen Abständen zum nachfolgenden Bogen stärker auf als bei längeren. Aus diesem

Grund erfolgte diese Untersuchung in einem 60 cm langen Rohr.

In Abbildung 4.18 sind wieder die berechneten Radien bezüglich des Abstands zur Aufnahme position dargestellt. Anhand der Auswertung ist eindeutig ersichtlich, dass der Winkel des folgenden Bogens Auswirkung auf die Größe der Aufweitung hat. Bei einem 15° Bogen beträgt die maximale Aufweitung im Verhältnis zum Soll-Radius circa 1,7 cm, bei einem 90° circa 2,5 cm.

Je größer der Winkel des Bogens ist, desto größer ist die maximale Aufweitung. Auch dieses Phänomen lässt sich auf den Einfluss der Mehrwegeffekte zurückführen. Je größer der Winkel des Bogens ist, desto stärker werden Signale reflektiert da hier die Auftreffwinkel größer sind. Bei einem 90° Bogen liegen diese im Bereich von 80° bis 90° . Bei einem Bogen mit kleinerem Winkel treffen die Signale in einem wesentlich flacheren Winkel auf und werden somit in das dem Bogen folgende Rohr abgeleitet. Die Signale werden dadurch weniger stark reflektiert. Dadurch ist die Ausprägung der Mehrwegeffekte bei Bögen mit flacherem Winkeln geringer als bei Bögen mit größerem Winkel.

Versuche bezüglich der Ausrichtung des Bogens, also die Position des Bogens in Aufnahme richtung der Kamera nach oben/unten bzw. links/rechts, haben keinerlei Auswirkung auf die Stärke der Mehrwegeffekte gezeigt.

Material des Endstückes

Um eine Aussage zu erhalten, ob unterschiedliche Materialien der Abdeckung die Entstehung von Mehrwegeffekten beeinflussen, wurden am Ende eines 1 m langen Rohres drei verschiedene Abdeckungsarten untersucht:

1. ohne Abdeckung (zum Vergleich)
2. Abdeckung aus PVC
3. Abdeckung aus Kartonage

Die Ergebnisse sind in der Abbildung 4.19 dargestellt. Es hat sich gezeigt, dass eine Abdeckung aus Kartonage die stärksten Mehrwegeffekte und damit die größte Aufweitung erzeugt. Eine Abdeckung mittels eines PVC-Deckels entspricht ungefähr den Ergebnissen mit einem 90° Bogen. Interessant ist an dieser Stelle, dass auch die Aufnahme ohne Abdeckung eine Aufweitung beinhaltet. Diese entsteht ohne den Einfluss eines Elements am Ende des Rohres aufgrund der durch die Rohrrinnenwand bedingten Mehrwegeffekte. Diese Mehrwegeffekte allein führen schon zu einer Aufweitung von circa 1 bis 1,7 cm im Vergleich zum Soll-Radius von 7,5 cm.

Die hier durchgeführten Versuche erfolgten immer mit handelsüblichen KG-Rohren. Bei realen Inspektionen muss berücksichtigt werden, dass eventuell verschiedene Materialien vorkommen oder aber auch Verschmutzungen, Kalkablagerungen oder Feuchtigkeit auf den Rohrwänden die Materialeigenschaften verändern können. Dies wird die Stärke der Mehrwegeffekte und damit die Aufweitung der Punktwolke beeinflussen.

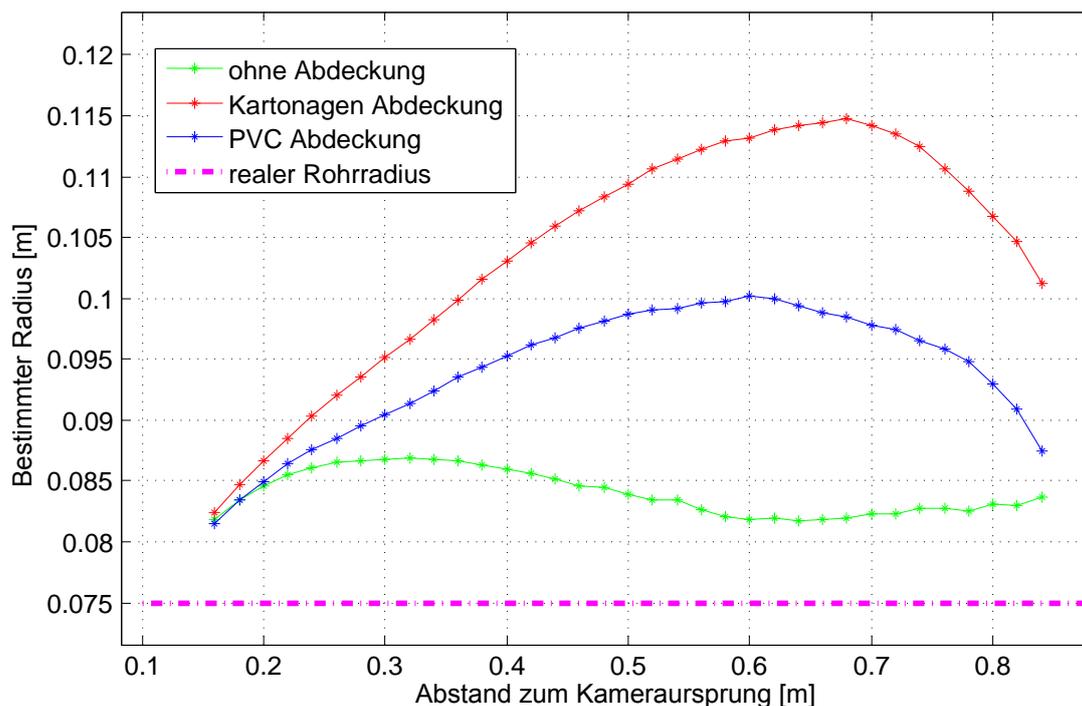


Abbildung 4.19: Darstellung der Aufweitung (Verlauf der Radien) in einem 1 m langen Rohr in Abhängigkeit von der Art der Abdeckung.

4.3.3 Konsequenzen für die Durchführung der Versuche

Insgesamt haben die Untersuchungen gezeigt, dass Aufnahmen innerhalb eines geraden Rohres spezielle Charakteristika besitzen, die auch die Bestimmung der Zylinderachse beeinflussen können. Zusammengefasst sind dies vor allem:

- die Aufweitung der Punktwolke aufgrund von Mehrwegeffekten
- Verteilung der Messpunkte in Abhängigkeit von der äußeren Orientierung

Anhand der bisherigen Ergebnisse können folgende Rahmenbedingungen für die Durchführung der Versuche abgeleitet werden:

1. Eine Beschneidung der qualitativ minderwertigen Bereiche der Punktwolke erscheint sinnvoll. Dies ist zum einen der Bereich ab einem Abstand von circa 1–1,2 zur ToF-Kamera, in dem die Qualität der Messungen sowie die Punktdichte aufgrund der unvorteilhaften Messkonfiguration abnimmt. Des Weiteren kommt es aufgrund der Spezifikation der ToF-Kamera im Bereich von 0–0,2 m Abstand zum Ursprung zu keiner zirkulären Verteilung der Messpunkte. Die in diesem Bereich vorhandenen spitzen Ausläufer der Punktwolke wölben sich in Richtung der Rohrmittelachse und sind ebenfalls als fehlerbehaftet einzustufen. Außerdem befinden sich Fehlmessungen, die aufgrund der Überschreitung des Eindeutigkeitsbereiches oder aufgrund der Unterschreitung der minimalen Messdistanz entstehen, ebenfalls meist im Bereich von 0–0,2 m. Bei den durchgeführten Versuchen zur Bestimmung der äußeren Orientierung erfolgt aus diesen Gründen eine Entfernung der Bereiche von 0–0,2 m sowie der Bereiche ab einem Abstand von 1,2 m zum Ursprung.
2. Bei allen Aufnahmen erfolgt eine Filterung der Distanzmessungen mittels eines Gauß- bzw. Mittelwert-Filters, um die Verteilung der Messpunkte zu verbessern und das Rauschen der Distanzmessungen zu reduzieren (siehe vorherigen Abschnitt).
3. Aufgrund der gewonnenen Erfahrungen konnten die Rahmenbedingungen für die folgenden Versuche festgelegt werden. Die Versuche erfolgen mit drei verschiedenen Rohrlängen. Es handelt sich um ein 60 cm, 1 m und 2 m langes, handelsübliches KG-Rohr. Mit diesen Längen wird der als sinnvoll einzuschätzende Messbereich zur Bestimmung der äußeren Orientierung abgedeckt. Bei kleineren Rohrlängen wird der erfasste Bereich des geraden Rohres zu klein, bei größeren Rohren ist im Vergleich zum 2 m Rohr kein Gewinn an Erkenntnissen zu erwarten. Die Versuche werden zusätzlich auch mit drei verschiedenen Bögen (15° , 45° und 90°) am Ende des Rohres durchgeführt, um den Einfluss der Mehrwegeeffekte abschätzen zu können.

4.4 Versuchsaufbau und -durchführung

Um eine Aussage über die Genauigkeit der Verfahren bezüglich deren Bestimmung der äußeren Orientierung treffen zu können, wurden im Geodätischen Labor der Universität der Bundeswehr München Versuche mit dem entwickelten Positioniersystem (siehe Abschnitt 3.1.2) und der SR4000 in den drei verschiedenen langen KG-Rohren durchgeführt. Der innere Rohrdurchmesser betrug jeweils 15 cm.

Mit dem entwickelten Positioniersystem können Lageabweichungen entlang der x-Achse auf 0,01 mm und Rotationen um die y-Achse des Kamerakoordinatensystems auf $0,1^\circ$ genau eingestellt werden. Unter Berücksichtigung der Dimension der Kamera und des gegebenen Durchmessers beträgt die maximal einstellbare Lageabweichung aufgrund der Konstruktion der Kamerahalterung und der Installation im Rohr ± 22 mm. Die Rotation um die y-Achse kann maximal $\pm 15^\circ$ betragen. Die Einstellung von Sollwerten für den Höhenwinkel und die Höhenabweichung ist mit der Halterung nicht möglich. Diese beiden Parameter der äußeren Orientierung können aber grundsätzlich als konstant angesehen werden [Striegl et al. 2014].

4.4.1 Versuchsaufbau

Vor der Durchführung der Versuche muss die Lage der ToF-Kamera bezüglich der mittleren Rohrachse des jeweiligen KG-Rohres eingemessen werden (siehe Abbildung 4.20). Die ToF-Kamera wird dazu auf dem Positioniersystem montiert und dieses wird mittels einer Montageplatte fest mit dem jeweiligen KG-Rohr verschraubt. Die Einmessung erfolgt in zwei Teilschritten:

Zuerst wird, wie in Abbildung 4.20 (oben) dargestellt, die Zielachse eines Theodolits entlang der mittleren Rohrachse ausgerichtet. Dazu wird eine Abdeckung mit einem zentrierten Loch am hinteren Ende des Rohres montiert und mit einer Lichtquelle von außen beleuchtet. Am vorderen Ende des Rohres befindet sich die horizontal angebrachte Montageplatte mit einer zentralen Markierung. Diese beiden Markierungen definieren die Richtung der mittleren Rohrachse. Mit Hilfe eines unter dem Theodolit angebrachten Lineartisches erfolgt die Ausrichtung der Zielachse des Theodolits entlang der mittleren Rohrachse.

In einem zweiten Schritt erfolgt die Montage und Einmessung der auf dem Linear- und Winkelverstellisch installierten Kamera. Mittels eines Markierungsdorns kann der Drehpunkt (Abbildung 4.20, Mitte) in die Zielachse durch Verstellung des Lineartisches eingemessen werden. Dieser Vorgang wird durch die Bestimmung der horizontalen Winkel zu der linken und rechten Rohrwand kontrolliert.

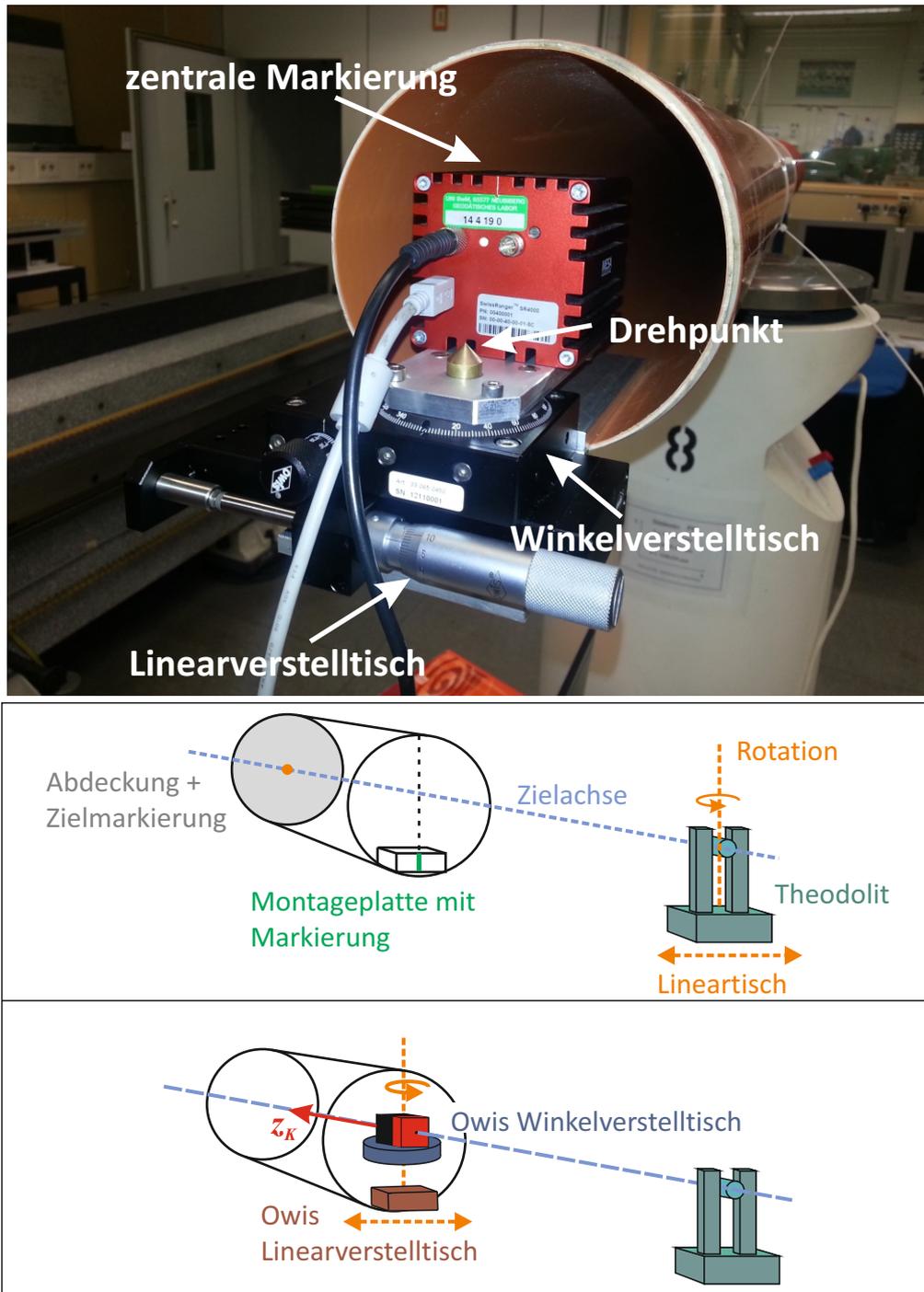


Abbildung 4.20: Oben: Aufnahme des Versuchsaufbaus mit montiertem Linear- und Winkelverstelltisch sowie eingemessener SR4000. Mitte: Skizze des Vorgehens zur Ausrichtung der Zielachse entlang der Rohrachse. Unten: Einmessung der z-Achse der ToF-Kamera entlang der Zielachse.

Die beiden Winkel sollten bei korrekter Einmessung identisch sein. Anschließend muss durch eine zentral angebrachte Markierung am Kameragehäuse die z-Achse entlang der Zielachse ausgerichtet werden (Abbildung 4.20, unten).

Bei der Einmessung ist aufgefallen, dass die Profile der KG-Rohre keinen idealen Kreis beschreiben. Messungen der Rohrdurchmesser mittels einer Schieblehre an den Enden, der bei den Versuchen verwendeten Rohre, in vier verschiedenen Positionen haben Abweichungen des Profildurchmessers von bis zu 4–5 mm ergeben (siehe Abbildung 4.21). Da die Messungen des Profildurchmessers auch an den beiden Enden eines Rohres unterschiedliche Ergebnisse lieferten, ist davon auszugehen, dass die Verformungen über die gesamte Rohrlänge differieren.

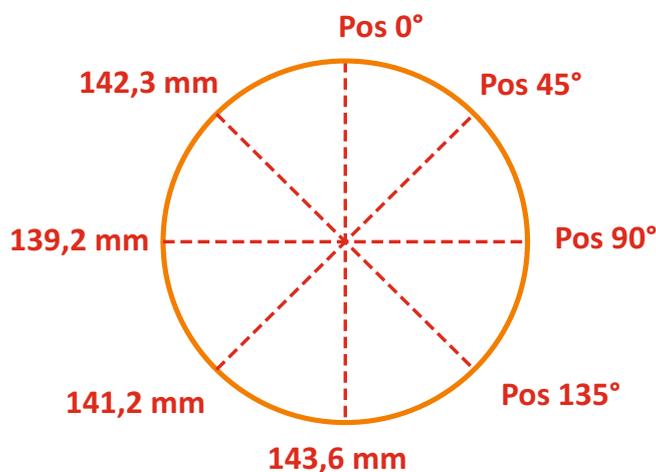


Abbildung 4.21: Rohrinnendurchmesser an verschiedenen Positionen beim 2 m Rohr.

Die Verformungen entstehen eventuell bei der Produktion oder durch die Lagerung. In der Realität können jedoch Verformungen des Rohrprofils leicht entstehen, zum Beispiel durch auf das Rohr wirkende Kräfte, wie das Gewicht eines Baumes. Bei den Versuchen kann es durch die Schraubbefestigung der Montageplatte dazu kommen, dass sich das Rohr leicht verzieht und dadurch von einem idealen Kreis abweicht. Dies wirkt sich natürlich auch auf die Qualität der Einmessung aus. Aus diesem Grund kann die Einmessgenauigkeit des Lagewinkels und der Lageabweichung nur geschätzt werden. Diese lag aber bei den Lagewinkeln in einem Bereich von 1° bzw. im Bereich von 5 mm bei den Lageabweichungen. Diese Genauigkeitsangabe ist primär bei der absoluten Bestimmung der äußeren Orientierung der ToF-Kamera im Rohr von Bedeutung. Bei der relativen Bestimmung der äußeren Orientierung, also der Differenz zwischen zwei Aufnahmen, gilt die oben beschriebene Genauigkeit von 0,01 mm bei der Lageabweichung und $0,1^\circ$ beim Lagewinkel.

Die Auswirkungen der Verformung des Rohrprofils auf die Genauigkeit der Bestimmung der Zylinderachse mit den Auswerteverfahren sind nur schwer abschätzbar, da die Dimension der Verformung bezüglich der gesamten Rohrlänge differieren kann. Die Größe der Abweichungen liegt mit 4–5 mm unterhalb der Messgenauigkeit der ToF-Kamera (siehe Abschnitt 3.1.1) und wird für die Auswertung als vernachlässigbar angesehen.

Da das Positioniersystem am Anfang der KG-Rohre installiert werden muss, wurden drei verschieden lange Rohre bei den Versuchen eingesetzt, um unterschiedliche Längsbereiche zum folgenden Bogen abzudecken (siehe Abschnitt 4.3.3). An jedem dieser Rohre konnte jeweils ein 15° , 45° und 90° Bogen angebaut werden. Bei Letzterem handelt es sich laut Hersteller korrekterweise um einen 89° Bogen. In der Arbeit wird dieser der Einfachheit halber aber weiterhin als 90° Bogen bezeichnet.

Die Kombination der unterschiedlich langen Rohre mit den jeweiligen Bögen ergibt somit insgesamt neun verschiedene Versuchsaufbauten. Diese werden in den folgenden Abschnitten immer durch Benennung der jeweiligen Rohrlänge und dem Winkel des folgenden Bogens beschrieben. Die Kurzbezeichnung für einen Versuchsaufbau lautet z.B. 2m - 45° .

4.4.2 Versuchsdurchführung

Da nur die zwei Parameter Lagewinkel und Lageabweichung der äußeren Orientierung bei den Versuchen verändert werden, können dementsprechend drei verschiedene Kategorien von Versuchen durchgeführt werden:

- Versuche mit Änderung des Lagewinkels in $0,5^\circ$ Schritten bis zu 15° .
- Versuche mit Änderung der Lageabweichung in 1 mm Schritten bis zu 22 mm
- Versuche mit einer Kombination aus einer Änderung des Lagewinkels von $-4,5^\circ$ bis zu $+4,5^\circ$ (in $0,5^\circ$ Schritten) und konstanter eingestellter Lageabweichung von circa 1,5 cm (je nach Versuch).

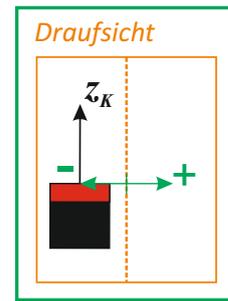
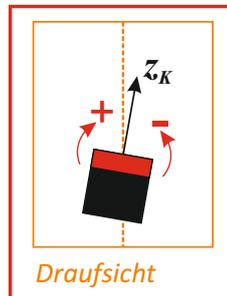
Die jeweiligen Schrittweiten sind entsprechend der Ergebnisse aus Abschnitt 5.2 gewählt. Eine Definition der Einstellungsmöglichkeiten inklusive der verwendeten Vorzeichen finden sich in Abbildung 4.22.

Der Höhenwinkel und die Höhenabweichung sind nicht einstellbar. Der Ursprung des Kamerakoordinatensystems kann sich dementsprechend einige mm über bzw. unterhalb der mittleren Rohrachse befinden. Auch der Höhenwinkel kann von einer parallelen Position zur mittleren Rohrachse leicht abweichen. Beide Parameter sind während eines Versuches als konstant anzusehen.

Lagewinkel α

Kamera nach rechts gedreht = positive Rotation

Kamera nach links gedreht = negative Rotation

**Lageabweichung L**

Kamera nach rechts verschoben = positive Translation

Kamera nach links verschoben = negative Translation

Abbildung 4.22: Definition der Richtung und Vorzeichen bei den inkrementellen Änderungen von Lagewinkel und Lageabweichung bei den Versuchen.

Bei jeder Versuchsdurchführung wurde mit einer Positionierung der ToF-Kamera ohne eingestellten Lagewinkel bzw. Lageabweichung begonnen. Diese Position wird als Nullposition bezeichnet. Danach werden inkrementell entweder der Lagewinkel, die Lageabweichung oder beide Parameter in Kombination verändert. Die jeweiligen Einstellungen werden bei der Genauigkeitsanalyse als Soll-Werte verwendet.

An jeder Position werden Aufnahmen mit der ToF-Kamera durchgeführt. Die durch die Verfahren bestimmten Lagewinkel und Lageabweichungen werden als Ist-Werte bezeichnet. Anhand der Differenz zwischen Ist- und Soll-Wert erfolgt eine Analyse, mit welcher Genauigkeit die beiden Parameter der äußeren Orientierung, Lagewinkel und Lageabweichung, durch die Verfahren bestimmt werden können. Durch die Auswertung mehrere Aufnahmen an einer Position können auch Standardabweichungen zur Bewertung der Genauigkeit ermittelt werden.

Kapitel 5

Genauigkeitsuntersuchungen zur Bestimmung der äußeren Orientierung

Dieses Kapitel beinhaltet die Ergebnisse der Untersuchung der Genauigkeit, mit der die Verfahren RANSAC, Hough-Transformation und 2D Zylinder-Fitting die äußere Orientierung der ToF-Kamera zum Rohr bestimmen können.

Der Workflow zur Genauigkeitsuntersuchung ist in Abbildung 5.1 dargestellt. Bevor die Verfahren zur Bestimmung der äußeren Orientierung zum Einsatz kommen, erfolgt die Vorbereitung der Daten. Diese beinhaltet die in Abschnitt 4.3.3 beschriebene Beschneidung der Punktwolke sowie die Filterung der Distanz- und Amplitudenmessungen. Bei den Verfahren RANSAC und Hough-Transformation erfolgt zudem noch die Bestimmung der benötigten Oberflächennormalen.

Die durch das Positioniersystem eingestellte äußere Orientierung wird als “vor-/eingestellte äußere Orientierung” bezeichnet. Die einstellbaren Parameter Lagewinkel α und Lageabweichung L werden somit als “vor-/eingestellter Lagewinkel” bzw. “vor-/eingestellte Lageabweichung” deklariert.

Die durch die Verfahren bestimmte äußere Orientierung der ToF-Kamera wird als “bestimmte äußere Orientierung” und die jeweiligen Parameter entsprechend als “bestimmter Lagewinkel” oder “bestimmte Lageabweichung” bezeichnet.

Die Bewertung der Genauigkeit, mit der die äußere Orientierung bestimmt werden kann, ist durch den Vergleich der “Ist-Werte” (= bestimmte äußere Orientierung) mit den definierten “Soll-Werten” (= voreingestellte äußere Orientierung) möglich. Der Ist-Wert berechnet sich aus der Mittelung der ausgewerteten Ergebnisse mehrerer Aufnahmen an einer Position. Da die Parameter Höhenwinkel β und Höhenabweichung H nicht einstellbar sind, wird für diese als Soll-Wert der Wert 0 angenommen.

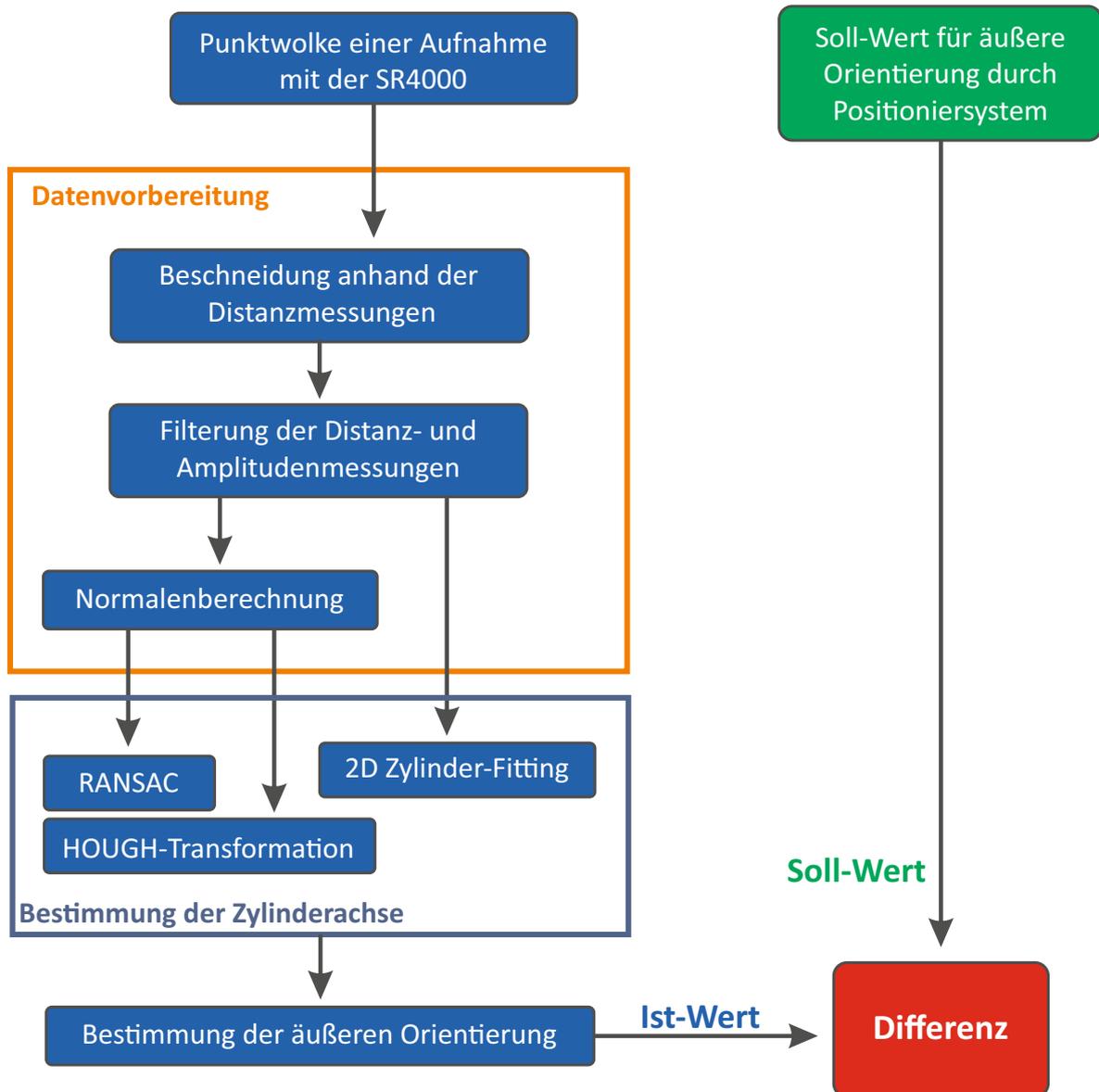


Abbildung 5.1: Workflow zur Genauigkeitsuntersuchung.

Die Abweichung zwischen Soll- und Ist-Wert wird im weiteren Verlauf als “Differenz” bezeichnet (siehe Abbildung 5.1). Anhand der Differenz lässt sich eine Aussage über die Genauigkeit bei der Bestimmung der äußeren Orientierung treffen.

Bei den Darstellungen der Ergebnisse definiert in den Diagrammen die y-Achse immer die Differenz zwischen dem Soll- und Ist-Wert für den jeweiligen Parameter der äußeren Orientierung. Die x-Achse definiert die Änderung des voreingestellten Lagewinkels bzw. der Lageabweichung. Die Änderung der Differenz eines Parameters bezüglich der Änderung eines voreingestellten Parameters, zum Beispiel die Differenz des Parameters Lageabweichung in Abhängigkeit zum voreingestelltem Lagewinkel wird kurz als “ L bezüglich α ” bezeichnet.

Um die Ergebnisse der Auswertung vergleichbar darstellen zu können, wird bei einigen Auswertungen der an der Nullposition bestimmte Mittelwert von den Mittelwerten der anderen Aufnahmepositionen subtrahiert. Die Ergebnisse werden somit relativ zur theoretischen Nullposition betrachtet. Dies wird als “relative Darstellung” der Ergebnisse bezeichnet.

Die bei den Auswertungen eingestellten Konfigurationsparameter sind in Tabelle 5.1 aufgelistet. Die Werte sind so gewählt, dass sie bei allen Versuchen, also unabhängig vom jeweiligen Aufbau des Rohrsystems (Abstand zum folgenden Bogen bzw. der Winkel des folgenden Bogens), qualitativ brauchbare Ergebnisse bei der Bestimmung der äußeren Orientierung liefern. Bei den Versuchen hat sich aber auch gezeigt, dass es durchaus möglich ist, mit speziell auf eine Aufnahme angepassten Konfigurationsparametern genauere Ergebnisse bei der Bestimmung der äußeren Orientierung zu erzielen. Diese speziellen Konfigurationen versagen aber dann wiederum bei anderen Aufnahmen vollends.

Die Umsetzung des Workflows erfolgt in der Entwicklungsumgebung MATLAB der Firma MathWorks. Sowohl die Eigenentwicklungen als auch die in Kapitel 3.2 vorgestellten Verfahren wurden eigenständig in dieser Umgebung umgesetzt. Dies hat den Vorteil, dass der gesamte Auswertungsprozess, von der Aufnahme mit der SR4000 bis zur Analyse und Auswertung der Ergebnisse, in einer Entwicklungsumgebung erfolgen kann. Grundsätzlich existieren aber auch Bibliotheken, wie die Point Cloud Library – PCL (<http://pointclouds.org>), die vorgefertigte Funktionen zur Anwendung von RANSAC oder Hough-Transformation in der Programmiersprache C++ zur Verfügung stellen.

Tabelle 5.1: Konfigurationsparameter der Auswerteverfahren.

	Parameter	Wert	siehe
Beschneidung	max. Distanz	1,2 m	Abschnitt 4.3.3
	min. Distanz	0,2 m	
Amplitudenwerte	Grenzwert	0.01	Abschnitt 4.3.1
Glättung	Dimension Gauß-Filter	7 x 7 px	Abschnitt 4.3.3
	Dimension Mittelwertfilter	7 x 7 px	
Berechnung der Normalen	Anzahl der einbezogenen Nachbarn	2 px Umfeld = 25 Nachbarn	Abschnitt 3.2.1
RANSAC	Wahrscheinlichkeit p	0,99	Abschnitt 3.2.2
	Grenzwert: Distanzabweichung t_D	$\pm 0,02$ m	
	Grenzwert: Normalenabweichung t_N	$\pm 10^\circ$	
Hough-Transformation	Auflösung Hough-Raum bei der Bestimmung der Orientierung	1°	Abschnitt 3.2.3
	Auflösung Hough-Raum bei der Bestimmung von Aufpunkt und Radius	0,01 m	
	Pufferbereich um die bestimmte Orientierung	10°	
	Pufferbereich um den bestimmten Aufpunkt	0,03 m	
2D-Zylinder-Fitting	Größe der Zylinderabschnitte $z_a - z_b$	0,01 m	Abschnitt 4.2
	Abstand zwischen den Zylinderabschnitten	0,01 m	
	Grenzwert $t_{Std_{MP}}$: maximale Standardabweichung Mittelpunkt	0,005	
	Grenzwert $t_{Std_{Rad}}$: maximale Standardabweichung Radius	0,003 m	
	Grenzwert t_{Rad} : maximaler Radius	0,07 m	

5.1 Voruntersuchung zur Bestimmung der äußeren Orientierung mittels simulierter Aufnahmen

Im Rahmen einer Voruntersuchung wurde die grundsätzliche Eignung der Verfahren sowie die mögliche erreichbare Genauigkeit, mit der diese die äußere Orientierung bestimmen können, mittels simulierter Testdatensätze überprüft. Durch die Simulation können Fehler aufgrund von Ungenauigkeiten bei der Einmessung der ToF-Kamera oder durch den Einfluss von Mehrwegeeffekten, wie sie bei realen Versuchen auftreten, bei der Auswertung ausgeschlossen werden. Des Weiteren soll mit der Voruntersuchung geklärt werden, inwiefern die Verteilung der Messpunkte in Abhängigkeit von der voreingestellten äußeren Orientierung (siehe Kapitel 4.3.1) Auswirkungen auf die Genauigkeit der Ergebnisse der Verfahren hat.

Auswertung simulierter Testdaten: Für die Erstellung der Testdatensätze wurde ein Programm entwickelt, mit dem Messungen einer ToF-Kamera im Rohr bei verschiedensten äußeren Orientierung simuliert werden können. Das Simulationsprogramm berechnet dabei nur die geometrische Lage der Messpunkte bei einer Aufnahme. Signalspezifische Messdaten, wie die Amplitudenmessungen, werden nicht simuliert. Die Simulation selbst basiert auf dem sogenannten Lochkameramodell, dem die SR4000 entspricht.

Mit dem Lochkameramodell werden die Strahlengänge von jedem Pixel des Sensorchips durch das Projektionszentrum simuliert und mit einem Zylindermodell verschnitten. Die Schnittpunkte entsprechen den Messpunkten und die Länge des Strahlengangs der Distanzmessung. Sensorchip und Projektionszentrum können beliebig bezüglich der Lage zum Zylinder verändert werden. Dadurch können verschiedene äußere Orientierungen zum Zylinder respektive Rohr simuliert werden.

In einem zweiten Schritt werden zur Simulation der Messgenauigkeit der ToF-Kamera, die Distanzmessungen mit einer Streuung belegt. Die Streuung wird mit einer Standardabweichung von 0,01 m angesetzt. Anschließend muss mittels der veränderten Distanzmessungen die Lage der Messpunkte neu berechnet werden.

Die Länge des Rohres bzw. des Zylinders ist variabel einstellbar. Durch die Verschneidung mit einer Ebene, kann ein Ende des Rohres bzw. des Zylinders vorgegeben werden.

In Abbildung 5.2 sind reale und simulierte Aufnahmen mit einem Lagewinkel von 10° gegenübergestellt. Fehlmessungen aufgrund von Mehrwegeeffekten bleiben bei der Simulation unberücksichtigt.

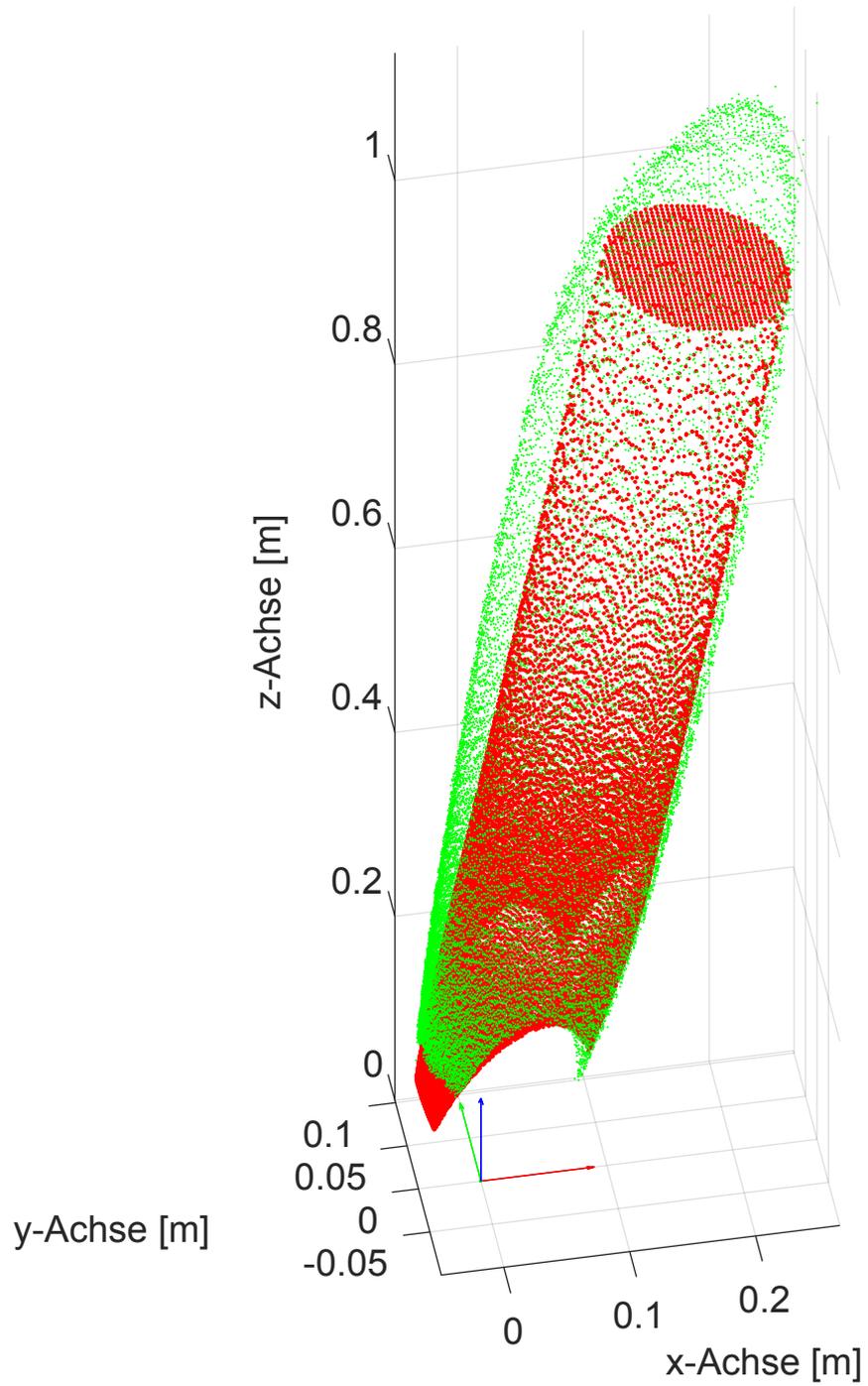


Abbildung 5.2: Simulierte (rot) und reale (grün) Aufnahme im Rohr mit einem Lagewinkel von 10° .

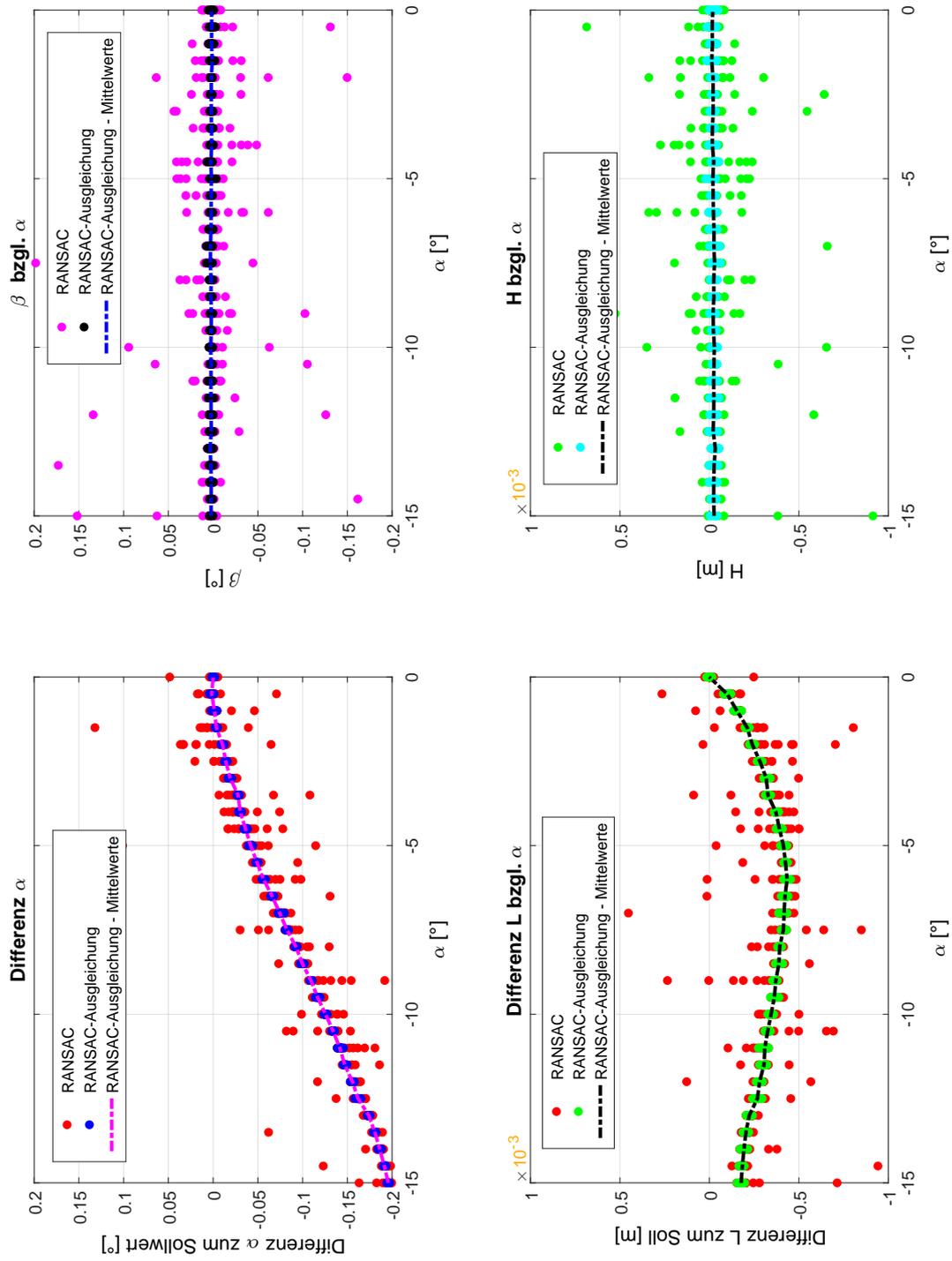


Abbildung 5.3: Auswertung einer Simulation mit Lagewinkeln α von -15° bis 0° mittels RANSAC

In Abbildung 5.3 sind die Ergebnisse der Auswertung einer Simulation mittels des Verfahrens RANSAC dargestellt. Bei den Versuchen wurden Aufnahmepositionen mit voreingestelltem Lagewinkel α in $0,5^\circ$ Schritten von -15° bis 0° simuliert. Dieser Größenbereich entspricht den in Abschnitt 4.4.2 definierten Rahmenbedingungen bei den realen Versuchen. Die restlichen Parameter der äußeren Orientierung, Lageabweichung L , Höhenwinkel β und Höhenabweichung H sind bei der Simulation konstant auf den Wert 0 voreingestellt. An jeder Aufnahmeposition wurden 15 Aufnahmen simuliert.

Die in Abbildung 5.3 dargestellten Punkte „RANSAC“ stellen die durch RANSAC bestimmten Ergebnisse der Parameter der äußeren Orientierung ohne Ausgleichung der Inlier dar. Die Punkte „RANSAC-Ausgleichung“ sind die Ergebnisse mit Ausgleichung der Inlier. Wie anhand der Abbildung ersichtlich ist, können die Ergebnisse ohne Ausgleichung stark von den Soll-Werten bzw. auch von den berechneten ausgeglichenen Ergebnissen abweichen. Aus diesem Grund wird im Weiteren auf die Darstellung und Diskussion der Ergebnisse ohne Ausgleichung bei den Verfahren RANSAC und Hough-Transformation verzichtet.

An jeder Aufnahmeposition werden der Mittelwert und die Standardabweichung der ausgeglichenen Einzelmessungen berechnet. Die Mittelwerte stellen die Ist-Werte des jeweiligen Parameters der äußeren Orientierung an der jeweiligen Aufnahmeposition dar. Die durch die Simulation definierten Soll-Werte werden von diesen subtrahiert. Liegen die Differenzen im negativen Bereich, ist der bestimmte Ist-Wert kleiner als der Soll-Wert. Befinden sich die Differenzen im positiven Bereich, so liegt der gegenteilige Fall vor. Die x-Achse in der Abbildung definiert den voreingestellten Lagewinkel, die y-Achse beschreibt die Differenz von Ist- und Soll-Wert.

Anhand des Verlaufs der Differenzen von Lagewinkel und Lageabweichung sind systematische Abweichungen vom Soll-Wert in Abhängigkeit vom voreingestelltem Lagewinkel erkennbar. Die maximalen Abweichungen betragen beim Lagewinkel $0,2^\circ$ und bei der Lageabweichung circa $0,0005$ m. Die ungleiche Verteilung der Messpunkte hat somit Auswirkungen auf die Genauigkeit des Verfahrens bei der Bestimmung von Lagewinkel und Lageabweichung. Diese Auswirkungen sind aber im Verhältnis zur geforderten Genauigkeit des Anwendungsfalls gering. Da bei der Simulation nur eine Änderung des Lagewinkels erfolgt und dies die Verteilung der Messpunkte an der Ober- und Unterseite des Rohres (von der Kamera aus gesehen) wesentlich geringer beeinflusst als an den beiden Seiten, tritt oben genannter Effekt bei der Bestimmung von Höhenwinkel und Höhenabweichung nicht auf. Die Differenzen zum Soll-Wert liegt bei diesen Parameter nahezu bei Null.

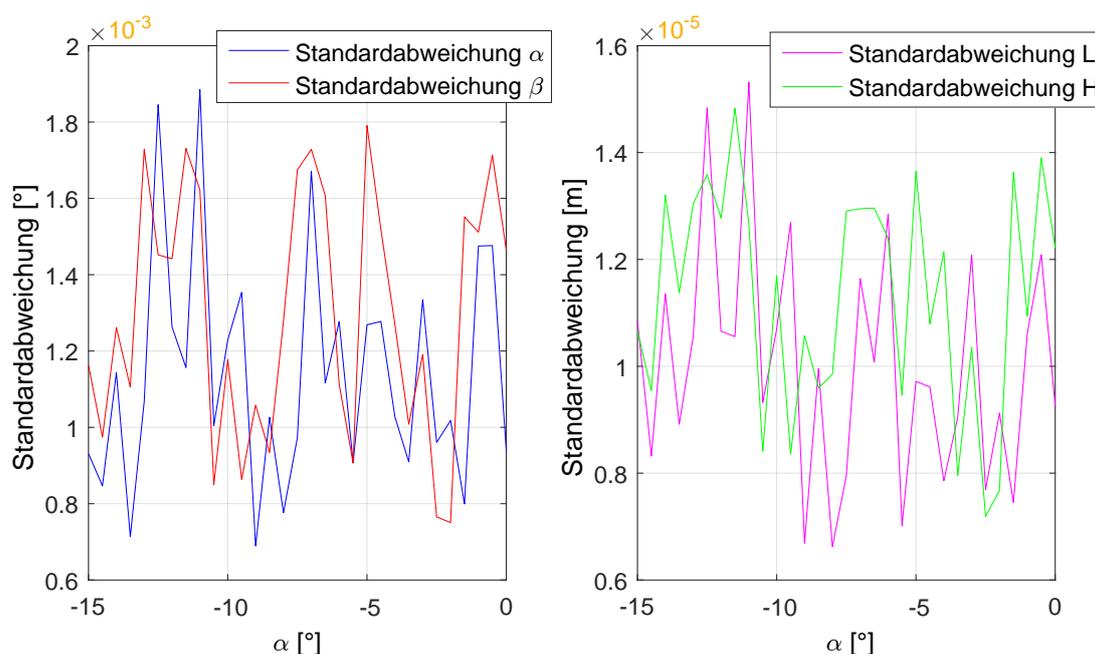


Abbildung 5.4: Standardabweichung bei der Auswertung einer Simulation mit Lagewinkeln α von -15° bis 0° mittels RANSAC.

Abbildung 5.4 stellt die jeweiligen berechneten Standardabweichungen der ausgeglichenen Parameter der äußeren Orientierung dar. Diese Standardabweichung definiert die innere Genauigkeit oder Wiederholgenauigkeit eines Verfahrens bei der Bestimmung der äußeren Orientierung. Die innere Genauigkeit setzt sich aus der Kombination von Messgenauigkeit der ToF-Kamera (bei der Simulation ist die Messgenauigkeit definiert durch die Streuung) und der Genauigkeit, mit dem ein Verfahren die äußere Orientierung bestimmen kann, zusammen.

Die Ergebnisse der Standardabweichung der Parameter der äußeren Orientierung weisen keine signifikante Abhängigkeit zum voreingestellten Lagewinkel auf. Beim Lagewinkel α und Höhenwinkel β liegt die Standardabweichung im Bereich unter einem $0,01^\circ$. Bei der Lage- L und Höhenabweichung H liegt die Standardabweichung unter einem $0,1$ mm.

In Abbildung 5.5 sind die Differenzen der einzelnen Verfahren im Vergleich zueinander dargestellt. Die Einzelmessungen sind aus Gründen der Übersichtlichkeit weggelassen. Die Hough-Transformation und das 2D Zylinder-Fitting weisen bei der Bestimmung des Lagewinkels ein ähnliches Verhalten wie RANSAC auf. Die Differenz der Lageabweichung ist gerade beim 2D-Zylinder-Fitting mit $-1,5$ mm wesentlich größer als bei RANSAC oder der Hough-Transformation.

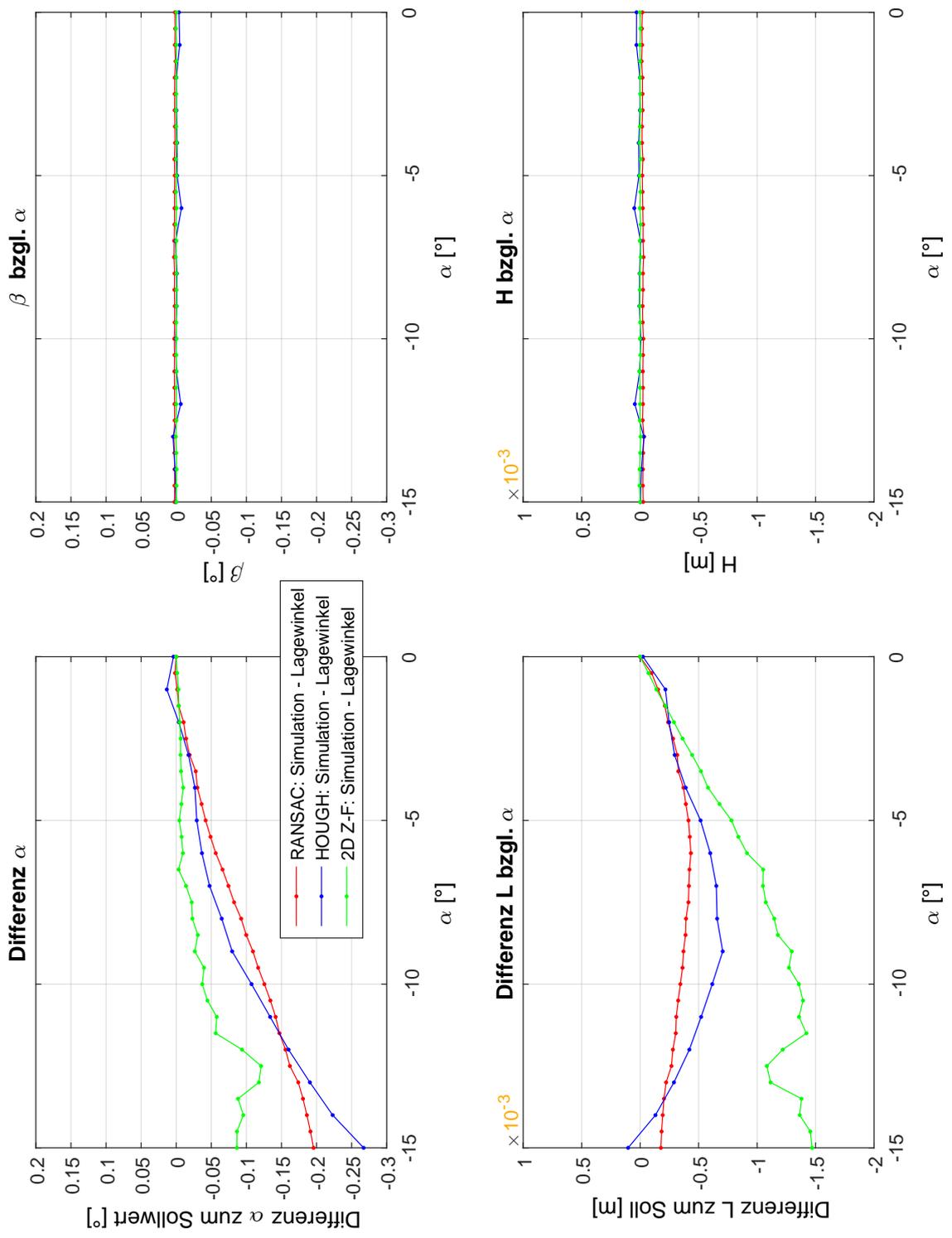


Abbildung 5.5: Auswertung einer Simulation mit Lagewinkeln α von -15° bis 0° mittels der angegebenen Verfahren.

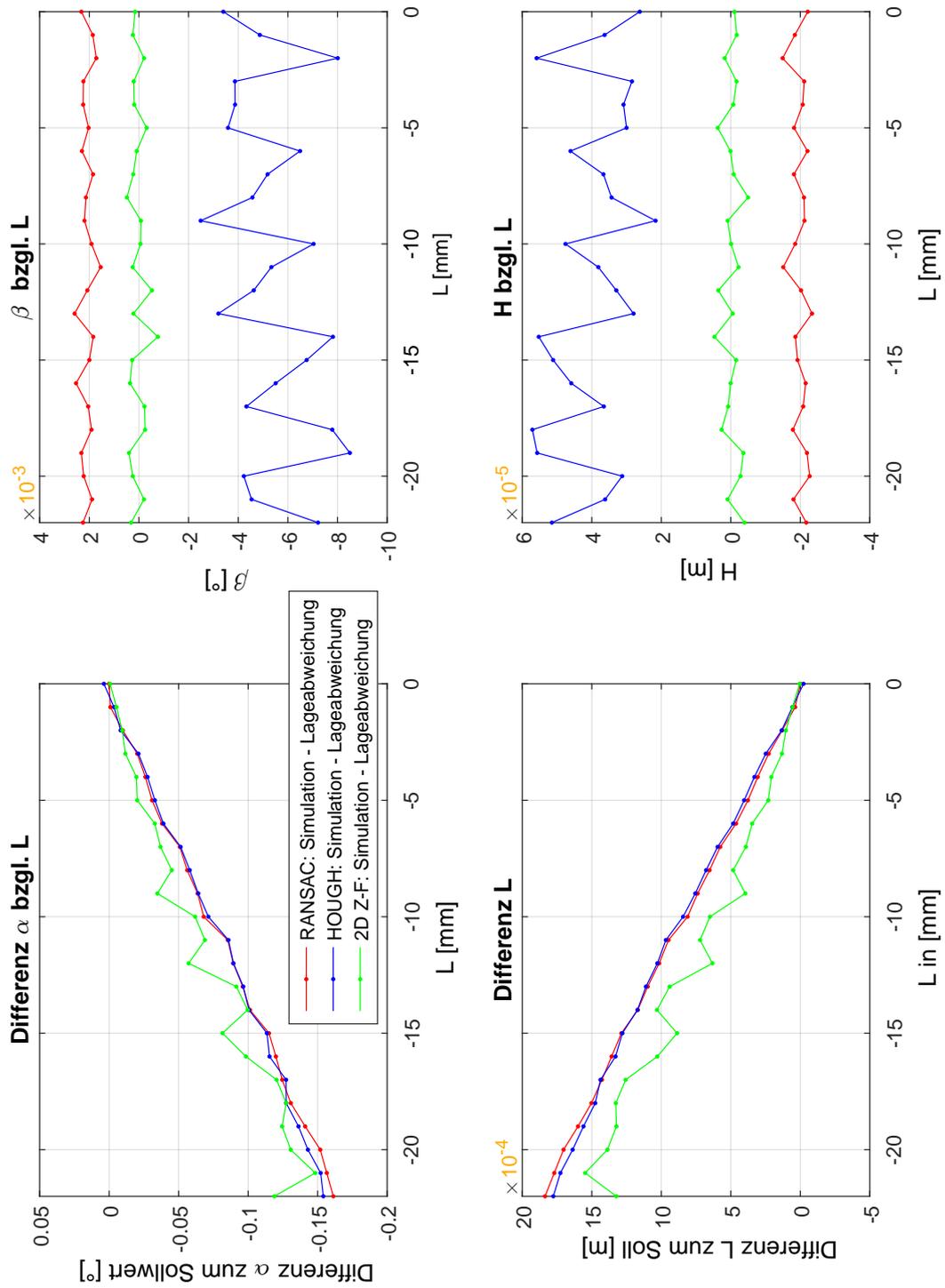


Abbildung 5.6: Auswertung einer Simulation mit Lageabweichungen L von 0 bis -22 mm mittels der angegebenen Verfahren.

Bei der Betrachtung der Ergebnisse der Auswertung simulierter Lageabweichungen von 0 bis -22 mm in Abbildung 5.6 fällt ebenfalls eine systematische Zunahme der Differenzen bei Lagewinkel α und Lageabweichung L in Abhängigkeit von der voreingestellten Lageabweichung auf. Diese ist bei allen Verfahren nahezu identisch. Die maximale Abweichung liegt beim Lagewinkel im Bereich von $-0,15^\circ$ und bei der Lageabweichung im Bereich von fast 2 mm.

Die Verfahren liefern somit bei der Bestimmung eines Lagewinkels qualitativ bessere Ergebnisse als bei der Bestimmung einer Lageabweichung. Eine Differenz von zwei 2 mm bei einer voreingestellten Lageabweichung von 22 mm entspricht einem Fehler von nahezu 10% des Soll-Wertes. Eine Differenz zum Soll von $0,25^\circ$ bei einem voreingestellten Lagewinkel entspricht nur einem Fehler von circa 1,7%.

Die Standardabweichungen von Lage- und Höhenwinkel liegen bei allen Verfahren und an jeder Aufnahmeposition unter $0,1^\circ$ und bei Lage- und Höhenabweichung unterhalb 1 mm. Im Anhang A sind die Standardabweichung der beiden Versuche dargestellt.

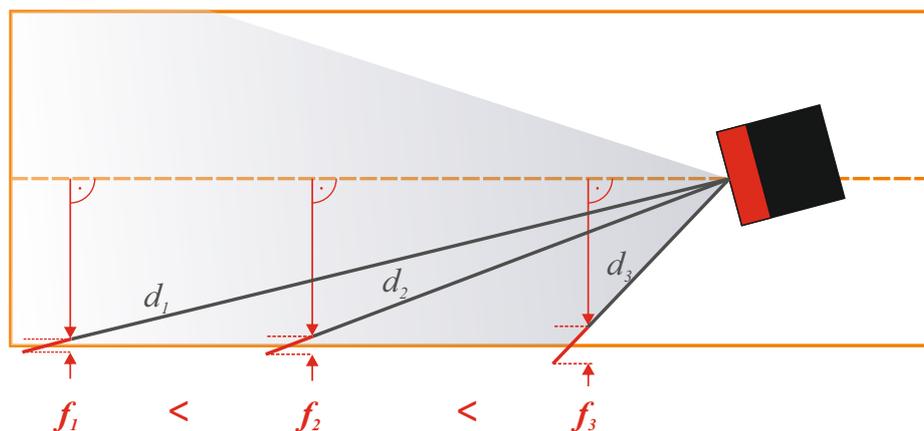


Abbildung 5.7: Auswirkung des Fehlermodells der ToF-Kamera auf die Lage der Messpunkte bezüglich der Rohrwand.

Die Ursache für das Auftreten der systematischen Zunahme der Differenzen liegt am Fehlermodell der ToF-Kamera und dem Vorgehen zur Bestimmung der Zylinderachse: In Abhängigkeit vom Abstand zur ToF-Kamera und deren äußeren Orientierung zum Rohr treffen die Strahlengänge der Distanzmessungen mit unterschiedlichen Winkeln auf der Rohrwand auf. Je weiter der Auftreffpunkt von der ToF-Kamera entfernt ist, desto geringer ist der Auftreffwinkel (siehe Distanzmessungen d_1 bis d_3 in Abbildung 5.7). Ein großer Auftreffwinkel führt (bei gleicher Messgenauigkeit der Distanzmessung) zu einer stärker ausgeprägten, senkrechten Abweichung der Messpunkte von der Rohrwand (siehe z.B.

f_3 in Abbildung 5.7). Mit Verringerung des Auftreffwinkels nimmt die Abweichung von der Rohrrinnenwand ab, dafür nimmt die mögliche Verschiebung der Messpunkte entlang der Rohrrinnenwand zu (siehe f_2 bis f_1 in Abbildung 5.7).

Für die Bestimmung der Zylinderachse ist vor allem die senkrechte Abweichung der Messpunkte von der Rohrrinnenwand von Bedeutung. Je größer diese Abweichungen sind, desto geringer ist die Genauigkeit mit der die Zylinderachse und in Folge die äußere Orientierung bestimmt werden kann. Vor allem voreingestellte Lagewinkel können die Problematik verschärfen, da dadurch die Größe der Auftreffwinkel und damit auch die Abweichungen der Messpunkte zur Rohrrinnenwand zunehmen. Befindet sich die ToF-Kamera an der Nullposition heben sich die Abweichungen bei der Bestimmung der Zylinderachse durch die symmetrische Messpunktverteilung auf.

Bei einem vorliegenden Lagewinkel oder einer Lageabweichung und der dadurch bedingten asymmetrischen Verteilung der Messpunkte kommt es, wie anhand der Ergebnisse der Simulation ersichtlich, zu einer systematischen Zunahme der Differenzen bezüglich der Sollwerte bei der Bestimmung äußerer Orientierung.

Rechenzeit: An dieser Stelle soll kurz auf die Berechnungszeiten der einzelnen Verfahren eingegangen werden. Beim Einsatz der Verfahren im beschriebenen Anwendungsfall müssen nicht nur einzelne Aufnahmen, sondern mehrere hundert Aufnahmen ausgewertet werden. Die Auswertezeiten von einer und hochgerechnet von 500 Aufnahmen mit den verschiedenen Verfahren (exklusiv der Datenvorbereitung) auf einer identischen Rechnerkonfiguration (Windows 8.1, Intel Core i5-4340M – 2.89GHz, 8GB RAM) sind in Tabelle 5.2 aufgelistet. Anhand der Tabelle ist ein großer Nachteil der Hough-Transformation zu den anderen beiden Verfahren zu erkennen. Die Rechenzeit beträgt im Vergleich zu RANSAC das Dreifache und gegenüber dem 2D Zylinder-Fitting das Zehnfache. Die Rechenzeit ist zwar nicht Gegenstand dieser Untersuchungen, muss aber bezüglich eines praktischen Einsatzes berücksichtigt werden.

Tabelle 5.2: Auswertezeiten der drei verwendeten Verfahren im Vergleich.

Verfahren	Auswertezeit	
	1 Aufnahme	500 Aufnahmen
RANSAC	17 sec	2,3 h
Hough-Transformation	44 sec	6,1 h
2D Zylinder-Fitting	4 sec	0,6 h

Die Voruntersuchung hat gezeigt, dass die Verfahren unter den idealen Bedingungen der Simulation in der Lage sind, die äußere Orientierung einer ToF-Kamera mit der durch den Anwendungsfall definierten Genauigkeit zu bestimmen. Es treten zwar systematische Fehler bei der Bestimmung von Lagewinkel und Lageabweichung auf, diese befinden sich aber unterhalb der definierten Anforderung von 1° für die Bestimmung von Lage- und Höhenwinkel und 5 mm für Lage- und Höhenabweichung. Im Folgenden wird untersucht, mit welcher Genauigkeit die äußere Orientierung auch bei realen Aufnahmen unter Laborbedingungen bestimmt werden kann.

5.2 Analyse der Genauigkeit bei realen Aufnahmen an der Nullposition

Die Voruntersuchung hat gezeigt, dass das Vorliegen eines Lagewinkels bzw. einer Lageabweichung, Auswirkungen auf die Ergebnisse und ihre Genauigkeiten bei der Bestimmung der äußeren Orientierung hat. Aus diesem Grund erfolgt zunächst eine Bewertung der inneren sowie der absoluten Genauigkeit der Verfahren an der Nullposition im Zusammenspiel mit der SR4000. Dies bedeutet: Die ToF-Kamera befindet sich entlang der mittleren Rohrachse ausgerichtet ohne voreingestellten Lagewinkel oder Lageabweichung. Ausgewertet werden an dieser Aufnahme position 25 Aufnahmen mit der SR4000.

5.2.1 Innere Genauigkeit

Versuche und Ergebnisse: Unter innerer Genauigkeit wird die Wiederholgenauigkeit verstanden, mit der die Verfahren die äußere Orientierung bei Aufnahmen mit einer SR4000 an einer identischen Position bestimmen können. Je nach Rohrlänge und folgendem Bogen ändert sich die Aufweitung der aufgenommenen Punktwolke aufgrund von Mehrwegeeffekten (siehe Abschnitt 4.3.2). Bei den folgenden Auswertungen wird untersucht, inwiefern diese Aufweitung Auswirkungen auf die innere Genauigkeit hat. Die Aufnahmen erfolgen aus diesem Grund bei verschiedenen Rohraufbauten. Ausgewertet werden Aufnahmen innerhalb eines 60 cm, 1 m und 2 m langen Rohres, mit jeweils einem 90° , 45° und 15° Bogen am Ende. Die Einmessung der SR4000 entlang der mittleren Rohrachse wird bei jedem Rohr nach dem in Abschnitt 4.4.1 beschriebenen Vorgehen durchgeführt. Es handelt sich somit bei jedem Rohr um einen vollständig unabhängigen Einmessvorgang.

Zur Bewertung der inneren Genauigkeit wird die Standardabweichung der Ergebnisse der Einzelmessungen verwendet. Wie schon in Abschnitt 3.2 beschrieben, werden bei den Ver-

fahren RANSAC und Hough-Transformation nur die ausgeglichenen Ergebnisse betrachtet. Die Standardabweichungen der Ergebnisse befinden sich in Tabelle 5.3. Die Betrachtung der Standardabweichungen lässt verschiedene Schlussfolgerungen zu, die im Folgenden aufgelistet sind:

- Beim Vergleich der Verfahren zueinander fällt auf, dass das 2D Zylinder-Fitting bei den Aufnahmen in allen drei Rohren eine geringe Standardabweichung aufweist. Bei Lage- und Höhenwinkel liegt diese immer unter $0,1^\circ$, bei Lage- und Höhenabweichung unter 1 mm.
- Die Hough-Transformation liefert grundsätzlich stabile Ergebnisse mit einer geringen Standardabweichung. Nur bei der Nullposition im 60 cm langem Rohr, mit angeschlossenen 90° Bogen, kommt es zu einer Standardabweichung von $0,58^\circ$ beim Höhenwinkel und 0,0043 m bei der Höhenabweichung.
- Die Ergebnisse von RANSAC weisen im Verhältnis zu den anderen beiden Verfahren die größten Standardabweichungen auf. Dies ist aufgrund der Berechnungsweise des Verfahrens zu erwarten gewesen. Die höchste Standardabweichung tritt bei RANSAC beim 2 m langen Rohr, in Kombination mit einem angeschlossenen 45° Bogen auf. Die Standardabweichung des Höhenwinkels beträgt $0,85^\circ$ und bei der Höhenabweichung 0,0059 m.
- Bei allen drei Verfahren treten die größten Standardabweichungen bei den Höhenwinkeln bzw. den Höhenabweichungen auf. Dies liegt vermutlich an der Tatsache, dass die SR4000 in vertikaler Richtung weniger Pixel (144 px) besitzt als in horizontaler Richtung (176 px). Dadurch existieren grundsätzlich weniger Messpunkte zur Darstellung der Ober- und Unterseite des Rohres. Dies hat zur Folge, dass auch weniger Messpunkte zur Stabilisierung der Ergebnisse von Höhenwinkel bzw. Höhenabweichung zur Verfügung stehen.
- Bei Betrachtung der Ergebnisse fällt auf, dass eine höhere Standardabweichung des Lage- bzw. Höhenwinkel immer auch eine höhere Standardabweichung der Lage- bzw. Höhenabweichung zur Folge hat. Hier scheint ein systematischer Zusammenhang zu bestehen, auf dem in den folgenden Abschnitt noch genauer eingegangen wird.
- Unterschiedliche Rohrlängen oder Winkel des folgenden Bogens haben bei Betrachtung der Ergebnisse keine signifikante Auswirkung auf die innere Genauigkeit an der Nullposition.

Tabelle 5.3: Standardabweichungen der Auswertung von 25 Aufnahmen an der jeweiligen Nullposition.

Verfahren	Rohrlänge-Bogen	α [°]	β [°]	L [m]	H [m]
HOUGH	2m - 90°	0,03	0,05	0,0002	0,0003
	2m - 45°	0,31	0,04	0,0020	0,0003
	2m - 15°	0,02	0,02	0,0001	0,0001
RANSAC	2m - 90°	0,39	0,79	0,0026	0,0053
	2m - 45°	0,65	0,85	0,0045	0,0059
	2m - 15°	0,16	0,48	0,0011	0,0033
2D Zylinder	2m - 90°	0,03	0,01	0,0002	0,0001
	2m - 45°	0,02	0,01	0,0001	0,0001
	2m - 15°	0,02	0,01	0,0001	0,0001
HOUGH	1m - 90°	0,03	0,05	0,0001	0,0003
	1m - 45°	0,01	0,01	0,0001	0,0001
	1m - 15°	0,02	0,01	0,0001	0,0001
RANSAC	1m - 90°	0,13	0,25	0,0007	0,0014
	1m - 45°	0,11	0,28	0,0006	0,0016
	1m - 15°	0,03	0,02	0,0002	0,0001
2D Zylinder	1m - 90°	0,02	0,01	0,0001	0,0001
	1m - 45°	0,01	0,01	0,0001	0,0001
	1m - 15°	0,01	0,01	0,0001	0,0001
HOUGH	60cm - 90°	0,24	0,58	0,0017	0,0043
	60cm - 45°	0,01	0,02	0,0001	0,0001
	60cm - 15°	0,02	0,18	0,0001	0,0010
RANSAC	60cm - 90°	0,36	0,29	0,0028	0,0022
	60cm - 45°	0,09	0,05	0,0006	0,0004
	60cm - 15°	0,03	0,04	0,0002	0,0003
2D Zylinder	60cm - 90°	0,01	0,01	0,0001	0,0001
	60cm - 45°	0,01	0,01	0,0001	0,0000
	60cm - 15°	0,07	0,02	0,0004	0,0001

Zusammenfassung – innere Genauigkeit: Die Untersuchung der inneren Genauigkeit an der Nullposition hat gezeigt, dass das 2D Zylinder-Fitting die höchste innere Genauigkeit besitzt, gefolgt von der Hough-Transformation. Die in Abschnitt 1.3.2 definierten Anforderungen an die Genauigkeit sehen eine Bestimmung von Schwimmwinkeln mit einer Genauigkeit von einem 1° oder geringer vor. Bei Übernahme dieser Anforderungswerte auf die Bestimmung der äußeren Orientierung sind alle drei Verfahren in der Lage, diese Anforderung zu erfüllen. Die Anforderung für die Genauigkeit bei der Bestimmung von Lage- und Höhenabweichung liegt bei 0,005 m (siehe Abschnitt 4.1.4). Die innere Genauigkeit dieser beider Parameter liegt beim 2D Zylinder-Fitting und der Hough-Transformation bei allen Auswertungen ebenfalls unter dem genannten Wert. Bei RANSAC wird bei zwei Versuchen der Anforderungswert mit 0,006 m bei der Bestimmung der Höhenabweichung knapp überschritten.

Grundsätzlich ist bei der Nullposition keine Abhängigkeit der inneren Genauigkeit von der Aufweitung der Punktwolke aufgrund von Mehrwegeeffekten erkennbar. Die Nullposition stellt eine ideale Messkonfiguration bei Aufnahmen im Rohr dar, da die Messpunkte relativ flächendeckend und gleichmäßig auf der Rohrwand verteilt sind. In den folgenden Abschnitten wird untersucht, wie sich die voreingestellte äußere Orientierungen auf die Genauigkeit der Ergebnisse der Verfahren auswirken. Zuvor wird im nächsten Abschnitt auf die Untersuchung der absoluten Genauigkeit eingegangen.

5.2.2 Absolute Genauigkeit

Versuche und Ergebnisse: Die absolute Genauigkeit beschreibt die Genauigkeit, mit der die Verfahren die „reale“ äußere Orientierung zum Rohr bestimmen können. Um die absolute Genauigkeit zu ermitteln, muss die „reale“ äußere Orientierung durch unabhängige Messungen bestimmt werden. Die Vorgehensweise hierzu ist in Abschnitt 4.4 beschrieben. Bei den Einmessungen hat sich gezeigt, dass die KG-Rohre keinen idealen Kreis beschreiben, sondern Abweichungen von 4-5 mm im Durchmesser auftreten. Aus diesem Grund konnte die Positionsgenauigkeit der „realen“ äußeren Orientierung bei den Versuchen nur abgeschätzt werden. Die Genauigkeit des Einmessvorgangs liegt beim Lagewinkel bei 1° und bei der Lageabweichung bei 5 mm. Dies muss bei der folgenden Bewertung der absoluten Genauigkeit berücksichtigt werden. Höhenwinkel und Höhenabweichung sind nicht einstellbar und werden aus diesem Grund nicht betrachtet.

Tabelle 5.4 enthält die berechneten Mittelwerte von Lagewinkel und Lageabweichung an der Nullposition. Anhand der Standardabweichung der Ergebnisse an dieser Aufnahme-position kann, wie schon erfolgt, die innere Genauigkeit analysiert werden. Die Mittelwerte können zur Bewertung der absoluten Genauigkeit verwendet werden. Der Soll-Wert von Lagewinkel und Lageabweichung ist Null.

Grundsätzlich liegen die Mittelwerte der Lagewinkel bei allen Nullpositionen und allen Verfahren unter 1° . Diese Tatsache untermauert den Schätzwert von 1° bei der Einmessgenauigkeit. Die mittleren Lageabweichungen der Hough-Transformation und des 2D Zylinder-Fitting befinden sich mit einem Maximalwert von 3,5 mm ebenfalls unter der Einmessgenauigkeit von 0,005 m. Nur RANSAC überschreitet bei den Versuchen im 2 m langen Rohr mit einer Lageabweichung von -5,5 mm einmalig diesen Wert.

Interessant ist, dass die Verfahren bei bestimmten Aufnahmen nahezu gleichwertige Ergebnisse liefern. Dies ist bei den Aufnahmen im 60 cm langen Rohr bei RANSAC und dem 2D-Zylinder-Fitting der Fall. Die Abweichungen zwischen den Mittelwerten der bestimmten Lagewinkel beträgt maximal $0,1^\circ$ und bei den Lageabweichungen maximal 0,3 mm. Bei den Aufnahmen im 1 m langen Rohr haben die Verfahren insgesamt tendenziell ähnliche Ergebnisse. Dies kann als ein positives Indiz für die Plausibilität der Ergebnisse gewertet werden. Im 2 m langem Rohr hingegen weichen die Ergebnisse bei den unterschiedlichen Verfahren voneinander ab.

Unter Berücksichtigung der inneren Genauigkeit scheint der RANSAC Algorithmus bei der Auswertung der Aufnahmen im 2 m Rohr insgesamt ungenauere Ergebnisse als bei den anderen beiden Rohrlängen bzw. auch im Verhältnis zu den anderen beiden Verfahren zu liefern. Eine konkrete Ursache dafür konnte nicht gefunden werden.

Zusammenfassung – absolute Genauigkeit: Grundsätzlich ist bei der Bestimmung der absoluten Genauigkeit an der Nullposition keine signifikante Auswirkung auf die Genauigkeit durch die Aufweitung der Punktwolke aufgrund von Mehrwegeeffekten zu erkennen. Die Ergebnisse liegen bis auf wenige Ausnahmen unterhalb der geschätzten Einmessgenauigkeit. Da die geschätzte Einmessgenauigkeit wiederum der geforderten Genauigkeit des Anwendungsfalls entspricht, können die Verfahren somit grundsätzlich zur Bestimmung der äußeren Orientierung im Rahmen der geforderten Genauigkeit eingesetzt werden.

Aufgrund der bisher gewonnen Erkenntnisse wurden für die nachfolgenden Versuche eine Schrittweite für die relative Änderung des Lagewinkels von $0,5^\circ$ und für die Lageabweichung von 1 mm gewählt (siehe auch Abschnitt 4.4).

Tabelle 5.4: Mittelwerte der Auswertung von 25 Einzelmessungen an der jeweiligen Nullposition.

Verfahren	Rohrlänge - Bogen	α [°]	L [m]
HOUGH	2m - 90°	-0,12	0,0005
	2m - 45°	-0,17	0,0009
	2m - 15°	0,51	-0,0034
RANSAC	2m - 90°	0,66	-0,0048
	2m - 45°	0,54	-0,0041
	2m - 15°	0,73	-0,0055
2D Zylinder	2m - 90°	0,23	-0,0015
	2m - 45°	0,24	-0,0014
	2m - 15°	0,27	-0,0017
HOUGH	1m - 90°	-0,16	0,0003
	1m - 45°	-0,14	0,0000
	1m - 15°	0,29	-0,0014
RANSAC	1m - 90°	-0,08	0,0000
	1m - 45°	-0,12	0,0002
	1m - 15°	0,26	-0,0012
2D Zylinder	1m - 90°	-0,20	0,0007
	1m - 45°	-0,19	0,0007
	1m - 15°	0,21	-0,0009
HOUGH	60cm - 90°	-0,20	0,0027
	60cm - 45°	0,10	0,0003
	60cm - 15°	0,81	-0,0018
RANSAC	60cm - 90°	0,45	-0,0016
	60cm - 45°	0,37	-0,0008
	60cm - 15°	0,90	-0,0021
2D Zylinder	60cm - 90°	0,35	-0,0013
	60cm - 45°	0,40	-0,0011
	60cm - 15°	0,88	-0,0021

5.3 Auswirkung der Änderung der äußeren Orientierung auf die Genauigkeit

Bei einem Einsatz in der Realität wird sich die ToF-Kamera meist nicht exakt in der Nullposition zum Rohr befinden. Aus diesem Grund wird untersucht, mit welcher Genauigkeit die Verfahren auch bei einer voreingestellten äußeren Orientierung diese selbst noch bestimmen können. Wie schon in Abschnitt 4.3.1 beschrieben, hat eine geänderte äußere Orientierung einen nicht unerheblichen Einfluss auf die Verteilung der Messpunkte. Hinzu kommen noch eventuell vorhandene Einflüsse aufgrund der Aufweitung der Punktwolke durch Mehrwegeeffekte.

In den folgenden Versuchen soll geprüft werden, inwiefern unterschiedlich voreingestellte Lagewinkel, Lageabweichungen oder Kombinationen von beiden Einfluss auf die Bestimmung der äußeren Orientierung selbst haben. Die Änderungen des Lagewinkels erfolgt in $0,5^\circ$ Schritten und die der Lageabweichung in 1 mm Schritten. Bei der Kombination ist eine Lageabweichung von circa 1,5 cm voreingestellt und die Änderungen des Lagewinkels erfolgt in $0,5^\circ$ Schritten bis zu maximal $\pm 4,5^\circ$.

Ausgewertet werden an jeder Position jeweils 25 Aufnahmen. Es kann an jeder Aufnahme position die Standardabweichung und der Mittelwert für jeden Parameter der äußeren Orientierung berechnet werden. Die y-Achsen stellen die Differenzen von Soll- und Ist-Wert der jeweiligen Parameter der äußeren Orientierung dar. Der Höhenwinkel β und die Höhenabweichung H sind bei allen Versuchen als konstant anzusehen. Die x-Achse der Diagramme definiert bei diesen Versuchen den an der jeweiligen Aufnahme position voreingestellten Lagewinkel α bzw. die Lageabweichung L . Aus Gründen der Übersichtlichkeit werden bei den Ergebnissen nur die berechneten Mittelwerte der ausgeglichenen Einzelmessungen aufgelistet.

Eine vollständige Darstellung der Ergebnisse der Mittelwerte und Standardabweichungen aller Verfahren und Versuche befindet sich in den Anhängen B.1 bis B.3.

5.3.1 Auswirkung von Lagewinkeln auf die Bestimmung der äußeren Orientierung

Im Folgenden werden die Ergebnisse der Auswertung der Versuche mit einer schrittweisen Änderung des voreingestellten Lagewinkels betrachtet. Um die Versuche in verschiedenen Rohrlängen vergleichbar darstellen zu können, werden die Ergebnisse in einer relativen Darstellung präsentiert. Das heißt, bei der Auswertung wird der an der Nullposition be-

stimmte Mittelwert von den Mittelwerten der anderen Aufnahmepositionen subtrahiert. Die aus den Versuchen gewonnenen Erkenntnisse werden anhand ausgewählter Ergebnisse vorgestellt. Diese befinden sich den Abbildungen 5.9 bis 5.11. Eine gesamtliche Darstellung der Ergebnisse der Auswertungen befindet sich im Anhang B.1.

Grundsätzlich ist festzustellen, dass die Verfahren RANSAC und Hough-Transformation bis auf wenige Ausnahmen relativ identische Ergebnisse bei der Auswertung der Versuche liefern (siehe Abbildung 5.8). Auffallende Abweichungen zwischen den Ergebnissen der beiden Verfahren treten nur bei den Höhenwinkeln und Höhenabweichungen im 60 cm und 2 m langen Rohr auf.

Anhand der Ergebnisse der Auswertung können folgende Erkenntnisse gewonnen werden:

Lagewinkel und Lageabweichung: Eine der wohl wichtigsten Erkenntnisse der Auswertung ist die zunehmende Differenz zwischen Soll- und Ist-Wert bei der Bestimmung des Lagewinkels und der Lageabweichung in Abhängigkeit vom voreingestelltem Lagewinkel. Wie in Abbildung 5.8 ersichtlich, steigt die Differenz des Lagewinkels bei der Auswertung der Aufnahmen im 60 cm Rohr mit angeschlossenen 90° Bogen bei den Verfahren RANSAC und Hough-Transformation bis zu circa $-4,5^\circ$ an (siehe Abbildung 5.9). Die Zunahme der Differenz verläuft bei den beiden Verfahren annähernd linear. Da die Differenz negativ ist, fällt der durch die Verfahren bestimmte Lagewinkel somit zu gering aus. Auch die Ergebnisse der Auswertung mit dem 2D Zylinder-Fitting weisen einen negativen linearen Anstieg der Differenz zwischen Soll- und Ist-Wert auf. Dieser ist aber im Vergleich zu den beiden anderen Verfahren mit einem Maximalwert von circa $-1,25^\circ$ wesentlich geringer (siehe Abbildung 5.10). Die negative Zunahme der Differenz vor allem bei RANSAC und der Hough-Transformation in Abhängigkeit vom voreingestellten Lagewinkel sind eindeutig als systematische Fehler bei der Bestimmung der äußeren Orientierung einzuordnen.

Es besteht eine Abhängigkeit zwischen dem Anstieg des voreingestellten Lagewinkels und der Zunahme der Differenz zwischen Soll- und Ist-Wert bei der Lageabweichung. Dies ist in den Abbildungen 5.9 oder 5.10 erkennbar. Bei der Auswertung des Versuches im 60 cm Rohr mit angeschlossenen 90° Bogen mit RANSAC bzw. der Hough-Transformation beträgt die Differenz der Lageabweichung bei einem voreingestellten Lagewinkel von 15° circa 2,5 cm.

Die Zunahme der Differenzen bei der Lageabweichung verläuft wie bei den Lagewinkeln ebenfalls annähernd linear. Beim 2D Zylinder-Fitting ist bei den Versuchen im Verhältnis zu den anderen beiden Verfahren insgesamt nur eine sehr geringe Zunahme der Differenz bei den Lagewinkeln und der Lageabweichung zu erkennen (siehe Abbildung 5.10).

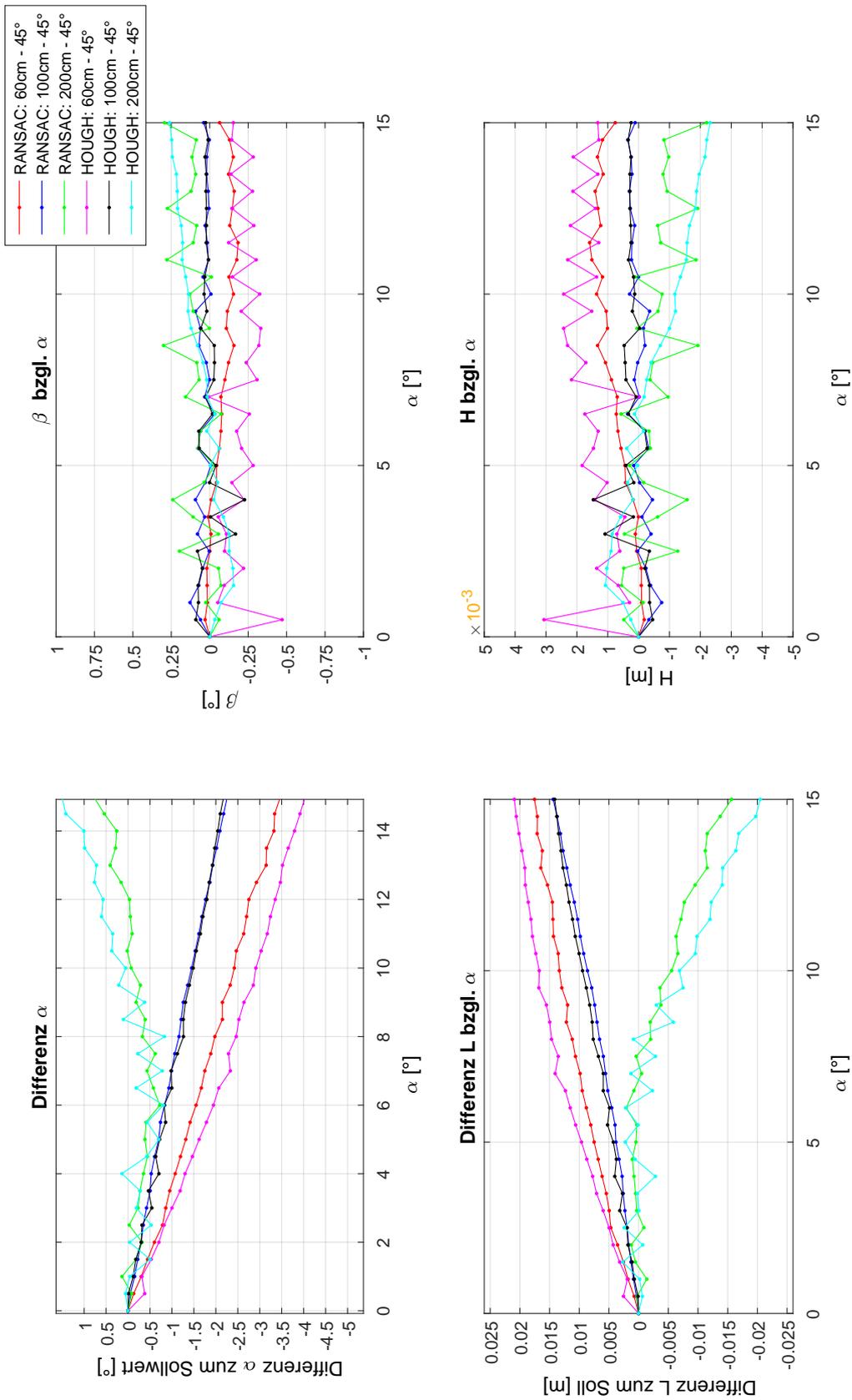


Abbildung 5.8: Auswertung mit RANSAC/Hough-Transformation im 60cm/1m/2m Rohr mit 45° Bogen und voreingestelltem Lagewinkel α .

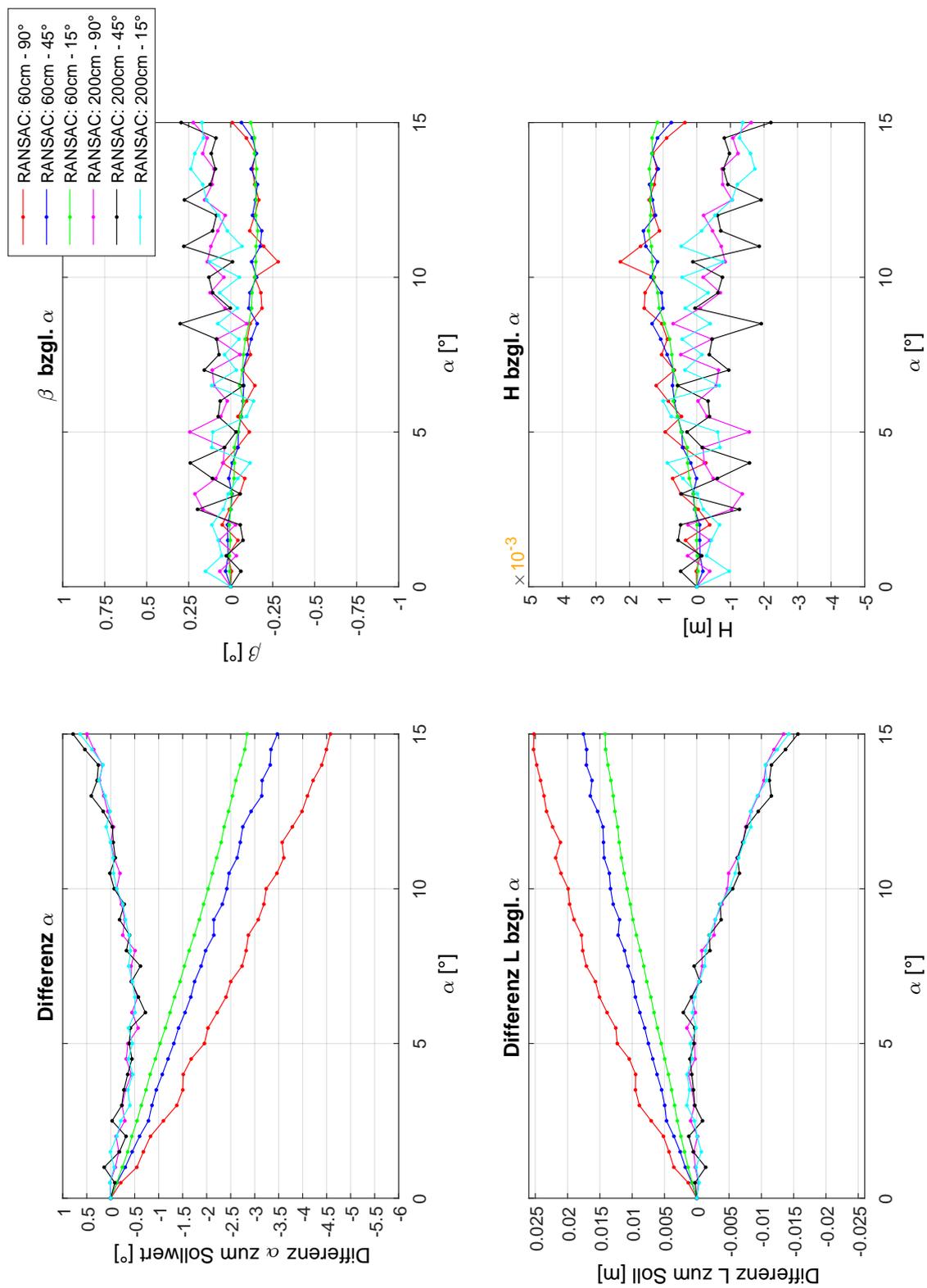


Abbildung 5.9: Auswertung mit RANSAC im 60cm/2m Rohr mit 15°/45°/90° Bogen und vor-eingestelltem Lagewinkel α .

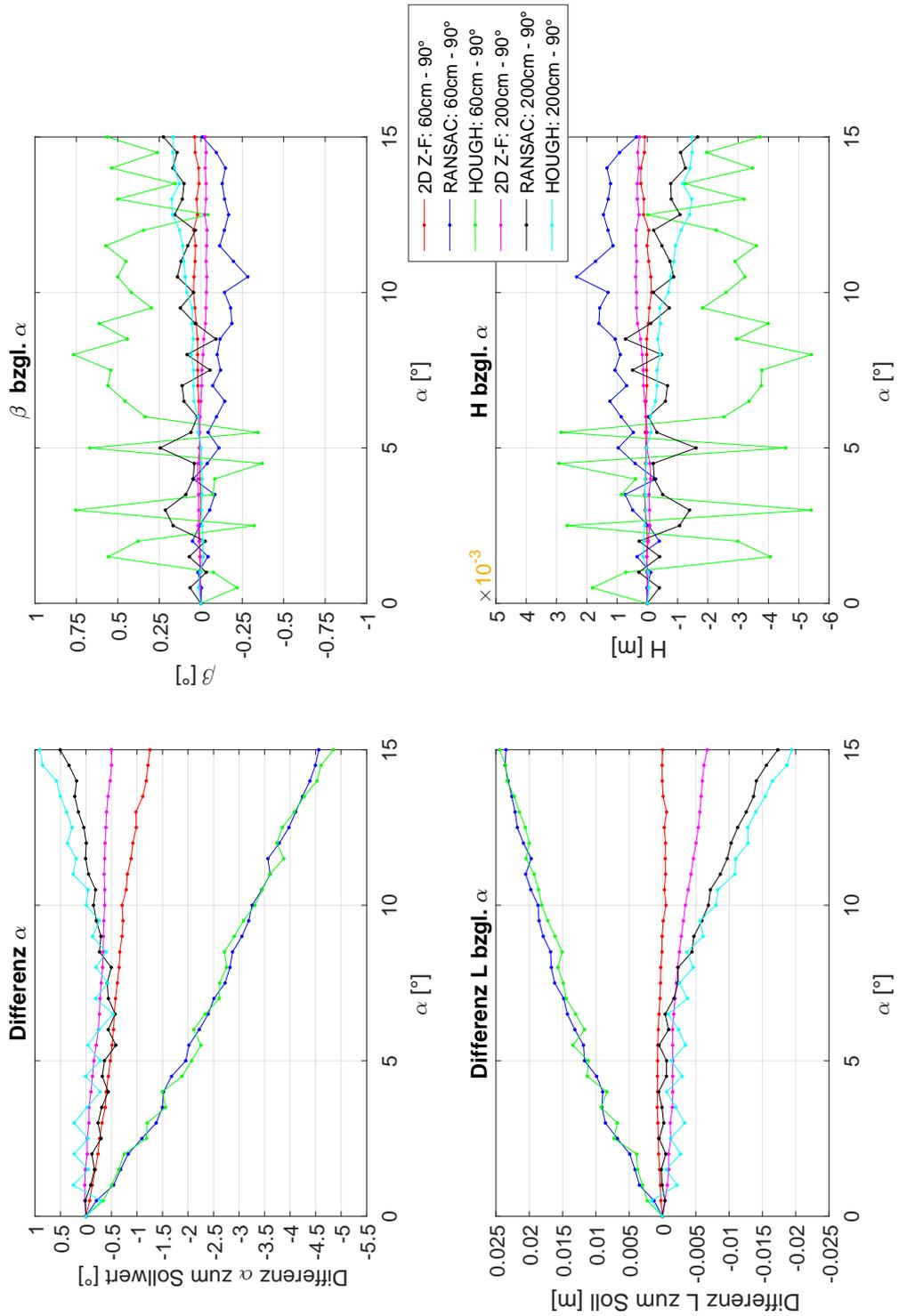


Abbildung 5.10: Auswertung mit 2D Zylinder-Fitting/RANSAC/Hough-Transformation im 60cm/2m Rohr mit 90° Bogen und voreingestelltem Lagewinkel α .

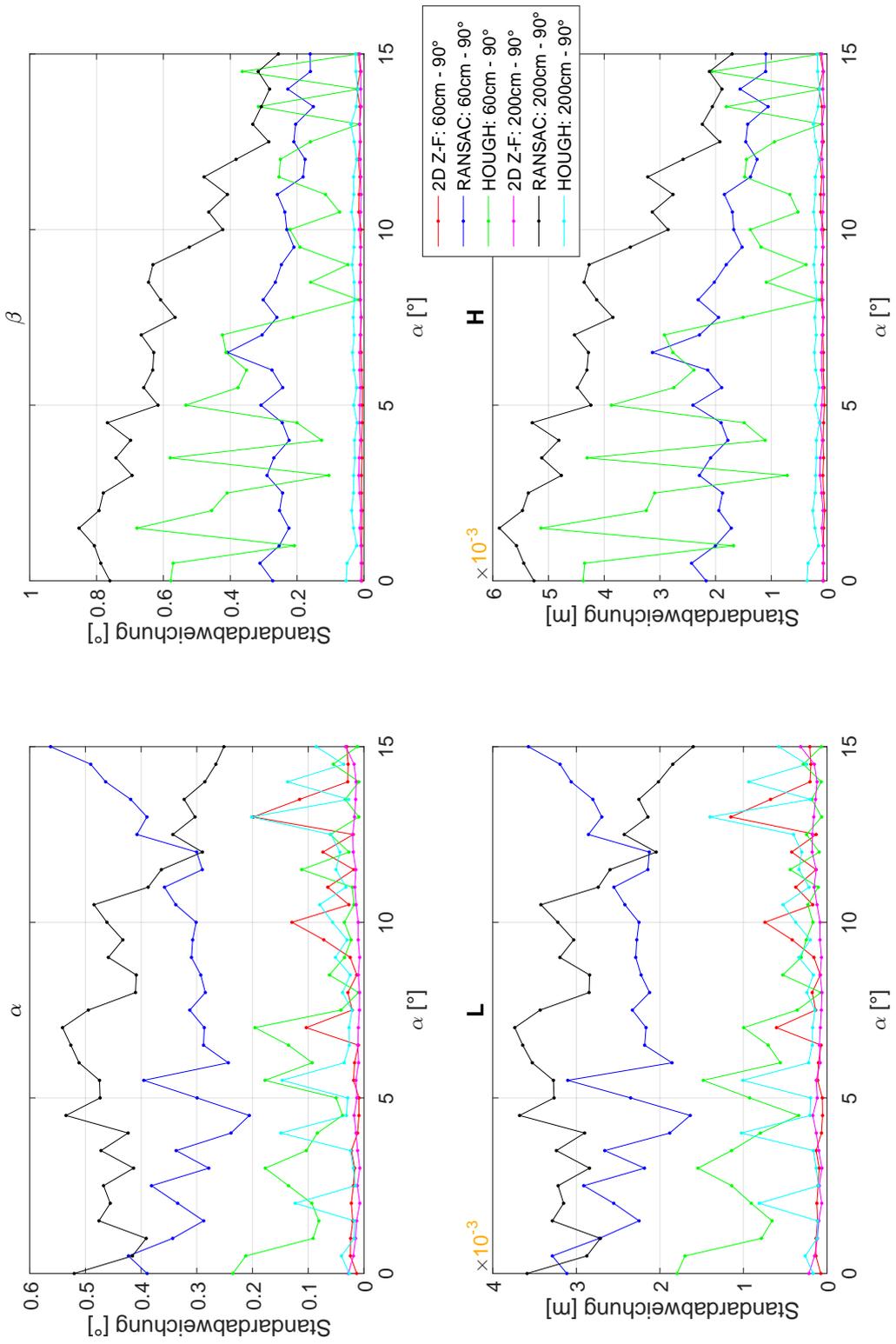


Abbildung 5.11: Standardabweichung bei der Auswertung mit 2D Zylinder-Fitting/RANSAC/Hough-Transformation im 60cm/2m Rohr mit 90° Bogen und voreingestelltem Lagewinkel α .

Die Zunahme der Differenz zwischen Soll- und Ist-Wert bei der Bestimmung von Lagewinkel und Lageabweichung ist nicht bei allen Versuchen gleich groß. Die Analyse der Ergebnisse hat ergeben, dass eine Abhängigkeit zwischen dem Aufbau des Rohrsystems und der Größe der Differenz besteht. Diese lässt sich am besten anhand der Ergebnisse von RANSAC und der Hough-Transformation erkennen. Bei den Ergebnissen des 2D Zylinder-Fittings sind die Einflüsse des Rohraufbaus weniger stark ausgeprägt bzw. erkennbar. Folgende Faktoren des Rohraufbaus haben Auswirkung auf die Größe der Differenz:

- Winkel des folgenden Bogens: Je geringer der Winkel des folgenden Bogens ist, desto geringer fällt die Zunahme der Differenz von Lagewinkel und Lageabweichung aus (siehe Abbildung 5.9). Bei Betrachtung beispielsweise der Ergebnisse mit RANSAC bei der Auswertung des 60 cm langen Rohres mit einem voreingestellten Lagewinkel von 15° , ergibt sich ein Unterschied bei der Differenz des Lagewinkels zwischen dem 90° und 15° Bogen von circa $1,5^\circ$. Der Unterschied bei der Lageabweichung beträgt circa 1 cm.
- Abstand zum folgenden Bogen: Je größer der Abstand zum folgenden Bogen ist, desto geringer wirken sich unterschiedliche Winkel dieses Bogens auf die Größe der Differenzen von Lagewinkel und Lageabweichung aus (siehe Abbildung 5.9). Bei der Auswertung des 2 m langen Rohres mit RANSAC sind kaum mehr Unterschiede bei den Ergebnissen mit verschiedenen Winkeln des folgenden Bogens zu erkennen. Im Allgemeinen nimmt die Größe der Differenz mit zunehmenden Abstand zum Bogen ab. Bei Betrachtung der Ergebnisse der Versuche mit RANSAC oder der Hough-Transformation bei verschiedenen Rohrlängen und angeschlossenem 45° Bogen in Abbildung 5.8 ist die Verringerung der Differenz deutlich ersichtlich. Mit zunehmender Rohrlänge verringert sich die maximale Differenz des Lagewinkels bei RANSAC von $-3,5^\circ$ beim 60 cm langen Rohr, über circa $-2,25^\circ$ beim 1 m langen Rohr bis zu $0,75^\circ$ beim 2 m langen Rohr.
- Auch die maximale Differenz bei der Lageabweichung nimmt tendenziell mit zunehmender Rohrlänge ab. Dies ist an den Ergebnissen im 60 cm und 1 m Rohr erkennbar. Interessant ist beim 2 m langem Rohr, dass bei allen Verfahren die Auswertung eine geringere Zunahme der Differenz der Lagewinkel ergibt, die Differenz der Lageabweichung hingegen weiter einen hohen Anstieg zu verzeichnen hat. Die maximale Differenz entspricht ungefähr der Größenordnung der Ergebnisse im 60 cm langem Rohr nur mit einem negativen anstatt einem positiven Vorzeichen (siehe Abbildung 5.8 und 5.10). Auch geht der lineare Verlauf der Differenzen im 2 m langem Rohr mehr

in einen gekrümmten Verlauf über. Beim 2D Zylinder-Fitting tritt bei den Versuchen im 2 m langen Rohr sogar die insgesamt stärkste Zunahme der Differenz bei der Lageabweichung auf.

Des Weiteren hat sich bei Versuchen mit einer negativen Rotationsrichtung des Lagewinkels gezeigt, dass die Zunahme der Differenzen zwischen Soll- und Ist-Wert bei Lagewinkel und Lageabweichung richtungsabhängig ist (siehe Abbildung 5.12). Bei einer Drehung der Kamera nach links (negativ) oder rechts (positiv) wird immer ein zu geringer Lagewinkel bestimmt. Ebenso wird bei einer Drehung der Kamera nach links eine positive Lageabweichung (Verschiebung nach links) bestimmt und eine Drehung nach rechts resultiert in einer negativen Lageabweichung.

Höhenwinkel und Höhenabweichung: Für die Höhenwinkel und die Höhenabweichungen existiert kein Soll-Wert, da diese nicht durch das Positioniersystem einstellbar sind. Sie können grundsätzlich als konstant angesehen werden. Der Mittelwert an der Nullposition definiert somit den Soll-Wert. Auf die Differenz zwischen Soll- und Ist-Wert bei den Höhenwinkeln und Höhenabweichungen hat die Änderung des Lagewinkels kaum Einfluss. Nur bei den Auswertungen des 60 cm und 2 m langen Rohres sind bei RANSAC und Hough-Transformation kleine Änderungen der Differenzen bei Höhenwinkel und Höhenabweichung in Abhängigkeit vom voreingestellten Lagewinkel erkennbar (siehe Abbildungen 5.9 und 5.10). Im Vergleich zu den Differenzen bei Lagewinkel und Lageabweichung sind diese Änderungen aber marginal.

Auswirkung auf die innere Genauigkeit der Verfahren: Die Standardabweichungen der Parameter der äußeren Orientierung weisen grundsätzlich keine signifikanten systematischen Zusammenhänge zum voreingestellten Lagewinkel auf. Je nach Versuch kann es wie mit RANSAC bei der Auswertung des 60 cm langen Rohres mit angeschlossenen 90° Bogen zu einem leichten Anstieg der Standardabweichung des Lagewinkels kommen. Bei den Versuchen im 2 m Rohr nimmt hingegen die Standardabweichung mit der Zunahme des voreingestellten Lagewinkels leicht ab (siehe Abbildung 5.11). Selbiges Verhalten kann auch bei den anderen beiden Verfahren mehr oder weniger ausgeprägt auftreten. Es lässt sich daraus aber keine allgemein gültige Aussage über bestehende Zusammenhänge zwischen dem voreingestellten Lagewinkel und der inneren Genauigkeit ableiten.

Die in Abschnitt 5.2 bestimmten Größenordnungen der Standardabweichungen für die Parameter der äußeren Orientierung werden auch mit Zunahme des voreingestellten Lagewinkels meist eingehalten.

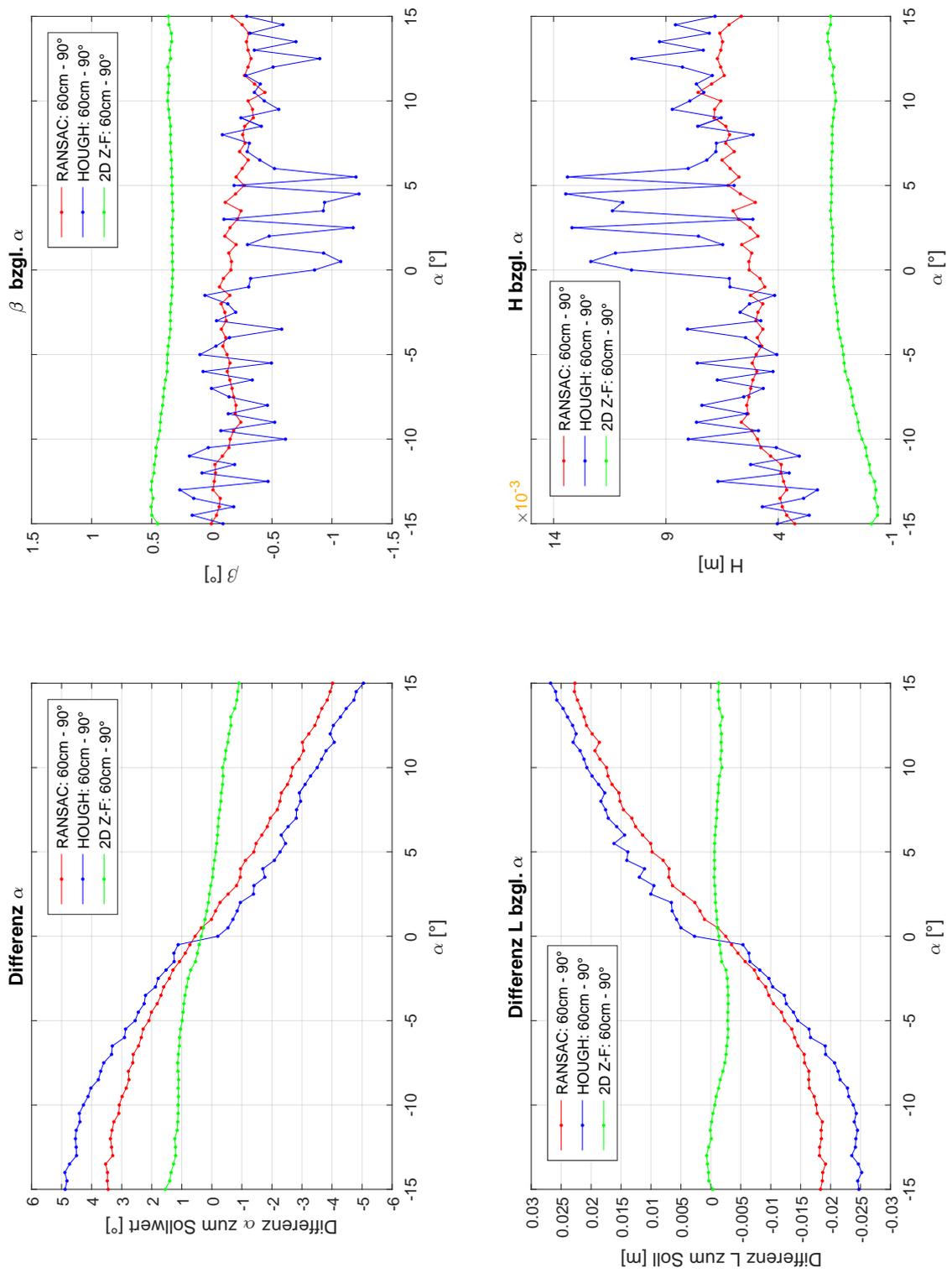


Abbildung 5.12: Auswertung mit 2D Zylinder-Fitting/RANSAC/Hough-Transformation im 60cm Rohr mit 90° Bogen und voreingestelltem Lagewinkel α von -15° bis 15°.

Nur bei der Auswertung der Versuche im 2 m langen Rohr mit RANSAC wird, wie auch schon bei der Auswertung an der Nullposition festgestellt, die geforderte Genauigkeit des Anwendungsfalls bei der Bestimmung des Höhenwinkels und der Höhenabweichung überschritten. Die Hough-Transformation liefert bei der Auswertung des 60 cm Rohres die größten Werte für die Standardabweichungen bei Höhenwinkel und Höhenabweichung (siehe Abschnitt 5.2). Vereinzelt kommt es hier zu einer leichten Erhöhung der Standardabweichung im Vergleich zur Nullposition, grundsätzlich wird aber die geforderte Genauigkeit des Anwendungsfalls mit der Hough-Transformation eingehalten. Das 2D Zylinder-Fitting liefert durchgehend eine im Verhältnis zu den anderen beiden Verfahren geringe Standardabweichung.

5.3.2 Auswirkung von Lageabweichungen auf die Bestimmung der äußeren Orientierung

Im Folgenden werden die Ergebnisse der verschiedenen Versuche mit einer schrittweisen Änderung der voreingestellten Lageabweichung bis zu 22 mm betrachtet. Um wie schon bei der vorherigen Untersuchung einen übersichtlichen Vergleich zwischen den Ergebnissen der verschiedenen Versuche zu erhalten, wird wieder einer relative Darstellung der Ergebnisse bezüglich der Nullposition verwendet. Eine gesamtheitliche Darstellung der Ergebnisse der Auswertungen befindet sich im Anhang B.2. Im Folgenden werden die aus den Versuchen gewonnen Erkenntnisse wieder anhand ausgewählter Ergebnisse vorgestellt. Diese befinden sich in den Abbildungen 5.13 bis 5.15.

Lagewinkel und Lageabweichung: Wie bei den Versuchen mit einer schrittweisen Änderung des voreingestellten Lagewinkels in Abschnitt 5.3.1 hat eine Zunahme des voreingestellten Lageabweichung grundsätzlich Auswirkungen auf die Bestimmung der äußeren Orientierung. Auch hier kann eine Zunahme der Differenz zwischen Soll- und Ist-Wert vor allem bei der Bestimmung der Lagewinkel und der Lageabweichung auftreten. Insgesamt betrachtete sind die Auswirkung einer voreingestellten Lageabweichung auf die Bestimmung der äußeren Orientierung geringer als ein voreingestellter Lagewinkel. Die größten Differenzen bei der Lageabweichung liefert mit knapp -6,5 mm das 2D Zylinder-Fitting im 60 cm langen Rohr mit angeschlossenem 90° Bogen. Im Vergleich zu den Ergebnissen der Versuche mit einer Änderung des voreingestellten Lagewinkels ist dieser Wert aber relativ gering. Die Auswirkung auf die Bestimmung des Lagewinkels fällt grundsätzlich sehr gering aus. Die Differenzen zwischen den Ist- und Soll-Werten liegen bei allen Versuchen und Verfahren unter 1°.

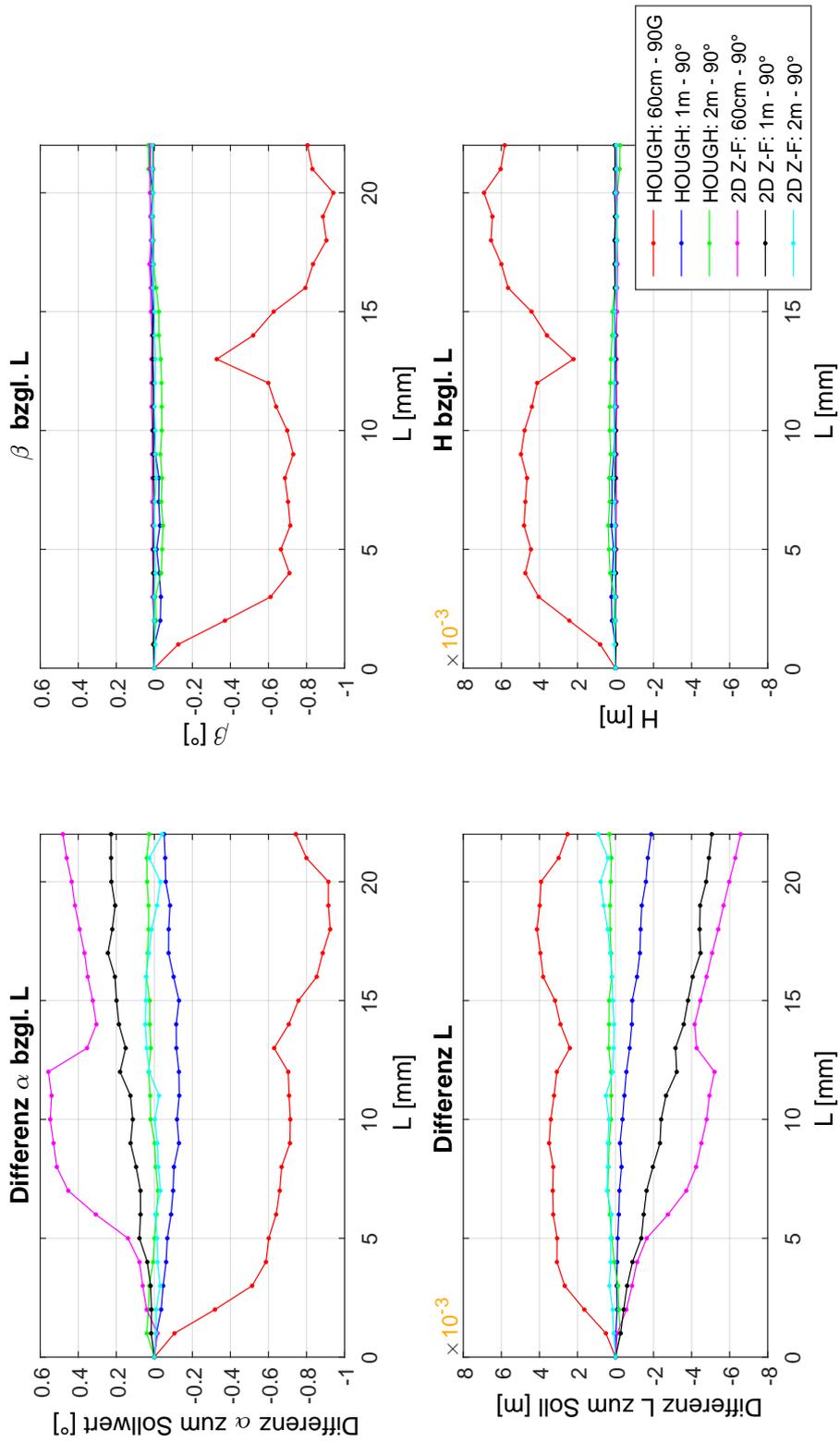


Abbildung 5.13: Auswertung mit Hough-Transformation/2D Zylinder-Fitting im 60cm/1m/2m Rohr mit 90° Bogen und einer voreingestellter Lageabweichung L .

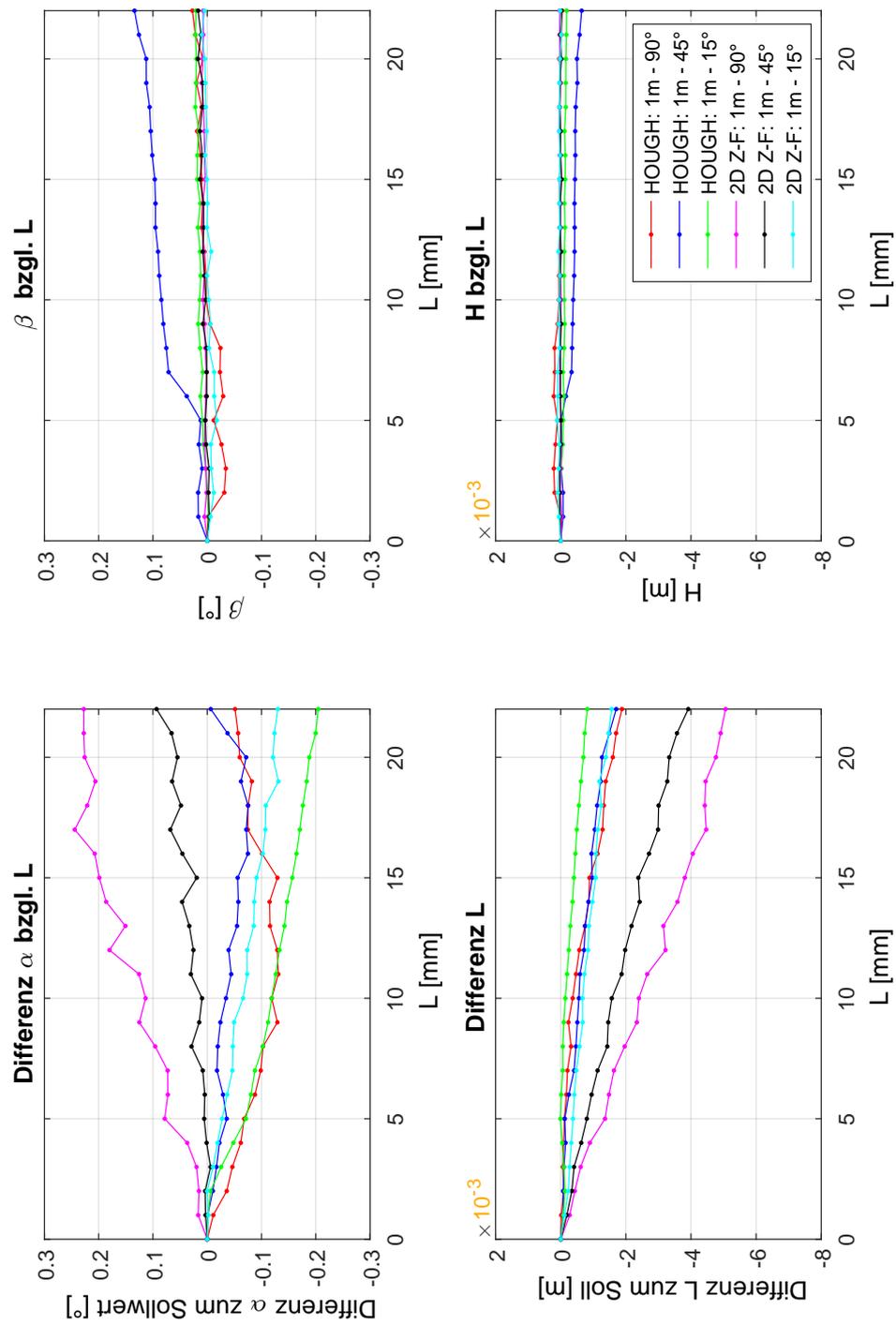


Abbildung 5.14: Auswertung mit Hough-Transformation/2D Zylinder-Fitting im 1m Rohr mit 15°/45°/90° Bogen und voreingestellter Lageabweichung L .

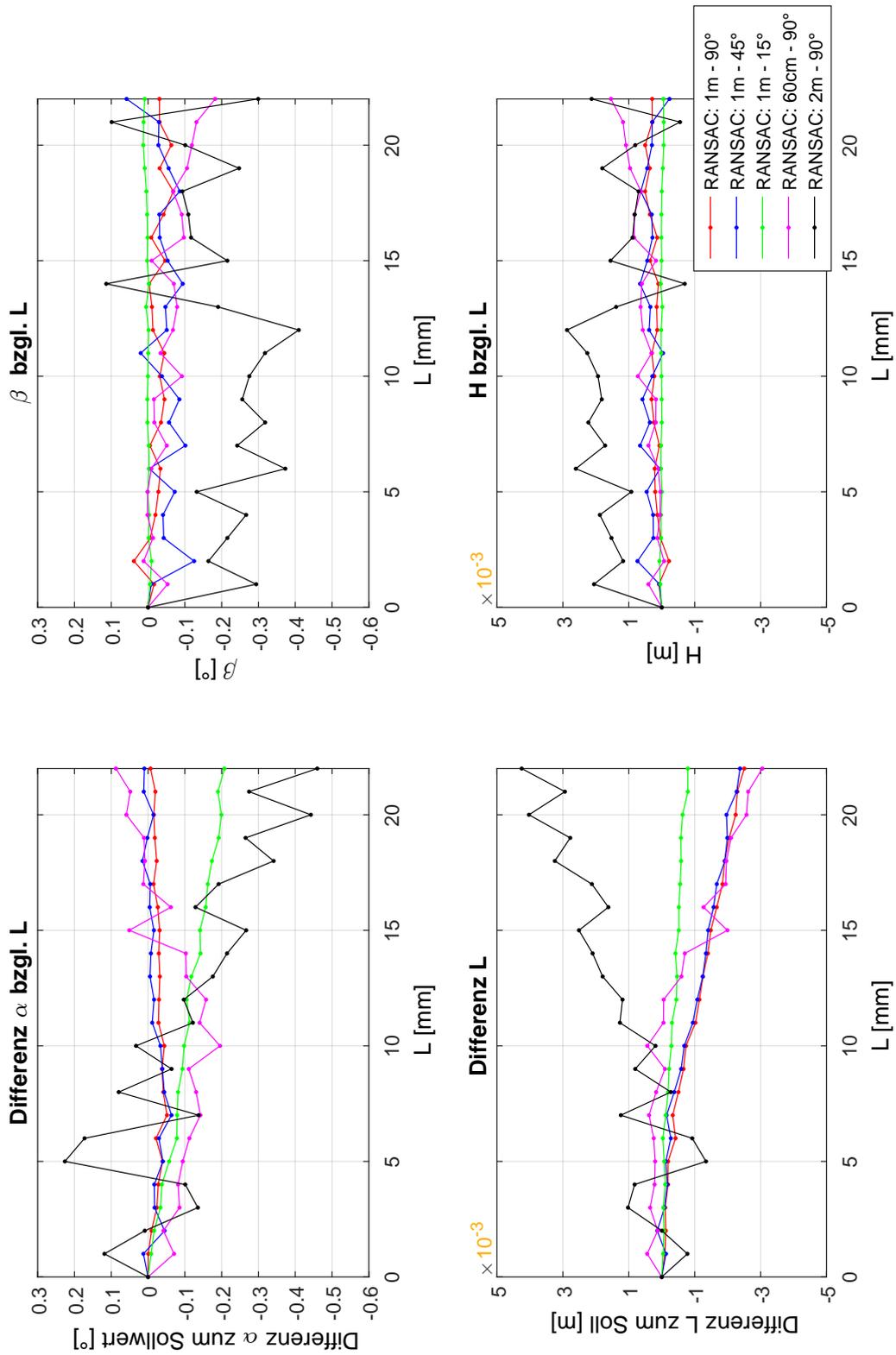


Abbildung 5.15: Auswertung mit RANSAC im 60cm/1m/2m Rohr mit 15°/45°/90° Bogen und voreingestellter Lageabweichung L .

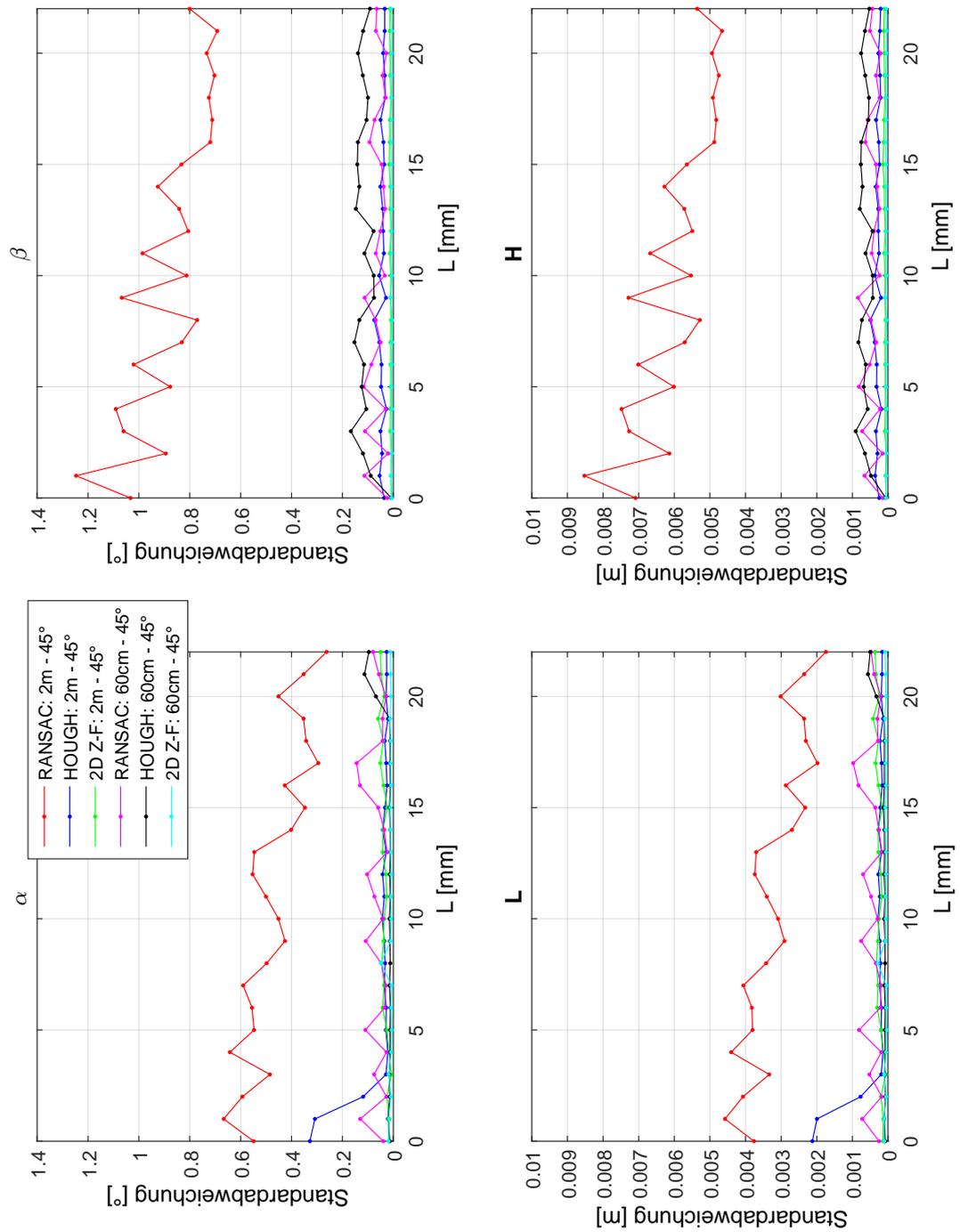


Abbildung 5.16: Standardabweichung der Auswertung mit RANSAC/Hough-Transformation/2D Zylinder-Fitting im 60cm/2m Rohr mit 45° Bogen und voreingestellter Lageabweichung L .

Auffallend ist, dass das 2D-Zylinder-Fitting bei den vorherigen Untersuchungen in Abschnitt 5.3.1 relativ geringe systematische Fehler bei der Bestimmung der äußeren Orientierung aufweist. Bei den hier vorliegenden Versuchen im 60 cm und 1 m langen Rohr (siehe Abbildungen 5.13 und 5.14) treten nun, im Verhältnis zu den anderen beiden Verfahren, wesentlich ausgeprägtere systematische Fehler, vor allem bei der Bestimmung der Lageabweichung, auf.

Bei den Versuchen im 2 m Rohr liefert das 2D Zylinder-Fitting im Vergleich zu den anderen beiden Verfahren wieder Ergebnisse mit geringeren Differenzen.

Die bei der vorherigen Untersuchung festgestellten Abhängigkeiten der Differenzen vom Rohraufbau, also dem Abstand zum Bogen oder dem Winkel des folgenden Bogens, sind in diesem Fall nur bei den Ergebnissen des 2D Zylinder-Fittings eindeutig erkennbar. Bei RANSAC sind bei den Versuchen keine Abhängigkeit zwischen der Zunahme der Differenzen und diesen beiden Faktoren nachweisbar (siehe Abbildung 5.15). Die Ergebnisse der Hough-Transformation lassen ebenfalls keine eindeutige Aussage über eine generelle Abhängigkeit zum Rohraufbau zu. Die Versuche im 60 cm Rohr zeigen eine Zunahme der Differenz in Abhängigkeit vom Winkel des folgenden Bogens. Im 2 m langen Rohr hingegen ist keinerlei Abhängigkeit erkennbar.

Höhenwinkel und Höhenabweichung: Die schrittweise Änderung der voreingestellten Lageabweichung zeigt bei fast allen Ergebnissen grundsätzlich keinerlei erkennbare Auswirkung auf die Differenzen bei Höhenwinkel und Höhenabweichung. Vereinzelt kommt es bei der Auswertung des 60 cm langen Rohres mit der Hough-Transformation oder bei der Auswertung des 2 m langen Rohres mit RANSAC zu einem leichten Anstieg der Differenz zwischen Soll- und Ist-Wert. Als eine nachweisbare, systematische Auswirkung der Änderung der voreingestellten Lageabweichung auf die Bestimmung von Höhenwinkel oder Höhenabweichung lässt sich dieses Verhalten aber nicht einstufen.

Auswirkung auf die innere Genauigkeit der Verfahren: Bei den Versuchen sind keine Auswirkungen durch die Veränderung der Lageabweichung auf die innere Genauigkeit der Verfahren zu erkennen. Die Ergebnisse der inneren Genauigkeit sind vergleichbar mit denen bei der Änderung des voreingestellten Lagewinkels in Abschnitt 5.3.1.

Auch hier überschreitet RANSAC bei der Auswertung des 2 m langen Rohres, die durch den Anwendungsfall geforderte Genauigkeit bei der Bestimmung des Höhenwinkels und der Lage- und Höhenabweichung (siehe Abbildung 5.16). Ein Unterschied zur vorherigen Untersuchung ist bei der Auswertung des 2 m langen Rohres mit angeschlossenen 15° Bogen bei

der Hough-Transformation zu erkennen. Die Standardabweichung liegt hier bei allen Parametern der äußeren Orientierung deutlich höher als bei den Versuchen mit voreingestellten Lagewinkeln.

5.3.3 Auswirkungen von Kombinationen aus Lagewinkel und Lageabweichung auf die Bestimmung der äußeren Orientierung

Um die Auswirkung von Kombinationen aus Lagewinkel und Lageabweichung auf die Bestimmung der äußeren Orientierung zu untersuchen, werden drei verschiedene Versuche im 60 cm, 1 m und 2 m langen Rohr mit angeschlossen 90° durchgeführt. Die Soll-Werte der Lageabweichung sind bei den einzelnen Versuchen aufgrund des Versuchsaufbaus leicht unterschiedlich, sie liegen aber alle im Bereich von 15-18 mm. An diesen Positionen erfolgt eine schrittweise Änderung des voreingestellten Lagewinkels von $-4,5^\circ$ bis $4,5^\circ$. Die Darstellung der Ergebnisse erfolgt im Gegensatz zu den beiden vorhergehenden Untersuchungen nicht relativ, also ohne Abzug des Mittelwerts an der Nullposition von den Mittelwerten der anderen Positionen. Die Ergebnisse sind in den Abbildungen 5.17 bis 5.19 dargestellt. Die dazugehörigen Standardabweichungen befinden sich im Anhang B.3.

Lagewinkel und Lageabweichung: Die in Abschnitt 5.3.1 festgestellten systematischen Fehler bei der Bestimmung von Lagewinkel und Lageabweichung mit RANSAC und der Hough-Transformation in Abhängigkeit vom voreingestellten Lagewinkel treten auch bei einer Kombination mit einer voreingestellten Lageabweichung auf. Die Dimension der systematischen Fehler bei den Lagewinkeln entspricht größenordnungsmäßig den Ergebnissen aus Abschnitt 5.3.1. Anhand der Abbildungen ist auch gut die schon beschriebene Vorzeichenänderung der systematischen Fehler in Abhängigkeit von der Rotationsrichtung des voreingestellten Lagewinkels zu erkennen. Beim 2D-Zylinder-Fitting sind, wie erwartet, nur geringer systematische Fehler bei der Bestimmung des Lagewinkels ersichtlich.

Auch die bestimmten Lageabweichungen liegen größenordnungsmäßig im Rahmen der bei den vorherigen Untersuchungen festgestellten Differenzen zwischen Soll- und Ist-Wert in Abhängigkeit vom voreingestellten Lagewinkel bzw. der voreingestellten Lageabweichung. Die bisher gewonnenen Erkenntnisse sind somit durchaus auf eine Kombination von Lageabweichung und Lagewinkel übertragbar.

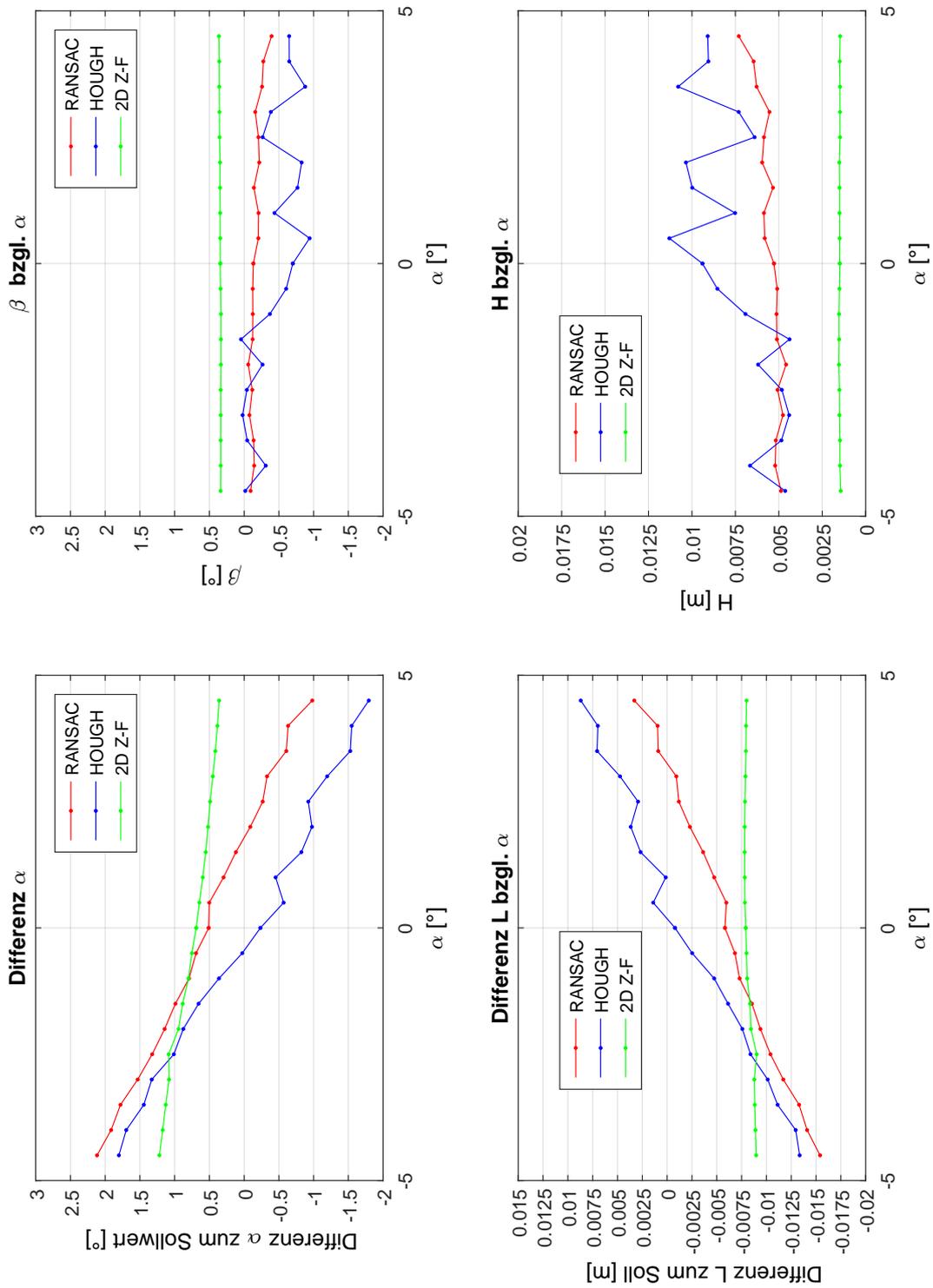


Abbildung 5.17: Auswertung mit RANSAC/Hough-Transformation/2D Zylinder-Fitting im 60cm Rohr mit 90° Bogen und einer Kombination aus voreingestelltem Lagewinkel (-4,5° bis 4,5°) und Lageabweichung (17,81mm).

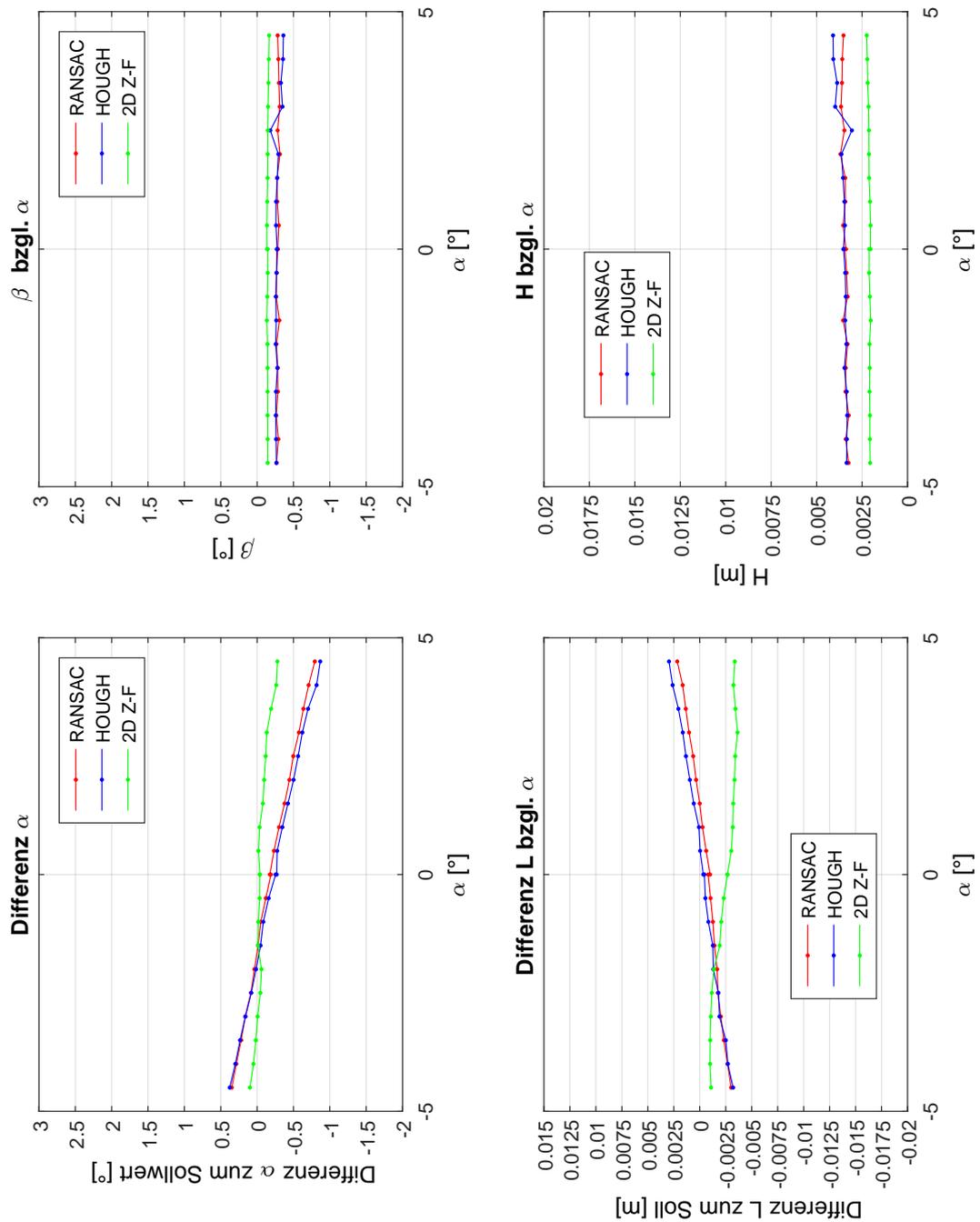


Abbildung 5.18: Auswertung mit RANSAC/Hough-Transformation/2D Zylinder-Fitting im 1m Rohr mit 90° Bogen und einer Kombination aus voreingestelltem Lagewinkel (-4,5° bis 4,5°) und einer Lageabweichung (15,55mm).

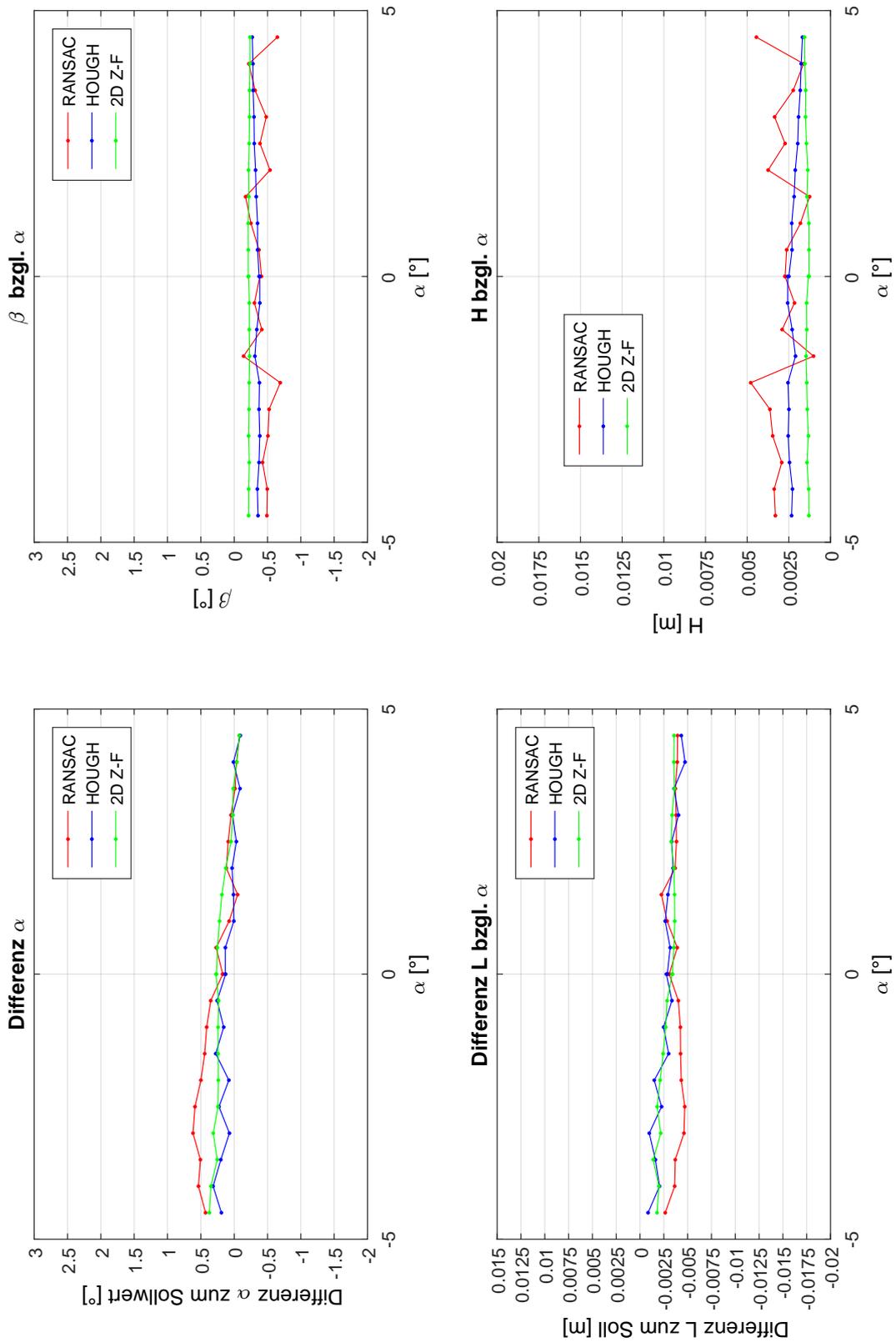


Abbildung 5.19: Auswertung mit RANSAC/Hough-Transformation/2D Zylinder-Fitting im 2m Rohr mit 90° Bogen und einer Kombination aus voreingestelltem Lagewinkel (-4,5° bis 4,5°) und einer Lageabweichung (18,19mm).

Höhenwinkel und Höhenabweichung: Wie auch die Ergebnisse der beiden vorherigen Untersuchungen gezeigt haben, ist aufgrund der Änderung des Lagewinkels und der Lageabweichung kein Einfluss auf die Bestimmung der Höhenwinkel und Höhenabweichungen erkennbar. Eine Kombination von Lagewinkel und Lageabweichung scheint auch hier nicht mehr bzw. weniger Auswirkung auf die Bestimmung der beiden Parameter zu haben als bei getrennter Betrachtung.

Auswirkung auf die innere Genauigkeit der Verfahren: Die Ergebnisse der inneren Genauigkeit der Versuche entsprechen ebenfalls den bisher gewonnenen Erkenntnissen der beiden vorherigen Untersuchungen. Auch hier treten keine signifikanten Änderungen der Standardabweichung aufgrund des voreingestellten Lagewinkel und der Lageabweichungen auf. Die zu den Versuchen ermittelten Standardabweichungen befinden sich im Anhang B.3.

5.4 Zusammenfassung – Bestimmung der äußeren Orientierung

Im Folgenden sind die wichtigsten grundlegenden Erkenntnisse bei der Bestimmung der äußeren Orientierung mit den Verfahren RANSAC, Hough-Transformation und 2D Zylinder-Fitting zusammengefasst:

- Die innere Genauigkeit der Verfahren bei der Bestimmung der äußeren Orientierung an der Nullposition liegt bei nahezu allen Versuchen und allen Verfahren innerhalb der geforderten Genauigkeit des Anwendungsfalls. Nur das Verfahren RANSAC überschreitet bei den Versuchen im 2 m langem Rohr die Anforderung bei der Bestimmung von Höhenwinkel und Höhenabweichung.
- Einen Einfluss auf die innere Genauigkeit der Verfahren aufgrund der Änderung von Lagewinkel oder Lageabweichung kann nicht festgestellt werden.
- Grundsätzlich ist eine eindeutige Hierarchie bezüglich der inneren Genauigkeit bei den Verfahren festzustellen. Ergebnisse mit einer geringen Standardabweichungen liefert das 2D Zylinder-Fitting, gefolgt von der Hough-Transformation. Die Standardabweichungen der Ergebnisse mit RANSAC sind im Verhältnis zu den anderen beiden Verfahren höher.
- Die Ergebnisse der absoluten Genauigkeit an der Nullposition befinden sich im Rahmen der Einmessgenauigkeit und dementsprechend auch im Rahmen der geforderten

Genauigkeit.

- Die Genauigkeit mit der sich die äußere Orientierung der ToF-Kamera bestimmen lässt ist nicht konstant. Mit zunehmender schrittweiser Änderung des voreingestellten Lagewinkels bzw. der voreingestellten Lageabweichung kommt es vor allem bei den Verfahren RANSAC und Hough-Transformation zu einer Zunahme der Differenzen zwischen den eingestellten Soll- und Ist-Werten. Die Zunahmen der Differenzen verläuft annähernd linear und sind somit als systematische Fehler bei der Bestimmung der äußeren Orientierung anzusehen. Grundsätzlich führen Änderungen des voreingestellten Lagewinkels zu größeren systematischen Fehlern als eine Änderung der voreingestellten Lageabweichung. Des Weiteren besteht eine Abhängigkeit zwischen der Dimension der systematischen Fehlern und dem Rohraufbau. Es kann, vor allem bei den Versuchen mit voreingestellten Lagewinkeln, eine Abhängigkeit der systematischen Fehler bezüglich des Abstands der ToF-Kamera zum folgenden Bogen sowie der Größe des Winkels des folgenden Bogens nachgewiesen werden.
- Die Dimension der systematischen Fehler bei der Bestimmung der äußeren Orientierung ist bei den Verfahren je nach Versuchsanordnung unterschiedlich stark ausgeprägt. Grundsätzlich liefert das 2D Zylinder-Fitting, insgesamt betrachtet, die Ergebnisse mit den geringsten systematischen Fehlern. Nur bei den Versuchen im 60 cm und 1 m langem Rohr mit einer Änderung der voreingestellten Lageabweichung treten, im Vergleich zu den anderen beiden Verfahren, höherer systematische Fehler bei der Bestimmung von Lagewinkel und Lageabweichung auf. Die Ergebnisse von RANSAC und Hough-Transformation sind meist relativ ähnlich und können Abweichungen zum Soll-Wert (im Rahmen der hier durchgeführten Versuche) bis zu 4,7° bei der Bestimmung des Lagewinkels und bis 2,5 cm bei der Bestimmung der Lageabweichung aufweisen.
- Eine Kombination von Lagewinkel und Lageabweichung führt bei allen Verfahren zu keiner erkennbaren Verbesserung oder Verminderung der Genauigkeit bei der Bestimmung der äußeren Orientierung.

Die Versuche haben gezeigt, dass die Genauigkeit der Bestimmung der äußeren Orientierung mit den Verfahren auch von bis dato noch unbekanntem Faktoren abhängig ist. Dies lässt sich am besten anhand der Versuche im 2 m langen Rohr erkennen. RANSAC liefert bei allen Versuchen im 2 m Rohr Ergebnisse mit einer im Verhältnis relativ hohen Standardabweichung. Dasselbe Problem zeigt sich aber auch bei der Auswertung der Versuche im 60 cm Rohr mit angeschlossen 90° Bogen bei der Hough-Transformation. Die konkrete

Ursache für die bei diesen Versuchen auftretenden hohen Standardabweichungen konnte nicht ermittelt werden. Auch ist die starke Zunahme der systematischen Fehler bei der Bestimmung der Lageabweichung mit den Verfahren RANSAC und Hough-Transformation bei den Versuche mit voreingestellten Lagewinkeln im 2 m Rohr mit den bisherigen Erkenntnissen nicht erklärbar.

Grundsätzlich ist eine Bestimmung der äußeren Orientierung und damit auch die Bestimmung von Schwimmwinkeln mit den vorgestellten Verfahren möglich. Die Genauigkeit ist abhängig vom Auftreten möglicher systematischer Fehler bedingt durch den Rohraufbau in Kombination mit der voreingestellten äußeren Orientierung. Grundsätzlich gilt: Je geringer die Aufnahmeposition von der Nullposition abweicht, desto geringer sind auch die zu erwartenden systematischen Fehler und dementsprechend steigt die Wahrscheinlichkeit, dass die geforderte Genauigkeit mit der die äußere Orientierung bestimmt werden kann, erfüllt wird.

Die Versuche haben gezeigt, dass das speziell für den Anwendungsfall entwickelte 2D Zylinder-Fitting die Ergebnisse mit den geringsten systematischen Fehlern und Standardabweichungen liefert.

In den folgenden Kapiteln wird auf mögliche Ansätze zur Korrektur der auftretenden systematischen Fehler eingegangen.

Kapitel 6

Korrektur von Mehrwegeffekten bei der Bestimmung der äußeren Orientierung

6.1 Erklärungsansatz für das Auftreten systematischer Fehler

Aufgrund systematischer Fehler kann bei der Bestimmung der äußeren Orientierung, vor allem mit den Verfahren RANSAC und Hough-Transformation, die durch den Anwendungsfall vorgegebene Anforderung an die Genauigkeit leicht überschritten werden. Im Rahmen der Auswertung der Versuche wurde eine mögliche Erklärung für das Auftreten der systematischen Fehler bei der Bestimmung der äußeren Orientierung gefunden.

Die analysierten Sachverhalte, auf denen diese aufbaut, sind im Folgenden zusammengefasst:

- In der Voruntersuchung wurde festgestellt, dass die Verteilung der Messpunkte Auswirkungen auf die Bestimmung der äußeren Orientierung hat. Mit zunehmender Abweichung der äußeren Orientierung der ToF-Kamera von der Nullposition und damit entsprechender Zunahme der asymmetrischen Verteilung der Messpunkte nehmen auch die Differenzen zwischen Soll- und Ist-Wert zu. Die Ergebnisse der Voruntersuchung weisen bei der Bestimmung der Lageabweichung Differenzen von bis zu 2 mm und bei der Bestimmung des Lagewinkels bis zu $0,25^\circ$ auf. Die Zunahme der Differenzen kann als systematischer Fehler interpretiert werden. Dieser ist aber relativ gering und liegt unter den durch den Anwendungsfall definierten Anforderungen an die Genauigkeit.

- In den Ergebnissen der Voruntersuchung ist keine erkennbare Zunahme der Differenz zwischen Soll- und Ist-Wert bei der Bestimmung von Höhenwinkel und Höhenabweichung erkennbar.
- Bei der Auswertung realer Aufnahmen treten systematische Fehler auf, die wesentlich größer sind als bei der Voruntersuchung. Die Differenz zwischen Soll- und Ist-Wert kann bei der Bestimmung der Lagewinkel bis zu 4° und bei der Bestimmung der Lageabweichung bis zu 2,5 cm betragen. Diese Fehler können somit nicht allein mit einer asymmetrischen Verteilung der Messpunkte begründet werden. Es müssen bei einer realen Aufnahme Messfehler vorhanden sein, die eine Erhöhung der systematischen Fehler bei der Bestimmung der äußeren Orientierung zur Folge haben.
- Aufnahmen im Rohr sind stark durch Mehrwegeeffekte beeinflusst (siehe Abschnitt 4.3). Durch die Versuche konnten zwei Faktoren des Rohraufbaus identifiziert werden, die in direkter Abhängigkeit zu den systematischen Fehlern stehen. Diese sind die Größe des Winkels des folgenden Bogens und der Abstand der ToF-Kamera zu diesem. Dieselben Faktoren werden auch in Abschnitt 4.3.2 mit der Aufweitung der Punktwolke aufgrund von Mehrwegeeffekten in Zusammenhang gebracht.

Es ist davon auszugehen, dass die durch Mehrwegeeffekte bedingte Aufweitung sowie die voreingestellte äußere Orientierung der ToF-Kamera als Ursache für die systematischen Fehler anzusehen sind. Durch eine asymmetrische Anordnung der Messpunkte aufgrund eines voreingestellten Lagewinkels oder einer Lageabweichung (siehe Abschnitt 4.3) in Kombination mit der Aufweitung, wird die Bestimmung der Position der Zylinderachse verfälscht. Ein Lagewinkel hat dabei eine wesentlich stärkere Änderung der asymmetrischen Verteilung der Messpunkte bezüglich der Seitenwände eines Rohres (in Aufnahme-richtung) zur Folge als eine Lageabweichung (siehe Abbildung 4.15). Dadurch entstehen bei der schrittweisen Zunahme des voreingestellten Lagewinkels größere Fehler bei der Bestimmung der Position der Zylinderachse, als bei der schrittweisen Zunahme der voreingestellten Lageabweichung. Da Änderungen des voreingestellten Lagewinkels oder der Lageabweichung nur eine geringe Auswirkung auf die Verteilung der Messpunkte auf der Ober- bzw. Unterseite des Rohres (in Aufnahme-richtung) haben, treten bei der Bestimmung von Höhenwinkel und Höhenabweichung keine erkennbaren systematischen Fehler auf.

Die Entstehung der systematischen Fehler soll im Folgenden anhand von zwei Skizzen veranschaulicht werden. In Abbildung 6.1 links sind die mit einer ToF-Kamera aufgenommenen Bereiche eines Rohres bei einer Aufnahmesituation mit einem voreingestellten Lagewinkel in 2D (xz-Ebene des Kamerakoordinatensystems) dargestellt. Eine theoretisch ideale

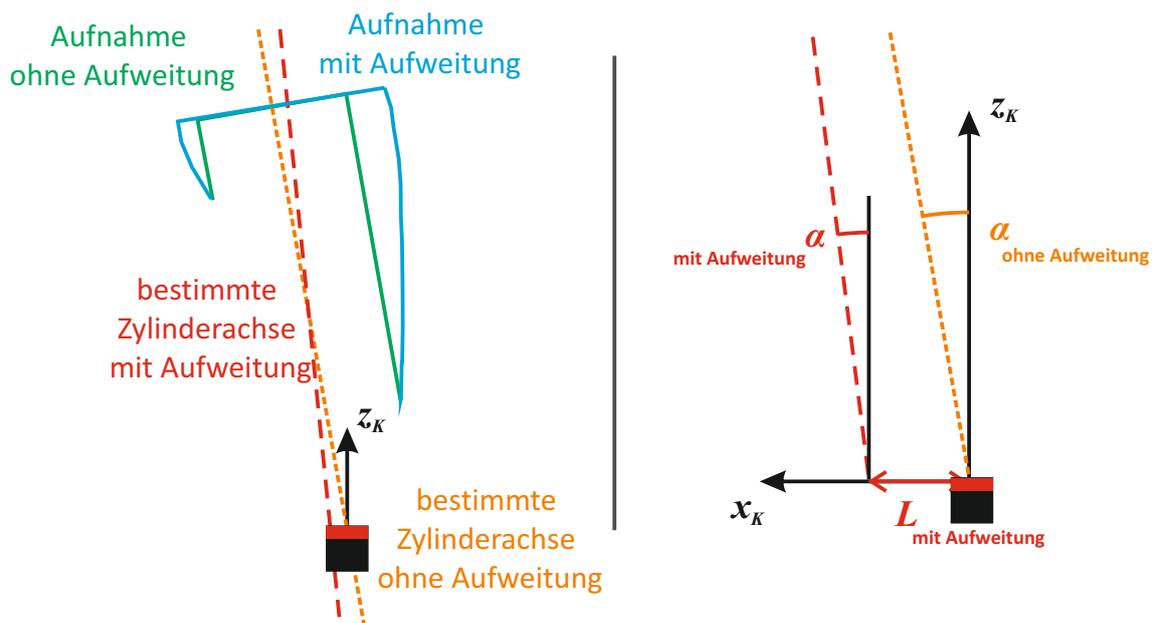


Abbildung 6.1: 2D Skizze der Auswirkungen von Mehrwegeffekten auf die Bestimmung von Lagewinkel und Lageabweichung.

Aufnahme des Rohres ohne den Einfluss von Mehrwegeffekten oder sonstigen Fehleinflüssen ist als grüner aufgenommener Bereich eingezeichnet. Eine Aufnahme mit Mehrwegeffekten und entsprechender Aufweitung der Punktwolke ist als blau markierter Aufnahmebereich dargestellt.

Die theoretisch bestimmte Zylinderachse ohne Einfluss der Aufweitung ist in orange, die Zylinderachse mit Aufweitung in rot skizziert. Aufgrund des voreingestellten Lagewinkels wird auf der rechten Seite ein größerer Bereich des Rohres durch wesentlich mehr Messpunkte abgedeckt als auf der linken Seite. Es liegt somit eine asymmetrische Verteilung der Messpunkte vor. In Kombination mit der Aufweitung führt dies bei RANSAC und der Hough-Transformation zu einer „Verschiebung/Verdrehung“ der Position der Zylinderachse zur rechten Seite der Aufnahme hin (siehe Abbildung 6.1 rechts). Die Stärke der „Verschiebung/Verdrehung“ ist abhängig von der Ausprägung der Aufweitung und der voreingestellten äußeren Orientierung. Aufgrund der „Verschiebung/Verdrehung“ fällt der bestimmte Lagewinkel geringer aus als bei einer Aufnahme ohne den Einfluss von Mehrwegeffekten. Die „Verschiebung/Verdrehung“ der Zylinderachse kann auch zu einer fälschlichen Bestimmung einer Lageabweichung führen. Dies ist in Abbildung 6.1 rechts skizziert. Die Zylinderachse verläuft nicht direkt durch den Ursprung des Kamerakoordinatensystems. Dadurch kommt es mit zunehmendem Lagewinkel zu einer Zunahme der Differenz bei der Lageabweichung.

Dies lässt sich auch an den Auswertergebnissen in Abschnitt 5.3 erkennen. Befindet sich die ToF-Kamera hingegen an der Nullposition, sind die Messpunkte symmetrisch verteilt und die Aufweitung kompensiert sich selbst.

In Abbildung 6.2 ist die mit RANSAC bestimmte Zylinderachse bei einer realen Aufnahme im 60 cm Rohr mit angeschlossenen 90° Bogen und einem voreingestellten Lagewinkel von 10° in der Farbe Schwarz dargestellt. Die bei der Ausgleichung verwendeten Punkte (Inlier) sind grün, die restlichen Punkte rot eingefärbt. Die Soll-Zylinderachse ist als blaue Linie eingezeichnet. Es ist deutlich erkennbar, dass die durch RANSAC bestimmte Zylinderachse einen kleineren Lagewinkel aufweist als die Soll-Zylinderachse. Auch verläuft die bestimmte Zylinderachse nicht durch den Ursprung, sondern schneidet die x-Achse bei circa 2,5 cm. Bei RANSAC und der Hough-Transformation sind die systematischen Fehler bei allen Versuchen richtungsabhängig. Das heißt, eine Rotation der Kamera nach rechts (wie im Beispiel), führt zur Bestimmung einer fehlerhaften positiven Lageabweichung. Bei einer Rotation der Kamera nach links, ist die bestimmte Lageabweichung negativ (siehe Abbildung 5.12).

Beim 2D Zylinder-Fitting treten im Vergleich zu RANSAC nur sehr geringe systematische Fehler auf. Dies liegt an der Vorgehensweise des Verfahrens: Beim 2D Zylinder-Fitting werden immer nur kleine Abschnitte des Zylinders betrachtet. Die Auswirkungen einer Aufweitung fallen bei der Bestimmung des ausgleichenden Kreises in den jeweiligen Zylinderabschnitten geringer aus als bei einer ganzheitlichen Berücksichtigung der Messpunkte wie bei RANSAC oder Hough-Transformation.

6.2 Korrektur von Mehrwegeeffekten

Ein Ansatz zur Reduzierung der systematischen Fehler besteht somit in der Korrektur von Mehrwegeeffekten in den Aufnahmen der ToF-Kamera. Dabei können die in Abschnitt 3.2.4 vorgestellten Verfahren eingesetzt werden, um die gemessenen Distanzen bezüglich der Mehrwegeeffekte zu korrigieren. Dadurch müsste sich die Aufweitung der Punktwolke und in Folge die systematischen Fehler bei der Bestimmung der äußeren Orientierung verringern. Im folgenden Abschnitt wird untersucht, inwiefern ein Einsatz der beiden Verfahren im gegebenen Anwendungsfall möglich ist und sich die systematischen Fehler dadurch vor allem bei den Ergebnissen von RANSAC und der Hough-Transformation verringern lassen. Da, wie im vorherigen Kapitel festgestellt, die systematischen Fehler bei den Versuchen mit einem angeschlossenen 90° Bogen am stärksten auftreten, werden die folgenden Untersuchungen auf die Versuche mit geschlossenem 90° Bogen beschränkt.

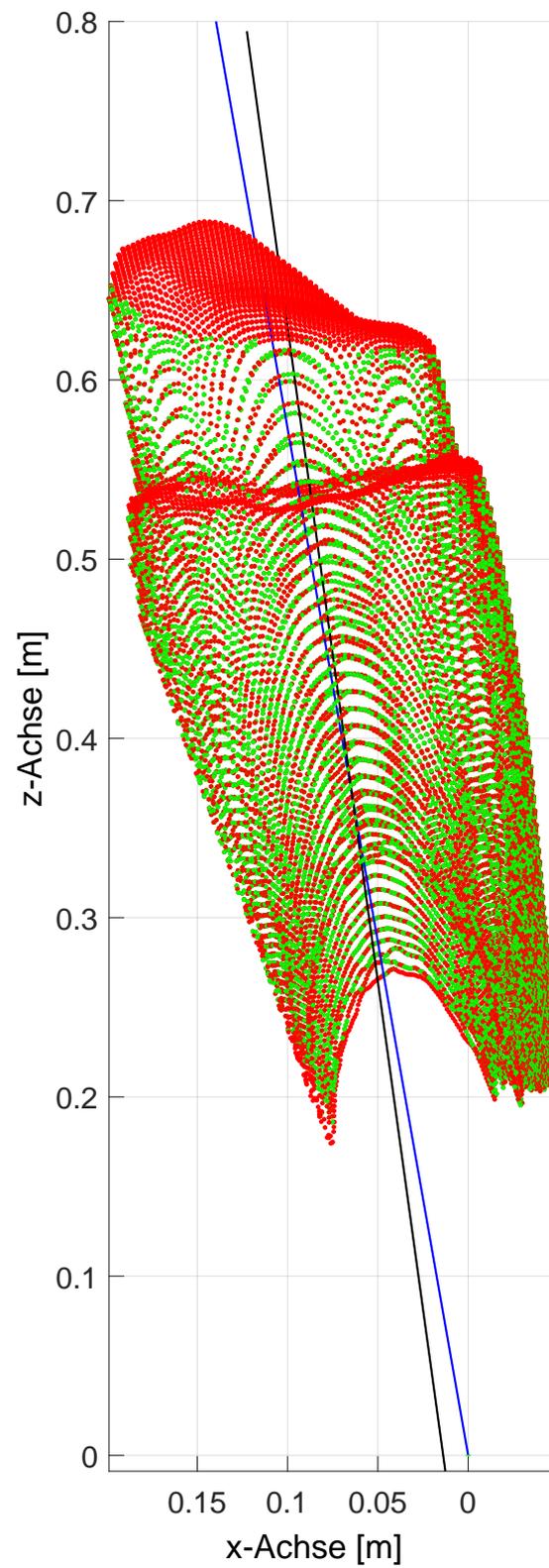


Abbildung 6.2: Mit RANSAC bestimmte Zylinderachse (schwarz) und die theoretische Soll-Position der Zylinderachse (blau) bei einer Aufnahme im 60 cm langen Rohr mit angeschlossenen 90° Bogen und einem eingestellten Lagewinkel von 10°.

6.2.1 Radiometrische Modelle

Die in Abschnitt 3.2.4 vorgestellten Verfahren von [Fuchs 2012] und [Jiménez et al. 2012] bzw. [Jiménez et al. 2014] zur Korrektur von Mehrwegeeffekten basieren auf der Verwendung radiometrischer Modelle. Mittels dieser Modelle sollen die durch Mehrwegeeffekte in der Szene auftretenden additiven Signalleistungen einer jeden Distanzmessung der ToF-Kamera berechnet und damit entsprechend die Distanzmessungen korrigiert werden.

Es existieren auch Ansätze die durch zwei Aufnahmen mit unterschiedlichen Messfrequenzen Mehrwegeeffekte bestimmen (siehe Abschnitt 2.4). Diese können im gegebenen Anwendungsfall aber nicht eingesetzt werden, da die Inspektionseinheit bei der Vermessung eines Rohrsystems meist kontinuierlich in Bewegung ist. Es kann somit nicht gewährleistet werden, dass die beiden Aufnahmen mit unterschiedlichen Frequenzen auch eine identische Szene abbilden.

Theoretische Annahmen der radiometrischen Modelle

Die Korrektur von Mehrwegeeffekten mittels der beiden auf radiometrischen Modellen basierenden Verfahren erfolgt grundsätzlich unter Verwendung vereinfachter Annahmen. Die wichtigsten werden an dieser Stelle nochmal kurz wiederholt:

- Alle aufgenommenen Flächen verhalten sich wie ideale Lambert-Strahler, das heißt Licht wird diffus reflektiert.
- Im Modell werden nur Einwege-Mehrwegeeffekt, also der richtungsabhängige Mehrwegeeffekt einer Fläche auf eine andere betrachtet.

Eine Problemstellung der Verfahren ist, dass die Berechnung der Parameter der radiometrischen Modelle auf Basis von durch Mehrwegeeffekte verfälschten Distanzmessungen, erfolgt. Da im gegebenen Anwendungsfall die Distanzmessungen stark durch Mehrwegeeffekte beeinflusst sind, kann dies auch zu entsprechend ausgeprägten Fehlern bei der Berechnung der Korrekturwerte führen. Inwiefern dies den Einsatz der Verfahren im gegebenen Anwendungsfall beeinflusst, wird im Folgenden untersucht.

Im Rahmen der ersten Versuche hat sich gezeigt, dass beim Einsatz der Verfahren im gegebenen Anwendungsfall eine weitere Annahme bei der Verwendung der radiometrischen Modell getroffen werden muss, um verwendbare Ergebnisse zu erhalten. Es handelt sich um die Festlegung von konstanten Albedo-Faktoren für die aufgenommenen Flächen.

Albedo-Faktoren geben Auskunft über das Reflexionsvermögen einer Fläche (siehe Abschnitt 3.2.4). Die Berechnung der Albedo-Faktoren erfolgt bei beiden Verfahren mittels der

Parameter des radiometrischen Modells und den Amplitudenmessungen der ToF-Kamera. Laut [Jiménez et al. 2012] ist die Bestimmung korrekter Albedo-Faktoren für die aufgenommenen Flächen allgemein problematisch. Gerade bei verschiedenen Lichtverhältnissen stellt die Bestimmung korrekter Albedo-Werte eine Herausforderung dar. Bei Aufnahmen im Rohr ist zwar grundsätzlich nicht mit verschiedenen Lichtverhältnissen zu rechnen, dafür besteht eine ähnliche Problematik aufgrund des PVC-Materials der KG-Rohre. Im Gegensatz zu der Annahme des radiometrischen Modells, dass alle Flächen Licht diffus reflektieren, treten bei Aufnahmen im Rohr durchaus Bereiche auf, die Licht spiegelnd reflektieren. Diese Reflexionen und die damit verbundene hohe Amplitudenmessungen können zu einer fehlerhaften Berechnung der Albedo-Faktoren führen.

Festlegung eines konstanten Albedo-Faktors für die aufgenommenen Flächen

Als fehlerhafte Albedo-Faktoren werden in dieser Arbeit Werte deklariert, die den Bereich von 0 bis 1 überschreiten. Bei einem Wert größer 1 würde bei der Berechnung ein auf einer Fläche auftreffendes Signal verstärkt. Das ausgehende Signal wäre somit größer als das eingehende Signal. Fehlerhaft bestimmte Albedo-Faktoren können in Folge zu nicht unerheblichen Fehlern bei der Berechnung der Mehrwegeeffekte und deren Korrekturwerten für die Distanzmessungen führen.

Beide Verfahren beinhalten zwar Ansätze zur Kompensierung von zu hohen Albedo-Faktoren bei der Berechnung, diese funktionieren aber nur bei geringen Überschreitungen des Wertebereichs. Bei größeren Abweichungen vom Wertebereich, wie sie bei Aufnahmen im Rohr leicht entstehen (zum Beispiel bestimmte Albedo-Faktoren mit Werten im Bereich von 2 oder 3), können die Verfahren dies nicht mehr kompensieren und es kommt in Folge zu Fehlern bei der Bestimmung der Mehrwegeeffekte. [Jiménez et al. 2012] reduzierten die Albedo-Faktoren im Verhältnis zum Maximalwert unter Berücksichtigung eines globalen Skalierungsfaktors. Dadurch liegen immer alle Albedo-Faktoren unter dem Wert 1. Ist der maximale Albedo-Faktor aber aufgrund einer fehlerhaften Bestimmung sehr hoch, führt dies in Folge zu einer zu starken Verringerung der restlichen Albedo-Faktoren.

Bei [Fuchs 2012] werden im ersten Iterationsschritt die Amplituden-Werte korrigiert, um anschließend nochmals die korrekten Albedo-Faktoren zu bestimmen. Auch hier können einzelne hohe Albedo-Faktoren zu Fehlern bei der Bestimmung der Korrekturwerte für die Amplitudenmessungen führen.

Da die Aufnahmen innerhalb eines Rohrsystems erfolgen und die Signale somit immer von einem identischen Material reflektiert werden, müsste theoretisch jeder Messpunkt auch einen identischen Albedo-Faktor besitzen. Um Unsicherheiten bei der Bestimmung

der Albedo-Faktoren zu vermeiden, wird aufgrund dieser Annahme bei der Auswertung der Versuche ein konstanter Albedo-Faktor für alle Messpunkte festgelegt. Der Albedo-Faktor für das Material wird, wie in [Fuchs 2012] beschrieben, anhand einer Aufnahme des Rohres von außerhalb geschätzt. Dadurch kann der Einfluss von Mehrwegeeffekten bei der Bestimmung des Albedo-Faktors vermieden werden. Es hat sich gezeigt, dass das PVC-Material einen Albedo-Wert von circa 0,5 besitzt. Dieser Wert wird bei der Verwendung der Verfahren für jede Fläche der aufgenommenen Szene verwendet.

6.2.2 Voruntersuchung zur Korrektur von Mehrwegeeffekten

Um die Einsatzfähigkeit der beiden Verfahren im vorliegenden Anwendungsfall zu überprüfen, werden ausgewählte Aufnahmen im Rahmen einer Voruntersuchung ausgewertet und die Ergebnisse analysiert. Zuerst erfolgt eine Auswertung von Testmessungen außerhalb eines Rohres, um die generelle Funktionalität der umgesetzten Verfahren zu testen. Die aufgenommene Szene besteht aus zwei, im rechten Winkel zueinander befindlichen Wänden und ist dem in [Fuchs 2012] und [Jiménez et al. 2014] vorgestellten Versuchsaufbau nachempfunden.

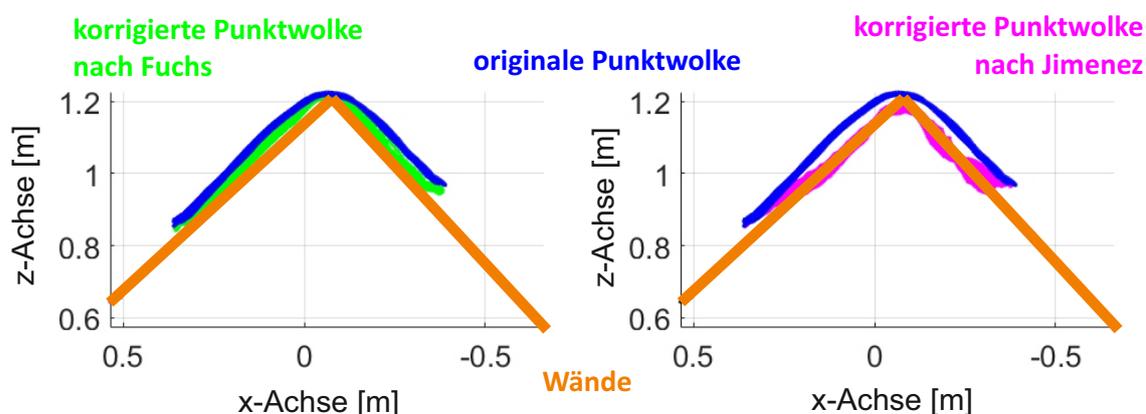


Abbildung 6.3: Originale und mit den Verfahren bezüglich Mehrwegeeffekte korrigierte Punktwolken einer Aufnahme von zwei zueinander senkrecht befindlichen Wänden in der xz-Ebene des Kamerakoordinatensystems

In Abbildung 6.3 sind die originalen (blau) und korrigierten Aufnahmen einer solchen Szene abgebildet. In der linken Abbildung sind die Ergebnisse der Mehrwegkorrektur nach [Fuchs 2012] in grün und rechts die Ergebnisse nach [Jiménez et al. 2012] in magenta dargestellt. Die mit einem Tachymeter eingemessenen Wände sind zur Referenzierung als orange Linien eingezeichnet. Die Auswertung der Versuche mit den Verfahren liefern in beiden Fällen

plausible Ergebnisse. Im optischen Vergleich liegt das Ergebnis des Verfahrens von [Jiménez et al. 2012] näher an den Referenzlinien als das von [Fuchs 2012].

Bei der Voruntersuchung im Rohr werden die Ergebnisse der Verfahren unter Berücksichtigung der folgenden Punkte betrachtet:

- Optische Bewertung der korrigierten Ergebnisse
- Stabilität bezüglich fehlerhaft bestimmter Parameter des radiometrischen Modells
- Einfluss der Albedo-Faktoren
- Abhängigkeit von der Aufnahmesituation

Die Bewertung bezieht sich nur auf die im Rahmen der Versuche durchgeführten Aufnahmen. Die Voruntersuchung erfolgt mittels Aufnahmen in der Nullposition sowie mit maximal eingestellten Lagewinkeln bzw. Lageabweichungen.

Korrektur von Aufnahmen im Rohr mit dem Verfahren nach [Fuchs 2012]

[Fuchs 2012] weist in seiner Arbeit explizit darauf hin, dass nur bei, im Verhältnis zur Gesamtstrecke, geringen Fehlern aufgrund von Mehrwegeeffekten eine Korrektur möglich ist. Da aber keine expliziten Angaben existieren, ab wann ein Einsatz des Verfahrens nicht mehr möglich ist, muss dies für diesen Anwendungsfall speziell geprüft werden.

Ungenauigkeiten oder Fehler bei der Bestimmung der Parameter des radiometrischen Modells entstehen vor allem im Bereich von kantenartigen Strukturen in der aufgenommenen Szene. Entsprechend dem in [Fuchs 2012] beschriebenen Vorgehen erfolgt vor der Berechnung eine Kantendetektion, um diese Bereiche herauszufiltern. In diesem Fall werden die betroffenen Bereiche mittels eines Canny-Filters [Canny 1986] detektiert.

Die ersten Versuche haben gezeigt, dass das Verfahren grundsätzlich sehr empfindlich auf unterschiedliche Aufnahmesituationen reagiert. Dies hängt vermutlich mit dem Algorithmus des Verfahrens zusammen. Da die Berechnung der Mehrwegeeffekte direkt mittels zweier Iterationsschritte erfolgt und nicht wie bei [Jiménez et al. 2012] einen Optimierungsalgorithmus beinhaltet, wirken sich Änderungen der Eingangsparameter des radiometrischen Modells direkt auf die Ergebnisse aus.

In Abbildung 6.4 sind die Ergebnisse der Auswertungen von Aufnahmen an der Nullposition im 60 cm (links) und 1 m (rechts) langem Rohr mit angeschlossenem 90° Bogen abgebildet. Die originale Punktwolke ist in der Farbe Blau und die korrigierte Punktwolke in der Farbe Magenta dargestellt. Die Grenzen des Rohres sind als Referenz mittels grüner Linien eingezeichnet.

Bei den Aufnahmen im 60 cm langem Rohr (Abbildung 6.4 links) sind fehlerhaft korrigierte Messpunkte im negativen Bereich der z-Achse erkennbar. Untersuchungen haben dafür folgende Ursache ermittelt: Im Bereich des Bogens führen benachbarte Messpunkte im ersten Iterationsschritt oftmals zu sehr großen Korrekturwerten für die Amplitudenmessungen. Dadurch kommt es in Folge zu relativ kleinen Amplitudenmessungen, die in den zweiten Iterationsschritt eingehen. Sind die im zweiten Iterationsschritt, durch Mehrwegeeffekte bedingten Signalanteile in Summe wesentlich größer als diese Amplitudenmessungen, führt dies bei der Berechnung in der komplexen Darstellung zu negativ korrigierten Distanzmessungen.

Eine negative Distanz ergibt bei der Rückrechnung Messpunkte, die im Kamerakoordinatensystem hinter der ToF-Kamera liegen. Ein Ausschluss von benachbarten Messpunkten in einem bestimmten Umkreis kann dieses Problem verringern. Die Wahl der korrekten Größe des Umkreises gestaltet sich schwierig, da diese von der jeweiligen Aufnahmesituation abhängig ist. Wird der Umkreis zu groß gewählt, führt dies in Folge zu einer zu starken Reduzierung der Korrekturwerte. Auch die Verwendung von durch das Verfahren selbst berechneten Albedo-Faktoren konnte diesbezüglich keine Abhilfe schaffen.

Bei den Aufnahmen im 1 m langem Rohr tritt beschriebener Effekt hingegen nicht auf. Trotzdem sind die Ergebnisse der Korrektur bereits bei einer rein optischen Betrachtung nicht überzeugend. Es treten häufig Artefakte in den korrigierten Punktwolken auf, die bei der originalen Punktwolke nicht existieren. Ein solches Artefakt befindet sich im Bereich von 0,8 bis 0,9 m der z-Achse in Abbildung 6.4 (rechts).

Grad und Anzahl der fehlerhaften Korrekturen bei [Fuchs 2012] sind stark von der jeweiligen Aufnahmesituation abhängig. Im Rahmen der Untersuchungen konnten keine befriedigenden Lösungen gefunden werden, die eine gleichbleibende Qualität der Mehrwegkorrektur unabhängig von der Aufnahmesituation gewährleisten. Das Verfahren ist in dem vorliegenden Anwendungsfall somit nicht einsetzbar. Aus diesem Grund wird im weiteren Verlauf der Untersuchungen das Verfahren von [Fuchs 2012] nicht weiter betrachtet.

Korrektur von Aufnahmen im Rohr mit dem Verfahren nach [Jiménez et al. 2012]

Die Voruntersuchungen mit dem Verfahren haben ergeben, dass das Verfahren grundsätzlich für den Einsatz im gegebenen Anwendungsfall geeignet ist. Aufgrund des Optimierungsalgorithmus liefert es bei allen Aufnahmen kontinuierlich stabile Ergebnisse. Auch Kantenbereiche verursachen im Gegensatz zum Verfahren nach [Fuchs 2012] kaum Probleme bei der Bestimmung der Mehrwegeeffekte. Bezüglich der Auswahl des konstanten

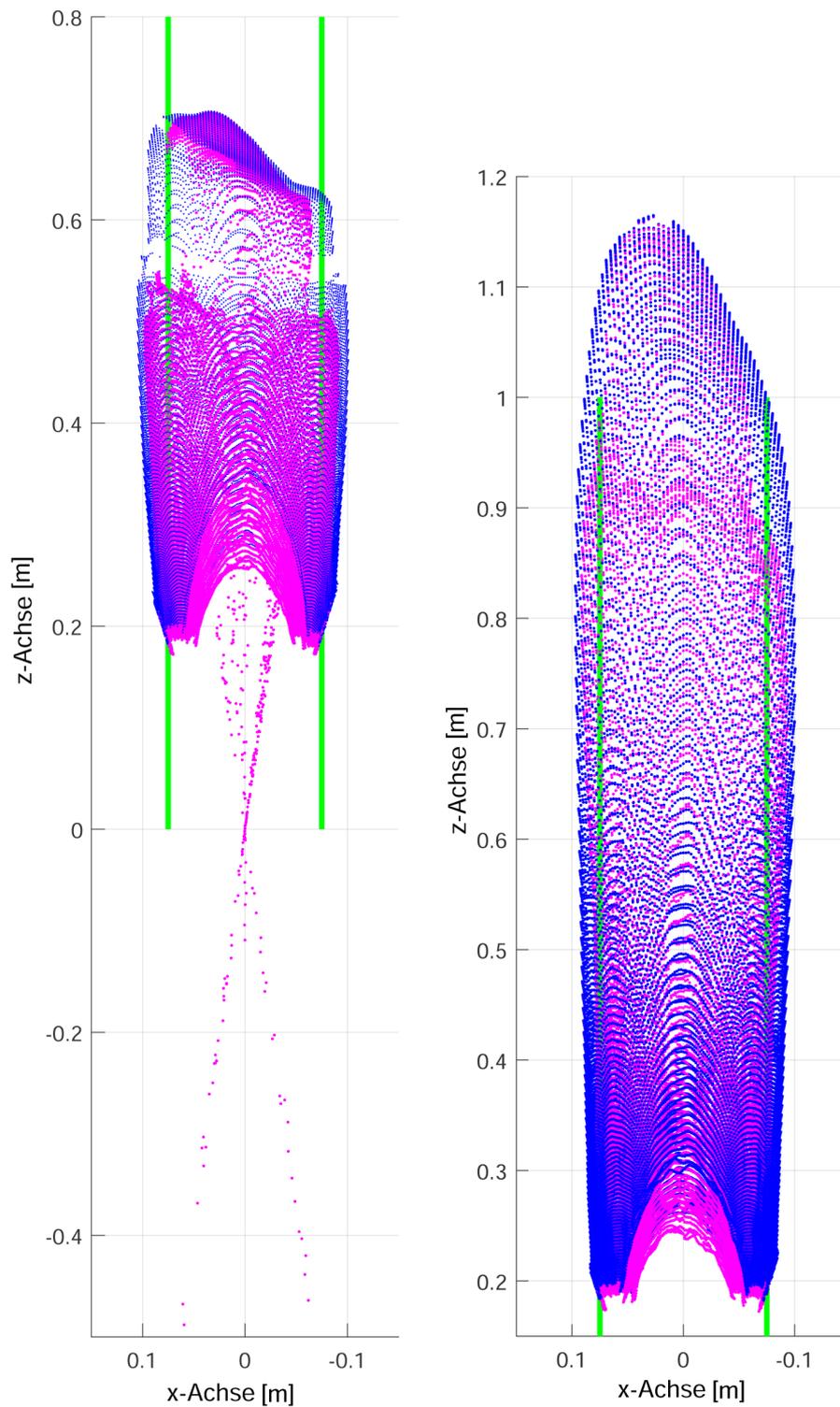


Abbildung 6.4: Original (blau) und mit [Fuchs 2012] korrigierte Punktwolke (magenta) einer Aufnahme im 1m (rechts) und im 60cm (links) Rohr mit 90° Bogen. Die Begrenzung des Rohres ist als Referenz mit grünen Linien markiert.

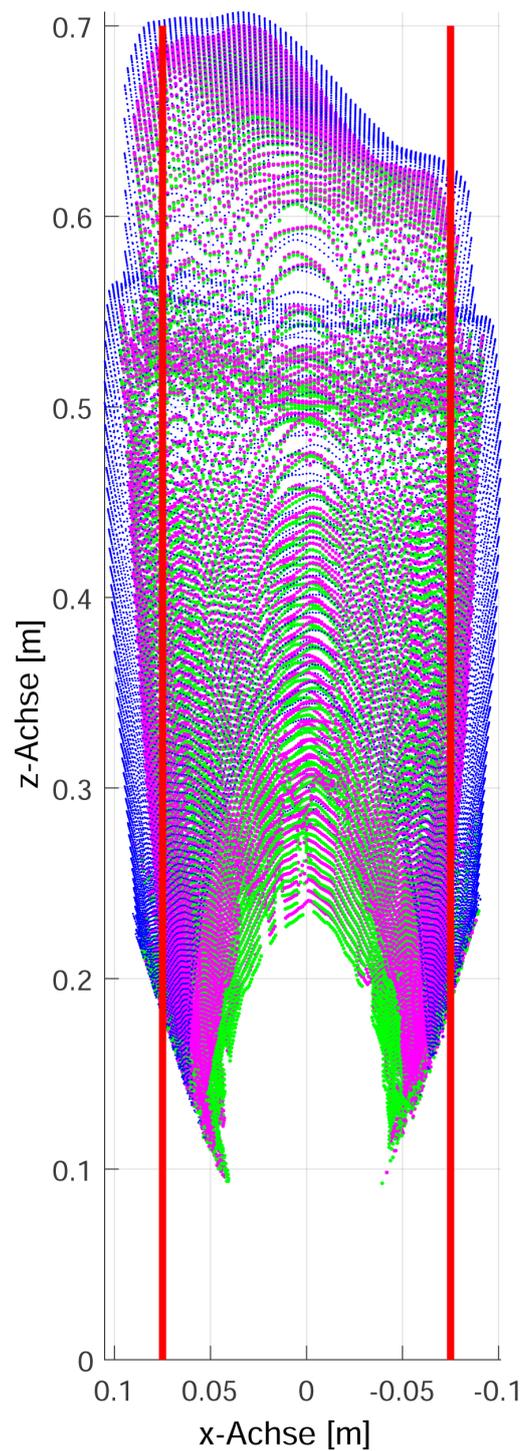


Abbildung 6.5: Original (blau) und mit [Jiménez et al. 2012] korrigierte Punktwolken mit konstanten Albedo-Faktor von 0,5 (magenta) und 0,6 (grün) einer Aufnahme im 60cm Rohr mit 90° Bogen. Die Begrenzung des Rohres ist als Referenz mit roten Linien markiert.

Albedo-Faktors zeigt sich das Verfahren ebenfalls als sehr stabil. In Abbildung 6.5 sind die korrigierten Punktwolken mit einem konstanten Albedo-Faktor von 0,5 (magenta) und 0,6 (grün) gegenüber der originalen Punktwolke (blau) dargestellt. Zwischen den beiden korrigierten Punktwolken sind bis auf geringe Abweichungen keine großen Unterschiede erkennbar. Im weiteren Verlauf wird ein konstanter Albedo-Faktor von 0,5 verwendet.

Die optische Bewertung der korrigierten Punktwolken ist insgesamt auch mit voreingestellten Lagewinkeln (siehe Abbildung 6.6) und Lageabweichungen überzeugend. Grundsätzlich kann das Verfahren die durch Mehrwegeeffekte auftretende Aufweitung verringern, aber nicht komplett eliminieren. Dies ist im Vergleich mit den eingezeichneten Referenzlinien der theoretischen Rohrbegrenzungen erkennbar.

Anpassung des Verfahrens zur Reduzierung der Rechenzeit: Durch den Einsatz des Optimierungsalgorithmus bei [Jiménez et al. 2012] muss für jeden Messpunkt eine Ausgleichung nach dem Prinzip der kleinsten Quadrate durchgeführt werden. Die gesamte Berechnung für eine Aufnahme kann aus diesem Grund bei der in Abschnitt 5.1 beschriebenen Rechnerkonfiguration bis zu einer Stunde dauern.

Bei einem kontinuierlichen Aufbau der aufgenommenen Szene, wie es bei Aufnahmen im Rohr der Fall ist, besteht die Möglichkeit die Auswertung nur für jedes zweite oder dritte Pixel durchzuführen und die Ergebnisse der dazwischenliegenden Pixel zu interpolieren. Dadurch kann die Rechenzeit ohne zu großen Qualitätsverlust verkürzt werden. Eine Auswertung von nur jedem dritten Pixel kann die Rechenzeit auf circa 8 Minuten pro Aufnahme reduzieren.

Die Abweichung zwischen den ohne und mit Interpolation berechneten, korrigierten Distanzen beträgt bei der Aufnahme an der Nullposition im 60 cm langem Rohr im Mittel 2 mm. Dieser Wert ist unter Berücksichtigung der Verbesserung der Rechenzeit durchaus akzeptierbar. Dementsprechend erfolgt die Berechnung der Mehrwegeeffekte zur Reduzierung der Rechenzeit immer mit einer Interpolation.

Bei der Berechnung der Mehrwegeeffekte werden des Weiteren nicht nur Punkte im Umkreis von 0,5 m, wie in [Jiménez et al. 2012] beschrieben, berücksichtigt. In der hier durchgeführten Auswertung werden alle Messpunkte in den Berechnungsprozess mit einbezogen. Die grundsätzliche Eignung des Verfahrens im gegebenen Anwendungsfall ist durch die Voruntersuchung bestätigt worden. Im Folgenden wird untersucht, ob durch den Einsatz des Verfahrens die systematischen Fehler bei der Bestimmung der äußeren Orientierung reduziert werden können. Die in Abschnitt 5.3 vorgestellten Versuche mit einer Änderung der voreingestellten Lagewinkel und Lageabweichungen werden erneut, nur diesmal mit einer vorherigen Korrektur der Mehrwegeeffekte nach [Jiménez et al. 2012], ausgewertet.

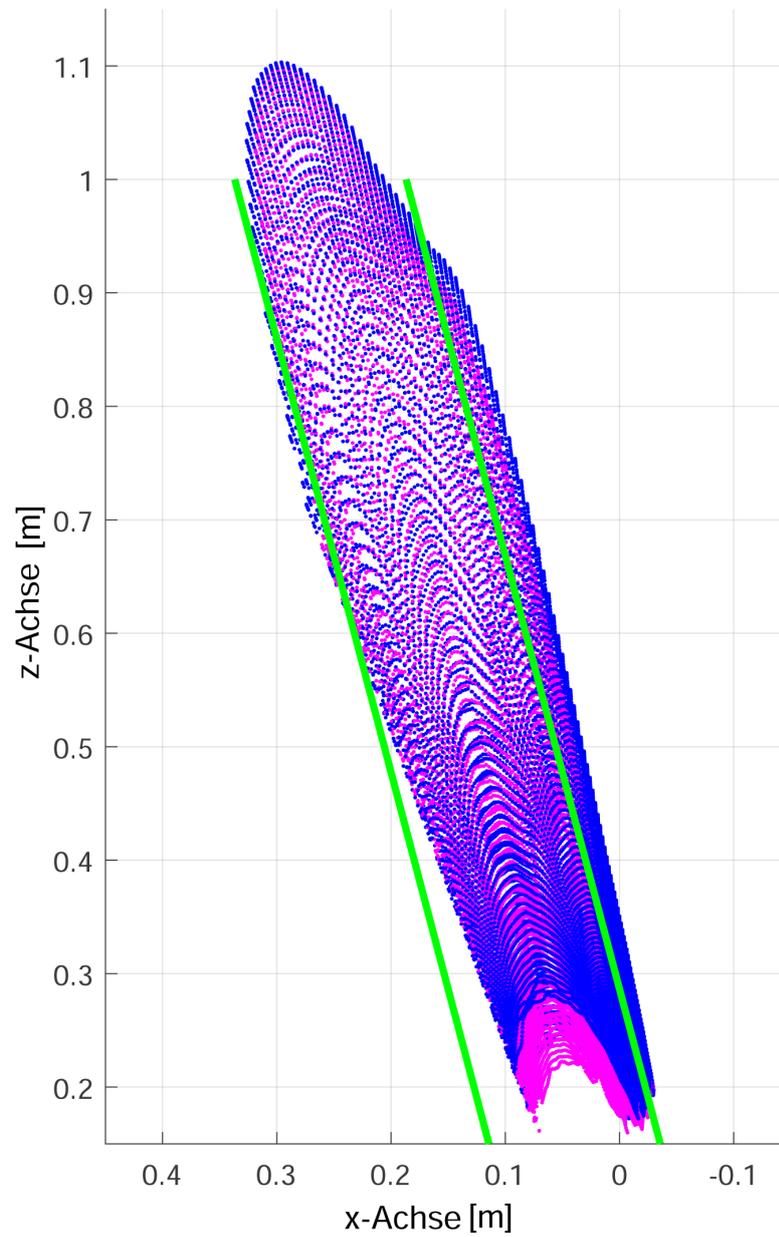


Abbildung 6.6: Original (blau) und mit [Jiménez et al. 2012] korrigierte Punktwolke (magenta) einer Aufnahme im 1m Rohr mit 90° Bogen und voreingestelltem Lagewinkel von 15°. Die Begrenzung des Rohres ist als Referenz mit grünen Linien markiert.

6.3 Ergebnisse der Auswertung mit einer Mehrwegkorrektur

6.3.1 Versuche mit Änderung des voreingestellten Lagewinkels

Die Darstellung der Ergebnisse ist entsprechend dem in Kapitel 5 beschriebenen Schema aufgebaut. Es handelt sich um eine absolute Darstellung der Messergebnisse, also ohne Abzug des Mittelwerts der Nullposition von den Mittelwerten der anderen Aufnahmepositionen. An jeder Aufnahmeposition werden 10 Aufnahmen ausgewertet. Stellvertretend sind an dieser Stelle die Ergebnisse der Auswertung der Versuche im 60 cm langem Rohr in Abbildung 6.7 und 6.8 dargestellt. Die Ergebnisse der Auswertung des 1 und 2 m langen Rohres befinden sich im Anhang C.

Auswirkungen auf die Bestimmung der Lage- und Höhenwinkel: Bei den Ergebnissen der Auswertung der Versuche mit dem 2D Zylinder-Fitting zeigten sich bei den Versuchen im 1 und 2 m langen Rohr grundsätzlich keine großen Änderungen bei der Bestimmung von Lage- und Höhenwinkel. Die Bestimmung des Lagewinkels im 60 cm langem Rohr wird hingegen durch die Mehrwegkorrektur verbessert. Die Abweichung zum Soll-Wert ist bei einem voreingestellten Lagewinkel von 15° um circa 1° geringer als bei den Versuchen ohne Mehrwegkorrektur (siehe Abbildung 6.7).

Die Verfahren RANSAC und Hough-Transformation profitieren durch die Korrektur der Mehrwegeffekte, vor allem bei der Auswertung der Aufnahmen im 60 cm langen Rohr. Die Abweichung zum Soll-Wert bei einem voreingestellten Lagewinkel von 15° wird bei beiden Verfahren um circa $1,5^\circ$ verbessert (siehe Abbildung 6.7).

Die Größenordnung der Verbesserung nimmt mit zunehmender Rohrlänge ab. Im 1 m langen Rohr betragen die Verbesserungen im Vergleich zur Auswertung ohne Korrektur der Mehrwegeffekte, noch circa $0,5^\circ$. Im 2 m langem Rohr sind keine eindeutigen Verbesserungen zu erkennen (siehe Anhänge C.1 und C.3). Der systematische Fehler der Auswertung des 2 m Rohres mit der Hough-Transformation wird durch das Korrekturverfahren sogar leicht erhöht.

Da für den Höhenwinkel kein Soll-Wert existiert, kann diesbezüglich keine eindeutige Aussage über Verbesserungen getroffen werden. Auffällig ist aber, dass vor allem bei den Ergebnissen des 60 cm langen Rohres große Schwankungen, wie bei der Hough-Transformation, geglättet werden. Des Weiteren nähern sich die Ergebnisse dem theoretischen Nullwert des Höhenwinkels an.

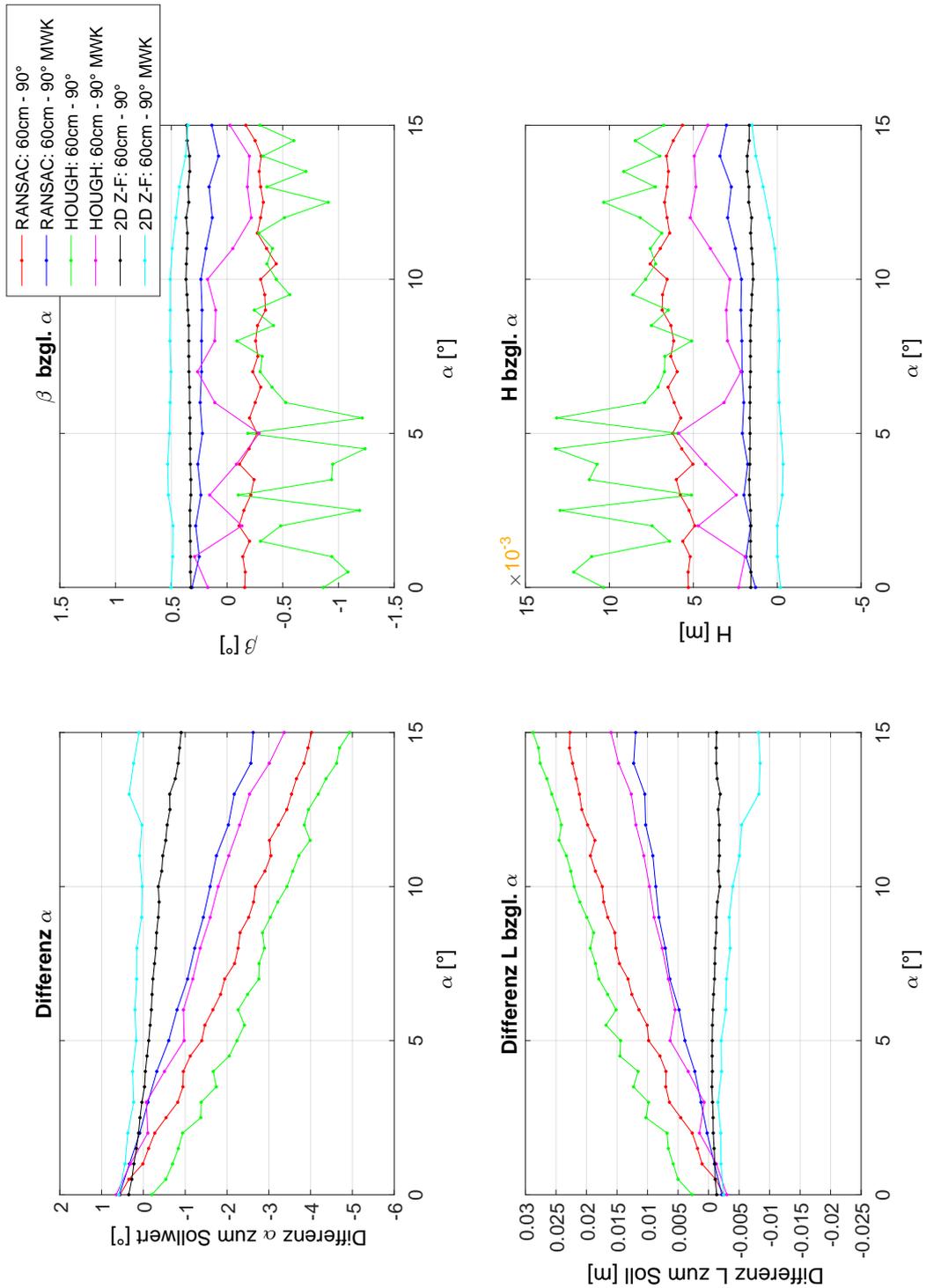


Abbildung 6.7: Auswertung mit RANSAC/Hough-Transformation/2D Zylinder-Fitting im 60cm langen Rohr mit 90° Bogen und voreingestelltem Lagewinkel α und Mehrwegkorrektur (MWK).

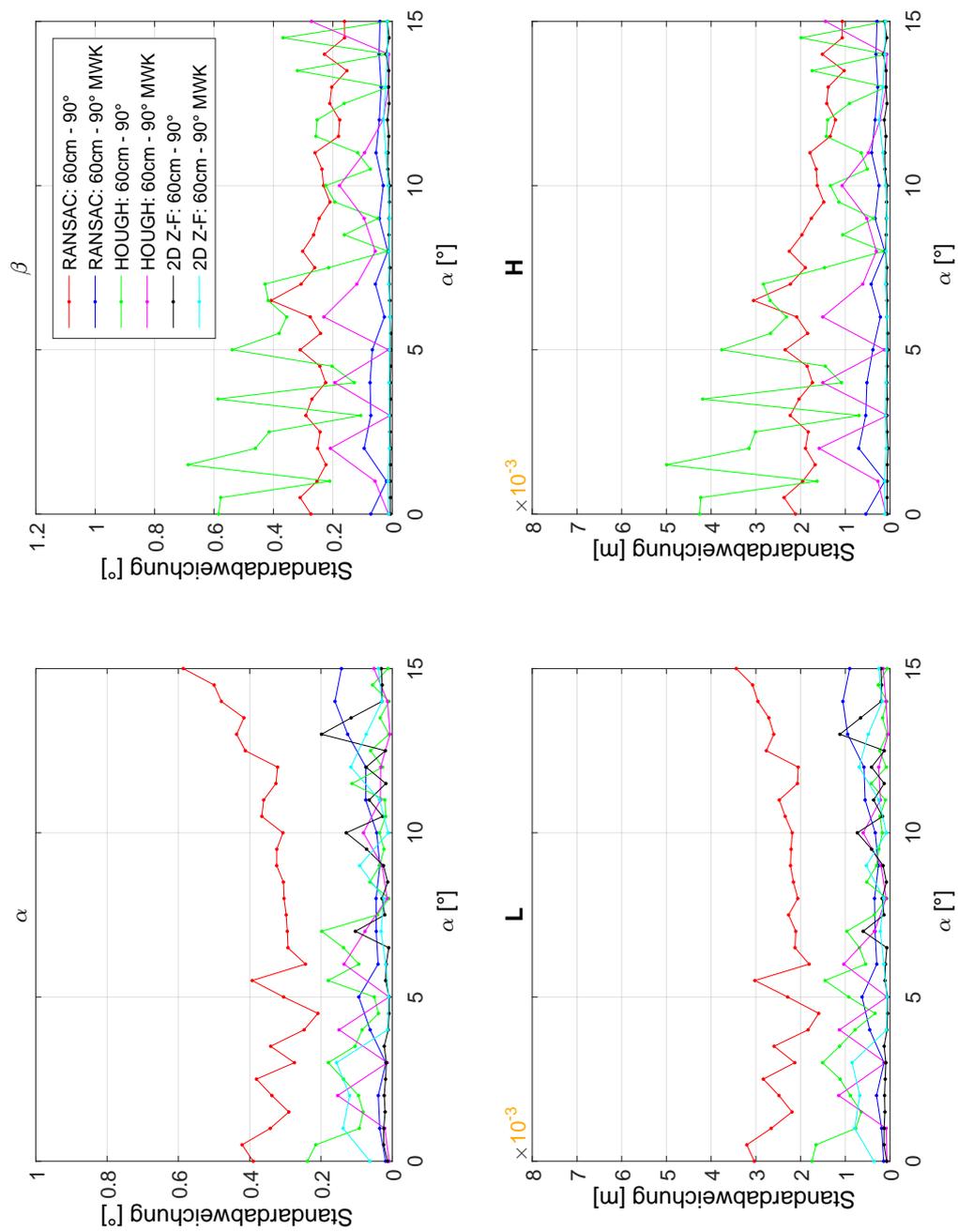


Abbildung 6.8: Standardabweichung der Auswertung mit RANSAC/Hough-Transformation/2D Zylinder-Fitting im 60cm Rohr mit 90° Bogen und voreingestelltem Lagewinkel α und Mehrwegkorrektur (MWK) .

Die Verbesserung der Stabilität der Ergebnisse lässt sich auch an den Standardabweichungen erkennen. Diese fallen gerade bei der Bestimmung des Höhenwinkels mit RANSAC und der Hough-Transformation geringer aus als bei den Ergebnissen ohne Korrektur (siehe Abbildung 6.8).

Auswirkungen auf die Bestimmung der Lage- und Höhenabweichung: Auch die Bestimmung der Lageabweichung wird durch den Einsatz des Verfahrens von [Jiménez et al. 2012] verbessert. Die systematischen Fehler bei der Bestimmung der Lageabweichung mit RANSAC und der Hough-Transformation nehmen im 60 cm Rohr um circa 11 bis 12 mm, im Vergleich zu den unkorrigierten Ergebnissen, ab (siehe Abbildung 6.7). Im 1 m langem Rohr reduziert sich der systematische Fehler noch um circa 4 bis 6 mm (siehe Anhang C.1). Signifikante Verbesserungen der beiden Parameter sind im 2 m langem Rohr nicht mehr erkennbar. Der systematische Fehler der Lageabweichung bei der Auswertung mit der Hough-Transformation nimmt leicht zu. Dasselbe Problem besteht auch bei der Auswertung des 60 cm langen Rohres mit dem 2D Zylinder-Fitting.

Bei der Bestimmung der Höhenabweichung zeigen sich die gleichen Effekte wie bei der Bestimmung der Höhenwinkel: Die Ergebnisse nähern sich dem Nullwert an und werden grundsätzlich stabilisiert. Auch die Standardabweichungen der beiden Parameter, vor allem bei der Höhenabweichung, werden durch das Korrekturverfahren verringert.

6.3.2 Versuche mit Änderung der voreingestellten Lageabweichung

Für die Versuche mit einer schrittweisen Änderung der Lageabweichung sind im Folgenden wiederum stellvertretend die Ergebnisse der Auswertung des 60 cm langen Rohres in den Abbildungen 6.9 und 6.10 dargestellt. Die Ergebnisse der Auswertung der 1 und 2 m langen Rohre befinden sich im Anhang C.2.

Auswirkungen auf die Bestimmung des Lagewinkels und der Lageabweichung: Der Einsatz des Korrekturverfahrens liefert bei einer Änderung der Lageabweichung grundsätzlich kaum eine Verbesserung der systematischen Fehler bei der Bestimmung von Lagewinkel und Lageabweichung. Im Gegenteil, es kommt gerade bei der Bestimmung der Lageabweichung meist zu einer leichten Erhöhung des systematischen Fehlers.

Auch der systematische Fehler bei der Bestimmung des Lagewinkels nimmt bis auf wenige Ausnahmen zu. Dies lässt sich am besten anhand der Auswertung des 60 cm langen Rohres erkennen (siehe Abbildung 6.9): Bei RANSAC und dem 2D Zylinder-Fitting führt die Korrektur der Mehrwegeeffekte zu einer Erhöhung des systematischen Fehlers.

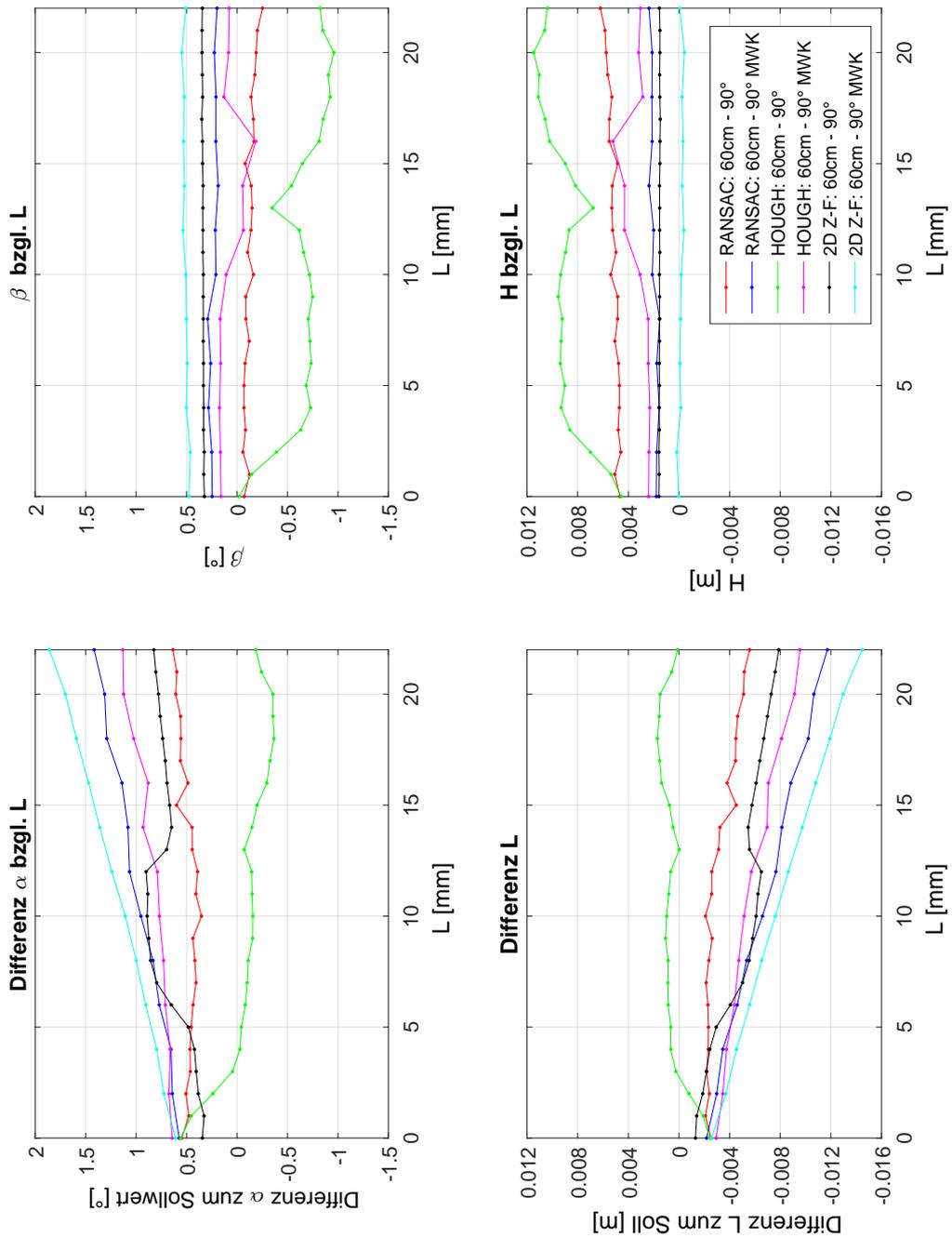


Abbildung 6.9: Auswertung mit RANSAC/Hough-Transformation/2D Zylinder-Fitting im 60cm Rohr mit 90° Bogen und voreingestellter Lageabweichung L und Mehrwegkorrektur (MWK) .

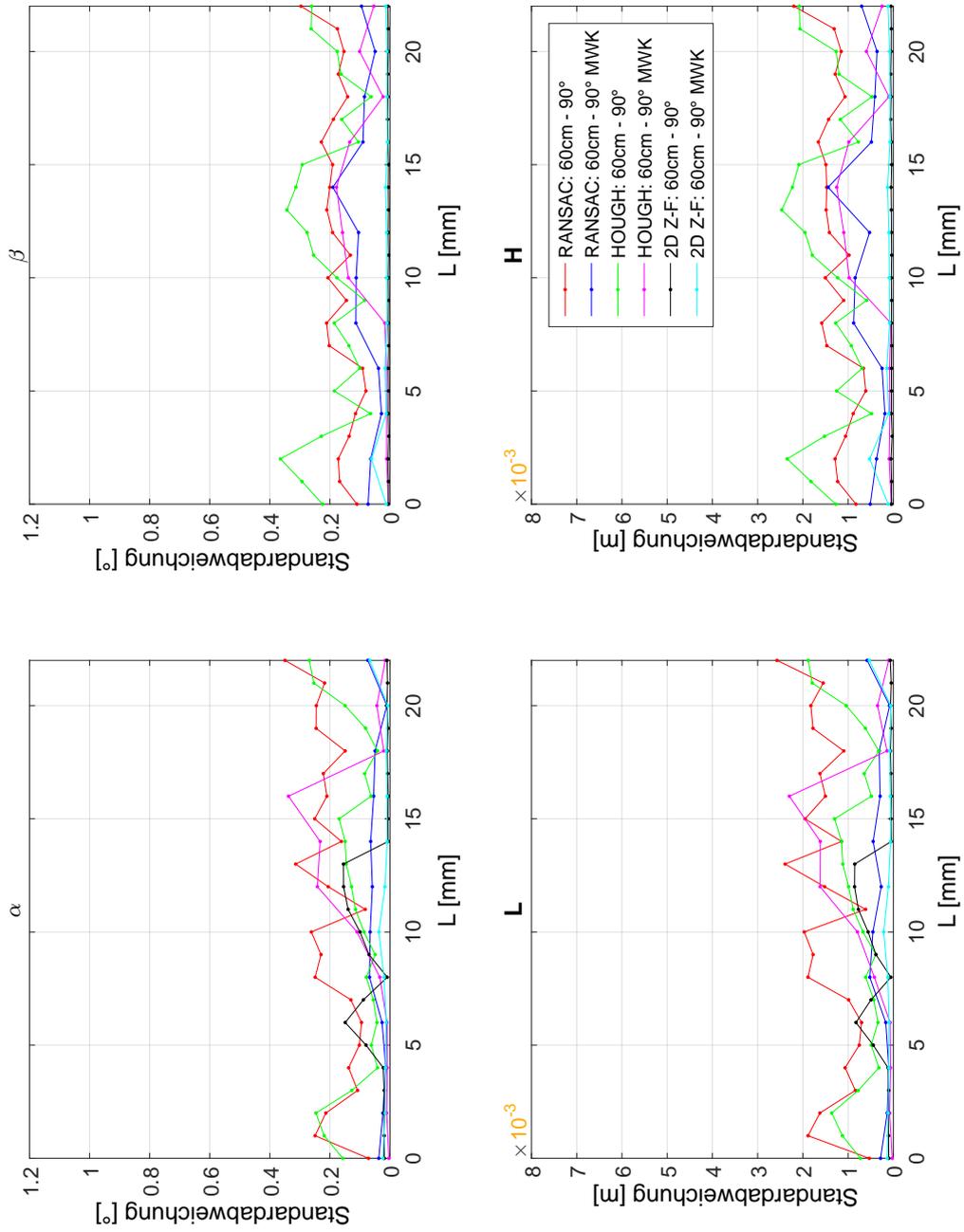


Abbildung 6.10: Standardabweichung der Auswertung mit RANSAC/Hough-Transformation/2D Zylinder-Fitting im 60cm Rohr mit 90° Bogen und voreingestellter Lageabweichung L und Mehrwegkorrektur (MWK) .

Auch die Abweichung zwischen Ist- und Sollwert an der Nullposition nimmt beim 2D Zylinder-Fitting zu. Nur bei der Hough-Transformation tritt im Vergleich eine leichte Verbesserung auf. Bei den Versuchen im 1 m langem Rohr sind nur geringe Unterschiede bei den Ergebnissen mit und ohne Korrektur erkennbar (siehe Abbildung C.5). Die Tendenz zu einer Erhöhung des systematischen Fehlers ist aber durchaus auch hier wahrnehmbar. Im 2 m langen Rohr wird die Abweichung zum Soll-Wert bei RANSAC verbessert. Die Ergebnisse der Hough-Transformation hingegen weichen im Verhältnis zu den Ergebnissen ohne Mehrwegkorrektur mit circa 1° und 8 mm stark von den Soll-Werten ab. Die Standardabweichung der beiden Parameter ändert sich meist kaum oder wird bei vereinzelt Auswertungen leicht verbessert.

Auswirkungen auf die Bestimmung des Höhenwinkels und der Höhenabweichung: Wie bei den Versuchen mit voreingestellten Lagewinkeln führt eine Mehrwegkorrektur, gerade bei der Bestimmung der Höhenabweichung, zu einer Reduzierung der Schwankungen in den Ergebnissen. Auch treten geringere Abweichungen zum Nullwert auf. Dies lässt sich vor allem anhand der Ergebnisse der Versuche im 60 cm langem Rohr erkennen.

Die Mehrwegkorrektur hat kaum Auswirkungen auf die Standardabweichung der beiden Parameter. Bei vereinzelt Auswertungen tritt sogar eine leichte Verbesserung dieser auf.

6.4 Zusammenfassung – Korrektur von Mehrwegeffekten

Im Folgenden sind die wichtigsten grundlegenden Erkenntnisse der Auswertungen mit einer Mehrwegkorrektur nach [Jiménez et al. 2012] zusammengefasst:

- Bei einer schrittweisen Änderung des voreingestellten Lagewinkels führt der Einsatz der Mehrwegkorrektur meist zu einer Verringerung der systematischen Fehler bei der Bestimmung von Lagewinkel und Lageabweichung.
- Bei einer schrittweisen Änderung der Lageabweichung und dem Einsatz der Mehrwegkorrektur kann es hingegen zu einer Zunahme der systematischen Fehler kommen.
- Die Mehrwegkorrektur hat vor allem auf die Ergebnisse von RANSAC und der Hough-Transformation signifikante Auswirkungen. Die Auswirkungen auf die Ergebnisse des 2D Zylinder-Fittings sind wesentlich geringer.

- Mit abnehmender Größe der systematischen Fehler in Abhängigkeit vom Abstand zum folgenden Bogen nimmt auch die Auswirkung der Mehrwegkorrektur auf die systematischen Fehler ab.
- Die Bestimmung von Höhenwinkel und Höhenabweichung wird grundsätzlich stabilisiert.
- Die Mehrwegkorrektur hat in den meisten Fällen keine Auswirkungen auf die Ergebnisse der Standardabweichungen der Parameter der äußeren Orientierung.

Insgesamt betrachtet kann die Mehrwegkorrektur die systematischen Fehler bei der Bestimmung der äußeren Orientierung mit RANSAC und der Hough-Transformation bei den Versuchen mit voreingestelltem Lagewinkel verringern. Bei den Versuchen mit einer Änderung der voreingestellten Lageabweichung führt die Mehrwegkorrektur oftmals zu einer Zunahme der systematischen Fehler. Aufgrund dieser Unsicherheit erscheint der Einsatz einer Mehrwegkorrektur nach [Jiménez et al. 2012] in Kombination mit RANSAC und der Hough-Transformation im gegebenen Anwendungsfall nicht empfehlenswert. In Kombination mit dem 2D Zylinder-Fitting ist die Mehrwegkorrektur grundsätzlich nicht sinnvoll, da die negativen Auswirkungen auf die Genauigkeit der Ergebnisse überwiegen.

Kapitel 7

Optimale Aufnahmebereiche bei der Bestimmung der äußeren Orientierung

7.1 Optimaler Aufnahmebereich einer Punktwolke

Eine weitere Möglichkeit die systematischen Fehler zu reduzieren, ist die Auswahl von Bereichen der Punktwolke, in denen ein möglichst großer Bereich des Rohrprofils mit Messpunkten abgedeckt ist. Dies wird anhand der Abbildung 7.1 verdeutlicht.

Wie in Abschnitt 4.3.2 beschrieben, nimmt die Aufweitung aufgrund von Mehrwegeeffekten mit zunehmendem Abstand zur ToF-Kamera zu. Bei Aufnahmen an der Nullposition sind die Messpunkte symmetrisch verteilt und der Einfluss der Aufweitung auf die Bestimmung der Zylinderachse gleicht sich aus. Bei einer asymmetrischen Verteilung der Messpunkte ist dies nicht der Fall. Durch Kombination aus asymmetrischer Messpunktverteilung und Aufweitung kommt es zu einer „Verschiebung/Verdrehung“ der bestimmten Zylinderachse in Richtung der Rohrseite, die durch eine erhöhte Anzahl an Messpunkten abgedeckt wird (siehe Abbildung 7.1, links). Ein einfacher Lösungsansatz, um diesem Effekt entgegenzuwirken, ist das Ausschließen von Bereichen der Punktwolke, in denen die Messpunkte nur eine Seite des Rohrprofils abdecken (siehe Abbildung 7.1, Mitte). Nur der Bereich der Punktwolke, bei dem die Messpunkte einen möglichst großen Teil des Rohrprofils abdecken, wird zur Bestimmung der Zylinderachse genutzt. Dieser Bereich wird im Folgenden als „optimaler Bereich“ der Punktwolke bezeichnet. Durch die bessere Verteilung der Messpunkte auf dem Rohrprofil besteht die Möglichkeit, dass die Auswirkung der Aufweitung auf die Bestimmung der Zylinderachse, ähnlich wie an der Nullposition, ausgeglichen und damit die systematischen Fehler reduziert werden (siehe Abbildung 7.1, rechts).

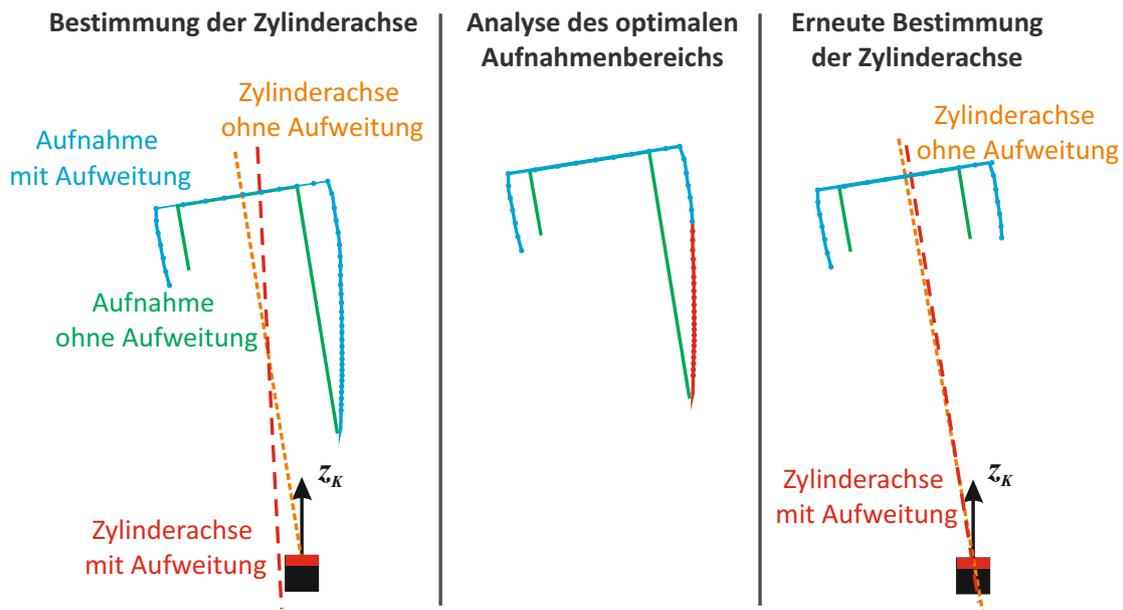


Abbildung 7.1: Ansatz zur Korrektur der systematischen Fehler durch eine vorherige Analyse des optimalen Aufnahmebereichs.

Die korrekte Auswahl des optimalen Aufnahmebereichs ist abhängig von der voreingestellten äußeren Orientierung und kann somit nicht von vornherein festgelegt werden. Daher wurde ein Vorgehen entwickelt, mit dem ein optimaler Bereich der Punktwolke relativ einfach selektiert werden kann. Dieses wird im folgende Abschnitt vorgestellt.

7.2 Vorgehen zur Analyse des optimalen Aufnahmebereichs

Das Vorgehen zur Bestimmung des optimalen Aufnahmebereichs orientiert sich an der Verfahrensweise des 2D Zylinder-Fittings: Die Punktwolke wird in Zylinderabschnitte unterteilt und diese werden bezüglich der Messpunktverteilung im Rohrprofil analysiert. Als Kriterium, ob ein Zylinderabschnitt dem optimalen Bereich zugeordnet wird oder nicht, dient der Prozentsatz des durch Messpunkte abgedeckten Bereichs des Zylinderprofils (siehe Abbildung 7.2). Zur Berechnung dieses Prozentsatzes werden die in die xy -Ebene projizierten Messpunkte und der Mittelpunkt des ausgeglichenen Kreises verwendet. Vom Mittelpunkt aus werden die Winkel zu den jeweiligen Messpunkten im Bezug zu einer Nullorientierung bestimmt. Der Vollkreis wird in diesem Fall in 3° große Sektoren unterteilt und die Winkel werden diesen Sektoren zugeordnet.

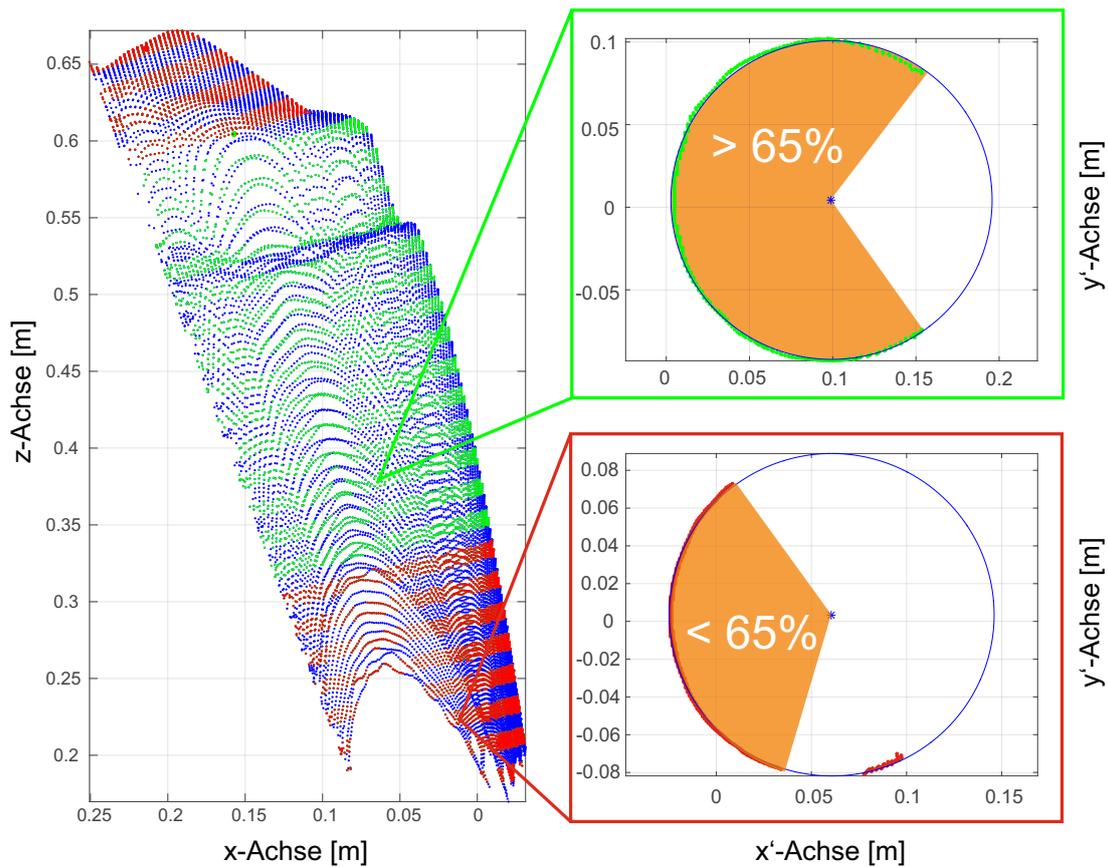


Abbildung 7.2: Vorgehen zur Analyse des optimalen Aufnahmebereichs. Links: Punktwolke mit als optimal (grün) und nicht verwendbar (rot) markierten Zylinderabschnitten. Rechts: Abdeckung des Rohrprofils in zwei Zylinderabschnitten.

Sektoren mit zugeordneten Messpunkten bekommen den Wert 1, Sektoren ohne Messpunkte den Wert 0. Der Prozentsatz der Messpunktverteilung für jeden Zylinderabschnitt errechnet sich aus dem Verhältnis der Anzahl der belegten Sektoren zu deren Gesamtanzahl. Liegt der berechnete Prozentsatz über einem vordefinierten Grenzwert, werden die Messpunkte des jeweiligen Zylinderabschnitts dem optimalen Bereich zugeordnet. Im gegenteiligen Fall werden die Messpunkte des Zylinderabschnitts entfernt. Mittels des Grenzwerts werden somit Bereiche der Punktwolke, deren zugehöriges Profil unter dem definierten Prozentsatz liegen, bei der Bestimmung der Zylinderachse ausgeschlossen.

Bei der Wahl des Grenzwertes für den Prozentsatz müssen zwei Probleme berücksichtigt werden: Bei Aufnahmen in der Nähe des folgenden Bogens kann in Kombination mit einem voreingestellten Lagewinkel die Wahl eines zu hohen Grenzwertes dazu führen, dass nur sehr wenige Messpunkte dem optimalen Bereich zugeordnet werden. Dadurch kann die Zylinderachse nicht mehr korrekt bestimmt werden. Wird der Prozentsatz hingegen zu klein

gewählt, kommt es zu keinerlei Auswirkungen bei der Bestimmung der äußeren Orientierung. Verschiedene Tests haben gezeigt, dass die Wahl eines Prozentsatzes von 65% als Grenzwert bei allen Versuchen grundsätzlich sinnvolle Ergebnisse liefert.

In das 2D Zylinder-Fitting kann das Vorgehen direkt integriert werden. Bei RANSAC und der Hough-Transformation muss dagegen die Analyse der Messpunkte vor der eigentlichen Auswertung erfolgen. Dazu wird zuerst die Zylinderachse ohne Analyse des optimalen Aufnahmebereichs bestimmt. Die Parameter der berechneten Zylinderachse werden dann zur Analyse des optimalen Aufnahmebereichs verwendet. Die Richtung der Zylinderachse entspricht dabei der Normalen der Ebene, in der die Messpunkte in jedem Zylinderabschnitt projiziert werden (siehe Vorgehen 2D Zylinder-Fitting in Abschnitt 4.2). Anschließend erfolgt das im vorherigen Abschnitt beschriebene Vorgehen.

Die Darstellung der Ergebnisse geschieht nach dem selben Prinzip wie bei der Korrektur der Mehrwegeeffekte in Abschnitt 6.3. Es handelt sich wieder um eine absolute Darstellung der Messergebnisse, also ohne Abzug des Mittelwerts der Nullposition von den Mittelwerten der anderen Positionen. An jeder Position werden 10 Aufnahmen ausgewertet.

7.3 Ergebnisse der Auswertung mit einer Analyse des optimalen Aufnahmebereichs

7.3.1 Versuche mit Änderung des voreingestellten Lagewinkels

Stellvertretend sind an dieser Stelle die Ergebnisse der Auswertung der Versuche im 60 cm langen Rohr in den Abbildungen 7.3 und 7.4 dargestellt. Die Ergebnisse der Auswertung der 1 und 2 m langen Rohre befinden sich im Anhang D.

Auswirkungen auf die Bestimmung der Lage- und Höhenwinkel: Die vorangehende Analyse des optimalen Aufnahmebereichs hat eindeutig eine Reduzierung der systematischen Fehler bei der Bestimmung des Lagewinkels zur Folge. Dies ist vor allem bei der Auswertung der Versuche im 60 cm langen Rohr erkennbar. Die systematischen Fehler bei einem voreingestellten Lagewinkel von 15° wird bei RANSAC um circa 4° bei der Hough-Transformation um circa 2° und beim 2D Zylinder-Fitting um circa 1° verringert (siehe Abbildung 7.5). Auch bei den Versuchen im 1 m langem Rohr kommt es zu einer Dezimierung der systematischen Fehler. Diese beträgt bei RANSAC $0,75^\circ$ und bei der Hough-Transformation circa $0,5^\circ$. Beim 2D Zylinder-Fitting sind bei diesem Versuch keine signifikanten Änderungen zu erkennen (siehe D.5).

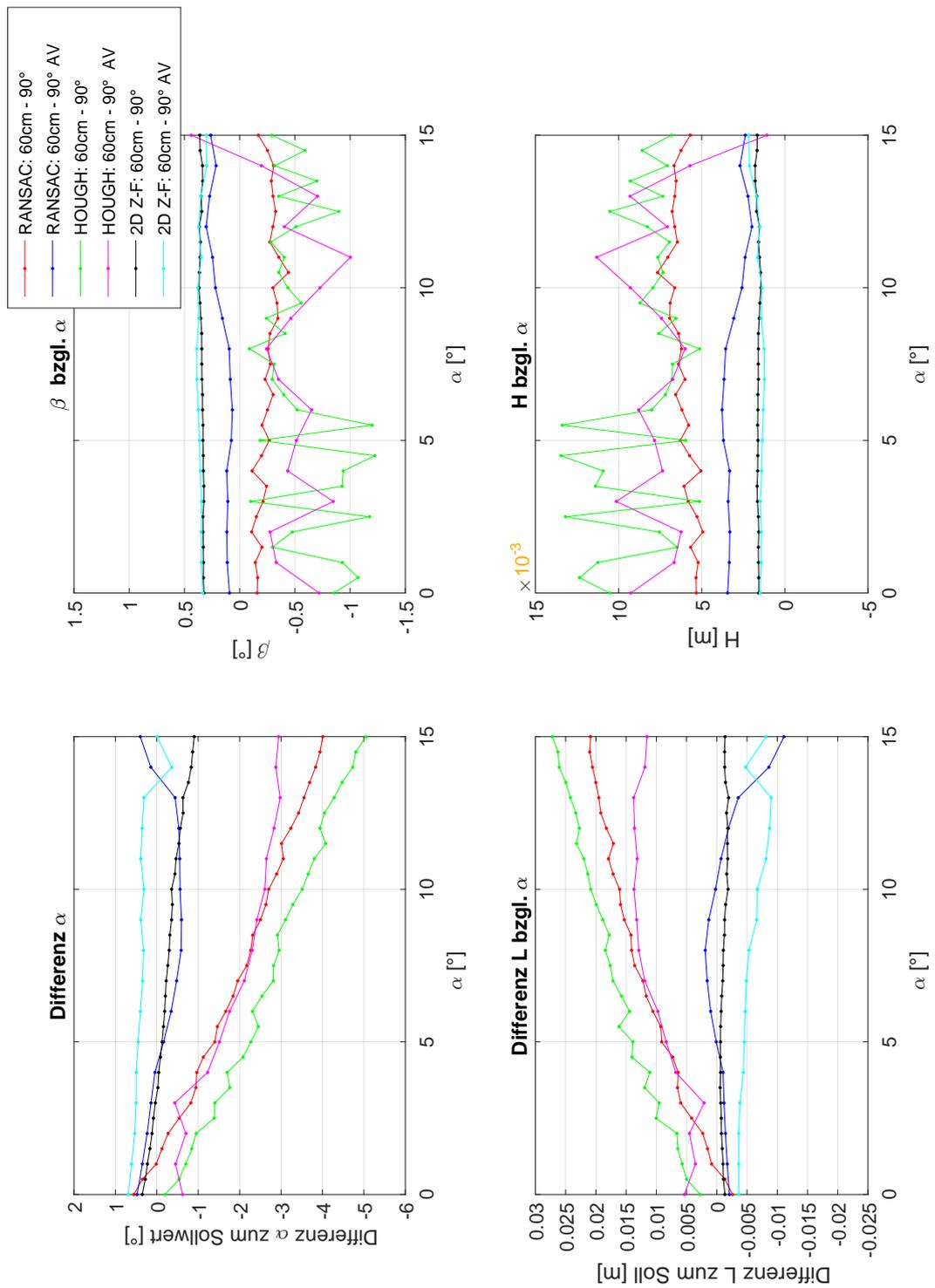


Abbildung 7.3: Auswertung mit RANSAC/Hough-Transformation/2D Zylinder-Fitting im 60cm Rohr mit 90° Bogen und voreingestelltem Lagewinkel α und Analyse des optimalen Aufnahmebereichs (AV).

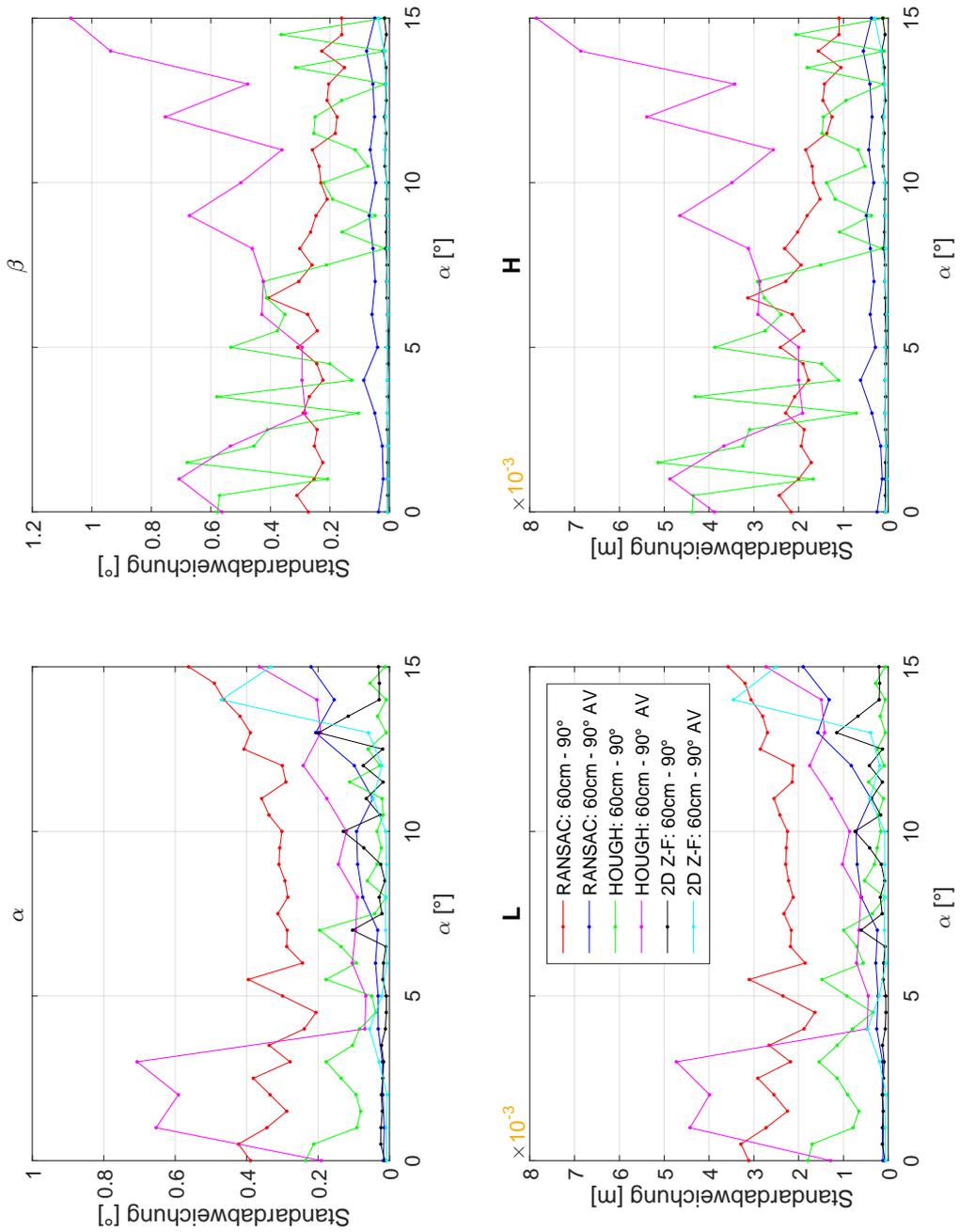


Abbildung 7.4: Standardabweichung der Auswertung mit RANSAC/Hough-Transformation/2D Zylinder-Fitting im 60cm Rohr mit 90° Bogen und voreingestelltem Lagewinkel α und Analyse des optimalen Aufnahmebereichs (AV).

Bei den Versuchen im 2 m langen Rohr hat die Analyse des optimalen Aufnahmebereichs bei RANSAC und der Hough-Transformation, wie in Abbildung D.7 ersichtlich, eine leichte Erhöhung der systematischen Fehler zur Folge. Beim 2D Zylinder-Fitting sind auch hier keine signifikanten Änderungen zu erkennen.

Grundsätzlich sind keine nennenswerten Auswirkungen auf die Bestimmung des Höhenwinkels ersichtlich. Im 60 cm langen Rohr werden Schwankungen bei der Auswertung mit der Hough-Transformation leicht reduziert und bei RANSAC ist im 2 m langen Rohr eine leichte Zunahme der Differenz zwischen Soll- und Ist-Wert erkennbar.

Die Standardabweichungen der beiden Parameter werden bei der Auswertung des 60 cm und 1 m langen Rohres mit RANSAC grundsätzlich verringert. Bei der Auswertung im 2 m Rohr nimmt sie hingegen leicht zu (siehe Abbildung D.4). Die Standardabweichung der beiden anderen Verfahren ändert sich kaum. Nur bei den Aufnahmen im 60 cm Rohr kommt es bei der Hough-Transformation zu einem Anstieg der Standardabweichung.

Auswirkungen auf die Bestimmung der Lage- und Höhenabweichung: Auch bei der Bestimmung der Lageabweichung hat die Analyse des optimalen Aufnahmebereichs eine Reduzierung der systematischen Fehler zur Folge. Wie in Abbildung 7.3 ersichtlich, ändert sich die systematischen Fehler bei einem voreingestellten Lagewinkel von 15° bei RANSAC von circa 2 zu -1 cm oder bei der Hough-Transformation von circa 2.75 zu 1 cm. Wie auch bei der Bestimmung der Lagewinkel nimmt bei beiden Verfahren die Größe der systematischen Fehler insgesamt und entsprechend auch die Verbesserung durch die Analyse des optimalen Aufnahmebereichs mit zunehmender Rohrlänge ab. Beim 2 m langen Rohr sind kaum noch Veränderungen erkennbar (siehe Abbildung D.7). Die Analyse der Verteilung der Messpunkte hat auf das 2D Zylinder-Fitting hingegen kaum Auswirkungen. Nur der systematische Fehler der Lageweichung nimmt bei der Auswertung im 60 cm langen Rohr leicht zu.

Auch auf die Bestimmung der Höhenabweichung sind grundsätzlich keine großen Auswirkungen vorhanden. Im 60 cm langen Rohr werden Schwankungen bei der Auswertung mit der Hough-Transformation leicht reduziert und bei RANSAC ist im 2 m langen Rohr wieder eine leichte Zunahme der Differenz zwischen Soll- und Ist-Wert erkennbar.

Die Auswirkungen auf die Standardabweichung entsprechen ebenfalls tendenziell denen bei der Bestimmung von Lage- und Höhenwinkel. Bei RANSAC verringert sich die Standardabweichung bei der Auswertung im 60 cm und 1 m Rohr. Bei der Auswertung im 2 m Rohr nimmt sie hingegen leicht zu (siehe Abbildung D.4). Die Standardabweichung der beiden anderen Verfahren ändert sich grundsätzlich kaum. Nur bei den Aufnahmen im 60 cm Rohr kommt es bei der Hough-Transformation zu einem Anstieg der Standardabweichung.

7.3.2 Versuche mit Änderung der voreingestellten Lageabweichung

Stellvertretend sind an dieser Stelle die Ergebnisse der Auswertung der Versuche im 60 cm langen Rohr in den Abbildungen 7.5 und 7.6 dargestellt. Die Ergebnisse der Auswertung der 1 und 2 m langen Rohre befinden sich im Anhang D.2.

Auswirkungen auf die Bestimmung der Lage- und Höhenwinkel: Auf die Bestimmung des Lagewinkels bei einer voreingestellten Lageabweichung hat die Analyse des optimalen Aufnahmebereichs bei allen Rohrlängen grundsätzlich negative Auswirkungen. Dies lässt sich gut an den Ergebnissen der Versuche im 60 cm langen Rohr erkennen (siehe Abbildung 7.5). Die systematischen Fehler des Lagewinkels nehmen bei allen Verfahren zu. Des Weiteren kommt es beim 2D Zylinder-Fitting und der Hough-Transformation zu einer Erhöhung der Abweichung des Ist-Werts vom Soll-Wert an der Nullposition. Bei den Auswertungen der 1 und 2 m langen Rohre treten ebenfalls leichte Erhöhungen der Differenzen zwischen Soll- und Ist-Wert auf.

Die Auswirkungen auf die Bestimmung des Höhenwinkels hingegen sind marginal. Nur bei der Hough-Transformation tritt im 60 cm und bei RANSAC im 2 m langen Rohr eine leichte Erhöhung der Differenz zum theoretischen Soll-Wert auf.

Die Standardabweichung nimmt bei den Versuchen mit RANSAC im 2 m Rohr und mit der Hough-Transformation im 60 cm Rohr leicht zu. Im 60 cm und 1 m langem Rohr führt die Analyse des optimalen Aufnahmebereichs hingegen bei RANSAC zu einer Verringerung der Standardabweichung. Ansonsten bleibt im Vergleich zu den Versuchen ohne Analyse der Messpunkte die Standardabweichung meist unverändert.

Auswirkungen auf die Bestimmung der Lage- und Höhenabweichung: Auch auf die Bestimmung der Lageabweichung hat die Analyse des optimalen Aufnahmebereichs ebenfalls grundsätzlich negative Auswirkungen. Die systematischen Fehler bei der Auswertung im 60 cm langen Rohr nehmen bei allen Verfahren zu. Auch die Abweichung zwischen Ist- und Soll-Wert an der Nullposition wird beim 2D Zylinder-Fitting und der Hough-Transformation wieder erhöht (siehe Abbildung 7.5).

Wie in den Anhängen D.5 und D.7 erkennbar, hat die Analyse des optimalen Aufnahmebereichs im 1 und 2 m langen Rohr ebenfalls eine Erhöhung der systematischen Fehler bei allen drei Verfahren zur Folge.

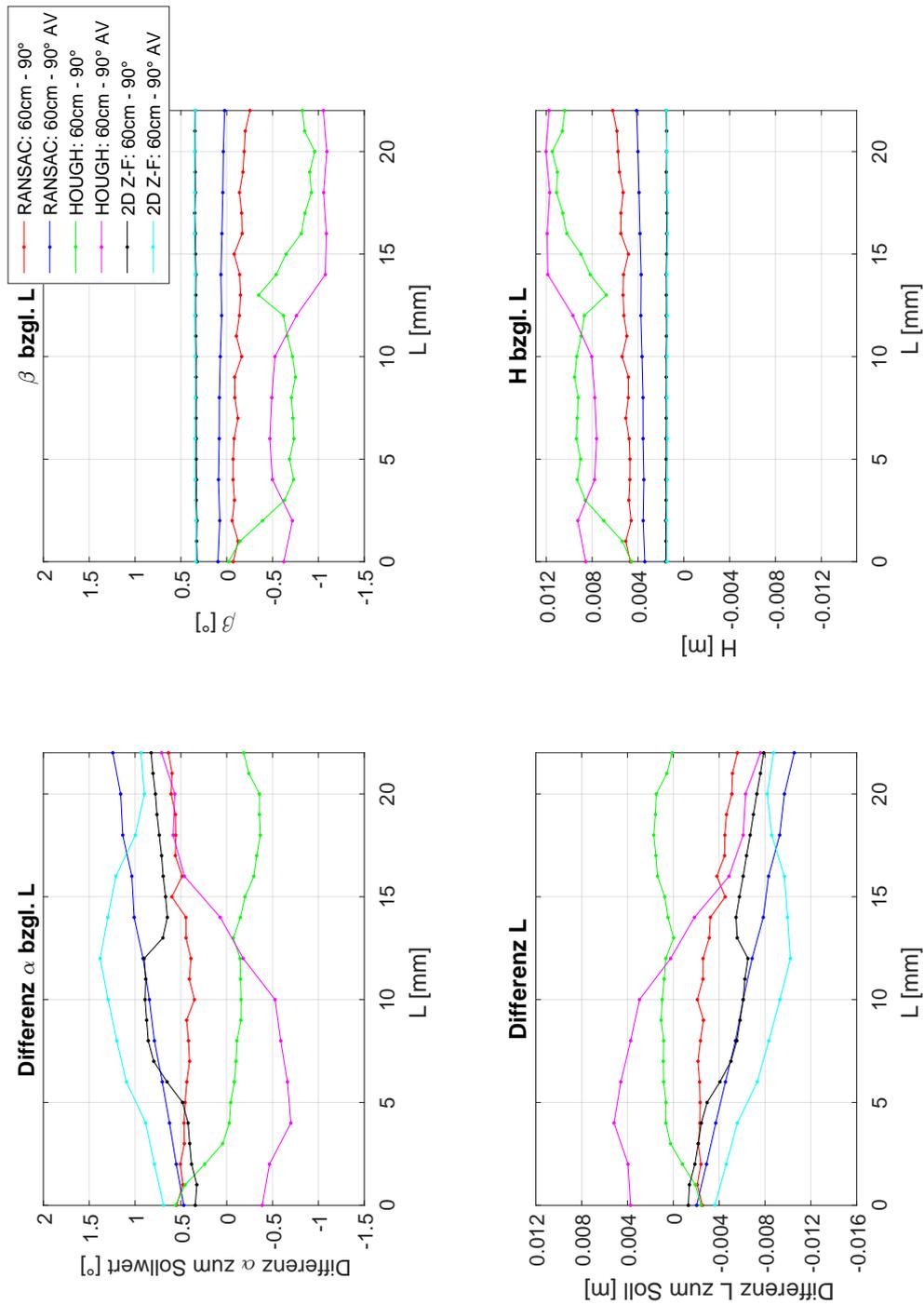


Abbildung 7.5: Auswertung mit RANSAC/Hough-Transformation/2D Zylinder-Fitting im 60cm Rohr mit 90° Bogen und voreingestellter Lageabweichung L und Analyse des optimalen Aufnahmebereichs (AV).

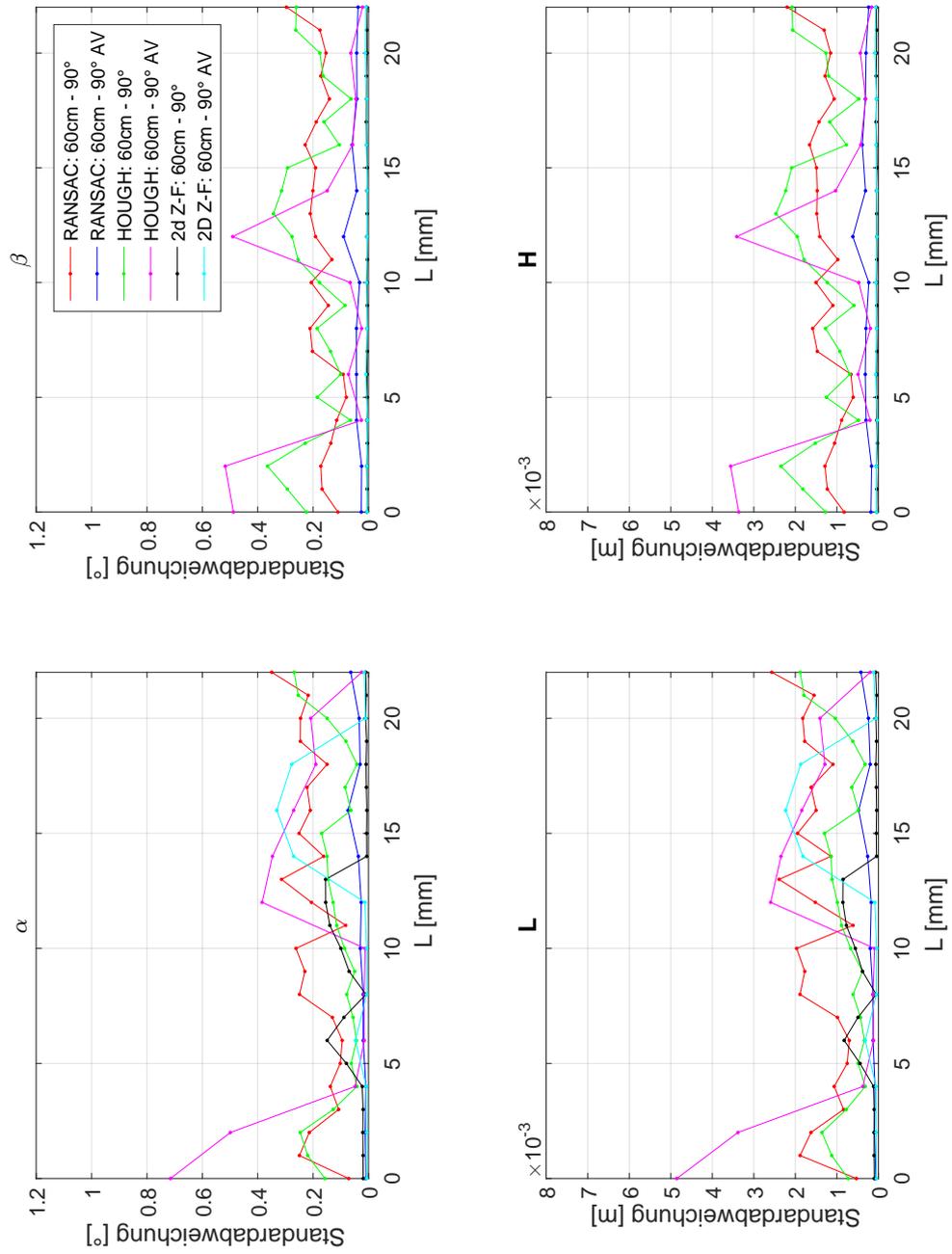


Abbildung 7.6: Standardabweichung der Auswertung mit RANSAC/Hough-Transformation/2D Zylinder-Fitting im 60cm Rohr mit 90° Bogen und voreingestellter Lageabweichung L und Analyse des optimalen Aufnahmebereichs (AV).

Die Auswirkungen der Analyse des optimalen Aufnahmebereichs auf die Bestimmung der Höhenabweichung sind grundsätzlich marginal. Nur bei RANSAC im 2 m Rohr und bei der Hough-Transformation im 60 cm langem Rohr tritt eine Erhöhung der Differenz zwischen Soll- und Ist-Wert auf.

Die Standardabweichung nimmt bei den Versuchen mit RANSAC im 2 m Rohr und mit der Hough-Transformation im 60 cm Rohr leicht zu. Im 60 cm und 1 m langen Rohr führt die Analyse des optimalen Aufnahmebereichs hingegen bei RANSAC zu einer Verringerung der Standardabweichung. Ansonsten bleibt im Vergleich zu den Versuchen ohne Analyse der Messpunkte die Standardabweichung meist unverändert.

7.4 Zusammenfassung – Analyse des optimalen Aufnahmebereichs

Die wichtigsten Erkenntnisse der Auswertung mit einer Analyse des optimalen Aufnahmebereichs sind im Folgenden zusammengefasst:

- Eine schrittweise Änderung des voreingestellten Lagewinkels führt, wie auch bei der Korrektur der Mehrwegeeffekte, zu einer signifikanten Verringerung der systematischen Fehler bei der Bestimmung von Lagewinkel und Lageabweichung.
- Die schrittweise Änderung der Lageabweichung kann hingegen zu einer leichten Zunahme der systematischen Fehler führen.
- Die vorherige Analyse des optimalen Aufnahmebereichs hat vor allem auf die Ergebnisse von RANSAC und der Hough-Transformation signifikante Auswirkungen. Die Auswirkungen auf die Ergebnisse des 2D Zylinder-Fittings sind meist wesentlich geringer.
- Mit abnehmender Größe der systematischen Fehler in Abhängigkeit vom Abstand zum folgenden Bogen nimmt auch die Auswirkung der Analyse des optimalen Aufnahmebereichs auf die systematischen Fehler ab.
- Die Bestimmung von Höhenwinkel und Höhenabweichung wird durch die Lösungsansätze grundsätzlich stabilisiert.
- Die Lösungsansätze haben kaum Auswirkungen auf die Ergebnisse der Standardabweichungen der Parameter der äußeren Orientierung.

Da die systematischen Fehler je nach Versuchsanordnung zum Teil verringert und zum Teil vergrößert werdend, erscheint auch der Einsatz der Analyse des optimalen Aufnahmebereichs im gegebenen Anwendungsfall nicht empfehlenswert.

Kapitel 8

Versuche zur Bestimmung der Winkel von Bögen

8.1 Einführung

Bei der Dokumentation von GEA mittels direkter Messsysteme erfolgt die Messung von Bogenwinkeln meist mittels des INS. Fehler bei den INS Messungen, zum Beispiel aufgrund der Drift, wirken sich direkt auf die Genauigkeit des gesamten dokumentierten Verlaufs der GEA aus. Aus diesem Grund wird im folgenden Abschnitt untersucht, inwiefern es möglich ist, die Winkel von Bögen direkt anhand der Aufnahme einer ToF-Kamera und damit unabhängig vom INS zu bestimmen. Das Ergebnis der Bestimmung eines Bogenwinkels könnte bei zukünftigen Filteralgorithmen verwendet werden, um die INS Messungen bezüglich Plausibilität zu prüfen, zu verbessern oder eventuell sogar ganz zu ersetzen.

Die Bestimmung eines Bogenwinkels erfolgt nach dem in Abschnitt 1.3 beschriebenen Schema (siehe auch Abbildung 1.10). Um den Bogenwinkel zu berechnen, müssen in der aufgenommenen Punktwolke die Zylinderachsen der vor und nach dem Bogen befindlichen geraden Rohrelemente bestimmt und miteinander verschnitten werden. Der berechnete Schnittwinkel entspricht dem Winkel des zu bestimmenden Bogens.

Die Bestimmung der Zylinderachsen der beiden geraden Rohrelemente kann mit den Verfahren RANSAC oder Hough-Transformation erfolgen. Der Vorteil dieser beiden Verfahren ist, dass die Segmentierung der beiden Zylinder direkt erfolgt und keine Vorsegmentierung notwendig ist (siehe Abschnitt 2.2). Das 2D Zylinder-Fitting ist nur zur Bestimmung der äußeren Orientierung einsetzbar und kann nicht zur Segmentierung von verschiedenen Zylindern in Punktwolken und damit in Folge auch nicht zur Bestimmung des Bogenwinkels eingesetzt werden. Dieses Kapitel stellt die Ergebnisse der Versuche vor und enthält eine

allgemeine Abschätzung über die mögliche Genauigkeit, mit der die Winkel von Bögen bestimmt werden können.

8.1.1 Theoretische Überlegungen

Um den Winkel eines Bogens bestimmen zu können, müssen von den beiden geraden Rohrelementen jeweils ausreichend große Bereiche mit der ToF-Kamera erfasst werden. Gerade bei der Aufnahme des nach dem Bogen folgenden Rohres wird nur ein Teilbereich aufgenommen. Die Größe der aufgenommenen Bereiche der beiden geraden Rohrelemente hängt primär von folgenden drei Faktoren ab:

- dem Abstand der ToF-Kamera zum Bogen
- der Größe des Winkels des Bogens
- der vorliegenden äußeren Orientierung der ToF-Kamera

Die Auswirkungen dieser drei Faktoren werden im Folgenden mit maßstabsgetreuen Skizzen vorgestellt. In Abbildung 8.1 (links) ist eine solche Skizze in der horizontalen Ebene mit verschiedenen großen Bögen dargestellt. Die mit der ToF-Kamera aufgenommenen Bereiche der jeweiligen Rohrelemente sind durch dicke Linien markiert.

Der aufgenommene Bereich des Rohrelements, in dem sich die ToF-Kamera befindet, ist dabei direkt vom Öffnungswinkel der ToF-Kamera abhängig.

Der aufnehmbare Bereich des nach dem Bogen befindliche Rohrelements wird anhand des (in diesem Fall linken) Kantenendes des vor dem Bogen befindlichen Rohrelements begrenzt. Dies ist anhand der roten gestrichelten Linie in Abbildung 8.1 (links) gekennzeichnet. Anhand des Schnittpunkts dieser Linie mit der Rohrwand lassen sich die aufgenommenen Bereiche des folgenden Rohrelements bestimmen. Wie in der Skizze deutlich ersichtlich, nimmt der jeweils aufgenommene Bereich mit zunehmenden Winkel der Bögen kontinuierlich ab. Die Größe dieses Bereiches ist bei einem 87° Bogen so gering, dass eine sinnvolle Bestimmung des Winkels nicht mehr möglich ist.

Ein Vergrößerung der aufgenommenen Bereiche des folgenden Rohrelements, könnte durch Änderung des Abstands der ToF-Kamera zum Rohr erreicht werden. Dies ist anhand eines Rohrsystems mit einem 45° Bogen in der Abbildung 8.1 (rechts) skizziert. Wird der Abstand der ToF-Kamera zum Bogen verringert, nimmt zwar die Größe des aufgenommenen Bereichs des folgenden Rohrelements zu, dafür dezimiert sich der aufgenommene Bereich des Rohres, in dem sich die ToF-Kamera befindet. Nimmt der Abstand der ToF-Kamera

zum Bogen hingegen zu, führt dies zum umgekehrten Effekt. In diesem Fall nimmt der aufgenommene Bereich des folgenden Rohrelements ab und der Bereich des Rohrelements, in dem sich die ToF-Kamera befindet, nimmt zu. Grundsätzlich muss der optimale Abstand der ToF-Kamera zum Bogen gefunden werden, bei dem von beiden geraden Rohrelementen genügend große Bereiche aufgenommen werden, so dass die Verfahren die Zylinderachsen bestmöglich bestimmen können.

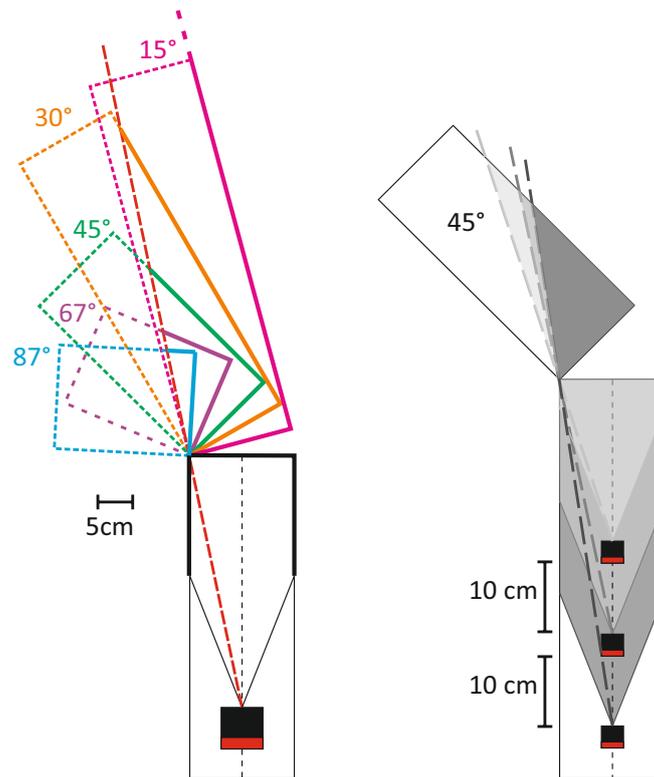


Abbildung 8.1: Aufnahmebereiche bei verschiedenen Bögen (links) und Abständen der ToF-Kamera zum Bogen (rechts).

Um Auswirkung der äußeren Orientierung der ToF-Kamera zu simulieren, wird in der Abbildung 8.2 ein Lagewinkel bzw. eine Lageabweichung der ToF-Kamera hinzugefügt. Wie anhand der Skizze ersichtlich ist, hat bei dem vorliegenden Abstand der ToF-Kamera zum Bogen ein Lagewinkel von 10° noch keinen Einfluss auf die aufgenommenen Bereiche des folgenden Rohrelements. Nur bei größeren Lagewinkeln sind Auswirkungen auf die Größe dieses Bereiches zu erwarten. Lageabweichungen können je nach Richtung den aufgenommenen Bereich des nachfolgenden Rohres erhöhen oder verringern.

Grundsätzlich ist die Größe der aufgenommenen Bereiche von der Kombination aus Bogenwinkel, Abstand zum Bogen und der äußeren Orientierung abhängig. Bei den Versuchen ist

die ToF-Kamera vorerst immer entlang der mittleren Rohrachse ausgerichtet. Das Ziel der Versuche ist eine Abschätzung des idealen Abstands der ToF-Kamera zum Bogen bei der Bestimmung von Bogenwinkeln, sowie der Qualität, mit der die Winkel bestimmt werden können.

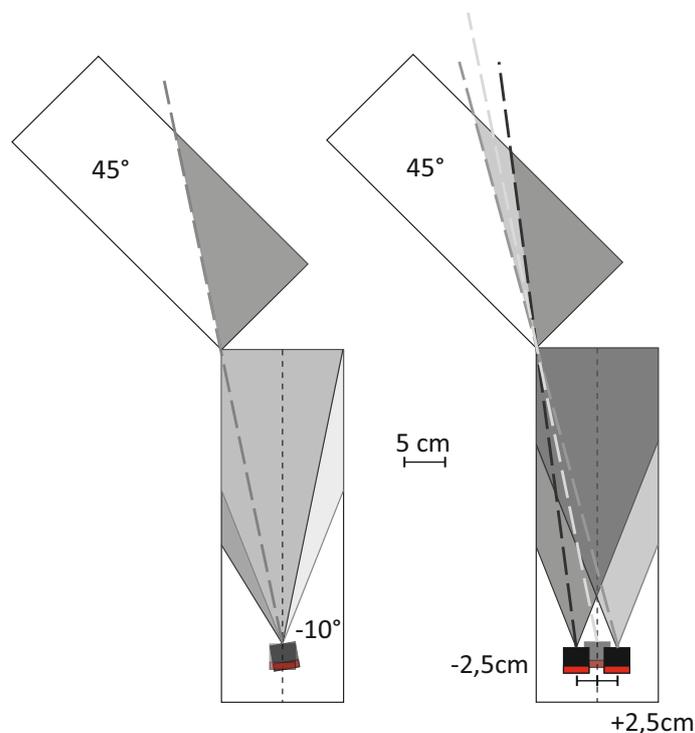


Abbildung 8.2: Aufnahmebereiche bei vorliegendem Lagewinkel (links) und Lageabweichung (rechts) der ToF-Kamera.

8.1.2 Konzept zur Bestimmung von Bogenwinkeln

Die Verfahren RANSAC und Hough-Transformation sind grundsätzlich in der Lage, mehrere verschiedene Zylinder in einer Punktwolke zu segmentieren. Dazu wird, entsprechend dem Vorgehen bei der Bestimmung der äußeren Orientierung, der erste Zylinder und dessen Achse in der Punktwolke bestimmt. Die dem Zylinder zugeordneten Inlier werden aus der Punktwolke entfernt und eine erneute Zylinderbestimmung durchgeführt. Dies kann theoretisch solange erfolgen, bis keine Messpunkte mehr vorhanden sind.

Die Problematik besteht darin, die den beiden geraden Rohrelementen entsprechenden Zylinder zu detektieren. Es kann sein, dass die den Bogen abdeckenden Messpunkte ebenfalls zur Bestimmung eines Zylinders verwendet werden.

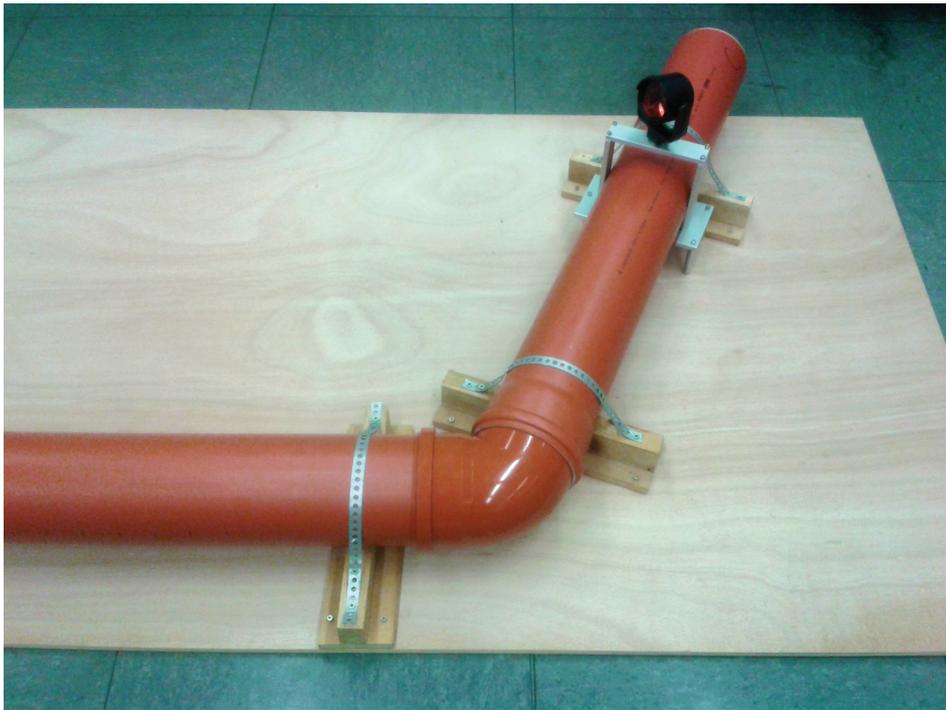


Abbildung 8.3: Tachymetrische Einmessung des fixierten Rohrsystems.

Es kann aufgrund der Aufweitung der Punktwolke vorkommen, dass ein gerades Rohrelement als zwei Zylinder mit ähnlicher Orientierung, aber unterschiedlichen Radien interpretiert wird. Letzteres tritt vor allem auf, wenn die Grenzwerte bei der Bestimmung der Inlier bei den Verfahren zu restriktiv gewählt werden.

Erste Auswertungen haben gezeigt, dass die ersten beiden detektierten Zylinder auch in den meisten Fällen den beiden geraden Rohrelementen entsprechen. Um Fehlbestimmungen zu vermeiden, wird dies aber jeweils nochmals visuell überprüft. Es handelt sich somit aktuell um ein semi-automatisches Vorgehen.

8.1.3 Versuchsaufbau

Wie schon in Abschnitt 1.1 beschrieben, entspricht der reale Winkel zwischen zwei geraden Rohrelementen aufgrund des Spiels der Steckverbindungen nicht exakt der Winkelangabe des Bogens. Um die Genauigkeit der Verfahren zur Bestimmung des Bogens beurteilen zu können, muss zuerst der reale Winkel bestimmt werden. Dieser dient dann als Soll-Wert bei der Auswertung der Ergebnisse.

Die Aufnahmen erfolgen bei den Versuchen innerhalb eines 1 m langen Rohres. An diesem werden verschiedene Bögen und anschließend wieder ein gerades Rohr angeschlossen.

Tabelle 8.1: Tachymetrisch bestimmte Winkel zwischen den beiden geraden Rohrelementen

Winkelangabe des Herstellers	Winkel Standpunkt A	Winkel Standpunkt B	Mittelwert der Winkel
15°	15,71°	15,75°	15,73°
30°	30,67	30,62	30,64
45°	44,33	44,40	44,37
67°	67,51	67,48	67,49
87°	87,86	87,89	87,88

Die Bestimmung des realen Winkels zwischen den beiden geraden Rohrelementen erfolgt mittels tachymetrischer Messungen. Dazu wird zuerst der jeweilige Rohraufbau mit Metallbändern auf einer Arbeitsplatte fixiert, um Veränderungen des Winkels aufgrund des Spiels zwischen den einzelnen Steckverbindungen während der Aufnahmen auszuschließen (siehe Abbildung 8.3). Anschließend erfolgt die tachymetrische Erfassung der geraden Rohrelemente mittels einer Totalstation TPS1200 der Firma Leica. Die Genauigkeit von Distanzmessungen mit einem Standardreflektor beträgt bei der TPS1200 laut Hersteller $2 \text{ mm} + 2 \text{ ppm}$. Die Winkelmessungen haben eine Genauigkeit von einer 1" [Leica Geosystems 2006]. Um die mittlere Rohrachse so genau wie möglich erfassen zu können, wurde für den Reflektor eine spezielle Halterung entwickelt, die entlang der geraden Rohrelemente verschoben werden kann (siehe Abbildung 8.3). Dadurch befindet sich der Reflektor immer über der mittleren Rohrachse. Anhand der aufgenommenen Messpunkte erfolgt anschließend die Bestimmung der beiden Zylinderachsen mittels einer Regressionsanalyse. Die Zylinderachsen werden miteinander verschnitten und daraus der Soll-Wert für den jeweiligen Bogenwinkel berechnet. Zur Kontrolle erfolgt die Messung von zwei verschiedenen Standpunkten aus. Die Ergebnisse der beiden Standpunkte werden gemittelt. In Tabelle 8.1 sind die Ergebnisse der tachymetrischen Bestimmung der Winkel für die bei den Versuchen eingesetzten Bögen aufgelistet.

8.1.4 Versuchsdurchführung

Bei den Versuchen zur Bestimmung von Bogenwinkeln werden folgende Aspekte betrachtet:

- Abschätzung des optimalen Abstands zum Bogen bei der Bestimmung der Winkel
- Abschätzung der möglichen Genauigkeit, mit der die Winkel der Bögen bestimmt werden können



Abbildung 8.4: Schlitten mit montierter ToF-Kamera bei den Versuchen zur Bestimmung der Bogenwinkel.

Zur Positionierung der ToF-Kamera im Rohr wird ein beweglicher Schlitten verwendet. Dieser besteht aus einer rechteckigen Aluminiumplatte mit den Maßen 10 x 6,5 x 0,5 cm, auf der die ToF-Kamera montiert wird. In einem runden Rohr liegt diese Grundplatte immer nur mit den seitlichen Kanten auf (siehe Abbildung 8.4). Dadurch ist die Position der Grundplatte und damit auch die der ToF-Kamera immer annähernd entlang der mittleren Rohrachse ausgerichtet. Die Grundplatte rutscht aufgrund des Eigengewichts immer in eine Position, die sich nahezu parallel zum Horizont befindet.

Es werden Aufnahmen in verschiedenen Abständen zum Bogen durchgeführt. Die Abstände zwischen den Aufnahmepositionen betragen jeweils 10 cm. Die ToF-Kamera ist immer entlang der mittleren Rohrachse ausgerichtet. An jeder Position werden 15 Aufnahmen mit der ToF-Kamera durchgeführt und ausgewertet.

8.2 Ergebnisse

In den Abbildungen 8.5 und 8.6 sind die Ergebnisse der Auswertung der Versuche dargestellt. An jeder Aufnahmeposition werden die Mittelwerte und Standardabweichungen der 15 Einzelmessungen berechnet. Die Mittelwerte stellen die berechneten Ist-Werte des jeweiligen Bogenwinkels dar. Von diesem wird der tachymetrisch bestimmte Soll-Wert subtrahiert. Die Differenz wird im folgenden auch als “ Δ Bogenwinkel” bezeichnet.

Der Verlauf der Differenzen und der Standardabweichungen bezüglich des Abstands der jeweiligen Aufnahmeposition zum Bogen wird durch eine farbige Linie dargestellt. Die Einzelmessungen werden aus Gründen der Übersichtlichkeit weggelassen.

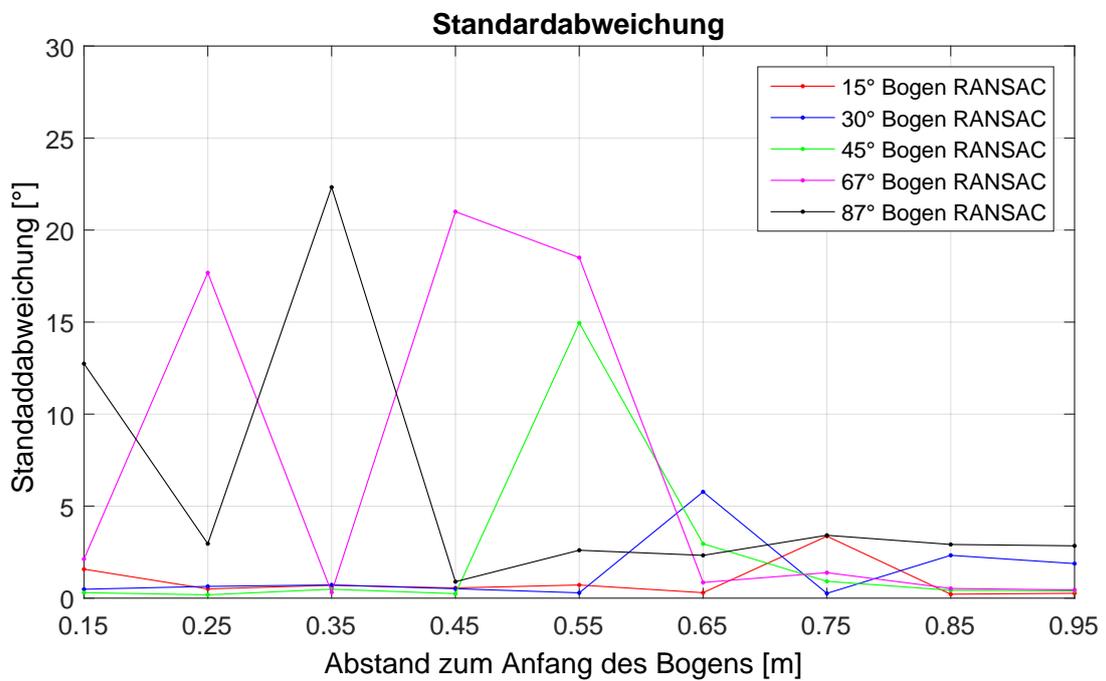
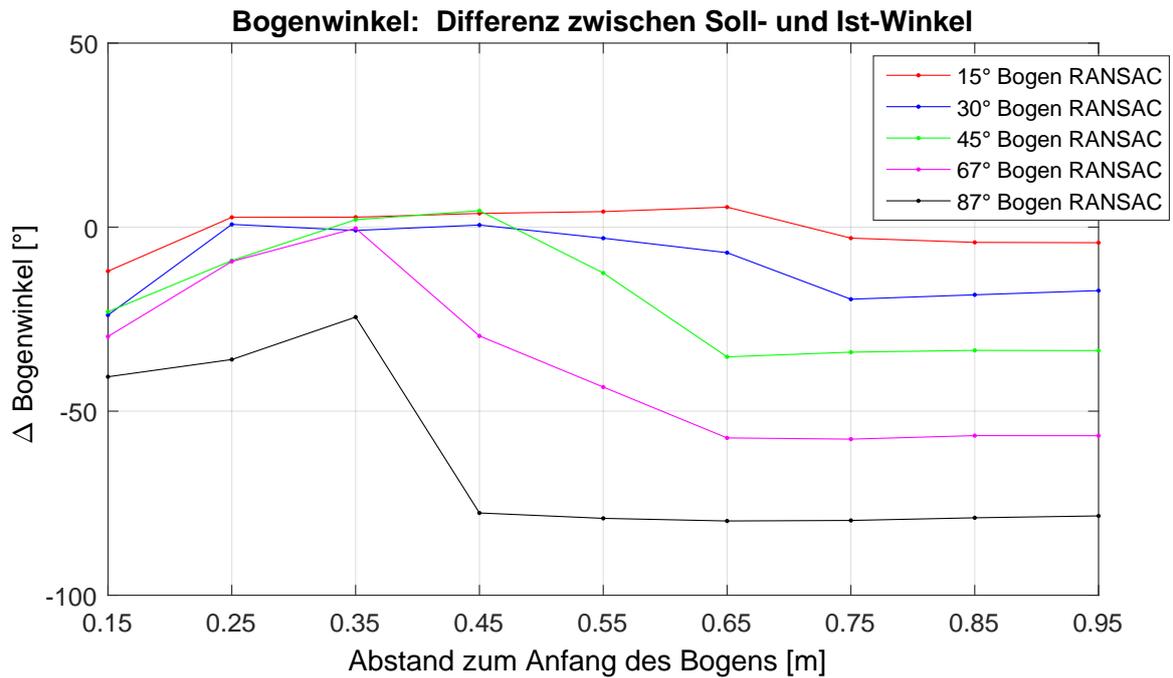


Abbildung 8.5: Ergebnisse der Bestimmung der Bogenwinkel mit RANSAC.

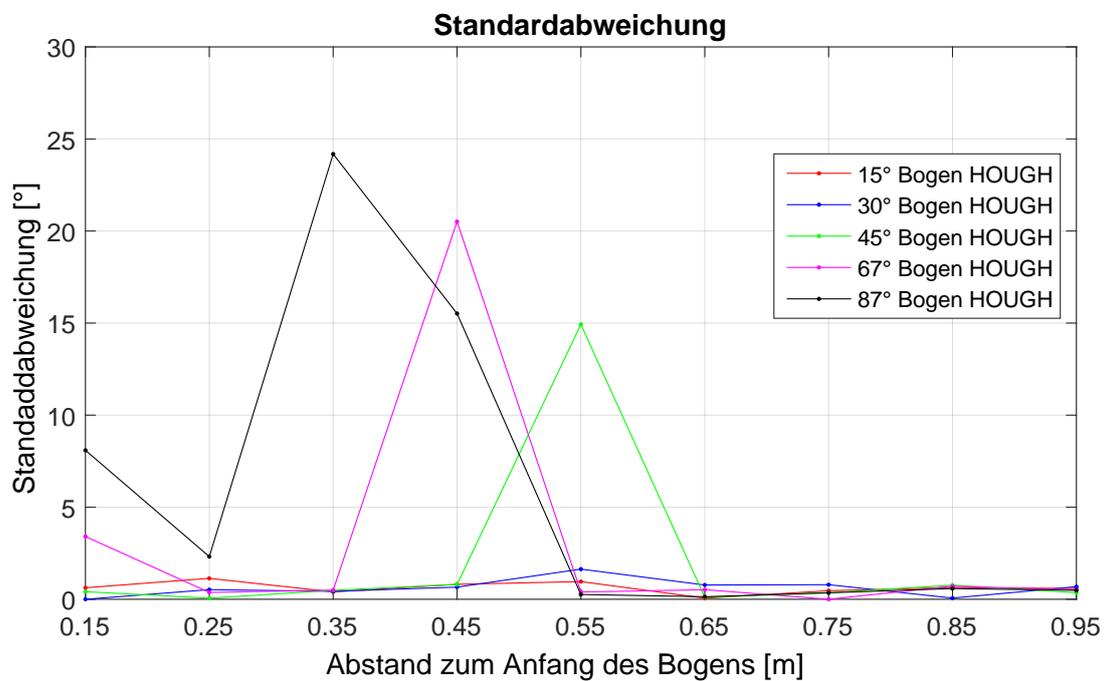
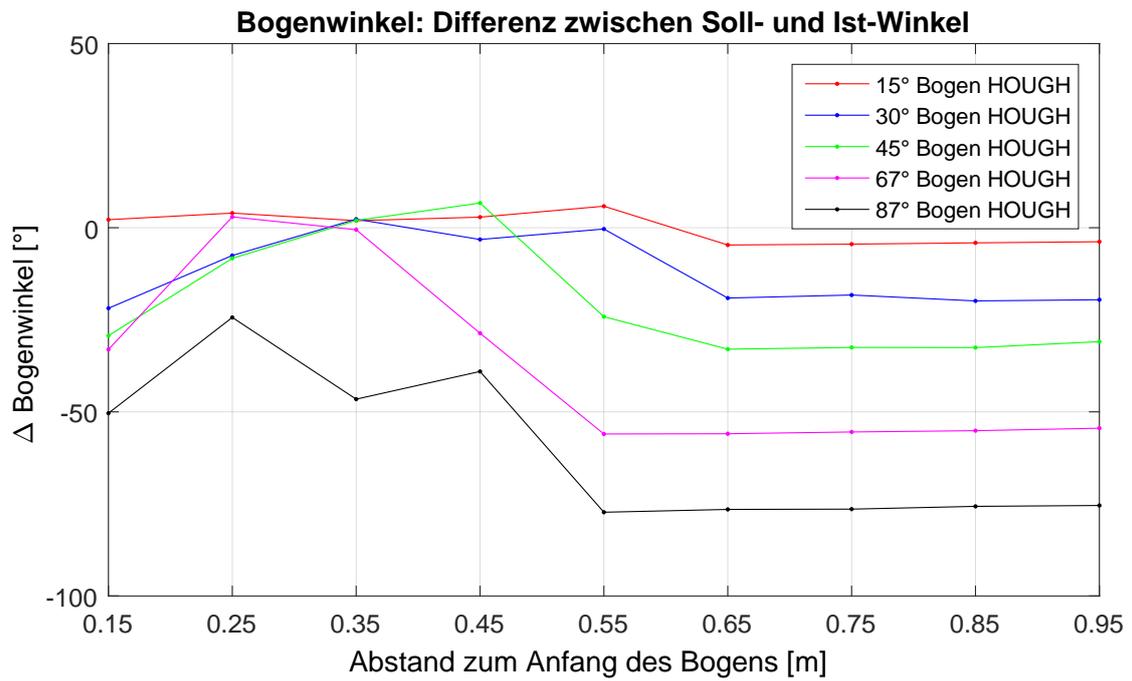


Abbildung 8.6: Ergebnisse der Bestimmung der Bogenwinkel mit der Hough-Transformation.

Die x-Achse definiert in den Abbildungen den Abstand der Aufnahmeposition der ToF-Kamera zum nachfolgenden Bogen. Im oberen Diagramm der Abbildungen 8.5 und 8.6 definiert die y-Achse die Δ Bogenwinkel, in der unteren Abbildung beschreibt die y-Achse die dazugehörige Standardabweichung. Abbildung 8.5 stellt die Ergebnisse der Auswertung mit RANSAC und Abbildung 8.6 die Ergebnisse der Auswertung mit der Hough-Transformation dar.

Je geringer der Bogenwinkel, desto größer ist der aufgenommene Bereich des folgenden Rohres. Dadurch kann der Winkel auch mit größerem Abstand zum Bogen noch bestimmt werden (siehe die Auswertung des 15° oder 30° Bogens). Je größer der Bogenwinkel, desto näher muss sich die ToF-Kamera am Bogen befinden, um noch Teile des folgenden Rohres aufnehmen zu können.

An der Position mit einem Abstand von 0,35 m zum folgenden Bogen sind die Differenzen zum Soll-Wert bei den Auswertungen der verschiedenen Bögen bei beiden Verfahren durchgehend gering. Bei den umgebenden Positionen mit einem Abstand von 0,25 m oder 0,45 m nimmt die Differenz zum Soll-Wert gerade bei größeren Bogenwinkeln bei beiden Verfahren wieder zu. Es ist also davon auszugehen, dass sich die bestmögliche Aufnahmeposition der ToF-Kamera bei der Bestimmung von Bögen im Abstandsbereich von ungefähr 0,35 m befindet. Auch die Standardabweichungen der Ergebnisse sind an dieser Position gering. Mit zunehmenden Abstand der ToF-Kamera zum Bogen (größer 0,45 m) nimmt die Differenz in Abhängigkeit vom Bogenwinkel zu. Befindet sich die ToF-Kamera hingegen zu nah am Bogen, nimmt die Genauigkeit der Bestimmung der Bogenwinkel wieder ab, da nur ein geringer Teil des Rohres in dem sich die ToF-Kamera befindet aufgenommen wird. Bei einem Bogenwinkel von 87° ist bei beiden Verfahren nur eine Bestimmung des Bogenwinkels mit, im Verhältnis, hohen Differenzen möglich.

Da an der Position mit 0,35 m Abstand zum Bogen beide Verfahren die geringsten Differenzen zwischen Soll- und Ist-Wert aufweisen, werden die Ergebnisse an genannter Positionen in Tabelle 8.2 nochmal im Detail betrachtet.

Die maximal auftretenden Differenzen zum Soll-Wert betragen an dieser Position mit RANSAC $2,7^\circ$ und mit der Hough-Transformation $2,32^\circ$. Nur bei sehr großen Bogenwinkeln, wie dem 87° Bogen, treten hohe Differenzen auf. Die Standardabweichungen liegen bei beiden Verfahren unter 1° . Grundsätzlich ist bei der Auswertung an dieser Position kein systematischer Zusammenhang zwischen der Qualität der Ergebnisse und der Größe des Bogenwinkels zu erkennen.

Tabelle 8.2: Ergebnisse der Bogenbestimmung (Differenz zum Soll-Wert) mit RANSAC und der Hough-Transformation an einer Position mit einem Abstand von 0,35 m zum Bogen.

	RANSAC		HOUGH	
	Differenz	Standardabweichung	Differenz	Standardabweichung
15° Bogen	2,70°	0,70°	1,92°	0,40°
30° Bogen	-0,90°	0,72°	2,32°	0,43°
45° Bogen	2,02°	0,48°	1,97°	0,49°
67° Bogen	-0,31°	0,32°	-0,54°	0,50°
(87° Bogen)	-24,44°	22,33°	-46,56°	24,18°

8.3 Zusammenfassung – Bestimmung der Winkel von Bögen

Es konnte gezeigt werden, dass es grundsätzlich möglich ist, die Winkel von Bögen anhand der Auswertung von Aufnahmen einer ToF-Kamera mit den Verfahren RANSAC und Hough-Transformation zu bestimmen. Die Genauigkeit ist dabei vom Abstand der ToF-Kamera zum Bogen und dem Winkel des Bogens abhängig. Die Verfahren liefern Ergebnisse mit den geringsten Differenzen zum Soll-Wert an der Aufnahmeposition mit einem Abstand von 0,35 m zum Bogen. Die maximale Abweichung der Ergebnisse bei den durchgeführten Versuchen zwischen Soll- und Ist-Wert beträgt an dieser Aufnahmeposition bei RANSAC 2,7° und bei der Hough-Transformation 2,32°. Nur bei der Bestimmung des 87° Bogens traten hohe Differenzen zwischen Soll- und Ist-Wert auf. Die Standardabweichung der Ergebnisse liegen jeweils unter einem Grad.

Die Anforderung des Anwendungsfalls beträgt bei der Bestimmung der Schwimmwinkel 1°. Grundsätzlich überschreitet die Genauigkeit der Bestimmung von Bogenwinkeln aktuell diese Anforderung. Wie in Kapitel 5 festgestellt, kann das Verfahren 2D-Zylinder-Fitting die äußere Orientierung der ToF-Kamera mit Differenzen zum Soll-Wert, je nach voreingestellten Lagewinkel und Lageabweichung, bis zu maximal 1,25° bestimmen. Die Genauigkeit der Bestimmung von Schwimmwinkeln mit dem 2D-Zylinder-Fitting und der Bestimmung der Bogenwinkel liegt somit in einem ähnlichen Größenbereich. Dabei muss aber berücksichtigt werden, dass die Bestimmung der Schwimmwinkel allein noch nicht die Bestimmung eines Bogens ermöglicht. Messfehler des INS müssen bei der Aufnahme von Bögen ebenfalls berücksichtigt werden. Unter diesem Aspekt ist die Bestimmung von Bogenwinkeln anhand der Aufnahme einer ToF-Kamera ein vielversprechender Ansatz, der unter Berücksichtigung der bisherigen Ergebnisse zur Plausibilitätsüberprüfung von

INS Messungen eingesetzt werden kann. Die Auswertung der Ergebnisse lassen durchaus die Annahme zu, dass ein Steigerungspotenzial bei der Genauigkeit der Bestimmung der Bogenwinkel durch Anpassungen der Algorithmen vorhanden ist.

Kapitel 9

Resümee

In dieser Arbeit konnte gezeigt werden, dass der Einsatz von ToF-Kameras zur Steigerung der Genauigkeit bei der Dokumentation von GEA mittels direkter Messsysteme beitragen kann.

Die Zielsetzung der Dissertation beinhaltete die Beantwortung folgender Fragestellungen:

1. Können Informationen über vorliegende Schwimmwinkel, respektive die äußere Orientierung, aus Aufnahmen einer ToF-Kamera gewonnen werden?
2. Können Informationen über die Winkel von Bögen anhand einer Aufnahme einer ToF-Kamera gewonnen werden?
3. Mit welcher Genauigkeit können diese Informationen bestimmt werden?

Die ersten beiden Fragestellungen können durch die gewonnenen Erkenntnisse bejaht werden. Die dritte Fragestellung wurde im Rahmen der durchgeführten Untersuchungen evaluiert. Die durch den Anwendungsfall definierte Anforderung an die Genauigkeit beträgt bei der Bestimmung von Schwimmwinkeln, respektive Lage- und Höhenwinkel, 1° und bei der Bestimmung von Lage- und Höhenabweichung 5 mm. Die geforderte Genauigkeit für die Bestimmung der Winkel von Bögen liegt ebenfalls bei 1° .

Die unter Laborbedingungen durchgeführten Versuche erfolgten mit einer ToF-Kamera SR4000 der Firma MESA Imaging. Die gewonnenen Erkenntnisse sollten aber auf ToF-Kameras mit ähnlichen Spezifikationen (Genauigkeit, Pixelauflösung, etc.) übertragbar sein.

Genauigkeitsuntersuchungen zur Bestimmung der äußeren Orientierung

Das entwickelte Konzept zur Bestimmung der äußeren Orientierung verwendet spezielle Verfahren zur Berechnung der Zylinderachse in einer aufgenommenen Punktwolke. Anhand der Lage der Zylinderachse zum Kamerakoordinatensystem kann die äußere Orientierung, respektive der Schwimmwinkel der ToF-Kamera zum Rohr, berechnet werden.

In den Untersuchungen wurden die Verfahren RANSAC, Hough-Transformation und ein speziell für den Anwendungsfall entwickeltes Verfahren, das 2D Zylinder-Fitting, zur Bestimmung der Zylinderachse eingesetzt.

Die Auswertung der Versuche hat gezeigt, dass mit allen drei Verfahren Informationen über die vorliegende äußere Orientierung gewonnen werden können.

Innere und absolute Genauigkeit an der Nullposition

Die Auswertungen der Versuche an der Nullposition, also ohne eingestellten Lagewinkel und Lageabweichung, hat gezeigt, dass die innere Genauigkeit der Verfahren Hough-Transformation und 2D Zylinder-Fitting im Bereich der geforderten Genauigkeit des Anwendungsfalls liegt. Die innere Genauigkeit von RANSAC liegt vereinzelt über den Anforderungen.

Auch die Ergebnisse der absoluten Genauigkeit liegen im Rahmen der geforderten Genauigkeit.

Genauigkeit bei einer schrittweisen Änderung von Lagewinkel und Lageabweichung

Die Zunahme der voreingestellten Lagewinkel und Lageabweichungen hat keinen nennenswerten Einfluss auf die innere Genauigkeit der verwendeten Verfahren.

Auch auf die Differenz zwischen den gegebenen Soll-Werten und den bestimmten Ist-Werten bei den Parametern Höhenwinkel und Höhenabweichung sind keine nennenswerten Auswirkungen erkennbar.

Die Bestimmung der Parameter Lagewinkel und Lageabweichung unterliegen hingegen systematischen Fehlern. Die Untersuchungen haben gezeigt, dass die Größe dieser Fehler von folgenden Faktoren abhängig ist:

- Einfluss von Mehrwegeeffekten und die damit verbundene Aufweitung der Punktwolke

- Asymmetrische Verteilung der Messpunkte im Rohr aufgrund der vorliegenden (voreingestellten) äußeren Orientierung
- Dem jeweiligen eingesetzten Verfahren zur Bestimmung der äußeren Orientierung

Bei RANSAC und der Hough-Transformation treten bei den Versuchen ausgeprägte systematische Fehler auf. Diese sind mit bis zu $4,7^\circ$ bei der Bestimmung des Lagewinkels und 2,5 cm bei der Bestimmung der Lageabweichung meist wesentlich größer als die des 2D Zylinder-Fittings. Die bei den Versuchen auftretenden systematischen Fehler beim 2D Zylinder-Fitting betragen beim Lagewinkel maximal $1,25^\circ$ und bei der Lageabweichung maximal 7 mm. Das 2D Zylinder-Fitting liefert somit grundsätzlich die Ergebnisse mit den geringsten Abweichungen zu den Soll-Werten bei einer schrittweisen Änderung von Lagewinkel und Lageabweichung.

Mit einer Genauigkeit von $1,25^\circ$ beim Lagewinkel und 7 mm bei der Lageabweichung wird die geforderte Genauigkeit des Anwendungsfall leicht überschritten. Wie in Abschnitt 1.3 beschrieben, führt jede Bestimmung und Korrektur von Schwimmwinkeln grundsätzlich zu einer Verbesserung der Dokumentation von GEA. Auch wenn das 2D Zylinder-Fitting aufgrund der möglichen systematischen Fehler die Anforderung leicht überschreitet, ist die Genauigkeit in jedem Fall ausreichend, um Schwimmwinkel anhand der Aufnahmen einer ToF-Kamera zu detektieren und dadurch die Genauigkeit der Dokumentation von GEA grundsätzlich zu verbessern.

Ansätze zur Reduzierung der systematischen Fehler

In der Arbeit wurden zwei Ansätze untersucht, die systematischen Fehler der Verfahren in Abhängigkeit von der Zunahme der voreingestellten Lagewinkel und Lageabweichung bei der Bestimmung der äußeren Orientierung zu reduzieren.

Korrektur von Mehrwegeeffekten mittels radiometrischer Modelle

Aufnahmen mit einer ToF-Kamera innerhalb des Rohres sind grundsätzlich Fehlereinflüssen durch Mehrwegeeffekte unterworfen. Diese führen zu einer Aufweitung der aufgenommenen Punktwolke. Anhand verschiedener Versuche konnten Merkmale des Rohraufbaus analysiert werden, die eine Entstehung von Mehrwegeeffekten bei Aufnahmen und damit die Aufweitung der Punktwolke innerhalb des Rohres begünstigen. Diese sind:

- **Abstand der ToF-Kamera zum folgenden Bogen**

Je geringer der Abstand der ToF-Kamera zum folgenden Bogen ist, desto größer sind

die Einflüsse von Mehrwegeffekten und damit auch die Dimension der Aufweitung.

- **Winkel des folgenden Bogens**

Je größer der Winkel des folgenden Bogens ist, desto ausgeprägter sind die Einflüsse von Mehrwegeffekten und damit die Dimension der Aufweitung.

- **Material**

Es besteht eine Abhängigkeit zwischen der Ausprägung der Mehrwegeffekte und den Materialeigenschaften der aufgenommenen Szene. Dies ist gerade bei zukünftigen Untersuchungen unter realen Bedingungen ein wichtiger zu berücksichtigender Aspekt.

Die auf radiometrischen Modellen basierenden Ansätze zur Korrektur von Mehrwegeffekten von [Jiménez et al. 2012] und [Fuchs 2012] wurden bezüglich des Einsatzes im gegebenen Anwendungsfall untersucht. Die Untersuchung hat ergeben, dass der Korrekturansatz nach [Fuchs 2012] bei derartig ausgeprägten Mehrwegeffekten häufig fehlerhafte Korrekturwerte liefert und somit im gegebenen Anwendungsfall nicht einsetzbar ist.

Die Korrektur von Mehrwegeffekten mit dem Korrekturansatz von [Jiménez et al. 2012] führt zu einer Reduzierung der systematischen Fehler bei der Bestimmung der äußeren Orientierung bei den Versuchen mit einer schrittweisen Zunahme des voreingestellten Lagewinkels. Im günstigsten Fall kann die Reduzierung 1° bis $1,5^\circ$ bei der Bestimmung des Lagewinkels und circa 1 cm bei der Bestimmung der Lageabweichung betragen. Bei den Versuchen mit einer schrittweisen Änderung der Lageabweichung kommt es hingegen durch die Korrektur der Mehrwegeffekte zu einer Zunahme der systematischen Fehler.

Der Einsatz der Mehrwegkorrektur kann somit, je nach äußerer Orientierung, zu einer Vergrößerung oder Verringerung der systematischen Fehler führen. Aufgrund dieser festgestellten Unsicherheit ist die Korrektur mit dem Verfahren nach [Jiménez et al. 2012] im gegebenen Anwendungsfall nicht einsetzbar.

Analyse optimaler Aufnahmebereiche

Ein speziell für den Anwendungsfall entwickeltes Vorgehen zur Reduzierung der systematischen Fehler ist die Analyse der optimalen Aufnahmebereiche einer Punktwolke. Dadurch sollen die Auswirkungen der asymmetrischen Messpunktverteilung in Kombination mit der Aufweitung verringert werden.

Die Auswertung der Versuche mit einer vorherigen Analyse des optimalen Aufnahmebereichs liefert ähnliche Ergebnisse, wie die Auswertung mit einer Korrektur der Mehrwegeffekte. Die Analyse des optimalen Aufnahmebereichs ist aber, bei reiner Betrachtung der Dimension der Reduzierung der Differenz zwischen Soll- und Ist-Wert, effektiver als

die Korrektur der Mehrwegeffekte. Die Reduzierung der systematischen Fehler bei der Bestimmung der äußeren Orientierung beträgt mit RANSAC bei den Versuchen mit einer schrittweisen Zunahme des voreingestellten Lagewinkels bis zu 4° bei der Bestimmung des Lagewinkels und circa 1 cm bei der Bestimmung der Lageabweichung. Aber auch bei einer vorherigen Analyse des optimalen Aufnahmebereichs kommt es bei den Versuchen mit einer schrittweisen Änderung der Lageabweichung zu einer Zunahme der systematischen Fehler. Wie auch bei der Korrektur der Mehrwegeffekte ist aufgrund dieser Unsicherheit die Analyse der optimalen Aufnahmebereiche im gegebenen Anwendungsfall nicht einsetzbar.

Bestimmung der Winkel von Bögen anhand der Aufnahme einer ToF-Kamera

Die Versuche haben gezeigt, dass es grundsätzlich möglich ist, Zusatzinformationen über die Winkel von Bögen mittels Aufnahmen einer ToF-Kamera zu gewinnen. Die Genauigkeit ist dabei vor allem von der Aufnahmesituation, wie dem Abstand der ToF-Kamera zum Bogen, dem Winkel des Bogens selbst und der äußeren Orientierung der ToF-Kamera abhängig. Diese drei Faktoren sind maßgebend für die Größe der aufgenommenen Bereiche der, vor und hinter dem Bogen befindlichen, geraden Rohrelemente verantwortlich. Nur bei ausreichend groß erfassten Bereichen der beiden geraden Rohrelemente ist eine Bestimmung der Zylinderachse mittels RANSAC oder der Hough-Transformation möglich.

Qualitativ gute Ergebnisse bei der Winkelbestimmung sind in einem Abstandsbereich der ToF-Kamera zum Bogen von 0,35 m zu erwarten. Bögen mit großen Winkeln, wie der 87° Bogen, können aufgrund des geringen Aufnahmebereichs des folgenden Rohres nicht mehr korrekt bestimmt werden.

Die Auswertung der Bögen mit geringeren Winkeln mittels RANSAC und der Hough-Transformation liefert Ergebnisse mit maximalen Differenzen zu den tachymetrisch bestimmten Soll-Werten von $2,7^\circ$ bzw. $2,3^\circ$. Ergebnisse mit einer Genauigkeit dieser Größenordnung können auf jeden Fall zur Plausibilitätsüberprüfung der INS-Messungen bei direkten Messsystemen verwendet werden. Die mögliche erreichbare Genauigkeit bei der Bestimmung von Schwimmwinkel mit dem 2D-Zylinder-Fitting (Differenzen zum Soll-Wert von $1,25^\circ$ beim Lagewinkel und 7 mm bei der Lageabweichung) und der Bestimmung der Bogenwinkel liegt somit in einem ähnlichen Größenbereich. Es ist aber zu beachten, dass die Bestimmung der Schwimmwinkel allein noch nicht die Bestimmung eines Bogens ermöglicht. Messfehler des INS müssen bei der Aufnahme von Bögen ebenfalls berücksichtigt werden. Unter diesem Aspekt ist die Bestimmung von Bogenwinkeln anhand der Aufnahme

einer ToF-Kamera ein vielversprechender Ansatz, der den Einsatz eines INS zur Bestimmung von Bögen in Zukunft ersetzen könnte.

Durch die Arbeit konnte aufgezeigt werden, dass der Einsatz einer ToF-Kamera bei der Dokumentation von GEA mittels direkter Messsysteme, Potential zur Steigerung der Genauigkeit bietet. Sowohl durch die Bestimmung von Schwimmwinkeln mit dem 2D Zylinder-Fitting als auch bei der direkten Bestimmung von Bogenwinkel mittels RANSAC oder der Hough-Transformation, ist eine Steigerung der Genauigkeit möglich. Durch den Einsatz einer ToF-Kamera sollte sich somit die durch die Anwender geforderte Lage- und Höhen-genauigkeit bei der Dokumentation von GEA auch bei längeren und komplexeren Rohr-systemen halten bzw. sogar verbessern lassen.

Kapitel 10

Zukünftige Arbeiten und Ausblick

Im Rahmen der Untersuchungen haben sich in verschiedenen Themenbereichen weitere Fragestellungen aufgetan, die bei zukünftigen Forschungsarbeiten betrachtet werden sollten und im folgenden Abschnitt kurz vorgestellt werden.

Auswirkung von Umwelteinflüssen auf die Bestimmung von Schwimmwinkeln

Bei Aufnahmen mit einer ToF-Kamera während einer realen Inspektion können verschiedene verbaute Materialien, Feuchtigkeit oder Verschmutzungen die Qualität der Aufnahmen beeinflussen. Dies kann die Entstehung von Messfehlern und die Ausprägung von Mehrwegeeffekten beeinflussen und damit auch Auswirkungen auf die Genauigkeit bei der Bestimmung von Schwimmwinkel haben. Auch in der Realität auftretende Beschädigungen des Rohrsystems, wie Verformungen oder Einstürze können die Genauigkeit der Bestimmung beeinflussen. In zukünftigen Untersuchungen müssen die Auswirkungen der genannten Faktoren auf die Genauigkeit bei der Bestimmung von Schwimmwinkel untersucht werden.

Integration der Zusatzinformationen in den Messprozess

Die mittels einer ToF-Kamera gewonnenen Informationen über Schwimmwinkel oder den Winkel von Bögen können mit den Daten der anderen eingesetzten Sensoren, wie dem INS oder dem Odometer, in einem Verarbeitungsprozess integriert werden. Für zukünftige Dokumentationssysteme von GEA müssen entsprechend spezielle Filteralgorithmen, wie beispielsweise ein Kalman-Filter, angepasst und implementiert werden.

Ableiten von Zusatzinformationen aus Schwimmwinkeln

Informationen über Schwimmwinkel können auch zu weiteren Verbesserungsansätzen bei der Dokumentation von GEA verwendet werden. Zwei mögliche Ansätze sind:

Korrektur von Pendelbewegungen: Bei der Befahrung von geraden Rohrsystemen mit größeren Durchmessern kann es aufgrund der im Verhältnis kleinen Inspektionseinheit und der geringeren Steigung der Rohrwände zu einer Pendelbewegung um die mittlere Rohrachse im Bereich der Rohrsohle kommen. Diese Pendelbewegung wird von den Yaw-Winkelmessungen des INS erfasst und führt somit auch beim dokumentierten Verlauf zu einer Pendelbewegung. Durch die Bestimmung von Schwimmwinkeln kann diese Pendelbewegungen relativ einfach erfasst und die INS Messungen und damit in Folge die Dokumentation des eigentlich geraden Verlaufs entsprechend korrigiert werden.

Schätzung der Driftrate des INS: Eine weitere Möglichkeit ist die Schätzung der aktuellen Driftrate des INS bei der Inspektion von geraden Rohren. Die realen Bewegungen der Inspektionseinheit im Rohr werden mittels der Bestimmung von Schwimmwinkeln anhand der Aufnahmen der ToF-Kamera erfasst und die Yaw-Winkelmessungen des INS entsprechend korrigiert. Die Yaw-Winkelmessungen enthalten somit nur noch Winkeländerung aufgrund der Drift des INS. Diese Drift kann dann kontinuierlich geschätzt und im weiteren Verlauf als Korrektur bei den INS Messungen angebracht werden.

Weiterführende Untersuchungen bei der Bestimmung von Bögen

Die durchgeführten Untersuchungen haben grundsätzlich die Bestimmbarkeit von Bogenwinkeln mittels Aufnahmen einer ToF-Kamera bestätigt und eine erste Abschätzung über die mögliche Genauigkeit, mit der Bogenwinkel bestimmt werden können, geliefert. In zukünftigen Versuchen müssen Verbesserungsmöglichkeiten bezüglich der Qualität und der Automatisierung bei der Bogenbestimmung untersucht werden.

Qualität in Abhängigkeit von der Aufnahmeposition: Die Versuche haben gezeigt, dass die Qualität der Bestimmung von Bogenwinkeln von der Aufnahmeposition der ToF-Kamera zum Bogen abhängig ist. Vor allem die beiden Faktoren

- Abstand der ToF-Kamera zum Bogen

- Winkel des Bogens

beeinflussen die Größe der aufgenommenen Bereiche der vor und nach dem Bogen befindlichen geraden Rohre. In nachfolgenden Untersuchungen muss der optimale Abstand der ToF-Kamera in einer höheren Auflösung analysiert und die Grenzen der Winkelbestimmung in Abhängigkeit von der Winkelgröße detailliert untersucht werden.

Bei den bisherigen Versuchen ist die ToF-Kamera immer entlang der mittleren Rohrachse ausgerichtet. In weiterführenden Versuchen müssen die Auswirkungen einer vorliegenden äußeren Orientierung auf die Qualität bei der Bestimmung von Bogenwinkeln untersucht werden.

Automatisierung: Ein in der Realität einsetzbares Verfahren muss in der Lage sein, automatisiert Aufnahmen zu detektieren, die eine hohe Qualität bei der Winkelbestimmung versprechen und diese auszuwerten. Folgende Kriterien sollten bei der Umsetzung der automatisierten Detektion berücksichtigt werden:

- Analyse des Abstands zum Bogen, um die optimale Aufnahmesituation zu bestimmen.
- Detektion möglicher Fehleinflüsse aufgrund einer äußeren Orientierung der ToF-Kamera.
- Automatisierte und zugleich korrekte Zuordnung der bestimmten Zylinder zu den geraden Rohrelementen.

Des Weiteren müssen in zukünftigen Arbeiten auch die Bestimmung der Winkel von Abzweigungen in Rohrsystemen untersucht werden.

Bestimmung von Wegstrecken mittels Aufnahmen einer ToF-Kamera

Grundlage für die Bestimmung von Wegstrecken mittels optischer Systeme ist die Aufnahme von identischen, prägnanten Geometrien in zwei Aufnahmen zu zwei verschiedenen Zeitpunkten t_1 und t_2 . Das Ziel ist die Bestimmung der zurückgelegten Wegstrecke zwischen diesen beiden Zeitpunkten anhand prägnanter Geometrien durch ein Punktwolken-Matching Verfahren wie dem Iterative Closest Point Algorithmus (ICP) (siehe [Besl et al. 1992]).

Als prägnante Geometrie kann ein am Ende eines geraden Rohrelements befindlicher Bogen oder eine Abzweigung gewertet werden (siehe Abbildung 10.1).

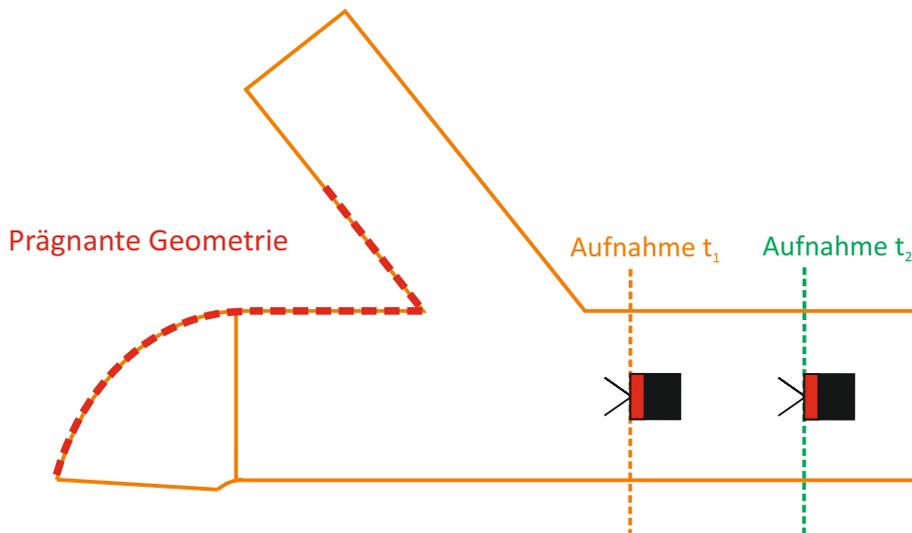


Abbildung 10.1: Bogen oder Abzweigung als mögliche prägnante Geometrie (rot markiert) in zwei Aufnahmen.

Grundvoraussetzung für die Wegstreckenbestimmung ist die Transformation der aufgenommenen Punktwolken in den lokalen Horizont mittels der mit dem INS bestimmten Roll- und Pitch-Winkel sowie die Transformation der Punktwolke um die Parameter der äußeren Orientierung.

Die Vorgehensweise zur Bestimmung der Wegstrecke ist in Abbildung 10.2 zusammengefasst. In Abbildung 10.2a sind zwei Aufnahmen mit verschiedenen äußeren Orientierungen im Rohrsystem dargestellt. Die rot und grün markierten Bereiche des Rohrsystems wurden von der ToF-Kamera zu den Zeitpunkten t_1 und t_2 erfasst. In Abbildung 10.2b sind aufgenommene Punktwolken im Kamerakoordinatensystem abgebildet und werden anschließend mit Hilfe der jeweiligen bestimmten äußeren Orientierung transformiert (Abbildung 10.2c). Anschließend wird ein Punktwolken-Matching durchgeführt, um die Verschiebung zwischen den beiden Punktwolken in Richtung der z-Achse des Kamerakoordinatensystems zu bestimmen. Die Verschiebung entspricht der zurückgelegten Wegstrecke zwischen den beiden Aufnahmen (Abbildung 10.2d).

Erste Versuche mit diesem Konzept erfolgten im Rahmen der Masterarbeit von [Hartung 2014] und haben die grundsätzliche Möglichkeit der Bestimmung von Wegstrecken mittels Aufnahmen einer ToF-Kamera bestätigt. In Zukunft müssen noch weitere Untersuchungen bezüglich der Genauigkeit der Wegstreckenbestimmung erfolgen.

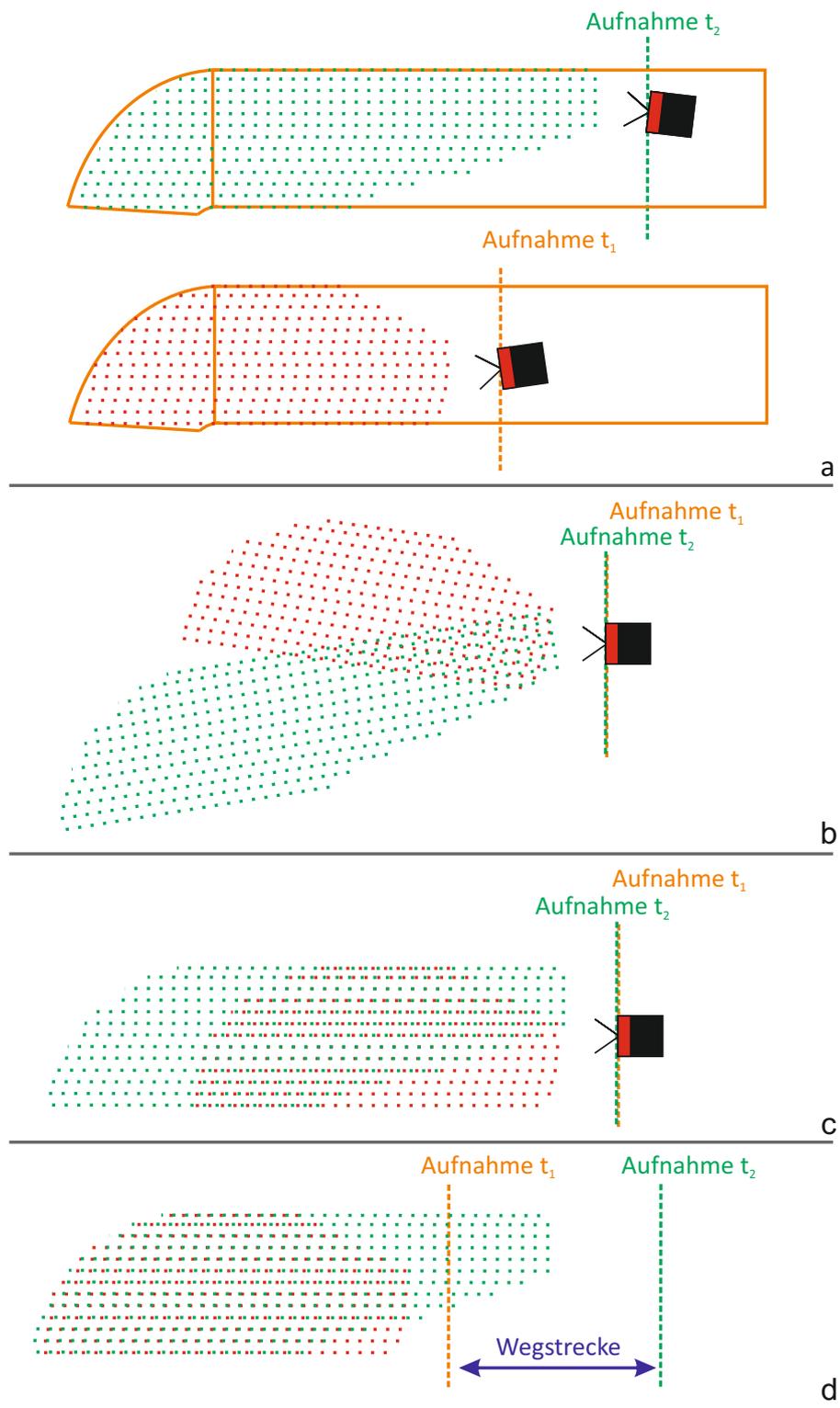


Abbildung 10.2: Konzept zur Bestimmung der gefahrenen Wegstrecke mittels zweier Aufnahmen einer prägnanten Geometrie zu zwei unterschiedlichen Zeitpunkten.

Detektion von Schäden

Anhand der Aufnahmen einer ToF-Kamera besteht die Möglichkeit, Schäden am Rohrsystem zu detektieren. Die optischen (Grauwertbilder der Amplitudenmessungen) und räumlichen Aufnahmen (Punktwolke) der ToF-Kamera können zur Detektion von Rissen oder Deformationen im Rohrsystem verwendet werden. Gerade Letztere lassen sich eventuell nur schwer anhand von rein optischen Aufnahmen bei der TV-Inspektion erkennen. Die Aufnahmen einer ToF-Kamera könnte somit nicht nur zur Dokumentation, sondern auch direkt bei der Inspektion von GEA eingesetzt werden.

Literatur

- Bauer, A. (2005). „Leitfaden für die Untersuchung/Datenerhebung von Grundstücksentwässerungsanlagen mit dem Untersuchungssystem ASYS (Automatisches System zur Kanalverlaufserfassung)“. Herausgegeben von: A. Bauer. Kassel: Kasseler Entwässerungsbetrieb.
- Bauer, A., H. Heister und W. Reinhardt (2009). „geoASYS – ein System zur Dokumentation des Verlaufes von Grundstücksentwässerungsanlagen. Aufnahme und Dokumentation als Basis einer ganzheitlichen Betrachtung“. In: *gwf Wasser Abwasser*. Herausgegeben von: DIV Deutscher Industrieverlag GmbH. Bd. 2-3. München: Oldenbourg Industrieverlag München, S. 190–196. ISBN: 0016-3651.
- Beder, C. und W. Förstner (2006). „Direkte Bestimmung von Zylindern aus 3D-Punkten ohne Nutzung von Oberflächennormalen“. In: *Photogrammetrie – Laserscanning – Optische 3D-Messtechnik*. Herausgegeben von: T. Luhmann und C. Müller. Herbert Wichmann Verlag, S. 206–213.
- Berkmann, J. und T. Caelli (1994). „Computation of surface geometry and segmentation using covariance techniques“. In: *Pattern Analysis and Machine Intelligence, IEEE Transactions on* Band 16 (Nr. 11), S. 1114–1116.
- Besl, P. und N. D. McKay (1992). „A method for registration of 3-D shapes“. In: *Pattern Analysis and Machine Intelligence, IEEE Transactions on* Band 14 (Nr. 2), S. 239–256.
- Bhandari, A. et al. (2014). „Resolving multipath interference in time-of-flight imaging via modulation frequency diversity and sparse regularization“. In: *Optics letters* Band 39 (Nr. 6), S. 1705–1708.
- Björck, A. (1996). „Numerical methods for least squares problems“. Philadelphia: Society for Industrial and Applied Mathematics. ISBN: 9781611971484.
- Canny, J. (1986). „A computational approach to edge detection“. In: *Pattern Analysis and Machine Intelligence, IEEE Transactions on* (Nr. 6), S. 679–698.
- Chaperon, T. und F. Goulette (2001). „Extracting Cylinders in Full 3D Data Using a Random Sampling Method and the Gaussian Image“. In: *Proceedings of the Vision Modeling*

- and Visualization Conference*. (Stuttgart, Germany). Herausgegeben von: T. Ertl et al. Aka GmbH 2007, S. 35–42. ISBN: 3-89838-028-9.
- Chiabrando, F., D. Piatti und F. Rinaudo (2010). „SR-4000 ToF camera: Further experimental tests and first applications to metric surveys“. In: *Int. Arch. Photogramm. Remote Sens. Spatial Inf. Sci* Band 38 (Nr. 5), S. 149–154.
- Chiabrando, F. et al. (2009). „Sensors for 3D Imaging: Metric Evaluation and Calibration of a CCD/CMOS Time-of-Flight Camera“. In: *Sensors* Band 9 (Nr. 12), S. 10080–10096. ISSN: 1424-8220.
- Chum, O., J. Matas und J. Kittler (2003). „Locally Optimized RANSAC“. In: *Pattern Recognition*. Herausgegeben von: B. Michaelis und G. Krell. Bd. 2781. Lecture Notes in Computer Science. Berlin: Springer, S. 236–243. ISBN: 978-3-540-40861-1.
- Cohen, M. und J. Wallace (1993). „Radiosity and Realistic Image Synthesis“. The Morgan Kaufmann Series in Computer Graphics. Burlington: Elsevier. ISBN: 9780121782702.
- DIN, Hrsg. (2009a). „EN 1401-1 – Kunststoff-Rohrleitungssysteme für erdverlegte drucklose Abwasserkanäle und -leitungen – Weichmacherfreies Polyvinylchlorid (PVC-U) – Teil 1: Anforderungen an Rohre, Formstücke und das Rohrleitungssystem“. Berlin: Beuth.
- Hrsg. (2009b). „EN 1401-3 – Kunststoff-Rohrleitungssysteme für erdverlegte drucklose Abwasserkanäle und -leitungen – Weichmacherfreies Polyvinylchlorid (PVC-U) – Teil 3: Empfehlung für die Verlegung“. Berlin: Beuth.
- Dohmann, M. (1999). „Wassergefährdung durch undichte Kanäle. Erfassung und Bewertung“. Berlin: Springer. ISBN: 3-540-64212-9.
- Döll, D. (2015a). „Einsatz einer Stereo High Dynamic Range (HDR) Kamera bei Pipe-Guard“. Kontakt mit: P. Striegl. Telefonat. Neubiberg. 13.04.2015.
- (2015b). „Geschwindigkeit der Lindauer-Schere bei der Inspektion“. Kontakt mit: P. Striegl. Telefonat. Neubiberg.
- Dorrington, A. et al. (2011). „Separating true range measurements from multi-path and scattering interference in commercial range cameras“. In: *SPIE Electronic Imaging*. Bd. 786404. International Society for Optics and Photonics, S. 786404–786410.
- Duran, O., K. Althoefer und L. Seneviratne (2002). „State of the art in sensor technologies for sewer inspection“. In: *Sensors Journal, IEEE* Band 2 (Nr. 2), S. 73–81. ISSN: 1530-437X.
- Encarnação, J. L. (1996). „Graphische Datenverarbeitung“. 4. Auflage. München: Oldenbourg. ISBN: 3-486-23223-1.

- Fischler, M. A. und R. C. Bolles (1981). „Random sample consensus: a paradigm for model fitting with applications to image analysis and automated cartography“. In: *Communications of the ACM* Band 24 (Nr. 6), S. 381–395.
- Frank, M. et al. (2009). „Theoretical and experimental error analysis of continuous-wave time-of-flight range cameras“. In: *Optical Engineering* Band 48 (Nr. 1), S. 013602–013616.
- Fuchs, S. (2010). „Multipath Interference Compensation in Time-of-Flight Camera Images“. In: *Pattern Recognition (ICPR), 2010 20th International Conference on.* (Istanbul), S. 3583–3586. ISBN: 1051-4651.
- (2012). „Calibration and Multipath Mitigation for Increased Accuracy of Time-of-Flight Camera Measurements in Robotic Applications“. Fakultät (IV) für Elektrotechnik und Informatik. Dissertation. Berlin: Technischen Universität Berlin.
- Fuchs, S. und S. May (2007). „Calibration and registration for precise surface reconstruction with ToF cameras“. In: *International Workshop on Dynamic 3D Imaging.* (Heidelberg). Herausgegeben von: Springer Berlin Heidelberg. Bd. 1.
- Godbaz, J., M. Cree und A. Dorrington (2012). „Closed-form inverses for the mixed pixel/multipath interference problem in amcw lidar“. In: *SPIE Electronic Imaging.* International Society for Optics and Photonics, S. 829618–15.
- Godbaz, J., A. Dorrington und M. Cree (2013). „Understanding and Ameliorating Mixed Pixels and Multipath Interference in AMCW Lidar“. In: *TOF Range-Imaging Cameras.* Herausgegeben von: F. Remondino und D. Stoppa. Springer, S. 91–116. ISBN: 978-3-642-27522-7.
- Grimson, W. et al. (1993). „An automatic tube inspection system that finds cylinders in range data“. In: *Proceedings of Computer Vision and Pattern Recognition Conference.* Computer Vision and Pattern Recognition Conference. (New York). Herausgegeben von: IEEE Computer Society, S. 446–452. ISBN: 0-8186-3880-X.
- Günthert, F. und W. Reinhardt (2008). „Inspektions- und Sanierungsstrategien für nicht-öffentliche Grundstücksentwässerungsanlagen“. Herausgegeben von: Bundesinstitut für Bau-, Stadt- und Raumforschung. Bonn.
- El-Halawany, S. und D. Lichti (2011). „Detection of Road Poles from Mobile Terrestrial Laser Scanner Point Cloud“. In: *Proceedings of 2011 International Workshop on Multi-Platform/Multi-Sensor Remote Sensing and Mapping.* (Xiamen, China). Herausgegeben von: IEEE, S. 1–6.

- Hansen, A. (2009). „Bestimmung des Verlaufes einer Rohrleitung aus einer Punktwolke der 3D-Mini-Kamera SR4000“. Institut für Angewandte Informatik & Institut für Geodäsie. Diplomarbeit. München: Universität der Bundeswehr München.
- Hartung, M. (2014). „Genauigkeitsuntersuchung der Wegstreckenbestimmung in einem Rohrsystem aus Aufnahmen einer 3D-Kamera“. Masterarbeit. München: Hochschule für angewandte Wissenschaften München.
- Hebert, M. und J. Ponce (1982). „A new methode for segmenting 3-D scenes into primitives“. In: *International Conference on Pattern Recognition*. (München). Herausgegeben von: ICPRS, S. 836–838.
- Heister, H. und W. Reinhardt (2007). „3D-Dokumentation von Kanalanschlussleitungen – Ortung und Inspektion im Untergrund –“. In: *14. Internationale Geodätische Woche Obergurgel*. Herausgegeben von: G. Chesi und T. Weinold. Wichmann.
- Hering, E., R. Martin und M. Stohrer (2002). „Physik für Ingenieure“. 8. Auflage. Springer-Lehrbuch. Berlin: Springer. ISBN: 3-540-42964-6.
- Heunecke, O. et al. (2013). „Handbuch Ingenieurgeodäsie“. 2. Auflage. Berlin: Wichmann. ISBN: 978-3-87907-467-9.
- Holies, R. und M. Fischler (1981). „A RANSAC-based approach to model fitting and its application to finding cylinders in range data“. In: *Proceedings of the 7th International Joint Conference on Artificial Intelligence*. IJCAI. (Canada). Herausgegeben von: W. Kaufmann und P. Hayes. Bd. 2. University of British Columbia Vancouver, S. 637–644.
- Hoover, A. et al. (1996). „An experimental comparison of range image segmentation algorithms“. In: *Pattern Analysis and Machine Intelligence, IEEE Transactions on* Band 18 (Nr. 7), S. 673–689.
- Hough, P. (1962). „Method and means for recognizing complex patterns“. US3069654 A (United States of America).
- Jiménez, D. et al. (2014). „Modeling and correction of multipath interference in time of flight cameras“. In: *Image and Vision Computing* Band 32 (Nr. 1), S. 1–13. ISSN: 0262-8856.
- Jiménez, D. et al. (2012). „Modelling and correction of multipath interference in time of flight cameras“. In: *Computer Vision and Pattern Recognition (CVPR), 2012 IEEE Conference on*, S. 893–900.
- Kadambi, A. et al. (2013). „Coded time of flight cameras: Sparse Deconvolution to Address Multipath Interference and Recover Time Profiles“. In: *ACM Transactions on Graphics (TOG)* Band 32 (Nr. 6), S. 1–10. ISSN: 0730-0301.

- Kahlmann, T. (2007). „Range imaging metrology: Investigation, calibration and development“. Dissertation. Zürich: ETH Zürich.
- Karel, W., S. Ghuffar und N. Pfeifer (2010). „Quantifying the distortion of distance observations caused by scattering in time-of-flight range cameras“. In: *International Archives of Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences* Band 38 (Nr. Part 5).
- Kawashima, K., S. Kanai und H. Date (2013). „Automatic recognition of piping system from laser scanned point clouds using normal-based region growing“. In: *ISPRS Annals of Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences* Band II-5/W2, S. 121–126. ISSN: 2194-9050.
- Kirchner, F. und J. Hertzberg (1997). „A Prototype Study of an Autonomous Robot Platform for Sewerage System Maintenance“. In: *Autonomous Robots* Band 4 (Nr. 4), S. 319–331. ISSN: 09295593.
- Klasing, K. et al. (2009). „Comparison of surface normal estimation methods for range sensing applications“. In: *International Conference on Robotics and Automation*. (Kobe, Japan). Herausgegeben von: IEEE, S. 3206–3211.
- Klußmann, N. und A. Malik (2012). „Lexikon der Luftfahrt“. 3. Auflage. Berlin: Springer. ISBN: 9783642224997.
- Krause, W. (2014). „PIPEGUARD. A novel technology for sewerage mapping, inspection and cleaning with integrated real-time self-audit capability“. Final Report Summary. Herausgegeben von: CORDIS. Fraunhofer-Gesellschaft zur Förderung der angewandten Forschung e.V.
- Kubacki, J. (2014). „Multipath“. Kontakt mit: P. Striegl. E-Mail. Neubiberg. 29.09.2014.
- Lange, R. et al. (1999). „Time-of-flight range imaging with a custom solid state image sensor“. In: *Industrial Lasers and Inspection (EUROPTO Series)*. (München, 1999). Herausgegeben von: H. Tiziani und P. Rastogi. SPIE Proceedings, S. 180–191.
- Lari, Z. und A. Habib (2013). „A novel hybrid approach for the extraction of linear / cylindrical features from laser scanning data“. In: *ISPRS Annals of Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences* Band II-5/W2, S. 151–156. ISSN: 2194-9050.
- Lee, J. et al. (2013). „Skeleton-based 3D reconstruction of as-built pipelines from laser-scan data“. In: *Automation in Construction* Band 35, S. 199–207. ISSN: 0926-5805.
- Leica Geosystems, Hrsg. (2006). „Leica TPS1200 Gebrauchsanweisung“. Version 5.0. Leica Geosystems.

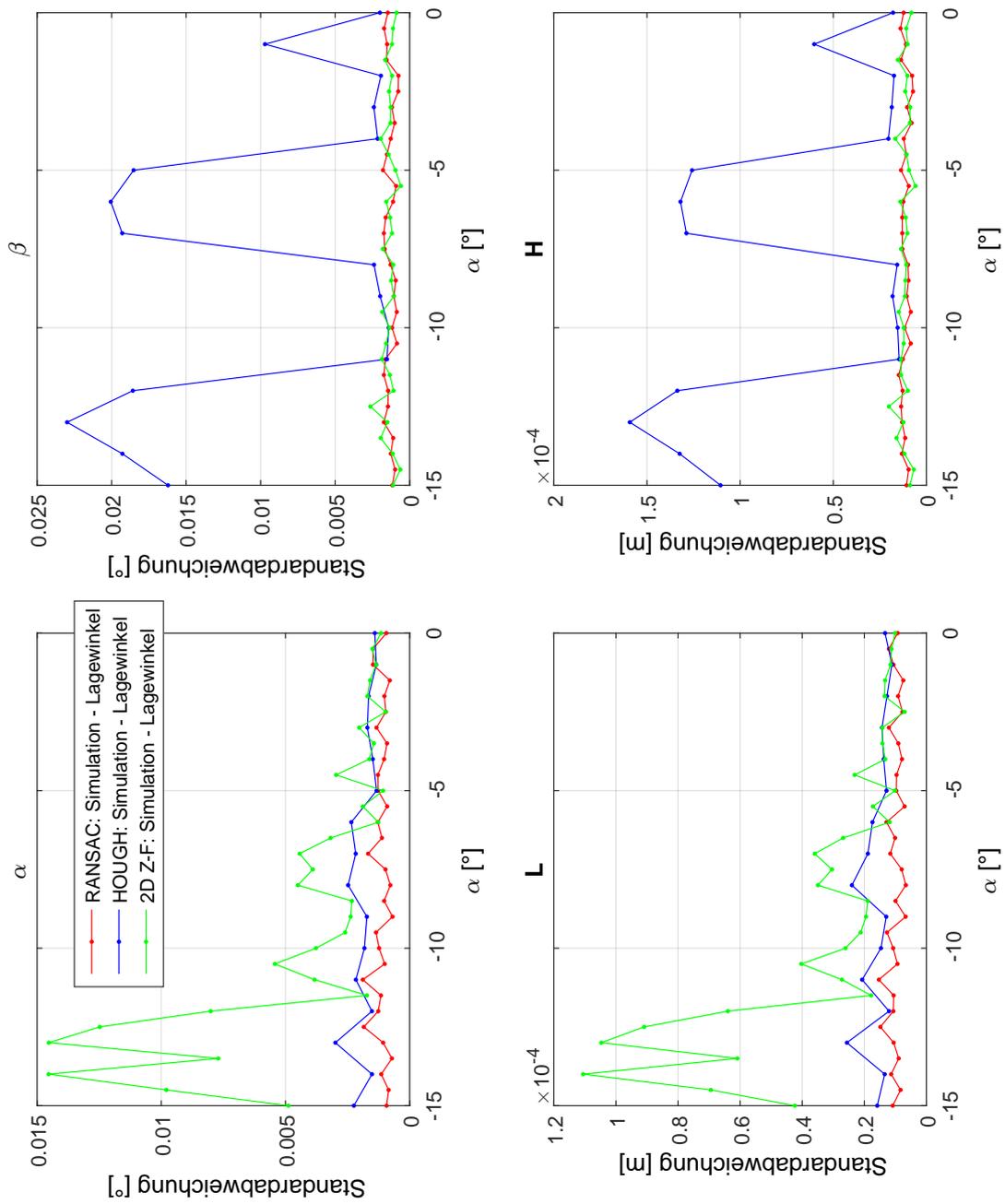
- Liang, P. und J. Todhunter (1990). „Representation and recognition of surface shapes in range images: A differential geometry approach“. In: *Computer Vision, Graphics, and Image Processing* Band 52 (Nr. 1), S. 78–109. ISSN: 0734-189X.
- Lichti, D., C. Kim und S. Jamtsho (2010). „An integrated bundle adjustment approach to range camera geometric self-calibration“. In: *ISPRS Journal of Photogrammetry and Remote Sensing* Band 65 (Nr. 4), S. 360–368. ISSN: 09242716.
- Luan, X. (2001). „Experimental investigation of photonic mixer device and development of TOF 3D ranging systems based on PMD technology“. Elektrotechnik und Informatik. Dissertation. Siegen: Hochschule Siegen.
- Lukács, G., R. Martin und D. Marshall (1998). „Faithful least-squares fitting of spheres, cylinders, cones and tori for reliable segmentation“. In: *5th European Conference on Computer Vision*. Herausgegeben von: H. Burkhard und B. Neumann. Bd. 1407. 1407. Springer, S. 671–686. ISBN: 978-3-540-64613-6.
- Lutton, E., H. Maitre und J. Lopez-Krahe (1994). „Contribution to the determination of vanishing points using Hough transform“. In: *Pattern Analysis and Machine Intelligence, IEEE Transactions on* Band 16 (Nr. 4), S. 430–438.
- Madsen, K., H. Nielsen und O. Tingleff (2004). „Methods for Non-Linear Least Squares Problems. Informatics and Mathematical Modelling“. Technical University of Denmark.
- Marshall, D., G. Lukacs und R. Martin (2001). „Robust segmentation of primitives from range data in the presence of geometric degeneracy“. In: *Pattern Analysis and Machine Intelligence, IEEE Transactions on* Band 23 (Nr. 3), S. 304–314.
- Mayer, H. (2015). „Vorlesung Grundzüge von Visual Computing“. Neubiberg.
- MESA Imaging AG (2013). „SR4000 User Manual“. Herausgegeben von: MESA Imaging AG. Version 2. Zürich.
- (2011). „SR4000 Product Specifications“. Herausgegeben von: MESA Imaging AG. Version 5.1. Zürich.
- MESA Imaging / Gerald Dahlmann (2013). „SR4000“. Kontakt mit: P. Striegl. Telefonat. Neubiberg. 29.08.2013.
- Mure-Dubois, J. und H. Hügli (2007). „Optimized scattering compensation for time-of-flight camera“. In: *Optics East 2007*. International Society for Optics and Photonics.
- Nash, J. (1979). „Compact numerical methods for computers. Linear algebra and function minimisation“. Bristol: Hilger. ISBN: 0-85274-330-0.
- Nassiraei, A. et al. (2007). „Concept and Design of A Fully Autonomous Sewer Pipe Inspection Mobile Robot "KANTARO““. In: *Robotics and Automation, 2007 IEEE International Conference on*, S. 136–143.

- Newman, T., P. Flynn und A. Jain (1993). „Model-based classification of quadric surfaces“. In: *CVGIP: Image Understanding* Band 58 (Nr. 2), S. 235–249.
- Nourse, B. et al. (1980). „Natural quadrics in mechanical design“. In: *Proceedings of Autofact West*. Herausgegeben von: Society of Manufacturing Engineers. Bd. 1. 1, S. 363–378. ISBN: 0872630668.
- OWIS (2015). „Katalog: Manuelle Positioniersysteme“. Herausgegeben von: OWIS. Staufen.
- Petitjean, S. (2002). „A survey of methods for recovering quadrics in triangle meshes“. In: *ACM Computing Surveys (CSUR)* Band 34 (Nr. 2), S. 211–262.
- Piatti, D. und F. Rinaudo (2012). „SR-4000 and CamCube3.0 Time of Flight (ToF) Cameras: Tests and Comparison“. In: *Remote Sensing* Band 4 (Nr. 4), S. 1069–1089.
- Press, W. (1988). „Numerical recipes in C. The art of scientific computing“. Cambridge: Cambridge Univ. Press. ISBN: 052135465X.
- Rabbani, T. S. (2006). „Automatic reconstruction of industrial installations using point clouds and images“. Bd. 62. Publications on geodesy. Delft: Nederlandse Commissie voor Geodesie. ISBN: 978 90 6132 297 9.
- Rabbani, T. S. und F. van den Heuvel (2004). „3D industrial reconstruction by fitting CSG models to a combination of images and point clouds“. In: *XXth ISPRS Congress Technical Commission V*. (Istanbul, Turkey). Herausgegeben von: A. Orhan. International Society for Photogrammetry and Remote Sensing, S. 7–12.
- (2005). „Efficient Hough transform for automatic detection of cylinders in point clouds“. In: *ISPRS Laser Scanning 2005*. Herausgegeben von: G. Vosselman und C. Brenner. Bd. 36. ISPRS Working Groups, S. 60–65.
- Rabbani, T. und F. van den Heuvel (2004). „Methods for fitting CSG models to point clouds and their comparison“. In: *Computer Graphics and Imaging*. (Kauai, Hawaii, USA). Herausgegeben von: The International Association of Science and Technology for Development.
- Reinhardt, W. und P. Striegl (2009). „Georeferenzierung von Abwasserkanälen und -leitungen“. Herausgegeben von: Bundesinstitut für Bau-, Stadt- und Raumforschung. Bonn.
- Rome, E. et al. (1999). „Towards autonomous sewer robots: the 5MAKRO6 project“. In: *Urban Water* Band 1 (Nr. 1), S. 57–70. ISSN: 1462-0758.
- Rusin, D. (1998). *Topics on Sphere Distribution*. Herausgegeben von: D. Rusin. Northern Illinois University. URL: www.math.niu.edu/~rusin/known-math/95/sphere.faq (besucht am 05.02.2014).

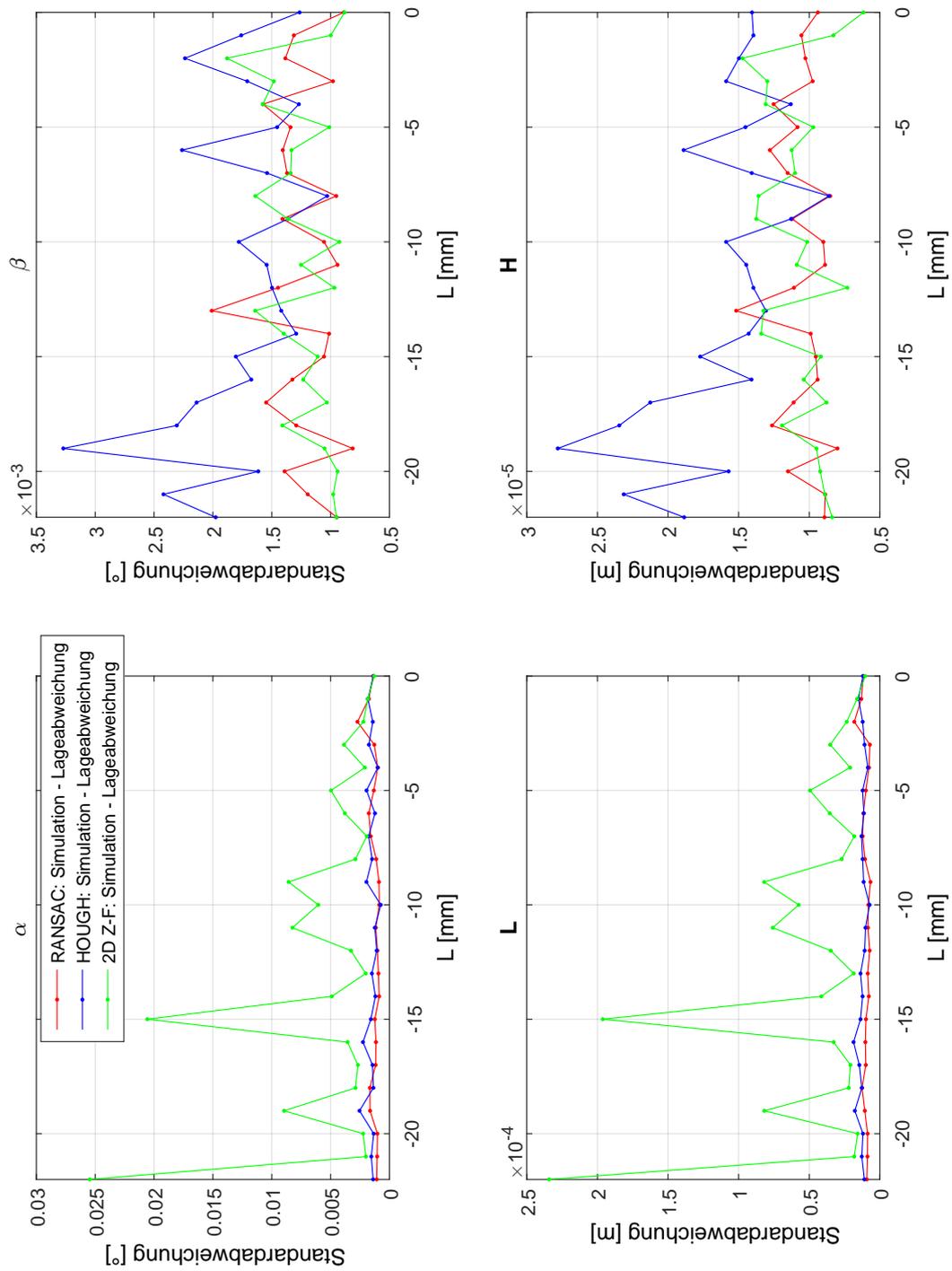
- Rusu, R. (2009). „Semantic 3D Object Maps for Everyday Manipulation in Human Living Environments“. Institut für Informatik. Dissertation. München: Technische Universität München.
- Schenk, M. (2009). „Automatisierte Kanalinspektion für eine saubere Umwelt“. Magdeburg: Fraunhofer-Institut für Fabrikbetrieb und -automatisierung IF.
- Schnabel, R., R. Wahl und R. Klein (2007). „Efficient RANSAC for Point-Cloud Shape Detection“. In: *Computer Graphics Forum*. Herausgegeben von: H. Rushmeier und O. Deussen. Bd. 26. European Association for Computer Graphics. Oxford: Wiley, S. 214–226. ISBN: 1467-8659.
- Striegl, P., K. Mönch und W. Reinhardt (2014). „Untersuchungen zur Verbesserung der Aufnahmege nauigkeit von Abwasserleitungen“. In: *Zeitschrift für Geodäsie, Geoinformation und Landmanagement*. Herausgegeben von: Gesellschaft für Geodäsie, Geoinformation und Landmanagement e.V. Bd. 2/2014. 139 Bde., S. 71–81. ISBN: 1618-8950.
- Striegl, P. et al. (2010). „Multisensorsystem geoASYS zur 3D Kanaldokumentation“. In: *Ingenieurvermessung 10. Beiträge zum 16. Internationalen Ingenieurvermessungskurs München, 2010*. Herausgegeben von: T. Wunderlich. Berlin: Wichmann, S. 145–156. ISBN: 978-3879074921.
- Su, Y.-T. und J. Bethel (2010). „Detection and robust estimation of cylinder features in point clouds“. In: *Opportunities for emerging geospatial technologies*. (San Diego, California, USA). Bd. 1. American Society for Photogrammetry and Remote Sensing. USA, S. 887–893. ISBN: 9781617389160.
- Titterton, D. und J. Weston (2004). „Strapdown inertial navigation technology“. 2nd ed. Auflage. Bd. 17. IEE radar, sonar, navigation, and avionics series. Institution of Electrical Engineers. ISBN: 0-86341-358-7.
- Torr, P. und A. Zisserman (1998). „Robust computation and parametrization of multiple view relations“. In: *Sixth International Conference on Computer Vision*. (Bombay). Herausgegeben von: IEEE, S. 727–732. ISBN: 81-7319-221-9.
- (2000). „MLESAC: A New Robust Estimator with Application to Estimating Image Geometry“. In: *Computer vision and image understanding* Band 78, S. 138–156.
- Vosselman, G. et al. (2004). „Recognising structure in laser scanner point clouds“. In: *International Archives of Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences* Band 46 (Nr. 8), S. 33–38.
- Weber, M. (2010). „Genauigkeitsuntersuchung der Mini 3D Kamera SR4000“. Institut für Angewandte Informatik & Institut für Geodäsie. Diplomarbeit. München: Universität der Bundeswehr München.

Anhang A

Simulation



A.1: Standardabweichung bei der Auswertung einer Simulation mit simuliertem Lagewinkel von -15° bis 0° mittels der angegebenen Verfahren.

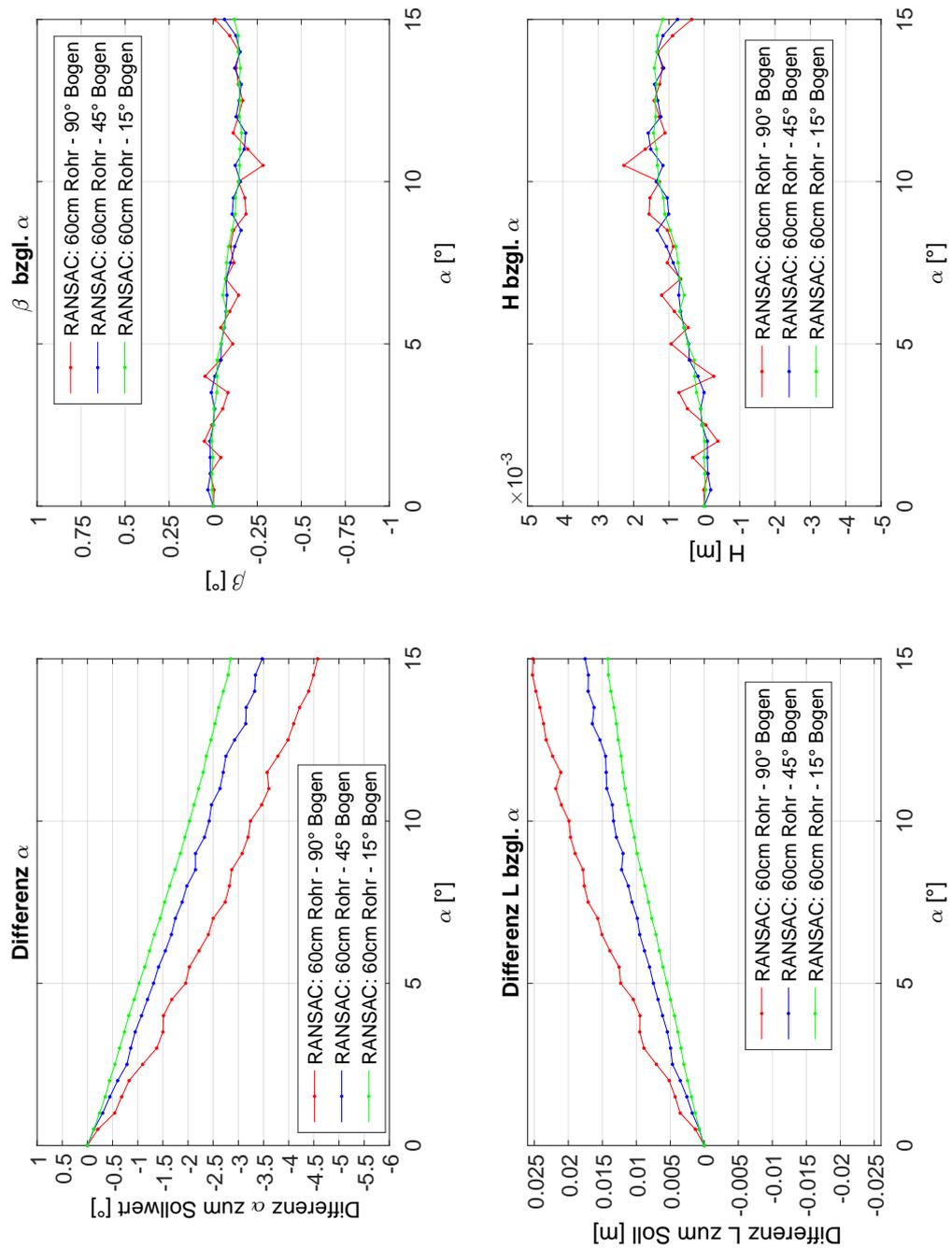


A.2: Standardabweichung bei der Auswertung einer Simulation mit simulierter Lageabweichung von 0 bis -22 mm mittels der angegebenen Verfahren.

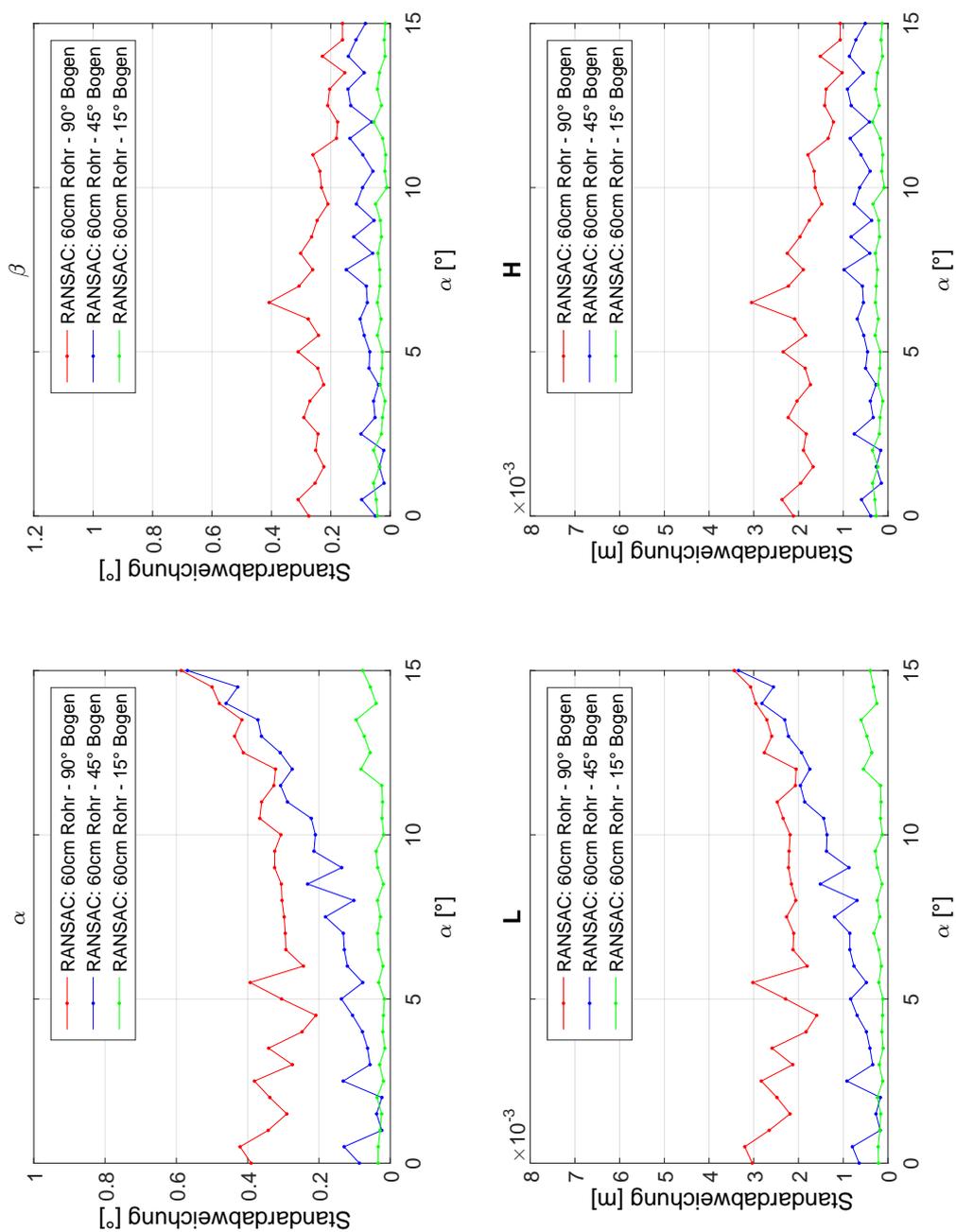
Anhang B

Äußere Orientierung

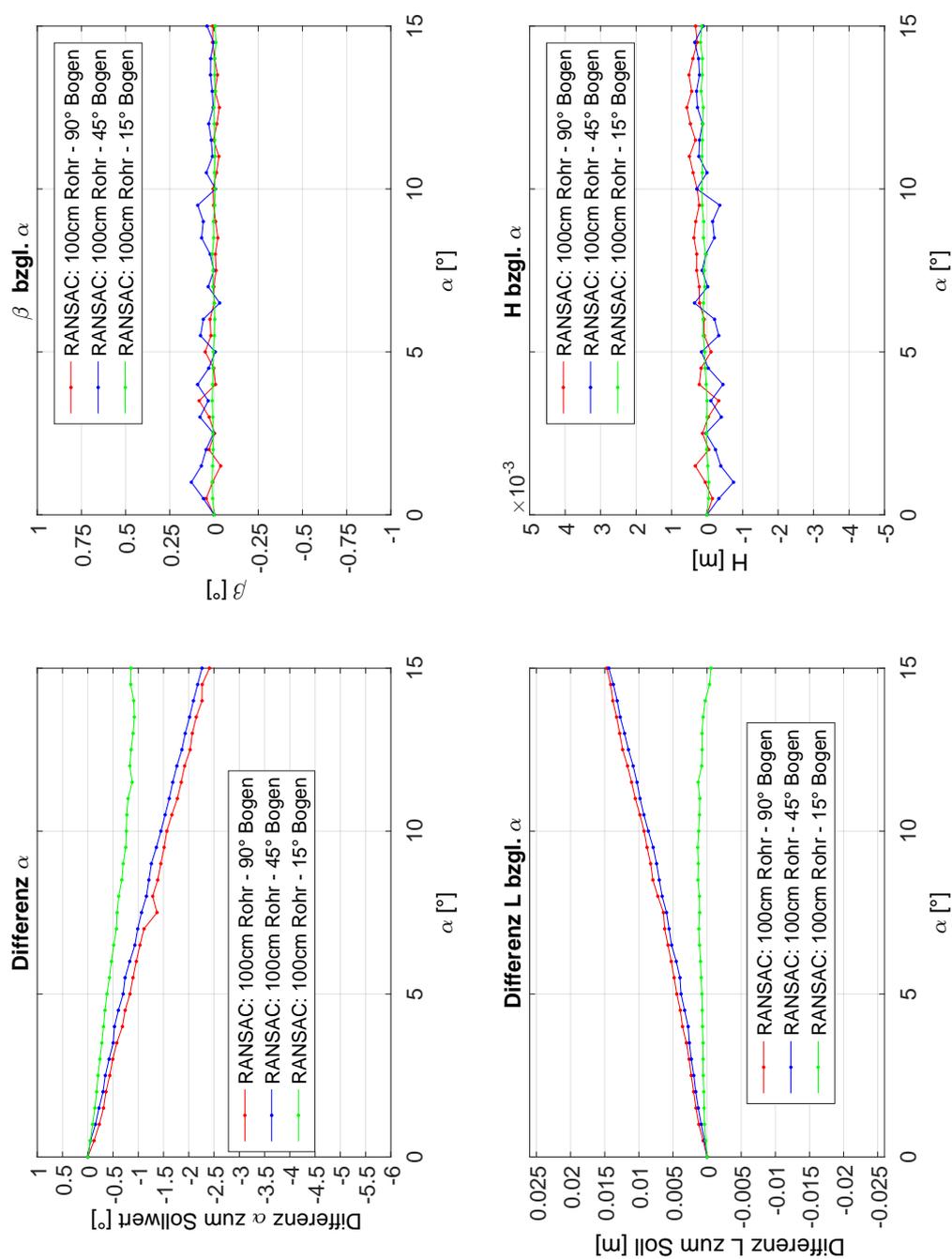
B.1 Änderung des Lagewinkels



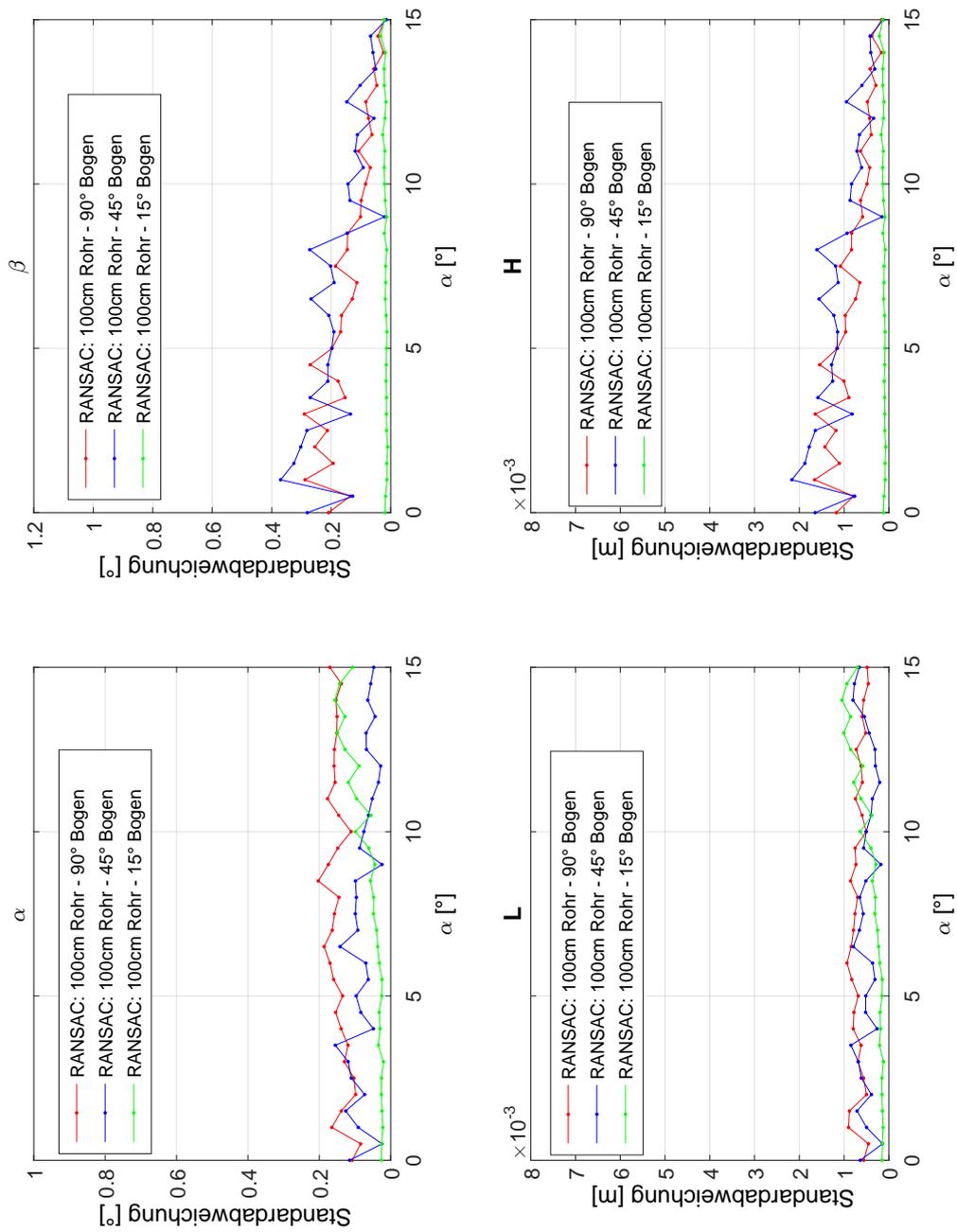
B.1: Auswertung mit RANSAC im 60cm Rohr mit 15°/45°/90° Bogen und voreingestelltem Lagewinkel α .



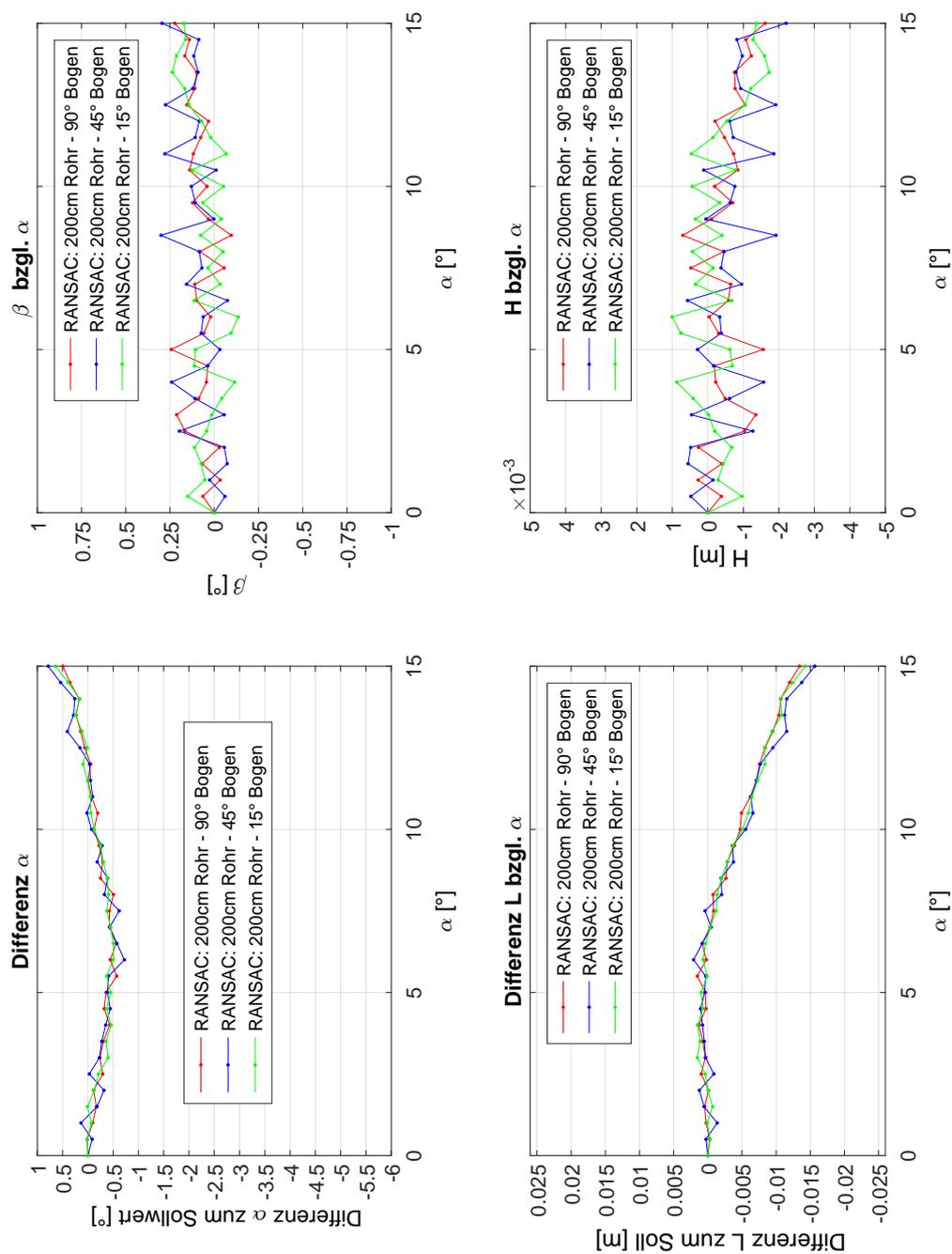
B.2: Standardabweichung der Auswertung mit RANSAC im 60cm Rohr mit 15°/45°/90° Bogen und voreingestelltem Lagewinkel α .



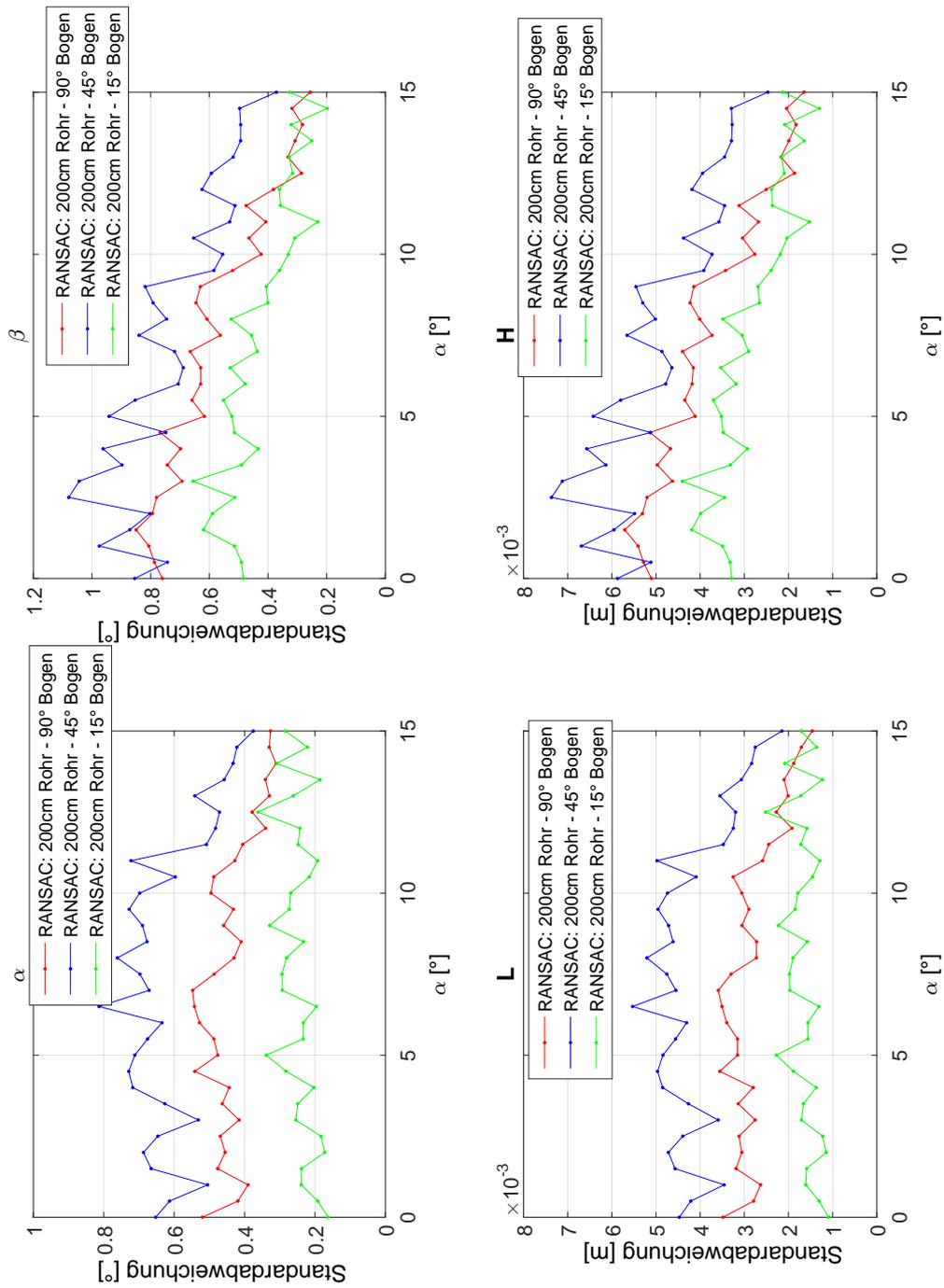
B.3: Auswertung mit RANSAC im 1m Rohr mit 15°/45°/90° Bogen und voreingestelltem Lagewinkel α .



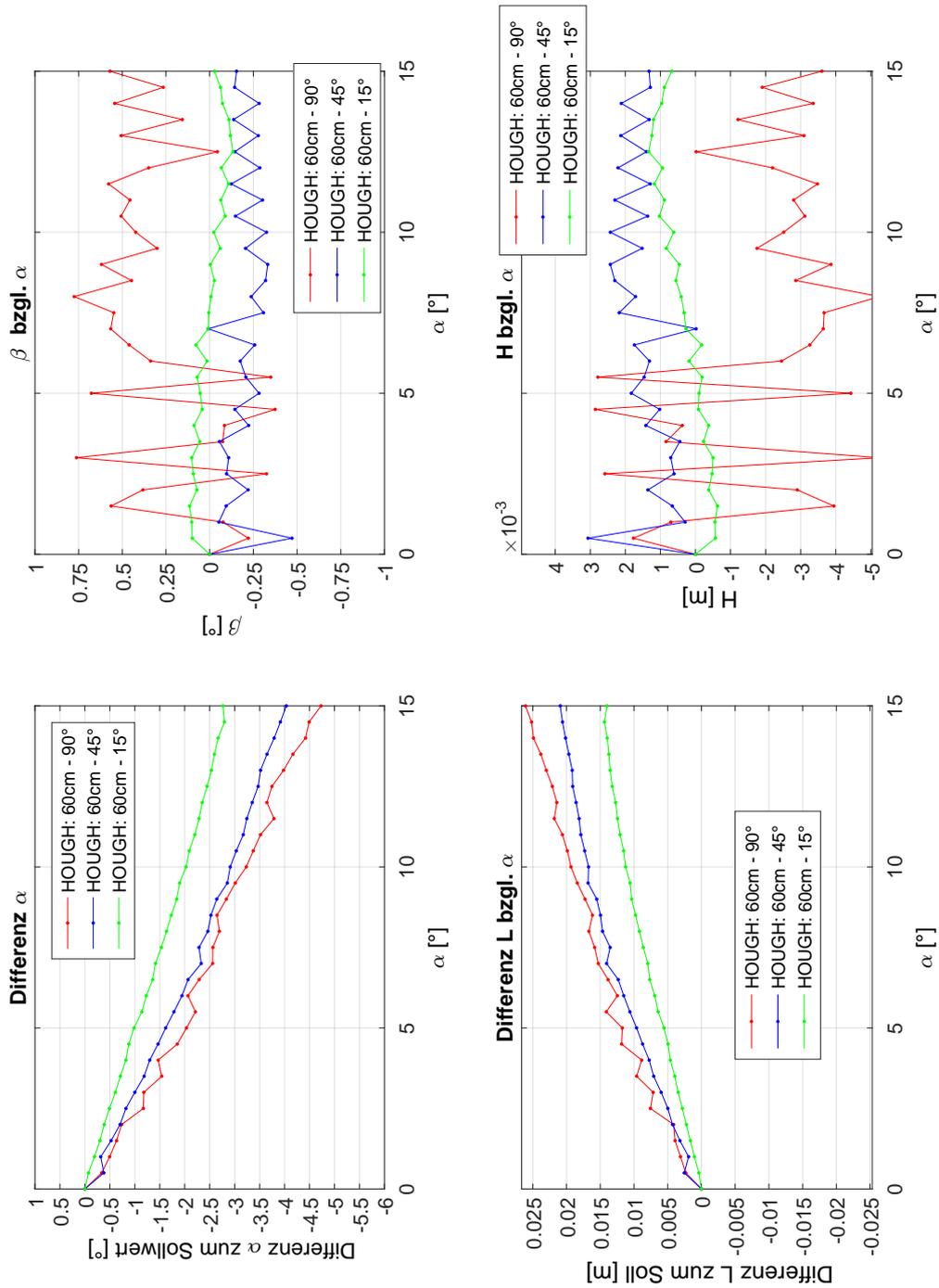
B.4: Standardabweichung der Auswertung mit RANSAC im 1m Rohr mit 15°/45°/90° Bogen und voreingestelltem Lagewinkel α .



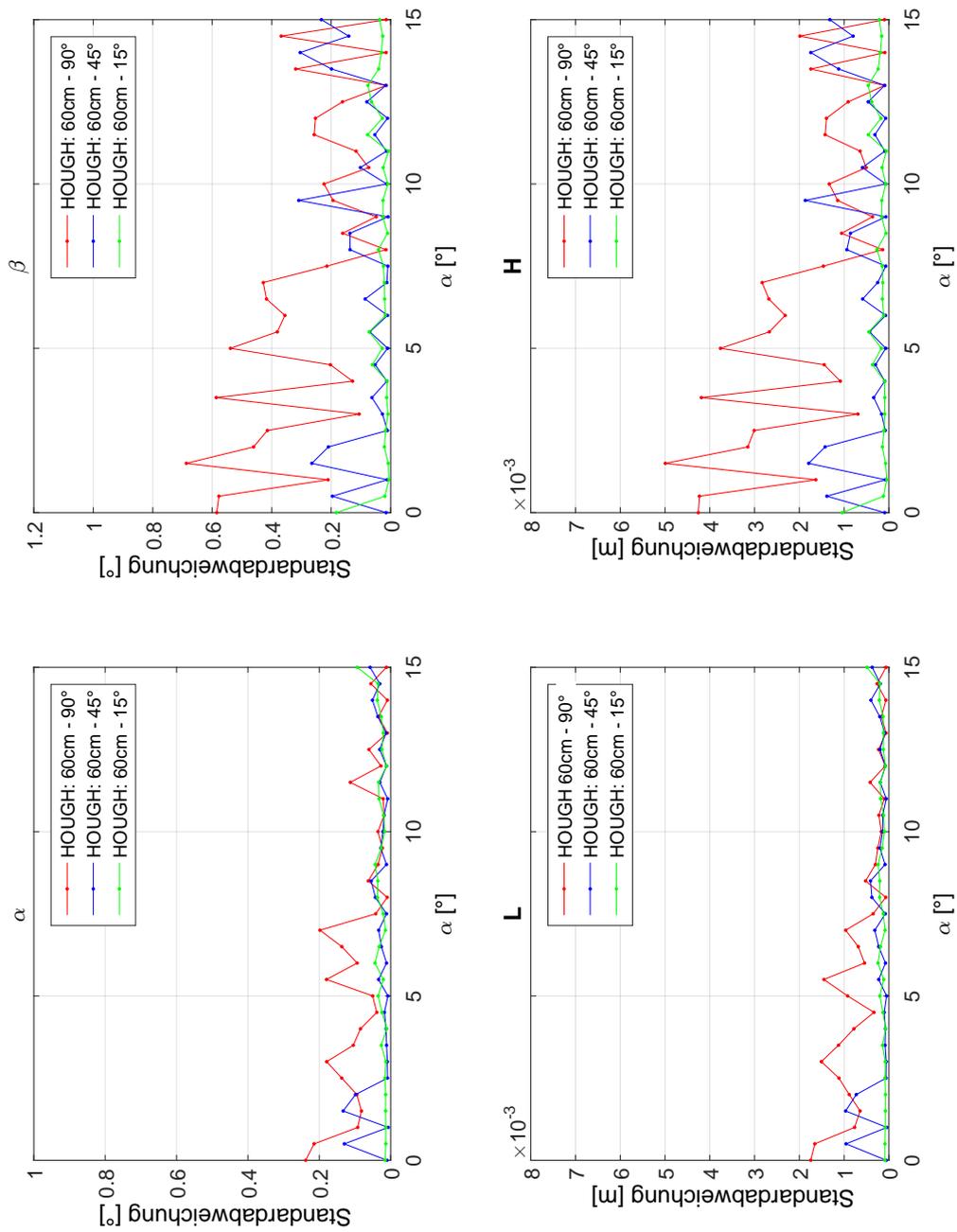
B.5: Auswertung mit RANSAC im 2m Rohr mit 15°/45°/90° Bogen und voreingestelltem Lagewinkel α .



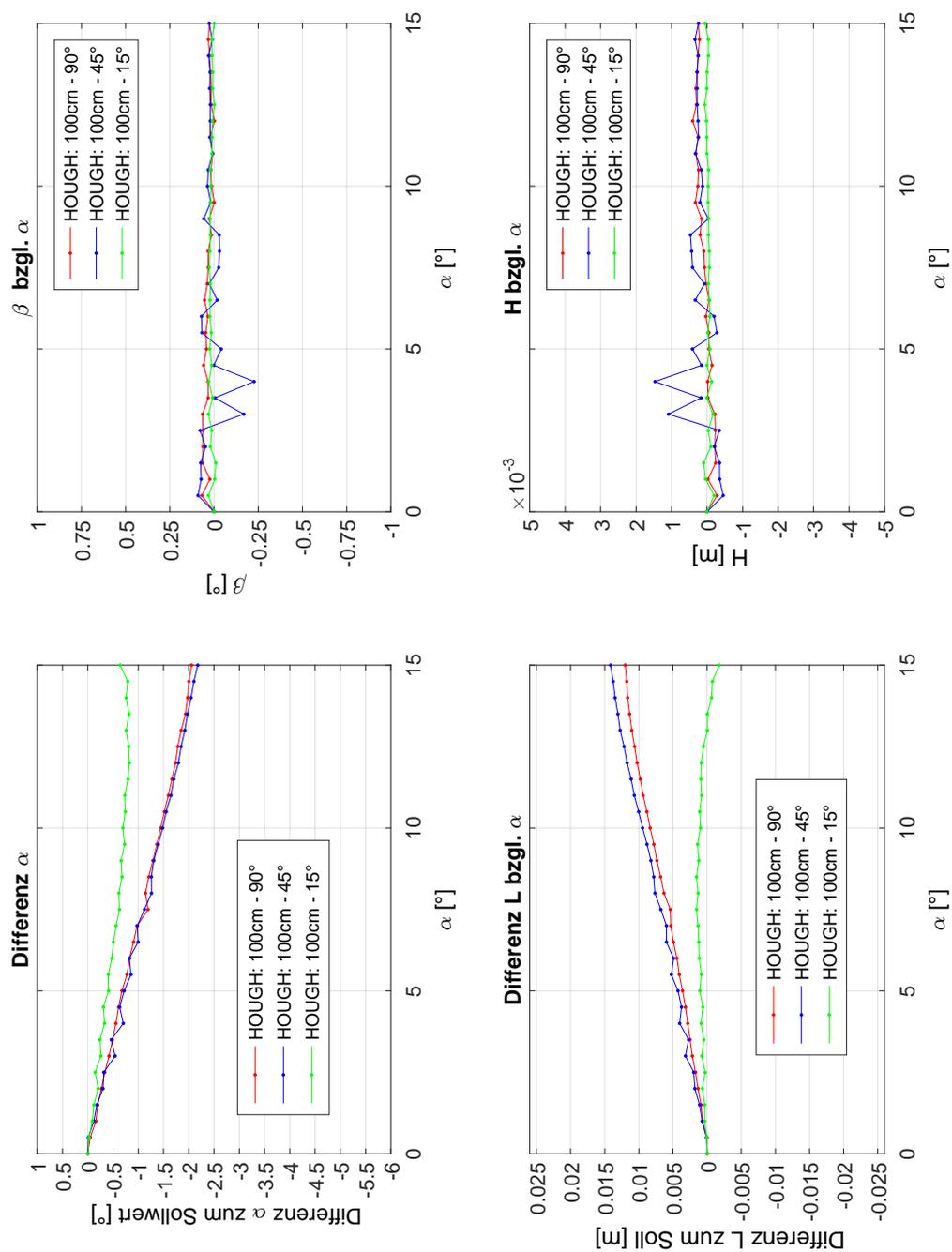
B.6: Standardabweichung der Auswertung mit RANSAC im 2m Rohr mit 15°/45°/90° Bogen und voreingestelltem Lagewinkel α .



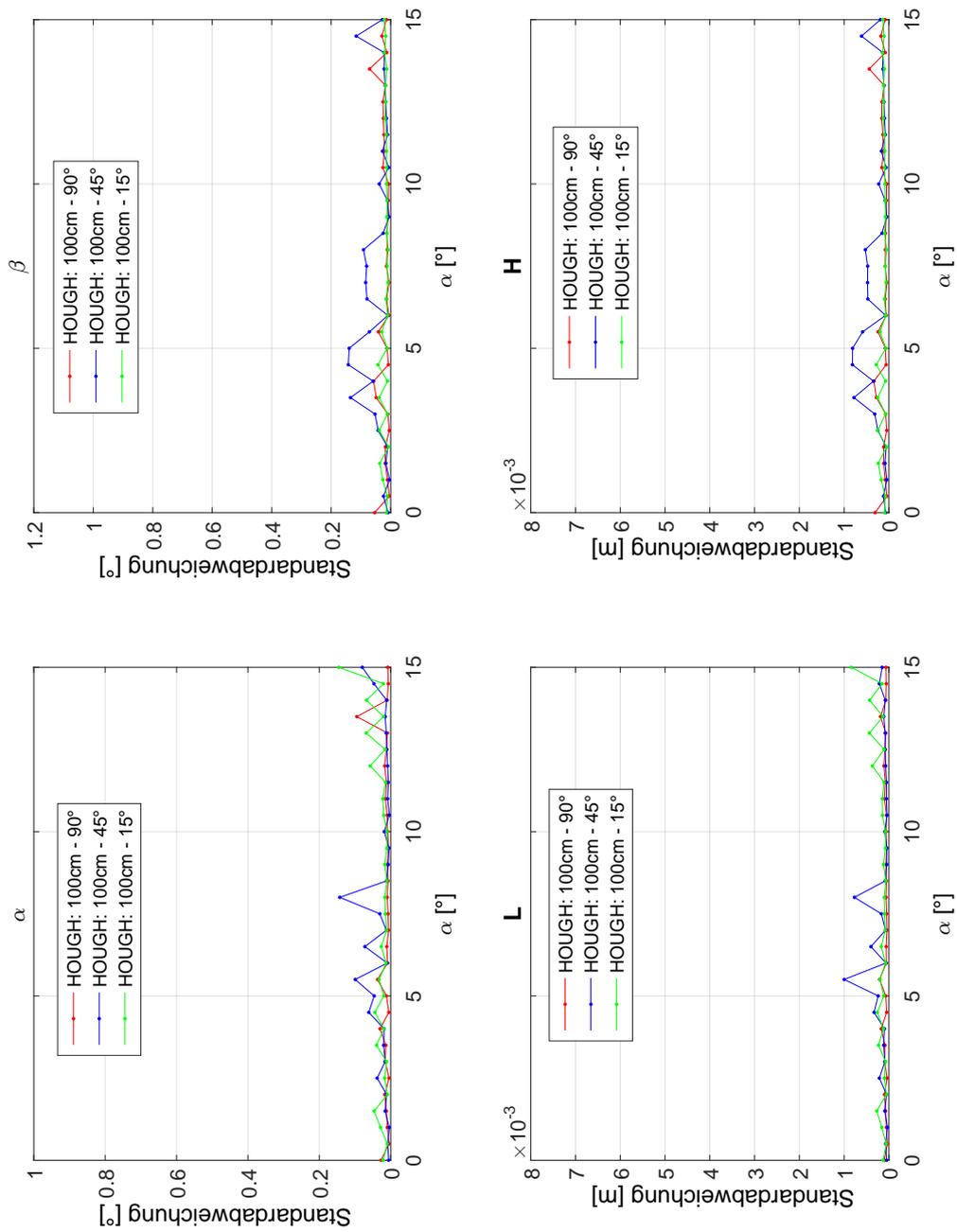
B.7: Auswertung mit der Hough-Transformation im 60cm Rohr mit 15°/45°/90° Bogen und vor-eingestelltem Lagewinkel α .



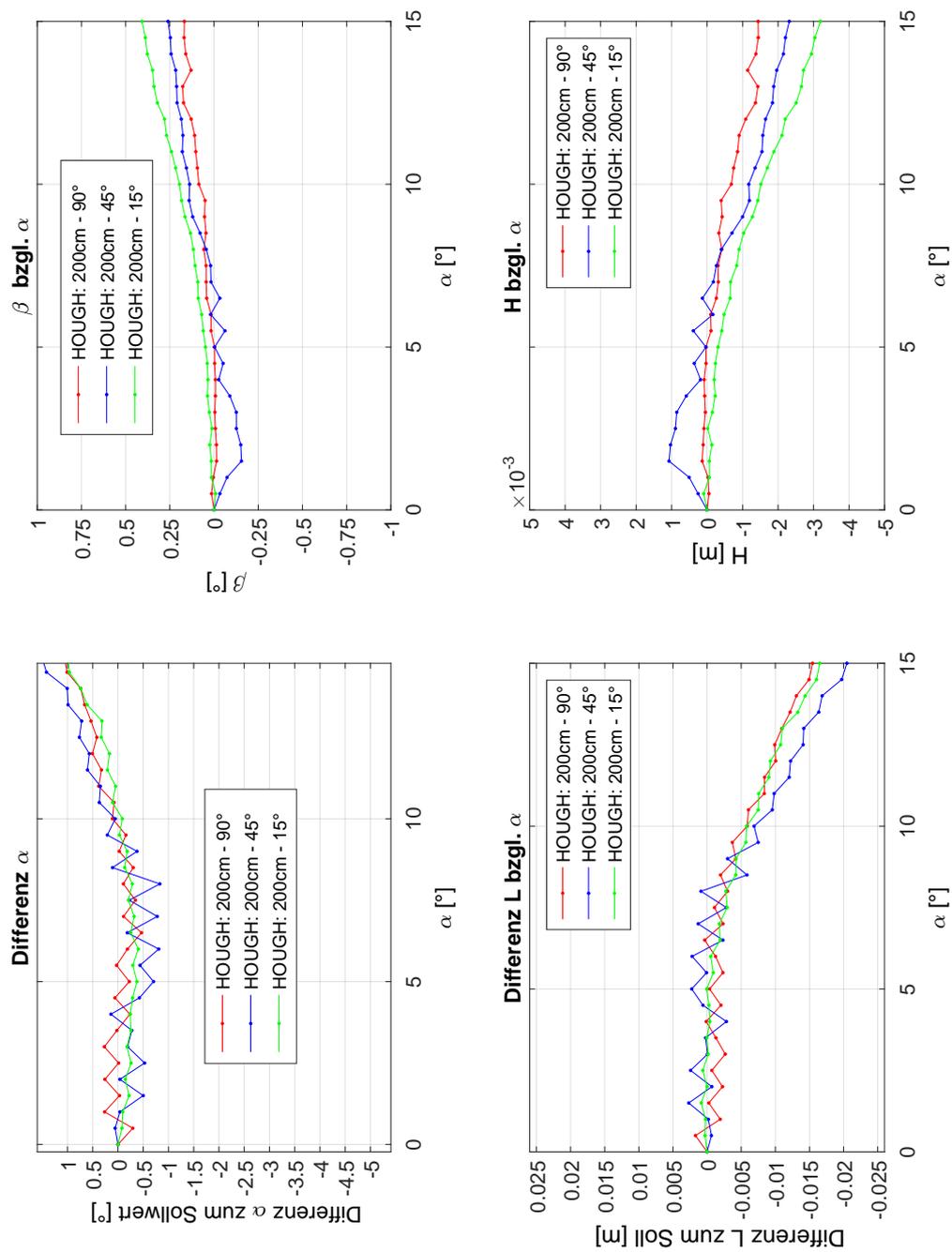
B.8: Standardabweichung der Auswertung mit der Hough-Transformation im 60cm Rohr mit 15°/45°/90° Bogen und voreingestelltem Lagewinkel α .



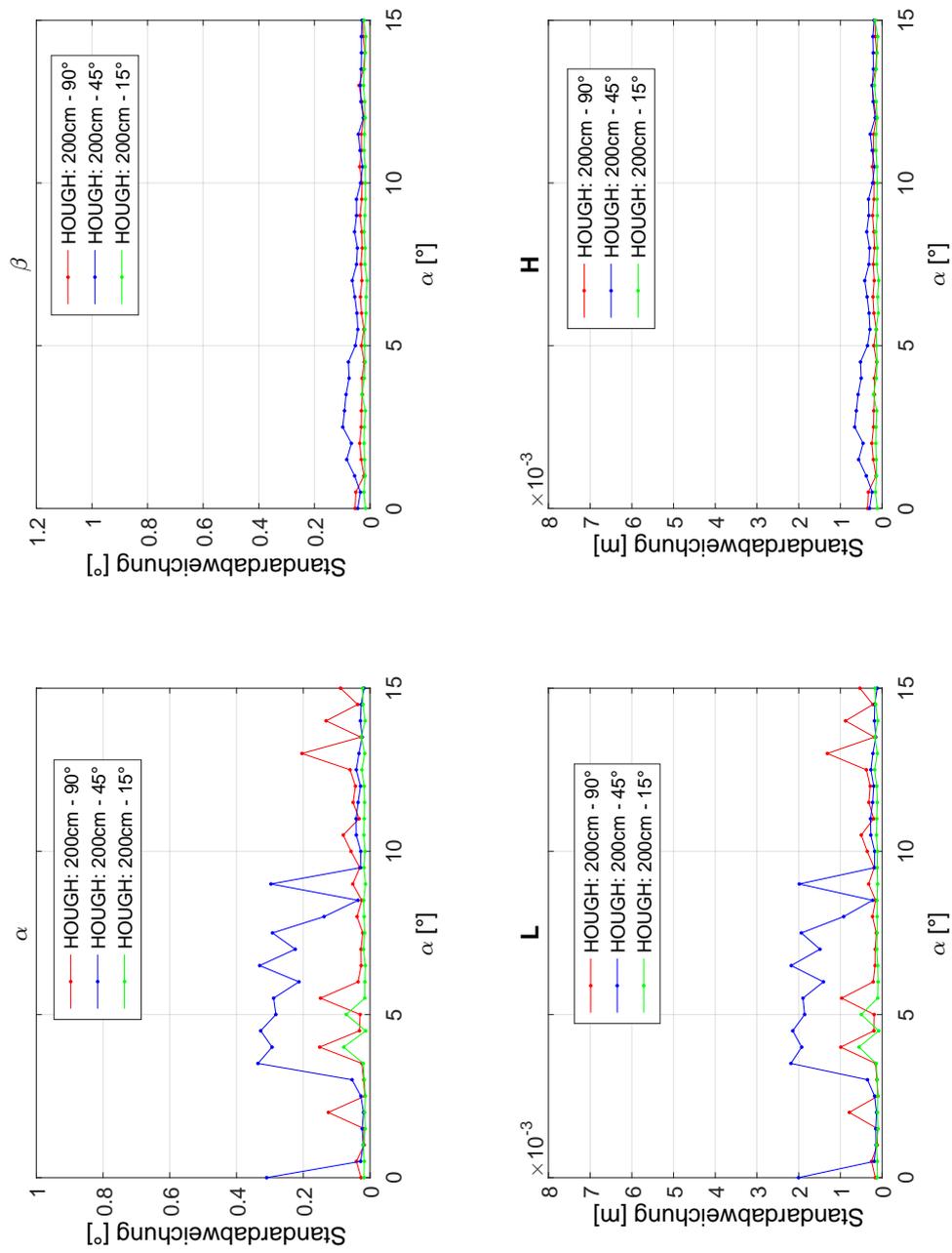
B.9: Auswertung mit der Hough-Transformation im 1m Rohr mit 15°/45°/90° Bogen und voreingestelltem Lagewinkel α .



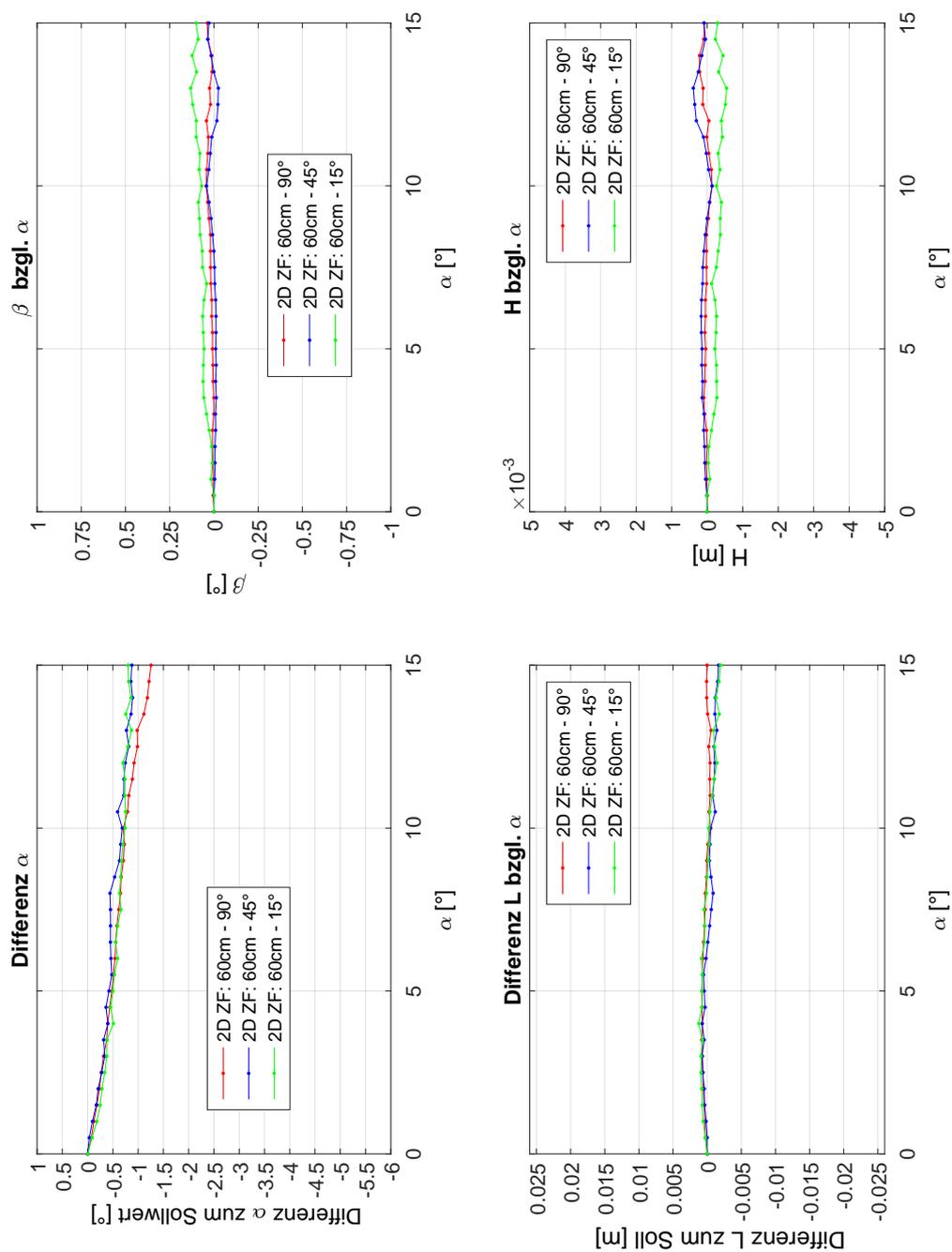
B.10: Standardabweichung der Auswertung mit der Hough-Transformation im 1m Rohr mit 15°/45°/90° Bogen und voreingestelltem Lagewinkel α .



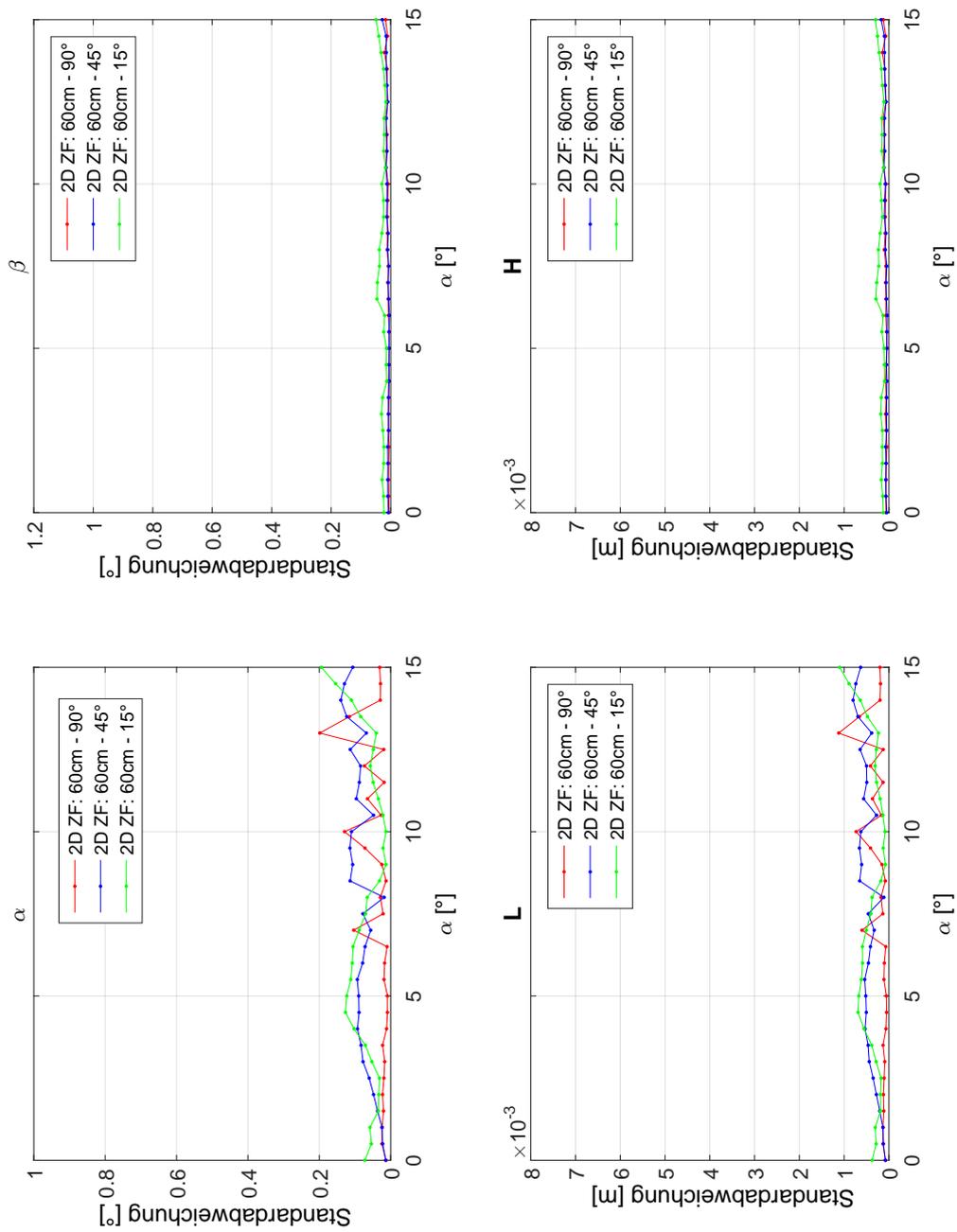
B.11: Auswertung mit der Hough-Transformation im 2m Rohr mit 15°/45°/90° Bogen und voreingestelltem Lagewinkel α .



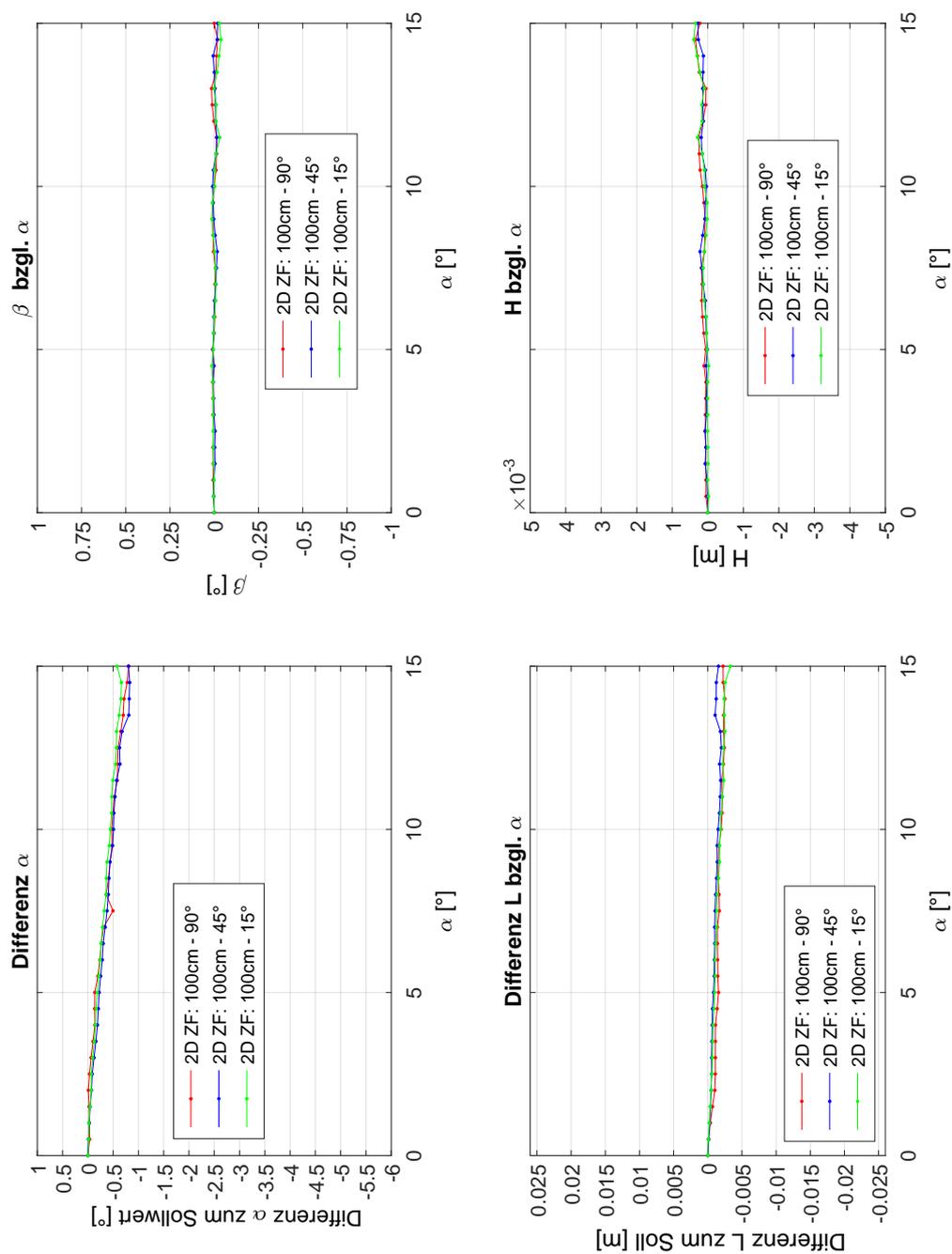
B.12: Standardabweichung der Auswertung mit der Hough-Transformation im 2m Rohr mit 15°/45°/90° Bogen und voreingestelltem Lagewinkel α .



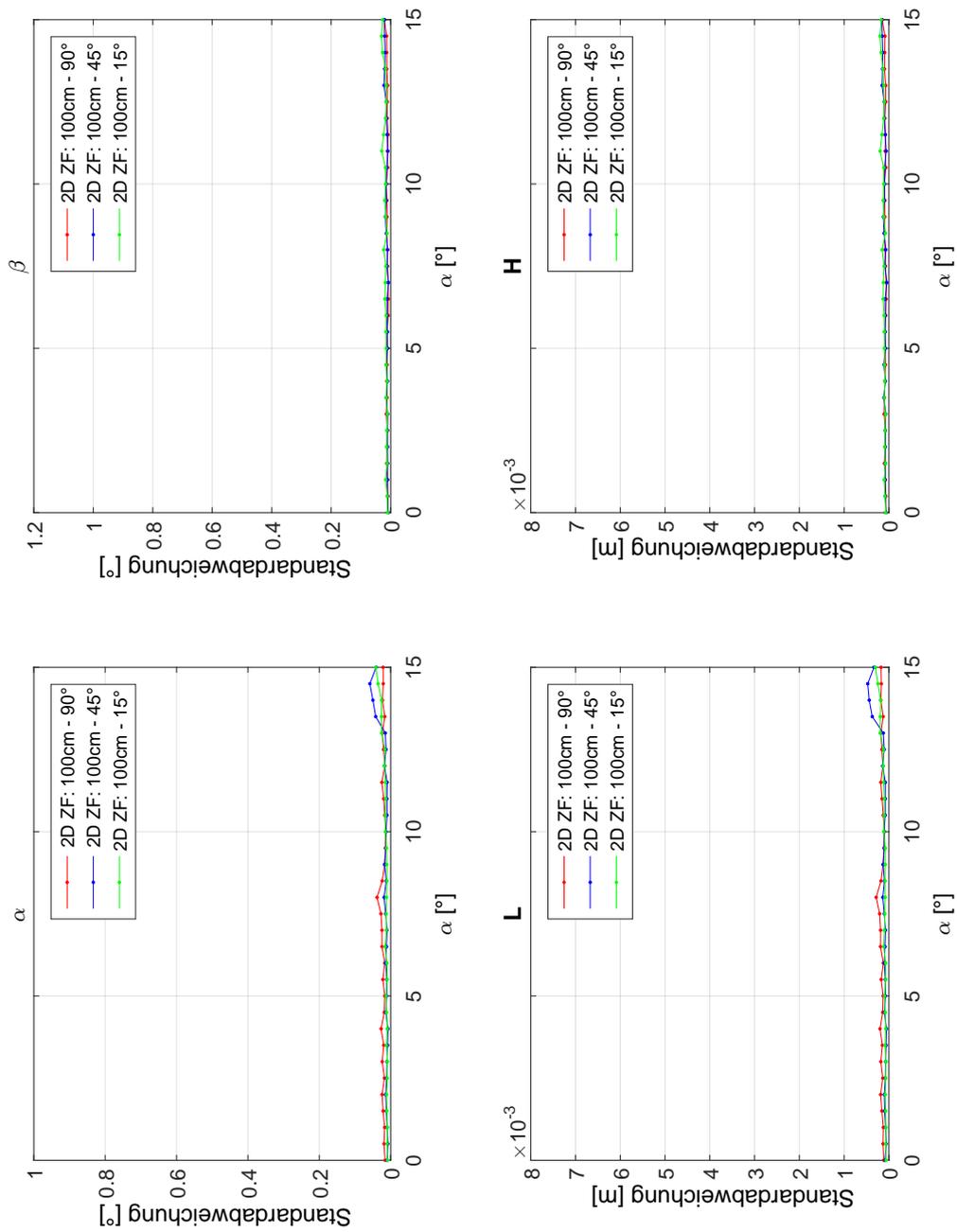
B.13: Auswertung mit dem 2D Zylinder-Fitting im 60cm Rohr mit 15°/45°/90° Bogen und vor-eingestelltem Lagewinkel α .



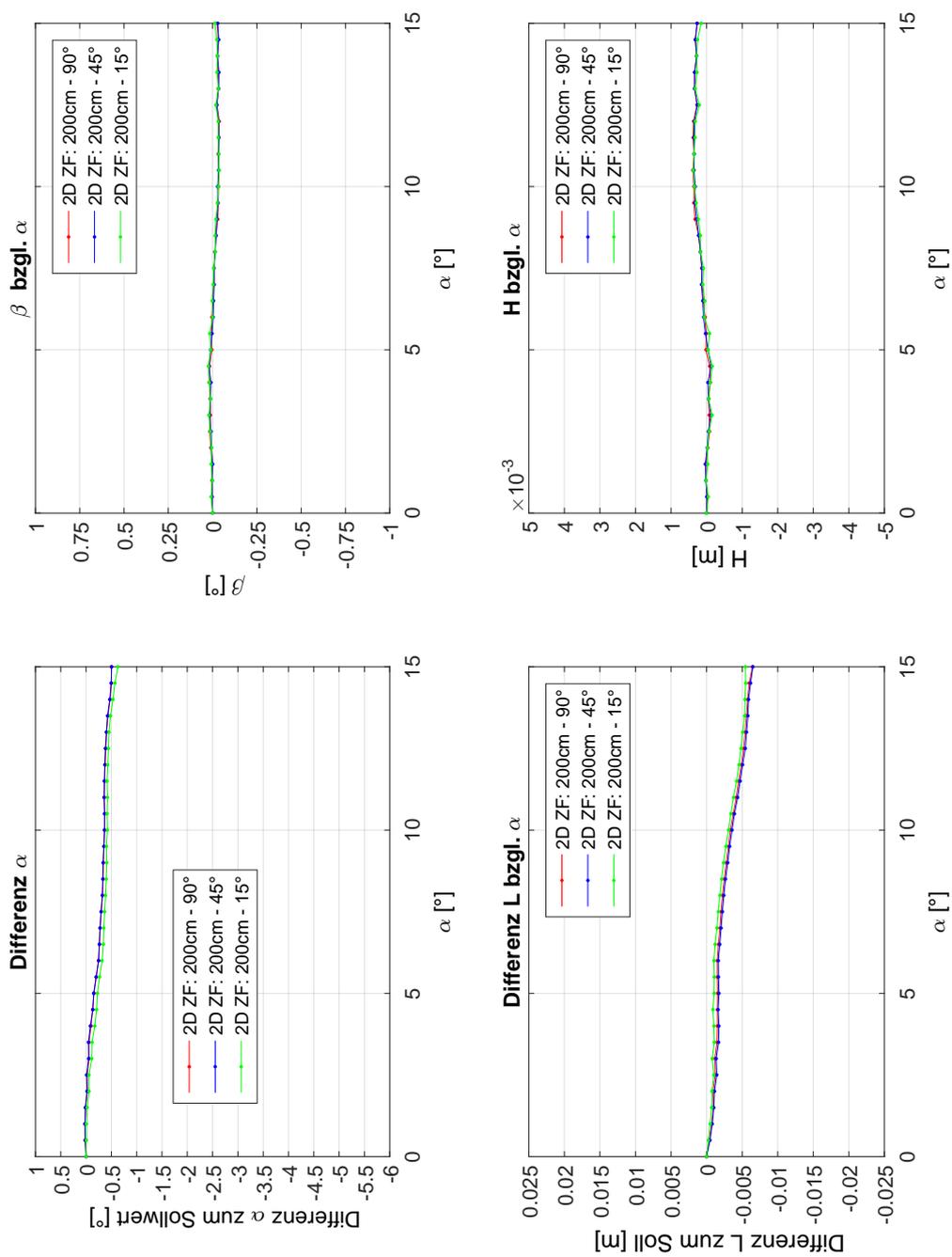
B.14: Standardabweichung der Auswertung mit dem 2D Zylinder-Fitting im 60cm Rohr mit 15°/45°/90° Bogen und voreingestelltem Lagewinkel α .



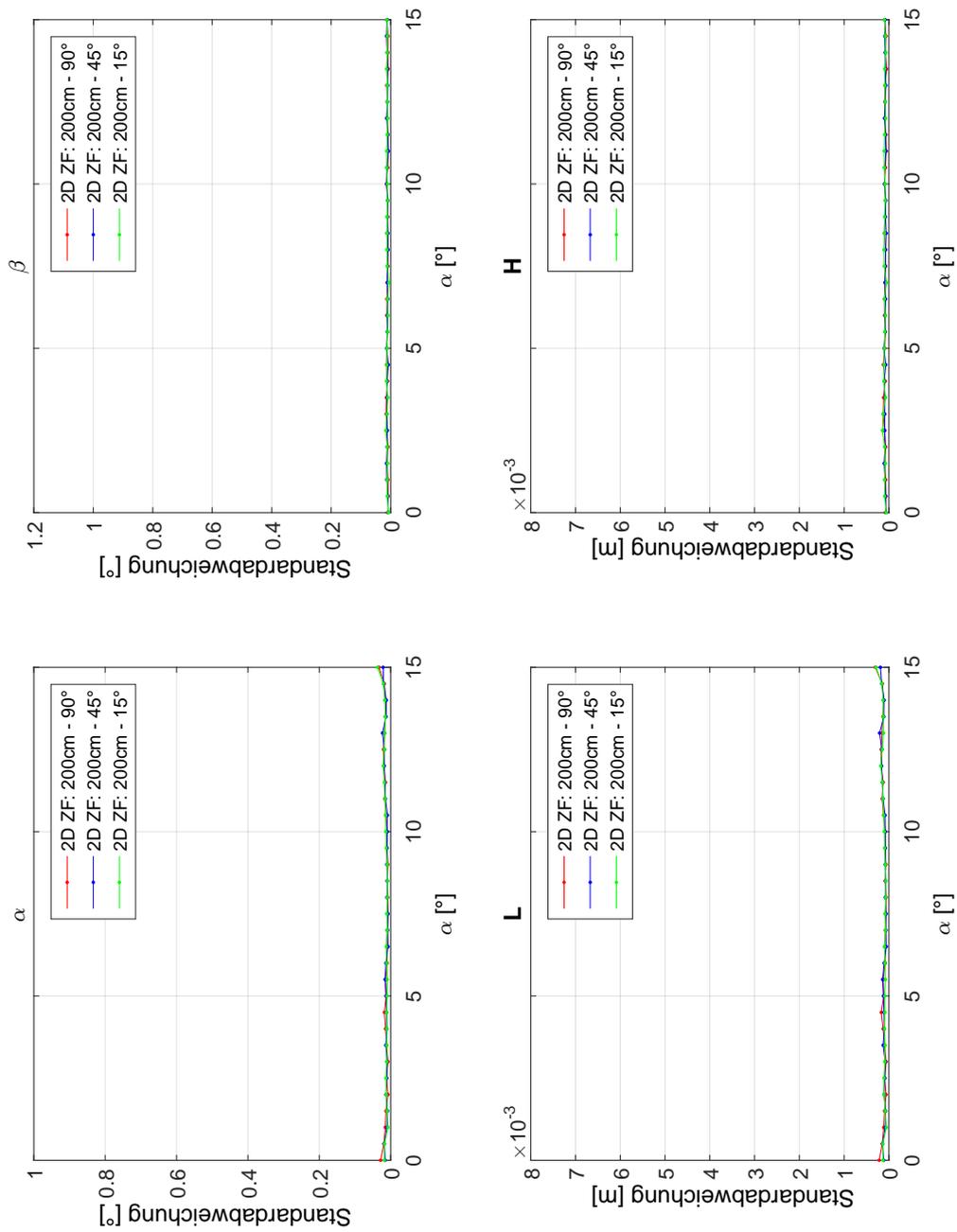
B.15: Auswertung mit dem 2D Zylinder-Fitting im 1m Rohr mit 15°/45°/90° Bogen und voreingestelltem Lagewinkel α .



B.16: Standardabweichung der Auswertung mit dem 2D Zylinder-Fitting im 1m Rohr mit 15°/45°/90° Bogen und voreingestelltem Lagewinkel α .

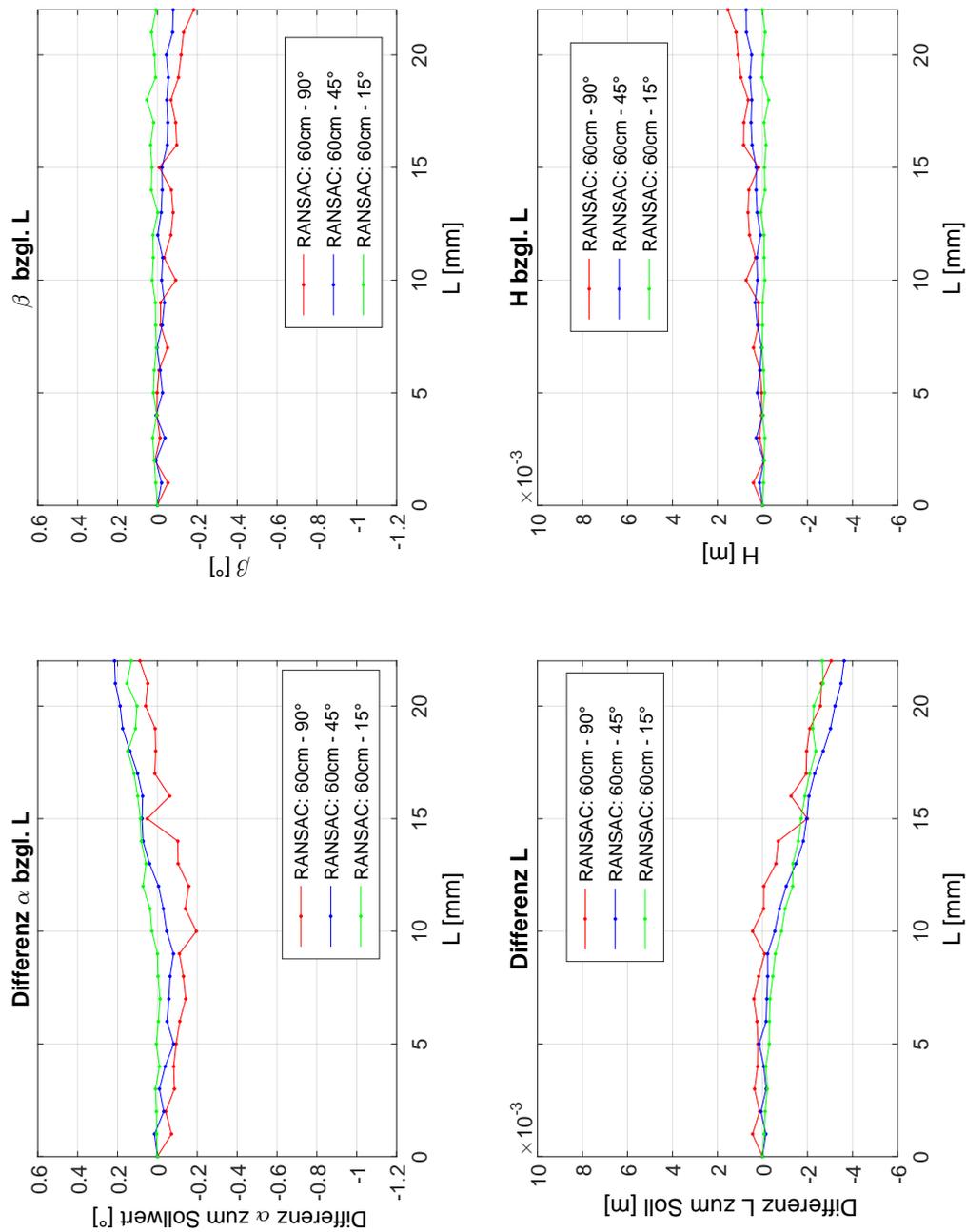


B.17: Auswertung mit dem 2D Zylinder-Fitting im 2m Rohr mit 15°/45°/90° Bogen und vorgelegtem Lagewinkel α .

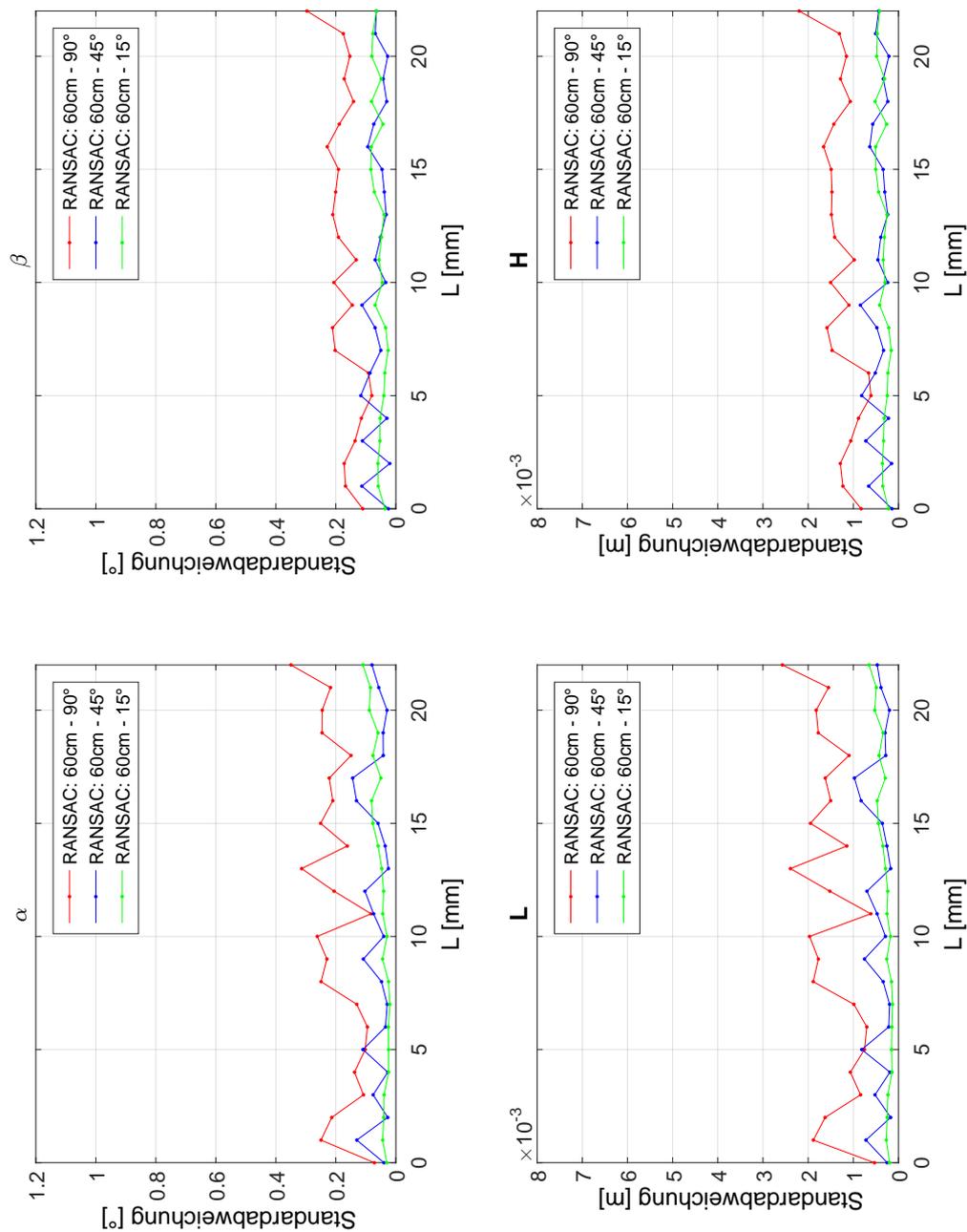


B.18: Standardabweichung der Auswertung mit dem 2D Zylinder-Fitting im 2m Rohr mit 15°/45°/90° Bogen und voreingestelltem Lagewinkel α .

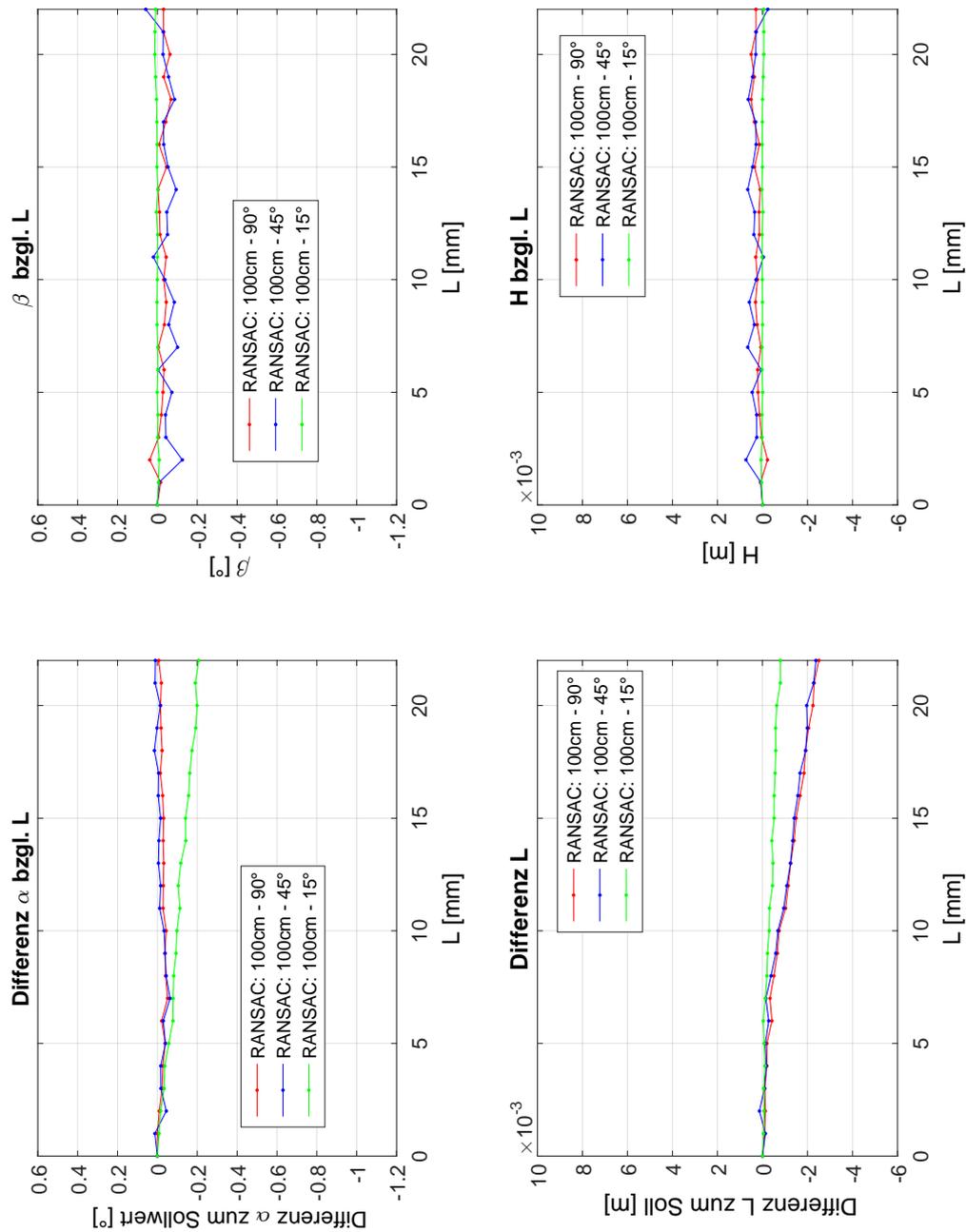
B.2 Änderung der Lageabweichung



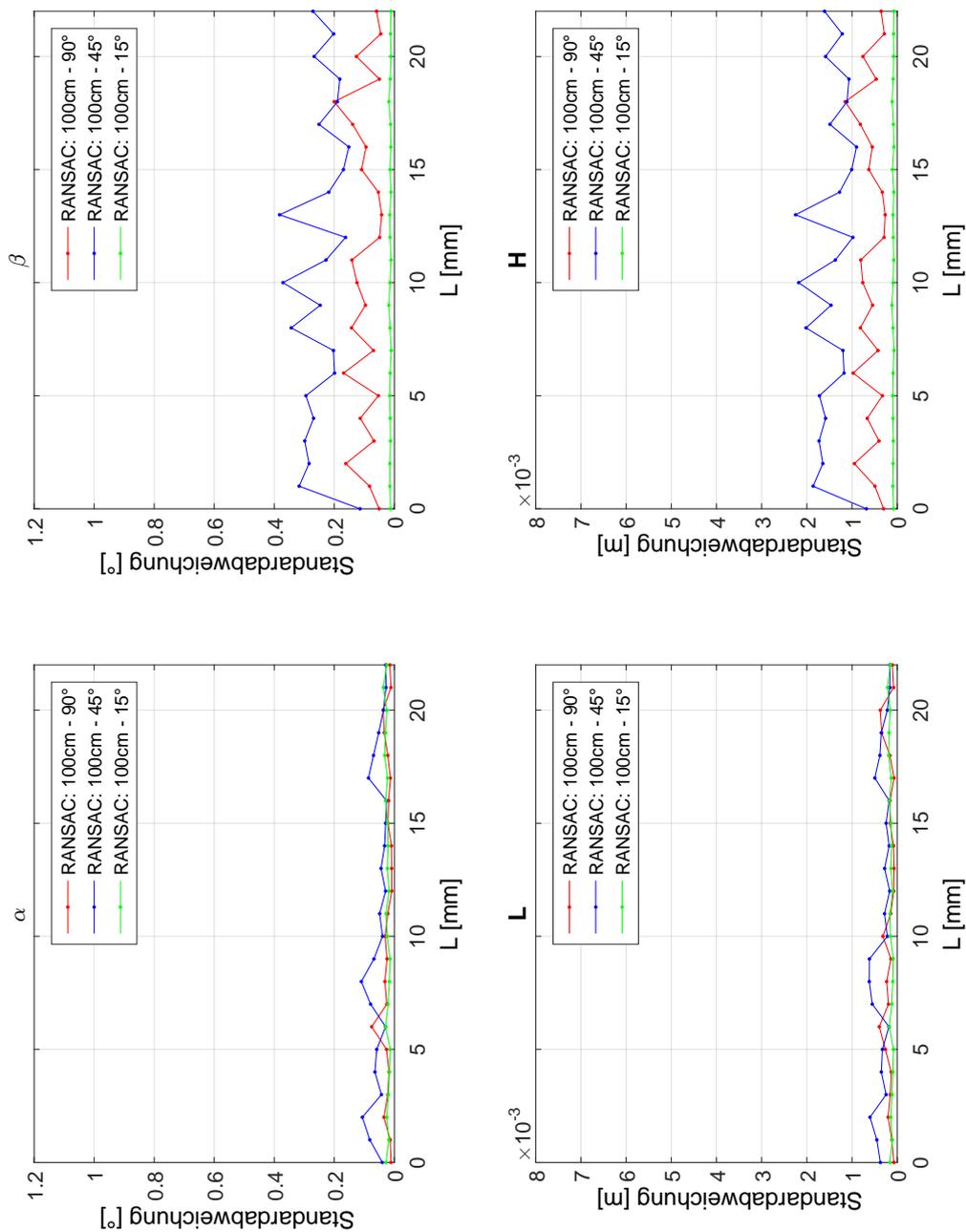
B.19: Auswertung mit RANSAC im 60cm Rohr mit 15°/45°/90° Bogen und voreingestellter Lageabweichung L .



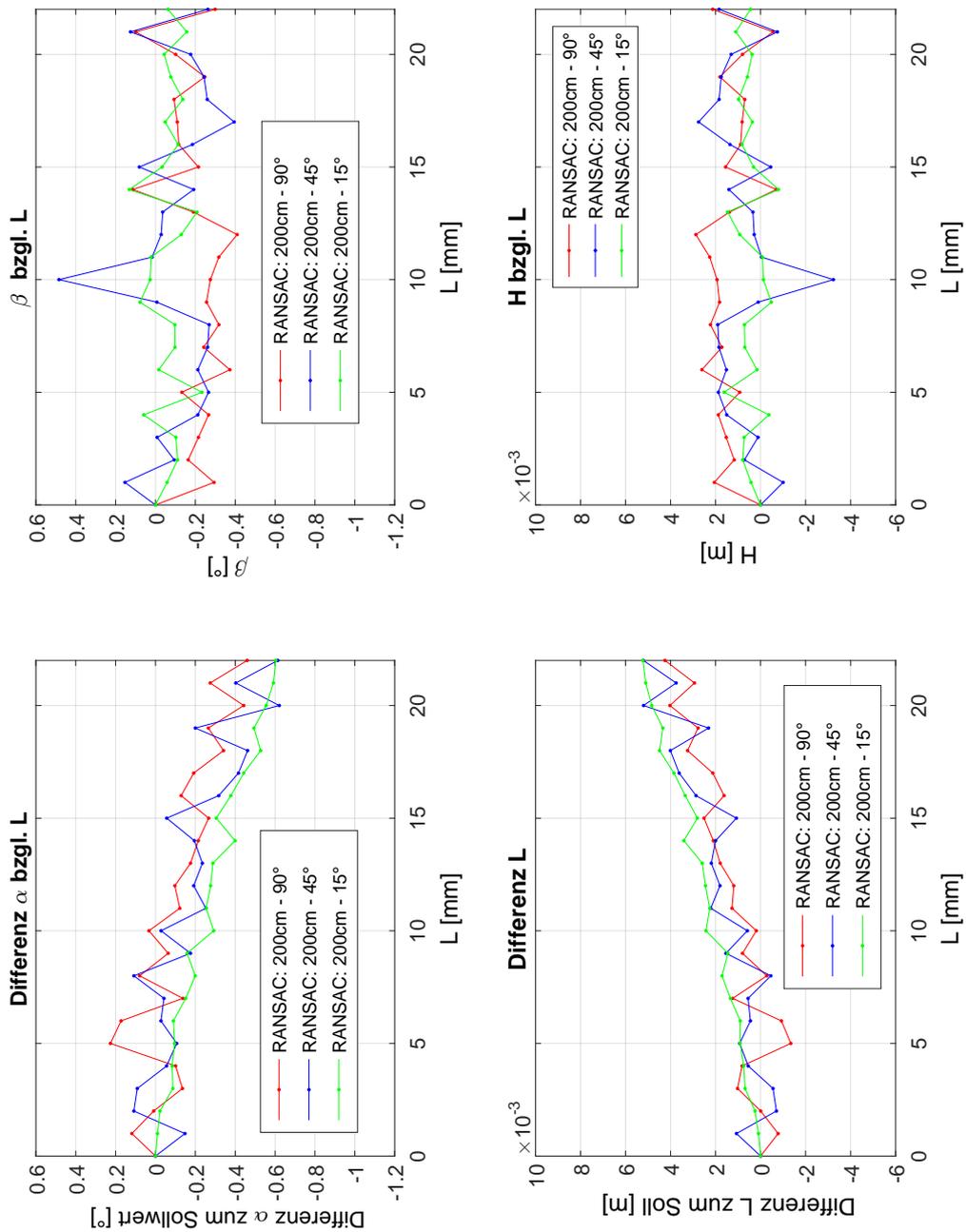
B.20: Standardabweichung der Auswertung mit RANSAC im 60cm Rohr mit 15°/45°/90° Bogen und voreingestellter Lageabweichung L .



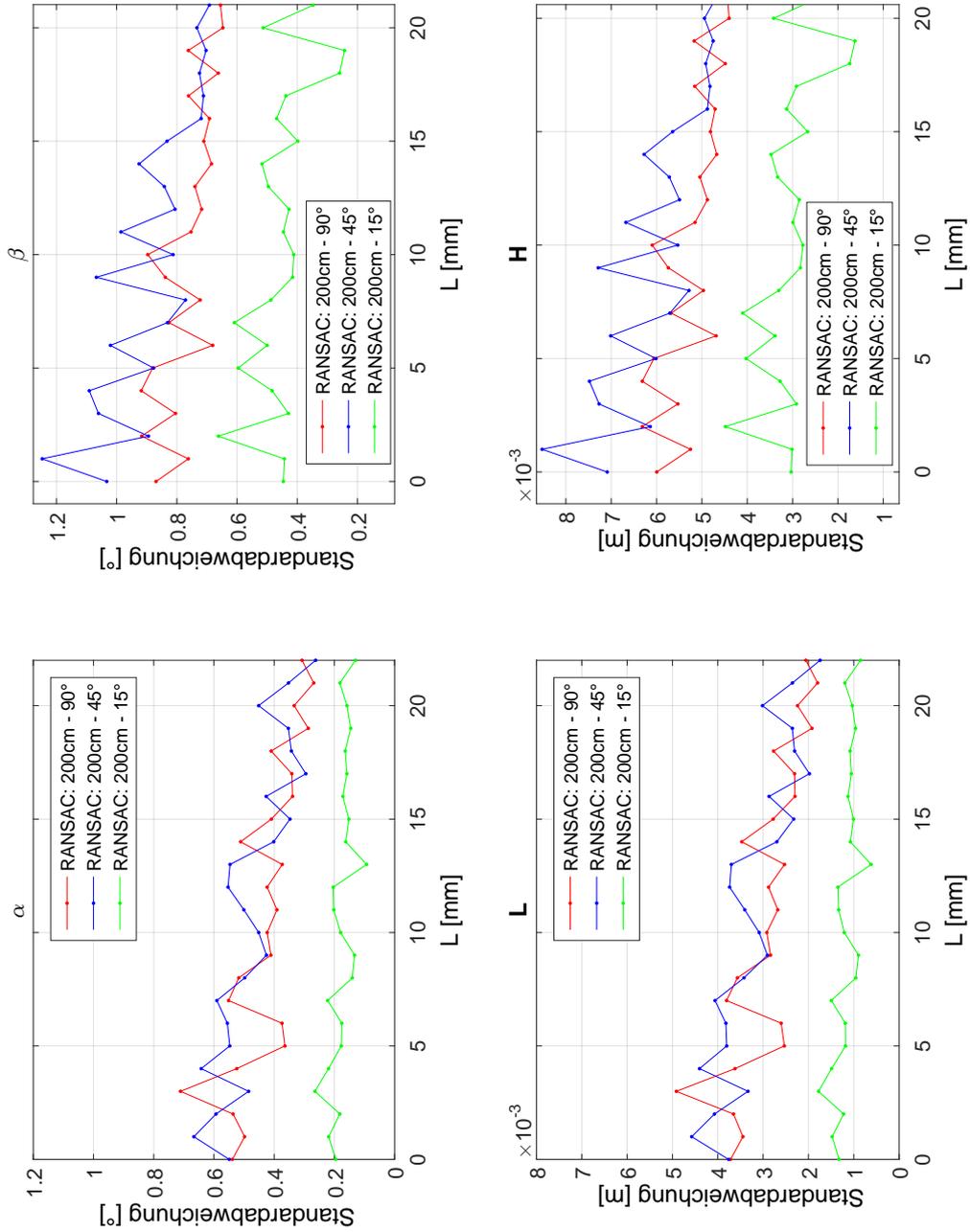
B.21: Auswertung mit RANSAC im 1m Rohr mit 15°/45°/90° Bogen und voreingestellter Lageabweichung L .



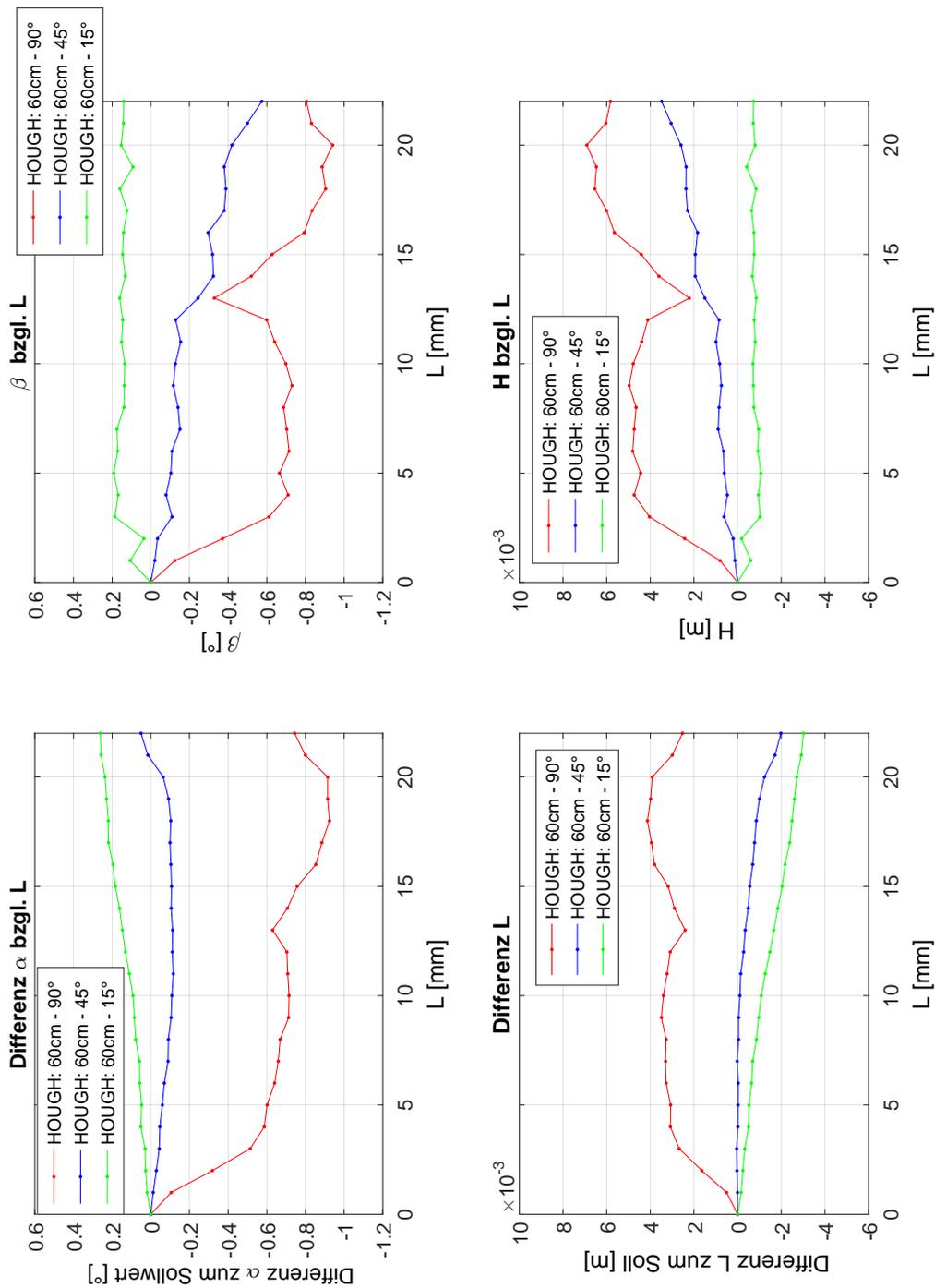
B.22: Standardabweichung der Auswertung mit RANSAC im 1m Rohr mit 15°/45°/90° Bogen und voreingestellter Lageabweichung L .



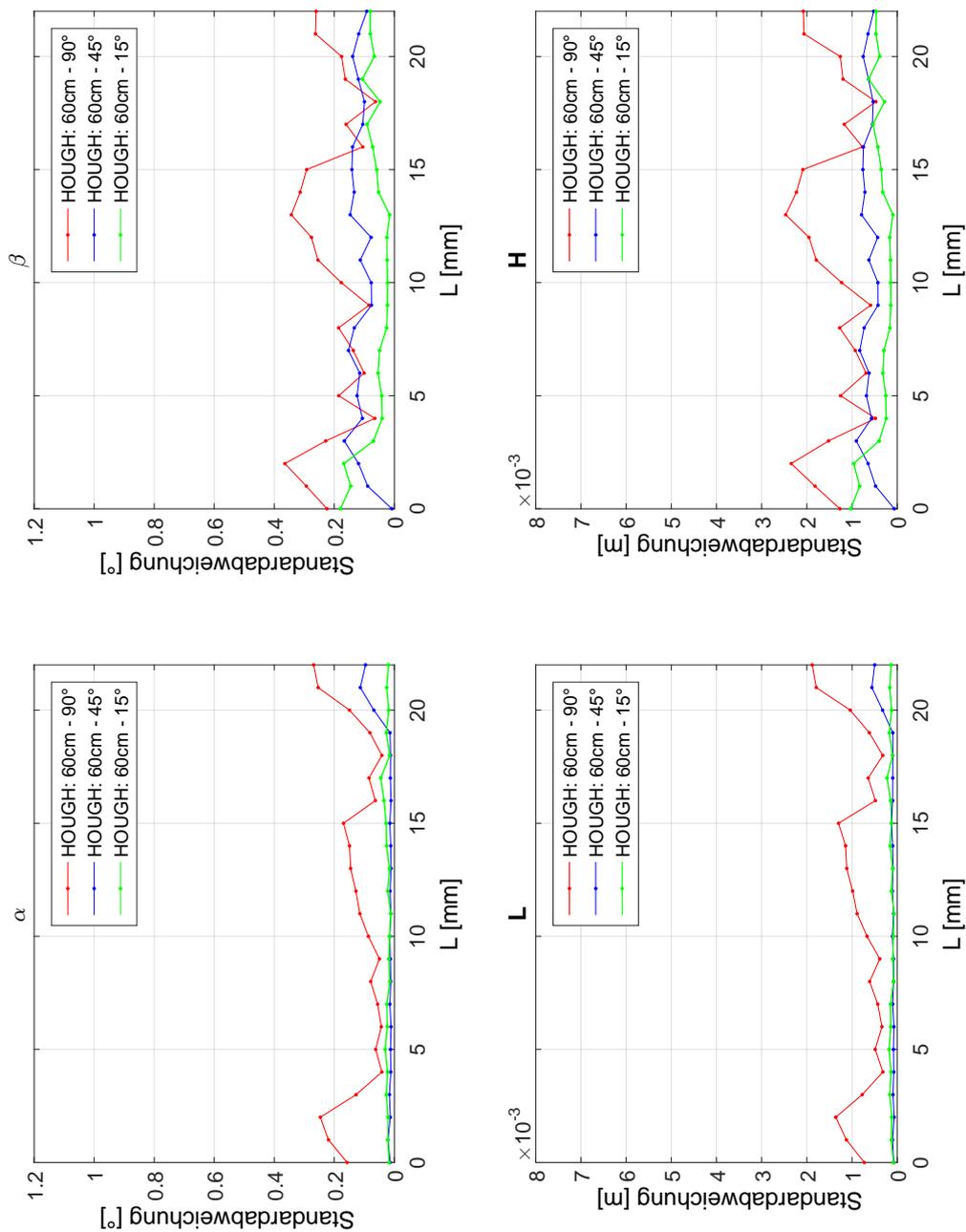
B.23: Auswertung mit RANSAC im 2m Rohr mit 15°/45°/90° Bogen und voreingestellter Lageabweichung L .



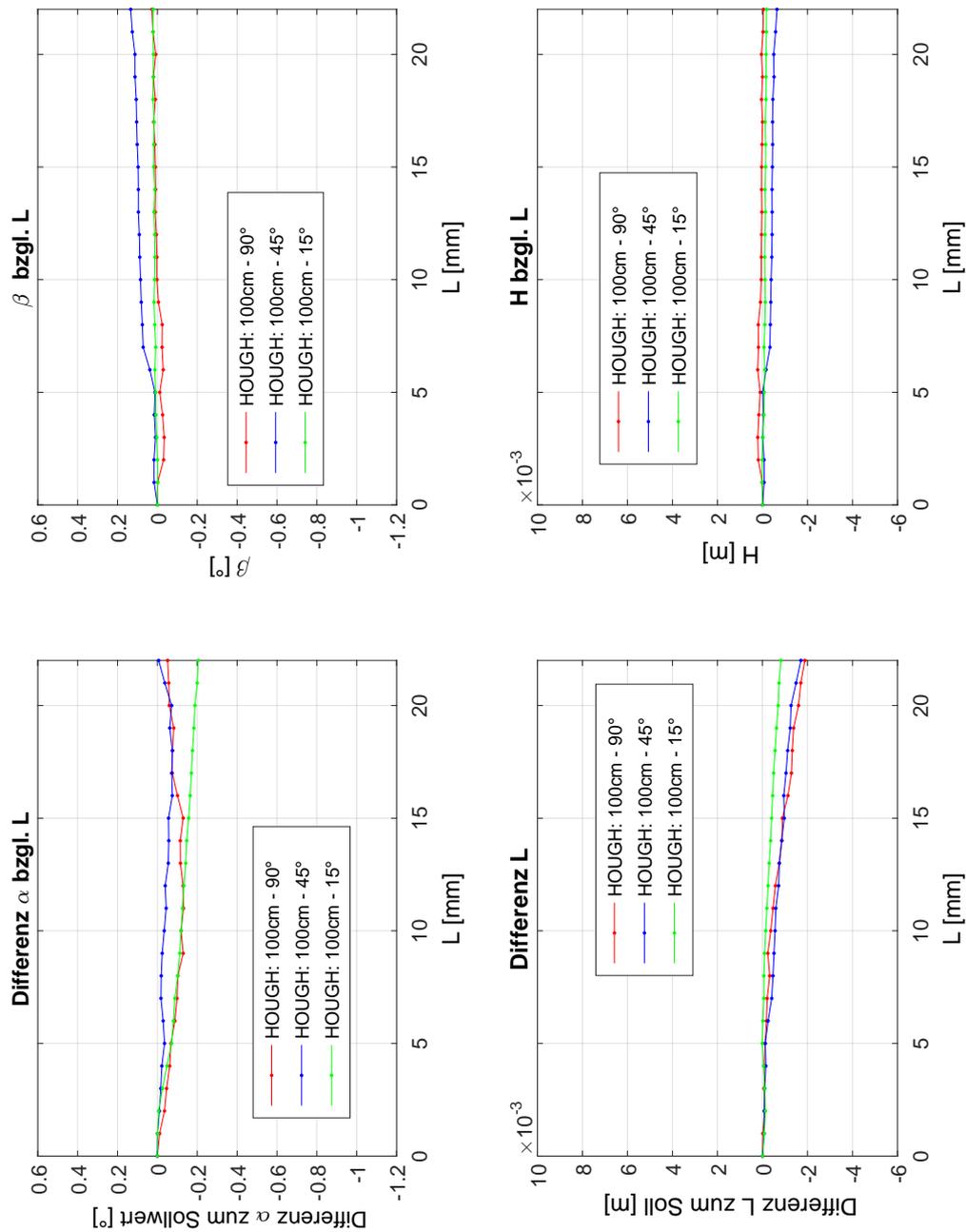
B.24: Standardabweichung der Auswertung mit RANSAC im 2m Rohr mit 15°/45°/90° Bogen und voreingestellter Lageabweichung L .



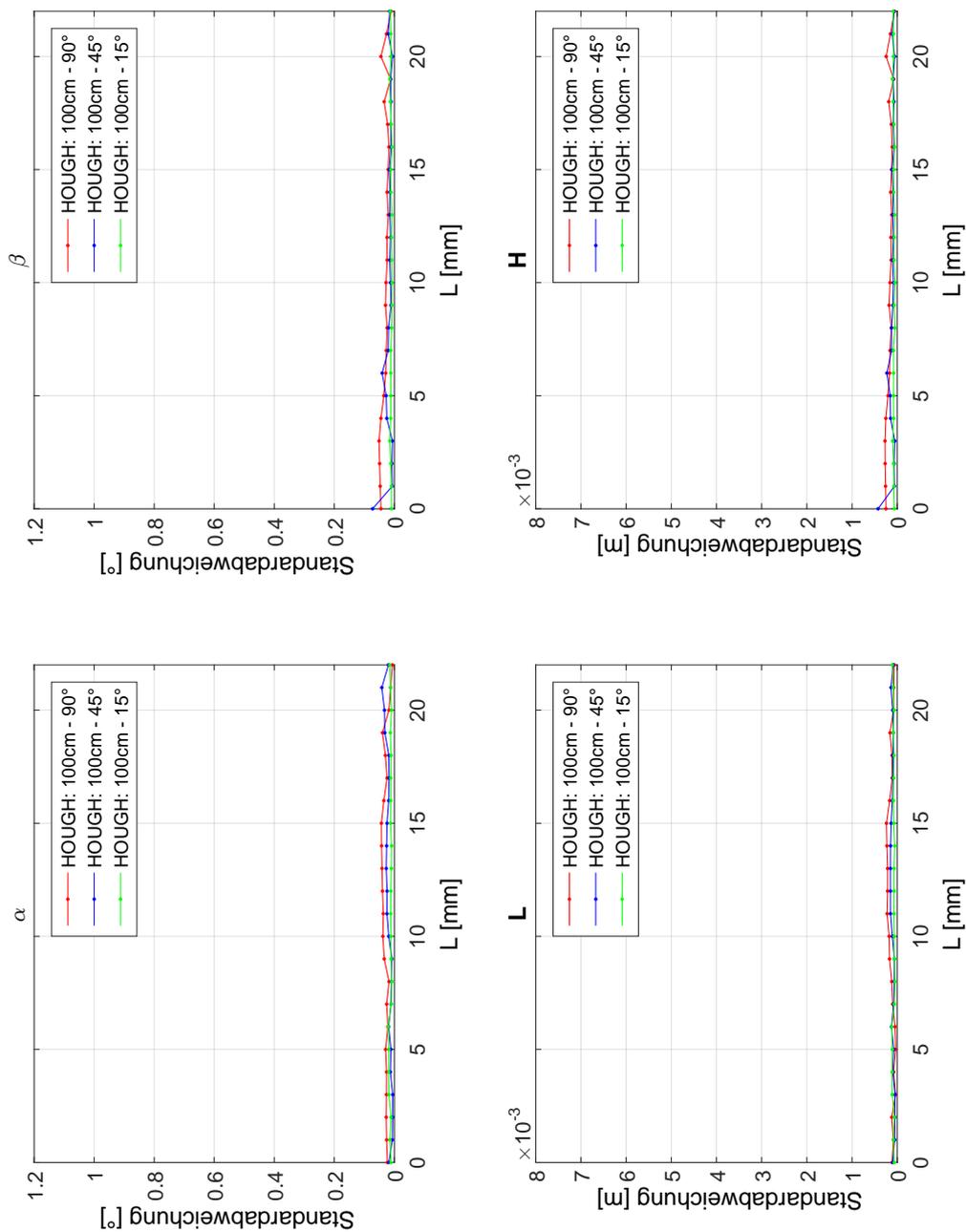
B.25: Auswertung mit der Hough-Transformation im 60cm Rohr mit $15^\circ/45^\circ/90^\circ$ Bogen und voreingestellter Lageabweichung L .



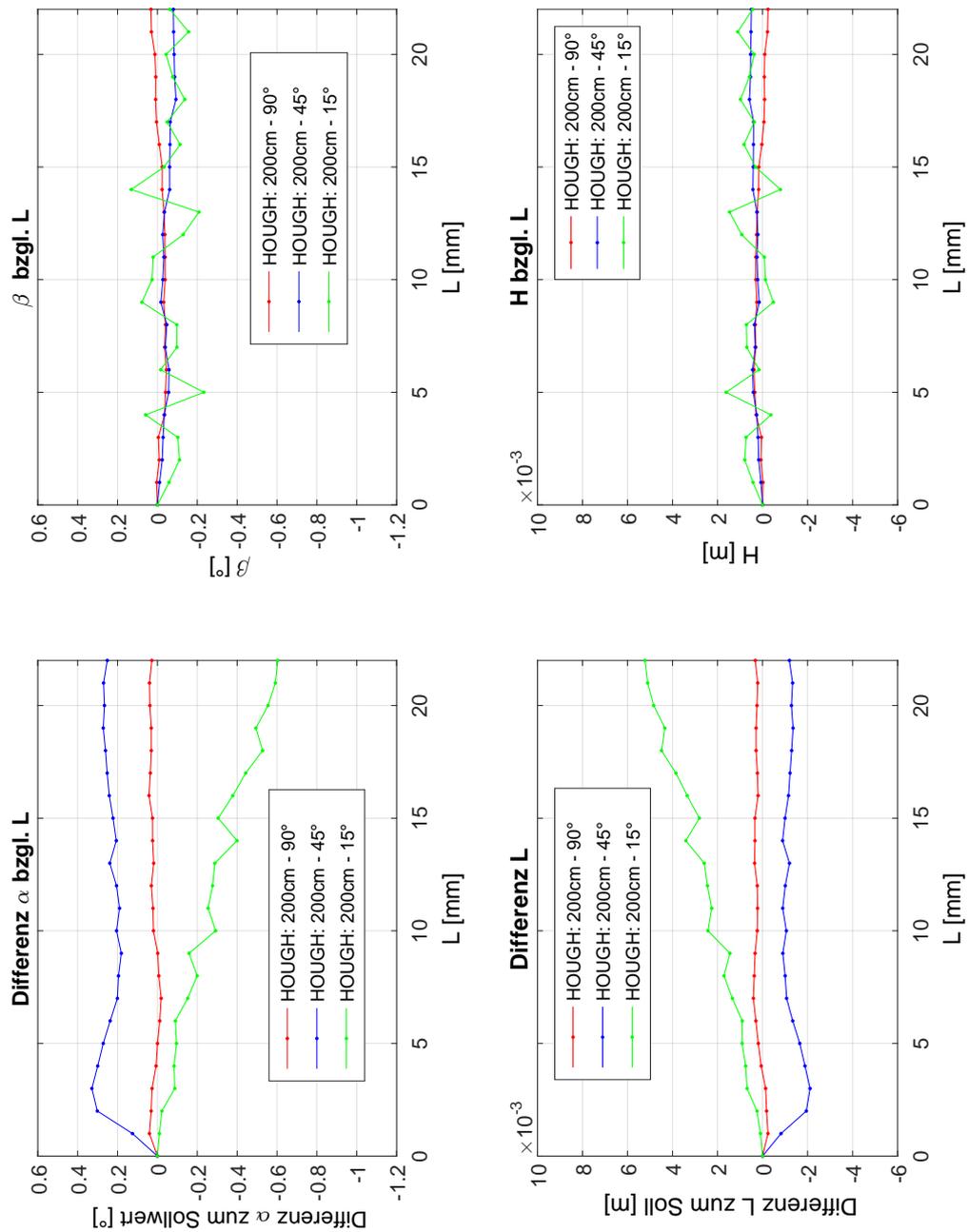
B.26: Standardabweichung der Auswertung mit der Hough-Transformation im 60cm Rohr mit $15^\circ/45^\circ/90^\circ$ Bogen und voreingestellter Lageabweichung L .



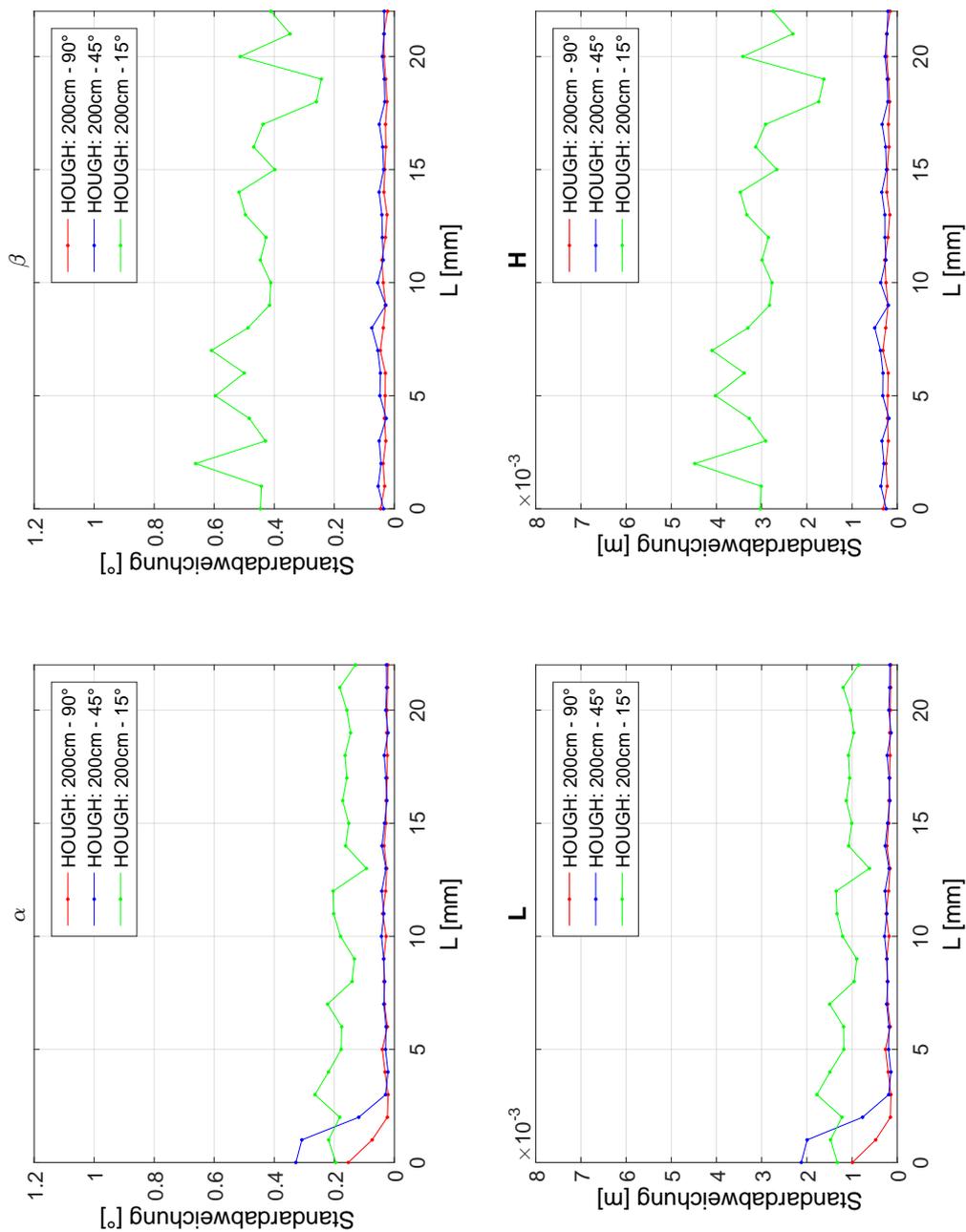
B.27: Auswertung mit der Hough-Transformation im 1m Rohr mit 15°/45°/90° Bogen und vor-eingestellter Lageabweichung L .



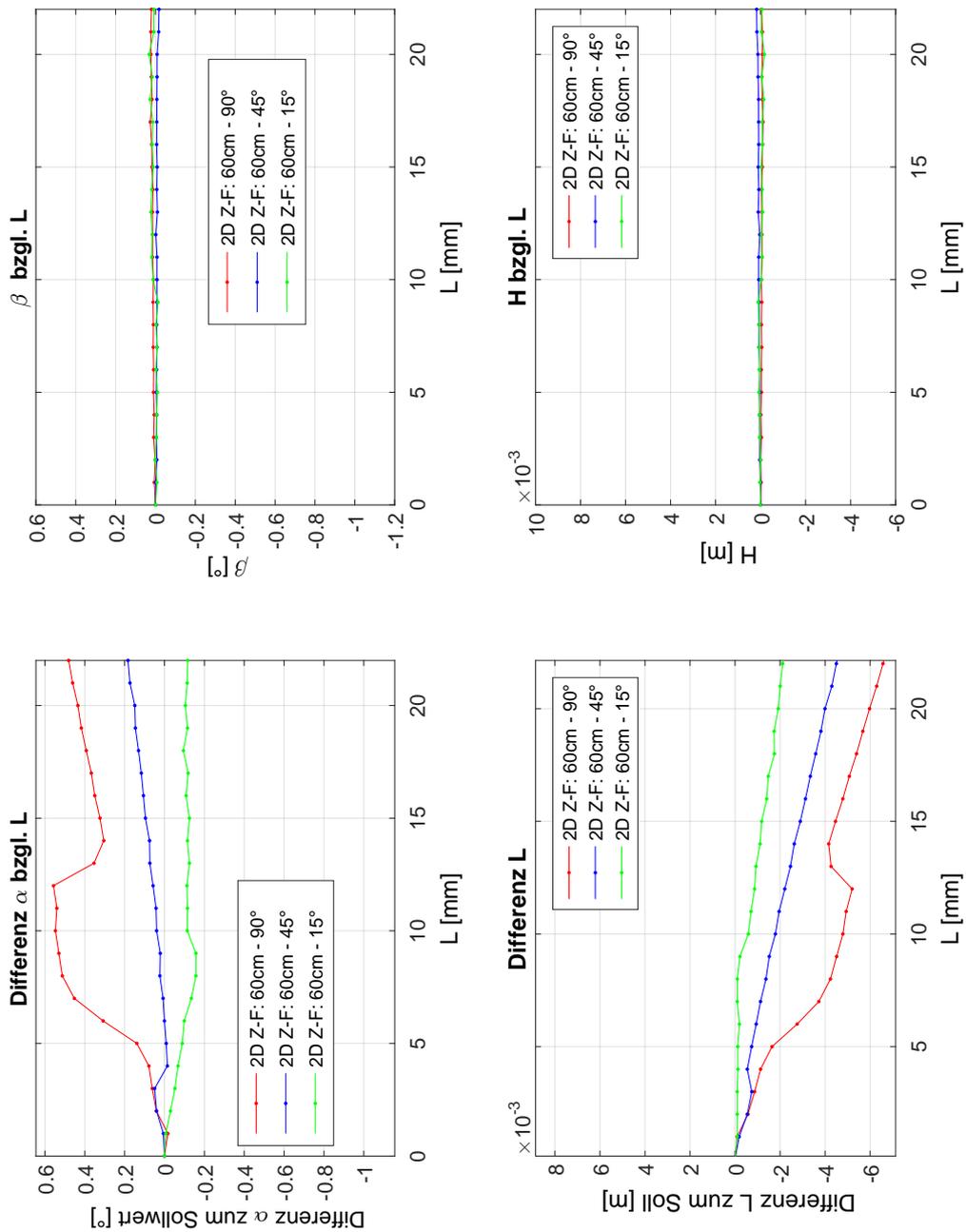
B.28: Standardabweichung der Auswertung mit der Hough-Transformation im 1m Rohr mit 15°/45°/90° Bogen und voreingestellter Lageabweichung L .



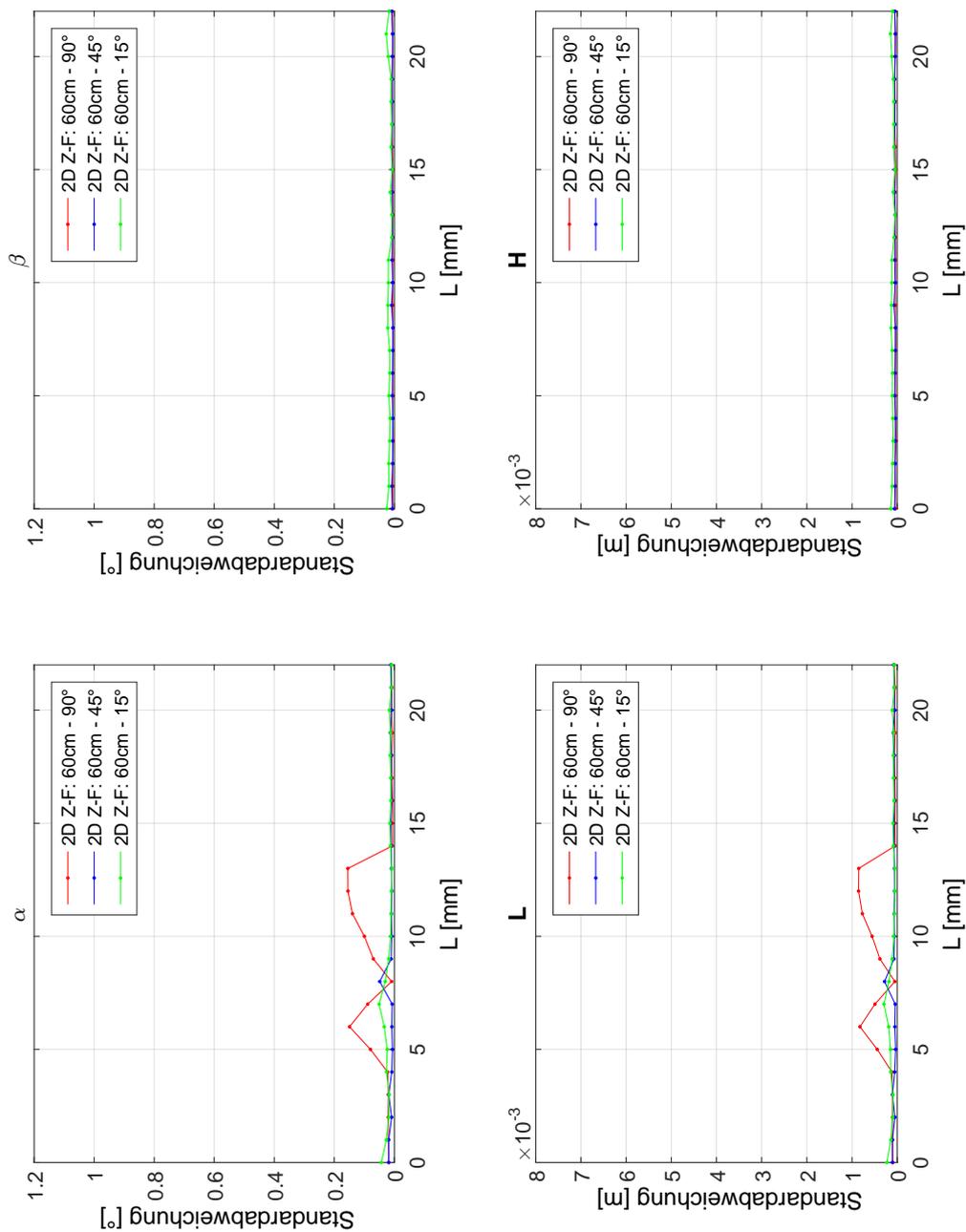
B.29: Auswertung mit der Hough-Transformation im 2m Rohr mit 15°/45°/90° Bogen und voreingestellter Lageabweichung L .



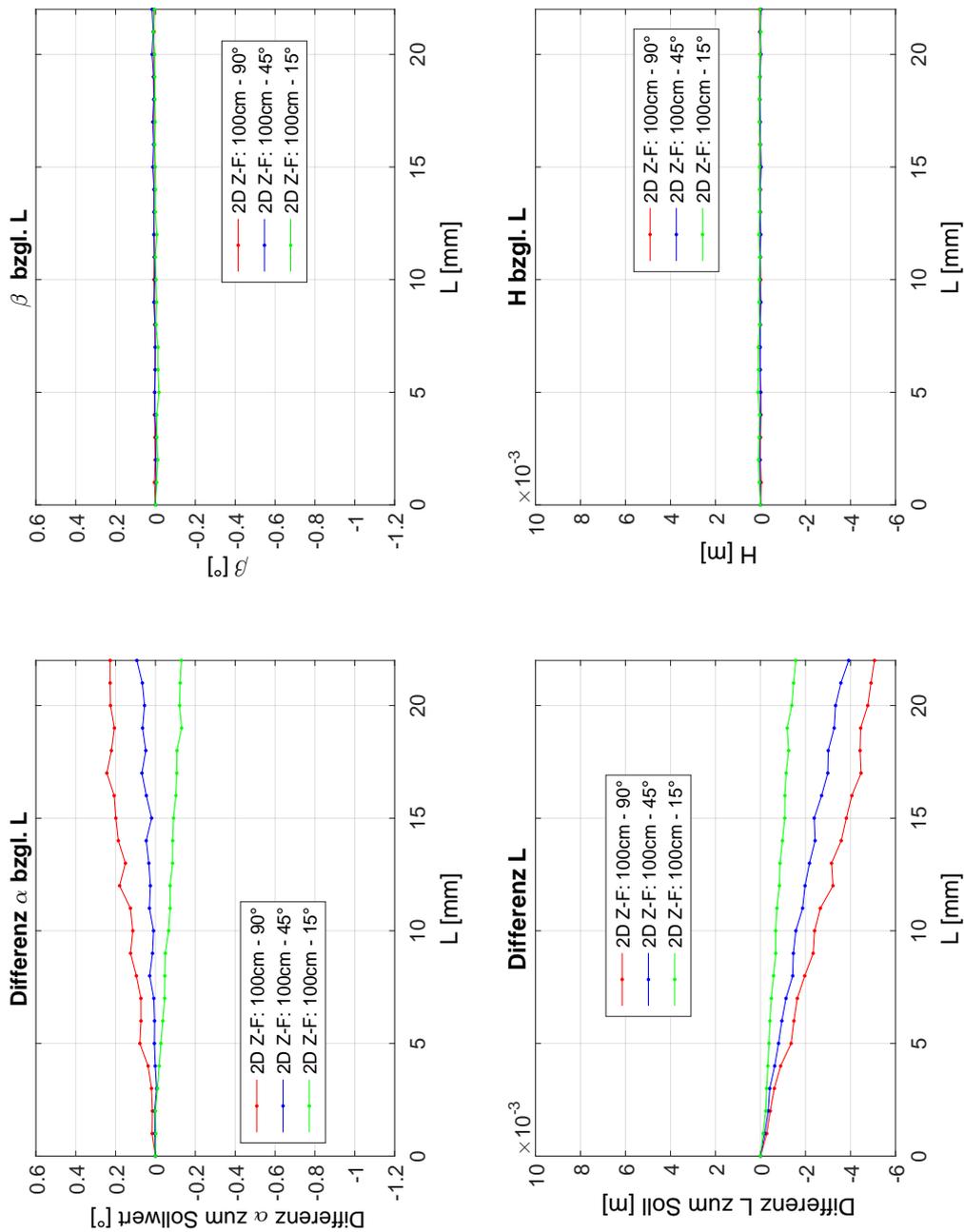
B.30: Standardabweichung der Auswertung mit der Hough-Transformation im 2m Rohr mit 15°/45°/90° Bogen und voreingestellter Lageabweichung L .



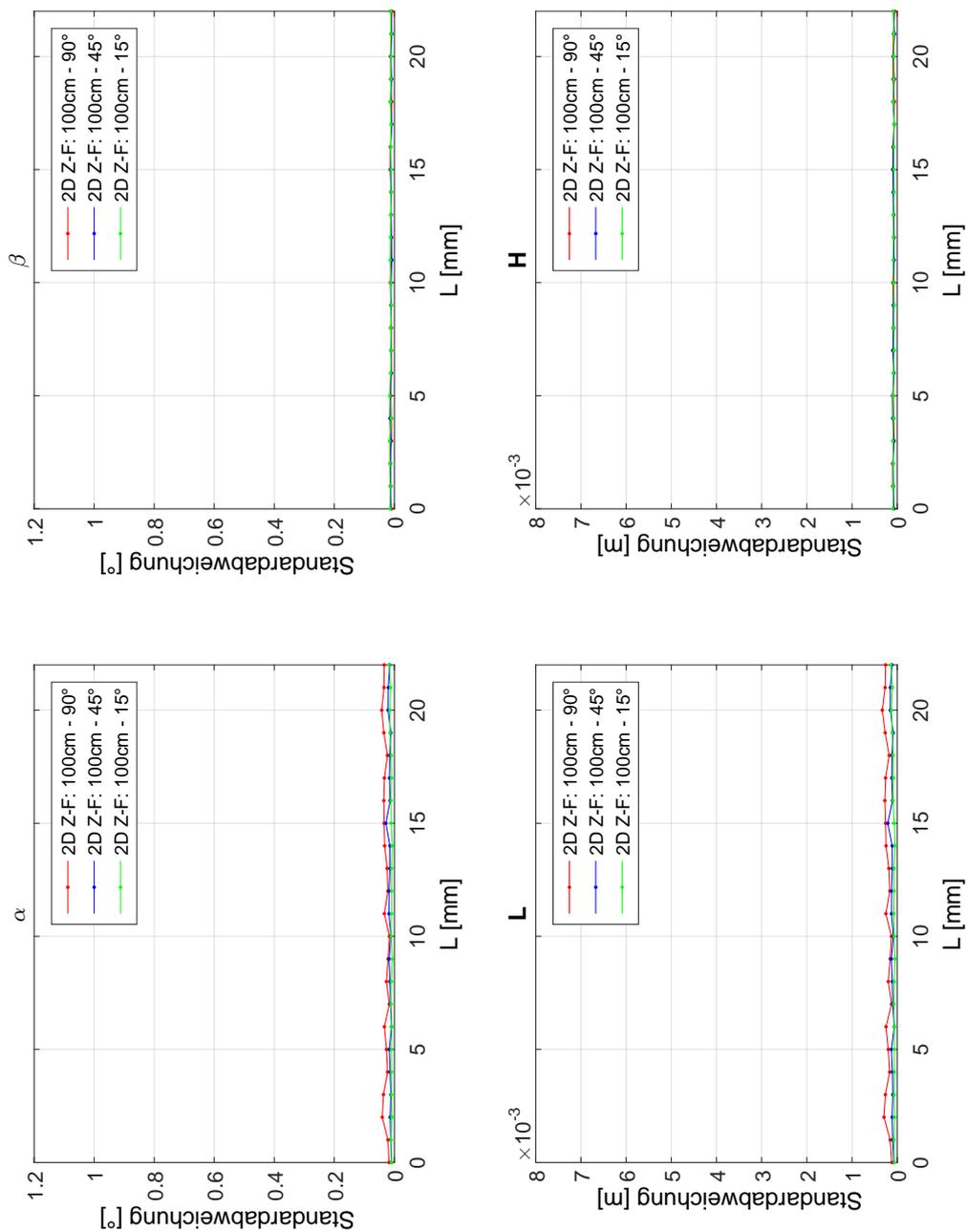
B.31: Auswertung mit dem 2D Zylinder-Fitting im 60cm Rohr mit 15°/45°/90° Bogen und vor-eingestellter Lageabweichung L .



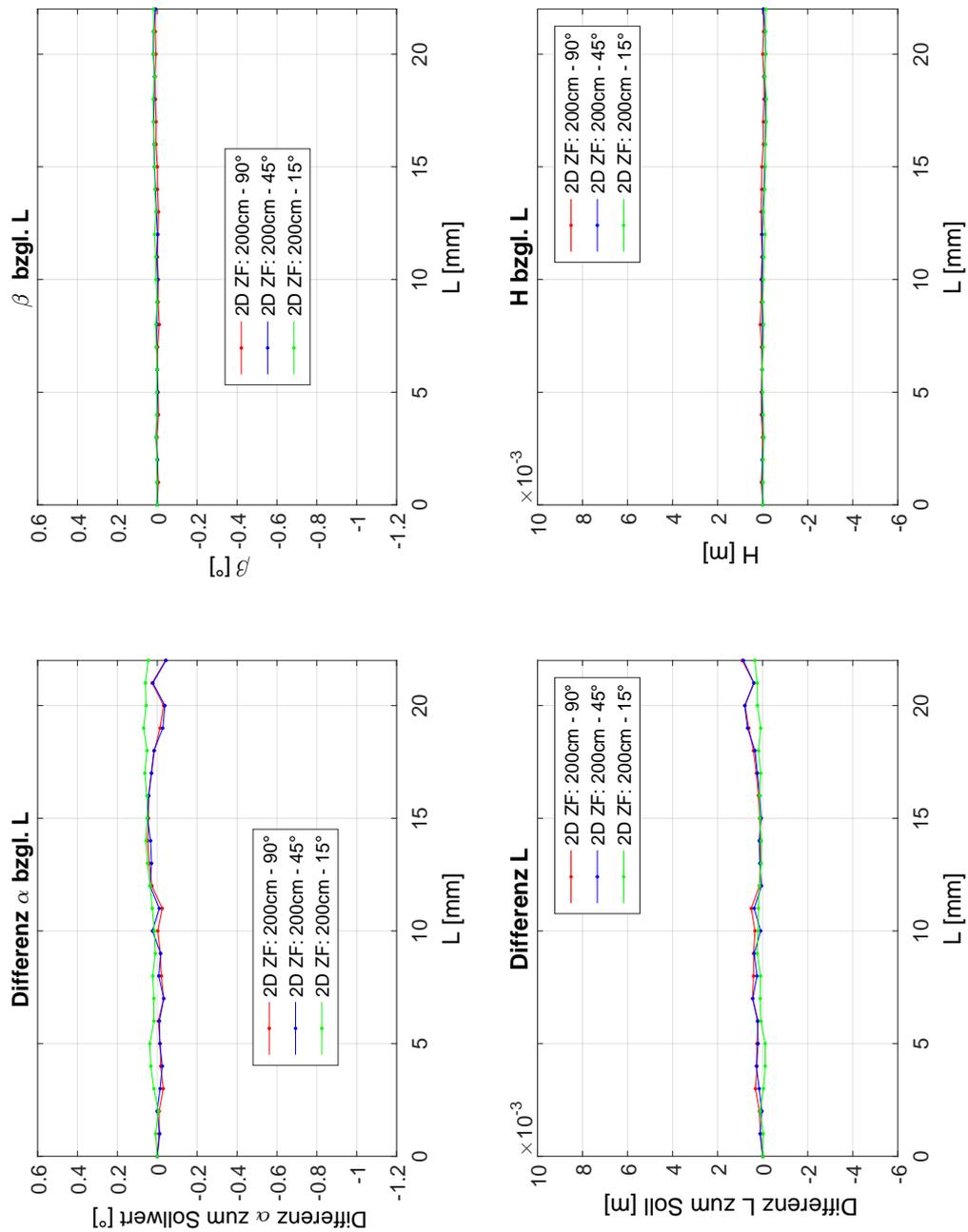
B.32: Standardabweichung der Auswertung mit dem 2D Zylinder-Fitting im 60cm Rohr mit $15^\circ/45^\circ/90^\circ$ Bogen und voreingestellter Lageabweichung L .



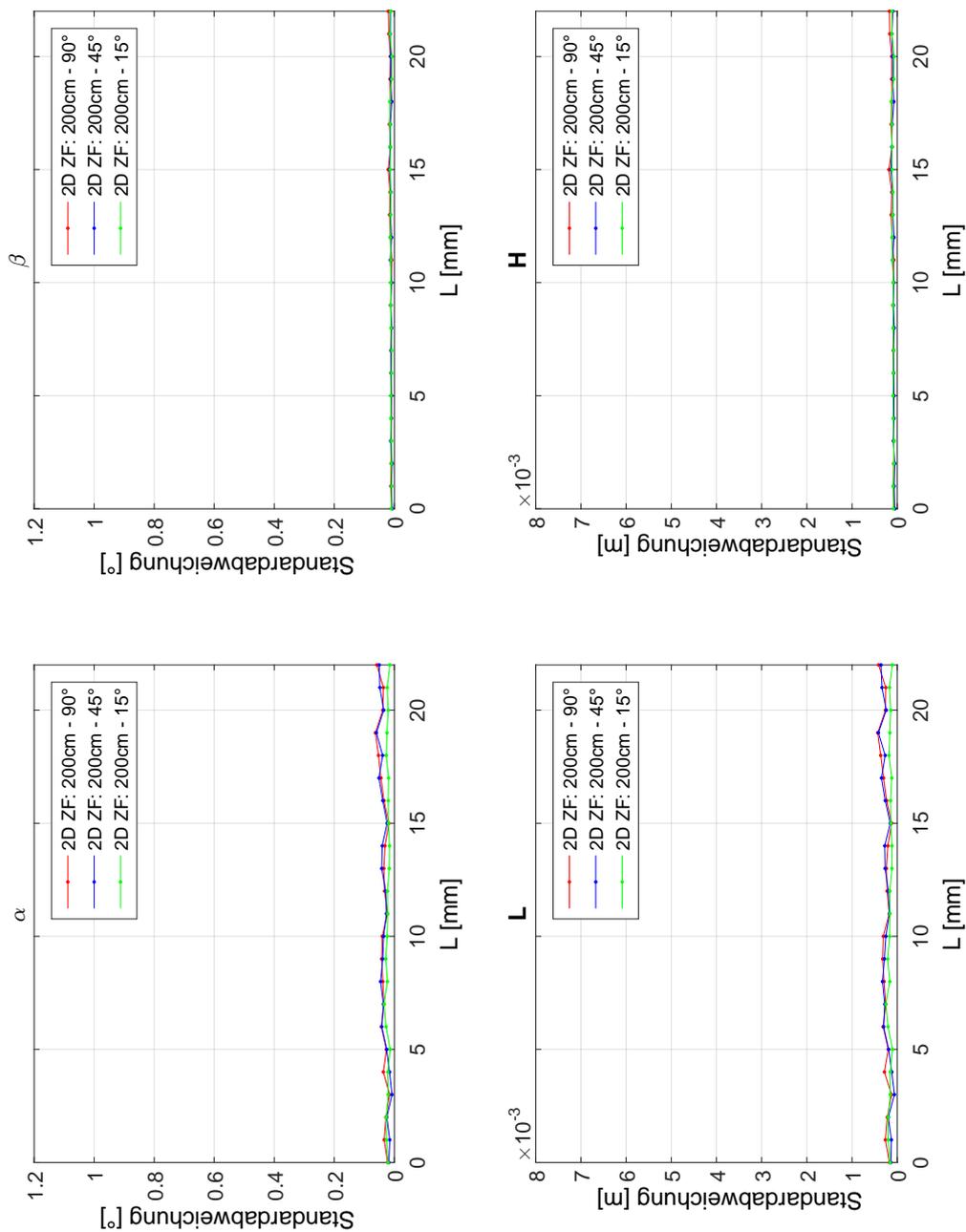
B.33: Auswertung mit dem 2D Zylinder-Fitting im 1m Rohr mit 15°/45°/90° Bogen und voreingestellter Lageabweichung L .



B.34: Standardabweichung der Auswertung mit dem 2D Zylinder-Fitting im 1m Rohr mit $15^\circ/45^\circ/90^\circ$ Bogen und voreingestellter Lageabweichung L .

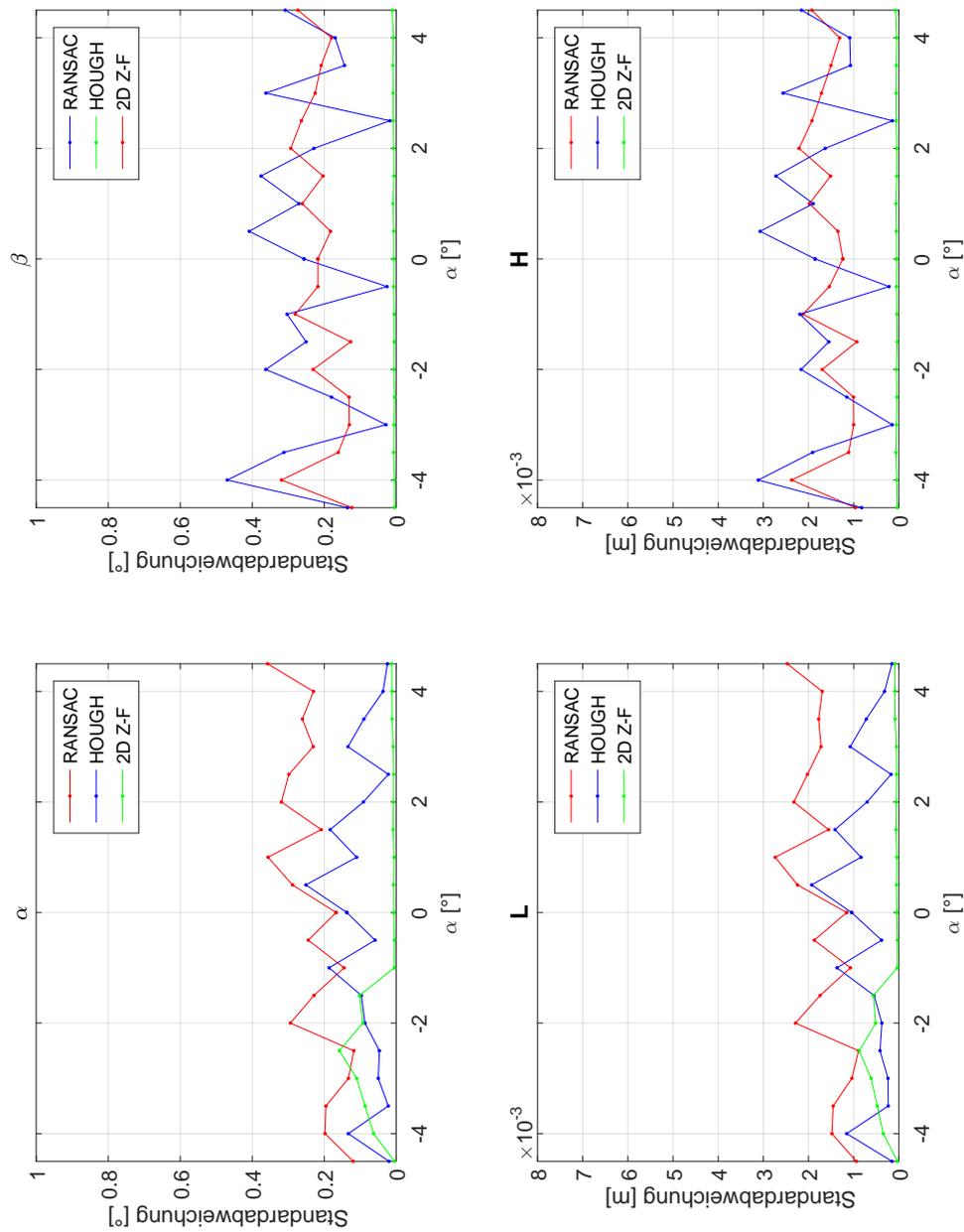


B.35: Auswertung mit dem 2D Zylinder-Fitting im 2m Rohr mit $15^\circ/45^\circ/90^\circ$ Bogen und voreingestellter Lageabweichung L .

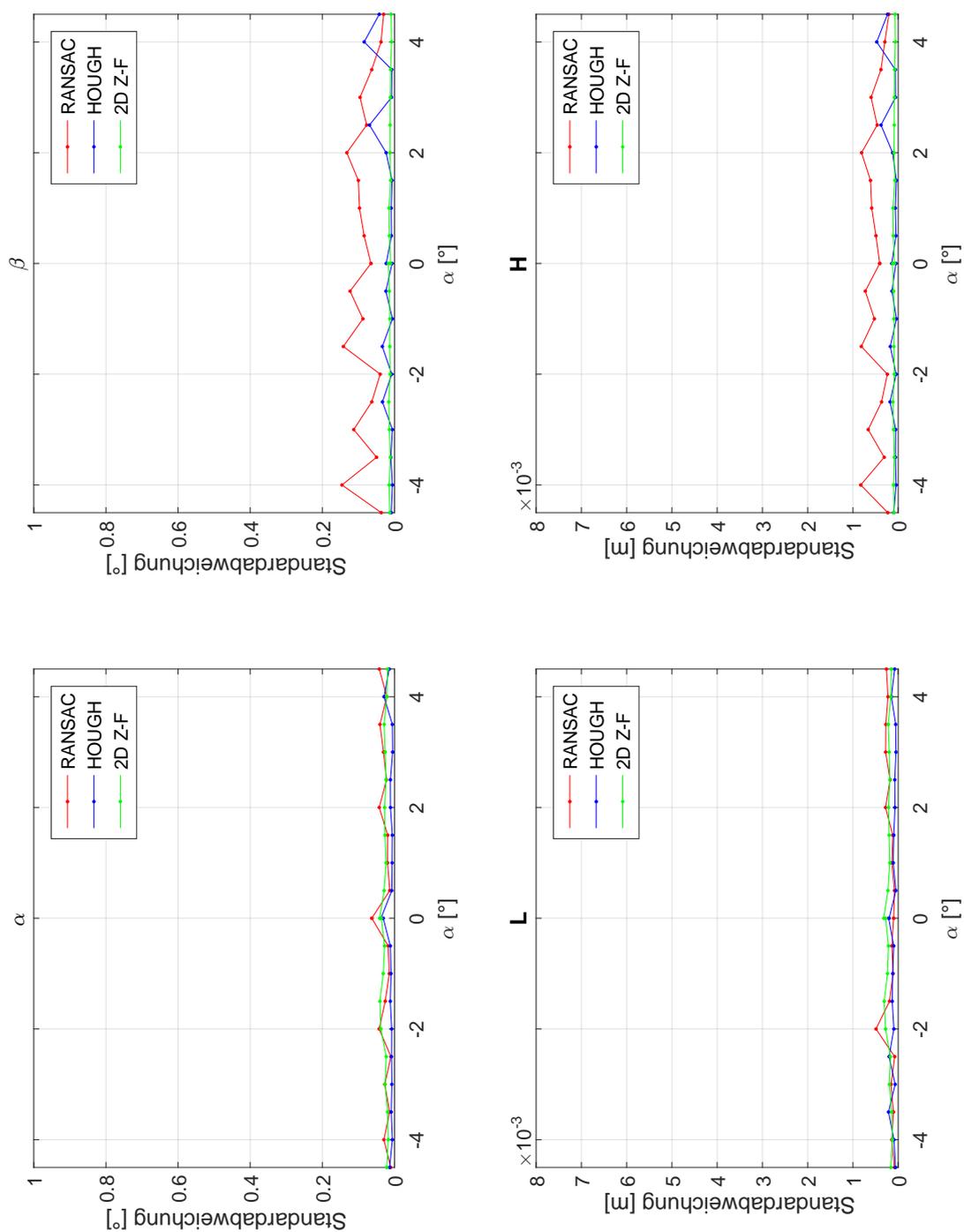


B.36: Standardabweichung der Auswertung mit dem 2D Zylinder-Fitting im 2m Rohr mit $15^\circ/45^\circ/90^\circ$ Bogen und voreingestellter Lageabweichung L .

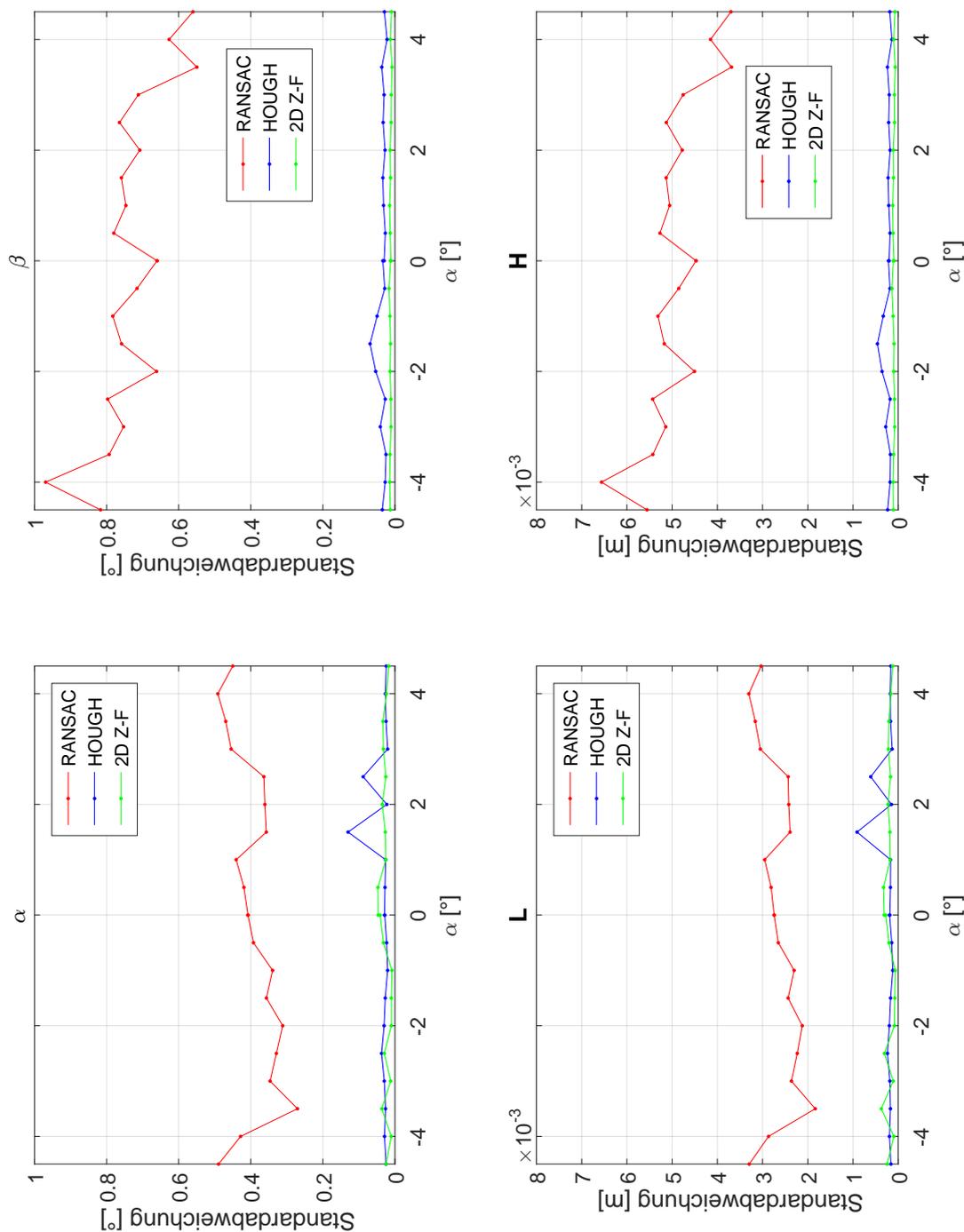
B.3 Kombinierte Änderung von Lagewinkel und Lageabweichung



B.37: Standardabweichung der Auswertung mit RANSAC/Hough-Transformation/2D Zylinder-Fitting im 60cm Rohr mit 90° Bogen und einer Kombination aus voreingestelltem Lagewinkel (-4,5° bis 4,5°) und Lageabweichung (17,81mm).



B.38: Standardabweichung der Auswertung mit RANSAC/Hough-Transformation/2D Zylinder-Fitting im 1m Rohr mit 90° Bogen und einer Kombination aus voreingestelltem Lagewinkel (-4,5° bis 4,5°) und Lageabweichung (15,55mm).

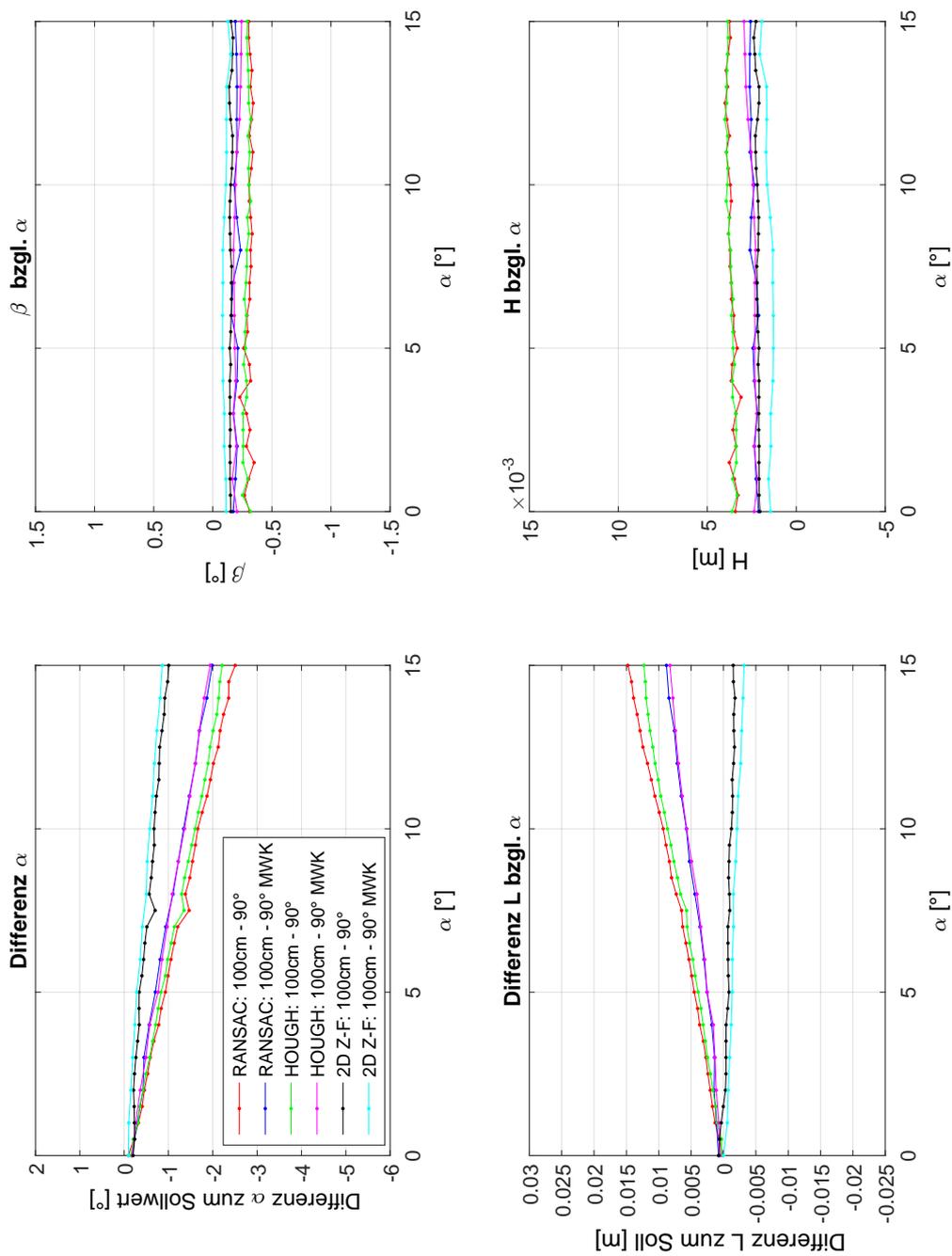


B.39: Standardabweichung der Auswertung mit RANSAC/Hough-Transformation/2D Zylinder-Fitting im 2m Rohr mit 90° Bogen und einer Kombination aus voreingestelltem Lagewinkel (-4,5° bis 4,5°) und Lageabweichung (18,19mm).

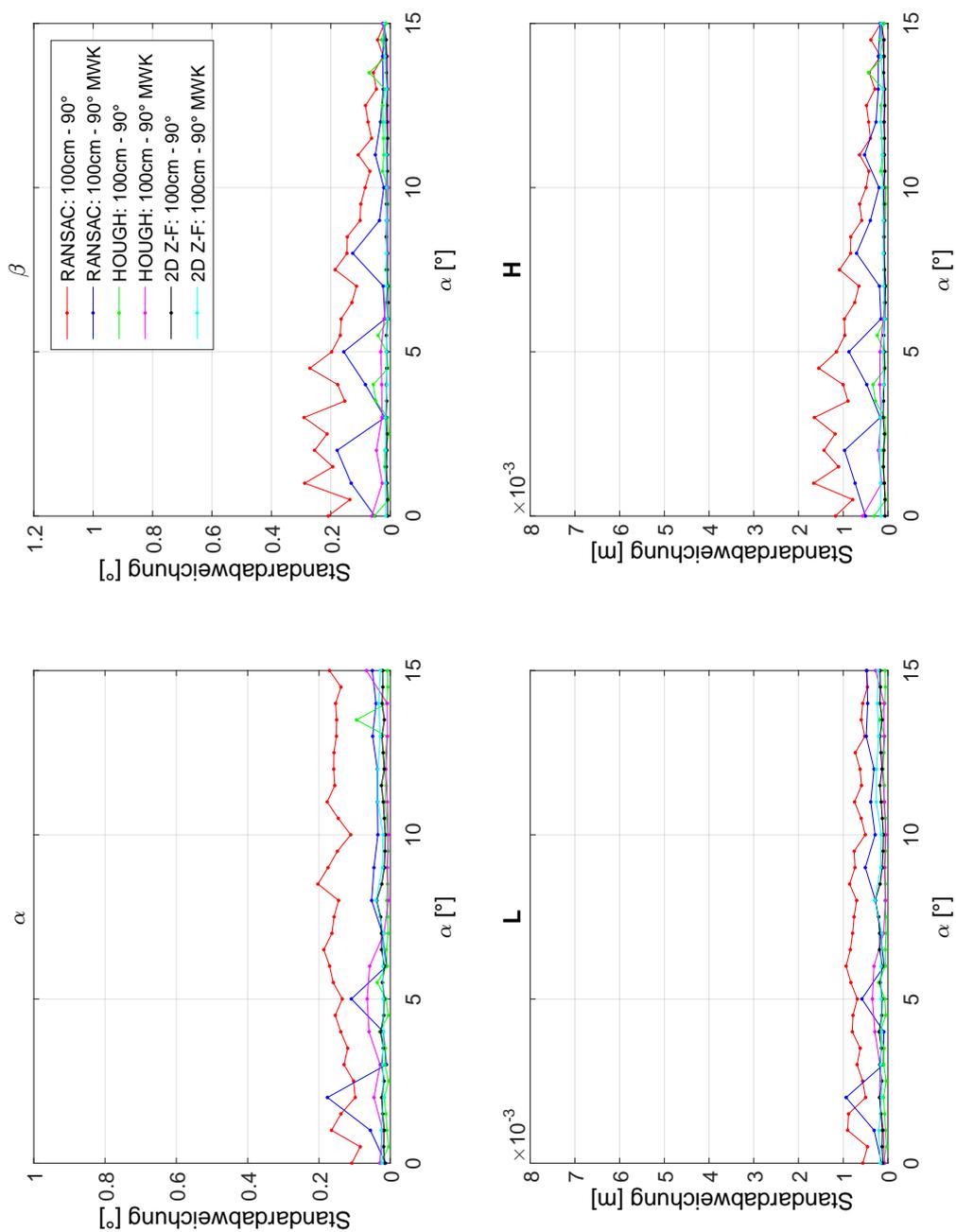
Anhang C

Mehrwegkorrektur

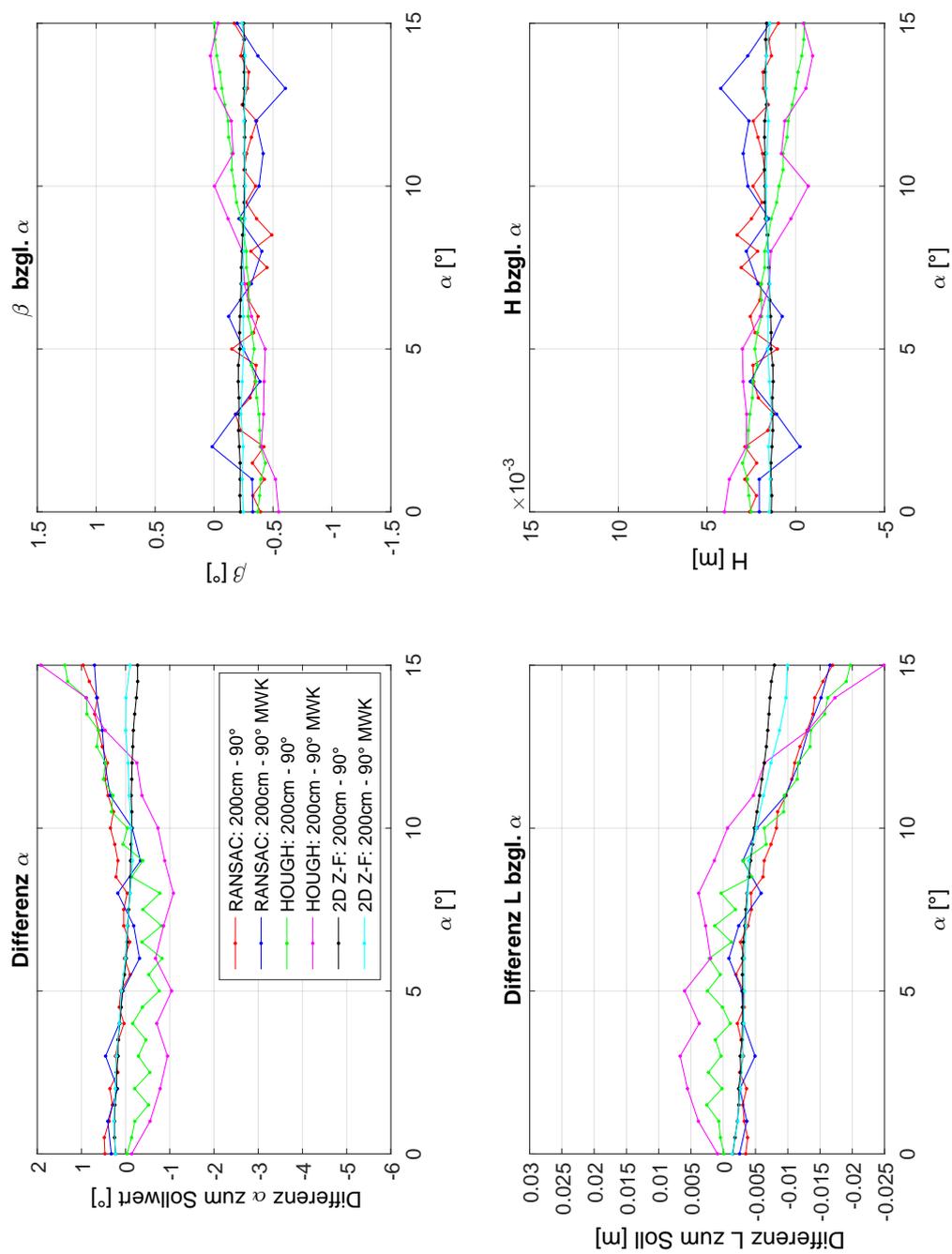
C.1 Änderung des Lagewinkels



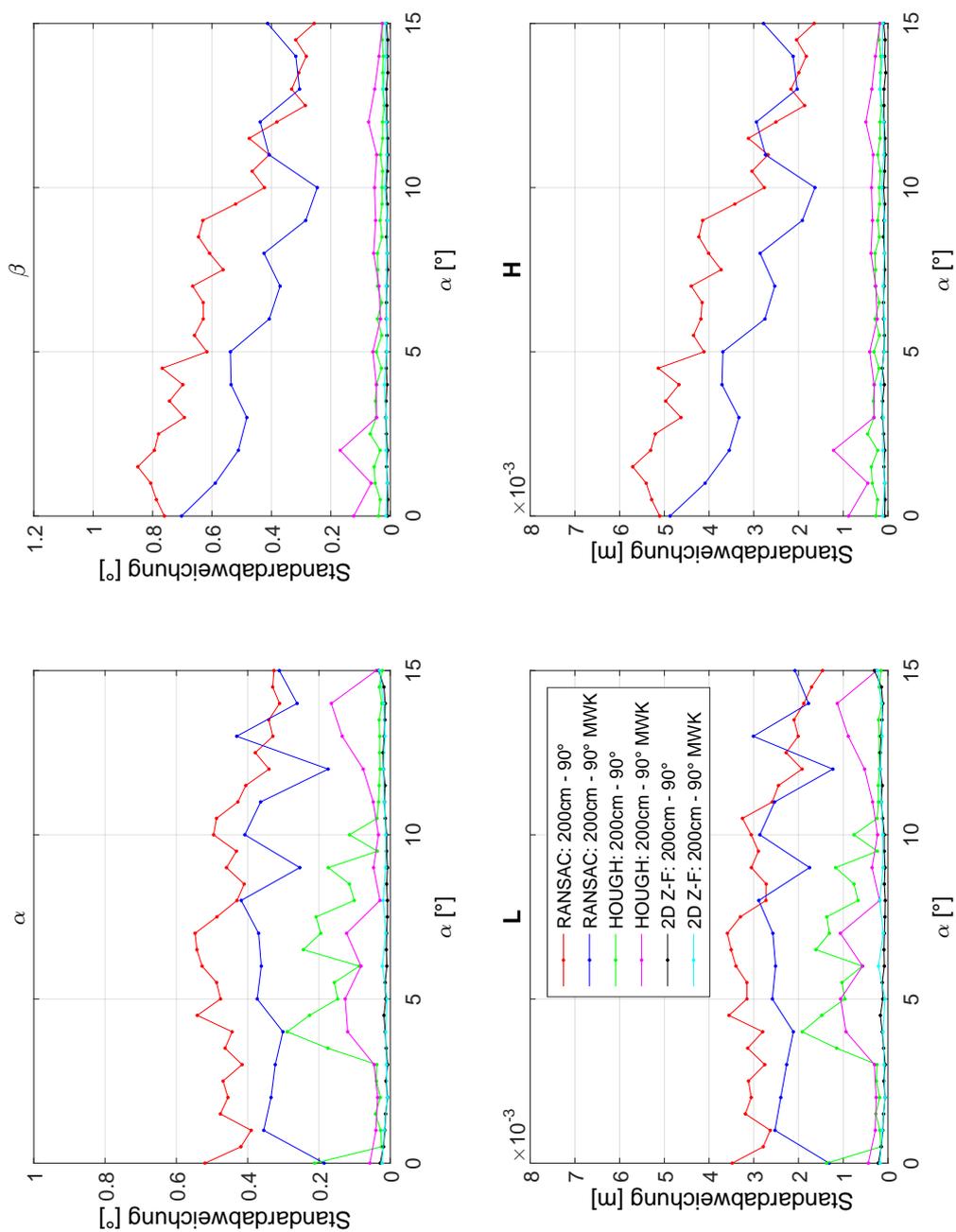
C.1: Auswertung mit RANSAC/Hough-Transformation/2D Zylinder-Fitting im 1m Rohr mit 90° Bogen und voreingestelltem Lagewinkel α und Mehrwegkorrektur (MWK).



C.2: Standardabweichung der Auswertung mit RANSAC/Hough-Transformation/2D Zylinder-Fitting im 1m Rohr mit 90° Bogen und voreingestelltem Lagewinkel α und Mehrwegkorrektur (MWK).

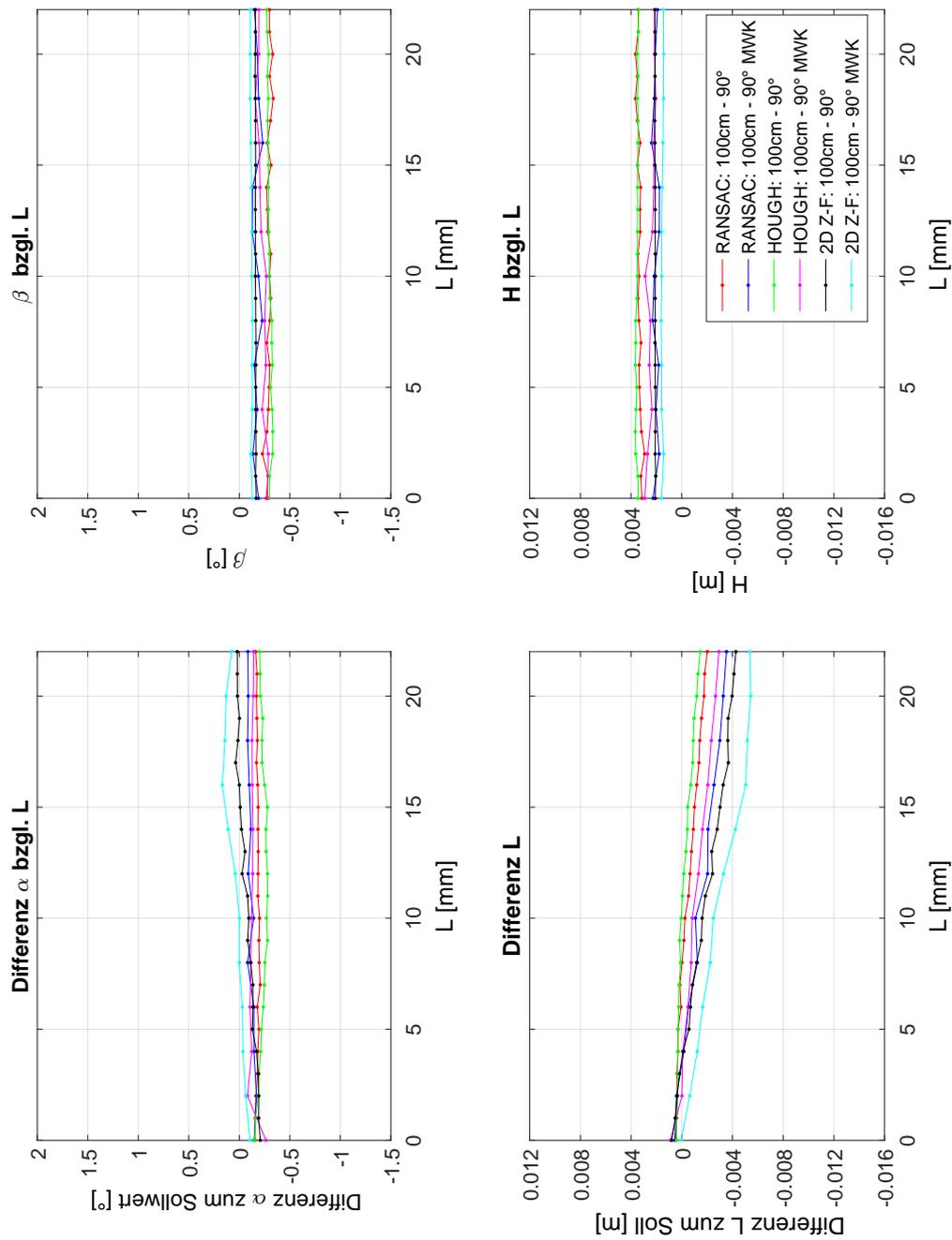


C.3: Auswertung mit RANSAC/Hough-Transformation/2D Zylinder-Fitting im 2m Rohr mit 90° Bogen und voreingestelltem Lagewinkel α und Mehrwegkorrektur (MWK).

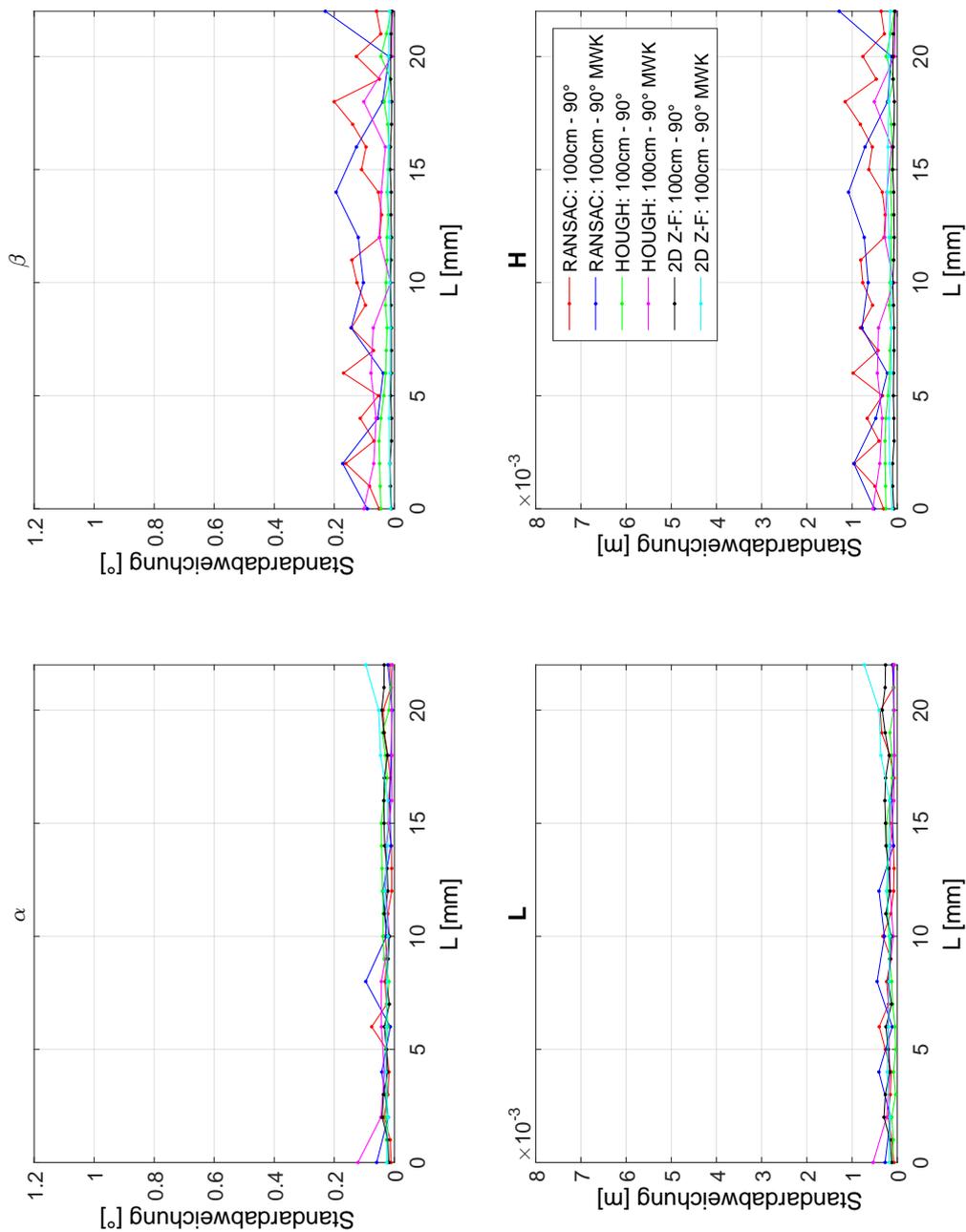


C.4: Standardabweichung der Auswertung mit RANSAC/Hough-Transformation/2D Zylinder-Fitting im 2m Rohr mit 90° Bogen und voreingestelltem Lagewinkel α und Mehrwegkorrektur (MWK).

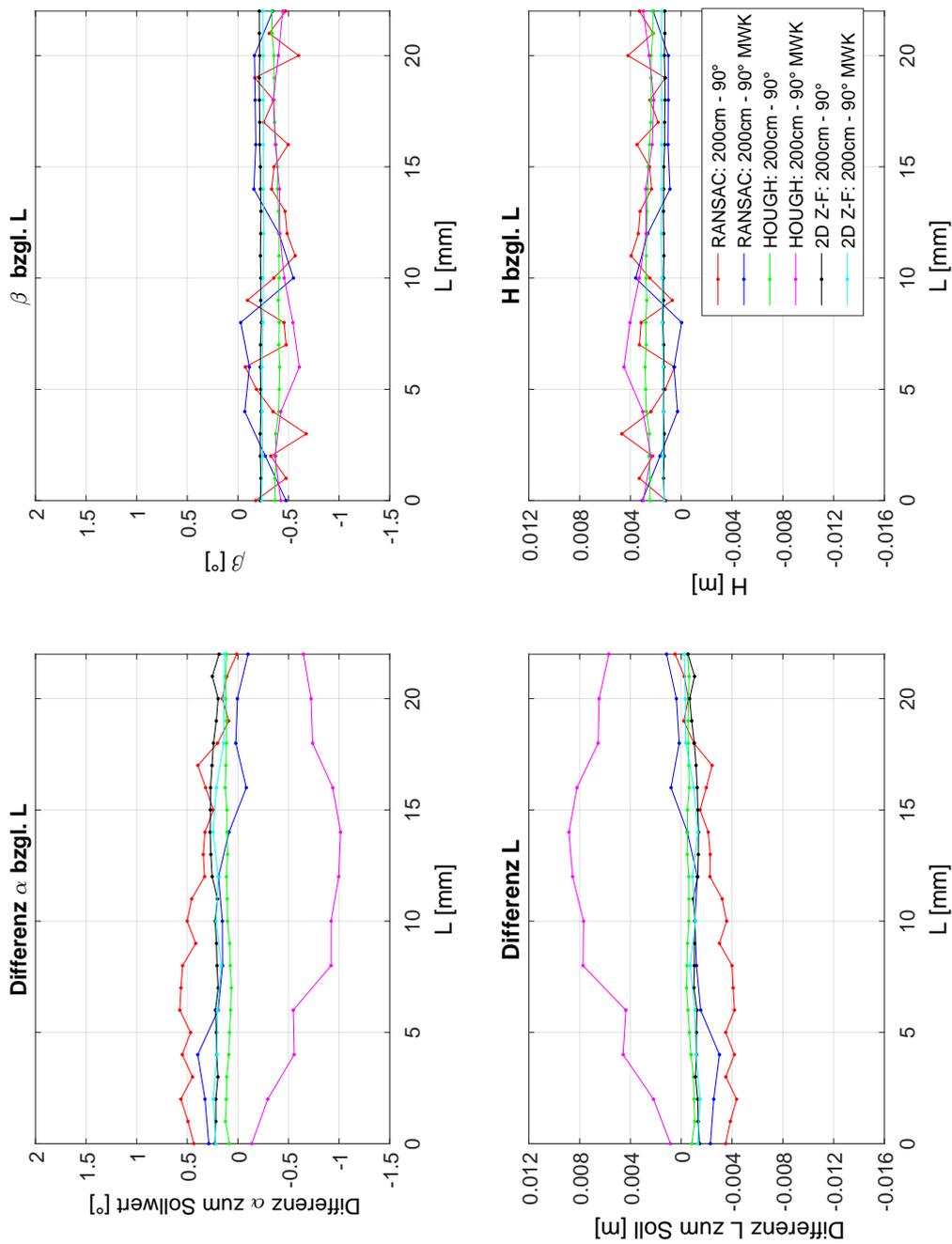
C.2 Änderung der Lageabweichung



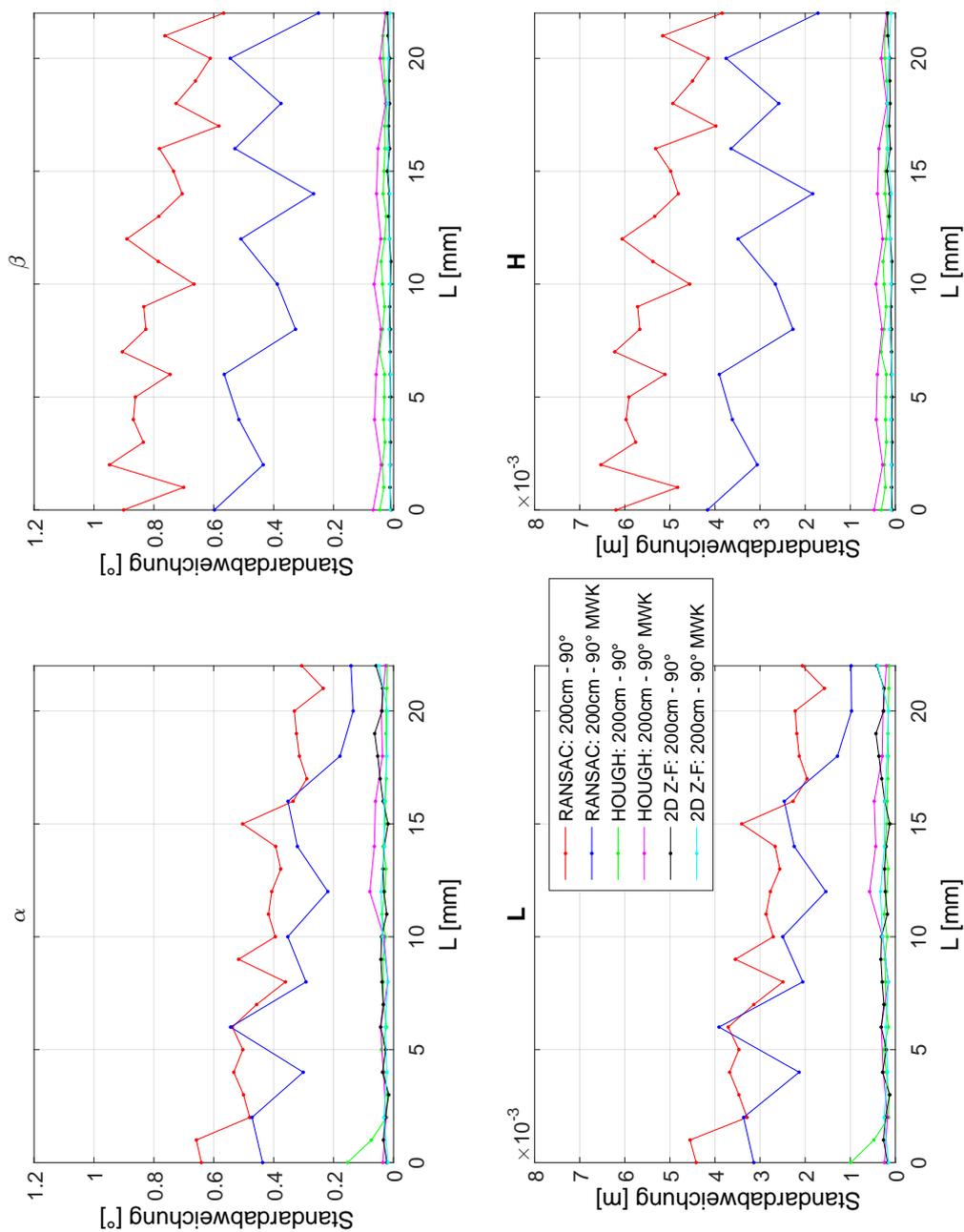
C.5: Auswertung mit RANSAC/Hough-Transformation/2D Zylinder-Fitting im 1m Rohr mit 90° Bogen und voreingestellter Lageabweichung L und Mehrwegkorrektur (MWK).



C.6: Standardabweichung der Auswertung mit RANSAC/Hough-Transformation/2D Zylinder-Fitting im 1m Rohr mit 90° Bogen und voreingestellter Lageabweichung L und Mehrwegkorrektur (MWK).



C.7: Auswertung mit RANSAC/Hough-Transformation/2D Zylinder-Fitting im 2m Rohr mit 90° Bogen und voreingestellter Lageabweichung L und Mehrwegkorrektur (MWK).

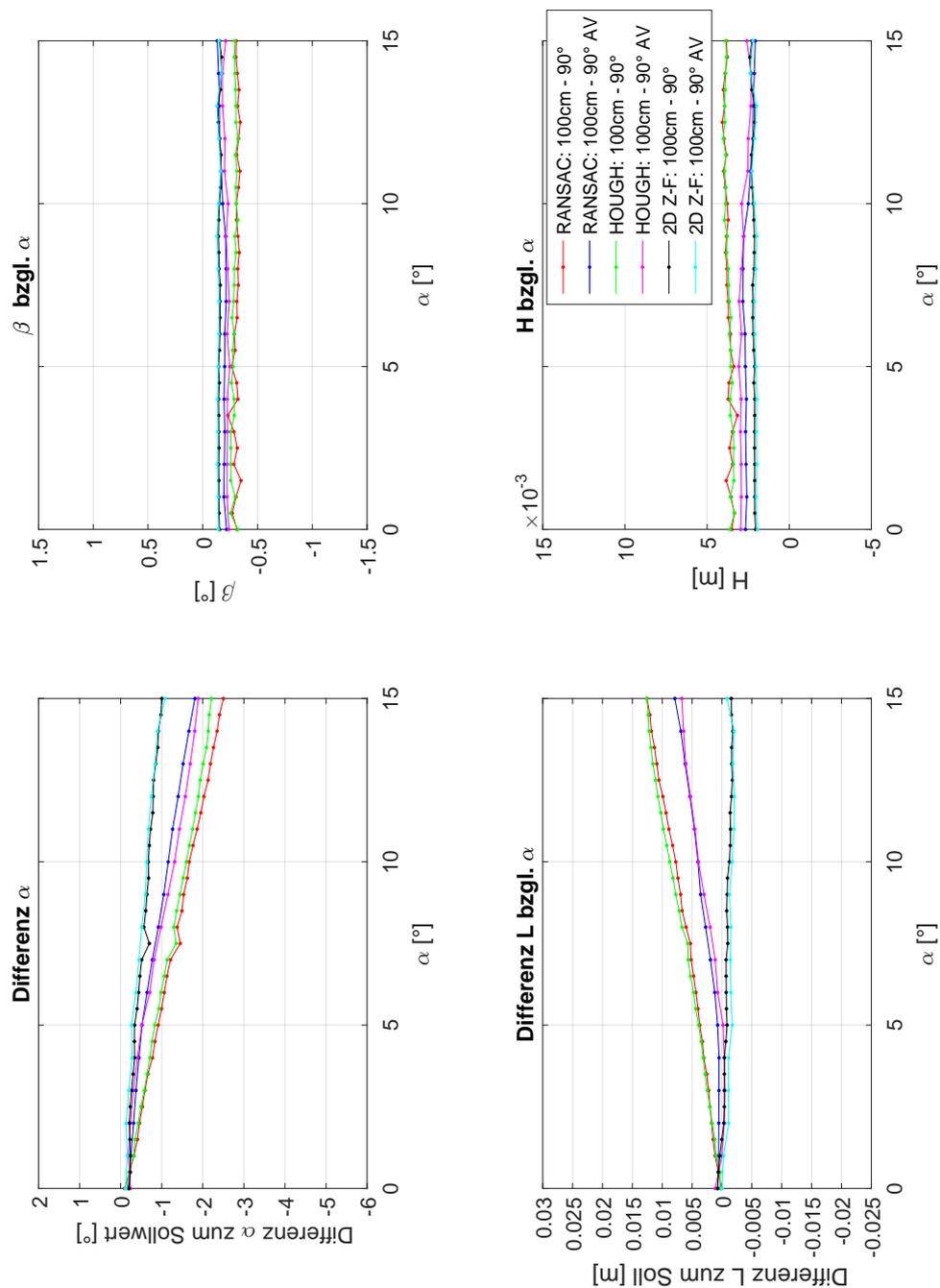


C.8: Standardabweichung der Auswertung mit RANSAC/Hough-Transformation/2D Zylinder-Fitting im 2m Rohr mit 90° Bogen und voreingestellter Lageabweichung L und Mehrwegkorrektur (MWK).

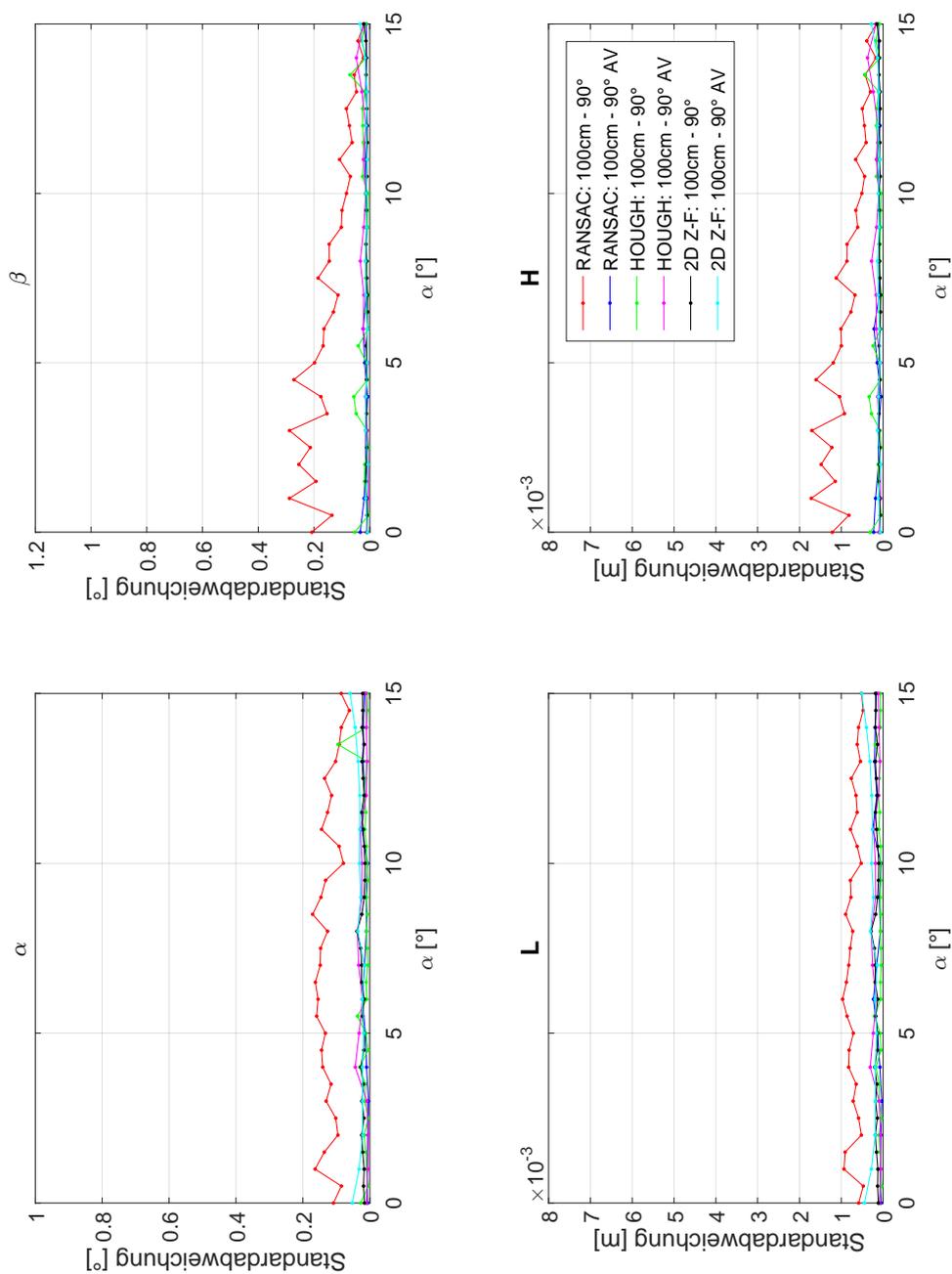
Anhang D

Analyse des optimalen Aufnahmebereichs

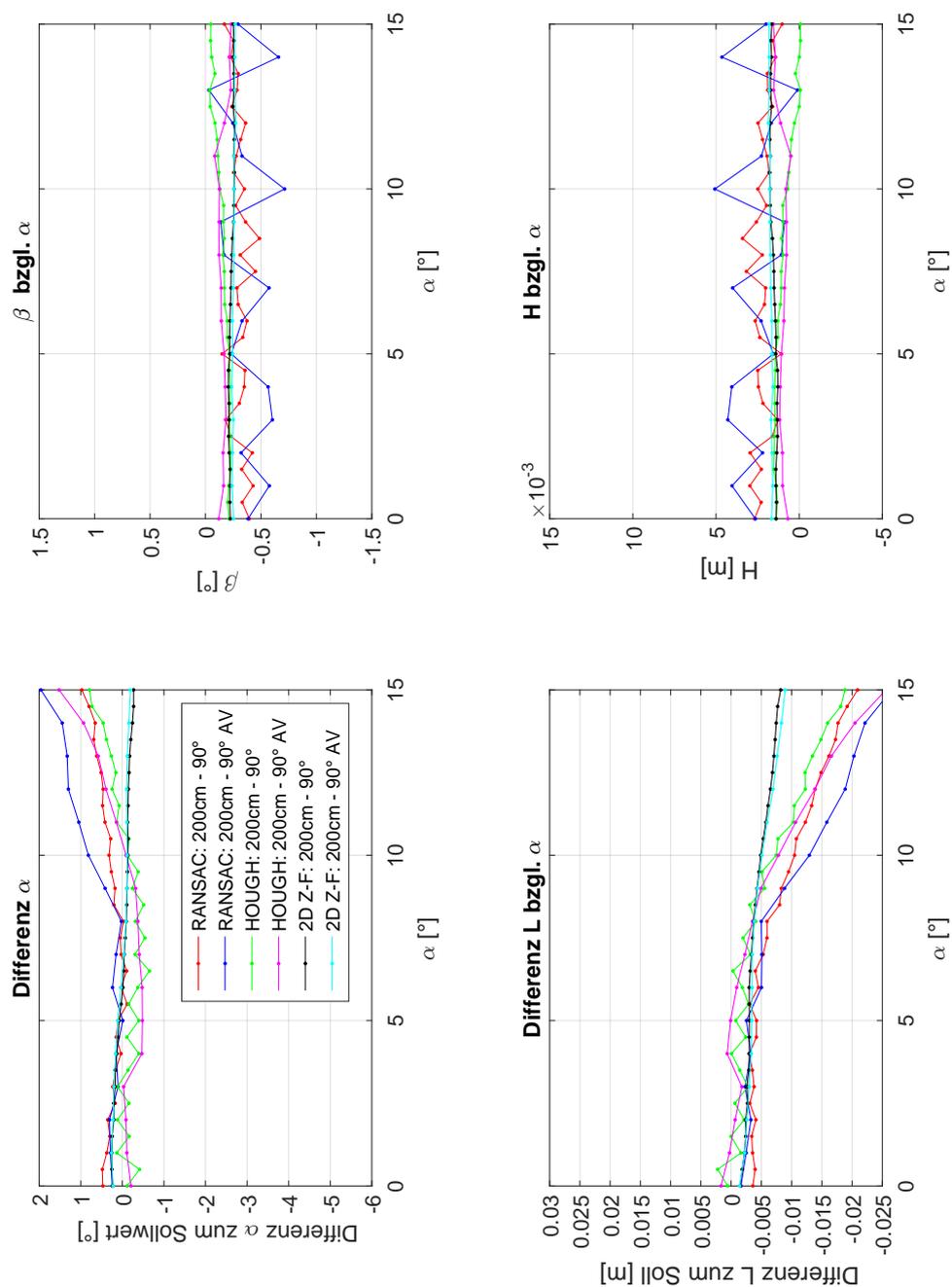
D.1 Änderung des Lagewinkels



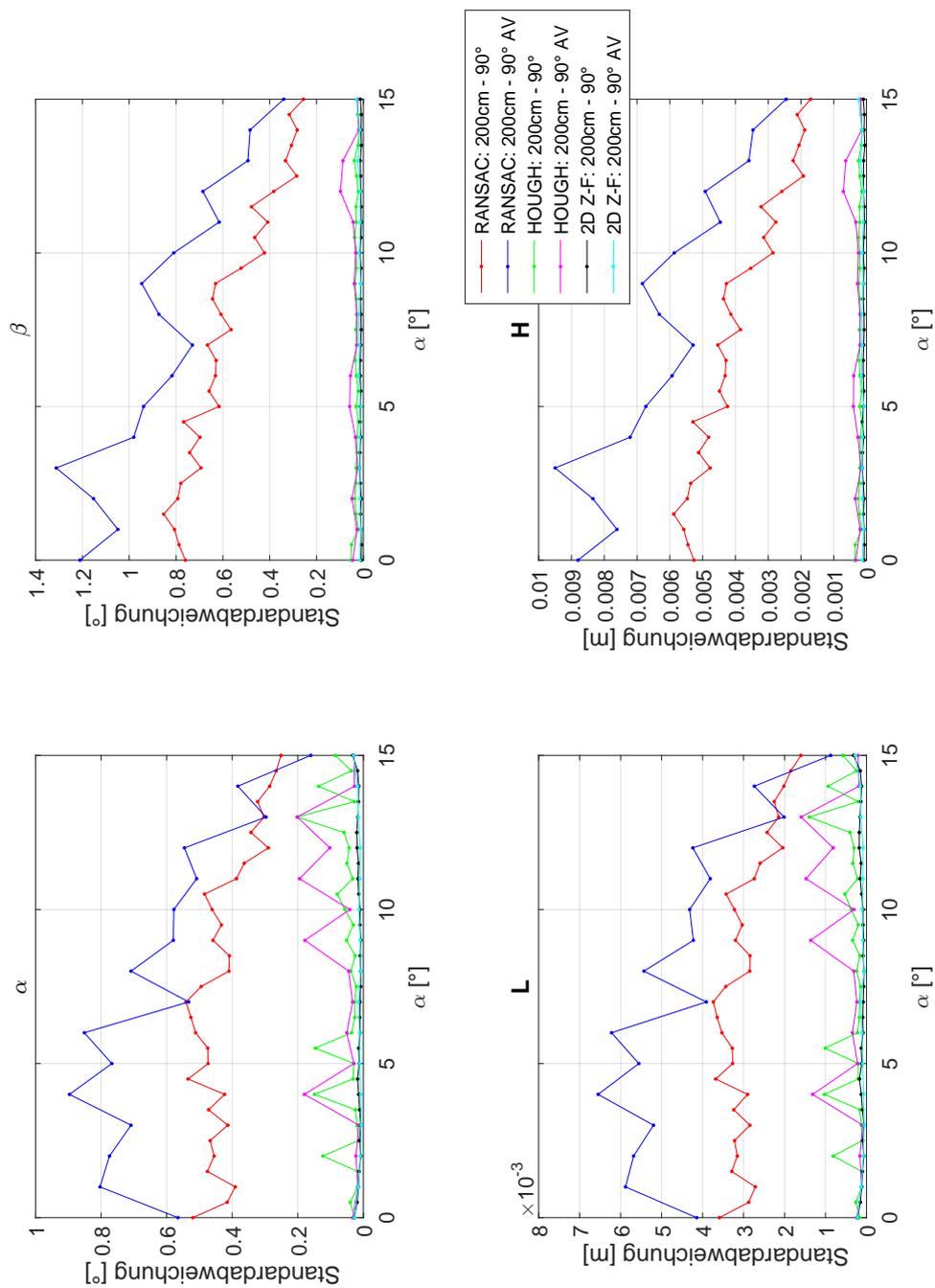
D.1: Auswertung mit RANSAC/Hough-Transformation/2D Zylinder-Fitting im 1m Rohr mit 90° Bogen und voreingestelltem Lagewinkel α und vorheriger Analyse des optimalen Aufnahmebereichs (AV).



D.2: Standardabweichung der Auswertung mit RANSAC/Hough-Transformation/2D Zylinder-Fitting im 1m Rohr mit 90° Bogen und voreingestelltem Lagewinkel α und vorheriger Analyse des optimalen Aufnahmebereichs (AV).

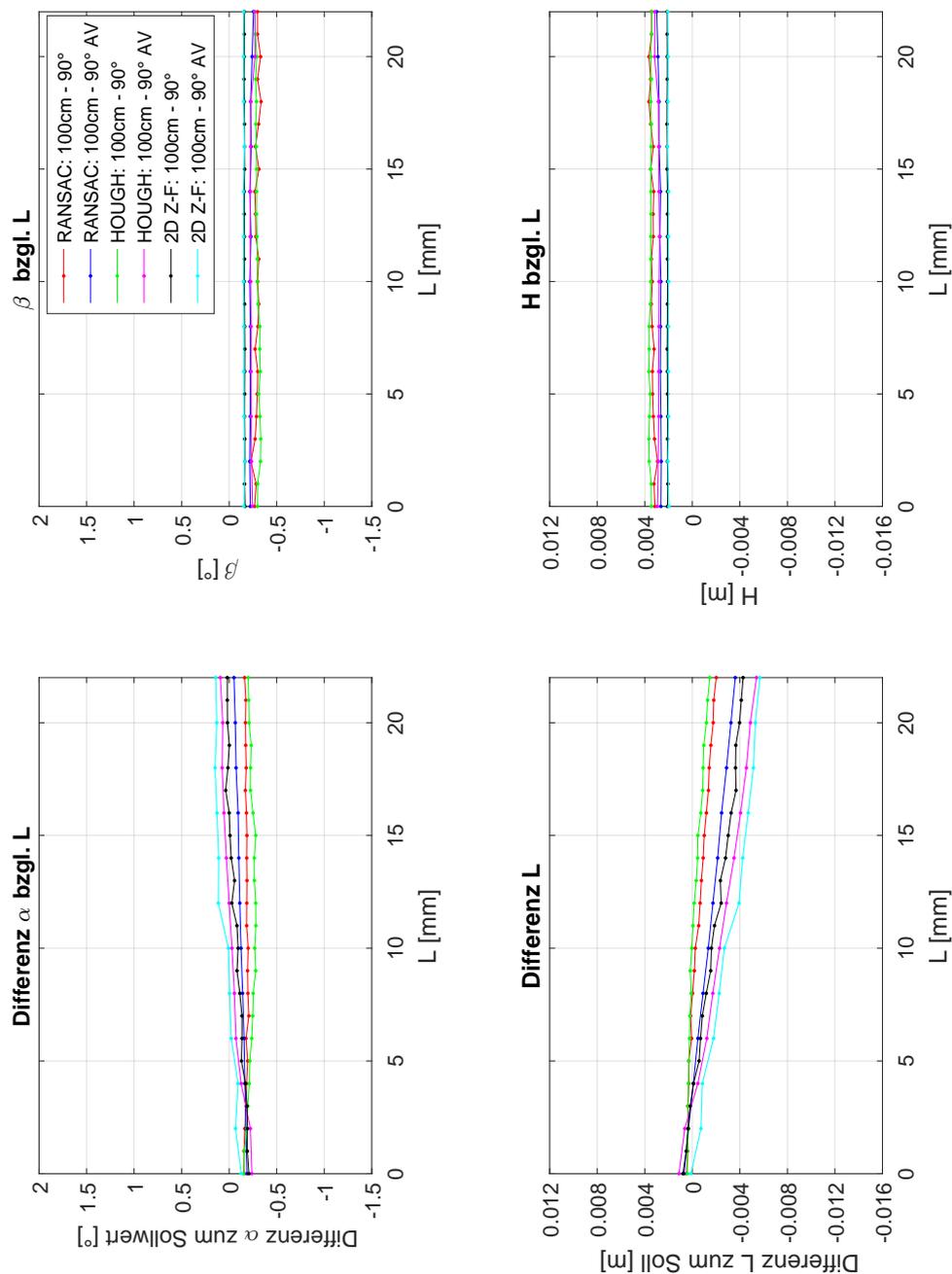


D.3: Auswertung mit RANSAC/Hough-Transformation/2D Zylinder-Fitting im 2m Rohr mit 90° Bogen und voreingestelltem Lagewinkel α und vorheriger Analyse des optimalen Aufnahmebereichs (AV).

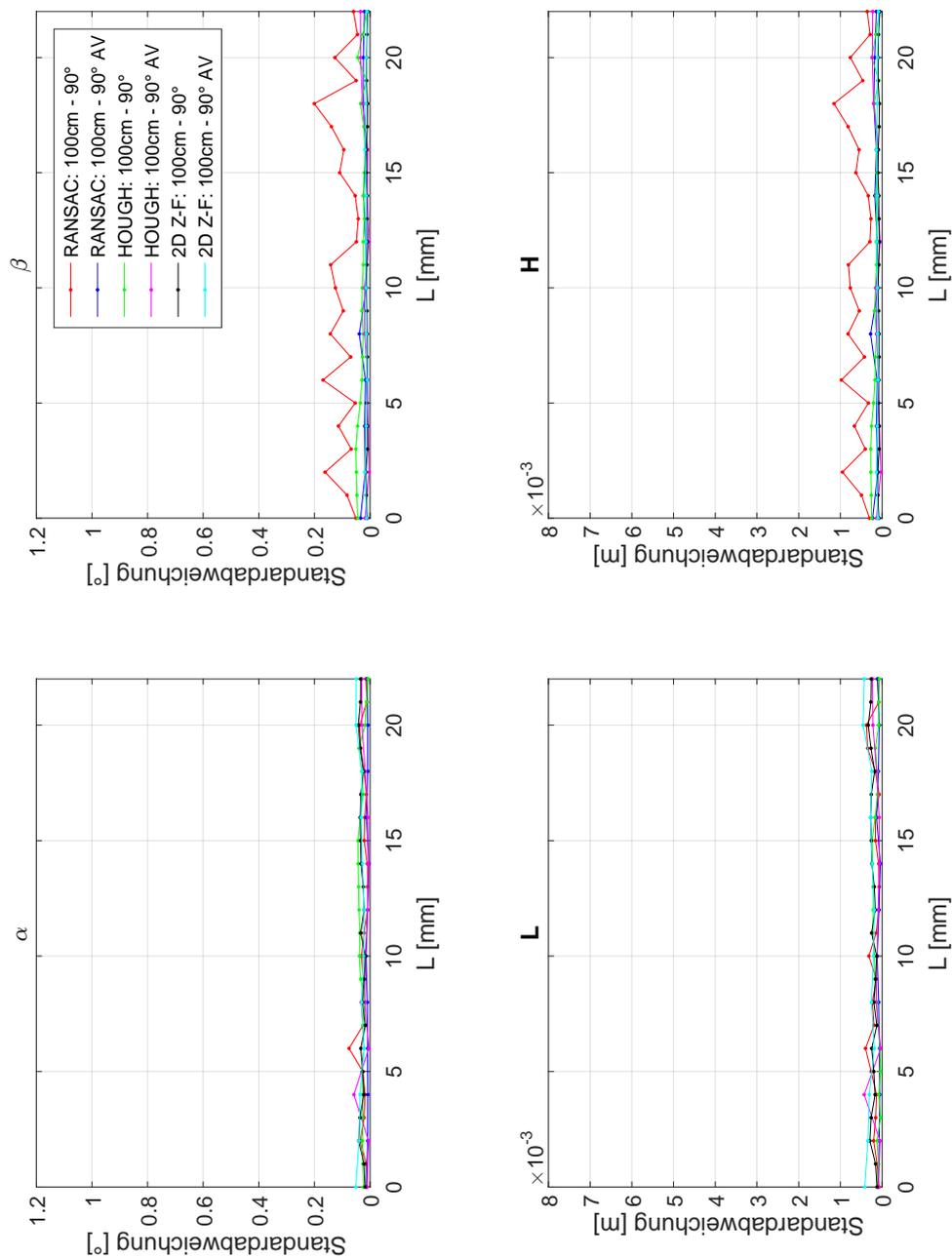


D.4: Standardabweichung der Auswertung mit RANSAC/Hough-Transformation/2D Zylinder-Fitting im 2m Rohr mit 90° Bogen und voreingestelltem Lagewinkel α und vorheriger Analyse des optimalen Aufnahmebereichs (AV).

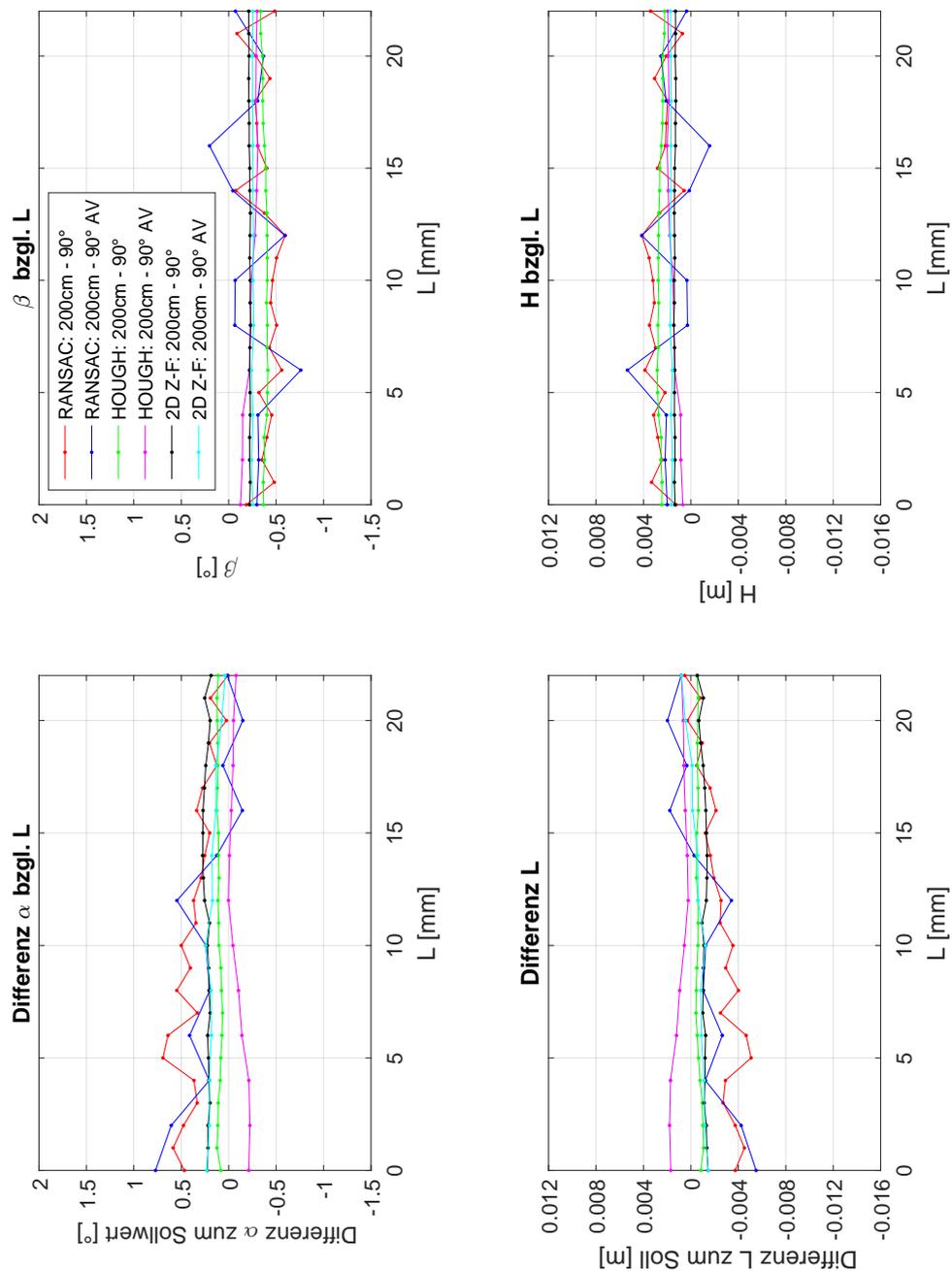
D.2 Änderung der Lageabweichung



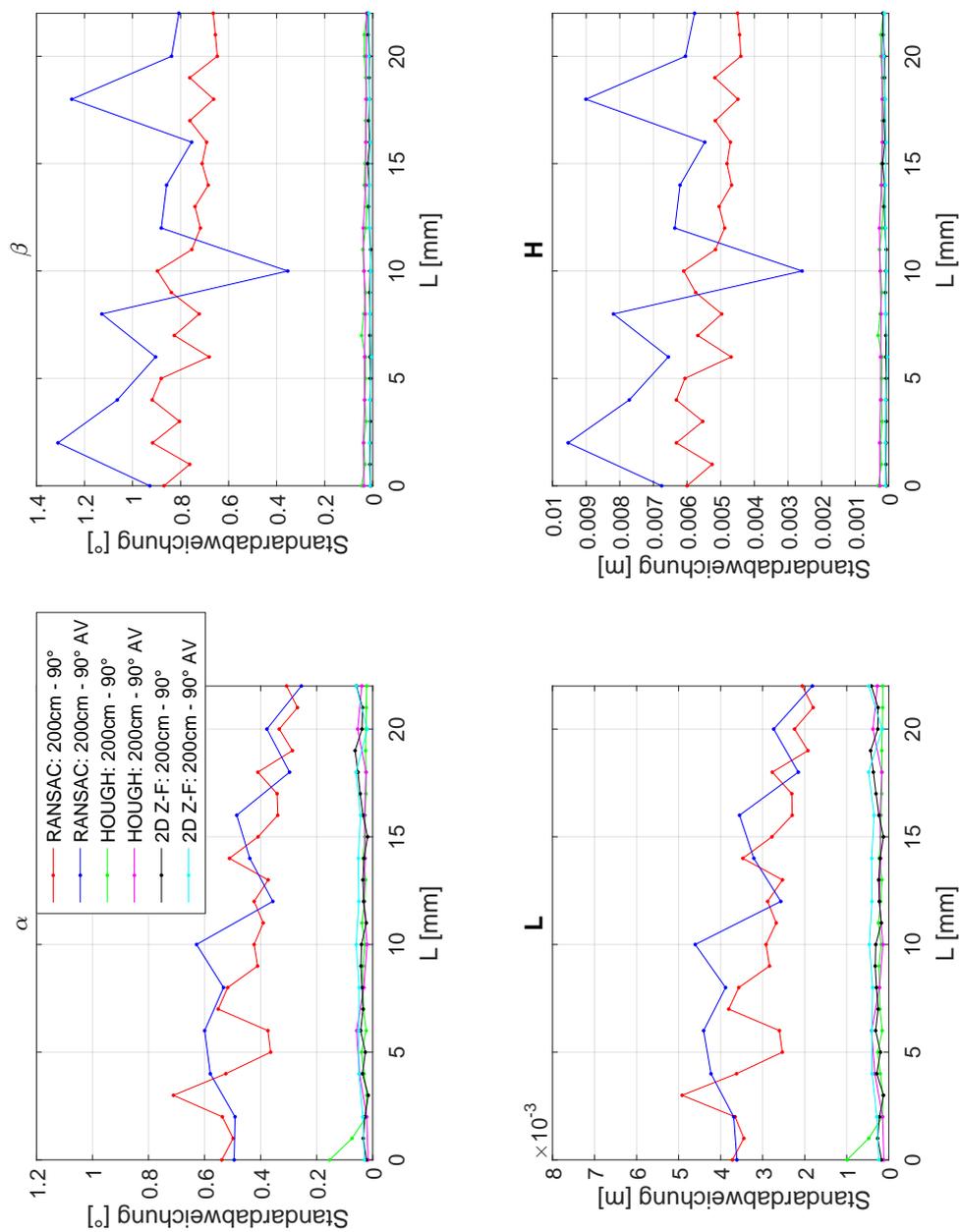
D.5: Auswertung mit RANSAC/Hough-Transformation/2D Zylinder-Fitting im 1m Rohr mit 90° Bogen und voreingestellter Lageabweichung L und vorheriger Analyse des optimalen Aufnahmebereichs (AV).



D.6: Standardabweichung der Auswertung mit RANSAC/Hough-Transformation/2D Zylinder-Fitting im 1m Rohr mit 90° Bogen und voreingestellter Lageabweichung L und vorheriger Analyse des optimalen Aufnahmebereichs (AV).



D.7: Auswertung mit RANSAC/Hough-Transformation/2D Zylinder-Fitting im 2m Rohr mit 90° Bogen und voreingestellter Lageabweichung L und vorheriger Analyse des optimalen Aufnahmebereichs (AV).



D.8: Standardabweichung der Auswertung mit RANSAC/Hough-Transformation/2D Zylinder-Fitting im 2m Rohr mit 90° Bogen und voreingestellter Lageabweichung L und vorheriger Analyse des optimalen Aufnahmebereichs (AV).

Danksagung

Die thematischen Aspekte dieser Arbeit entstanden im Rahmen des Projektes geoASYS. Es handelt sich dabei um ein Public-Private-Partnership Projekt an dem die die Arbeitsgemeinschaft Geoinformationssysteme (AGIS) und das Geodätische Labor der Universität der Bundeswehr München beteiligt waren. Anregungen für die Thematik gaben mir vor allem die Leiter der beiden genannten Institutionen, Herr Prof. Wolfgang Reinhardt sowie Herr Prof. Hansbert Heister und schufen damit das grundlegende Fundament dieser Arbeit. Vor allem bei Herr Prof. Reinhardt möchte ich mich für die kontinuierliche Förderung und Unterstützung im Rahmen seiner Rollen als Doktorvater und Gutachter bedanken.

Die praktische Durchführung der Versuche erfolgte mit Unterstützung des Geodätische Labors des Instituts für Geodäsie der Universität der Bundeswehr. An dieser Stelle möchte ich mich beim Leiter des Instituts und gleichzeitig meinem zweiten Gutachter Herrn Prof. Otto Heunecke für die Ermöglichung der Versuchsdurchführung und die Begutachtung meiner Dissertation bedanken. Auch möchte ich seinen Mitarbeitern Herrn Peter Pongratz, Herrn Wolfgang Liebl und Herrn Norbert Barth für Ihre konstruktive Unterstützung bei der Durchführung der Versuche meinen Dank aussprechen.

Des Weiteren bedanke ich mich bei meinem dritten Gutachter Herrn Prof. Thomas Wunderlich und meinem Prüfer Herrn Prof. Helmut Mayer für die Begutachtung der Dissertation und die wertvollen Denkanstöße bedanken.

Nicht unerwähnt soll an dieser Stelle auch Herr Prof. Wilhelm Caspary bleiben, der mir in vielen Gesprächen immer mit guten Rat zur Seite gestanden hat.

Anerkennung gilt auch meinen Kollegen die sich oft die Zeit für fachliche Gespräche nahmen und damit zum Gelingen dieser Dissertation beitrugen. Im besonderen sei hier Herr Maximilian Hartung genannt, der mich oft bei der Durchführung der Versuche unterstützte.

Des Weiteren möchte ich mich vor allem bei meiner Frau bedanken, die mir immer eine moralische Stütze war und ist, und somit maßgebend zum Gelingen dieser Arbeit beitrug. Und "last but not Least" gilt auch meiner Familie und meinen Freunden Dank, die mit ihrer lästigen Fragerei "wann die Dissertation denn nun endlich fertig sei", auch den nötigen Druck geschaffen haben um diese Arbeit erfolgreich abzuschließen.