



DIPLOMSTUDIENGANG VERMESSUNGSWESEN

## DIPLOMARBEIT

von

Birgit Abendroth und Miriam zur Mühlen

# GENAUIGKEITSBEURTEILUNG UND UNTERSUCHUNGEN DER ZUVERLÄSSIGKEIT VON OPTISCHEN ONLINEMESSUNGEN

BONN 2009

BETREUER:

PROF. DR.-ING. WOLFGANG FÖRSTNER  
DIPL.-INF. TIMO DICKSCHEID  
DIPL.-ING. ROBERT GODDING

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



## Diplomaufgabe

für

Frau cand. Geod. Birgit Abendroth

und

Frau cand. Geod. Miriam zur Mühlen

### **Genauigkeitsbeurteilung und Untersuchungen der Zuverlässigkeit von optischen Onlinemesssystemen**

Zur Erfassung dynamischer Vorgänge bietet sich der Einsatz photogrammetrischer Onlinemesssysteme an. Je nach Konfiguration sind mit diesen Systemen sowohl die Bestimmung von 3D-Koordinaten einzelner signalisierter Punkte als auch der 6 Freiheitsgrade eines Starrkörpers während der Bewegung möglich, wobei in diesem Fall nur eine Kamera notwendig ist. Im Zuge der Weiterentwicklung der AICON-MoveInspect Produktlinie sollen verschiedene Gesichtspunkte solcher Messsysteme vertieft untersucht werden.

1. Ein- und Mehrkameralösungen zur Verfolgung von Starrkörpern sollen auf ihre *Genauigkeit* hin untersucht werden. Zur Überprüfung der Qualität verschiedener Messreihen der Ein- bzw. Zweikamerasysteme werden geeignete Testanordnungen definiert. Mit Hilfe von statistischen Testverfahren sollen die Messreihen beurteilt werden. Unter anderem soll ein Soll-Ist-Vergleich durchgeführt werden, bei denen hochgenaue Linearverschiebungen und Drehbewegungen als Referenzbewegungen herangezogen werden. Ziel ist es, verschiedene Testanordnungen bzw. die verschiedenen Messsysteme miteinander in Beziehung zu setzen.
2. Ein- und Zweikameralösungen sollen in Hinblick auf ihre *Geschwindigkeit* optimiert werden:

Die Bestimmung der Parameter der Äußeren Orientierung bei der *Einkamerallösung* wird i. A. mittels des Räumlichen Rückwärtsschnitts gelöst. Momentan wird ausschließlich eine iterative Implementation dieses Verfahrens eingesetzt. Zur Beschleunigung des Verfahrens unter dem Gesichtspunkt der Realtime-Fähigkeit sollen andere Varianten des Räumlichen Rückwärtsschnitts untersucht werden. Dazu soll die direkte Lösung des Verfahrens implementiert werden. Außerdem soll in diesem Rahmen eine Untersuchung über den Einfluss von speziellen Anordnungen der Messpunkte und die dadurch vereinfachte Berechnungsmöglichkeit der Äußeren Orientierung erfolgen.

Bei der Messung von Einzelpunkten mit einem *Stereosystem* wird das Korrespondenzproblem für nicht codierte identische Punkte mit Hilfe der Epipolargeometrie gelöst. Bei diesem Verfahren treten unter Umständen Mehrdeutigkeiten auf. Zur Verbesserung des Zuordnungsverfahrens sollen zusätzliche Restriktionen eingeführt werden. Diese können aus Vorinformationen über die Objektoberfläche bestehen. Aus diesen Informationen soll eine Oberflächenklassifikation erstellt werden, mit deren Hilfe die Oberfläche aus den bereits zugeordneten Punkten geschätzt werden soll. Es ist zu untersuchen, inwieweit die Nutzung dieser Information die Zuordnungsqualität verbessert.

Prof. Dr.-Ing. Wolfgang Förstner

Betreuer: W. Förstner, T. Dickscheid, R. Godding  
Ausgegeben am: 27.03.2009  
Abgabetermin: 27.09.2009  
Abgegeben am: 14.09.2009

## Erklärung

Hiermit erklären wir eidesstattlich, dass wir unsere entsprechend gekennzeichneten Anteile der vorgelegten Arbeit selbständig und ohne unzulässige Hilfe angefertigt haben. Es wurden keine anderen als die angegebenen Quellen und Hilfsmittel verwendet.

Bonn, den 10. September 2009

Birgit Abendroth

Miriam zur Mühlen

# Kennzeichnung der Anteile

## Birgit Abendroth:

- Teil I:
  - Abschnitt 2
  - Abschnitte 3.1.1, 3.1.2 und 3.2.3
  - Abschnitte 4.1, Paragraphen „Auswertung des Systems WHEELWATCH“ und „Auswertung des Systems MOVEINSPECT“ des Abschnitts 4.3.2.1, Paragraph „Auswertung des Systems WHEELWATCH“ des Abschnitts 4.3.2.2, Paragraph „Auswertung des Systems MOVEINSPECT“ des Abschnitts 4.3.2.3, Abschnitt 4.3.3, Abschnitt 4.4,
  - Einleitung des Abschnitts 5, Abschnitt 5.1, Einleitung des Abschnitts 5.2, Abschnitte 5.2.1 und 5.3
- Teil III
- Anhang A.2, Anhang A.3, Anhang A.5, Paragraphen „Messdurchführung“, „Auswertung des Lasertrackers“, „Auswertung des Systems WHEELWATCH“ und „Auswertung des Systems MOVEINSPECT“ des Anhangs A.6, Anhang A.8, Anhang C

## Miriam zur Mühlen:

- Vorwort 0
- Teil I:
  - Abschnitt 1
  - Einleitungen der Abschnitte 3 und 3.1, Abschnitte 3.1.3 und 3.1.4, Einleitung des Abschnitts 3.2, Abschnitte 3.2.1 und 3.2.2
  - Einleitung des Abschnitts 4, Abschnitte 4.2, Einleitung des Abschnitts 4.3, Abschnitt 4.3.1, Einleitung des Abschnitts 4.3.2, Einleitung und Paragraph „Messdurchführung“ des Abschnitts 4.3.2.1, Einleitung und Paragraphen „Messdurchführung“ und „Auswertung des Systems MOVEINSPECT“ des Abschnitts 4.3.2.2, Einleitung und Paragraph „Messdurchführung“ und „Auswertung des Systems WHEELWATCH“ des Abschnitts 4.3.2.3, Abschnitt 4.5
  - Abschnitte 5.2.2 und 5.4
  - Abschnitt 6
- Teil II
- Anhang A.1, Anhang A.4, Einleitung des Anhangs A.6, Anhang A.7 und Anhang B

# Inhaltsverzeichnis

<b>0</b>	<b>Vorwort</b>	<b>1</b>
<b>I</b>	<b>Genauigkeitsbeurteilung optischer Onlinemessungen</b>	<b>4</b>
<b>1</b>	<b>Einleitung des ersten Teils</b>	<b>4</b>
1.1	Motivation . . . . .	4
1.2	Aufgabenstellung . . . . .	5
1.3	Aufbau . . . . .	5
<b>2</b>	<b>Statistische Grundlagen</b>	<b>6</b>
2.1	Vorgaben nach der Deutschen Industrie Norm . . . . .	6
2.2	Ordinary Kriging . . . . .	8
<b>3</b>	<b>Messsysteme</b>	<b>12</b>
3.1	Optische Onlinemesssysteme . . . . .	13
3.1.1	WheelWatch . . . . .	13
3.1.2	MoveInspect . . . . .	15
3.1.3	Software TraceCamF . . . . .	17
3.1.4	Hilfsmittel . . . . .	20
3.2	Hochgenaue Verschiebeeinheiten . . . . .	21
3.2.1	Drehtisch . . . . .	22
3.2.2	Lineareinheit . . . . .	23
3.2.3	Geradheitsbahn mit Interferometer . . . . .	24
<b>4</b>	<b>Überprüfung der Winkelgenauigkeit optischer Onlinemessungen</b>	<b>26</b>
4.1	Modell der Winkelbestimmung . . . . .	27
4.2	Adapter für Drehtisch . . . . .	29
4.3	Voruntersuchungen zur Winkelgenauigkeit . . . . .	35
4.3.1	Implementation des Modells . . . . .	36
4.3.2	Durchführung und Auswertung der Voruntersuchungen . . . . .	36
4.3.3	Erkenntnisse aus den Voruntersuchungen . . . . .	51
4.4	Testverfahren zur Beurteilung der Winkelgenauigkeit . . . . .	52
4.4.1	Implementation des Testverfahrens . . . . .	53
4.4.2	Durchführung und Auswertung des Testverfahrens . . . . .	54
4.5	Fazit der Untersuchungen der Winkelgenauigkeit . . . . .	60
<b>5</b>	<b>Überprüfung der Distanzgenauigkeit optischer Onlinemessungen</b>	<b>61</b>
5.1	Modell der Distanzbestimmung . . . . .	62
5.2	Voruntersuchungen zur Distanzgenauigkeit . . . . .	64
5.2.1	Implementation des Modells . . . . .	64
5.2.2	Durchführung und Auswertung der Voruntersuchungen . . . . .	65
5.2.3	Fazit der Voruntersuchungen . . . . .	94
5.3	Testverfahren zur Beurteilung der Distanzgenauigkeit . . . . .	95

5.3.1	Implementation des Testverfahrens . . . . .	95
5.3.2	Durchführung und Auswertung des Testverfahrens . . . . .	98
5.4	Fazit der Untersuchungen der Distanzgenauigkeit . . . . .	111
<b>6</b>	<b>Ausblick</b>	<b>112</b>
6.1	Weiterführende Genauigkeitsuntersuchungen . . . . .	112
6.2	Verbesserungsvorschläge der entwickelten Testverfahren . . . . .	113
<b>II</b>	<b>Räumlicher Rückwärtsschnitt</b>	<b>115</b>
<b>7</b>	<b>Einleitung des zweiten Teils</b>	<b>115</b>
7.1	Motivation . . . . .	115
7.2	Aufgabenstellung . . . . .	115
7.3	Aufbau . . . . .	116
<b>8</b>	<b>Verfahren zur direkten Lösung des Räumlichen Rückwärtsschnitts</b>	<b>117</b>
8.1	Algorithmus A: Verfahren in drei Schritten . . . . .	117
8.1.1	Rotation in den Normalfall . . . . .	118
8.1.2	Rotation zu parallelen Kamera- und Objektsystemen . . . . .	123
8.1.3	Bestimmung des Projektionszentrums . . . . .	125
8.2	Algorithmus B: Polynom vierten Grades . . . . .	126
8.3	Algorithmus C: Singulärwertzerlegung . . . . .	129
<b>9</b>	<b>Auswertung der Algorithmen</b>	<b>131</b>
9.1	Fallbeispiel: Legolandszene . . . . .	131
9.2	Auswertung des Algorithmus A . . . . .	133
9.3	Auswertung des Algorithmus B . . . . .	135
9.4	Auswertung des Algorithmus C . . . . .	137
9.5	Fazit der Auswertungen . . . . .	137
<b>10</b>	<b>Problemstellung des Radadapters</b>	<b>139</b>
10.1	Problematik mit dem Algorithmus A . . . . .	140
10.2	Problematik mit dem Algorithmus B . . . . .	141
10.3	Problematik mit dem Algorithmus C . . . . .	142
10.4	Fazit der Problematiken des Radadapters . . . . .	142
<b>11</b>	<b>Fazit und Ausblick</b>	<b>143</b>
<b>III</b>	<b>Zuordnung von homologen Punkten</b>	<b>145</b>
<b>12</b>	<b>Einleitung des dritten Teils</b>	<b>145</b>
12.1	Motivation . . . . .	145
12.2	Aufgabenstellung zum zweiten Teil . . . . .	146
12.3	Aufbau des dritten Teils . . . . .	147

<b>13 Zuordnungsverfahren</b>	<b>148</b>
13.1 Epipolargeometrie . . . . .	148
13.2 Zuordnung über die Objektoberfläche . . . . .	151
13.2.1 Oberflächeneinteilung . . . . .	151
13.2.2 Algorithmus für die Zuordnung über die Objektoberfläche . . . . .	154
13.3 Delaunay Triangulation . . . . .	159
<b>14 Ergebnisse</b>	<b>162</b>
14.1 Ebenes Objekt . . . . .	162
14.2 Zylinder . . . . .	170
14.3 Kopf . . . . .	175
<b>15 Fazit des dritten Teils</b>	<b>180</b>
15.1 Zusammenfassung der Zuordnungsergebnisse . . . . .	180
15.2 Ausblick . . . . .	181
<b>IV Anhang</b>	<b>187</b>
<b>A Genauigkeitsbeurteilung</b>	<b>187</b>
A.1 Photogrammetrische Grundlagen . . . . .	187
A.1.1 Kameraorientierung . . . . .	187
A.1.2 Verzeichnungs-korrektur . . . . .	189
A.1.3 Räumlicher Rückwärtsschnitt (RRS) . . . . .	190
A.1.4 Räumlicher Vorwärtsschnitt (RVS) . . . . .	191
A.2 Statistische Grundlagen . . . . .	191
A.2.1 Hypothesentest . . . . .	191
A.2.2 Soll-Ist-Vergleich . . . . .	195
A.3 Dokumentation zur Messauswertung des Genauigkeitstests . . . . .	196
A.3.1 Aufnahme der Messreihen . . . . .	196
A.3.2 Einstellungen in der Auswertesoftware . . . . .	197
A.3.3 Auswertung . . . . .	197
A.3.4 Ergebnisausgabe . . . . .	201
A.4 Ergebniszusammenstellung der Messreihen mit dem Drehtisch . . . . .	203
A.5 Ergebnisse der Testreihen zur Überprüfung der Winkelgenauigkeit . . . . .	205
A.6 Überprüfungsmessungen mit dem Lasertracker . . . . .	207
A.7 Ergebniszusammenstellung der Messreihen mit der Lineareinheit . . . . .	216
A.8 Ergebnisse der Testreihen zur Überprüfung der Distanzgenauigkeit . . . . .	219
<b>B Räumlicher Rückwärtsschnitt</b>	<b>274</b>
B.1 Bestimmung einer Rotationsmatrix aus einem Quaternion . . . . .	274
B.2 Bestimmung zweier Fluchtpunkte . . . . .	274

<b>C Zuordnung</b>	<b>276</b>
C.1 Grundlagen der Epipolargeometrie . . . . .	276
C.2 Direkte Lösungen zur Bestimmung der Flächenparameter . . . . .	277
C.3 Ergebnistabellen . . . . .	279
<b>Literatur</b>	<b>282</b>

## 0 Vorwort

Der Titel „Genauigkeitsbeurteilung und Untersuchungen der Zuverlässigkeit von optischen Onlinemessungen“ impliziert eine weite Bandbreite an Untersuchungsmöglichkeiten. Diese allgemeine Einführung gibt einen Überblick über die untersuchten Aspekte dieser Arbeit. Neben der Motivation, die zu der Entstehung dieser Diplomarbeit geführt hat, beinhaltet diese Einführung eine grobe Gliederung der behandelten Themenschwerpunkte.

### Motivation

Ein neues Aufgabengebiet innerhalb der Nahbereichsphotogrammetrie bietet die Konzeption von photogrammetrischen Messsystemen für industrielle Aufgabenstellungen. Die Firma AICON 3D Systems GmbH, mit deren Kooperation diese Arbeit entstand, hat sich auf die Entwicklung solcher Systeme spezialisiert. Sie gehört zu den weltweit führenden Unternehmen im Bereich der optischen kamerabasierten 3D-Vermessung. Ihr Anspruch ist es, hochgenaue und effiziente Produkte im Bereich von Inspektion und Prüfung zu entwickeln und zu überwachen. Ihre Produkte vertreibt das 1990 gegründete Unternehmen überwiegend in der Automobil-, Luft- und Raumfahrtindustrie sowie im Anlagen- und Schiffsbau. Zur Erfassung von dynamischen Vorgängen bietet das Unternehmen echtzeitfähige optische Messsysteme an, die je nach Konfiguration in der Lage sind einzelne signalisierte Punkte als 3D-Koordinaten zu erfassen oder die Bewegung eines Starrkörpers aufzunehmen. Damit diese photogrammetrischen Systeme gegenüber anderen Messsystemen im Konkurrenzkampf bestehen können, müssen sich diese einer ständigen Weiterentwicklung und Verbesserung unterziehen. Dabei steht insbesondere die Wirtschaftlichkeit, Zuverlässigkeit und die Genauigkeit der Systeme im Vordergrund.

Außerdem ist es nötig einzelne Messsysteme zu charakterisieren, um sie vergleichbar zu machen und die Einsatzmöglichkeiten aufzuzeigen. Dazu gehört neben den oben genannten Kriterien der Genauigkeit, Zuverlässigkeit und Wirtschaftlichkeit auch das Spektrum der Einsatzmöglichkeiten mit systemspezifischen Rahmenbedingungen. Des Weiteren kann ein Vergleich über Hardware- und Software-Module geschehen. Im weiteren Verlauf dieser Arbeit werden die Eigenschaften der Genauigkeit und der Software-Module näher untersucht. Dabei zeigt eine Genauigkeitsuntersuchung die Grenzen der Messsysteme auf, deren Kenntnis für die Weiterentwicklung von Bedeutung ist. Für die Verbesserung der Software wird diese anhand ihrer vorhandenen Algorithmik untersucht und mit alternativen Berechnungsverfahren verglichen.

Als Ausgangspunkt für diese Untersuchungen dienen dabei die beiden Onlinemesssysteme WHEELWATCH und MOVEINSPECT der Firma AICON 3D Systems GmbH. Die Motivation der Firma AICON 3D Systems GmbH ein Diplomarbeitsthema im Bereich einer Genauigkeitsuntersuchung zu stellen, liegt darin, das vorhandene theoretische Wissen der Universität mit dem praktischen Anwendungsbeispiel der Onlinemesssysteme

me zu verbinden. Dies gilt auch für den Bereich der Weiterentwicklung der Algorithmik. Damit die Systeme auch in Zukunft wettbewerbsfähig sind, müssen diese ständig weiter entwickelt werden. Aus diesem Grund beinhaltet diese Arbeit die Untersuchung von zwei verschiedenen Problemstellungen, die sich innerhalb der Algorithmen der Systeme ergeben.

## Aufgabenstellung

Das Ziel dieser gesamten Diplomarbeit besteht in der Verbesserung und Weiterentwicklung von Onlinemesssystemen. Dabei sollen theoretische Verfahren, die an der Universität vermittelt werden, auf die speziellen Messsysteme WHEELWATCH und MOVEINSPECT der Firma AICON 3D Systems GmbH angepasst und modifiziert werden. Insbesondere geht es um drei Aspekte der Onlinemesssysteme. Als erstes soll eine Genauigkeitsuntersuchung der Onlinemesssysteme in Hinblick auf die Bewegungserfassung von Starrkörpern durchgeführt werden. Hierbei dienen statistische Grundlagen dazu, die bisherigen Genauigkeitsangaben von AICON 3D Systems GmbH durch eine statistisch fundierte Angabe zu validieren. Die allgemeine Problemstellung bezieht sich auf die Entwicklung eines Testverfahrens für die Spezifikation von Genauigkeitsangaben der detektierten Bewegung von starren Objekten, die sich im Nahbereich des Messsystems befinden. Unter Nahbereich ist hier eine maximale Entfernung von bis zu 3m zu verstehen. Die nächsten zwei Teilaspekte bestehen in der Beurteilung der bestehenden Algorithmik und dessen Verbesserung durch alternative Lösungsansätze. Hier handelt es sich um zwei allgemeine Probleme. Für das Einkamerasystem werden direkte Lösungsmöglichkeiten des Räumlichen Rückwärtsschnittes aufgezeigt. Im Fall eines Zweikamerasystems findet eine Verbesserung der Punktzuordnung statt. Diese basiert insbesondere auf der Berücksichtigung der Oberfläche der Objekte. Diese Teilaufgaben werden in den einleitenden Abschnitten der drei Teile genau spezifiziert.

## Aufbau der Arbeit

Diese Diplomarbeit befasst sich mit drei verschiedenen Aspekten der Onlinemesssysteme WHEELWATCH und MOVEINSPECT. Aus diesem Grund besteht dieses Dokument aus drei großen Teilen. Der Teil I trägt den Titel „Genauigkeitsbeurteilung von optischen Onlinemesssystemen“. Darunter befindet sich die Entwicklung von zwei Testverfahren, die speziell für die Systeme WHEELWATCH und MOVEINSPECT konzipiert werden. Dabei beziehen sich die Testverfahren zur Untersuchung der Genauigkeit zum einen auf Strecken und zum anderen auf Winkel. Die genaue Vorgehensweise ist dem ersten Teil dieser Arbeit zu entnehmen.

Die beiden folgenden Teile befassen sich mit der Verbesserung der Algorithmik der Onlinemesssysteme. Dabei stellt der Teil II Alternativen zum Räumlicher Rückwärtsschnitt (RRS) des Systems WHEELWATCH vor. Das Ziel dieses Abschnitts ist es das bisher von der Firma AICON 3D Systems GmbH implementierte iterative Verfahren

des RRS durch ein direktes zu erweitern. Die direkte Lösung des RRS dient dann zur Bestimmung der Näherungswerte für das iterative Verfahren. Mit der Algorithmik des Systems MOVEINSPECT befasst sich der Teil III. Hier werden neue Ansatzmöglichkeiten aufgezeigt, um das Problem der Zuordnung von uncodierten Marken bei einem Zweikamerasystem zu verringern.

## Teil I

# Genauigkeitsbeurteilung optischer Onlinemessungen

## 1 Einleitung des ersten Teils

Der erste Teil der Diplomarbeit beschäftigt sich mit der Genauigkeitsbetrachtung von Bewegungsaufnahmen mit optischen Onlinemesssystemen. Die Entwicklung eines Testverfahrens zur Spezifikation der Genauigkeitsangaben zu erfassten Strecken und Winkeln wird insbesondere für die zwei Messsysteme WHEELWATCH und MOVEINSPECT der Firma AICON 3D Systems GmbH entwickelt, ist aber auch auf andere optische Nahbereichsmesssysteme übertragbar.

### 1.1 Motivation

In der Industrievermessung wurden bisher vor allem mechanische Messsensoren zur Erfassung von Bewegungsvorgängen verwendet. Diese haben den Nachteil, dass sie die Messergebnisse durch die Montage am Messobjekt beeinflussen. Optische Messsysteme besitzen hingegen die Möglichkeit, berührungslos zu messen. Für die Erfassung von präzisen 3D-Koordinaten haben sich als optische Verfahren Theodolitmesssysteme und Lasertracker etabliert. Diese nehmen jedoch, ebenso wie mechanische Systeme, lediglich Einzelpunkte auf. Eine flächenhafte Beobachtung mit einer gleichzeitigen Aufnahme vieler Punkte kann durch photogrammetrische Systeme ermöglicht werden. Dadurch zeigt sich auch ein deutliches Zeitersparnis im Messprozess. Des Weiteren ist neben einer statischen Messung auch eine dynamische Erfassung von Bewegungsvorgängen mit photogrammetrischen Systemen möglich, die in Echtzeit ausgewertet werden können. Diese Vorteile allein überzeugen die Kunden solcher Systeme jedoch nicht, um die alten etablierten Messsysteme durch die neuen photogrammetrischen Messsysteme zu ersetzen. Sie sind skeptisch gegenüber der erzielbaren Genauigkeit. Um mit den verschiedenen Messsystemen konkurrieren zu können, ist eine spezifizierte Angabe der erreichbaren Genauigkeit notwendig. Für diese Spezifikation wird innerhalb des ersten Teils der Diplomarbeit ein Testverfahren zur Genauigkeitsbeurteilung von optischen Onlinemessungen entwickelt.

## 1.2 Aufgabenstellung

Die Genauigkeitsuntersuchung von Onlinemesssystemen wird mit dem Ziel durchgeführt, eine allgemeine Genauigkeitsaussage für rotatorische und translatorische Bewegungsänderungen, die kontinuierlich in Echtzeit aufgenommen werden, zu treffen. Die Onlinemesssysteme der Firma AICON 3D Systems GmbH sind in der Lage schnelle Bewegungsänderungen in einem Messvolumen von etwa  $1\text{m} \times 1\text{m} \times 0,5\text{m}$  zu detektieren. Angesichts dessen, dass die Systeme die Bewegungsabläufe mit hohen Aufnahmefrequenzen beobachten, liegen zwischen zwei Messwerten kleine Bewegungsänderungen vor, die auch unterhalb des mm-Bereichs liegen können.

Auf Basis eines Vergleichs mit Referenzmessungen eines Systems mit übergeordneter Genauigkeit soll ein Testverfahren entwickelt werden, das eine Aussage der erreichbaren Genauigkeiten der Bewegungsänderungen unter verschiedenen Konfigurationen zulässt. Dafür ist es nötig die Auswirkung verschiedener Einflussgrößen, wie zum Beispiel die Versuchsanordnung, die Belichtungszeit oder die Aufnahmefrequenz, auf das Messergebnis und damit auf die Genauigkeit zu untersuchen und zu berücksichtigen. Diese Einflussgrößen besitzen zum Teil unterschiedliche Wirkungen auf die Strecken- und Winkelmessung. Somit unterteilt sich das Testverfahren in zwei unabhängige Teile, die die Genauigkeitsangaben von Distanzen und Winkeln getrennt spezifizieren. Beide basieren auf statistischen Auswerteverfahren zur Festlegung eines Qualitätsmaßes der Messsysteme. Das Ergebnis des Tests wird als Standardabweichung für den Messbereich des jeweiligen Systems graphisch mit dem Programm Matlab dargestellt. Mit diesem erfolgt die gesamte eigene Implementation der Testverfahren.

Als spezielle Messsysteme stehen die Systeme WHEELWATCH als Einkamerasystem und MOVEINSPECT als Stereomesssystem für die Untersuchungen zur Verfügung. Auf diese Systeme wird das Testverfahren abgestimmt, damit eine fundierte Aussage zu den beiden Onlinemesssystemen angegeben werden kann. Mit dem Testverfahren wird der Vergleich zwischen dem System WHEELWATCH und MOVEINSPECT ermöglicht. Dieser Vergleich dient als Hilfestellung für die Entscheidung, welches dieser Systeme für einen bestimmten Anwendungsfall das geeignetere Messsystem darstellt.

## 1.3 Aufbau

Zunächst werden die benötigten Grundlagen zum Aufbau eines Genauigkeitstests in Abschnitt 2 und die verwendeten Messsysteme (s. Abschnitt 3.1) kurz vorgestellt. Anschließend erfolgt die Entwicklung der zwei statistischen Testverfahren zur Beurteilung der Winkelgenauigkeit in Abschnitt 4 beziehungsweise der Streckengenauigkeit im darauffolgenden Abschnitt 5. Diese beiden Kapitel schildern die jeweiligen Voraussetzungen und durchgeführten Voruntersuchungen sowie die statistischen Auswertemodelle und die experimentell erzielten Ergebnisse der entwickelten beiden Testverfahren. Anschließend gibt der Abschnitt 6 einen Ausblick für mögliche Weiterentwicklungen der aufgestellten Testverfahren.

## 2 Statistische Grundlagen

Die zu entwickelnden Testverfahren basieren auf statistischen Grundlagen. Die allgemeinen theoretischen Grundzüge für verschiedene Messaufgaben stellt die Deutsche Industrie Norm (DIN) auf. Da diese als Vorschrift für Messungen und deren Auswertung dienen, erläutert der Abschnitt 2.1 die wesentlichen Definitionen der Genauigkeitsmaße nach DIN, auf denen die Testverfahren aufbauen. Anschließend erfolgt in Abschnitt 2.2 die Vorstellung des geostatistischen Verfahrens Ordinary Kriging. Dieses wird im Testverfahren zur Beurteilung von Distanzen verwendet, um diese für den gesamten Messbereich zu approximieren und graphisch darzustellen.

### 2.1 Vorgaben nach der Deutschen Industrie Norm

Das Deutsche Institut für Normung hat in Bezug auf die Qualitätsbeurteilung von Messgenauigkeiten zwei für diese Arbeit relevante Vorschriften hervorgebracht. Zum einen werden in der (DIN1319) die Grundlagen der Messtechnik beschrieben. Diese Norm besteht aus vier Teilen.

1. Grundbegriffe (DIN1319-1, 1995)
2. Begriffe für Messmittel (DIN1319-2, 2005)
3. Auswertung von Messungen einer einzelnen Testgröße (DIN1319-3, 1996)
4. Auswertung von Messungen (DIN1319-4, 1999)

Zum anderen definiert die (DIN55350) die Begriffe der Qualitätssicherung und Statistik. Hierbei ist vor allem der 13. Teil (DIN55350-13, 1987) von Interesse, der auf die Genauigkeit von Ermittlungsverfahren und Ermittlungsergebnissen eingeht und die Teile (DIN55350-21, 1982) bis (DIN55350-24, 1982), die die Begriffe der Statistik in Bezug auf beschreibende Werte und Wahrscheinlichkeitsverteilungen definiert.

Nach (DIN1319-3, 1996) und (DIN1319-4, 1999) läuft die Auswertung von Messungen in vier Schritten ab. Zuerst ist die Aufstellung eines Modells erforderlich, das alle beteiligten Größen in einem mathematischen Zusammenhang beschreibt. Die Messgröße beziehungsweise Ergebnisgröße, die als Ziel der Messungen und Auswertungen erreicht wird, ergibt sich als Modellfunktion aller beteiligten Einflussgrößen. Als nächster Schritt sind die gegebenen Messwerte und die verfügbaren Daten vorzubereiten. Dazu gehört zum Beispiel die Ermittlung eines Schätzwertes für die Eingangsgrößen und deren Messunsicherheiten. Danach kann im dritten Schritt die Ergebnisgröße inklusive Messunsicherheit mittels des aufgestellten Modells berechnet werden. Das Messergebnis kann durch Einsetzen der Schätzwerte in die Modellfunktion berechnet werden. Die zugehörige Standardunsicherheit ist über das Gauß-Verfahren, auch bekannt unter Fehlerfortpflanzungsgesetz, zu berechnen. Bei Überbestimmung ist das Ergebnis über die Methode der kleinsten Quadrate nach Gauß zu schätzen. In der Statistik führt dieses

Ausgleichungsverfahren zum Beispiel auf das Gauß-Markov-Modell (s. hierzu (Niemeier, 2002, S. 108 ff.)). Als letzter Schritt ist die Angabe des vollständigen Messergebnisses der Ergebnisgröße aufgeführt. Zu den Angaben gehört die Messgröße inklusive Messunsicherheit oder relativer Messunsicherheit. Als weitere sinnvolle Angaben gelten zum Beispiel die Schätzwerte aller Eingangsgrößen und deren Unsicherheiten, die Anzahl der Messungen und die Modellfunktion mit Erläuterung.

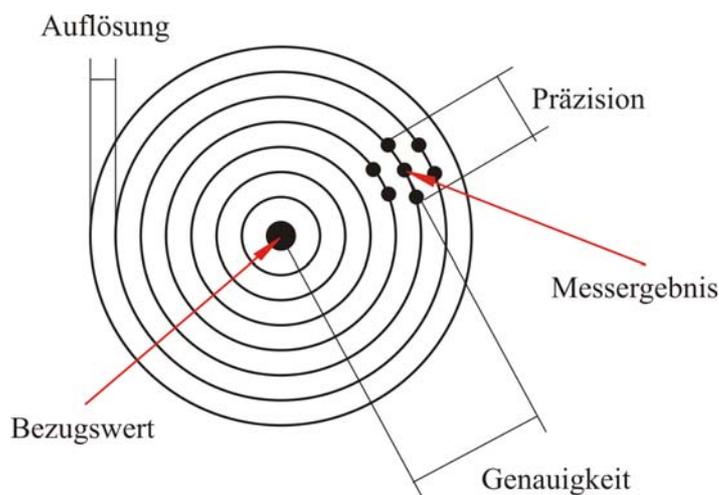


Abbildung 2.1: Darstellung der Zusammenhänge der qualitativen Genauigkeitsbegriffe „Genauigkeit“ und „Präzision“

Die Genauigkeitsbeschreibung von Messungen kann mit unterschiedlichen Angaben durchgeführt werden. Zunächst wird der Unterschied zwischen dem ermittelten Ergebnis des zuvor beschriebenen Verfahrens und einem Bezugswert, der dem wahren, dem richtigen oder dem Erwartungswert entspricht, mit dem Begriff der Messabweichung (s. (DIN1319-1, 1995) und (DIN55350-13, 1987)) beschrieben. Hieraus ergeben sich weitere Genauigkeitsbegriffe, die sich in die Definition von qualitativen und quantitativen Begriffen unterteilt. Die qualitativen Genauigkeitsbegriffe sind in Abbildung 2.1 graphisch dargestellt. Der Begriff Genauigkeit an sich, stellt eine qualitative Bezeichnung dar, die „das Ausmaß der Annäherung von Ermittlungsergebnissen an den Bezugswert“ (DIN55350-13, 1987) beschreibt. Zur quantitativen Angabe wird der Wertebereich einer Messung angegeben, in dem der Bezugswert liegt (DIN55350-13, 1987). Hierbei handelt es sich dann um die Messunsicherheit, die in Verbindung mit einer bestimmten Wahrscheinlichkeit angegeben wird, mit der der Wertebereich zutrifft. Ob der Bezugswert in diesem Wertebereich liegt, kann über Testverfahren überprüft werden. Diese werden in Teil 24 der DIN 55350 (DIN55350-24, 1982) näher definiert. Die Angabe der Messunsicherheit gehört nach (DIN1319-3, 1996) und (DIN1319-4, 1999) zum vollständigen Messergebnis.

Ein weiterer Begriff der qualitativen Beurteilung von Messergebnissen stellt die Präzision dar, die ein Maß für die Streuung der Messergebnisse untereinander ist. Diese kann quantitativ als Wiederholstandardabweichung oder Vergleichsstandardabweichung angegeben werden (s. (DIN55350-13, 1987)), die sich aus der Standardabweichung ergeben, je nachdem ob Wiederhol- oder Vergleichsbedingungen vorliegen. Die Streuungs-

parameter Standardabweichung und Varianz sind in (DIN55350-21, 1982) definiert und ihre Berechnung wird nachfolgend im Anhang A.2.1 dargelegt.

**Anwendung der DIN Vorschriften in der Praxis.** Im allgemeinen Sprachgebrauch wird häufig von der sogenannten inneren oder äußeren Genauigkeit der Messsysteme gesprochen. Diese beschreiben quantitative Werte der Präzision. Die innere Genauigkeit kann durch die Standardabweichung beschrieben werden, die sich aus Wiederholungsmessungen ergibt und somit nur Einflüsse des Messsystems selbst berücksichtigt. Die Standardabweichung von Messungen unter Vergleichsbedingungen führen auf die äußere Genauigkeit, bei der verschiedene Einflüsse auf das System sichtbar und miteinbezogen werden. Falls Vergleichsmessungen mit Sollwerten von übergeordneter Genauigkeit vorliegen, kann auf die absolute Genauigkeit geschlossen werden, die nach DIN als Messunsicherheit bezeichnet wird und als Angabe eines Messergebnisses erforderlich ist. Dies ist bei Messungen nicht immer möglich, weshalb die Angabe der Messunsicherheit in der Praxis häufig durch quantitative Angaben der Präzision ersetzt wird. Dies liegt unter anderem daran, dass eine Berücksichtigung aller Einflussgrößen im Modell nicht möglich ist, da nicht alle erfasst werden können.

## 2.2 Ordinary Kriging

Messungen liefern räumlich oder zeitlich verteilte punkthafte Aufnahmen. Zur Beurteilung dieser einzelnen Ergebnisse ist es sinnvoll, zwischen diesen Werten räumlich beziehungsweise zeitlich zu interpolieren, um einen Gesamtüberblick zu bekommen. Hierzu bietet die Geostatistik verschiedene Methoden, mit denen Werte an Stellen geschätzt werden, an denen keine Messwerte vorliegen. Die geostatistische Methode „Ordinary Kriging“ beruht auf einem stochastischen Ansatz, bei dem die Prädiktion von Werten auf Nachbarschaftsbeziehungen beruht. Dies bedeutet, dass das Verhalten an einem bestimmten Ort darauf schließen lässt, dass in der direkten Nachbarschaft des Ortes ein ähnliches Verhalten auftritt. Hierbei handelt es sich also um ein Verfahren für räumlich verteilte Daten.

Die Berechnung zur Approximation von Werten in der Umgebung der Messwerte mittels Ordinary Kriging unterteilt sich in mehrere Schritte. Die folgende Beschreibung ist aus unserer Dokumentation zum „Seminar: Robuste Parameterschätzung, Approximation über Kriging“ entnommen und verallgemeinert. Als Literatur bietet sich zum Beispiel (Wackernagel, 1995) an.

**Trendabspaltung.** Die Beobachtungen  $l$  sind eine Funktion eines Ortes und setzen sich aus einem deterministischen und einem stochastischen Anteil zusammen:

$$l = \underbrace{f(x)}_{\text{determ. Ansatz (Trend)}} + \underbrace{s + n}_{\text{stoch. Anteil (Signal + zuf. Rauschen)}} \quad (2.1)$$

Die Prädiktion eines Wertes mittels Ordinary Kriging beruht auf einem stochastischen Modell und setzt voraus, dass die Bedingungen der Stationarität gegeben sind. Das heißt die Wahrscheinlichkeit der einzelnen Zufallsvariablen muss während des gesamten Berechnungszeitraums konstant bleiben. Daraus folgt, dass die ersten beiden Momente (Erwartungswert und Varianz) jeweils einen konstanten Wert annehmen, der für jede Beobachtung und für jede Prädiktion gleich ist. Sind diese Bedingungen nicht erfüllt, muss ein so genannter Trend abgespalten werden. Der Trend kann durch eine beliebige Funktion approximiert werden. Diese sollte so gewählt werden, dass nach Abspaltung nur noch der stochastische Anteil übrigbleibt. Dies kann beispielsweise mittels eines Polynoms erfolgen, dessen Grad je nach Datensatz eine beliebige Ordnung annehmen kann.

Nach Abspaltung des Trends

$$\Delta l = l - \hat{l} \quad (2.2)$$

mit

$\Delta l$  ... Reduzierte Messwerte

$l$  ... Messwerte

$\hat{l}$  ... Berechnete Funktionswerte des Trends

kann das Variogramm mit den reduzierten Messwerten erstellt und anschließend die Werte prädiziert werden.

**Erstellung eines Variogramms.** Der Abstand  $h$  zwischen allen Paaren von Punkten wird gegen die mittlere quadratische Differenz zwischen den jeweiligen reduzierten Messwerten  $\gamma = \frac{(f(x+h)-f(x))^2}{2}$  aufgetragen. Damit ergibt sich die Variogrammwolke, wobei überprüft werden muss, ob die Entfernungen anisotrop (richtungsabhängig) oder isotrop (richtungsunabhängig) sind. Eine Richtungsabhängigkeit ist im Modell des Variogramms zu berücksichtigen. Näheres hierzu kann in (Wackernagel, 1995, S. 46 ff.) nachgelesen werden.

Da nur sehr wenige Punkte den gleichen Abstand haben, wird die Variogrammwolke in Abstandsklassen eingeteilt. Dazu wird die Anzahl der Abstandsklassen festgelegt, die Variogrammwerte innerhalb einer Klasse arithmetisch gemittelt und der zugehörige Abstandswert bestimmt. Dies erfolgt im so genannten „Experimentellen Variogramm“ oder „Semivariogramm“.

Im Anschluss wird durch das Experimentelle Variogramm eine positiv definite Funktion gelegt, wodurch das „Theoretische Variogramm“ entsteht.

Dieses Variogramm hat den in Abbildung 2.2 dargestellten grundsätzlichen Aufbau. Der Nugget-Effekt spiegelt die Unstetigkeit am Ursprung wider. Er ist gleich dem Konzept des Weißen Rauschens in der Signaltechnik. Die Funktion des Theoretischen Variogramms läuft gegen einen konstanten Wert. Diesen nimmt sie ab dem Punkt  $p$

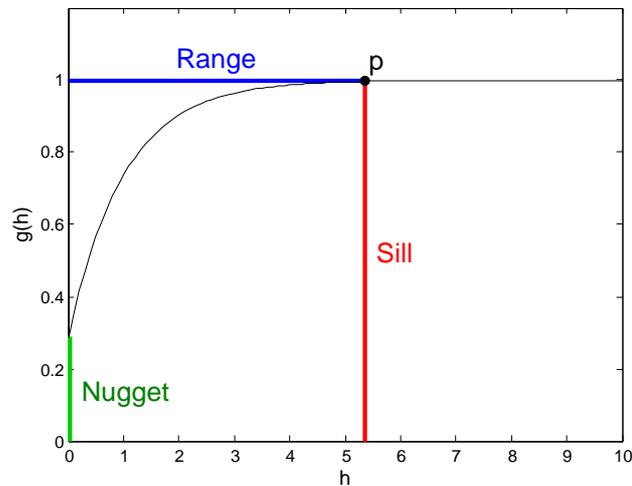


Abbildung 2.2: Variogramm mit Nugget-Effekt, Sill und Range

(s. Abbildung 2.2) an. Mit Sill wird der Abstand in  $y$ -Richtung zwischen  $x$ -Achse und dem konstanten Wert bezeichnet. Range bildet die Weite in  $x$ -Richtung zwischen  $y$ -Achse und dem Wert  $p$ .

Als Grundlage zur Schätzung des „Theoretischen Variogramms“ stehen verschiedene Modelle zur Verfügung. Eine Auswahl dieser Modelle ist im Folgenden aufgelistet. Hierbei steht der Parameter  $h$  für den Wert des Ranges.

- Nugget-Effekt-Modell:

$$\begin{aligned} \gamma(h) &= 0 & \text{für } h = 0 \\ \gamma(h) &= b & \text{für } h > 0 \end{aligned} \quad (2.3)$$

- Lineares Modell:

$$\begin{aligned} \gamma(h) &= \frac{h}{b} & \text{für } 0 \leq h \leq a \\ \gamma(h) &= b & \text{für } h > a \end{aligned} \quad (2.4)$$

- Exponentielles Modell:

$$\gamma(h) = b \cdot \left(1 - e^{-\frac{h}{a}}\right) \quad (2.5)$$

- Gauß-Modell:

$$\gamma(h) = b \cdot \left(1 - e^{-\frac{h^2}{a^2}}\right) \quad (2.6)$$

- Sphärisches Modell:

$$\begin{aligned} \gamma(h) &= b \cdot \left(\frac{3h}{2a} - \frac{h^3}{2a^3}\right) & \text{für } 0 \leq h \leq a \\ \gamma(h) &= b & \text{für } h > a \end{aligned} \quad (2.7)$$

- Modell mit Besselfunktion:

$$\gamma(h) = b \cdot (1 - \text{BesselJ}(0, h/a)) \quad (2.8)$$

Häufig werden Linearkombinationen der verschiedenen Modelle zur Festlegung eines Theoretischen Variogramms verwendet. An die Funktionsschätzung ist die Bedingung geknüpft, dass lediglich die ersten Klassen des Experimentellen Variogramms gut approximiert werden müssen. Dies liegt zum einen daran, dass die Klassengröße mit größer werdendem Abstand abnimmt. Somit repräsentieren die ersten Klassen einen höheren Anteil der Messdaten und sind deshalb wichtiger für die Approximation. Außerdem haben näher gelegene Punkte durch die nahe Nachbarschaft einen größeren Einfluss auf die Prädiktion eines Wertes als weiter entfernte. Deshalb sind die Variogrammwerte für die größeren Entfernungen ungenauer und müssen nicht optimal approximiert werden. Von der Wahl der Funktion und somit des Theoretischen Variogramms hängt entscheidend die nachfolgende Berechnung der Prädiktion und somit das Endergebnis des Ordinary Kriging ab.

**Ordinary Kriging.** Die Prädiktion eines Funktionswertes an der Stelle  $\mathbf{x}_0$  erfolgt über eine gewichtete Linearkombination der Messwerte an den Stützstellen  $x_n$ :

$$\hat{s}(\mathbf{x}_0) = \sum_{n=1}^N \lambda_n s(x_n) \quad (2.9)$$

mit den Gewichten  $\lambda_n$ .

Für den Prädiktionsschätzer werden die BLUE-Eigenschaften (**B**est **L**inear **U**nbiased **E**stimation) gefordert, womit sich folgendes Gleichungssystem ergibt, um die Gewichte zu ermitteln:

$$\begin{aligned} \begin{bmatrix} \lambda \\ k \end{bmatrix} &= \begin{bmatrix} \Sigma_{\Delta l \Delta l} & \mathbf{1} \\ \mathbf{1} & 0 \end{bmatrix}^{-1} \begin{bmatrix} \Sigma_{\Delta l, \hat{s}} \\ 1 \end{bmatrix} \\ \Leftrightarrow \begin{bmatrix} \lambda_1 \\ \vdots \\ \lambda_n \\ k \end{bmatrix} &= \begin{bmatrix} \gamma_{11} & \cdots & \gamma_{1n} & 1 \\ \vdots & \ddots & \vdots & \vdots \\ \gamma_{n1} & \cdots & \gamma_{nn} & 1 \\ 1 & \cdots & 1 & 0 \end{bmatrix}^{-1} \begin{bmatrix} \gamma_{10} \\ \vdots \\ \gamma_{n0} \\ 1 \end{bmatrix} \end{aligned} \quad (2.10)$$

mit

- $k$  ... Lagrange Operator
- $\Sigma_{\Delta l \Delta l}$  ... Kovarianzmatrix zwischen den Beobachtungen
- $\Sigma_{\Delta l \hat{s}}$  ... Kovarianzvektor zwischen den Beobachtungen und den zu schätzenden Werten
- $\gamma_{ij}$  ... Funktionswert des Variogramms bei gegebener Entfernung zwischen den Punkten  $i$  und  $j$

Zur Überprüfung, wie gut die prädizierten Werte sind, wird die sogenannte Krigingvarianz herangezogen. In der Literatur sind für diese Berechnung unterschiedliche Formeln zu finden. In (Wackernagel, 1995, S. 76) ist die Krigingvarianz mit

$$\sigma_k^2 = -k - \gamma(\mathbf{x}_0 - \mathbf{x}_0) + 2 \sum_{n=1}^N \lambda_n \gamma(x_n - \mathbf{x}_0) \quad (2.11)$$

angegeben.

**Kreuzvalidierung.** Mit Hilfe der Kreuzvalidierung wird nach groben Fehlern im Modell oder in dem vorliegenden Datensatz gesucht. Die Überprüfung jedes einzelnen Messwertes findet mittels Ordinary Kriging statt. Dazu wird der Reihe nach jeder Messwert geschätzt, ohne dass er selbst in die Berechnung miteingeht. Anschließend wird die Differenz zwischen Messwert und prädizierten Wert gebildet, um die Prädiktion des Wertes zu bewerten.

Zur Gesamtbeurteilung wird der Durchschnitt des Kreuzvalidierungsfehlers gebildet:

$$\frac{1}{N} \sum_{n=1}^N (s(x_n) - \hat{s}(x_n)) \quad (2.12)$$

Wenn sich der Wert signifikant von Null unterscheidet, können systematische Schätzfehler vorliegen und das Modell sollte überprüft werden.

### 3 Messsysteme

Die technischen Voraussetzungen dieser Untersuchung liefern die optischen Onlinemesssysteme WHEELWATCH und MOVEINSPECT sowie die Referenzsysteme. Die entwickelten Testverfahren sind insbesondere auf diese Systeme abgestimmt. Deshalb stellt zunächst der Abschnitt 3.1 die Funktionsweisen der Onlinemesssysteme vor. Hierzu gehört auch die Beschreibung der charakteristischen Einflussgrößen, wie zum Beispiel die Belichtungszeit oder die Bildfrequenz, deren Einstellungen direkte Auswirkungen auf die Messergebnisse haben. Für die Auswertung der einzelnen Untersuchungen ist es nötig, den Einfluss der einzelnen Parameter zu kennen, um die Messergebnisse beurteilen zu können. Die Einflussgrößen sind für die beiden Systeme WHEELWATCH und MOVEINSPECT weitestgehend identisch und können innerhalb der Steuersoftware TRACECAMF eingestellt werden. Über diese Software kann sowohl das System WHEELWATCH wie auch das System MOVEINSPECT angesteuert werden. Die genauen Parametereinstellungen und dessen Funktionsweise in der Software TRACECAMF stellt der Abschnitt 3.1.3 vor. Neben den Einflussgrößen, die innerhalb der Software TRACECAMF variiert werden können, besitzt die Wahl der aufzumessenen Objekte einen direkten Einfluss auf das Messergebnis. Deshalb liefert der Abschnitt 3.1.4 einen Einblick in die Erstellung der Adapter, die als starres Objekt für die Messung dienen.

Innerhalb der Testverfahren werden die Strecken und Winkel zwischen zwei Positionen des aufzunehmenden Adapters hinsichtlich ihrer Genauigkeit beurteilt. Für diese Beurteilung sind Referenzsysteme erforderlich, die Sollwerte liefern. Hierzu dienen die in Paragraph 3.2 vorgestellten hochgenauen Verschiebeeinheiten.

### 3.1 Optische Onlinemesssysteme

Alle Komponenten, die für eine Messung mit den optischen Onlinemesssystemen benötigt werden und die für die Entwicklung der Testverfahren relevant sind, stellt dieser Teil zusammen. Dies geht von der Vorstellung der beiden Systeme WHEELWATCH und MOVEINSPECT über eine Einweisung in die Steuersoftware TRACECAMF bis hin zu den benötigten Adaptern, die als aufzunehmende Objekte dienen. Die Angaben innerhalb dieses Abschnitts beziehen sich auf Informationen der Firma AICON 3D Systems GmbH.

#### 3.1.1 WheelWatch



Abbildung 3.1: WHEELWATCH der Firma AICON 3D Systems GmbH mit Messmarken am Kotflügel des Fahrzeugs und einem Radadapter (Aicon, 2008)

Das System WHEELWATCH ist dafür konzipiert das Bewegungsverhalten der Räder bei einer Autofahrt berührungslos zu erfassen (s. Abbildung 3.1). Neben diesem Anwendungsgebiet in der Fahrzeugentwicklung kann das System unter anderem auch zur Vermessung von Roboterbahnen oder zur Verhaltensanalyse von Autotüren beim Zuschlagen herangezogen werden.

Der folgende Abschnitt stellt die einzelnen Komponenten vor, die bei einer Messung mit WHEELWATCH benötigt werden. Anschließend erfolgt eine genauere Beschreibung des Aufbaus und der Funktionsweisen des Systems.

### 3.1.1.1 Komponenten

	WHEELWATCH
Kameratyp	TRACECAMF Highspeed CMOS Kamera
Auflösung	1280pel × 1024pel
Objektiv	verzeichnungsarmes Hochleistungsobjektiv $f = 10\text{mm}$
Bildfrequenz	bis 490Hz
Belichtungszeit	10 $\mu\text{s}$ – 1s
3D-Positionsgenauigkeit	$\pm 0,1\text{mm}$
Winkelgenauigkeit	$\pm 0,015^\circ$
Messvolumen	1m × 1m × 0,5m

Tabelle 3.1: Technische Daten des Produktes WHEELWATCH der Firma AICON 3D Systems GmbH (Angaben entnommen aus (Aicon, 2008))

Für die Messung mit WHEELWATCH werden verschiedene Komponenten benötigt. Die Hauptkomponente des Systems stellt die Hochgeschwindigkeitskamera TRACECAMF dar. Der integrierte hochauflösende CMOS-Sensor besitzt eine Auflösung von 1280 Pixel × 1024 Pixel, mit dem eine Bildfrequenz von 490Hz realisierbar ist. In Kombination mit dem Field-Programmable Gate Array (FPGA)-Bildauswerteprozessor werden Bewegungsabläufe bis zu einer Geschwindigkeit von 250km/h aufgenommen und in Echtzeit ausgewertet. Diese und alle weiteren technischen Daten des Systems WHEELWATCH sind in Tabelle 3.1 zusammengefasst. Des Weiteren ist die Kamera mit einem Hochleistungsblitz und einem 10mm-Objektiv ausgestattet. Die aufgenommenen Bilder der TRACECAMF-Kamera werden vom integrierten Prozessor vorverarbeitet, so dass lediglich die Orientierungsparameter der Kamera beziehungsweise Koordinaten als Messergebnisse an den mit einer Standardnetzwerkverbindung angeschlossenen Rechner übertragen werden. Aus diesem Grund ist das System über einen beliebigen Zeitraum echtzeitfähig. Die Kommunikation zwischen Kamera und Rechner erfolgt über eine Synchronisationsbox (SyncBox), an die bis zu vier Kameras gleichzeitig angeschlossen werden können. Dies ermöglicht zum Beispiel die gleichzeitige Aufnahme von allen vier Radbewegungen eines Fahrzeugs.

Neben der Kamera benötigt das System Messmarken und Adapter, die zur Signalisierung der aufzunehmenden Objekte dienen. Diese Hilfsmittel stellt der Abschnitt 3.1.4 im Anschluss vor.

### 3.1.1.2 Aufbau und Funktionsprinzip

Für die klassische Anwendung des Systems WHEELWATCH wird die Kamera mit einem speziellen Gestell am Fahrzeug angebracht (s. Abbildung 3.1). Ansonsten besteht die Möglichkeit die Kamera zum Beispiel auf einem Stativ zu montieren. Die Signalisierung des aufzunehmenden Objekts erfolgt mit speziellen Marken und Adaptern, welche von WHEELWATCH aufgemessen werden. Fest angebrachte Marken dienen zur Selbstreferenzierung der Kameraposition, während die Position und Lage eines Adapters die

Messgröße darstellt. Aus dieser Messgröße, die mittels mehrerer RRS bestimmt werden, lässt sich die Relativbewegung des Adapters ableiten. Die Grundlagen des Verfahrens des RRS sind im Anhang A.1.3 nachzuschlagen. Die Koordinatenbestimmung einzelner Messpunkte ist nicht möglich.

### 3.1.2 MoveInspect



Abbildung 3.2: Kamerasystem MOVEINSPECT HF mit TRACECAMF Kameras und Kamerabalken (Aicon, 2008)

Das System MOVEINSPECT wurde zur dreidimensionalen Erfassung und Auswertung von dynamischen Vorgängen entwickelt. Die bereits genannten Anwendungsgebiete der Türschlagversuche und der Bahnvermessung von Robotern bestehen auch für dieses System. Im Gegensatz zu WHEELWATCH ist MOVEINSPECT auch in der Lage einzelne Objektpunkte, sowohl codiert als auch uncodiert, zu messen. Dadurch ergeben sich weitere Anwendungsgebiete von MOVEINSPECT, zu denen unter anderem die Strukturanalyse von Oberflächen und die Fehleranalyse in der Produktionslinie, wie zum Beispiel bei Schweißvorgängen, Kollisionsuntersuchungen und der Materialprüfung, zählen. MOVEINSPECT kann auch im Windkanal oder in der Klimakammer verwendet werden, um das Verhalten von einzelnen Komponenten in Extremsituationen zu testen.

#### 3.1.2.1 Komponenten

	MOVEINSPECT HF		MOVEINSPECT HR
Kameratyp	TRACECAMF		TRACECAMF
Auflösung	1, 3Mpel	0, 7Mpel	2, 0/5, 0Mpel
Bildfrequenz	bis 490Hz	bis 1000Hz	bis 5Hz
Positionsgenauigkeit	±0, 1mm für Messvolumen		±0, 05mm für Messvolumen
Messvolumen	1m × 1m × 0, 5m		1m × 1m × 0, 5m

Tabelle 3.2: Technische Daten des Produktes MOVEINSPECT HF und HR der Firma AICON 3D Systems GmbH (Angaben entnommen aus (Aicon, 2008))

Das System MOVEINSPECT verwendet die gleichen Kameras wie das zuletzt vorgestellte System WHEELWATCH. Die nähere Beschreibung der Kameras kann deshalb im Abschnitt 3.1.1.1 nachgeschlagen werden. Der einzige Unterschied der hier eingesetzten Kameras liegt in der Brennweite. Das System MOVEINSPECT arbeitet mit 16mm-Objektiven. Außerdem besteht das System MOVEINSPECT aus zwei oder drei TRACECAMF Kameras, die auf einem Kamerabalken aus Aluminium angebracht werden. Die Verbindung der beiden Kameras findet über eine SyncBox statt, deren Ansteuerung über einen Auswerterechner erfolgt. Somit können die Kameras synchron Bilder aufnehmen.

Je nach Anwendungsgebiet steht dem Nutzer eine high frequency (HF) oder high resolution (HR) Lösung von MOVEINSPECT zur Verfügung. MOVEINSPECT HF bietet mit zwei Kameras die Möglichkeit die Messung mit einer höheren Bildfrequenz, aber einer geringeren Auflösung, durchzuführen als MOVEINSPECT HR. Die high resolution Lösung erreicht mit drei Kameras nach den Angaben von AICON 3D Systems GmbH eine Positionsgenauigkeit von  $\pm 0,05\text{mm}$  für ein Messvolumen von  $1\text{m} \times 1\text{m} \times 0,5\text{m}$ . Dies ist um das zweifache besser als die high frequency Lösung mit  $\pm 0,1\text{mm}$ . Die Daten der beiden Systeme sind in Tabelle 3.2 aufgelistet. Für die Untersuchungen in dieser Arbeit wird das Zweikamerasystem MOVEINSPECT HF verwendet.

Das System MOVEINSPECT benötigt Hilfsmittel für die Messung, wie Messmarken und Adapter, die der Abschnitt 3.1.4 erläutert.

### 3.1.2.2 Aufbau und Funktionsprinzip

Der MOVEINSPECT-Kamerabalken wird auf einem Stativ aufgestellt und ist somit transportabel einsetzbar. Damit das System für verschiedene Messaufgaben angepasst werden kann, ist die relative rotatorische Lage der Kameras beliebig varrierbar. Der Abstand zwischen den beiden Kameras, die so genannte Basis, ist durch den MOVEINSPECT-Kamerabalken festgelegt.

Die Berechnung der Koordinaten der Messpunkte erfolgt über den Räumlichen Vorwärtsschnitt (RVS). Die Grundlagen des RVS können im Anhang A.1.4 nachgelesen werden. Die Ergebnisse einer Messung wertet TRACECAMF entweder online oder nach Beendigung der Messung im Postprocessing aus. Als Ergebnis liefert die Software von MOVEINSPECT die Koordinaten von Einzelpunkten mit deren Standardabweichungen im Koordinatensystem der ersten Kamera. Bei der Messung von Adaptern sind in der Ergebnisdatei die Transformationsparameter (drei Translations- und drei Rotationsparameter) vom Kamera- in das Adaptersystem angegeben. Aus den Messgrößen kann im Anschluss eine Bestimmung der Bewegung oder eine Verformungsanalyse durchgeführt werden.

### 3.1.3 Software TraceCamF

Die Ansteuerung der beiden Onlinemesssysteme erfolgt über die Software TRACE-CAMF. Vor dem Ausführen des Programms wird TRACECAMF der jeweiligen Messaufgabe angepasst und anschließend verschiedene Parametereinstellungen durchgeführt. Die meisten Einstellmöglichkeiten sind für das Ein- und Zweikerasystem identisch. Ein genereller Unterschied besteht darin, dass MOVEINSPECT mit zwei Kameras ausgestattet ist, wohingegen WHEELWATCH nur mit einer Kamera misst. Bei MOVEINSPECT besitzen beide Kameras, mit denen ein Bildverband aufgenommen wird, die gleichen Einstellungen. Dies wird durch die Software TRACECAMF realisiert. Die wenigen Differenzen, die ansonsten noch zwischen den Systemen WHEELWATCH und MOVEINSPECT in der Parameterwahl vorliegen, werden unmittelbar bei der Beschreibung des jeweiligen Parameters erläutert.

#### 3.1.3.1 Kalibrierung mit TRACECAMF

**Fokussierung und Blendeneinstellung.** Vor einer Messung findet die Fokussierung der verwendeten Kameras statt. Für die Fokussierung müssen die Kameras demontiert werden, um das Objektiv zugänglich zu machen. Ziel dieser Maßnahme ist die Sicherstellung, dass die Fokussierung während einer Messung gleich bleibt. Ist dies nicht der Fall, liegen später verfälschte Messergebnisse vor. Die Fokussierung erfolgt auf einen Siemensstern, welcher sich im Abstand des späteren Objekts von der Kamera befindet. Zusätzlich zur Fokussierung erfolgt die Blendeneinstellung. Dies ist, aus den gleichen Gründen wie bei der Fokussierung, ebenfalls nur zu diesem Zeitpunkt möglich. Die Fokussierung und die Einstellung der Blende erfolgt üblicherweise lediglich einmal, nach der Festlegung der Entfernung, in der sich das aufzunehmende Objekt später befindet.

**Kalibrierung von WHEELWATCH.** Der nächste Schritt ist die Kalibrierung der Kameras. Die Kalibrierung unterscheidet sich etwas zwischen den Systemen WHEELWATCH und MOVEINSPECT, da eine unterschiedliche Anzahl an Kameras eingesetzt wird. Bei WHEELWATCH muss die Innere Orientierung (IO) und eine Referenzposition bestimmt werden. Für die IO schwenkt der Nutzer ein Referenzfeld, in der von der Software TRACECAMF vorgeschriebenen Art und Weise, vor der Kamera hin und her. Diese Referenzpunktfelder bestehen aus einer Ansammlung von Punkten, deren Koordinaten in einem lokalen Koordinatensystem bekannt sind. Durch Vergleich der Messwerte mit den vorliegenden Koordinaten bestimmt TRACECAMF die folgenden Parameter:

- Kamerakonstante  $c$
- Koordinaten des Hauptpunktes  $x'_H, y'_H$
- Polynomienellen Koeffizienten  $A_1, A_2, A_3$  der radialsymmetrischen Verzeichnung

- Koeffizienten  $B_1, B_2$  der radialasymmetrischen und tangentialen Verzeichnung
- Koeffizienten  $C_1, C_2$  der Scherung und der Affinität des Sensorsystems zum Bildsystem.

Die Verzeichnungskorrekturen  $d_{x'}$  und  $d_{y'}$  bilden den funktionalen Zusammenhang

$$d_{x'}(A_1, A_2, A_3, B_1, B_2, r_0, x', y') \quad (3.1)$$

$$d_{y'}(A_1, A_2, A_3, B_1, B_2, r_0, x', y') \quad (3.2)$$

mit den Parametern

$A_1, A_2, A_3$  ... Koeffizienten der radialsymmetrischen Verzeichnung  
 $B_1, B_2$  ... Koeffizienten der radialasymmetrischen und tangentialen Verzeichnung  
 $r_0$  ... Zweiter Nulldurchgang der Verzeichnungskurve  
 $x', y'$  ... Unkorrigierte Bildkoordinaten.

Der explizite funktionale Zusammenhang ist im Anhang A.1.2 zusammengestellt.

Aus diesen Parametern setzt sich die Kalibriermatrix  $K$  dann wie folgt zusammen:

$$K = \begin{bmatrix} c + C_1 & C_2 & x'_H + d_{x'} \\ 0 & c & y'_H + d_{y'} \\ 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \quad (3.3)$$

mit

$c$  ... Negative Kamerakonstante  
 $C_1$  ... Koeffizient der Affinität des Sensorsystems zum Bildsystem  
 $C_2$  ... Scherungsfaktor zwischen dem Sensorsystem zum Bildsystem  
 $x'_H, y'_H$  ... Bildkoordinaten des Bildhauptpunkts  
 $d_{x'}, d_{y'}$  ... Verzeichnungskorrekturen

Hiermit ist dieses Modell der IO der Firma AICON 3D Systems GmbH mit der in Abschnitt A.1.1 beschriebenen theoretischen Zusammensetzung der Kalibriermatrix vergleichbar.

Von den Kalibrierungsparametern der IO hängt die Güte der Messergebnisse unmittelbar ab. Aus diesem Grund muss darauf geachtet werden, dass die korrekten Parameter für eine Messung herangezogen werden. Die Parameter der IO beschreiben die innere Konfiguration der Kamera. Eine neue Kalibrierung ist zwingend erforderlich sobald sich diese Parameter verändern. Die Ursache für eine Veränderung der Parameter der IO ist zum Beispiel in Temperaturunterschieden begründet, denen die Kamera ausgesetzt ist. Eine Fokussierung verändert die Parameter der IO grundsätzlich, so dass nach diesem Schritt zwingend die Durchführung einer neuen Kalibrierung erfolgen muss.

Nachdem die IO erfolgreich bestimmt ist, benötigt die Software von WHEELWATCH eine Referenzposition des aufzunehmenden Messobjekts. Diese Startposition dient als Referenz für den nachfolgenden dynamischen Bewegungsablauf, der mit WHEELWATCH aufgenommen wird. Für diese eine Messung darf sich das aufzunehmende Objekt nicht bewegen. Aus diesem Grund wird diese Position vor der eigentlichen Messung bestimmt. Hiermit liegt die Äußere Orientierung (ÄO) der Kamera in Bezug auf das Referenzobjekt vor. Anschließend ist das System WHEELWATCH einsatzbereit.

**Kalibrierung von MOVEINSPECT.** Die Kalibrierung des Systems MOVEINSPECT unterscheidet sich zu WHEELWATCH dahingehend, dass hier keine Referenzposition bestimmt werden muss, dafür allerdings eine Relative Orientierung (RO) der beiden eingesetzten Kameras. Dies liegt an den verschiedenen Algorithmen der beiden Systeme zur Bestimmung einer Position. Die Parameter der Inneren und Relativen Orientierung können mittels zweier unterschiedlicher Ansätze bestimmt werden.

Die erste Möglichkeit besteht aus zwei Schritten. Der Erste bestimmt die Parameter der IO beider Kameras mit dem gleichen Verfahren, wie es bei WHEELWATCH zum Einsatz kommt. In einem zweiten Schritt erfolgt dann die Bestimmung der RO. Für diese werden die Kameras in der relativen Lage zueinander aufgebaut, die sie für die spätere Messungen einnehmen. Die Bestimmung der RO erfolgt dann mittels eines Referenzfeldes, welches von beiden Kameras gleichzeitig aufgenommen wird. Durch eine räumliche Veränderung des Referenzfeldes zwischen zwei Aufnahmen findet eine Tiefenvariation statt. Diese hat eine Genauigkeitssteigerung der Parameter der RO zur Folge.

Die zweite Variante ermittelt die Parameter beider Orientierungen gleichzeitig. Der Ablauf zur Bestimmung dieser Parameter ist identisch mit der gerade beschriebenen Bestimmung der RO. Der einzige Unterschied besteht in der Einstellung der Software von TRACECAMF. Hier kann der Benutzer angeben, ob nur die Parameter der RO oder beider Orientierungen berechnet werden sollen. Bei korrekter Durchführung der Kalibrierungsmessungen führen beide Varianten zu gleichwertigen Ergebnissen. Bedingt durch die unterschiedliche Visualisierung der Software TRACECAMF während beider Varianten der Kalibrierungsmessungen besteht eine größere Sicherheit für eine korrekte Parameterbestimmung, wenn die Orientierungen separat bestimmt werden.

Nach der Bestimmung der Parameter der Inneren und Relativen Orientierung, kann mit den eigentlichen Messungen begonnen werden.

### 3.1.3.2 Parametereinstellungen in der Software

Die Einsatzmöglichkeiten der Onlinemesssysteme WHEELWATCH und MOVEINSPECT sind sehr vielseitig. Aus diesem Grund muss der Benutzer einige Spezifikationen zu seinem konkreten Anwendungsbeispiel vornehmen, indem er verschiedene Parameter einstellt. Es findet hier lediglich die Vorstellung der Parametereinstellungen statt, die bei der Entwicklung der Testverfahren berücksichtigt werden.

**Schwellwert und Belichtungszeit.** Die Systeme WHEELWATCH und MOVEINSPECT sind in der Lage retroreflektierende Marken zu erkennen. Diese Marken setzen sich aus einzelnen Punkten zusammen, die möglichst gut detektiert werden müssen. Die Qualität der Detektion hängt von der Belichtungszeit und einem Schwellwert ab. Diese stellt der Anwender manuell nach verschiedenen Kriterien ein. Auf der einen Seite sollte die Software alle retroreflektierenden Punkte detektieren können. Auf der anderen Seite dürfen Spiegelungen, die zum Beispiel von der Sonne oder dem Blitzlicht an dem Objekt auftreten können, nicht als retroreflektierende Punkte von der Software wahrgenommen werden. Als Hilfestellung für diese Einstellungen dienen verschiedene Vorschau Modi, in denen der Benutzer die unmittelbaren Auswirkungen seiner Einstellungen erkennen kann. Da diese Größen einen unmittelbaren Einfluss auf das spätere Messergebnis haben, sollten sie sorgfältig bestimmt werden. Die Festlegung der Parameter für eine Messreihe findet vor deren Beginn statt.

**Einstellungen zur zeitlichen Bildauslösung.** Hier erfolgen alle Einstellungen, die im Zusammenhang mit der zeitlichen Bildauslösung stehen. Zum einen kann die Bildfrequenz eingestellt werden, die bei den Onlinemesssystemen im Bereich von 1Hz bis 490Hz beziehungsweise bis 1000Hz liegt. Zum anderen besteht die Möglichkeit eine kontinuierliche Messung zu starten. Dies bedeutet, dass das System in der angegebenen Bildfrequenz so lange Aufnahmen macht, bis die Messung vom Benutzer gestoppt wird. Demgegenüber besteht die Möglichkeit statische Messungen durchzuführen. Hierbei bestimmt der Nutzer durch Knopfdruck, wann eine Messung ausgelöst wird. Dabei besteht die Einstellmöglichkeit mit einem Knopfdruck  $k$  Messungen von den Onlinemesssystemen aufzunehmen. Die Anzahl der Bildaufnahmen pro Knopfdruck kann der Nutzer beliebig einstellen. Für die zwei MOVEINSPECT-Kameras gilt, dass diese immer synchron ihre Aufnahmen machen. Dies wird durch eine externe Synchronisation mit der SyncBox ermöglicht.

#### 3.1.4 Hilfsmittel

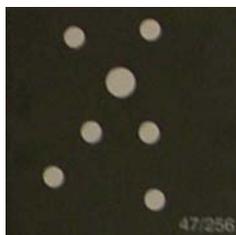


Abbildung 3.3: Retroreflektierende Marke mit dem Anco-Code der Firma AICON 3D Systems GmbH, eine so genannte Anco-Marke

In der photogrammetrischen Auswertung von Bildern spielen codierte und uncodierte Marken eine wichtige Rolle. Die Systeme WHEELWATCH und MOVEINSPECT arbeiten mit retroreflektierenden Marken, die mit dem so genannten Anco-Code (s. Abbildung 3.3) versehen sind. Diese Marken sind auf verschiedene Arten einsetzbar. Einer-

seits können sie einzeln am aufzunehmenden Objekt angebracht werden. Andererseits besteht die Möglichkeit mehrere Marken zu einem Adapter zusammenzufassen. Ein Adapter besteht aus einer kohlenstofffaserverstärkten Kunststoff (CFK)-Platte, einem sogenannten Panel, auf den mehrere Anco-Marken beliebig geklebt werden. Anschließend erfolgt eine Einmessung dieses Panels mit einem Digitalen Photogrammetrie Analyse (DPA)-System.

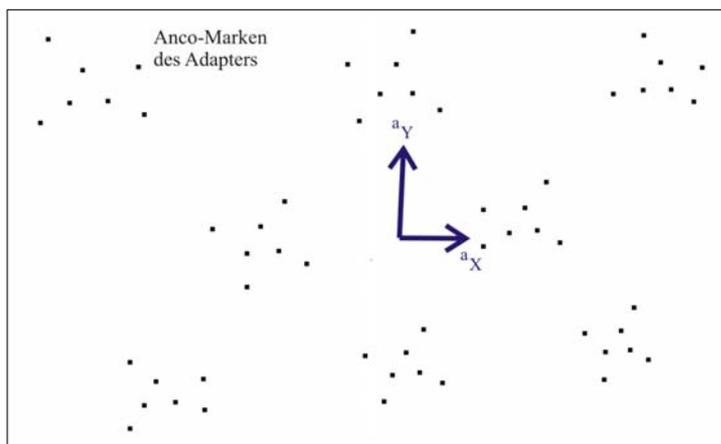


Abbildung 3.4: Adapter mit Adaptersystem  $S_a$  im Schwerpunkt der Anco-Marken

Ziel dieser Einmessung ist die Lagebestimmung der geklebten Marken auf dem Panel in einem lokalen Koordinatensystem, dem Adaptersystem  $S_a$  (s. Abbildung 3.4). Dieses und alle weiteren Koordinatensysteme, die innerhalb dieser Arbeit vorkommen, sind Rechtssysteme. In diesem Adaptersystem legt die Software einen so genannten Referenzpunkt an, der mit dem Systemursprung zusammen fällt. Der Sinn dieses Referenzpunktes liegt darin, dass bei einer späteren Messung des Adapters die Messergebnisse auf diesen reduziert werden. Dies bedeutet, dass zum Beispiel WHEELWATCH oder MOVEINSPECT die Anco-Marken messen. Als Messergebnis werden jedoch nicht alle Positionen der gemessenen Anco-Marken geliefert, sondern lediglich die Position des Referenzpunktes. Dies hat zum einen den Vorteil, dass die Datenmenge reduziert wird und zum anderen eine Genauigkeitssteigerung, da die Position des Referenzpunktes aus der Überbestimmung der detektierten codierten Anco-Marken berechnet wird. Nachteilig ist, dass die Lage des Referenzpunktes einen Einfluss auf das Messergebnis hat. Für die Aufnahmen, die während dieser Arbeit vorgenommen werden, ist es daher sinnvoll den Referenzpunkt in den Schwerpunkt der Marken auf dem Panel zu legen. Ansonsten treten bei späteren Transformationen, die bei der Messung mit WHEELWATCH beziehungsweise MOVEINSPECT berechnet werden, so genannte Hebeleffekte auf, die das Messergebnis unnötig verfälschen.

## 3.2 Hochgenaue Verschiebeeinheiten

Die Genauigkeit der Systeme WHEELWATCH und MOVEINSPECT werden mit Hilfe von hochgenauen Verschiebeeinheiten überprüft. Diese sollen in der Lage sein, hochgenaue

Streckendifferenzen beziehungsweise Winkelangaben zu liefern, welche später als Referenzgrößen für die von WHEELWATCH beziehungsweise MOVEINSPECT gemessenen Werte dienen. Die Firma AICON 3D Systems GmbH besitzt die Lineareinheit M-150.10 der Firma Physik Instrumente (PI) sowie den Drehtisch RV120CC von Newport. Beide Systeme werden als Referenzmaße für die Tests herangezogen. Die Steuerung der beiden erfolgt über einen Controller, über den verschiedene Einstellungen für die Messungen vorgenommen werden können.

Ein weiteres System, welches als Referenzmaß zum Einsatz kommt, ist das dynamische Kalibriersystem Agilent 5530A der Firma Weimer Messtechnik. Dieses System befindet sich in der Universität Bonn an einer 20m-Geradheitsbahn, an der zusätzlich einige Messungen durchgeführt werden.

Im Folgenden werden nun die drei hochgenauen Verschiebeeinheiten mit ihren technischen Daten und ihren Funktionsweisen näher erläutert.

### 3.2.1 Drehtisch

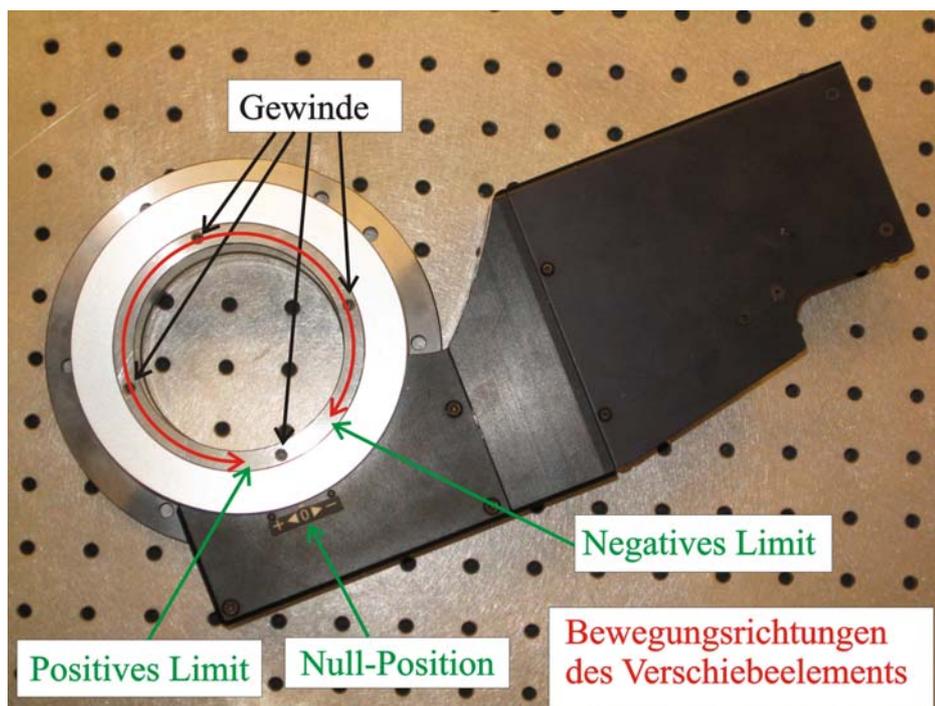


Abbildung 3.5: Foto des Drehtisches RV120CC der Firma Newport mit den eingezeichneten ansteuerbaren Positionen

Die Firma Newport hat in ihrem Sortiment verschiedene hochgenaue Dreheinheiten. AICON 3D Systems GmbH besitzt den Drehtisch RV120CC, welcher für die Testmessungen eingesetzt wird. Der bewegliche Teil des Drehtisches besitzt einen Durchmesser von 120mm. An diesem Bauteil können Objekte über vier vorhandene Gewinde befestigt werden. Die Abbildung 3.5 zeigt ein Foto des Drehtisches. Von seiner Nullstellung

aus kann der Drehtisch in beide Richtungen um ca.  $170^\circ$  gedreht werden. Als kleinstes Inkrement für die Verdrehung des Tisches gibt Newport einen Winkel von  $0,001^\circ$  mit einer Genauigkeit von  $0,01^\circ$  an. Die Maximalgeschwindigkeit des RV120CC liegt bei  $80^\circ/\text{s}$  mit einem Drehmoment von  $10\text{Nm}$ . Bei dieser hohen Geschwindigkeit ist die Beschleunigung und das Abbremsen des Drehtisches zu beachten.

**Ansteuerung und Parametereinstellungen.** Die Ansteuerung des Drehtisches erfolgt über einen Controller, der verschiedene Funktionen besitzt. Zunächst ermöglicht der Controller die Ansteuerung von festgesetzten Positionen. Das sogenannte „Positive Limit“ beziehungsweise das „Negative Limit“ realisieren die beiden Endpositionen des Drehtisches. Außerdem kann die „Null-Position“ unmittelbar angefahren werden. An diesen drei Positionen starten üblicherweise die Messungen für den Genauigkeitstest.

Der nächste Parameter legt das Verschiebeintervall fest. Mit den oben beschriebenen fest ansteuerbaren Positionen kann eine kontinuierliche Messung realisiert werden. Der Benutzer kann jedoch auch ein festes Intervall angeben, um die sich der Drehtisch auf Knopfdruck weiterbewegt. Außerdem kann die Bewegungsgeschwindigkeit individuell festgelegt werden. Zur Durchführung einer kontinuierlichen Messung muss jedoch das Zeitlimit beachtet werden. Die kontinuierliche Bewegung des Drehtisches stoppt, wenn einer der beiden folgenden Fälle eintritt. Im ersten Fall erreicht der Drehtisch den Kontakt des eingestellten Limits. Im zweiten stoppt der Drehtisch, sobald ein voreingestelltes Zeitlimit von drei Minuten verstrichen ist, ohne dass der Drehtisch bis zum vorgesehenen Limit verschoben wurde. Dieses Zeitlimit führt dazu, dass nicht bei allen eingestellten Geschwindigkeiten eine kontinuierliche Messung über den gesamten Messbereich des Drehtisches möglich ist.

### 3.2.2 Lineareinheit

Der verwendete Linearverschieber M-150.10 wurde von der Firma Physik Instrumente (PI) gefertigt. Dieser kann mit einer maximalen Geschwindigkeit von  $0,53\text{mm}/\text{s}$  innerhalb eines Bereiches von  $50\text{mm}$  bewegt werden. Als lineare Auflösung gibt der Hersteller  $0,0592\mu\text{m}/\text{c}$  an mit einem linearen Übersetzungsverhältnis von  $16,89\text{c}/\mu\text{m}$ . Die Einheit „count“ (c) stellt hierbei die mechanische Übersetzungsgröße dar. Die Umrechnung der linearen Auflösung mit Hilfe des linearen Übersetzungsverhältnisses ergibt eine Streckenauflösung von  $0,0035\mu\text{m}$ . Eine Angabe zur Genauigkeit des Systems liegt uns von der Firma Physik Instrumente nicht vor.

Das Foto 3.6 zeigt die Lineareinheit. An dem beweglichen Bauteil befinden sich zwei Gewinde, an denen zum Beispiel die Adapter befestigt werden können.

**Ansteuerung und Parametereinstellungen.** Die Parametereinstellung und damit verbundene Ansteuerung der Lineareinheit von der Firma Physik Instrumente erfolgt über denselben Controller, der im letzten Kapitel des Drehtisches ebenfalls zum Einsatz gekommen ist. Aus diesem Grund besteht auch bei der Lineareinheit die

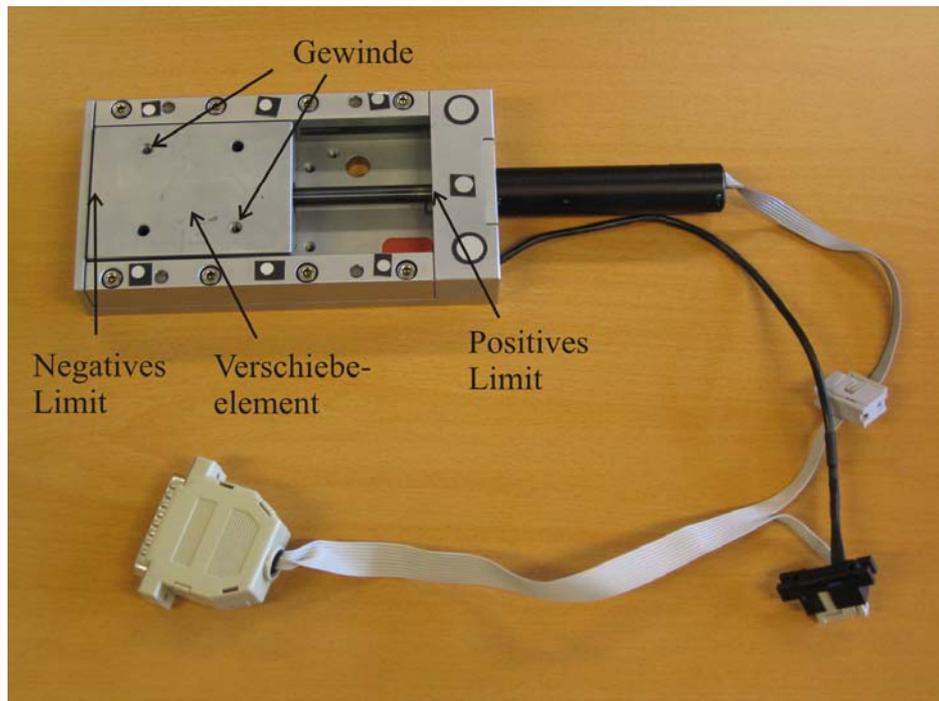


Abbildung 3.6: Foto der Lineareinheit M-150.10 der Firma Physik Instrumente (PI) mit den eingezeichneten ansteuerbaren Positionen

Möglichkeit die drei festen Positionen des negativen und positiven Limits sowie der Null-Position direkt anzusteuern. Außerdem kann der Benutzer auch hier wieder die Bewegungsgeschwindigkeit festsetzen. Die letzte identische Einstellung betrifft die Entscheidung zwischen einer kontinuierlichen oder einer statischen Messung, wobei auch hier wiederum das Zeitlimit von drei Minuten vorliegt.

### 3.2.3 Geradheitsbahn mit Interferometer

An der 20m-Geradheitsbahn der Universität Bonn finden im Zusammenhang mit den Untersuchungen dieser Arbeit einige zusätzliche Messungen zur Beurteilung der Systemgenauigkeit von WHEELWATCH und MOVEINSPECT statt. Die Geradheitsbahn dient normalerweise zur Kalibrierung von Elektrooptischen Distanzmessgeräten (EDM). Im Zusammenhang mit dieser Arbeit wird das Laserinterferometer Agilent 5530A der Firma Weimer Messtechnik zur Erzeugung von Referenzwerten für die Messung von Distanzen verwendet. Hierbei kann eine Messung über den gesamten Messbereich des jeweiligen Systems durchgeführt werden.

Die Distanz wird auf der Geradheitsbahn zwischen dem Laserinterferometer und einem Reflektor, der auf einem Schlitten angebracht ist, gemessen. Die Messung von Distanzen mit einem Interferometer finden relativ statt. Deshalb ist es wichtig, am Anfang der Messung einen Referenzwert zu setzen, zu dem die Distanzen gemessen werden. Die Software, über die der Schlitten und die Interferometermessung gesteuert werden, bietet

hierzu die Möglichkeit der Referenzierung auf die rechte Seite der Geradheitsbahn, dies entspricht der Seite des Interferometers, an. Eine Unterbrechung des Laserstrahls bedeutet, dass der Bezug zu dem Referenzwert verloren geht und die Messung neu gestartet werden muss.

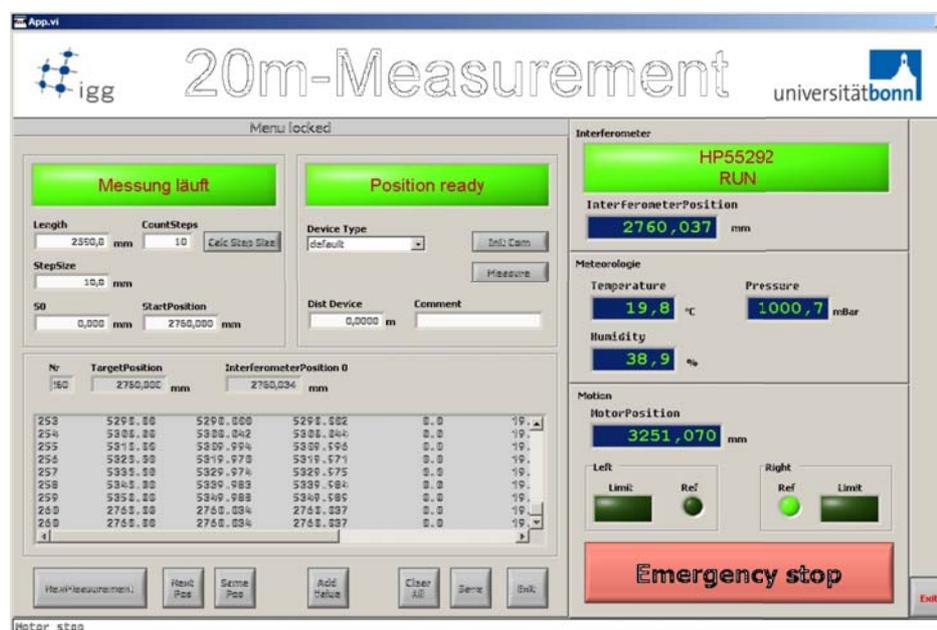


Abbildung 3.7: Software zur Durchführung von Messungen mit der Geradheitsbahn der Universität Bonn

Die Graphik 3.7 zeigt das Messprogramm zur Ansteuerung des Schlittens auf der Geradheitsbahn und zur Interferometermessung. Für die Messung legt der Benutzer eine Anfangsposition, die Länge der Wegstrecke und die Anzahl der Messungen fest. Über die zurückzulegende Wegstrecke und die Anzahl der Messungen werden die Inkremente festgelegt, die der Schlitten abfährt. Die Speicherung der Messdaten erfolgt in einem für Matlab lesbaren Dateiformat.

Ein hochgenaues Anfahren der festgelegten Schlittenpositionen ist aufgrund der mechanischen Motorsteuerung des Schlittens nicht möglich. Deshalb werden die Distanzen mit dem Interferometer erfasst. Für eine hohe Genauigkeit der Distanz werden die meteorologischen Werte der Temperatur, des Luftdrucks und der Luftfeuchte mit aufgenommen und die Distanzwerte entsprechend korrigiert. Die Genauigkeit der Interferometermessung hängt vor allem von dem Einfluss der Temperatur ab. Weiterhin ist die Geradheit der Bahn zu berücksichtigen, da die Interferometermessung keine 3D-Distanz wiedergibt. Überprüfungsmessungen haben eine Geradheit von  $< 0,1\text{mm}$  für die seitliche und höhenmäßige Führung ergeben<sup>1</sup>.

**Abschätzung der Fehlereinflüsse.** Die Genauigkeit der Soll-Werte der Interferometermessung hängen wie bereits erwähnt von der Temperaturerfassung und der Ge-

<sup>1</sup>Auskunft von Dr.-Ing. Wolfgang Schauerte, Wissenschaftlicher Mitarbeiter der Universität Bonn

radheit der Bahn ab. Die Temperatur kann an der Geradheitsbahn auf etwa 0,3 bis 0,5°C genau erfasst werden<sup>1</sup>. Hiermit kann die Messgenauigkeit des Interferometers für die Distanz  $D$  auf  $\hat{\sigma}_0^2 < 0,5\text{ppm} \cdot D$  abgeschätzt werden (Abschätzung nach (Joeckel und Stober, 1999, S. 78)). Bei einer Distanzmessung von 5m entspricht das einer Genauigkeit von 2,5µm.

Aufgrund der Bauweise der Geradheitsbahn kann diese um etwa 0,1mm seitlich oder höhenmäßig von einer Geraden abweichen. Dadurch ergibt sich ein Unterschied zwischen gemessener Distanz des Interferometers und der tatsächlichen 3D-Distanz. Die Messungen, die für diese Diplomarbeit durchgeführt werden, liegen zwischen 2m und 5m. Bei einer Abweichung der Geradheit von 0,1mm ergibt sich für ein Unterschied zwischen 2,5nm und 1nm auf der angegebenen Messstrecke. Dies lässt sich mit Hilfe des Satzes von Pythagoras wie folgt abschätzen:

$$\Delta D = \tilde{D}_{3D} - D_I \quad (3.4)$$

$$= \sqrt{D_I^2 + (\Delta x)^2} - D_I \quad (3.5)$$

mit

$\Delta D$	... Unterschied zwischen gemessener und tatsächlicher Distanz
$\tilde{D}_{3D}$	... 3D-Distanz
$D_I$	... Gemessene Distanz mit Interferometer
$\Delta x$	... Geradheitsabweichung

Diese Abweichungen liegen innerhalb der Messgenauigkeit und können somit vernachlässigt werden.

## 4 Überprüfung der Winkelgenauigkeit optischer Onlinemessungen

In diesem Kapitel wird ein Testverfahren zur Genauigkeitsüberprüfung der Onlinemesssysteme in Bezug auf Winkelmessungen entwickelt. Da speziell über die Onlinemesssysteme WHEELWATCH und MOVEINSPECT der Firma AICON 3D Systems GmbH eine spezifizierte Genauigkeitsaussage getroffen werden soll, findet eine Anpassung des Testverfahrens auf dessen Anforderungen statt. Aus den sechs Orientierungsparametern, die die Messsysteme als Messergebnis liefern, lassen sich Winkel ableiten. Das Modell zur Winkelbestimmung aus den Messwerten der Onlinemesssysteme beschreibt der Abschnitt 4.1. Nachteilig für das zu entwickelnde Testverfahren ist, dass von den gemessenen Translations- und Rotationsparametern keine Genauigkeitsangaben bekannt sind. Für die Beurteilung der Winkelgenauigkeit sind deshalb Vergleichsmessungen mit einem System mit einer übergeordneten Genauigkeit erforderlich. Hierfür steht ein Drehtisch der Firma Newport zur Verfügung. Mit einer Winkelgenauigkeit von  $\tilde{\sigma}_t = 0,01^\circ$  besitzt er eine übergeordnete Genauigkeit zu den Onlinemesssystemen.

Diese messen Richtungswinkel mit einer a priori Genauigkeit von  $\tilde{\sigma}_t = 0,015^\circ$ . Bei einer besseren Winkelmessgenauigkeit als die angegebenen  $0,015^\circ$  wäre allerdings eine alternative Prüfeinrichtung erforderlich.

Da für die Winkelmessungen innerhalb des Testverfahrens ein spezieller Adapter benötigt wird, erläutert der Teil 4.2 die Fertigung dieses Adapters und dessen Anforderungen. Mit der anschließenden Genauigkeitsabschätzung ist sichergestellt, dass die Anforderungen an diesen speziellen Adapter gewährleistet sind.

Für eine Spezialisierung des Testverfahrens auf die Onlinemesssysteme werden zunächst Voruntersuchungen in Abschnitt 4.3 durchgeführt. Diese Voruntersuchungen zeigen die Problematik der in Abschnitt 3.1.3.2 vorgestellten Einflussfaktoren auf die Genauigkeit von Winkelmessungen. Die Ergebnisse fließen anschließend in den Aufbau des Testverfahrens mit ein. Die Analysen der Voruntersuchungen dienen innerhalb des Testverfahrens dazu, fehlerhafte Messreihen aufzudecken, die zum Beispiel durch fehlerhafte Einstellungen entstehen können. Somit kann eine Verfälschung des Testergebnisses durch solche Messungen vermieden werden. Das Testverfahren zur Beurteilung der Winkelgenauigkeit und dessen Ergebnisse für die Onlinemesssysteme erläutert Abschnitt 4.4. Abschließend fasst Abschnitt 4.5 die Ergebnisse dieses Abschnitts zusammen.

## 4.1 Modell der Winkelbestimmung

Das Ziel dieser Untersuchung ist die Überprüfung der Winkelgenauigkeit der Onlinemesssysteme.

**Definition 4.1: Winkelgenauigkeit.** Winkelgenauigkeit bezeichnet die Genauigkeit des Winkels zwischen zwei Richtungen.

Aus der Definition leitet sich das verwendete Modell zur Winkelbestimmung ab.

**Messgrößen und Parameter.** Die Onlinemesssysteme liefern Richtungswinkel, die normalverteilt vorliegen. Hiermit ergibt sich der Beobachtungsvektor  $\mathbf{l}$  mit  $N$  Richtungswinkeln  $t_n$ . Die  $U$  geschätzten Winkel  $\hat{\alpha}_u$  zwischen jeweils zwei aufeinanderfolgenden Richtungsmessungen stellen die zu ermittelnden Parameter dar. Die wahren Werte der Winkel sind mit den Sollwerten, die der Drehtisch der Firma Newport liefert, gegeben. Die Sollwerte  $\tilde{\alpha}$  entsprechen entweder der Intervallangabe zur Drehung des Drehtischs oder ergeben sich nach Formel 4.1 aus der angegebenen Geschwindigkeit des Drehtischs und der Aufnahmefrequenz der Onlinemesssysteme.

$$\tilde{\alpha} = \frac{v}{f} \quad (4.1)$$

mit

- $\tilde{\alpha}$  ... Sollwinkel des Drehtischs
- $v$  ... Geschwindigkeit des Drehtischs
- $f$  ... Aufnahmefrequenz des Onlinemesssystems

Da die Sollwerte mit einer übergeordneten Genauigkeit vorliegen, können diese als fehlerfrei betrachtet werden.

**Deterministisches Modell für die Winkelbestimmung mit den Onlinemesssystemen.** Die ermittelten Winkel des Onlinemesssystems berechnen sich aus der Differenz der gemessenen Richtungswinkel  $t$  (s. Formel 4.2).

$$\hat{\alpha}_u = t_n - t_{n-1} \quad (4.2)$$

mit

$\hat{\alpha}_u$  ... Geschätzter Winkel zwischen zwei aufeinander folgenden Messwerten mit  $u = 1 \dots U$ ,  $U = N - 1$

$t_n, t_{n-1}$  ... Gemessener Richtungswinkel an den Position  $n$  beziehungsweise  $n - 1$  mit  $n = 1 \dots N$

**Stochastisches Modell für die Winkelbestimmung mit den Onlinemesssystemen.** Für die gemessenen Richtungswinkel liegen keine Genauigkeitsangaben vor. Die a priori Winkelgenauigkeit der Onlinemesssysteme bezieht sich nicht auf die Standardabweichung der Richtungsmessungen, sondern auf die maximale Abweichung zum Sollwert. Deshalb wird im Modell der Varianzfaktor als unbekannt angenommen. Außerdem wird von gleichgenauen unkorrelierten Beobachtungen ausgegangen, die normalverteilt vorliegen. Hieraus lässt sich das folgende stochastische Modell ableiten:

$$\Sigma_{uu} = \hat{\sigma}_t^2 I_N. \quad (4.3)$$

**Auswertung der Messergebnisse.** Für den Vergleich einzelner Messreihen, deren Durchführung unter unterschiedlichen Randbedingungen geschieht, werden statistische Kennwerte benötigt. Der Mittelwert und der Median der ermittelten Winkel gehören zu diesen Kennwerten, da sich die Größe des Drehwinkels innerhalb einer Messreihe nicht verändert. Wenn keine groben Fehler vorliegen, sollten diese beiden Kennwerte in der gleichen Größenordnung liegen.

Des Weiteren werden die Sollwinkel mit den Ergebnissen der Onlinemesssysteme mittels eines Soll-Ist-Vergleichs in Beziehung gesetzt (s. Anhang A.2.2). Hieraus wird die Messunsicherheit über die Formel A.14 auf Seite 192 berechnet. Die Verbesserungen der Winkel entsprechen hierbei den Differenzen aus Soll- und Istwinkeln. Bei dieser Berechnung ist die Korrelation der Winkel mit Hilfe der Kovarianzmatrix zu berücksichtigen. Zwei aufeinander folgende Winkel korrelieren mit einem Wert von 0,5 miteinander, da sich diese auf eine gleiche Richtungsmessung beziehen.

Neben der Ermittlung der Kennwerte wird innerhalb der Auswertung auch das deterministische und das stochastische Modell der Winkelbestimmung mit den Onlinemesssystemen überprüft.

Der **Globaltest** dient zur Überprüfung, ob generell Fehler in dem stochastischen und deterministischen Modell vorliegen. Hierfür wird die ermittelte Messunsicherheit mit der a priori Angabe auf Gleichheit überprüft (s. Paragraph „Globaltest“ im Anhang A.2.1). Mit dem Bestehen des Globaltests ist eine weitere Untersuchung des Modells nicht erforderlich.

Zur **Überprüfung des deterministischen Modells** werden die Beobachtungen nach Ausreißern untersucht. Die Ausreißersuche findet über die Abweichungen der berechneten Winkel statt. Hierzu wird ein Parametertest mit den Annahmen

$$H_0 : \quad \hat{\alpha}_u = \tilde{\alpha} \quad (4.4)$$

$$H_A : \quad \hat{\alpha}_u \neq \tilde{\alpha} \quad (4.5)$$

mit

$\hat{\alpha}_u$  ...  $u$ -ter geschätzter Winkel zwischen zwei aufeinander folgenden Messwerten  
 $\tilde{\alpha}$  ... Sollwinkel des Drehtischs

durchgeführt. Eine allgemeine Beschreibung des Parametertests befindet sich im Anhang A.2.1.

**Das stochastische Modell** beinhaltet die Annahme, dass die Messwerte normalverteilt vorliegen. Dies kann mit Hilfe eines  $\chi^2$ -Anpassungstests kontrolliert werden. Hierzu werden die Winkel der Onlinemesssysteme auf Normalverteilung überprüft. Die Grundlagen des  $\chi^2$ -Anpassungstests zeigt der Abschnitt A.2.1 im Anhang.

## 4.2 Adapter für Drehtisch

Das vorgestellte Modell vergleicht die Sollwinkel des Drehtischs mit der Richtungswinkeldifferenz der Onlinemesssysteme. Somit muss gewährleistet werden, dass das starre aufzunehmende Objekt vom Drehtisch nur um den einen Winkel rotiert wird, der von den Onlinemesssystemen als Richtungswinkel erfasst wird. Alle weiteren translatorischen und rotatorischen Bewegungen des Objekts führen zu Verfälschungen des Ergebnisses, weshalb diese auszuschließen sind. Als starres Objekt dient ein Adapter, dessen Befestigung am Drehtisch das oben genannte Kriterien erfüllen muss. Inwieweit dies realisierbar ist und welchen Einfluss zusätzliche Bewegungen zur Drehung besitzen, wird im Paragraph „Genauigkeitsabschätzung“ näher erläutert. Zunächst beschreibt der nächste Abschnitt die Einmessung des Adapters, da sich die anschließende Abschätzung auf diese Einmessung bezieht.

**Einmessung des Adapters für den Drehtisch.** Die Adaptereinmessung mit einem DPA-System erfolgt erst nachdem der Adapter auf dem Drehtisch montiert wurde. Nach der Einmessung darf die Lage des Adapters relativ zum Drehtisch nicht mehr verändert werden. Ist dies der Fall, wenn zum Beispiel ein neuer Adapter auf dem Drehtisch montiert wird, muss eine neue Adaptereinmessung durchgeführt werden.

Mit der Einmessung wird das Adaptersystem  $S_a$  in einem lokalen Koordinatensystem festgelegt. Die  $z$ -Achse dieses Systems soll hierbei der Rotationsachse des Drehtischs entsprechen, so dass sich eine Richtungsänderung des Drehtischs direkt in einer Richtungsänderung des Adapters um die  $z$ -Achse widerspiegelt. Dafür ist innerhalb der Einmessung die Bestimmung der Rotationsachse des Drehtischs erforderlich. Diese wird durch das bewegliche Bauteil, einem Hohlzylinder, festgelegt (s. Abbildung 3.5). Aufgrund der baulichen Fertigung des Drehtischs steht die Rotationsachse senkrecht auf der Ober- beziehungsweise Unterseite des beweglichen Bauteils und geht durch den Mittelpunkt dieses beweglichen Hohlzylinders.

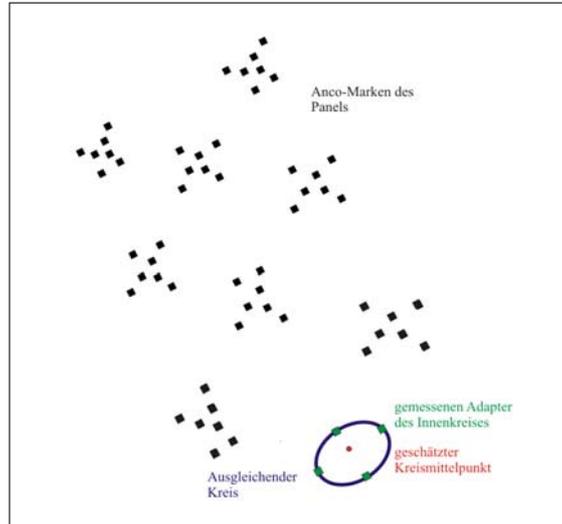
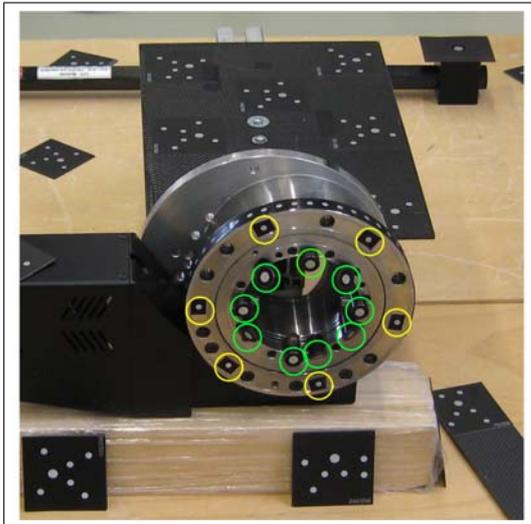
Da die Rotationsachse des Drehtischs später der  $z$ -Achse des Adaptersystems entsprechen soll, muss zunächst diese Rotationsachse bestimmt werden. Diese Bestimmung unterteilt sich in zwei Schritte. Die Richtung der Rotationsachse entspricht der Richtung der Normalen der Ebene, die durch die Unterseite des Drehtischs verläuft. Hierfür wird die Unterseite des Drehtischs durch Messpunkte signalisiert und durch die gemessenen Punkte eine Ebene geschätzt. Diese sind in Abbildung 4.1a gelb gekennzeichnet.

Als zweiter Schritt erfolgt die Bestimmung des Mittelpunktes des Innenkreises des Hohlzylinders, durch den die Rotationsachse verläuft. Der Innenkreis wird an der Unterseite mit speziellen retroreflektierende Hilfsadaptern signalisiert. Zur Verdeutlichung sind diese innerhalb der Abbildung 4.1a grün hervorgehoben. In der Auswertung findet eine Reduzierung der gemessenen Hilfsadapterpunkte auf die geschätzte Ebene des Drehtischs statt. Aus diesen reduzierten Koordinaten der gemessenen Hilfsadapterpunkte wird anschließend der Kreis berechnet und der Kreismittelpunkt bestimmt. Die einzelnen Konstruktionsschritte sind in Abbildung 4.1 graphisch veranschaulicht.

Als zusätzliche Kontrolle wird ein Band mit ebenfalls retroreflektierenden Punkten auf den Außenzylinder des Drehtischs geklebt. Mit diesem signalisierten Außenkreis werden die gleichen geometrischen Konstruktionen durchgeführt, wie oben für den Innenkreis beschrieben. Außerdem gibt es zwei verschiedene Arten der speziellen Hilfsadapter, die für die Signalisierung des Innenkreises verwendet werden. Mit jeder dieser beiden unterschiedlichen Hilfsadapterarten erfolgen die oben genannten geometrischen Auswertungen separat, damit die speziellen Eigenschaften der Hilfsadapter berücksichtigt werden. Anschließend wird überprüft, ob die drei Mittelpunkte der Kreise identisch sind.

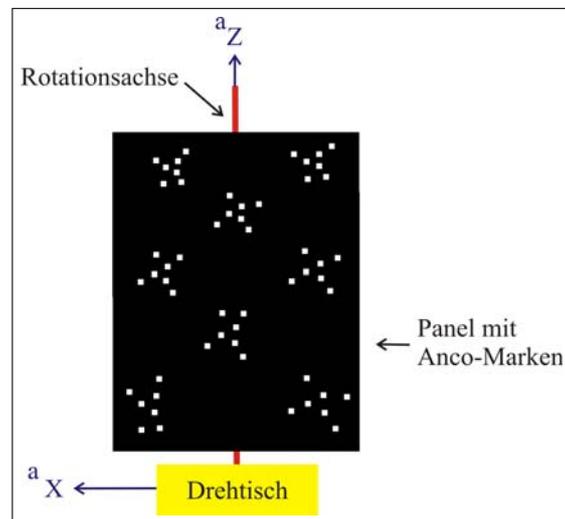
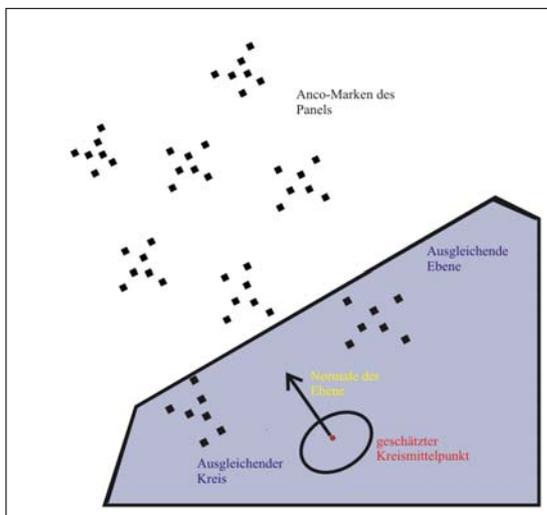
Die Definition des Adapterkoordinatensystems sieht dann vor, dass die  $z$ -Achse des Systems in die Rotationsachse gelegt wird mit dem Ursprung im Kreismittelpunkt. Die  $xy$ -Ebene entspricht der Ebene, die durch die Unterseite des Drehtischs geht und im Zuge der Einmessung bestimmt wurde. Zusätzlich liegt die  $x$ -Achse des Adaptersystems in der Ebene des Panels und die  $y$ -Achse vervollständigt das Koordinatensystem zu einem Rechtssystem (s. Abbildung 4.1d).

**Genauigkeitsabschätzung.** Der letzte Absatz erläuterte die Ermittlung des Adaptersystems  $S_a$  mittels des DPA-Systems. In diesem Abschnitt findet die Genauigkeitsabschätzung dieser Ermittlung statt. Ziel dieser Abschätzung ist es den möglichen



(a) Aufnahme des Drehadapters mit den signalisierten Punkten für die geschätzte Ebene (gelb umrandet) und den Hilfsadapters für die geschätzten Innenkreise (grün umrandet)

(b) Graphik des Panels mit dem geschätzten Innenkreis aus den signalisierten Punkten dieses Kreises und dessen Mittelpunkt



(c) Graphik des Panels mit dem geschätzten Innenkreis, dessen Mittelpunkt sowie der geschätzten Ebene und ihrer Normalen

(d) Systemskizze des Adapters mit eingezeichnetem Adaptersystem im Ursprung des geschätzten Kreismittelpunkts und Rotationsachse

Abbildung 4.1: Konstruktionschritte zur Erstellung des Adapters für den Drehtisch

Fehlereinfluss des Adapters auf die Winkelmessungen mit den Onlinemesssystemen zu ermitteln. Der Unterschied zwischen dem Sollkoordinatensystem  $S_{\text{Soll}}$ , also der theoretischen Sollausrichtung des Adaptersystems, und dem tatsächlich vorliegenden Adaptersystem  $S_a$  lässt sich durch sechs Parameter, drei Rotationen und drei Translationen, beschreiben.

Hiermit sind zwei Fehlereinflüsse zu überprüfen. Der erste ist die Verkippung der geschätzten Richtung der Rotationsachse zu ihrer theoretischen Definition. Dies kann auch als Verkippung um den Winkel  $\tau$  um eine beliebige Rotationsachse durch den Koordinatenursprung von zwei Koordinatensystemen aufgefasst werden, wie sie in Abbildung 4.2a vereinfacht für eine Verkippung um die  $y$ -Achse dargestellt ist. Der zweite Einfluss ist der Offset  $O$ . Dieser ist der kürzeste Abstand zwischen dem Koordinatenursprung des Adaptersystems zur Lage der Sollrotationsachse und lässt sich aus den drei Translationsparametern bestimmen. Dies ist in Abbildung 4.2b für einen Offset in  $x$ -Richtung veranschaulicht.

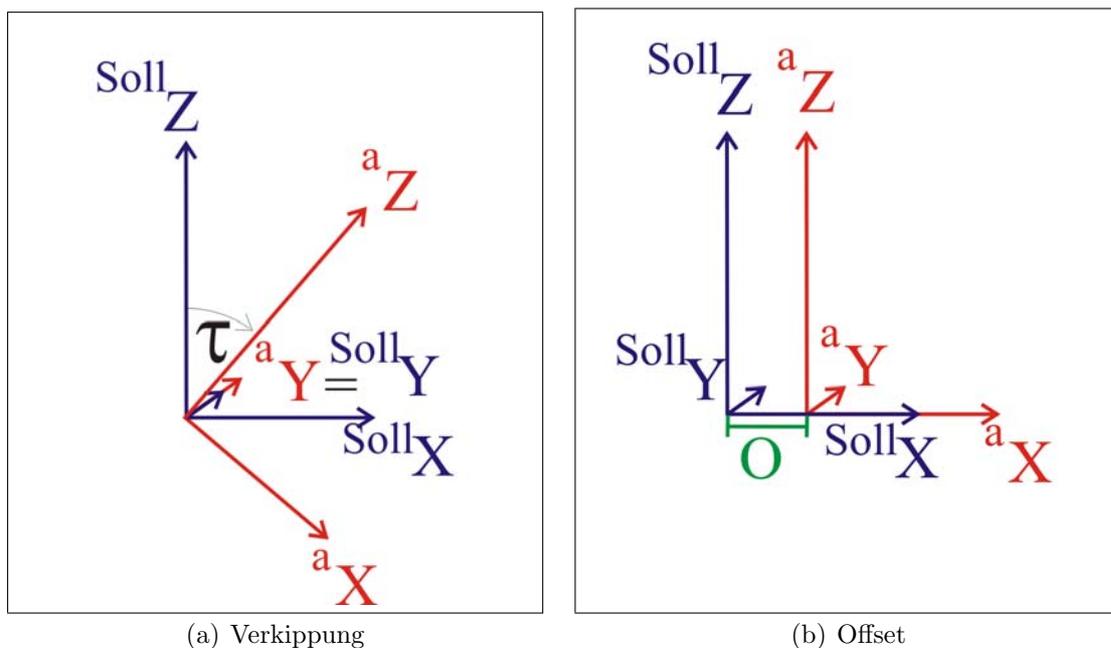


Abbildung 4.2: Die vereinfachte graphische Veranschaulichung der Verkippung  $\alpha$  und des Offsets  $O$  zwischen dem theoretischen Adaptersystem  $S_{\text{Soll}}$  und dem durch die Einmessung bestimmten Adaptersystem  $S_a$

Für die Bestimmung der Verkippung der beiden Systeme muss zunächst eine Genauigkeitsabschätzung der ermittelten Ebene aus Abbildung 4.1c vorgenommen werden. Diese Ebene wird aus sechs Punkten über eine Best-Fit-Ausgleichung geschätzt. Als Ergebnis liefert diese Ausgleichung die Normale  $n_a$  der Ebene (in Abbildung 4.1c gelb eingezeichnet) einschließlich der Genauigkeit der einzelnen Komponenten dieses Vektors. Außerdem wird davon ausgegangen, dass die Fertigungsgenauigkeit dieser Ebene nicht mit berücksichtigt werden muss, da sie keinen signifikanten Einfluss auf die Verkippung besitzt. Mit der Genauigkeitsangabe der eingemessenen Normale des Adap-

tersystems lässt sich die maximale Abweichung des Adaptersystems zur Sollrichtung abschätzen.

$$\mathbf{n}_{\max} = \mathbf{n}_a[\text{mm}] \pm \begin{bmatrix} 0,00001 \\ 0,00009 \\ 0,00008 \end{bmatrix} [\text{mm}] \quad (4.6)$$

mit

$\mathbf{n}_{\max}$  ... Richtung der abweichenden  $z$ -Achse des eingemessenen Adaptersystems  $S_a$   
 $\mathbf{n}_a$  ... Richtung der  $z$ -Achse des eingemessenen Adaptersystems  $S_a$

angegeben werden. Der Winkel

$$\tau = \arccos \left( \frac{|\mathbf{n}_{\max} \cdot \mathbf{n}_a|}{|\mathbf{n}_{\max}| |\mathbf{n}_a|} \right) \quad (4.7)$$

mit

$\tau$  ... Winkel der Verkippung  
 $\mathbf{n}_{\max}$  ... Richtung der abweichenden  $z$ -Achse des eingemessenen Adaptersystems  $S_a$   
 $\mathbf{n}_a$  ... Richtung der  $z$ -Achse des eingemessenen Adaptersystems  $S_a$

zwischen diesen beiden Vektoren gibt dann den maximalen Verkippungswinkel der Normalen  $\mathbf{n}_a$  an. Wird davon ausgegangen, dass die Normale  $\mathbf{n}_a$  von der Sollrichtung, die der  $z$ -Achse des Sollkoordinatensystems entspricht, maximal um den Winkel  $\tau$  verkippt ist, dann entspricht der Winkel  $\tau$  dem in Abbildung 4.2a eingezeichneten Verkippungswinkel zwischen der theoretischen Sollausrichtung des Adaptersystem und dem eingemessenen Adaptersystem.

Als nächstes erfolgt die Auswirkung dieses Einflusses auf die Messungen mit den Onlinemesssystemen. Dazu werden zwei Rotationsmatrizen miteinander verglichen. Diese Rotationsmatrizen beschreiben die Drehung um die  $z$ -Achse des Drehtisches um einen bestimmten Winkel  $\kappa$  in zwei verschiedenen Koordinatensystemen. Die erste Rotationsmatrix im Sollkoordinatensystem

$$R_{\text{Soll}} = \cos(\kappa)I_3 + (1 + \cos(\kappa))D_{e_3} - \sin(\kappa)S_{e_3} \quad (4.8)$$

mit

$R_{\text{Soll}}$  ... Rotationsmatrix im Sollkoordinatensystem  $S_{\text{Soll}}$   
 $\kappa$  ... Drehwinkel um die  $e_3$ -Achse des Sollkoordinatensystems  $S_{\text{Soll}}$   
 $e_3$  ... Richtung der  $z$ -Achse des Sollkoordinatensystems  $S_{\text{Soll}}$   
 $I_3$  ...  $3 \times 3$  Einheitsmatrix  
 $D_{e_3}$  ... Matrix des symmetrischen dyadischen Produkts der Rotationsachse im Sollkoordinatensystems  $S_{\text{Soll}}$   
 $S_{e_3}$  ... Schiefsymmetrische Matrix der Rotationsachse des Sollkoordinatensystems  $S_{\text{Soll}}$

definiert die Drehbewegung des Adaptersystems, die sich aus der Drehung der  $z$ -Achse des Sollkoordinatensystems um den Winkel  $\kappa$  ergibt. Diese Drehung entspricht bei der Winkelmessung der Drehbewegung des Drehtisches.

Als nächstes werden die Rotationsmatrizen der Onlinemesssysteme betrachtet. Diese Rotationsmatrizen sind je nach System unterschiedlich, da diese innerhalb der Software TRACECAMF auf verschiedene Arten aus den Elementardrehungen zusammengesetzt werden. Für das System WHEELWATCH gilt die Drehreihenfolge

$$R_{\text{WW}} = R_z(\kappa) \cdot R_x(\omega) \cdot R_y(\phi) \quad (4.9)$$

und für MOVEINSPECT

$$R_{\text{MI}} = R_x(\omega) \cdot R_y(\phi) \cdot R_z(\kappa). \quad (4.10)$$

mit

- $R_{\text{WW}}$  ... Rotationsmatrix des Systems WHEELWATCH
- $R_{\text{MI}}$  ... Rotationsmatrix des Systems MOVEINSPECT
- $R_x(\omega)$  ... Elementare Rotationsmatrix um die  $x$ -Achse des Adaptersystems  $S_a$
- $R_y(\phi)$  ... Elementare Rotationsmatrix um die  $y$ -Achse des Adaptersystems  $S_a$
- $R_z(\kappa)$  ... Elementare Rotationsmatrix um die  $z$ -Achse des Adaptersystems  $S_a$

In den nachfolgenden Messreihen betragen die gemessenen Sollwinkel zwischen zwei Richtungsmessungen  $\kappa = 0, 1^\circ$ . Über einen Komponentenvergleich der Rotationsmatrizen der Onlinemesssysteme und der Rotationsmatrix  $R_{\text{Soll}}$  ermittelt sich der Einfluss der Verkippung auf die Winkelmessung zwischen den beiden Koordinatensystemen. Die Rotationsmatrizen der Onlinemesssysteme sind für kleine Winkel trotz der unterschiedlichen Drehreihenfolge identisch. Hiermit hat die Drehung von  $0, 1^\circ$  um die  $z$ -Achse des Sollkoordinatensystems bei einer Verkippung von  $0,007^\circ$  auf das Messergebnis der Onlinemesssysteme eine Auswirkung von

$$\Delta\omega = 2 \cdot 10^{-10} \quad (4.11)$$

$$\Delta\phi = 2 \cdot 10^{-7} \quad (4.12)$$

$$\Delta\kappa = -0,0017 \quad (4.13)$$

mit

- $\Delta\omega$  ... Auswirkung auf den Drehwinkel um die  $x$ -Achse des Adaptersystems  $S_a$
- $\Delta\phi$  ... Auswirkung auf den Drehwinkel um die  $y$ -Achse des Adaptersystems  $S_a$
- $\Delta\kappa$  ... Auswirkung auf den Drehwinkel um die  $z$ -Achse des Adaptersystems  $S_a$

Dieses Ergebnis zeigt, dass die Rotationen um die  $x$ - und  $y$ -Achse des Adaptersystems vernachlässigt werden können, so dass im Folgenden lediglich die Rotation um

die  $z$ -Achse betrachtet wird. Außerdem hat die Verkippung einen so geringen Einfluss (unterhalb der Messgenauigkeit), dass die Richtung der  $z$ -Achse des Sollkoordinatensystems mit der Richtung des Adaptersystems gleichgesetzt werden kann.

Der zweite zu überprüfende Einfluss ist der Offset zwischen den beiden Koordinatensystemen. Mit einem Offset liegen translatorische Bewegungen des Adapters vor, die zur Genauigkeitsbestimmung von Winkeln mit WHEELWATCH beziehungsweise MOVEINSPECT vermieden werden sollten. Die Bestimmung des Koordinatenursprungs des Adaptersystems und damit der mögliche Offset wird im Zusammenhang mit der Bestimmung der Lage der  $z$ -Achse während der Einmessung auf drei verschiedene Arten ermittelt. Für diese Kontrolle werden drei unterschiedliche ausgleichende Kreise und deren Mittelpunkte (s. Abbildung 4.1b) eingemessen und auf die ausgleichende Ebene projiziert. Dort findet die Bestimmung der dreidimensionalen Abstände zwischen diesen Punkten statt. Diese schwanken zwischen 0,02mm und 0,05mm. Diese Abweichungen sind so gering, dass diese zu keinen translatorischen Effekten führen, die das Messergebnis der Winkel verfälschen können. Aus diesem Grund kann auch der Koordinatenursprung des Sollkoordinatensystems und des eingemessenen Adaptersystems im Folgenden als gleich angesehen werden. Dies ist gleichbedeutend mit der Aussage, dass kein Offset zwischen den beiden genannten Systemen vorliegt.

Diese Ergebnisse zeigen, dass das Sollkoordinatensystem und das Adaptersystem im Rahmen der Messgenauigkeit der Onlinemesssysteme übereinstimmen. Somit ist eine Änderung der Richtung des Drehtischs unmittelbar in einer Richtungsänderung des Adapters um die  $z$ -Achse erkennbar.

### 4.3 Voruntersuchungen zur Winkelgenauigkeit

Das Ziel dieses Kapitels besteht in der Spezifikation verschiedener Einflussfaktoren und ihre Auswirkungen auf die Genauigkeit der Aufnahme von Drehbewegungen mit den Onlinemesssystemen WHEELWATCH und MOVEINSPECT. Die Untersuchungen von einzelnen Einflussfaktoren dienen als Voruntersuchungen für den in Kapitel 4.4 aufgestellten Genauigkeitstest zur Spezifikation der Winkelgenauigkeit.

Dazu beschreibt der Abschnitt 4.3.1 die eigene Implementation des Modells für die Auswertung einzelner Messreihen. Im Folgenden werden dann die einzelnen Einflussfaktoren näher untersucht. Zunächst werden in Abschnitt 4.3.2.1 verschiedene Messaufbauten realisiert und miteinander verglichen. Dies dient zur Beurteilung, inwieweit die Winkelgenauigkeit von der Position im Messbereich des Onlinemesssystems abhängt. Abschnitt 4.3.2.2 zeigt den Unterschied zwischen statischen und kontinuierlichen Messungen auf. Als letztes wird überprüft, ob die Genauigkeit der Winkelmessungen von der Wahl der Bildfrequenz von WHEELWATCH beziehungsweise MOVEINSPECT abhängt. Dies zeigt Abschnitt 4.3.2.3. Anschließend stellt der Abschnitt 4.3.3 die Ergebnisse der Voruntersuchungen zusammen.

### 4.3.1 Implementation des Modells

Die Implementation erfolgt mit dem Programm Matlab nach den im Abschnitt 4.1 vorgestellten Modell.

Als Ergebnisse liefert dieses Programm die statistischen Kennwerte Mittelwert, Median und Standardabweichung der Winkel sowie eine graphische Veranschaulichung der Abweichungen der Messwerte zum Sollwert aufgetragen in einem Balkendiagramm.

### 4.3.2 Durchführung und Auswertung der Voruntersuchungen

Innerhalb dieses Abschnittes finden die experimentellen Messungen und Auswertungen für die Voruntersuchungen mit den Systemen WHEELWATCH und MOVEINSPECT statt.

Bei diesen Messungen der Onlinemesssysteme mit dem Drehtisch liegt im Allgemeinen eine große Anzahl an Ausreißern vor, sobald die Adapterpunkte bei den Messungen nicht mehr vollständig erkannt werden. Aufgrund der vielen Ausreißern wird deshalb die empirische Varianz zu groß geschätzt. Um die Ausreißer möglichst zuverlässig zu detektieren, ist deshalb der Test mit einer vorgegebenen Varianz sinnvoll. Deshalb wird der Ausreißertest bei einer bekannten Varianz mit einer normalverteilten Testgröße durchgeführt.

Die Firma AICON 3D Systems GmbH gibt als Winkelgenauigkeitsangabe einen Wert an, der einer maximalen Abweichung entspricht. Hiermit steht für die Überprüfungen von WHEELWATCH eine a priori Standardabweichung von  $\tilde{\sigma}_\alpha = 0,015^\circ$  zur Verfügung. Für das System MOVEINSPECT liegen keine Herstellerangaben zur Winkelgenauigkeit vor. Deshalb finden die Auswertungen von MOVEINSPECT zunächst mit der gleichen Standardabweichung von  $\tilde{\sigma}_\alpha = 0,015^\circ$  statt. Eine eventuelle Anpassung dieses Wertes findet nach den ersten Messungen statt.

#### 4.3.2.1 Gegenüberstellung verschiedener Messaufbauten

Der erste zu untersuchende Einflussfaktor ist die Anordnung der relativen Lage zwischen dem Drehtisch auf der einen Seite und den Onlinemesssystemen auf der anderen. In den vorherigen Abschnitten wird zum einen der Aufbau des Drehtischs mit dem Adapter (s. Abschnitt 3.2.1 beziehungsweise 4.2) und zum anderen der Aufbau der beiden Onlinemesssysteme (s. Abschnitt 3.1) beschrieben. Für die Anordnung der beiden Komponenten zueinander stehen prinzipiell beliebig viele Kombinationen zur Verfügung. Lediglich die in Abbildung 4.3 aufgeführten Varianten kommen für die ersten Testmessungen zum Einsatz. Der Grund liegt darin, dass diese zwei Aufbauvarianten pro Messsystem auf der einen Seite eine optimale und auf der anderen Seite eine sehr ungünstige Aufnahmegeometrie zwischen Drehtisch und Objekt darstellen.

Bei dem Aufbau entspricht der Abstand  $A$  zwischen Verschiebeeinheit und Onlinemesssystem der Entfernung, auf die die Kameras vor der Messung fokussiert werden.

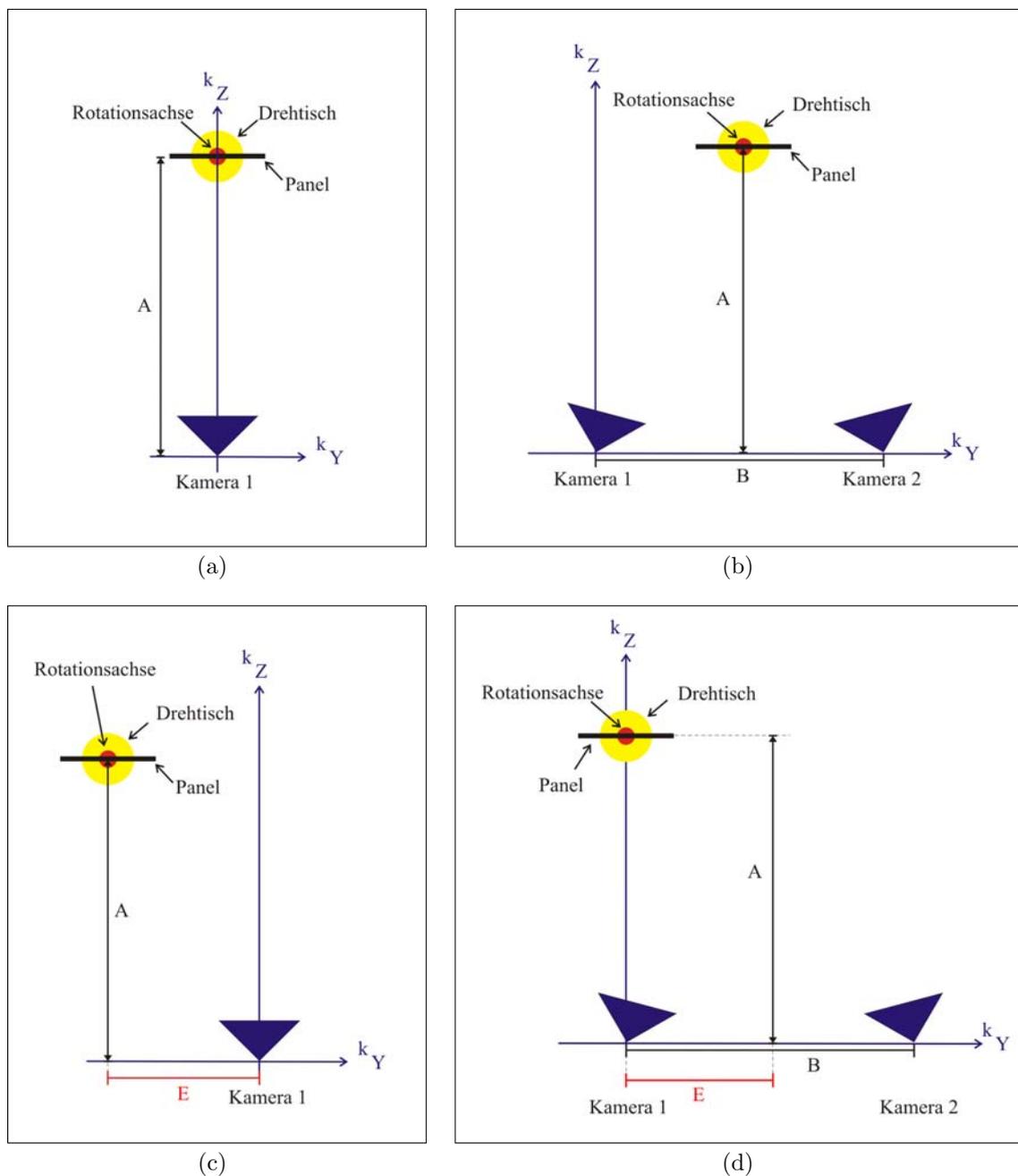


Abbildung 4.3: Zentrischer Aufbau der Systeme WHEELWATCH 4.3a und MOVEINSPECT 4.3b beziehungsweise exzentrischer Aufbau der Systeme WHEELWATCH 4.3c und MOVEINSPECT 4.3d zu dem aufzunehmenden Objekt (Adapter befestigt am Drehtisch)

Für die Messungen mit dem Drehtisch sind dies 800mm. Die Wahl der Fokussierungen ist auf ein praktisches Anwendungsbeispiel zurückzuführen. Dabei soll ein Objekt in einer Entfernung von 800mm von den Kameras erfasst werden können. Dies führt bei WHEELWATCH dazu, dass in einem horizontalen Messvolumen von etwa  $800\text{mm} \times 800\text{mm}$  gemessen werden kann. Das Messvolumen mit dem System MOVEINSPECT ist etwas kleiner. Dies ist auf die Wahl der unterschiedlichen Kameraobjektive zurückzuführen. Das System WHEELWATCH arbeitet mit 10mm-Objektiven, wohingegen MOVEINSPECT-Kameras mit 16mm-Objektiven zum Einsatz kommen. Aus diesem Grund ist der Öffnungswinkel bei MOVEINSPECT etwas geringer, als der von WHEELWATCH. Dieser geringere Öffnungswinkel führt dazu, dass das horizontale Messvolumen bei MOVEINSPECT auf  $600\text{mm} \times 600\text{mm}$  beschränkt ist.

Die nächste auszuwählende Größe ist die Basis  $B$  bei dem System MOVEINSPECT. Ausschlaggebend hierfür ist ein verwendeter Kamerabalken, auf denen die Kameras bei MOVEINSPECT montiert werden. Dadurch ist die Basis  $B$  auf 800mm festgelegt. Diese Länge der Basis wird deshalb auch bei den hier durchgeführten Tests verwendet, auch wenn der Balken bei den Testmessungen nicht zum Einsatz kommt.

Die vier aufgeführten Aufbauvarianten in der oben genannten Abbildung unterteilen sich zum einen in die Verwendung der Onlinemesssysteme und zum anderen in die relative Anordnung zwischen den Kamerasystemen und den Verschiebeeinheiten. In den zentrischen Aufbauten der Abbildungen 4.3a und 4.3b befindet sich die Verschiebeeinheit mit den aufzumessenden Adaptern zentrisch im Aufnahmebereich der Kameras. Bei WHEELWATCH befindet sich die Verschiebeeinheit deshalb im Abstand  $A$  mittig vor dem Objektiv der Kamera, wohingegen die Mitte der Basis als Referenz für den Abstand  $A$  bei MOVEINSPECT herangezogen wird. Der Drehtisch mit Adapter wird hierbei bei allen Aufbauvarianten so gedreht, dass in der Nullposition des Drehtisches der Adapter parallel zur Bildebene von WHEELWATCH beziehungsweise parallel zur Basis von MOVEINSPECT liegt.

Für die exzentrischen Aufbauten mit WHEELWATCH befindet sich der Drehtisch mit Adapter am Rand des Sichtfeldes der Kamera. Die Exzentrizität entspricht hier der Hälfte des jeweiligen horizontalen Messvolumens. Dies bedeutet, dass bei WHEELWATCH eine Exzentrizität  $E$  von etwa 400mm vorliegt. Der Abstand  $A$  bleibt unverändert (s. Abbildung 4.3c). Die Hälfte des horizontalen Messvolumen beträgt bei MOVEINSPECT etwa  $E \approx 300\text{mm}$ , um welchen der Drehtisch bei dem exzentrischen Aufbau verschoben ist (s. Abbildung 4.3d).

**Messdurchführung.** Die Überprüfung dieses Einflusses erfolgt für beide Onlinemesssysteme. Dazu werden verschiedene Messungen durchgeführt. Der Vergleich findet dann zwischen zwei Messreihen statt, bei denen nur die Aufbauposition von zentrisch auf exzentrisch verändert wird. Alle anderen Parameter der Onlinemesssysteme und des Drehtisches bleiben identisch. Die wesentlichen Parametereinstellungen, von den hier exemplarisch vorgestellten Messungen, sind in Tabelle 4.1 aufgelistet. Bei den Parametereinstellungen ist zu beachten, dass an jeder Position des Drehtisches 20 Wiederholungsmessungen der Onlinemesssysteme gemacht werden. Diese Wiederholungsmessungen

führen dazu, dass die zufällige Streuung der Messungen durch die Mittelbildung verringert wird, dadurch jedoch systematische Effekte in den Ergebnissen besser sichtbar sind. Außerdem werden alle Messungen mit dem Drehtisch mit einem flachen Adapter durchgeführt. Dieser Adapter besteht aus sechs Anco-Marken.

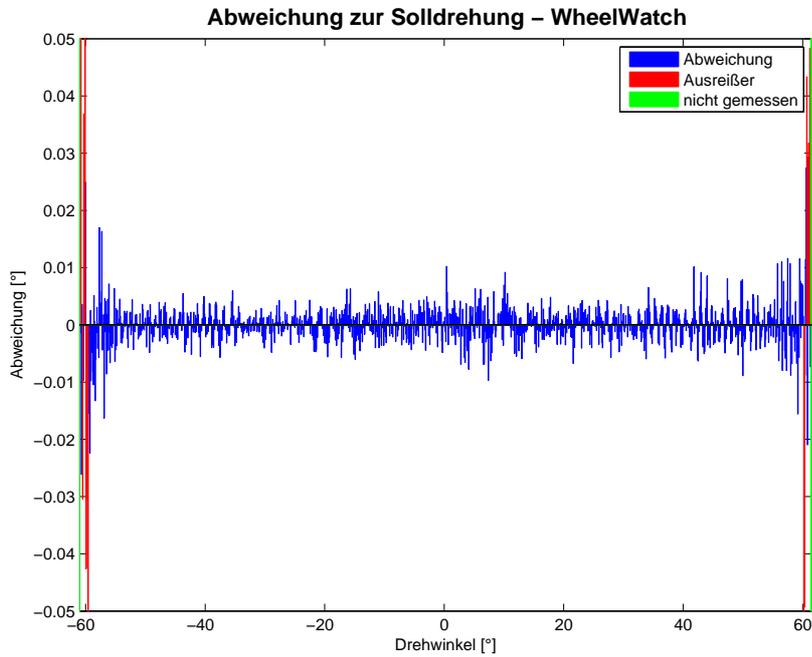
<b>Für alle nachfolgenden Messungen gilt:</b>		
Art der Messung:	statisch	
Fokussierung:	800mm	
Bildfrequenz:	50Hz	
Wiederholungsmessungen:	20	
Solldrehung:	0, 1°	
Messreihe	Messsystem	Adapterposition
WW_1	WHEELWATCH	zentrisch
WW_2	WHEELWATCH	exzentrisch
MI_1	MOVEINSPECT	zentrisch
MI_2	MOVEINSPECT	exzentrisch

Tabelle 4.1: Parametereinstellungen der Onlinemesssysteme und des Drehtisches für die Vergleichsmessungen des zentrischen und exzentrischen Messaufbaus

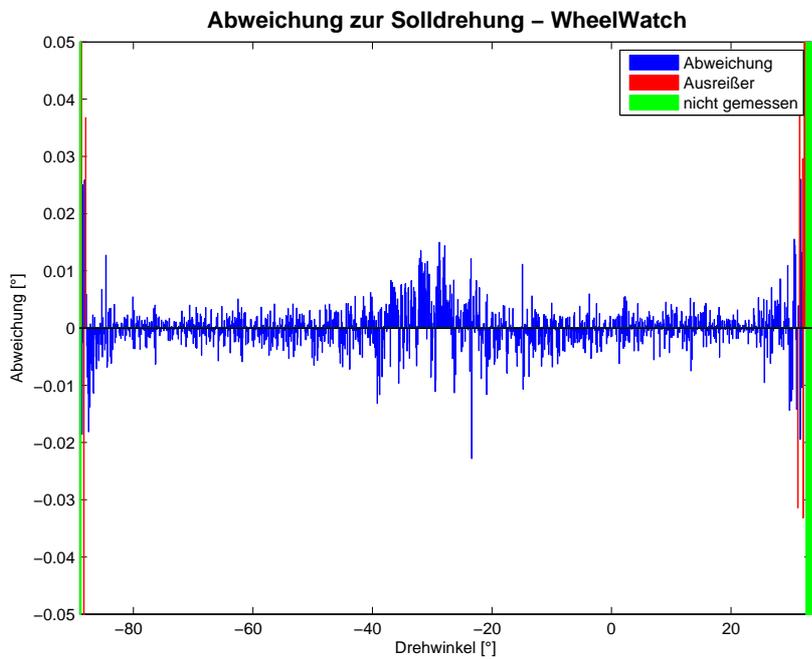
Im Vorfeld der Messungen erfolgt eine Festlegung, bis zu welchem Richtungswinkel des Drehtisches die Messsysteme den Adapter noch erkennen können, damit keine unnötigen Messungen durchgeführt werden. Dies ist mit Hilfe des Vorschaumodus in der Software TRACECAMF möglich. Nach Aufbau der Messsysteme wird der Drehtisch solange gedreht, bis die Anco-Marken des Adapters nicht mehr decodiert werden können, da sie außerhalb des Sichtbereichs der Kameras liegen. Bis zu dieser Position finden die Messungen, ausgehend von der Nullposition des Drehtisches, in beide Rotationsrichtungen statt. Diese beiden Messungen in und gegen den Uhrzeigersinn werden zunächst einzeln ausgewertet und danach in dem Ergebnisbild zu einer Messreihe zusammengefasst. Die Auswertung der Messreihen bezieht sich im Folgenden immer auf diese zwei zusammengesetzten Messungen. Die Auswertergebnisse der beiden einzelnen Messreihen sind im Anhang in den Tabellen A.1 bis A.4 zusammengestellt.

**Auswertung des Systems WHEELWATCH.** Die Auswertungen werden jeweils getrennt für die beiden Onlinemesssysteme durchgeführt. Zunächst beschreibt dieser Abschnitt die Ergebnisse zur Genauigkeit der Winkel in Bezug auf das System WHEELWATCH. Graphik 4.4 zeigt die Messabweichungen der Winkel im Vergleich zwischen zentrischem und exzentrischem Aufbau.

Der Bildteil 4.4a bezieht sich auf die zentrische Messung. Richtungswinkel eines flachen Adapters können mit WHEELWATCH in einem Winkelbereich von insgesamt 120° (von -60° bis +60°) detektiert werden. Bei -60° und +60°, also am Rand des Winkelbereichs, liegen vereinzelte Ausreißer (in der Graphik rot dargestellt) bis das System nicht



(a) Zentrischer Aufbau



(b) Exzentrischer Aufbau

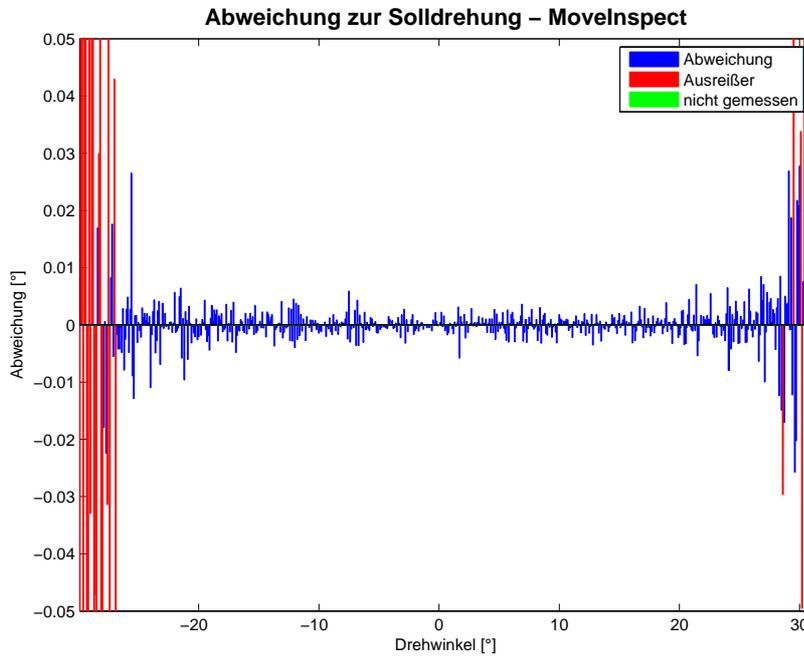
Abbildung 4.4: Vergleich der Messabweichungen der Richtungswinkel von  $0,1^\circ$  bei einem zentrischen und exzentrischen Aufbau des Systems WHEELWATCH

mehr in der Lage ist, den Adapter zu erkennen (grün eingezeichnet). Weiterhin sind die Messabweichungen am Rand des Winkelbereichs bei  $55^\circ$  bis  $60^\circ$  bzw.  $-55^\circ$  bis  $-60^\circ$  durchschnittlich um den Faktor zwei schlechter als in dem Winkelbereich von  $-55^\circ$  bis  $+55^\circ$ . Diese streuen ohne Ausreißer mit einer Standardabweichung von  $0,004^\circ$  um die Nulllinie. Die maximale Abweichung der ermittelten Winkel zum Sollwert beträgt  $0,03^\circ$  bei Vernachlässigung der Ausreißer. Die Ausreißer weichen bis zu  $0,15^\circ$  vom Sollwert ab. Damit erhöht sich die Standardabweichung mit Ausreißern auf  $0,007^\circ$ . Sowohl Mittelwert als auch der Median weisen keinen signifikanten Unterschied zu dem Sollwinkel auf. Somit liegen bei dieser Messreihe lediglich zufällige Streuungen der Messwerte vor. Dies gilt ebenfalls für alle folgenden Messungen der Richtungswinkel mit dem System WHEELWATCH. Deshalb wird bei der Auswertung der weiteren Messreihen mit WHEELWATCH nicht näher auf die Mittelwerte und Mediane eingegangen.

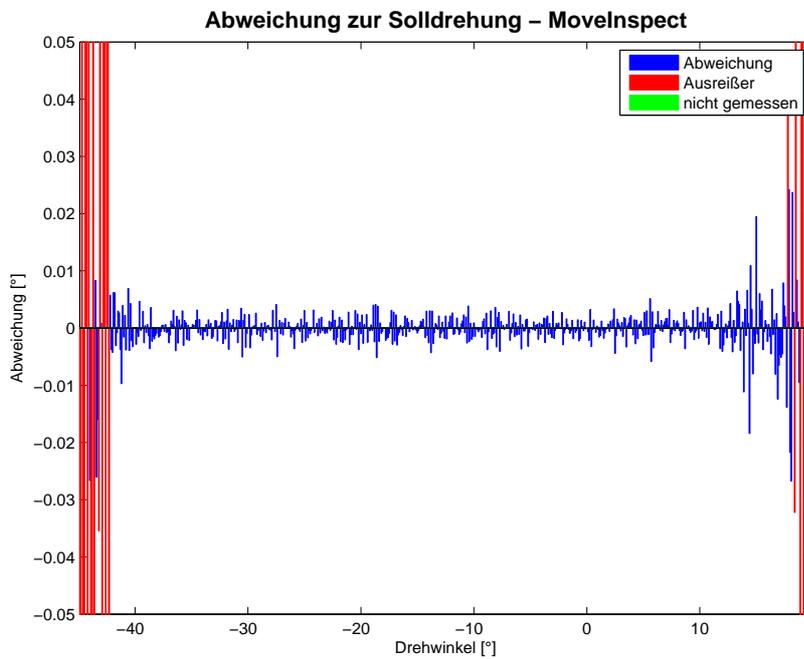
Die Standardabweichung der exzentrischen Messreihe mit WHEELWATCH (s. Abbildung 4.4b) beträgt wie bei der zentrischen Messung  $\hat{\sigma}_\alpha = 0,004^\circ$  ohne Ausreißer. Unter Berücksichtigung der Ausreißer erhöht sich die Standardabweichung auf  $\hat{\sigma}_\alpha = 0,011^\circ$ . Die maximalen Abweichungen der Ausreißer liegen hier bei  $0,4^\circ$ . Diese befinden sich ebenfalls am Rand des Winkelbereichs. Des Weiteren fällt bei der exzentrischen Messung auf, dass die Abweichungen zwischen  $-40^\circ$  und  $-20^\circ$  eine ähnliche Größenordnung wie die am Rand des Winkelbereichs (ohne Betrachtung der Ausreißer) besitzen. Diese liegt bei Abweichungen bis zu  $\pm 0,025^\circ$  und ist somit etwa um den Faktor zwei größer als im restlichen Winkelbereich. Diese größeren Abweichungen erklären sich durch die Aufnahmegeometrie. In diesem Winkelbereich verändert sich die Position des Adapters im Bild nur sehr gering im Gegensatz zu dem restlichen Winkelbereich. Aus diesem Grund kann der Winkel hier schlechter detektiert werden. Zusätzlich führt die schlechtere Aufnahmegeometrie des exzentrischen Aufbaus im Vergleich zum zentrischen dazu, dass die Abweichungen in diesem Winkelbereich um den oben genannten Betrag schlechter sind. Ansonsten liegen die Messabweichungen generell sowohl bei der zentrischen als auch bei der exzentrischen Messreihe in einer gleichen Größenordnung unabhängig vom Drehwinkel. Die Größe des gesamten messbaren Winkelbereichs verändert sich zwischen zentrischem und exzentrischem Aufbau nicht. Allerdings verschiebt sich bei einer Exzentrizität von etwa 450mm der Winkelbereich von  $-60^\circ$  und  $+60^\circ$  auf  $-88^\circ$  und  $+32^\circ$ . Dies liegt am Sichtbereich der Kamera.

**Auswertung des Systems MOVEINSPECT.** Mit dem System MOVEINSPECT findet ebenfalls der Vergleich der Genauigkeit der Winkel in zentrischer und exzentrischer Lage statt. Die Abweichungen der Messungen von den Sollwerten stellt für beide Aufbauten die Abbildung 4.5 dar.

Zunächst zeigt das erste Bild 4.5a das Ergebnis der zentrischen Messreihe. Der messbare Winkelbereich liegt bei dem Onlinemesssystem MOVEINSPECT bei  $60^\circ$  (von  $-30^\circ$  bis  $+30^\circ$ ). Am Rand des Winkelbereichs bei einem maximal messbaren Winkel liegen in einem Bereich von ca.  $2^\circ$  Ausreißer vor. Diese weichen bei zwei Werten bis zu  $\pm 25^\circ$  vom Sollwert ab. Alle weiteren Ausreißer liegen bei Abweichungen unter  $\pm 2^\circ$ . Dies führt zu einer deutlich größeren Standardabweichung von  $\hat{\sigma}_\alpha = 1,8^\circ$  unter Berücksich-



(a) Zentrischer Aufbau



(b) Exzentrischer Aufbau

Abbildung 4.5: Vergleich der Messabweichungen der Richtungswinkel von  $0, 1^\circ$  bei einem zentrischen und exzentrischen Aufbau des Systems MOVEINSPECT

tigung der Ausreißer. Dadurch weicht auch der Mittelwert in einer Größenordnung von  $0,002^\circ$  von der Sollrotation ab. Der Median zeigt als robuster Schätzer keinen signifikanten Unterschied. Bei Betrachtung der Messdaten fällt auf, dass die Ausreißer sich auf Messungen beziehen, bei denen nicht alle 20 Wiederholungsmessungen vorliegen. Die Messung erfolgt an diesen Stellen nicht mehr zuverlässig. Dies spiegelt sich auch in den weiteren Messreihen mit MOVEINSPECT wider, so dass bei den folgenden Auswertungen auf diesen Punkt nicht mehr explizit eingegangen wird. Nach Elimination der Ausreißer besitzen der Mittelwert und der Median keinen signifikanten Unterschied mehr. Dies gilt ebenfalls für alle nachfolgenden Winkelmessungen mit MOVEINSPECT. Die Standardabweichung der zentrischen Messreihe reduziert sich auf  $\hat{\sigma}_\alpha = 0,004^\circ$ . Im Bereich von  $-25^\circ$  bis  $+25^\circ$  werden die Winkel mit dieser gleichbleibenden Genauigkeit detektiert. Bei einer größeren Drehung von mehr als  $25^\circ$  vergrößern sich die Unterschiede zwischen den gemessenen Winkeln und den Sollwerten auf maximal  $0,03^\circ$ . Bei diesen beiden Werten sind die Ausreißer vernachlässigt.

Diese Ergebnisse wiederholen sich auch in der exzentrischen Messung (s. Abbildung 4.5b). Im Unterschied zu der zentrischen Messung liegt hier der messbare Winkelbereich bei  $-42^\circ$  bis  $+18^\circ$ . Dies resultiert aus der Aufnahmekonfiguration mit einer exzentrischen Aufstellung des Messobjekts zum Kamerasystem ( $E = 270\text{mm}$ ). Die Messabweichungen liegen im Bereich von  $-40^\circ$  bis  $+15^\circ$  in einer gleichbleibenden Größenordnung von höchstens  $0,005^\circ$ . Zum Rand hin liegen die Abweichungen bei bis zu  $0,03^\circ$ , wobei die Ausreißer mit bis zu  $\pm 16^\circ$  hierbei vernachlässigt sind. Die Standardabweichung der exzentrischen Messreihe ist mit  $0,004^\circ$  gleich groß wie die der zentrischen Messung. Dieser Wert zeigt die Genauigkeit des Systems MOVEINSPECT ohne Berücksichtigung der Ausreißer.

#### 4.3.2.2 Gegenüberstellung von statischen und kontinuierlichen Messungen

Die Einsatzgebiete für die Onlinemesssysteme MOVEINSPECT und WHEELWATCH sind sehr vielseitig. Allerdings werden diese Systeme überwiegend zur Aufnahme von dynamischen Bewegungsabläufen herangezogen. Aus diesem Grund ist es sinnvoll die Winkelgenauigkeit bei kontinuierlichen Bewegungsabläufen zu überprüfen. Diese Überprüfung ist prinzipiell mit dem Drehtisch der Firma Newport möglich. Dazu muss die Ansteuerung des Drehtischs und der Onlinemesssysteme synchronisiert werden, damit die Messergebnisse zum Beispiel über einen Zeitstempel miteinander in Beziehung gesetzt werden können. Wie der Abbildung 4.6 zu entnehmen ist, werden die beiden Komponenten von zwei unabhängigen Geräten angesteuert. Dies hat zur Folge, dass für die hier vorliegende Untersuchung die einzelnen Messpositionen des Drehtischs nur bei statischen Messungen mit dem entsprechenden Bild der Onlinemesssysteme in absolute Beziehung gesetzt werden können. Die Auswertung der kontinuierlichen Messungen beschränkt sich deshalb auf eine Aussage über den kompletten aufgenommenen Bereich, aber nicht auf eine spezielle Position innerhalb dieses Bereichs. Die in der Auswertegraphik angegebenen Drehwinkel stellen bei den kontinuierlichen Messungen aus diesem Grund lediglich eine Schätzung der ungefähren Position des Drehtischs dar.

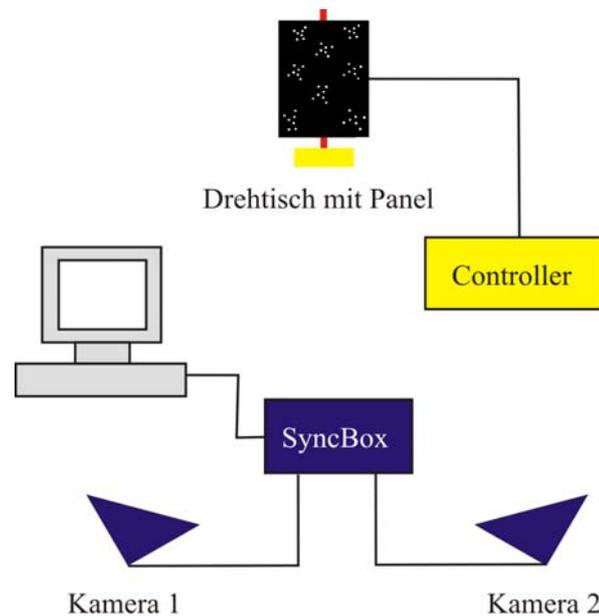


Abbildung 4.6: Systemskizze des Aufbaus für den Drehtisch von Newport mit den Onlinemesssystemen

<b>Für alle nachfolgenden Messungen gilt:</b>			
Adapterposition:		zentrisch	
Fokussierung:		800mm	
Bildfrequenz:		50Hz	
Solldrehung:		0,1°	
Messreihe	Messsystem	Art der Messung	Wiederholungsmessungen
WW_1	WHEELWATCH	statisch	20
WW_3	WHEELWATCH	kontinuierlich	1
MI_1	MOVEINSPECT	statisch	20
MI_3	MOVEINSPECT	kontinuierlich	1

Tabelle 4.2: Parametereinstellungen der Onlinemesssysteme und des Drehtisches für die Vergleichsmessungen zwischen statischen und kontinuierlichen Messungen

**Messdurchführung.** Die statischen Messungen der Onlinemesssysteme, die für diesen Vergleich herangezogen werden, sind die Messreihen WW\_1 beziehungsweise MI\_1 des Abschnitts 4.3.2.1 mit dem zentrischen Aufbau der Systeme. Hier werden diese Messungen mit jeweils einer zweiten Messreihe verglichen. Für diese bewegt sich der Drehtisch kontinuierlich mit einer Geschwindigkeit von 5°/s. Diese Bewegung nehmen die Onlinemesssysteme mit einer Frequenz von 50Hz auf, so dass sich der Drehtisch zwischen zwei Bildaufnahmen um einen Winkel von 0,1° weiter bewegt. Dieser Wert wird als Referenzmaß für den Soll-Ist-Vergleich angesetzt. Damit sind die Messergebnisse mit den statischen Messungen vergleichbar, bei denen der Drehtisch, zwischen zwei Aufnahmen mit den Onlinemesssystemen, um den gleichen Winkel bewegt wird. Die

statische Messung beinhaltet allerdings 20 Wiederholungsmessungen, wobei die kontinuierliche Messung lediglich als Einzelmessung vorliegt. Dies ist in der Auswertung zu berücksichtigen. Die wesentlichen Einstellungen sind in Tabelle 4.2 aufgelistet.

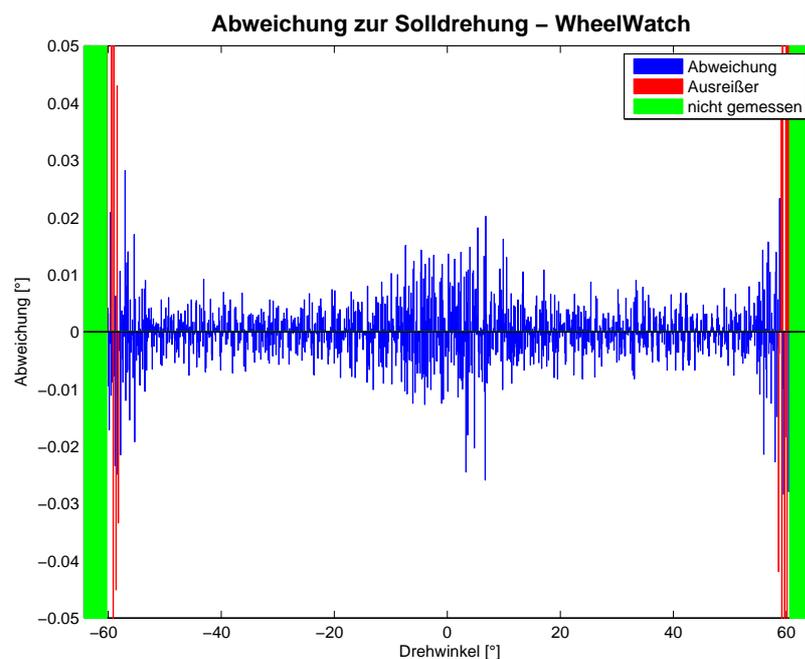


Abbildung 4.7: Messabweichungen der kontinuierlichen Richtungswinkel von  $0, 1^\circ$  aufgenommen mit dem System WHEELWATCH

**Auswertung des Systems WHEELWATCH.** Dieser Abschnitt gibt den Unterschied zwischen einer statischen und einer dynamischen Messreihe mit WHEELWATCH wieder. Die Auswertergebnisse der statischen Messreihe befinden sich in Teil 4.3.2.1. Die Graphik 4.7 zeigt die Messabweichungen der gemessenen Richtungswinkel zu den Sollwerten der dynamischen Messreihe. Als Standardabweichung dieser Messreihe ergibt sich  $\hat{\sigma}_\alpha = 0,006^\circ$ . Unter Berücksichtigung der Ausreißer beträgt diese  $\hat{\sigma}_\alpha = 0,013^\circ$ . Diese durchschnittlichen Werte für die gesamte Messreihe zeigen, dass die Genauigkeit der dynamische Messung schlechter ist, als die statische Messung. Dies liegt daran, dass sich die dynamische Messung lediglich auf eine Einzelmessung pro Position bezieht. Die statischen Winkel werden jeweils aus 20 Wiederholungsmessungen berechnet, womit sich die zufälligen Einflüsse und damit die Streuungen minimieren. Der größte Ausreißer liegt bei der kontinuierlichen Messreihe mit einer Abweichung von  $0,9^\circ$  vor. Ohne Ausreißer betragen die maximalen Messabweichungen genauso wie bei der statischen Messung  $0,03^\circ$ . Diese Ausreißer und maximalen Messabweichungen liegen bei der dynamischen Messreihe ebenfalls am Rand des Winkelbereichs vor. Zusätzlich liegen größere Messabweichung um die Nullstellung des Drehtischs vor. An dieser Position zeigen sich kleinere Positionsänderungen der abgebildeten Punkte im Bild als bei einem größeren Drehwinkel. Aufgrund dessen könnte die Bestimmung der Richtungswinkel

instabiler sein und besonders bei einer Einzelmessung größere Messabweichungen der Winkel um Null erzeugen.

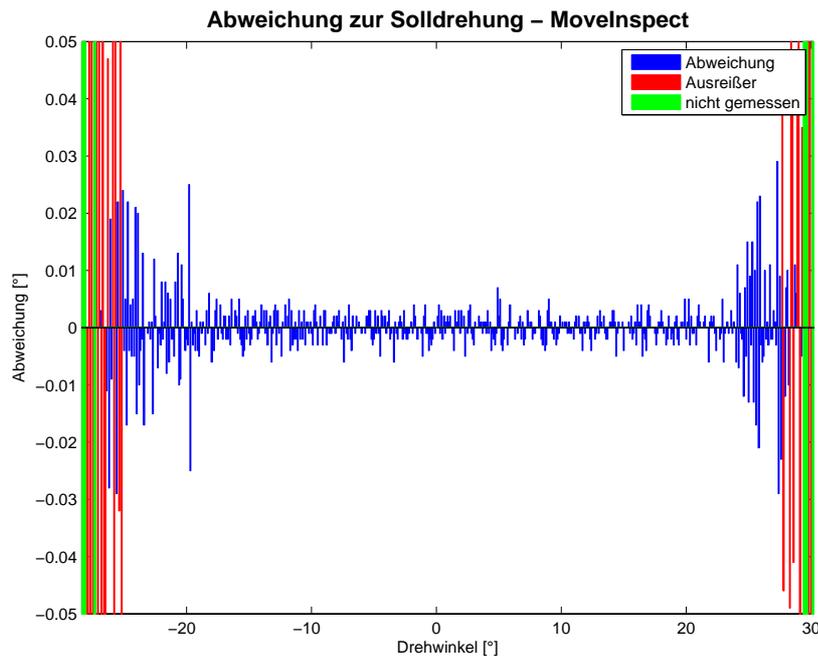


Abbildung 4.8: Messabweichungen der kontinuierlichen Richtungswinkel von  $0, 1^\circ$  aufgenommen mit dem System MOVEINSPECT

**Auswertung des Systems MOVEINSPECT.** Im Folgenden findet ein Vergleich von einer statischen Messreihe (s. hierzu Messreihe MI\_1 in Abschnitt 4.3.2.1) mit einer dynamischen Messung des Systems MOVEINSPECT statt. Zunächst werden die Auswertungsergebnisse der dynamischen Messreihe zusammengestellt und diese anschließend mit denen der Messreihe MI\_1 verglichen. Das graphische Ergebnis der kontinuierlichen Messung visualisiert das Bild 4.8. Am Rand des Winkelbereichs liegen größere Messabweichungen vor, die ab einem Winkel von etwa  $\pm 25^\circ$  als Ausreißer detektiert werden. Der Kennwert Standardabweichung mit Ausreißer beträgt  $0,078^\circ$ . Mit Vernachlässigung der detektierten Ausreißer reduziert sich dieser Wert auf  $0,006^\circ$  und die maximalen Abweichungen liegen wie bei der statischen Messung bei  $0,03^\circ$ . Dies zeigt, dass die statische und die dynamische Messreihe ähnliche Genauigkeitsergebnisse des Onlinemesssystems MOVEINSPECT liefert. Der Unterschied der Standardabweichung ohne Ausreißer bezieht sich darauf, dass bei der dynamischen Messung lediglich eine Einzelmessung vorliegt. Da die statischen Ergebnisse auf 20 Wiederholungsmessungen beruhen, liegt hier eine um  $0,02^\circ$  kleinere Standardabweichung vor als bei der kontinuierlichen Messreihe.

### 4.3.2.3 Einfluss der Bildfrequenz

Der nächste zu überprüfende Einflussfaktor stellt die Bildfrequenz dar, mit der die Onlinemesssysteme ihre Aufnahmen durchführen. Dabei kann mit dem System WHEELWATCH eine Bildfrequenz zwischen 1Hz und 490Hz ausgewählt werden. Mit MOVEINSPECT besteht die Möglichkeit bis zu einer Bildfrequenz von 1000Hz Bilder aufzunehmen. Zur Überprüfung dieses Einflussfaktors werden Messreihen mit den verschiedensten Bildfrequenzen aufgenommen. Im Folgenden werden die Ergebnisse von vier dieser Messreihen exemplarisch aufgeführt und analysiert.

<b>Für alle nachfolgenden Messungen gilt:</b>					
Adapterposition:		zentrisch			
Fokussierung:		800mm			
Wiederholungsmessungen:		20 (bei statischen Messungen)			
Messreihe	Messsystem	Art der Messung	Bildfrequenz [Hz]	Geschwindigkeit [°/s]	Solldrehung [°]
WW_1	WHEELWATCH	statisch	50	–	0,1
WW_4	WHEELWATCH	statisch	400	–	0,1
WW_3	WHEELWATCH	kontinuierlich	50	5	0,1
WW_5	WHEELWATCH	kontinuierlich	400	80	0,2
MI_1	MOVEINSPECT	statisch	50	–	0,1
MI_4	MOVEINSPECT	statisch	400	–	0,1
MI_3	MOVEINSPECT	kontinuierlich	50	5	0,1
MI_5	MOVEINSPECT	kontinuierlich	400	80	0,2

Tabelle 4.3: Parametereinstellungen der Onlinemesssysteme und des Drehtisches für die Vergleichsmessungen mit unterschiedlichen Bildfrequenzen der Onlinemesssysteme

**Messdurchführung.** Dieser Abschnitt untersucht den Einfluss der Bildfrequenz der Onlinemesssysteme, welcher hier mit kontinuierlichen und statischen Messungen überprüft wird. Als Vergleich dienen Messreihen mit einer Bildfrequenz von 50Hz und 400Hz. Die geringere Bildfrequenz liegt bei allen bisher vorgestellten Messreihen ebenfalls vor. Aus diesem Grund werden die Messreihen mit 400Hz in diesem Abschnitt mit den bereits vorgestellten Messreihen mit 50Hz der letzten Teile in Bezug gesetzt. Alle Messreihen mit den einzelnen Parametereinstellungen fasst die Tabelle 4.3 zusammen. Die jeweiligen Messdurchführungen für statische wie auch für kontinuierliche Messreihen beschreiben die vorangegangenen Abschnitte 4.3.2.1 und 4.3.2.2 ausführlich, so dass hier auf eine detailliertere Ausführung verzichtet wird.

**Auswertung des Systems WHEELWATCH.** Das System WHEELWATCH nimmt sowohl eine statische als auch eine dynamische Messreihe mit einer Bildfrequenz von

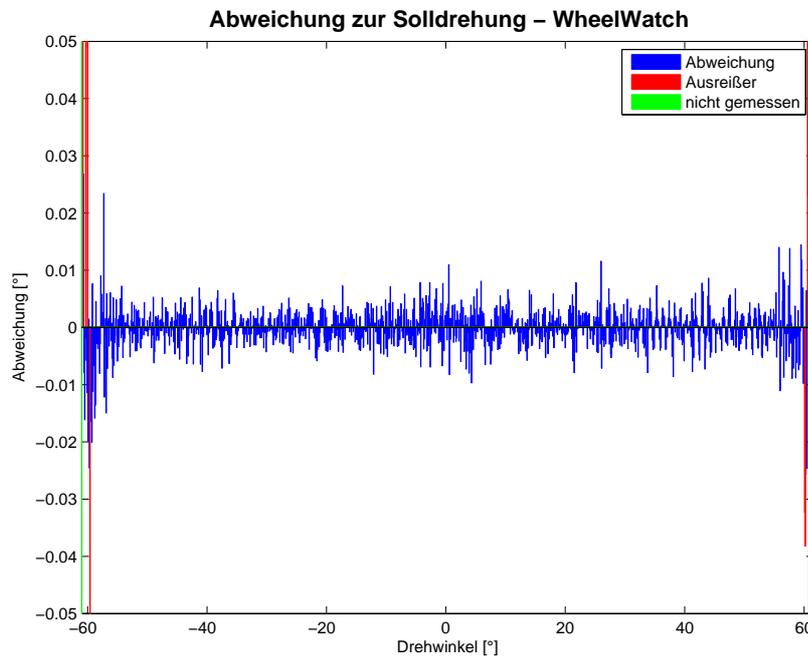


Abbildung 4.9: Richtungswinkel aufgenommen von dem System WHEELWATCH bei einer statischen Messreihe mit einer Bildfrequenz von 400Hz

400Hz auf. Die Messabweichungen der statischen Messung stellt die Abbildung 4.9 dar. Im Vergleich zu der Messung WW\_1 mit 50Hz zeigt sich kein Unterschied. Die Standardabweichungen sind mit  $0,004^\circ$  bei diesen beiden Messreihen identisch und die maximalen Messabweichungen liegen in der gleichen Größenordnung (s. hierzu Abschnitt 4.3.2.1 und Tabelle A.3 im Anhang A.4).

Bei der dynamischen Messreihe mit einer Bildfrequenz von 400Hz und einer Geschwindigkeit des Drehtisches von  $80^\circ/\text{s}$  ist ein deutlicher Unterschied in den Auswertergebnissen erkennbar. Hierbei zeigt sich, dass bei den kontinuierlichen Bewegungen des Drehtisches prinzipiell auch die Beschleunigung des Systems zu berücksichtigen ist. Dies ist jedoch nur mit einer Synchronisation der hochgenauen Verschiebeeinheit mit den Onlinemesssystemen möglich. Die mögliche Verfälschung der Messergebnisse wird in Abbildung 4.10 verdeutlicht. Dieses Ergebnis zeigt die Beschleunigung des Drehtisches, der sich mit  $80^\circ/\text{s}$  bewegen soll. Die Beobachtung dieser Bewegung erfolgt mit einer Frequenz von 400Hz des Systems WHEELWATCH. Als Solldrehung werden bei der Auswertung  $0,2^\circ$  herangezogen. In der Abbildung 4.10 kann der Bereich, in dem sich der Drehtisch tatsächlich mit den angegebenen  $80^\circ/\text{s}$  bewegt, gut abgegrenzt werden. Nur in dem Bereich von etwa  $-40^\circ$  bis  $+40^\circ$  streuen die Abweichungen von der Sollverschiebung um den Wert Null. Ansonsten steigen die Abweichungen vom Soll, bedingt durch die Beschleunigung beziehungsweise das Abbremsen, immer weiter an. Dieser Effekt zeigt sich deutlich in den Standardabweichungen wieder. Fließen die Ausreißer mit in diese Kenngröße ein, dann liegt diese bei  $0,025^\circ$ . Sobald die Ausreißer nicht mehr

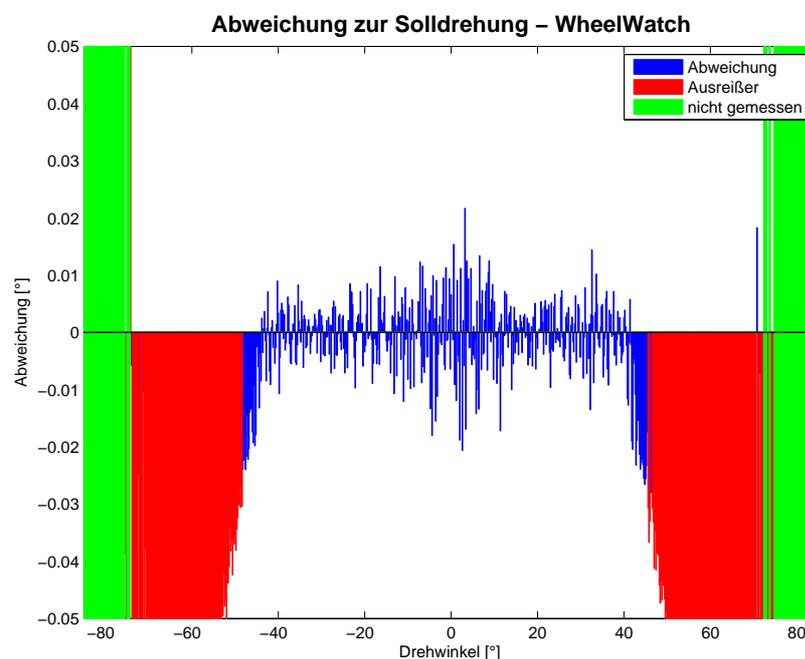


Abbildung 4.10: Bewegungsaufnahme des Drehtischs ( $80^\circ/\text{s}$ ) mit dem System WHEELWATCH (400Hz)

berücksichtigt werden ist die Standardabweichung um den Faktor fünf besser. Bei geringeren Geschwindigkeiten ist dieser Effekt nicht so ausgeprägt, da die Beschleunigungsbeziehungsweise Abbremsphase nicht so ausgeprägt ist. Prinzipiell muss dieser Effekt jedoch bei kontinuierlichen Messungen immer berücksichtigt werden. Dies ist jedoch nur mit einer Synchronisation möglich.

**Auswertung des Systems MOVEINSPECT.** Das graphische Ergebnis der statischen Messreihe von MOVEINSPECT mit einer Aufnahmefrequenz von 400Hz zeigt die Abbildung 4.11. Die Standardabweichung dieser Messreihe ohne Ausreißer beträgt  $0,005^\circ$ . Dies entspricht der gleichen Größenordnung der Standardabweichung von der Messreihe ML1 mit einer Aufnahmefrequenz von 50Hz. Diese zwei Messreihen weisen auch sonst keine signifikanten Unterschiede auf. Die Kennwerte der Messreihen liegen in Tabelle A.3 im Anhang A.4 vor.

Als weitere Messreihe zum Einfluss der Bildfrequenz von MOVEINSPECT liegt eine dynamische Messung mit 400Hz und einer Drehgeschwindigkeit von  $80^\circ/\text{s}$  vor. Die Messabweichungen dieser Messreihe stellt die Graphik 4.12 dar. Hier zeigt sich genau wie bei der Messung WW\_5 mit dem System WHEELWATCH der Einfluss der Beschleunigung des Drehtischs. Dies erläutert der vorherige Paragraph ausführlich. Der Unterschied zwischen den berechneten Standardabweichungen mit und ohne Berücksichtigung der Ausreißer ist bei diesem System noch gravierender als bei WHEELWATCH. Ohne die Ausreißer ermittelt sich eine Standardabweichung von  $0,05^\circ$  für diese Messreihe. Hin-

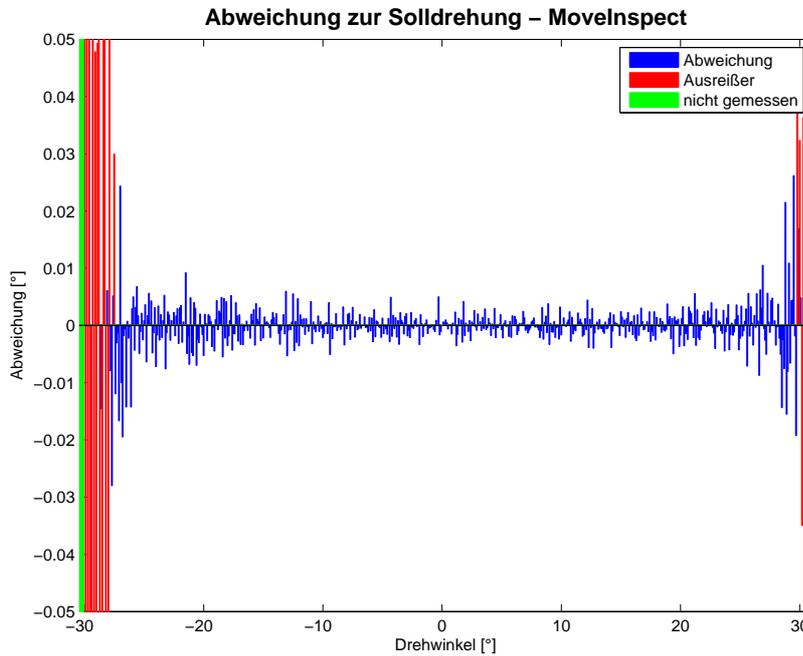


Abbildung 4.11: Wichtungswinkel aufgenommen von dem System MOVEINSPECT bei einer statischen Messreihe mit einer Bildfrequenz von 400Hz

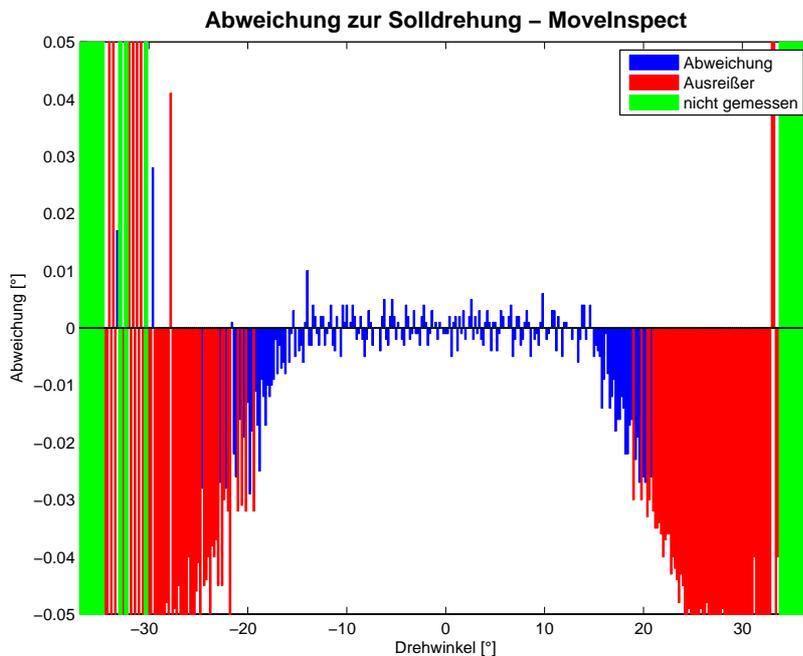


Abbildung 4.12: Bewegungsaufnahme des Drehtisches (80°/s) mit dem System MOVEINSPECT (400Hz)

gegen verschlechtert sich dieser Wert mit Ausreißern um mehr als das 17-fache auf  $0,087^\circ$ .

### 4.3.3 Erkenntnisse aus den Voruntersuchungen

Aus diesen Messungen mit dem Drehtisch können verschiedene Schlussfolgerungen abgeleitet werden. Als erstes findet eine Zusammenstellung der Ergebnisse aus dem Vergleich verschiedener Objektpositionen im Messbereich der Onlinemesssysteme WHEELWATCH und MOVEINSPECT statt. Hier können zum einen die Messbereiche der Winkel am Drehtisch miteinander in Beziehung gesetzt werden, bei denen die Onlinemesssysteme in der Lage sind eine Messung durchzuführen. Der Messbereich ist bei beiden Systemen unabhängig vom Aufbau. Dieser Bereich beträgt bei WHEELWATCH  $120^\circ$  und bei MOVEINSPECT  $60^\circ$ . Der kleinere Messbereich des Zweikamerasystem gegenüber dem Einkamerasystem ist einerseits auf die Geometrie des Aufbaus zurückzuführen. Andererseits verwenden die Messsysteme unterschiedliche Objektive mit verschiedenen Öffnungswinkeln. Dieser ist bei MOVEINSPECT kleiner als bei WHEELWATCH. Somit bildet eine einzelne Kamera von MOVEINSPECT mit einem 16mm-Objektiv generell einen kleineren Bereich ab als die von WHEELWATCH mit einem 10mm-Objektiv. Zusätzlich ist das Zweikamerasystem nur dann in der Lage ein Messergebnis zu liefern, wenn in beiden Kamerabildern der Adapter abgebildet wird. Zur Verdeutlichung

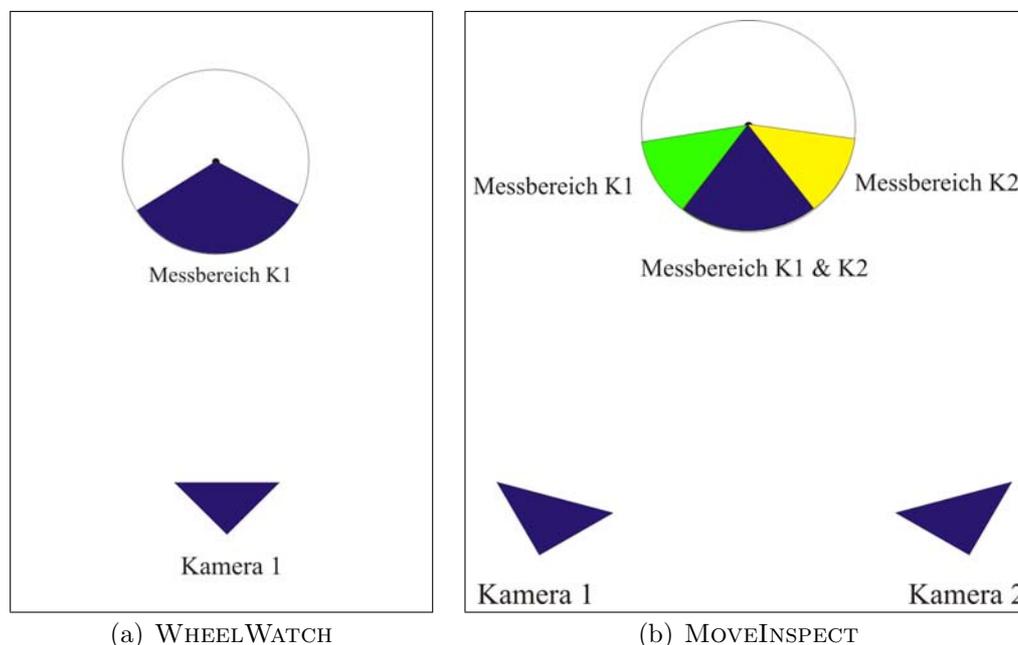


Abbildung 4.13: Winkelbereich des Drehtisch, in dem der Adapter von den Onlinemesssystemen erkannt wird

dieser Problematik sind die jeweiligen messbaren Winkelbereiche in Abbildung 4.13 eingezeichnet und miteinander in Beziehung gesetzt. Der Überlappungsbereich, in denen

der Adapter von beiden Kameras gesehen und gemessen wird, gibt den Winkelbereich von MOVEINSPECT wieder.

Als weiteres Ergebnis liefert der Abschnitt 4.3.2.1 den Vergleich der Genauigkeit von zentrischen und exzentrischen Aufbau. In den Standardabweichungen der Messreihen nach der Elimination der Ausreißer liegen keine Unterschiede vor. Sowohl WHEELWATCH als auch MOVEINSPECT besitzen unabhängig von der Position des Messobjekts eine Genauigkeit von  $\hat{\sigma}_\alpha = 0,004^\circ$ . Die Abweichungen der Richtungswinkel variieren abhängig vom Drehwinkel in der gleichen Größenordnung. Das System MOVEINSPECT ist allerdings am Rand des messbaren Winkelbereichs anfälliger für größere Ausreißer. Generell sollten hier keine Messungen mehr durchgeführt werden, da die Genauigkeit der Systeme in diesem Bereich nicht garantiert werden kann. Da keine Auffälligkeiten zwischen den unterschiedlichen Aufbauten vorliegen, werden die folgenden Untersuchungen lediglich mit dem zentrischen Aufbau durchgeführt.

Der Vergleich der a priori Genauigkeiten der Richtungswinkel von  $0,015^\circ$  mit den berechneten Standardabweichungen zeigt, dass die a priori Werte realistisch angesetzt sind. Allerdings liegen besonders bei den Messungen mit MOVEINSPECT am Rand des messbaren Winkelbereichs Ausreißer vor, die bis zu  $25^\circ$  von den Soll Drehungen abweichen. Dies führt bei diesen Messreihen dazu, dass die berechneten Standardabweichungen deutlich größer als die a priori Werte sind. Sobald diese großen Ausreißer eliminiert werden, liegen die Standardabweichungen wieder in dem Bereich der a priori Angabe. Aus diesem Grund wird darauf verzichtet, diese Angabe zu verändern. Sobald die Messsoftware TRACECAMF in der Lage ist, diese Ausreißer während der Messung zu erkennen und zu eliminieren beziehungsweise eine Begrenzung des Winkelbereichs enthält, ist die Durchführung des Ausreißertests mit der berechneten Varianz möglich.

Die nächste Untersuchung zeigt den Vergleich von einer statischen und einer dynamischen Messung in Abschnitt 4.3.2.2. Grundsätzlich besagen die Ergebnisse dieses Vergleichs, dass beide Messmethoden zur Überprüfung der Genauigkeit von Richtungswinkeln in Frage kommen. In Abschnitt 4.3.2.3 zeigt sich allerdings die Problematik der fehlenden Synchronisation, da Einflüsse durch die Beschleunigung des Drehtisches in der Auswertung nicht berücksichtigt werden können. Weiterhin findet lediglich eine Schätzung für die absolute Position des Drehtisches bei dynamischen Messungen statt. Aufgrund dieser Tatsachen und den daraus resultierenden Schwierigkeiten bei der Auswertung werden im Folgenden statische Messungen für die weitere Beurteilung der Winkelgenauigkeit herangezogen. Bei statischen Messungen besteht nach Abschnitt 4.3.2.3 kein Einfluss der gewählten Aufnahmefrequenz der Systeme WHEELWATCH und MOVEINSPECT. Diese kann deshalb frei gewählt werden ohne die Genauigkeitsanalyse zu beeinflussen.

## 4.4 Testverfahren zur Beurteilung der Winkelgenauigkeit

In diesem Kapitel wird das Testverfahren zur Genauigkeitsüberprüfung der Onlinemesssysteme in Bezug auf Winkelmessungen entwickelt.

Zunächst erläutern die Abschnitte 4.4.1 und 4.4.2.1 bis 4.4.2.2 das Grundprinzip des entwickelten Testverfahrens. Dieses Testverfahren beruht auf den Annahmen, die sich innerhalb der Voruntersuchungen herausgestellt haben. Im Anschluss zeigt der Abschnitt 4.4.2.3 die Durchführung des Genauigkeitstest mit den Onlinemesssystemen WHEELWATCH und MOVEINSPECT und dessen Ergebnisse.

#### 4.4.1 Implementation des Testverfahrens

Für die Beurteilung der Winkelgenauigkeit der Systeme WHEELWATCH und MOVEINSPECT wurde das Programm „Messauswertung für Drehtisch“ im Zuge dieser Diplomarbeit selbst erstellt. Dieses kann über den Aufruf der Matlabfunktion „genauigkeitstestWinkel.m“ gestartet werden. Eine Dokumentation des Programms liegt im Anhang A.3 vor.

Das Testprogramm zur Beurteilung der Genauigkeit von Winkeln setzt sich aus mehreren Auswerteschritten zusammen. Diese beruhen auf der Modellbeschreibung in Abschnitt 4.1 und wurden bereits in den Voruntersuchungen zu diesem Testverfahren durchgeführt. Da sich die einzelnen Auswertungsschritte in den Voruntersuchungen etabliert haben, werden diese übernommen.

Im Folgenden erfolgt deshalb lediglich eine genaue Beschreibung der Hypothesentests, die noch nicht berücksichtigt wurden. Die Ergebnisse der einzelnen Hypothesentests dienen zur Qualitätsbeurteilung der einzelnen Testreihen. Dies stellt neben den statistische Kennwerten ebenfalls eine Aussage zur Güte des Testergebnisses zur Genauigkeitsbeurteilung von Winkeln dar.

1. Als erstes findet der Globaltest nach Elimination der Ausreißer statt. Dieser dient zur Überprüfung, ob generell Fehler in dem stochastischen und deterministischen Modell vorliegen. Mit dem Bestehen des Globaltests ist eine weitere Untersuchung des Modells nicht erforderlich. Ansonsten wird der folgende Punkt 2 durchgeführt.
2. Das stochastische Modell beinhaltet die Annahme, dass die Messwerte normalverteilt vorliegen. Dies kann mit Hilfe eines  $\chi^2$ -Anpassungstests kontrolliert werden. Hierzu werden direkt die Winkel der Onlinemesssysteme auf Normalverteilung überprüft. Der  $\chi^2$ -Anpassungstest erfolgt nach dessen Beschreibung in Abschnitt A.2.1. Dies beinhaltet die Erstellung eines empirischen und theoretischen Histogramms der vorliegenden Verteilung. Für das empirische Histogramm werden die geschätzten Winkel zunächst in 20 gleichgroße Klassen eingeteilt. Falls Klassen mit weniger als fünf Messwerten vorliegen, werden diese mit ihrer Nachbarklasse zusammengefasst. Das theoretische Histogramm beruht auf den geschätzten Mittelwerten und den ermittelten Standardabweichungen aus den gemessenen Richtungswinkeldifferenzen. Mit diesen Angaben und den Klassengrenzen berechnet sich das theoretische Histogramm. Aus beiden Histogrammen wird die Testgröße nach Formel A.16 ermittelt, die mit 20 Klassen und 2 geschätzten Verteilungsparametern der theoretischen Verteilungsfunktion 17 Freiheitsgrade besitzt. Die Irrtumswahrscheinlichkeit des  $\chi^2$ -Anpassungstests wird auf eine

übliche Angabe von 5% festgelegt. Mit diesen Angaben lässt sich überprüfen, ob normalverteilte Messwerte vorliegen.

Das Ergebnis des Testverfahrens stellt die Software in einem Bild graphisch dar. Hierzu werden jeweils zehn geschätzte Winkel zusammengefasst und dessen Standardabweichung über Formel A.14 aus den Soll-Ist-Abweichungen berechnet. Diese werden in einem Kreisdiagramm zusammen mit dem jeweiligen mittleren Drehwinkel aus den 40 gemittelten Winkelmessungen dargestellt. Diese Darstellungsart wurde in den Voruntersuchungen noch nicht verwendet.

#### 4.4.2 Durchführung und Auswertung des Testverfahrens

Die folgenden beiden Abschnitte beschreiben den Aufbau und die Durchführung des Testverfahrens. Diese Aspekte des Testverfahrens ergeben sich aus den implementierten Auswerteschritten und berücksichtigen die Ergebnisse der Voruntersuchungen. Nachfolgend wird das Testverfahren experimentell mit den Onlinemesssystemen WHEELWATCH und MOVEINSPECT geprüft und dessen Ergebnisse dargestellt.

##### 4.4.2.1 Testaufbau

Aufgrund des Ergebnisses der Voruntersuchungen, dass kein Genauigkeitsunterschied zwischen zentrischen und exzentrischen Messungen vorliegt, werden die Messungen zur Beurteilung der Genauigkeit von Winkeln mit einem zentrischen Messaufbau durchgeführt. Dieser ist in den Abbildungen 4.3a und 4.3b des Abschnitts 4.3.2.1 dargestellt. Der Adapter wird so angebracht, dass er in der Nullposition des Drehtischs in die Blickrichtung des Kamerasystems zeigt. In dieser Position wird er nach Abschnitt 4.2 eingemessen.

##### 4.4.2.2 Testdurchführung

Die Kameras der Onlinemesssysteme können auf eine beliebige Entfernung fokussiert werden. Des Weiteren lässt sich der Lichteinfall in das Objektiv über die Blende steuern. Diese variablen Einstellungen an den Kameras sind im Vorfeld festzulegen und einzustellen. Danach findet die Einstellung der einzelnen Parameter in der Messsoftware und die Kalibrierung der Onlinemesssysteme statt. Dies beschreibt der Abschnitt 3.1.3 ausführlich.

Wie bei den Voruntersuchungen werden von der Nullposition des Drehtischs zwei Messreihen aufgenommen, die innerhalb der Auswertung zu einer Testreihe zusammengefasst werden. Die Rotation des Drehtischs findet mit Schritten von  $0,1^\circ$  statt. An jeder Position wird eine bestimmte Anzahl an Wiederholungsmessungen durchgeführt. Diese kann genauso wie die Aufnahmefrequenz der Onlinemesssysteme frei gewählt werden.

### 4.4.2.3 Ergebnisse zur Winkelgenauigkeit

<b>Für alle nachfolgenden Messungen gilt:</b>		
Art der Messung:	statisch	
Adapterposition:	zentrisch	
Fokussierung:	800mm	
Bildfrequenz:	50Hz	
Solldrehung:	0, 1°	
Testreihe	Messsystem	Wiederholungsmessungen
TestWW_1	WHEELWATCH	20
TestMI_1	MOVEINSPECT	20
TestWW_2	WHEELWATCH	1
TestMI_2	MOVEINSPECT	1

Tabelle 4.4: Parametereinstellungen der Onlinemesssysteme und der Lineareinheit für die Genauigkeitsbeurteilung der Richtungswinkel

Innerhalb dieser Arbeit liegen vier Testreihen zur Beurteilung der Genauigkeit der Richtungswinkel vor. Jedes der zwei zur Verfügung stehenden Onlinemesssysteme führt zunächst eine Testreihe durch. Hierzu werden die Kameras der beiden Systeme auf eine Entfernung von 800mm fokussiert und die Blende auf einen Wert von 2,8 eingestellt. Beide Systeme führen eine statische Testreihe durch mit einem Winkel von 0, 1°. Diese Aufnahme der Richtungswinkel findet in einem Abstand von 800mm statt und bezieht sich auf einen Adapter mit sechs Ancomarken. Über den Vorschaumodus der Messsoftware TRACECAMF wird der messbare Winkelbereich der Onlinemesssysteme ermittelt. Das System WHEELWATCH misst die Richtungswinkel des Adapters in einem Bereich von 120°. MOVEINSPECT ist lediglich in der Lage, einen Winkelbereich von 60° zu erfassen. An jeder Messposition messen die Systeme 20 Wiederholungsmessungen mit einer Aufnahme Frequenz von 50Hz. Diese zwei Testreihen TestWW\_1 und TestMI\_1 entsprechen den Messreihen WW\_1 und MI\_1 des Kapitels 4.3.2.1. Zwei weitere Testreihen ergeben sich aus diesen Testreihen mit Wiederholungsmessungen. Zur Beurteilung von Einzelmessungen wird jeweils nur der erste Messwert der Wiederholungsmessungen herangezogen. Damit liegen die zwei Testreihen TestWW\_2 und TestMI\_2 vor. In Tabelle 4.4 sind die Einstellungen dieser vier Testreihen zur Beurteilung der Winkelgenauigkeit nochmals zusammengestellt.

Im Anhang A.5 befindet sich zusätzlich die Zusammenstellung der Kennwerte der Testreihen und die Balkendiagramme der Messabweichungen der Einzelmessungen.

**Ergebnisse zum System WHEELWATCH.** Für das System WHEELWATCH liegen zwei Testreihen vor. Zunächst erläutert der Paragraph „Wiederholungsmessungen“ das Ergebnis der Testreihe TestWW\_1. Im Anschluss wird die Winkelgenauigkeit bei einer Einzelmessung im Paragraph „Einzelmessung“ untersucht. Dieser Teil bezieht sich auf die Testreihe TestWW\_2.

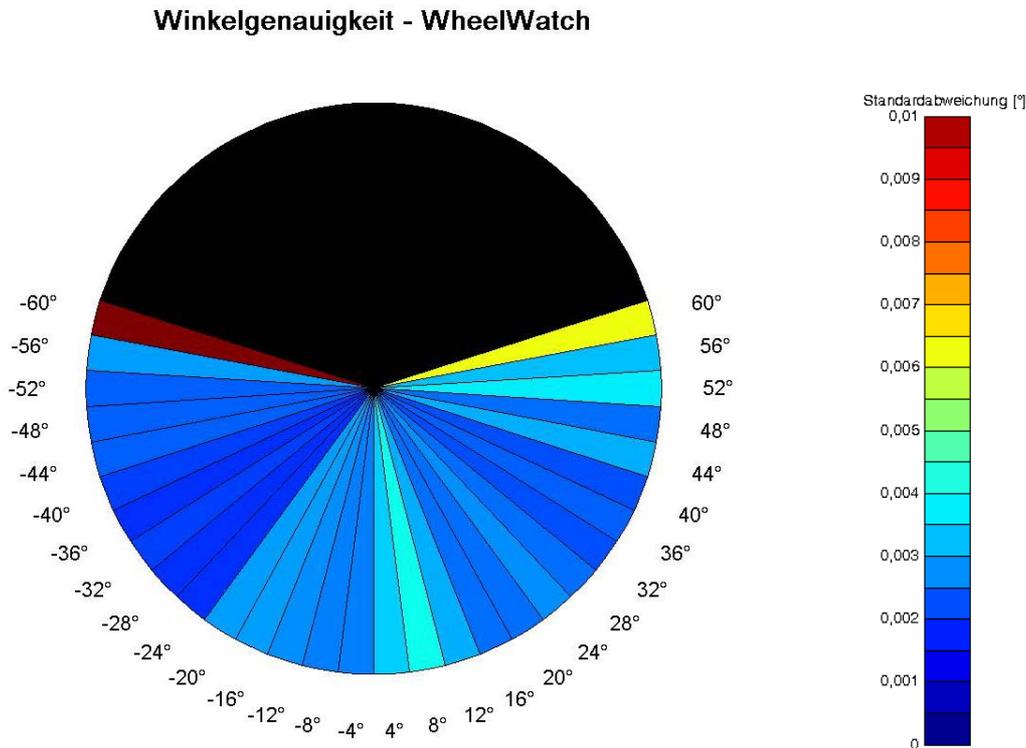


Abbildung 4.14: Kreisdiagramm der Standardabweichungen der Richtungswinkel ( $0, 1^\circ$ ) der zentrische Messung mit WHEELWATCH

**Wiederholungsmessungen mit WHEELWATCH.** Die Testreihe TestWW\_1 bezieht sich auf die Messwerte der Messreihe WW\_1. Die Kennwerte dieser Messung erläutert der Abschnitt 4.3.2.1 bereits ausführlich. Innerhalb des entwickelten Testverfahrens finden, zusätzlich zu der Ermittlung der Kennwerte und Messabweichungen, verschiedene Hypothesentests statt.

Diese finden aufgrund von groben Fehlern, die innerhalb der Voruntersuchungen aufgetreten sind, nach der Elimination der Ausreißer statt. Als erstes vergleicht der Globaltest nach Punkt 1 (Abschnitt 4.4.1) die a priori und die empirischen Standardabweichung. Aufgrund des gewählten a priori Wertes, der auch Ausreißer mit berücksichtigt, wird dieser Test nicht bestanden. Die a priori Standardabweichung stellt hierfür einen zu pessimistischen Wert dar. Dies gilt auch für alle weiteren Winkelmessungen für die Testdurchführung mit WHEELWATCH als auch mit MOVEINSPECT.

Der nächste Hypothesentest überprüft die ermittelten Winkel auf Normalverteilung (s. Punkt 2 der Implementation). Die graphische Veranschaulichung der Testergebnisse zeigt die Abbildung 4.15 exemplarisch für die Winkelmessung gegen den Uhrzeigersinn. Obwohl dieser Test ebenfalls nicht bestanden wird, liegen näherungsweise normalverteilte Winkel vor. Aus diesem Grund werden die Messreihen nicht verworfen, sondern trotz der negativen Testergebnisse als korrekt angesehen. Dies gilt auch für die später

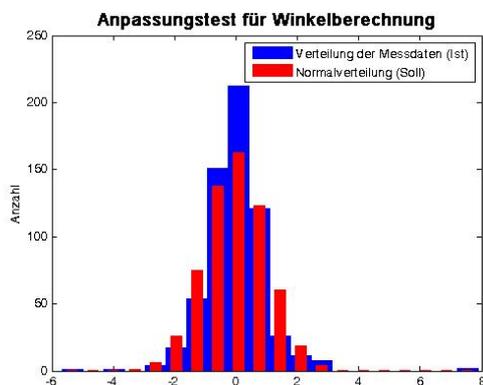


Abbildung 4.15: Ergebnis des Anpassungstests zur Überprüfung der Winkel auf Normalverteilung mit WHEELWATCH

durchgeführten Testreihen der Einzelmessungen.

Weiterhin wird die einfache Standardabweichung der Richtungswinkel in Graphik 4.14 in Bezug zu dem Drehwinkel dargestellt. Die berechneten Standardabweichungen beziehen sich jeweils auf 40 Messwerte in einem Bereich von  $4^\circ$ . Innerhalb des Winkelbereichs weisen diese Standardabweichung keine systematischen Veränderungen auf. Eine Ausnahme stellt der Rand des Winkelbereichs bei  $-60^\circ$  und  $+60^\circ$  dar, an denen die Standardabweichung den Wert von  $0,006^\circ$  aufgrund der Ausreißer übersteigt. Im restlichen Winkelbereich liegen die Werte unterhalb von  $0,004^\circ$ .

**Einzelmessung mit WHEELWATCH.** Die Abbildung 4.16 stellt das Ergebnis des Testverfahrens für die Testreihe TestWW\_2 dar. Die einfache Standardabweichung der gesamten Testreihe beträgt  $0,016^\circ$ , die sich nach der Elimination der detektierten Ausreißer auf  $0,006^\circ$  reduziert. Diese Ausreißer befinden sich ebenso wie bei den Wiederholungsmessungen am Rand des Winkelbereichs. Hier steigt auch die Standardabweichung auf einen Wert bis zu  $\hat{\sigma} = 0,05^\circ$  an. Ebenfalls auffällig sind größere Standardabweichungen um die Nulllage des Adapters. In einem Winkelbereich von  $-20^\circ$  bis  $+20^\circ$  liegen Standardabweichungen von über  $0,006^\circ$  vor. Bei einem Winkel von  $8^\circ$  liegt die Genauigkeit sogar bei  $\pm 0,013^\circ$ .

Dieser Effekt zeigt sich bei einer Einzelmessung deutlicher als bei der Testreihe mit Wiederholungsmessungen. Bereits in den Voruntersuchungen zeigt dies die Messreihe WW\_3 in Abschnitt 4.3.2.2. Im Bild werden die retroreflektierenden Punkte des Adapters abgebildet. Bei einem Richtungswinkel um den Winkel Null des Drehtischs verändert sich die Lage der abgebildeten Punkte zwischen zwei Aufnahmen weniger als bei einer gleichen Richtungswinkel bei einer größeren Winkelposition des Drehtischs. Dadurch verschlechtert sich die Genauigkeit. Bei Wiederholungsmessungen reduziert sich dieser Einfluss durch die Mittelbildung aus mehreren Messungen.

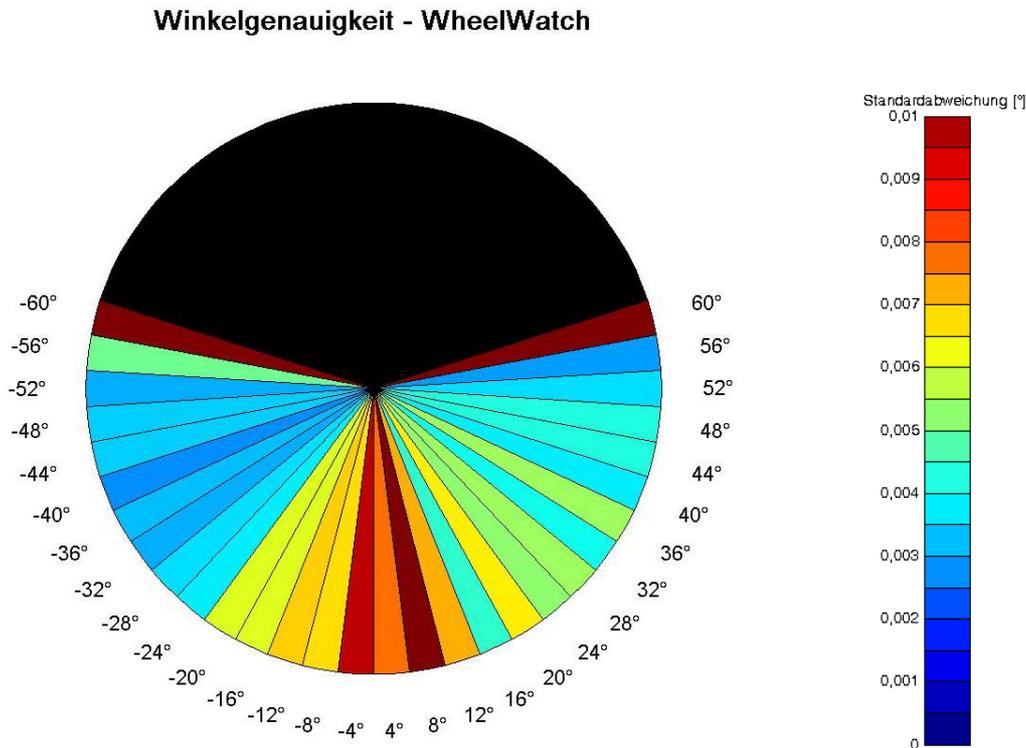


Abbildung 4.16: Kreisdiagramm der Standardabweichungen der Richtungswinkel ( $0, 1^\circ$ ) der zentrische Messung mit WHEELWATCH bei einer Einzelmessung

**Ergebnisse zum System MOVEINSPECT.** Dieser Abschnitt erläutert die Testergebnisse zur Genauigkeit der Richtungswinkel des Onlinemesssystems MOVEINSPECT. Zunächst beschreibt der Paragraph „Wiederholungsmessungen“ das Ergebnis der Testreihe TestML1. Anschließend geht der Paragraph „Einzelmessung“ auf die erreichbare Genauigkeit von Einzelmessungen der Testreihe TestML2 ein.

**Wiederholungsmessungen mit MOVEINSPECT.** Zunächst findet die Auswertung der Testreihe TestML1 statt. Diese Testreihe entspricht der Messreihe MI\_1, die im Abschnitt 4.3.2.1 bereits mit den entsprechenden Kennwerten beschrieben ist. Innerhalb des hier durchgeführten Testverfahrens werden weitere Untersuchungen bezüglich der Modellannahmen durchgeführt (s. Abschnitt 4.4.1). Die geschätzten Winkel liegen, wie die des Systems WHEELWATCH, annähernd normalverteilt vor. Dies verdeutlicht die Abbildung 4.17 beispielhaft für die Richtungswinkel gegen den Uhrzeigersinn. Da sich die nachfolgende Einzelmessung ebenfalls auf diese Messreihe bezieht, treffen die Aussagen auch für deren Auswertung der Hypothesentests zu.

Des Weiteren zeigt das Bild 4.18 die Standardabweichungen der Testreihe TestML1 (mit Wiederholungsmessungen) bezogen auf den absoluten Drehwinkel des eingemessenen Adapters. Das Kreisdiagramm verdeutlicht, dass die ermittelte Standardabweichung

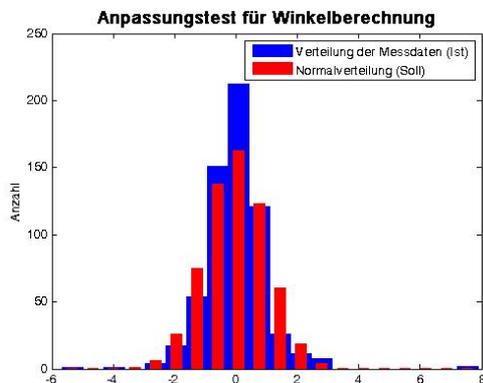


Abbildung 4.17: Ergebnis des Anpassungstests zur Überprüfung der Winkel auf Normalverteilung mit MOVEINSPECT

### Winkelgenauigkeit - MoveInspect

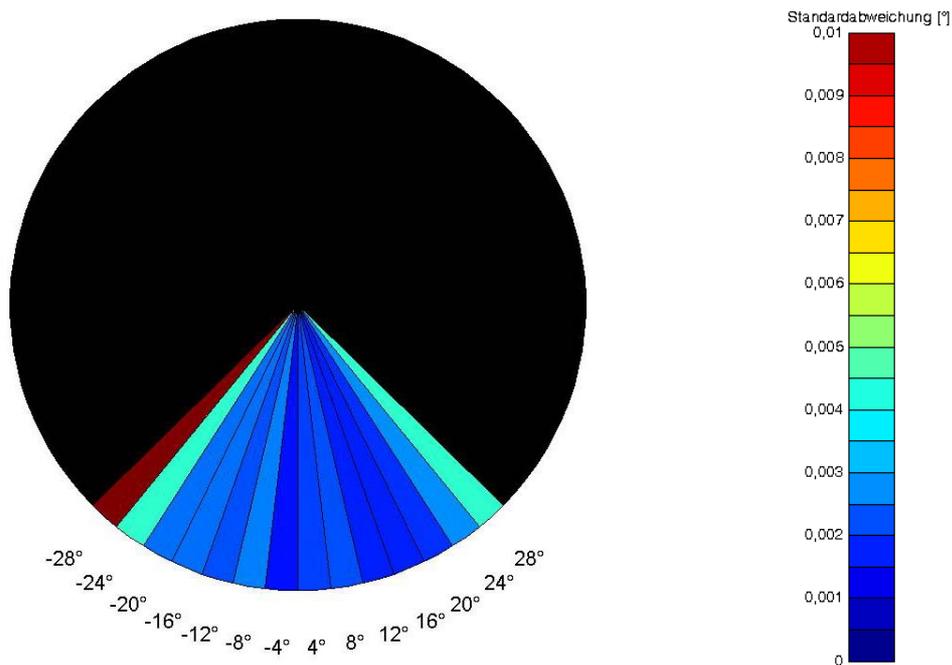


Abbildung 4.18: Kreisdiagramm der Standardabweichungen der Richtungswinkel ( $0, 1^\circ$ ) der zentrische Messung mit MOVEINSPECT

chung von  $0,004^\circ$  der gesamten Standardabweichung sich innerhalb des Winkelbereichs nicht signifikant verändert. Lediglich am Rand des Winkelbereichs verschlechtert sich die Standardabweichung auf  $\hat{\sigma}_\alpha = 0,03$  aufgrund der vorliegenden Ausreißer.

### Winkelgenauigkeit - MoveInspect

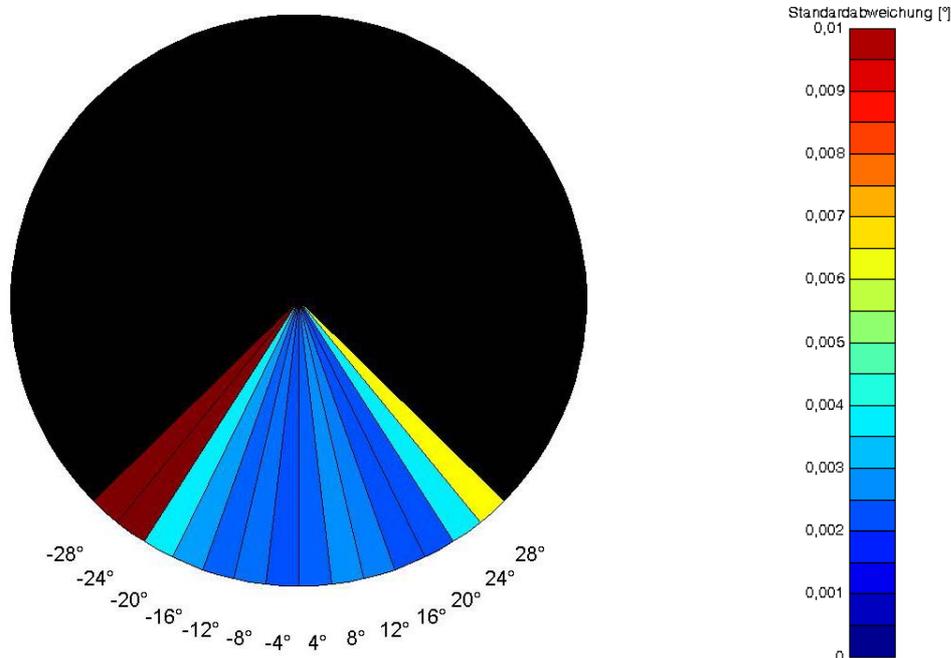


Abbildung 4.19: Kreisdiagramm der Standardabweichungen der Richtungswinkel ( $0, 1^\circ$ ) der zentrische Messung mit WHEELWATCH bei einer Einzelmessung

**Einzelmessung mit MOVEINSPECT.** Die Winkelgenauigkeit wird zusätzlich in Bezug zu einer Einzelmessung beurteilt. Das Ergebnis in Abbildung 4.19 bezieht sich auf die Testreihe TestMI.2. Hier liegt für die gesamte Testreihe eine einfache Standardabweichung von  $\hat{\sigma}_\alpha = 0,028^\circ$  vor. Ohne Berücksichtigung der Ausreißer vermindert sich der Wert auf  $0,005^\circ$ . Diese Standardabweichung liegt konstant im gesamten Winkelbereich, mit Ausnahme des Randbereichs, vor. Am Rand liegen die detektierten Ausreißer vor, mit denen sich die Standardabweichung auf bis zu  $0,065^\circ$  bei einem Winkel von  $-28^\circ$  erhöht.

## 4.5 Fazit der Untersuchungen der Winkelgenauigkeit

Die durchgeführten Vergleiche der beiden Onlinemesssysteme in Bezug auf die Messung von Winkeln zeigt, dass beide Systeme gleiche Genauigkeiten erreichen können. Die angenommenen a priori Werte für die Genauigkeit von  $0,015^\circ$  können bei beiden Systemen als zu pessimistisch angesehen werden, wenn die Ausreißer detektiert und aus der Berechnung eliminiert werden. Dann erreichen die beiden Systeme bei Einzelmessungen Genauigkeiten von weniger als  $0,006^\circ$ . Dies gilt für die Winkelbereiche, innerhalb derer die Systeme den Adapter voll detektieren und decodieren kann. Dieser

Winkelbereich ist bei MOVEINSPECT mit  $\pm 20^\circ$  kleiner als bei WHEELWATCH, wo dieser bei  $\pm 55^\circ$  liegt. Messungen, die über diesen Bereich hinausgehen führen bei beiden Systemen zu so schlechten Messergebnissen, dass in diesem Bereich keine Messungen mehr ausgeführt werden sollten.

Außerdem zeigen die Auswertergebnisse bei dem System WHEELWATCH, dass um die Nullposition des Drehtischs die Messergebnisse schlechter sind. Dies ist auf die geringe Veränderung der Lage des Adapters im Bild zurückzuführen. Diese Verschlechterung ist vor allem bei Einzelmessungen zu beobachten, da hier die Standardabweichung in diesem Winkelbereich auf bis zu  $0,013^\circ$  ansteigt. Bei Wiederholungsmessungen ist dieser Einfluss bedingt durch die Mittelbildung um den Faktor zwei geringer als bei der Einzelmessung. Mit dem System MOVEINSPECT ist dieser Unterschied zwischen einer Einzelmessung und einer Wiederholungsmessung nicht signifikant.

## 5 Überprüfung der Distanzgenauigkeit optischer Onlinemessungen

Innerhalb des letzten Abschnitts wurde ein Testverfahren zur Beurteilung der Winkelgenauigkeit entwickelt. Dieses Kapitel beschäftigt sich mit der Genauigkeit von Distanzen. Hierbei soll die Genauigkeitsangabe zur Distanzgenauigkeit und die Einflussfaktoren auf die Messergebnisse spezifiziert werden.

Die Onlinemesssysteme liefern als Messergebnis die sechs Parameter der Orientierung der Kamera beziehungsweise des Objekts in den jeweiligen lokalen Koordinatensystemen. Für die Beurteilung der Distanzgenauigkeit werden lediglich die drei Translationsparameter benötigt. Von den einzelnen Parametern sind keine Genauigkeitsangaben aus der Messung bekannt. Für die Einschätzung der Distanzgenauigkeit liegt lediglich der Herstellerwert zur 3D-Positionsgenauigkeit der Onlinemesssysteme WHEELWATCH und MOVEINSPECT vor. Dieser beträgt  $\pm 0,1\text{mm}$  für ein Messvolumen von  $1\text{m} \times 1\text{m} \times 0,5\text{m}$ . Zur Spezifikation dieses Wertes wird ein Testverfahren entwickelt.

Hierzu erläutert Abschnitt 5.1 zunächst das Modell zur Bestimmung von Distanzen aus den gemessenen Daten der Onlinemesssysteme. Dieses Modell wird anschließend experimentell mit den Onlinemesssystemen WHEELWATCH und MOVEINSPECT der Firma AICON 3D Systems GmbH näher untersucht. Aus der Systembeschreibung dieser beiden Onlinemesssysteme in Abschnitt 3.1 ergeben sich verschiedene Einflussfaktoren, die die Distanzgenauigkeit beeinflussen können. Der Einfluss dieser Faktoren wird in Abschnitt 5.2 im Rahmen von Voruntersuchungen näher spezifiziert. Unter Berücksichtigung der Ergebnisse der Voruntersuchungen wird im darauffolgenden Abschnitt 5.3 das entwickelte Testverfahren zur Beurteilung der Distanzgenauigkeit erläutert und für die Systeme WHEELWATCH und MOVEINSPECT durchgeführt. Die Ergebnisse zum Testverfahren und zur Genauigkeit der Distanzen fasst Abschnitt 5.4 zusammen.

## 5.1 Modell der Distanzbestimmung

Innerhalb der Genauigkeitsuntersuchung wird die Genauigkeit von ermittelten Distanzen näher betrachtet.

**Definition 5.2: Distanzgenauigkeit.** Die Distanzgenauigkeit bezeichnet die Genauigkeit der Strecke zwischen zwei 3D-Positionen eines Objekts.

Hieraus lässt sich das Modell für die Ermittlung der Distanzen aus 3D-Koordinaten bestimmen.

**Messgrößen und Parameter.** Der Beobachtungsvektor  $\mathbf{l}$  ergibt sich aus den  $N$  gemessenen  $X$ -,  $Y$ - und  $Z$ -Koordinaten der Translationsparameter. Aus diesen normalverteilten Beobachtungen werden die Strecken zwischen jeweils zwei aufeinanderfolgenden Positionen als  $U$  Parameter geschätzt. Für diese gemessenen Strecken stehen Sollwerte der Distanzen  $\tilde{D}$  mit einer übergeordneten Genauigkeit der Längeneinheit zur Verfügung. Diese können für statische Messungen direkt als Intervall an der Längeneinheit eingestellt werden. Bei kontinuierlichen Messungen kann die Distanz zwischen zwei aufeinanderfolgenden Messwerten wie bei dem Drehtisch über die Formel 4.1 auf Seite 27 berechnet werden. Hierzu müssen die Angaben über die Geschwindigkeit der Längeneinheit und der Aufnahme Frequenz des Messsystems vorliegen.

**Deterministisches Modell für die Distanzbestimmung mit den Onlinemesssystemen.** Die Distanzen  $\hat{D}_u$  zwischen zwei Messwerten der Onlinemesssysteme werden mit Formel 5.1 bestimmt.

$$\hat{D}_u = \sqrt{(X_n - X_{n-1})^2 + (Y_n - Y_{n-1})^2 + (Z_n - Z_{n-1})^2} \quad (5.1)$$

mit

$\hat{D}_u$  ... Geschätzte Distanzen mit  $u = 1 \dots U$ ,  $U = N - 1$   
 $X_n, Y_n, Z_n$  ... Koordinaten an der Position  $n$

Liegen Wiederholungsmessungen vor, werden diese innerhalb der Berechnung arithmetisch gemittelt. Dies ist in der Auswertung zu berücksichtigen, da hierdurch die zufälligen Fehler verringert werden und somit die ermittelte Standardabweichung zu optimistisch für eine Einzelmessung ist. Die Mittelung hat jedoch den Vorteil, dass in den Voruntersuchungen die systematischen Einflüsse in den Messungen besser erkannt werden. Der entwickelte Test nach Abschnitt 5.3 findet dann sowohl mit Wiederholungsmessungen als auch für eine Einzelmessung statt.

**Stochastisches Modell für die Distanzbestimmung mit den Onlinemesssystemen.** Für die einzelnen Koordinatengenauigkeiten liegen keine Angaben vor. Somit ergibt sich mit der Annahme von gleichgenauen und unkorrelierten Beobachtungen das stochastische Modell mit

$$\Sigma_{ll} = \hat{\sigma}_l^2 I_{3N}. \quad (5.2)$$

Die Herstellerangabe für die Positionsgenauigkeit von WHEELWATCH und MOVEINSPECT beträgt für beide Systeme  $\tilde{\sigma}_P = 0,1\text{mm}$ . Über die Varianzfortpflanzung für die Distanzberechnung aus zwei Punkten ergibt sich eine a priori Distanzgenauigkeit  $\tilde{\sigma}_D$  von

$$\begin{aligned} \tilde{\sigma}_D &= \sqrt{\tilde{\sigma}_{P_1}^2 + \tilde{\sigma}_{P_2}^2} \\ &= \sqrt{2} \cdot 0,1\text{mm} = 0,14\text{mm}. \end{aligned} \quad (5.3)$$

**Auswertung der Messergebnisse.** Mit einem Soll-Ist-Vergleich, der im Anhang unter Abschnitt A.2.2 nachgeschlagen werden kann, werden verschiedene Kennwerte für eine Messreihe ermittelt. Als Ergebnis stehen nach der Auswertung der Datensätze der Onlinemesssysteme jeweils der Mittelwert, der Median und die Standardabweichung der Distanzen als Messunsicherheit zur Verfügung. Für diese Ermittlung der Kennwerte sind die Korrelationen zwischen zwei aufeinander folgenden Distanzen zu beachten. Diese liegen vor, da sich zwei aufeinander folgende Distanzen in der Berechnung auf einen identischen Punkt beziehen. Für diese besitzt die Korrelation einen Wert von 0,5. Alle weiteren Distanzwerte korrelieren nicht miteinander. Aus diesem Grund ist in der weiteren Auswertung die Kovarianzmatrix zu beachten, damit die jeweiligen Korrelationen berücksichtigt werden können.

Ebenso wie in Abschnitt 4.1 für die Winkelbestimmung beschrieben, werden hier ebenfalls die Modellannahmen überprüft. Der Adapter sollte bei den hier durchgeführten Messungen immer im Sichtbereich der Kameras liegen, so dass im Gegensatz zu den Messungen mit dem Drehtisch nur mit vereinzelt Ausreißern zu rechnen ist. Deshalb wird hier die Berechnung eines Globaltests (s. Anhang A.2.1) zum Vergleich von a priori und empirischer Varianz durchgeführt. Unter der Annahme, dass keine Fehler im Modell vorliegen, tritt kein signifikanter Unterschied zwischen der a priori und der empirischen Varianz auf. Einzelne Ausreißer werden wiederum mit dem Parametertest nach Abschnitt A.2.1 detektiert und in den Ergebnissen markiert. Hierbei wird je nach Ergebnis des Globaltests die a priori oder die berechnete Varianz zur Erstellung der Testgröße verwendet. Nach der Elimination der Ausreißer wird die Messunsicherheit erneut berechnet und es findet ein Vergleich zu der zuvor berechneten empirischen Standardabweichung statt. Bei einer deutlichen Abweichung zwischen beiden Werten sollten die Ausreißer näher untersucht werden. Als Genauigkeitsmaß wird die Standardabweichung der Distanzen mit Ausreißern ausgegeben, da Ausreißer in praktischen Anwendungen ebenfalls vorkommen und nicht eliminiert werden können. Es ist zu beachten, dass es sich bei dieser Genauigkeitsangabe um eine Standardabweichung handelt, die

sich auf Wiederholungsmessungen beziehen kann.

Die Annahme von normalverteilten Messwerten wird mit einem  $\chi^2$ -Anpassungstest überprüft. Aus der Distanzberechnung nach Formel 5.1 ergibt sich, dass die berechneten Distanzen normalverteilt sind, wenn sie auf normalverteilten Beobachtungen basieren. Somit findet diese Überprüfung mit den ermittelten Distanzen auf Normalverteilung statt.

## 5.2 Voruntersuchungen zur Distanzgenauigkeit

Dieses Kapitel zeigt einige Einflussfaktoren auf, die für die Entwicklung des Testverfahrens zur Beurteilung der Genauigkeit von Distanzen in Abschnitt 5.3 von Bedeutung sind. Deshalb werden hier Voruntersuchungen durchgeführt, die den Einfluss einzelner Faktoren auf die Distanzgenauigkeit der Onlinemesssysteme ermitteln.

Abschnitt 5.2.1 beschreibt zunächst die eigene Implementation des Auswertemodells für die Messreihen. Danach findet in Abschnitt 5.2.2 die Untersuchung einzelner Einflussfaktoren von Messungen der Onlinemesssysteme mit der Lineareinheit der Firma PI statt. Hierzu gehören im Einzelnen die Gegenüberstellung verschiedener Messaufbauten, die die Positionsabhängigkeit innerhalb des Messbereichs zeigt, die Gegenüberstellung von statischen und kontinuierlichen Messungen, der Einfluss der Aufnahmefrequenz der Messsysteme und der Einfluss der Umgebungsbeleuchtung.

Neben Vergleichsmessungen mit der Lineareinheit der Firma PI werden auch Messungen an der 20m-Geradheitsbahn der Universität Bonn durchgeführt. Hierbei nimmt ein Laserinterferometer die Sollwerte der Linearverschiebungen auf. Diese Messungen sind in Abschnitt 5.2.2.5 beschrieben. Außerdem befindet sich im Anhang A.7 eine Zusammenstellung der Ergebnisse der in diesem Kapitel vorgestellten Messreihen.

### 5.2.1 Implementation des Modells

Die Auswertung der Messreihen findet nach der Modellbeschreibung in Abschnitt 5.1 statt. Für die Implementation wird das Programm Matlab der Firma The MathWorks verwendet.

Für die Voruntersuchungen wird als a priori Standardabweichung der Distanzen der Onlinemesssysteme zunächst der Wert von 0,14mm nach Formel 5.3 eingesetzt. Eine Anpassung des Wertes findet nach den ersten Messungen statt.

Die Ergebnisausgabe liefert die Kennwerte und eine graphische Darstellung der Messabweichungen als Balkendiagramm.

### 5.2.2 Durchführung und Auswertung der Voruntersuchungen

Die Untersuchung zur Beurteilung der Distanzgenauigkeit findet mit der Lineareinheit M-150.10 von der Firma Physik Instrumente statt. PI garantiert eine hochgenaue Distanzauflösung im sub $\mu\text{m}$ -Bereich. Hierbei ist unklar, ob diese Auflösungsangabe der Genauigkeit entspricht und ob sich diese Angabe auf die Distanz in Verschieberichtung oder die 3D-Distanz bezieht. Mit dem Absolute Tracker der Firma Leica wird deshalb eine Überprüfung durchgeführt, die zeigt, dass sich die Distanzangabe der Lineareinheit als Referenzdaten für 3D-Distanzen eignet.

Der Lasertracker besitzt laut Herstellerangabe eine Distanzgenauigkeit des integrierten Interferometers von 0,5ppm. Dies entspricht bei einem Abstand von etwa 2m zum Objekt einer Genauigkeit von  $1\mu\text{m}$ . Für die durchgeführten Messungen liegt hiermit eine a priori Standardabweichung von  $\tilde{\sigma}_{LT} = 1\mu\text{m}$  vor. Damit besitzt der Absolute Tracker eine höhere Genauigkeit als die Onlinemesssysteme, so dass gezeigt werden kann, dass keine Einflüsse der Lineareinheit die Messungen mit WHEELWATCH und MOVEINSPECT verfälschen.

Die Distanzgenauigkeit von 0,14mm stellt sich bei den Vergleichsmessungen mit dem Lasertracker als zu pessimistisch heraus. WHEELWATCH erreicht eine Genauigkeit der Distanzen von  $33\mu\text{m}$ . Für MOVEINSPECT ergibt sich eine Standardabweichung der Distanzen von  $5\mu\text{m}$ . Diese Werte werden für die weiteren Untersuchungen als a priori Standardabweichungen verwendet.

Da diese Vergleichsmessungen mit dem Lasertracker kein Bestandteil der Arbeit sind, befindet sich die ausführliche Beschreibung dieser Überprüfung mit den Ergebnissen im Anhang A.6.

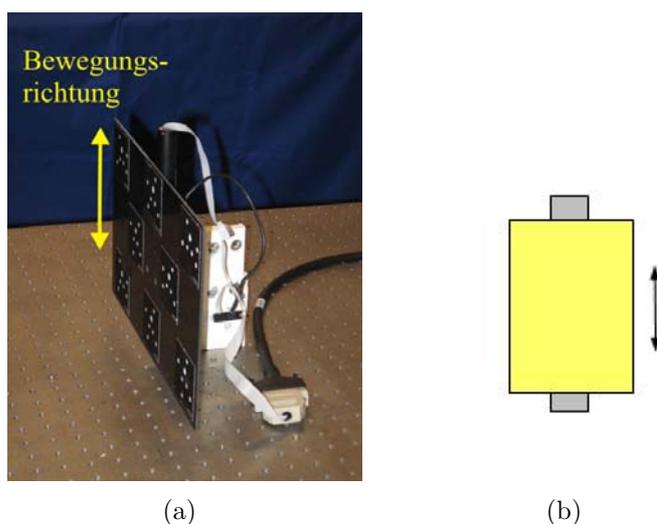


Abbildung 5.1: Fotografie der Lineareinheit, aufgebaut für eine vertikale Verschiebung mit einem Adapter [5.1a], und dazugehörige Systemskizze [5.1b]

### 5.2.2.1 Gegenüberstellung verschiedener Messaufbauten

Die Aufbauvarianten der Lineareinheit und der Onlinemesssysteme sind bei der Distanzüberprüfung umfangreicher als bei der Winkelmessung. Genau wie dort gibt es auch hier wieder die Unterscheidung zwischen dem zentrischen und dem exzentrischen Aufbau, wie sie in Abbildung 4.3 auf Seite 37 bereits aufgeführt sind. Zusätzlich gibt es insgesamt drei unterschiedliche Verschieberichtungen, die getestet werden. Aus diesem Grund wird die Lineareinheit relativ zu den Onlinemesssystemen auf unterschiedliche Arten aufgebaut. Die verschiedenen Aufbauvarianten werden durch unterschiedliche Befestigungen des Adapters an der Lineareinheit realisiert, welche im Folgenden nacheinander erläutert werden. Die erste Verschieberichtung ist die Vertikale. Dazu muss

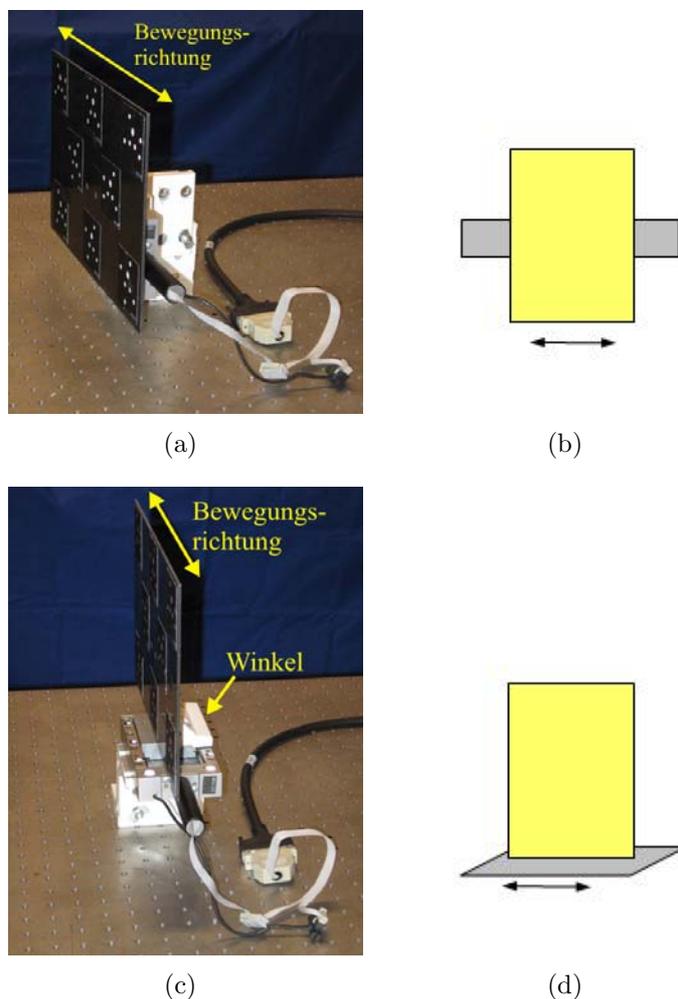


Abbildung 5.2: Fotografie der Lineareinheit, aufgebaut für eine horizontale Verschiebung parallel zur Bildebene beziehungsweise zur Basis mit einem Adapter [Variante 1: 5.2a und Variante 2: 5.2c], und dazugehörige Systemskizzen [Variante 1: 5.2b und Variante 2: 5.2d]

die Lineareinheit vertikal auf einer Unterkonstruktion aufgebaut werden. An dem beweglichen Bauteil der Lineareinheit befinden sich zwei Gewinde, die zur Montage der

Adapter dienen. Im Falle der vertikalen Verschiebung kann der Adapter direkt an der Lineareinheit befestigt werden. Das Foto 5.1a zeigt den Aufbau der Lineareinheit mit Adapter für eine vertikale Verschiebung. Aus diesem Aufbau leitet sich die daneben stehende Systemskizze 5.1b ab. Diese Verschieberichtung wird im Folgenden als „vertikal“ bezeichnet.

Mittels der beiden folgenden Aufbauten können horizontale Verschiebungen realisiert werden, die sich parallel zur Bildebene (WHEELWATCH) beziehungsweise parallel zur Basis (MOVEINSPECT) bewegen. Diese Bewegungsrichtung wird innerhalb der weiteren Arbeit kurz als „horizontal“ bezeichnet. Die erste Aufbauvariante ist vergleichbar mit dem gerade vorgestellten Aufbau für die vertikale Bewegung. Im Unterschied zu diesem ist die Lineareinheit um  $90^\circ$  gedreht an der Unterkonstruktion angebracht. Dadurch bewegt sich die Verschiebeeinheit dann horizontal, obwohl die Lineareinheit an sich weiterhin vertikal an der Unterkonstruktion befestigt ist (s. Abbildung 5.2a bzw. 5.2b). Der Adapter ist wiederum direkt an der Einheit fest gemacht.

Die zweite Variante stellt Abbildung 5.2c mit der dazugehörigen Systemskizze 5.2d dar. Wie dieser Abbildung zu entnehmen ist, liegt die Lineareinheit nun horizontal auf der Unterkonstruktion auf. Mit Hilfe eines Winkels kann der Adapter trotzdem vertikal auf der Lineareinheit angebracht werden. Da beide Aufbauvarianten die gleiche Verschiebung realisieren, kann der Benutzer sich aussuchen, welche der Varianten er für eine Messung aufbauen möchte.

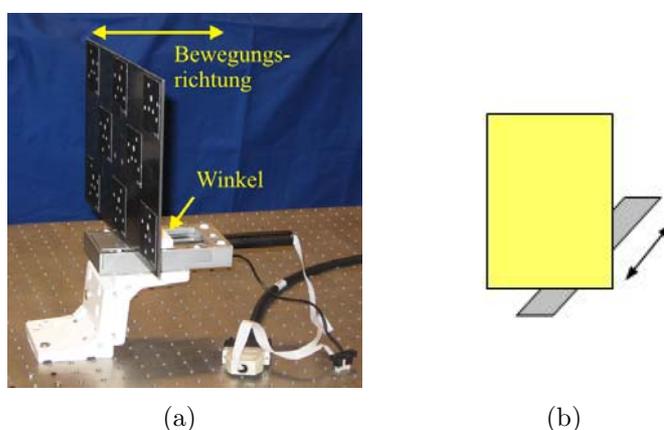


Abbildung 5.3: Photographie der Lineareinheit, aufgebaut für eine horizontale Verschiebung in Aufnahme­richtung der Kamerasysteme mit einem Adapter [5.3a], und dazugehörige Systemskizze [5.3b]

Die letzte translatorische Überprüfung ist ebenfalls eine horizontale Bewegung, allerdings nun in Aufnahme­richtung der Kameras. Dafür kann im Grundprinzip der letzte Aufbau herangezogen werden. Der Adapter inklusive des Winkels werden um  $90^\circ$  gedreht auf der Lineareinheit angebracht, so dass die gewünschte Bewegung zu realisieren ist. Die Abbildung 5.3a zeigt diesen Aufbau, aus der die Systemskizze 5.3b konstruiert ist. Diese Verschieberichtung wird im Folgenden als Bewegung „in Aufnahme­richtung“ tituliert.

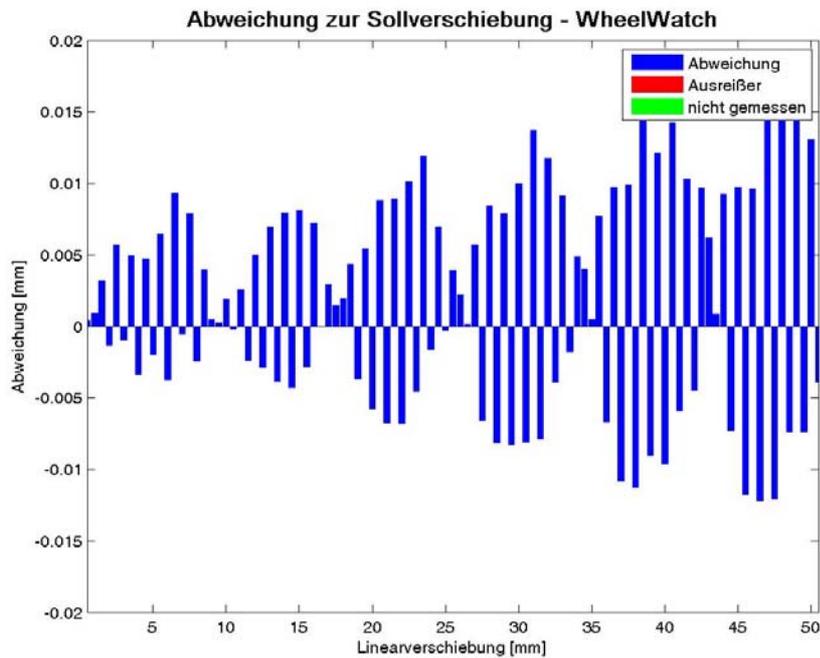
Diese drei Bewegungsrichtungen werden nun jeweils in zentrischer und exzentrischer relativer Position der Lineareinheit zu den Onlinemesssystemen aufgebaut und anschließend ausgewertet. Damit ergeben sich insgesamt sechs Messreihen, die jeweils für das System WHEELWATCH und MOVEINSPECT durchgeführt werden.

**Messdurchführung.** Die Messdurchführung zur Überprüfung des Einflusses der verschiedenen Aufbauvarianten ist identisch zu der Messdurchführung des gleichen Einflusses bei der Winkelüberprüfung (s. Abschnitt 4.3.2.1). Der Unterschied besteht lediglich darin, dass der Controller diesmal die Lineareinheit steuert und nicht den Drehtisch. Außerdem werden die exzentrischen und zentrischen Aufbauten jeweils für die drei im letzten Abschnitt vorgestellten Bewegungsrichtungen überprüft. Dies führt zu den insgesamt 12 Messreihen, die in der Tabelle 5.1 aufgeführt sind.

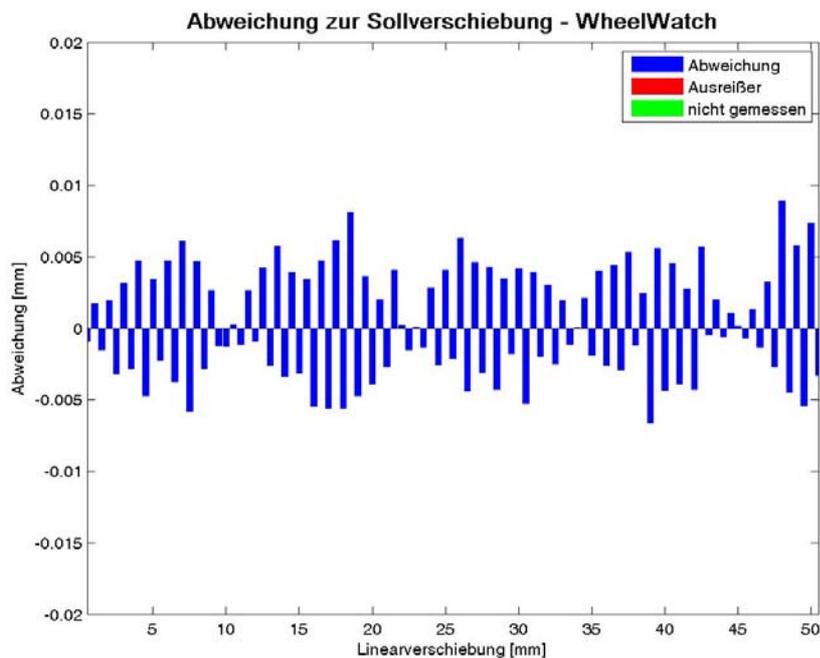
<b>Für alle nachfolgenden Messungen gilt:</b>			
Art der Messung:	statisch		
Fokussierung:	800mm		
Bildfrequenz:	50Hz		
Wiederholungsmessungen:	20		
Sollverschiebung:	0,5mm		
Messreihe	Messsystem	Adapterposition	Bewegungsrichtung
WW_6	WHEELWATCH	zentrisch	vertikal
WW_7	WHEELWATCH	exzentrisch	vertikal
WW_8	WHEELWATCH	zentrisch	horizontal
WW_9	WHEELWATCH	exzentrisch	horizontal
WW_10	WHEELWATCH	zentrisch	in Aufnahmerichtung
WW_11	WHEELWATCH	exzentrisch	in Aufnahmerichtung
MI_6	MOVEINSPECT	zentrisch	vertikal
MI_7	MOVEINSPECT	exzentrisch	vertikal
MI_8	MOVEINSPECT	zentrisch	horizontal
MI_9	MOVEINSPECT	exzentrisch	horizontal
MI_10	MOVEINSPECT	zentrisch	in Aufnahmerichtung
MI_11	MOVEINSPECT	exzentrisch	in Aufnahmerichtung

Tabelle 5.1: Parametereinstellungen der Onlinemesssysteme und der Linearverschiebeeinheit für die Vergleichsmessungen des zentrischen und exzentrischen Messaufbaus

**Auswertung des Systems WHEELWATCH.** Im Folgenden werden die Messungen des Systems WHEELWATCH ausgewertet, die zur Überprüfung der verschiedenen Aufbauvarianten durchgeführt werden. Als erstes erfolgt die Auswertung der zentrischen und exzentrischen Messreihe, in denen die Lineareinheit vertikal von unten nach oben verschoben wird. Die Abbildung 5.4 zeigt die Abweichungen dieser beiden Messreihen zur Sollverschiebung von 0,5mm zwischen zwei aufeinander folgenden Messpositionen.



(a) Zentrischer Aufbau



(b) Exzentrischer Aufbau

Abbildung 5.4: Vergleich des zentrischen und exzentrischen Aufbaus des Systems WHEELWATCH bei einer Distanzmessung in vertikaler Richtung

Diese Abweichungen weisen einen deutlichen systematischen Einfluss auf. Zum einen folgt auf eine positive Abweichung immer eine etwa gleich große negative Abweichung. Zum anderen ist in dem gemessenen Bereich eine Schwingung in den ermittelten Distanzen zu erkennen. Bei dem zentrischen Aufbau vergrößert sich die Amplitude dieser Schwingung, je weiter der Adapter auf der Lineareinheit nach oben verschoben wird. Die maximale Abweichung liegt bei dieser Messreihe bei  $16\mu\text{m}$ . Im Gegensatz dazu verändert sich die Amplitude bei der exzentrischen Messreihe nicht. Sie bleibt konstant etwas unter  $10\mu\text{m}$ . Die Länge dieser Schwingungen variiert ebenfalls leicht zwischen ca. 8mm (zentrischer Aufbau) und 11mm (exzentrischer Aufbau). Neben den systematischen Effekten fällt auf, dass die exzentrische Messung kleinere Abweichungen aufzeigt als die zentrische. Mit diesen Abweichungen ergeben sich für diese zwei Messreihen mit WHEELWATCH eine Standardabweichung von  $10\mu\text{m}$  für den zentrischen Aufbau beziehungsweise  $5\mu\text{m}$  für den exzentrischen. Diese Größenordnung der Standardabweichung liegt deutlich unterhalb der zuvor ermittelten Messgenauigkeit der Distanzen des Messsystems von  $33\mu\text{m}$  und ist somit nicht signifikant. Im Hinblick auf eine Verbesserung des Systems, wird diese Systematik trotzdem mit zwei weiteren Messungen näher betrachtet.

Der Wechsel von positiven und negativen Abweichungen lässt vermuten, dass hier zwei überlagerte Schwingungen vorliegen. Mit einer weiteren zentrischen Messung mit kleineren Distanzen von 0,05mm bei ansonsten gleichbleibenden Einstellungen wird dies bestätigt. Außerdem zeigt eine Messung in einem näheren Abstand von 400mm zur Kamera, dass der systematische Einfluss hier geringer ist. Das Ergebnis dieser beiden zusätzlichen Messungen liegen im Anhang A.7 vor.

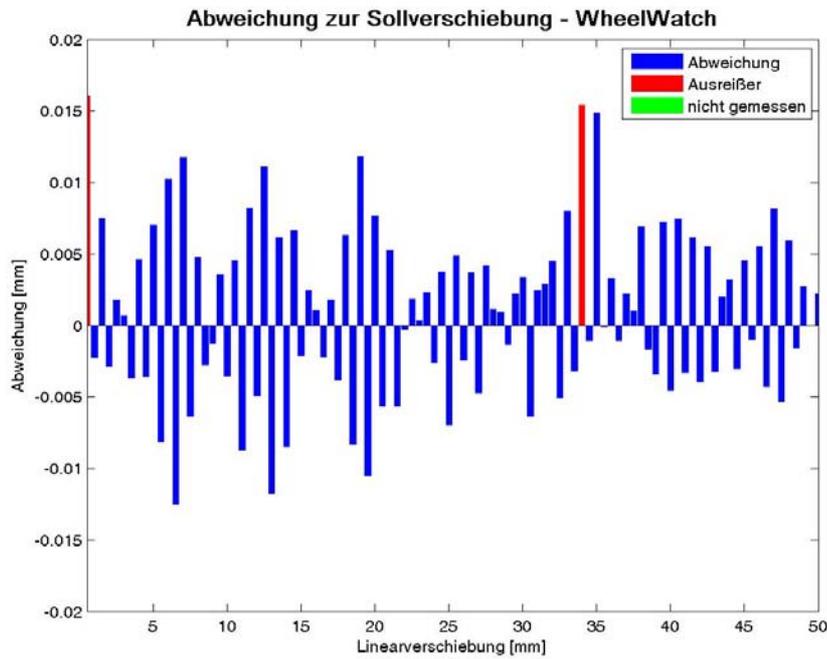
Aus diesen Beobachtungen lässt sich eine mögliche Erklärung für die beobachteten Effekte aufführen. Der Grund könnte in der Abbildung der Anco-Marken auf dem CCD-Chip und der daraus resultierenden Bestimmung der Bildkoordinaten liegen. Die Pixel auf dem CCD-Chip sind in einem Raster angeordnet. Zu jedem Pixel gehört ein lichtempfindliches Sensorelement, das nicht die ganze Fläche des Pixels einnimmt. Bei der Aufnahme eines Bildes, bestimmen die einfallenden Photonen auf das Sensorelement die Intensität des ganzen Pixels. Dadurch wird der Zwischenraum zwischen den Sensorelementen im Abbildungsprozess nicht berücksichtigt. Die Genauigkeit, mit der die Ränder der retroreflektierenden Punkte abgebildet werden, hängt somit von der Größe dieses Zwischenraums ab. Zur Bestimmung der Bildkoordinaten werden mit Hilfe des Sobelfilters die Kanten der abgebildeten Punkte detektiert und die dazwischen liegende Fläche gefüllt. Die Bildkoordinate berechnet sich dann aus dem Schwerpunkt dieser Fläche. Je nachdem, ob sich das Bild der Punktränder auf den Sensorelementen oder in den Zwischenräumen befindet, kann sich die ermittelte Bildkoordinate verändern und somit eine Schwingung in den Abweichungen des Soll-Ist-Vergleichs hervorrufen. Die Ungenauigkeit der Bildkoordinate und die Anzahl der Pixel, aus denen ein abgebildeter Punkt besteht, hängen unmittelbar voneinander ab. Aufgrund des Mittelungsprozesses, der bei der Berechnung der Bildkoordinate vorgenommen wird, verringert sich die Unsicherheit der Bildkoordinate mit zunehmender Zahl an Pixeln, aus denen sich ein abgebildeter Punkt zusammensetzt. Je größer diese Anzahl an Pixeln für einen Punkt ist, desto geringer ist der Einfluss eines einzelnen Pixels auf die Bildkoordinate. Dies

stimmt mit der Beobachtung überein, dass der systematische Einfluss mit einer kürzeren Entfernung des Objekts zur Kamera abnimmt.

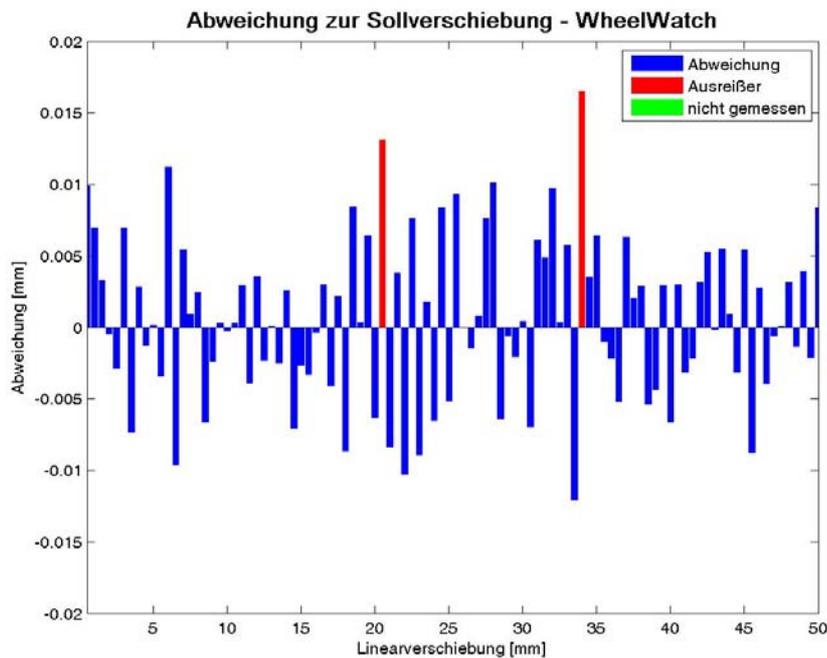
Ob diese Ursache hier genau zu Grunde liegt, muss über weitere Untersuchungen analysiert werden. Diese Analyse ist jedoch nicht Gegenstand dieser Arbeit.

Die nächste Betrachtung findet in Hinblick auf die horizontale Verschiebung der Lineareinheit parallel zur Bildebene der Kamera statt. Die Sollverschiebung der beiden Aufbauvarianten zwischen dem zentrischen und exzentrischen Aufbau liegt wiederum bei 0,5mm. Die Graphik 5.5 des Soll-Ist-Vergleichs zeigt, dass auch in dieser Richtung eine Schwingung erkennbar ist. Im Gegensatz zu der zuvor überprüften vertikalen Verschieberichtung, ist die Schwingung durch zufällige Einflüsse undeutlicher. Vor allem im exzentrischen Aufbau besitzen die Abweichungen kaum noch einen systematischen Verlauf. Deshalb ist es bei dem exzentrischen Aufbau schwierig eine Periodendauer festzulegen. Für die zentrische Messung beträgt die Periode der Schwingung etwa 7mm und die Amplitudengröße liegt bei durchschnittlich  $12\mu\text{m}$ . Bei beiden Messreihen können jeweils zwei Ausreißer detektiert werden, die bis ca.  $16\mu\text{m}$  von den Sollverschiebungen abweichen. Die restlichen Differenzen liegen bei dem zentrischen Aufbau bei maximal  $15\mu\text{m}$  und bei dem exzentrischen bei  $12\mu\text{m}$ . Die Distanzen können mit einer Standardabweichung von  $8\mu\text{m}$  (zentrischer Aufbau) bzw.  $7\mu\text{m}$  (exzentrischer Aufbau) bestimmt werden. Die möglichen Ursachen für die beobachteten Schwingungen sind die gleichen, wie die oben bereits erläuterten. Im Vergleich beider Aufbauvarianten wird deutlich, dass der systematische Einfluss nicht nur von der Entfernung zum Objekt sondern auch von der Richtung der Distanzmessung abhängt. Dies liegt daran, dass die Veränderung der abgebildeten Punkte zwischen zwei Bilder je nach Bewegungsrichtung unterschiedlich ist. Die Sensorelemente des CCD-Chips sind nicht quadratisch angeordnet, so dass der Einfluss in einer Koordinatenrichtung größer ist. Somit wird die mögliche Erklärung durch diese Messungen nicht widerlegt.

Die letzte Überprüfung des Systems WHEELWATCH in Verbindung mit den unterschiedlichen Aufbauvarianten der Lineareinheit ist die Veränderung der Strecken in Aufnahme­richtung der Kamera. Die Ergebnisse dieser Messreihen zeigen (s. Abbildung 5.6), dass hier kein systematischer Einfluss beobachtet werden kann. Die Differenzen des Soll-Ist-Vergleichs variieren beim exzentrischen Aufbau stärker als beim zentrischen. Der zentrische Aufbau weist keine Ausreißer auf und die maximale Abweichung zum Sollwert liegt bei  $12\mu\text{m}$  mit einer ermittelten Standardabweichung von  $\hat{\sigma}_D = 6\mu\text{m}$ . Auf der anderen Seite können drei Ausreißer von bis zu  $27\mu\text{m}$  bei dem exzentrischen Aufbau detektiert werden. Die restlichen Abweichungen des Soll-Ist-Vergleichs liegen bei  $17\mu\text{m}$  mit  $\hat{\sigma}_D = 9\mu\text{m}$ . Die Tatsache, dass bei diesen Messreihen keine Schwingungen mehr erkennbar sind, liegt an der Bewegungsrichtung der Lineareinheit. Generell kann die Koordinate, die in Aufnahme­richtung der Kamera liegt am schlechtesten bestimmt werden. Dies liegt an der Aufnahmegeometrie, da die Koordinaten, die parallel zur Bildebene verlaufen mit dem zweidimensionalen CCD-Chip besser bestimmt werden können als die dritte Dimension, welche in Aufnahme­richtung der Kamera verläuft. Die größere Unsicherheit dieser Komponente ist der Grund dafür, dass die gleichmäßige Schwingung in Aufnahme­richtung der Kamera nicht mehr erkannt werden kann. Da

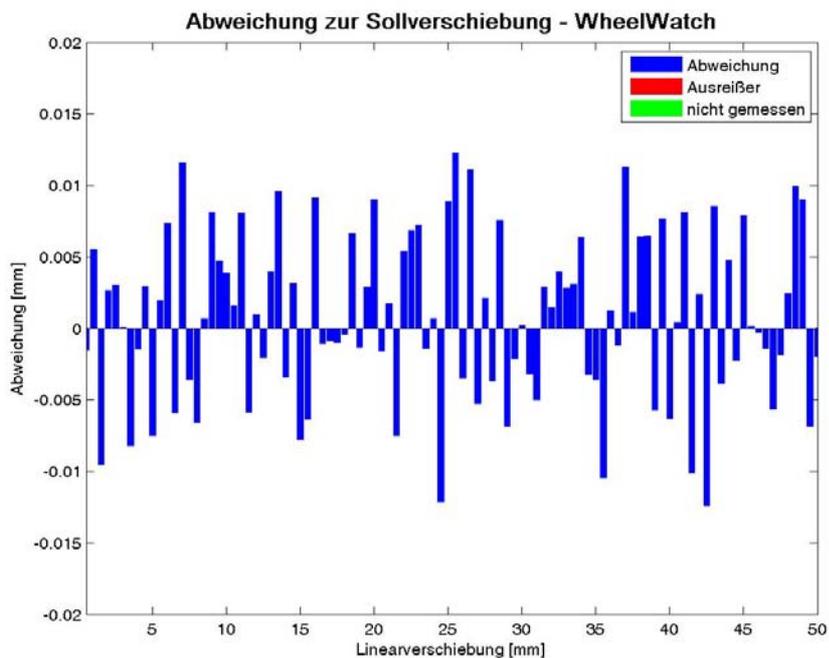


(a) Zentrischer Aufbau

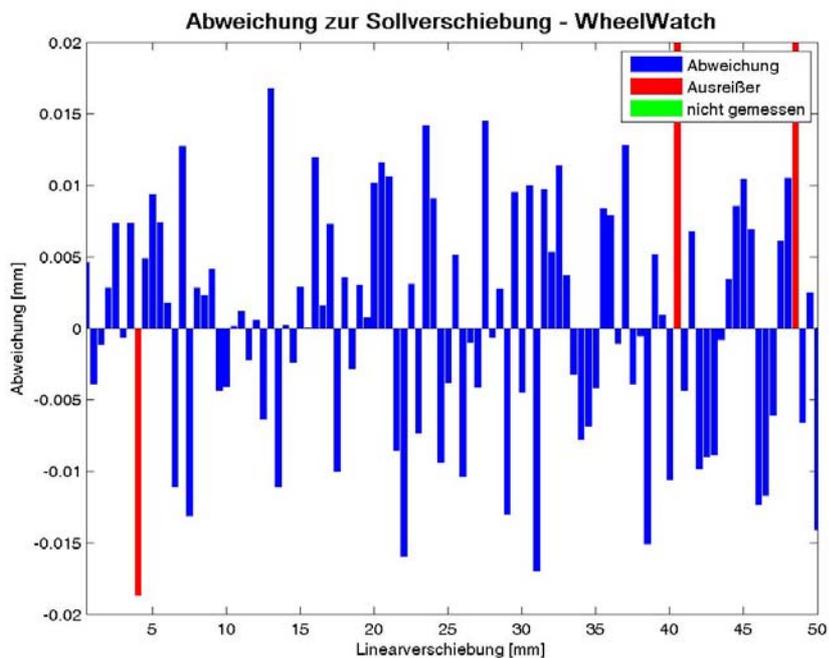


(b) Exzentrischer Aufbau

Abbildung 5.5: Vergleich des zentrischen und exzentrischen Aufbaus des System WHEELWATCH bei einer Distanzmessung in horizontaler Richtung parallel zur Bildebene der Kamera



(a) Zentrischer Aufbau



(b) Exzentrischer Aufbau

Abbildung 5.6: Vergleich des zentrischen und exzentrischen Aufbaus des System WHEELWATCH bei einer Distanzmessung in Aufnahme­richtung der Kameras

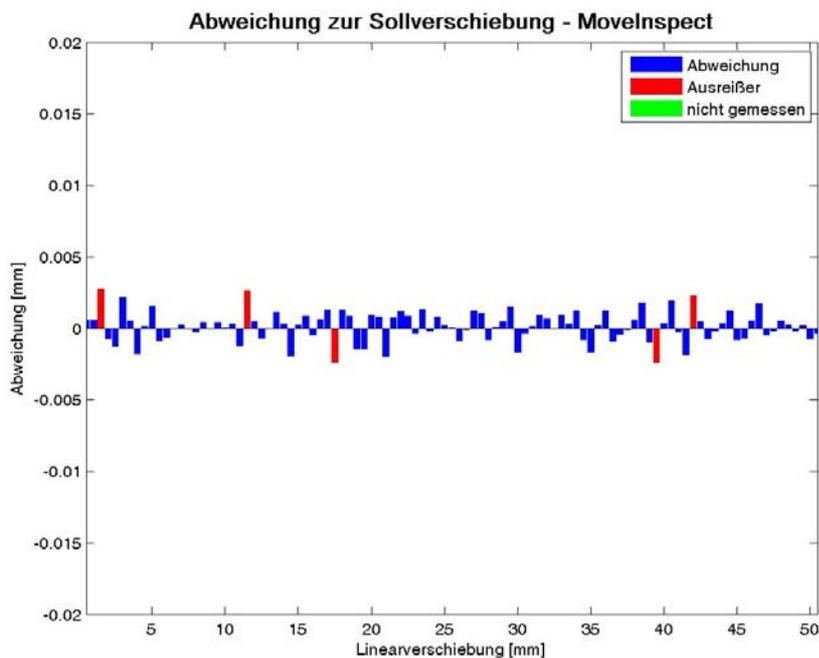
diese Bewegungsrichtung diejenige mit der größten Unsicherheit ist, werden die folgenden Messreihen mit WHEELWATCH nur noch in Aufnahme­richtung der Kameras bei einem zentrischen Aufbau durchgeführt.

Für alle bisher ausgewerteten Messreihen zeigt sich kein signifikanter Unterschied zwischen Mittelwert und Median. Zu der vorgegebenen Sollverschiebung weichen diese ebenfalls um maximal  $2\mu\text{m}$  ab. Dies trifft auch auf alle weiteren Messreihen zu, die in diesem Kapitel mit dem System WHEELWATCH vorgestellt werden. Aus diesem Grund werden im Folgenden die Ergebnisse der Mittelwerte und der berechneten Mediane nicht mehr explizit erwähnt. Im Anhang A.7 befindet sich die Tabelle A.7, in der alle Kenngrößen der hier verwendeten Messreihen aufgelistet sind.

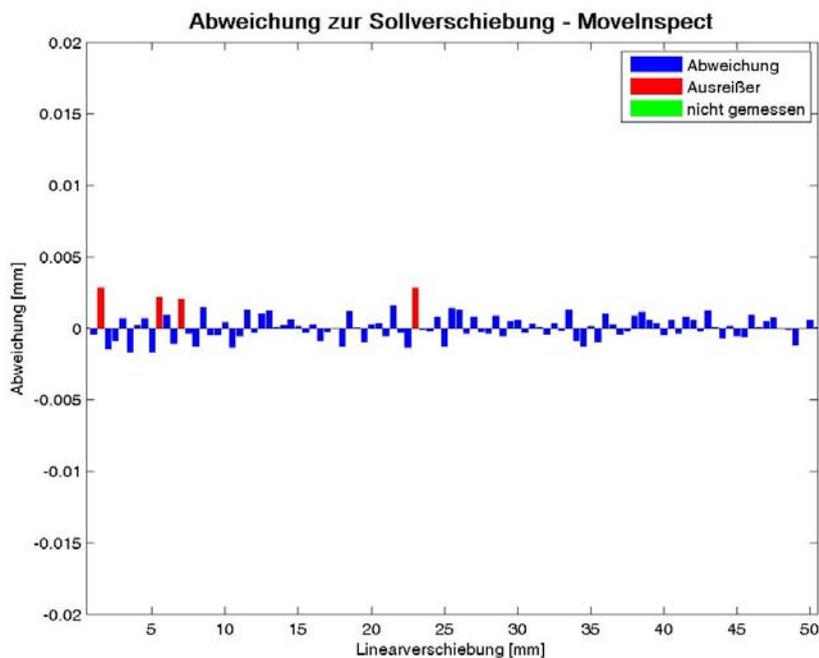
**Auswertung des Systems MOVEINSPECT.** Die Auswertung der Messungen mit MOVEINSPECT beginnt mit dem Vergleich der Aufnahmegeometrie bei Bewegungsänderungen in vertikaler Richtung. Die Abbildung 5.7 zeigt, dass zwischen dem zentrischen und exzentrischen Aufbau bei MOVEINSPECT kein signifikanter Unterschied zu erkennen ist. Beide Ergebnisse liefern vier (zentrischer Aufbau) beziehungsweise fünf Ausreißer (exzentrischer Aufbau), die maximal um  $3\mu\text{m}$  von den Sollverschiebungen abweichen. Bei dieser Größenordnung kann eigentlich nicht von Ausreißern gesprochen werden. Der Ausreißertest wird bei diesen Messreihen mit der empirischen Standardabweichung durchgeführt, die für diese Messreihen bei  $1\mu\text{m}$  liegen. Deshalb werden diese Abweichungen als Ausreißer detektiert. Die restlichen Messwerte liefern Abweichungen von maximal  $2\mu\text{m}$  bei dem zentrischen und exzentrischen Aufbau. Diese minimalen Abweichungen können mit einer Standardabweichung von  $1\mu\text{m}$  für beide Aufbauvarianten angegeben werden.

Etwas schlechtere Messergebnisse liefert die Überprüfung der Distanzmessung parallel zur Basis des Systems MOVEINSPECT. Bei der zentrischen Messung konnte die Auswertung drei Ausreißer detektieren, die eine Abweichung von maximal  $12\mu\text{m}$  von der Sollverschiebung aufweisen. Alle anderen Messungen dieser Messreihe weichen weniger als  $6\mu\text{m}$  mit einer Standardabweichung von  $3\mu\text{m}$  vom Sollwert ab (s. Abbildung 5.8a). Der exzentrische Aufbau liefert Messergebnisse, die von der Sollverschiebung von  $0,5\text{mm}$  um weniger als  $10\mu\text{m}$  abweichen (s. Abbildung 5.8b). Die fünf Ausreißer besitzen eine Größenordnung von  $9\mu\text{m}$  Abweichung zu den Sollwerten und die restlichen Messwerte sogar von nur  $5\mu\text{m}$ . Die Standardabweichung für diese Messreihe liegt bei  $2\mu\text{m}$ .

Der letzte Vergleich zwischen dem exzentrischen und zentrischen Aufbau bewertet die ermittelten Distanzen in Aufnahme­richtung des Onlinemesssystems. Hier können die Distanzen im Verhältnis zu den anderen Bewegungsrichtungen in der gleichen Größenordnung bestimmt werden. Dies zeigt sich auch in den Abweichungen der Graphiken 5.9. Diese weichen, abgesehen von zwei Ausreißern, bis zu  $6\mu\text{m}$  beim zentrischen Aufbau ab. Der exzentrische Aufbau differiert bis zu  $8\mu\text{m}$  von den Sollwerten. Die Standardabweichung liegt bei beiden Messreihen bei  $4\mu\text{m}$ . Mit diesen Angaben liegen die Messreihen bei den verschiedenen Bewegungsrichtungen und den unterschiedlichen Aufnahmegeometrien im Genauigkeitsbereich der zuvor ermittelten a priori Angabe von  $5\mu\text{m}$ .

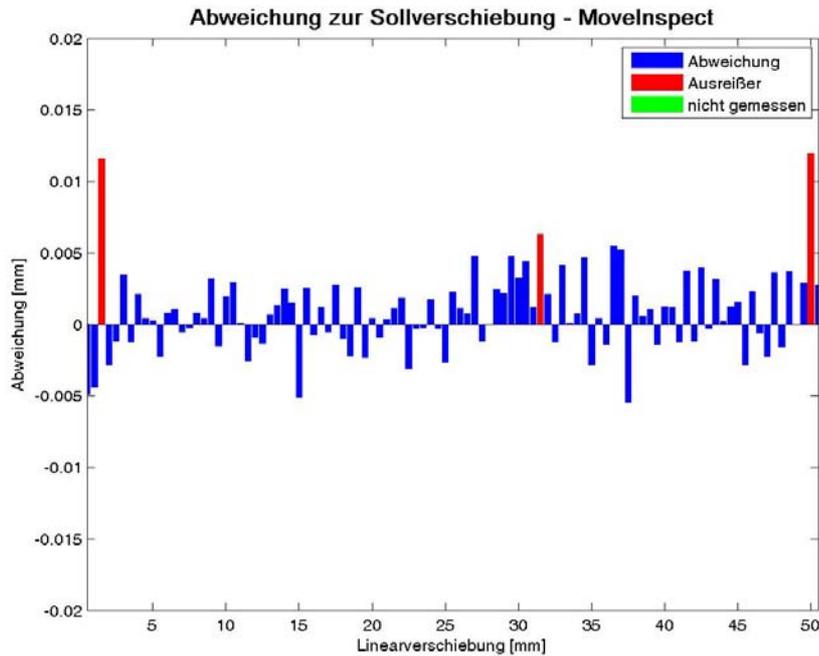


(a) Zentrischer Aufbau

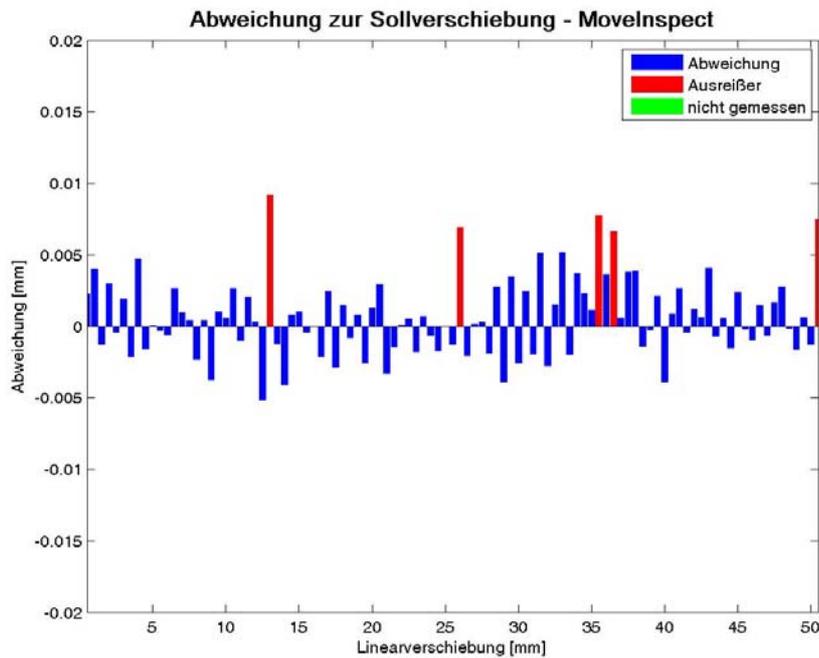


(b) Exzentrischer Aufbau

Abbildung 5.7: Vergleich des zentrischen und exzentrischen Aufbaus des System MO-VEINSPECT bei einer Distanzmessung in vertikaler Richtung

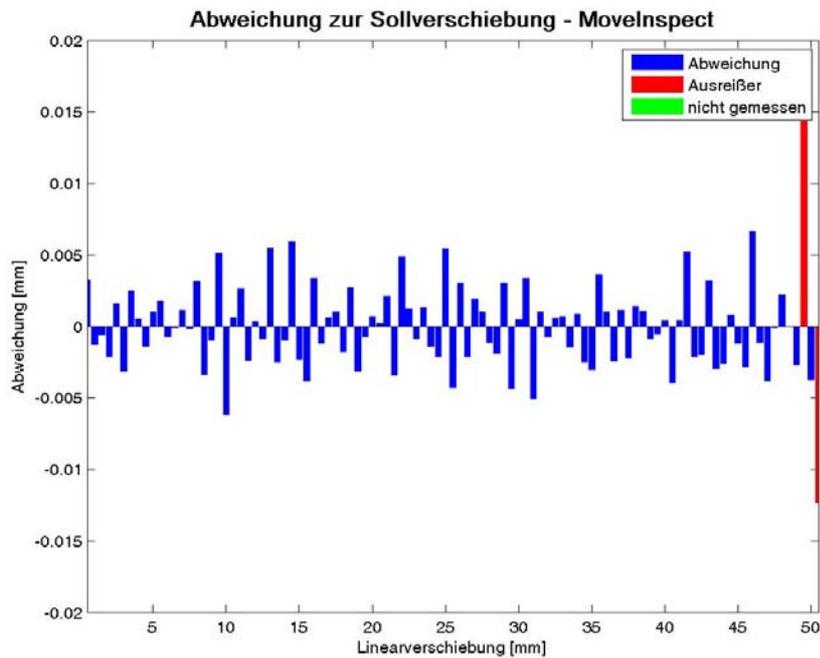


(a) Zentrischer Aufbau

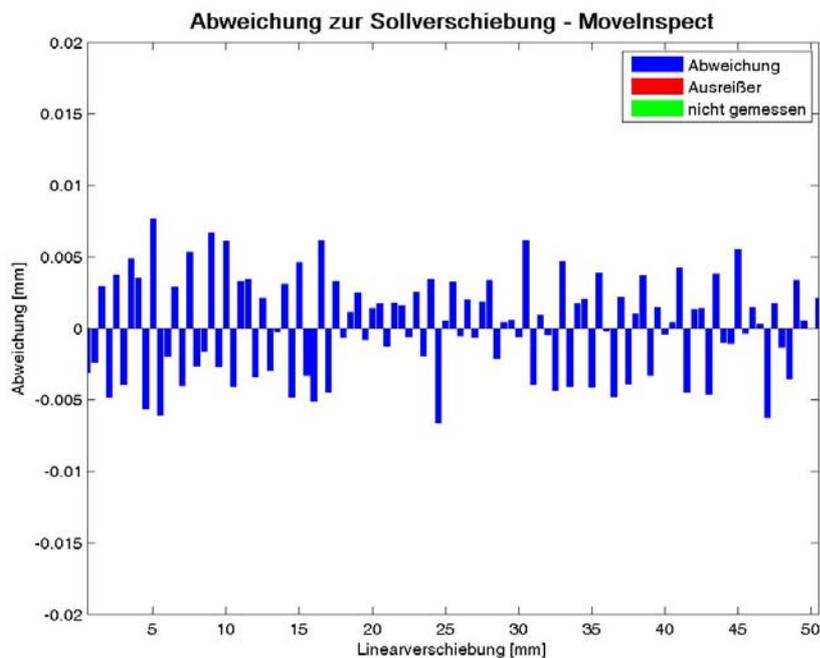


(b) Exzentrischer Aufbau

Abbildung 5.8: Vergleich des zentrischen und exzentrischen Aufbaus des System MOVEINSPECT bei einer Distanzmessung in horizontaler Richtung parallel zur Basis



(a) Zentrischer Aufbau



(b) Exzentrischer Aufbau

Abbildung 5.9: Vergleich des zentrischen und exzentrischen Aufbaus des System MO-VEINSPECT bei einer Distanzmessung in Aufnahme-richtung der Kameras

Die Sollverschiebung von 0,5mm kann von den Messreihen als Mittelwert und Median von dem System MOVEINSPECT bestätigt werden. Die Mittelwerte und der Median weichen um maximal 1 $\mu$ m von dem Sollwert ab. Da auch bei den folgenden Messreihen mit MOVEINSPECT die Auswertung einen Mittelwert und einen Median liefert, die keine größere Abweichung aufweisen, werden diese Ergebnisse auch für MOVEINSPECT lediglich in der Tabelle A.7 des Anhangs dargestellt. In den weiteren Auswertungen dieses Abschnitts finden diese beiden Werte sonst keine weitere Erwähnung. Zusammenfassend kann die Aussage auch bei dem System MOVEINSPECT getroffen werden, dass die Bewegung in Aufnahme­richtung der Kameras am schlechtesten bestimmt werden kann. Außerdem liegt kein signifikanter Unterschied zwischen einer exzentrischen und einer zentrischen Messung vor. Aus diesen Gründen werden auch bei MOVEINSPECT die folgenden Messungen der Distanzüberprüfung in Aufnahme­richtung der Kameras bei einem zentrischen Versuchsaufbau durchgeführt.

### 5.2.2.2 Gegenüberstellung von statischen und kontinuierlichen Messungen

Die Onlinemesssysteme WHEELWATCH und MOVEINSPECT sind von ihrer grundsätzlichen Konzeption dafür ausgelegt kontinuierliche Messreihen aufzunehmen. Eine absolute Überprüfung der Messergebnisse der Systeme mit der Lineareinheit bei kontinuierlichen Messungen ist nur mit einer Synchronisation möglich. Angesichts dessen, dass diese nicht vorliegt, kann bei kontinuierlichen Messreihen lediglich eine Aussage der Differenzen innerhalb einer Messreihe getroffen werden, jedoch kann keine absolute Zuordnung einer Position auf der Lineareinheit mit einer Messung der Onlinemesssysteme erfolgen. Aus diesem Grund werden für den Genauigkeitstest lediglich statische Messreihen herangezogen, da hier die Zuordnung eindeutig möglich ist. In diesem Abschnitt findet die Überprüfung zwischen statischen und kontinuierlichen Messreihen statt, so gut dies ohne Synchronisation möglich ist.

<b>Für alle nachfolgenden Messungen gilt:</b>				
Adapterposition:		zentrisch		
Bewegungsrichtung:		in Aufnahme­richtung		
Fokussierung:		800mm		
Wiederholungsmessungen:		20 (bei statischen Messungen)		
Messreihe	Messsystem	Art der Messung	Bildfrequenz [Hz]	Sollverschiebung [mm]
WW_10	WHEELWATCH	statisch	50	0,5
WW_12	WHEELWATCH	kontinuierlich	1	0,5
MI_10	MOVEINSPECT	statisch	50	0,5
MI_12	MOVEINSPECT	kontinuierlich	1	0,5

Tabelle 5.2: Parametereinstellungen der Onlinemesssysteme und der Linearverschiebe­einheit für den Vergleich zwischen kontinuierlichen und statischen Messreihen

**Messdurchführung.** Die beiden statischen Messreihen WW\_10 und MI\_10 sind die identischen aus dem letzten Abschnitt 5.2.2.1. Dort ist auch die Messdurchführung von diesen beiden Messungen nachzulesen. Für die kontinuierlichen Messreihen muss die Lineareinheit auf die gewünschte Geschwindigkeit eingestellt werden, mit welcher sich die Lineareinheit dann kontinuierlich bewegt. Die Onlinemesssysteme nehmen diese Bewegung dann mit den Parametereinstellungen der Tabelle 5.2 auf. Eine ausführlichere Beschreibung der Durchführung dieser kontinuierlichen Messreihen ist in Abschnitt 4.3.2.2 dargestellt.

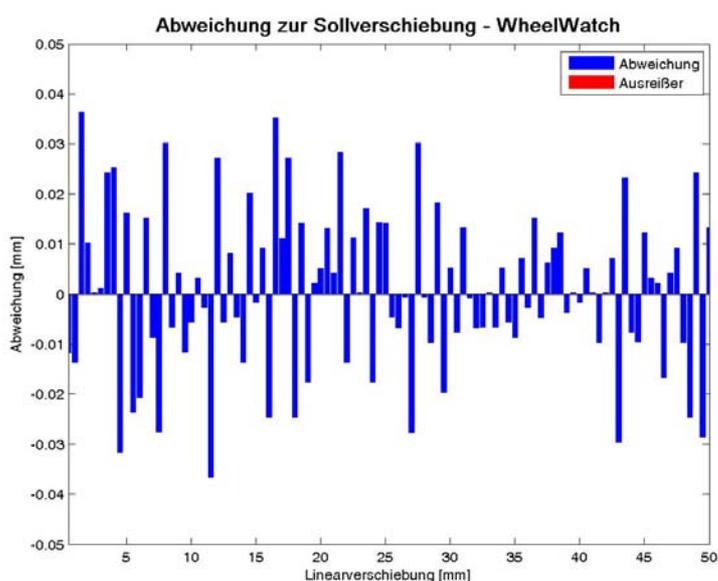


Abbildung 5.10: Kontinuierlichen Distanzmessungen in Aufnahme-richtung der Kamera aufgenommen mit dem System WHEELWATCH

**Auswertung des Systems WHEELWATCH.** Wie bereits im letzten Abschnitt ausführlich erklärt, weichen die Differenzen der Messreihe WW\_10 zu den Sollverschiebungen um maximal  $12\mu\text{m}$  mit einer Standardabweichung von  $6\mu\text{m}$  ab. Die kontinuierliche Messreihe besitzt eine Abweichung, die ungefähr dreimal so hoch ist (maximal  $37\mu\text{m}$ ). Diese größeren Abweichungen führen auch zu einer schlechteren Standardabweichung von  $19\mu\text{m}$ . Eine Schwingung, die bei den statischen Messreihen bei einer vertikalen und horizontalen Bewegung beobachtet werden konnte, ist hier wie bei der korrespondierenden statischen Messung in Aufnahme-richtung ebenfalls nicht erkennbar.

Das Ergebnis der Auswertung dieser beiden Messreihen zeigt, dass das System WHEELWATCH bei statischen Messreihen die Sollverschiebungen genauer bestimmen kann, als bei einer kontinuierlichen. Dies liegt vor allem daran, dass bei der statischen Messung an jeder Position 20 Wiederholungsmessungen durchgeführt und in der Auswertung gemittelt werden. Um noch weitere Aussagen in Bezug zur Aufnahmegeometrie und den verschiedenen Bewegungsrichtungen bei kontinuierlichen Messungen zu treffen, müssten noch weitere Messreihen miteinander in Beziehung gesetzt werden. Hierbei ist es

sinnvoll, eine eindeutige Zuordnung der Messwerte zwischen den beteiligten Systemen zu garantieren. Dies liegt aufgrund einer fehlenden Synchronisation jedoch nicht vor. Deshalb wird auf weitere kontinuierliche Messungen verzichtet.

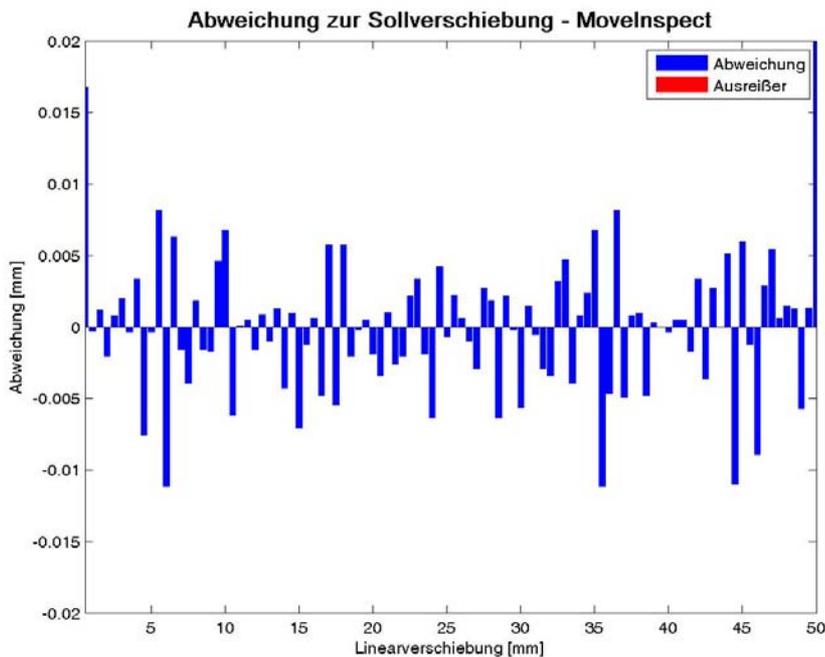


Abbildung 5.11: Kontinuierlichen Distanzmessungen in Aufnahme­richtung der Kamera aufgenommen mit dem System MOVEINSPECT

**Auswertung des Systems MOVEINSPECT.** Das System MOVEINSPECT weist geringere Unterschiede zwischen einer statischen und einer kontinuierlichen Messreihe auf als das System WHEELWATCH. Die maximalen Abweichungen bei der kontinuierlichen Messreihe mit MOVEINSPECT sind mit  $24\mu\text{m}$  nur um den Faktor zwei schlechter als die statische (s. Auswertung der Messreihe ML10 in Abschnitt 5.2.2.1). Dies gilt auch für die Standardabweichung der beiden Messreihen. Diese ist bei der statischen Messreihe mit  $\hat{\sigma}_D = 4\mu\text{m}$  ebenfalls um etwa den Faktor zwei besser als die der kontinuierlichen von  $6\mu\text{m}$ . Aus den gleichen Gründen wie bei dem System WHEELWATCH werden auch hier ohne Synchronisation keine weiteren Aussagen über den Unterschied zwischen statischen und kontinuierlichen Messreihen getroffen.

### 5.2.2.3 Einfluss der Bildfrequenz

Die Onlinemesssysteme WHEELWATCH und MOVEINSPECT sind beide in der Lage mit einer Frequenz von bis zu 490Hz Bilder aufzunehmen. MOVEINSPECT besitzt bei einer Reduktion der Auflösung sogar die Möglichkeit einer Aufnahme­frequenz von bis zu 1000Hz. In diesem Abschnitt wird getestet, welchen Einfluss die eingestellte Bildfrequenz auf die Genauigkeit der Distanzmessung besitzt. Zu diesem Zweck werden meh-

rere Messreihen aufgenommen, um möglichst unterschiedliche Frequenzen miteinander in Beziehung setzen zu können. Die Ergebnisse werden in diesem Abschnitt beispielhaft an insgesamt vier Messreihen vorgestellt.

<b>Für alle nachfolgenden Messungen gilt:</b>		
Art der Messung:	statisch	
Adapterposition:	zentrisch	
Bewegungsrichtung:	in Aufnahme-richtung	
Fokussierung:	800mm	
Wiederholungsmessungen:	10	
Sollverschiebung:	0,1mm	
Messreihe	Messsystem	Bildfrequenz [Hz]
WW_10	WHEELWATCH	50
WW_13	WHEELWATCH	1
MI_10	MOVEINSPECT	50
MI_13	MOVEINSPECT	1

Tabelle 5.3: Parametereinstellungen der Onlinemesssysteme und der Linearverschiebe-  
einheit für die Überprüfung des Einflusses der Bildfrequenz

**Messdurchführung.** Zur Überprüfung des Einflusses der Bildfrequenz auf die Genauigkeit der Distanzen werden pro Onlinemesssystem zwei Messreihen miteinander in Beziehung gesetzt. Die Bildfrequenzen variieren hierbei zwischen 1Hz und 50Hz. Die Messreihen mit der Bildfrequenz von 50Hz werden bereits in Abschnitt 5.2.2.1 vorgestellt und ausgewertet. Die Parametereinstellungen dieser beiden Messreihen und der neu aufgenommenen sind noch einmal in der Tabelle 5.3 aufgeführt. Die Durchführung der Messreihen an sich wurde bereits in den letzten Abschnitten mehrfach erläutert, so dass hier nicht weiter darauf eingegangen wird.

**Auswertung des Systems WHEELWATCH.** Der Vergleich der beiden Messreihen zeigt, dass die Abweichungen zu den Sollverschiebungen mit beiden Bildfrequenzen im gleichen Größenbereich streuen. Dies spiegelt sich auch in den Standardabweichungen wider, die sich nur um  $1\mu\text{m}$  voneinander unterscheiden. Die maximalen Abweichungen liegen bei der Messung mit 50Hz bei  $12\mu\text{m}$  mit  $\hat{\sigma}_D = 6\mu\text{m}$  und bei der zweiten Messreihe (1Hz) bei  $15\mu\text{m}$  mit  $\hat{\sigma}_D = 8\mu\text{m}$ . Ein Unterschied besteht jedoch zwischen den beiden Messreihen (s. Abbildung 5.12). Die Messung mit einer Frequenz von 1Hz weist vier Ausreißer auf, die bis zu  $26\mu\text{m}$  vom Sollwert abweichen. Diese Ausreißer kommen bei allen Bildfrequenzen vor und sind nicht von einer bestimmten Aufnahme-  
frequenz abhängig. Aus diesem Grund beeinflusst die Wahl der Bildfrequenz das Messergebnis nicht.

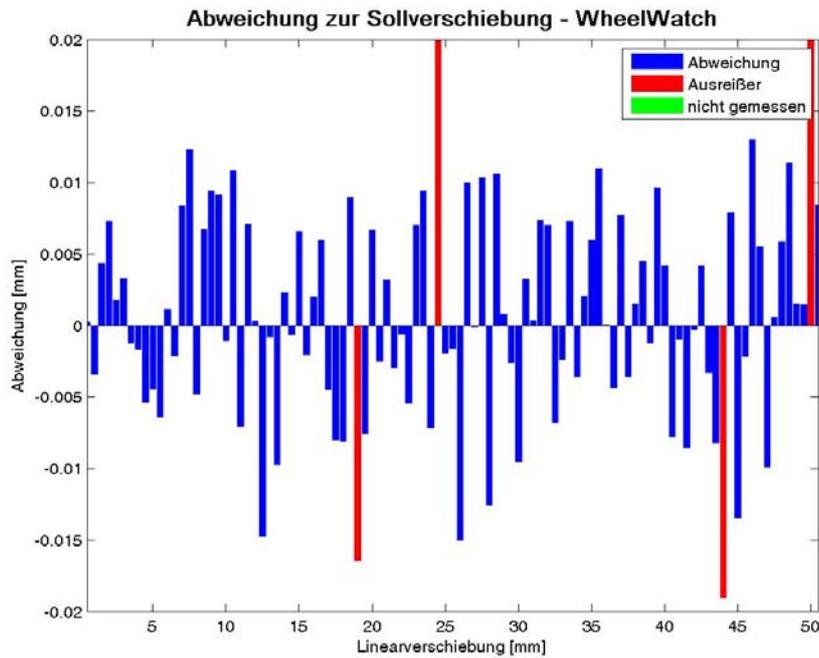


Abbildung 5.12: Distanzmessungen in Aufnahme­richtung aufgenommen mit dem System WHEELWATCH mit einer Bildfrequenz von 1Hz

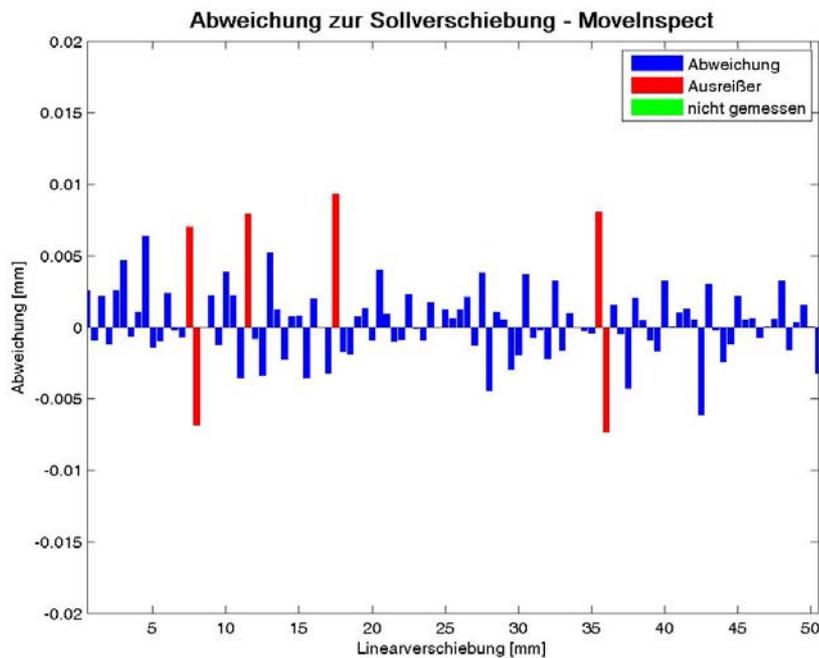


Abbildung 5.13: Distanzmessungen in Aufnahme­richtung aufgenommen mit dem System MOVEINSPECT mit einer Bildfrequenz von 1Hz

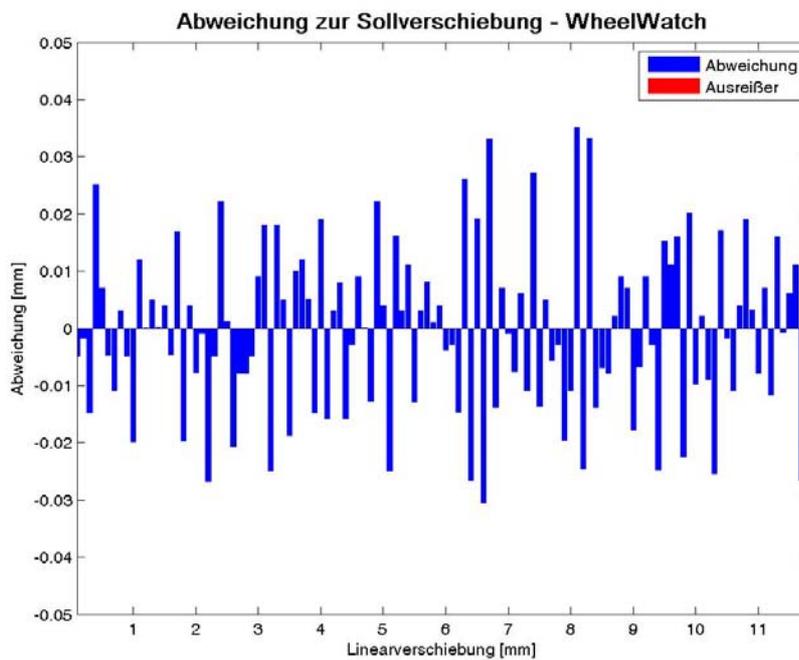
**Auswertung des Systems MOVEINSPECT.** Für den Vergleich des Einflusses von unterschiedlichen Bildfrequenzen stehen bei dem System MOVEINSPECT die beiden in Abbildung 5.13 aufgeführten Messreihen zur Verfügung. Diese beiden Graphiken der Abweichungen zu den Sollverschiebungen von 0,5mm zeigen, dass auch bei diesem System der Einfluss der ausgewählten Bildfrequenz vernachlässigt werden kann. Die Standardabweichungen beider Messreihen liegen mit  $4\mu\text{m}$  (50Hz) beziehungsweise  $3\mu\text{m}$  (1Hz) ebenfalls im gleichen Größenbereich. Der Vergleich der Graphiken 5.13 zeigt, dass die Messreihe mit der geringeren Bildfrequenz zwar vier Ausreißer mehr aufweist, dafür die Abweichungen ansonsten lediglich um  $6\mu\text{m}$  von den Sollwerten differieren. Bei der Messreihe mit einer Frequenz von 50Hz weichen die Messergebnisse in der gleichen Größenordnung von den Sollwerten ab. Diese beiden Messreihen zeigen daher, dass die Wahl der Bildfrequenz bei MOVEINSPECT keinen Einfluss auf das Messergebnis hat.

#### 5.2.2.4 Einfluss der Beleuchtung

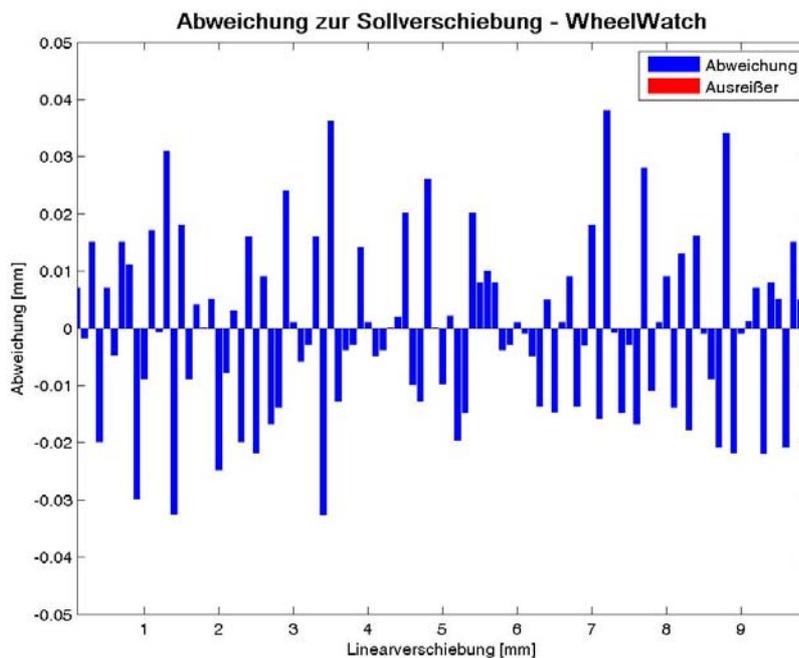
Mit der Lineareinheit und dem System WHEELWATCH wird auch der Einfluss von verschiedenen Beleuchtungen getestet. Für diese Überprüfung ist ein abgedunkelter Messraum nötig, damit die Beleuchtung nicht von der Helligkeit außerhalb des Raumes abhängig ist. Die Variation der Beleuchtung kann dann über das An- und Ausschalten von verschiedenen Leuchtkörpern gesteuert werden. Die Überprüfung erfolgt mit verschiedenen Beleuchtungen. Exemplarisch sind die Ergebnisse eines möglichst abgedunkelten Messraumes und eines voll beleuchteten Raumes in Abbildung 5.14, mit denen in Tabelle 5.4 vorgenommenen Parametereinstellungen, aufgeführt. Angesichts dessen, dass die Messdurchführung wiederum identisch zu den vorherigen statischen Messreihen ist, wird diese hier als bekannt vorausgesetzt. Die Messungen finden hier lediglich über eine Länge von etwa 10mm der Lineareinheit statt.

<b>Für alle nachfolgenden Messungen gilt:</b>		
Art der Messung:	statisch	
Adapterposition:	zentrisch	
Bewegungsrichtung:	in Aufnahme­richtung	
Fokussierung:	800mm	
Bildfrequenz:	1Hz	
Wiederholungsmessungen:	10	
Sollverschiebung:	0,1mm	
Messreihe	Messsystem	Beleuchtung
WW_14	WHEELWATCH	hell
WW_15	WHEELWATCH	dunkel

Tabelle 5.4: Parametereinstellungen von WHEELWATCH und der Linearverschiebeeinheit für die Überprüfung des Einflusses der Beleuchtung



(a) Volle Beleuchtung des Messraums



(b) Abdunklung des Messraums

Abbildung 5.14: Ergebnisse des Soll-Ist-Vergleichs zwischen WHEELWATCH und der Lineareinheit bei der Überprüfung des Beleuchtungseinflusses

**Auswertung des Systems WHEELWATCH.** Wie der Abbildung 5.14 zu entnehmen ist, liegt die Streuung der Messwerte um den Sollwert von 0,1mm unterhalb von  $\pm 40\mu\text{m}$ . Angesichts dessen, dass die Standardabweichung bei beiden Messreihen einen Wert von  $18\mu\text{m}$  annimmt, hat die unterschiedliche Beleuchtung keinen Einfluss auf die Qualität der Messergebnisse. Demnach kann eine Messung auch bei wechselnder Beleuchtung durchgeführt werden, ohne dass dadurch eine Genauigkeitsveränderung während der Messung auftritt. Diese Eigenschaft beruht auf der Benutzung von retroreflektierenden Messmarken und ist zum Beispiel bei WHEELWATCH-Messungen zur Überprüfung der Fahrdynamik eines Fahrzeugs wichtig, da hier die Lichtverhältnisse durch die Sonneneinstrahlung beeinflusst wird. Diese Überprüfung findet nur mit dem System WHEELWATCH statt. Da bei dem System MOVEINSPECT die selben Kameras und Messmarken eingesetzt werden, wird im Folgenden davon ausgegangen, dass auch das Zweikamerasystem nicht von unterschiedlichen Beleuchtungen beeinflusst wird.

### 5.2.2.5 Voruntersuchung über den gesamten Messbereich

Mit Hilfe der Lineareinheit M-150.10 der Firma PI können lediglich die Distanzmessungen auf einer Strecke von 50mm überprüft werden. Damit das Verhalten der Onlinemesssysteme über den gesamten Messbereich beurteilt werden kann, finden verschiedene Messungen an der Geradheitsbahn der Universität Bonn statt. An dieser Geradheitsbahn besteht die Möglichkeit, die Distanzmessungen über eine Gesamtstrecke von bis zu 20m zu überprüfen. Als Referenz dient dazu das Laserinterferometer Agilent 5530A der Firma Weimer Messtechnik.

Die Auswertung der Messungen, die an der Geradheitsbahn der Universität Bonn durchgeführt werden, findet im Prinzip nach dem Modell des Abschnitts 5.1 statt. Der einzige Unterschied zu der Messauswertung mit der Lineareinheit ist die Bestimmung der Sollwerte. Bei der Interferometermessung werden zwei Distanzwerte abgespeichert. Zum einen wird die gemessene und meteorologisch korrigierte Distanz nach Anfahren der Messposition automatisch protokolliert. Zum anderen speichert das Messprogramm die Distanz nach der Messung erneut ab. Demnach liegen für jede angefahrene Schlittenposition zwei Messwerte vor. Hiermit kann überprüft werden, ob in der Zeit zwischen diesen zwei Messungen eine Veränderung der ermittelten Schlittenposition aufgetreten ist. Für die Erzeugung der Sollwerte werden die Distanzen  $\tilde{D}_u$  mittels Differenzbildung aus den zwei aufeinander folgenden Messwerten, die nach der Messung abgespeichert wurden, ermittelt.

$$\tilde{D}_u = \tilde{D}_n - \tilde{D}_{n-1} \quad (5.4)$$

mit

$\tilde{D}_u$  ... Distanz zwischen zwei aufeinander folgenden Interferometermessungen  
mit  $u = 1 \dots N - 1$

$\tilde{D}_n$  ... Gemessene Solldistanz an der Position  $n$  mit  $n = 1 \dots N$

Die Positionsbestimmung des Schlittens, die unmittelbar nach der Anfahrt des Schlit-

tens gespeichert wird, dient zur Kontrolle. Diese sollte herangezogen werden, wenn größere Messabweichungen bei der Auswertung auffallen. Ansonsten wird diese Messung der Schlittenposition hier nicht weiter berücksichtigt.

Im Gegensatz zu den Messungen mit der Lineareinheit, ist es hier sinnvoll die Standardabweichung ohne Ausreißer anzugeben. Die Ausreißer beziehen sich auf Positionen, an denen der Adapter nicht mehr vollständig erkannt wird und somit eigentlich nicht mehr im Messbereich des Systems liegt.

**Messaufbau.** Ein weiteres System, welches als Referenzmaß zum Einsatz kommt, ist das dynamische Kalibriersystem Agilent 5530A der Firma Weimer Messtechnik an der 20m-Geradheitsbahn der Universität Bonn. Wie der Systemskizze 5.15 zu entnehmen ist, sind die beteiligten Komponenten wiederum nicht miteinander synchronisiert. Diese fehlende Synchronisation bewirkt, dass an der Geradheitsbahn nur statische Messungen vorgenommen werden.

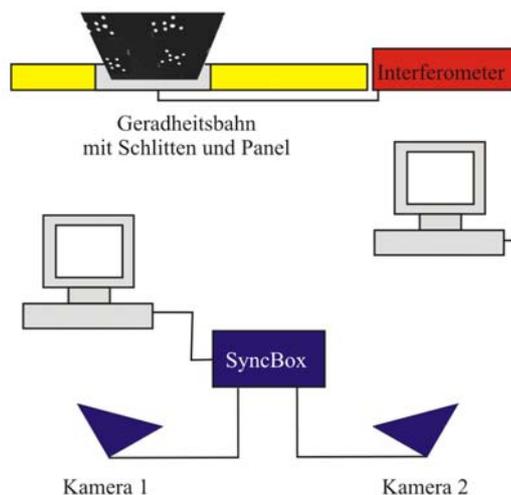


Abbildung 5.15: Systemskizzen des Aufbaus an der Geradheitsbahn der Universität Bonn mit den Onlinemesssystemen

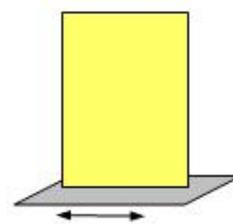
Außerdem können lediglich horizontale Verschiebungen mit der Geradheitsbahn überprüft werden. Aus diesem Grund gibt es hier nur zwei verschiedene Möglichkeiten den Adapter auf dem Schlitten zu befestigen. Auf dem Schlitten ist eine runde Stange montiert, an der der Adapter über eine Hilfskonstruktion (s. Abbildung 5.16) befestigt ist. Bedingt durch die runde Stange kann der Adapter prinzipiell um 360° gedreht auf dem Schlitten montiert werden. Für die Messungen der Genauigkeitsuntersuchung kommen nur zwei Positionen zum Einsatz. Die eine Befestigungsposition dient zur Überprüfung der Aufnahmegenauigkeit in horizontaler Richtung und die andere zur Überprüfung einer Bewegung in Aufnahme-Richtung der Kamera(s). Beide Aufbauten sind in Abbildung 5.17a bzw. 5.17c fotografiert. Aus diesen leiten sich die jeweils daneben stehenden Systemskizzen ab, die bereits in Abschnitt 5.2.2.1 eingeführt wurden.



Abbildung 5.16: Aufbau und Montage des Schlittens an der Geradheitsbahn der Universität Bonn mit Prisma für das Interferometer und Adapter für die Onlinemesssysteme



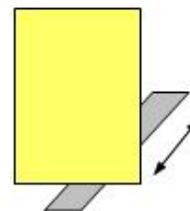
(a)



(b)



(c)



(d)

Abbildung 5.17: Fotografie des Aufbaus an der Geradheitsbahn der Universität Bonn zur Überprüfung der Linearverschiebungen parallel zur Bildebene (WHEELWATCH) bzw. parallel zur Basis (MOVEINSPECT) [5.17a] und in Aufnahme­richtung der Kamerasysteme [5.17c]. Die nebenstehenden Systemskizzen 5.17d und 5.17b sind identisch zu den Skizzen in Abbildung 5.3b bzw. 5.2d.

Anders als bei den bisher vorgestellten Versuchsaufbauten gibt es an der Geradheitsbahn keinen Unterschied zwischen einem zentrischem und exzentrischem Aufbau. Dies ist darauf zurückzuführen, dass der Adapter hier durch den gesamten Messbereich gefahren werden kann. Dadurch sind beide Aufbaumöglichkeiten sozusagen in einer Messung enthalten. Der Vorteil davon ist, dass die Streckendifferenzen konstant durch den gesamten Messbereich gemessen und ausgewertet werden können.

**Messdurchführung.** Damit das Verhalten der Distanzmessung der Onlinemesssysteme im gesamten Messbereich analysiert werden kann, werden vier Messungen an der Geradheitsbahn der Universität Bonn vorgenommen. Zunächst erfolgt jeweils eine Messung in Aufnahme-richtung der beiden Onlinemesssysteme. Des Weiteren findet jeweils eine horizontale Messung, also eine parallel zur Bildebene der Kamera bei WHEELWATCH und eine parallel zur Basis der Kameras von MOVEINSPECT, statt. Bei allen vier statischen Messungen bewegt sich der Schlitten um etwa 10mm zwischen zwei Aufnahme-positionen. Die exakten Verschiebungen des Schlittens werden mit dem Interferometer gemessen und abgespeichert. Dabei dient das Prisma, welches auf dem Schlitten montiert ist (s. Abbildung 5.16), als Ziel für die Messungen mit dem Interferometer. Der Soll-Ist-Vergleich mit den Messergebnissen der beiden Onlinemesssysteme erfolgt mit den gemessenen Sollverschiebungen des Schlittens.

Die Gesamtstrecke, die der Schlitten während einer Messreihe zurücklegt, variiert zwischen 850mm und 1220mm. Die Wahl der Gesamtstrecke für eine Messreihe ist auf den Bildbereich der Kameras zurückzuführen. Bei allen Messungen können die Onlinemesssysteme jeweils zu Beginn und zum Schluss der Messreihe den Adapter nicht mehr vollständig erkennen und nicht mehr alle Punkte einer Anco-Marke detektieren. Damit soll überprüft werden, ob ein Zusammenhang zwischen der Genauigkeit der Onlinemesssysteme und der Adaptererkennung auszumachen ist. Bei der folgenden Auswertung kann deshalb immer zwischen zwei Bereichen unterschieden werden. Im ersten Bereich können die Onlinemesssysteme den Adapter mit allen beteiligten Kameras voll erkennen. Der zweite Bereich beginnt, sobald eine Kamera des Onlinemesssystems nicht mehr alle codierten Punkte des Adapters erkennen kann. WHEELWATCH kann in diesem zweiten Bereich den Adapter nicht mehr vollständig detektieren und/oder decodieren. Bei MOVEINSPECT reicht es aus, wenn eine der beiden beteiligten Kameras einzelne Punkte nicht mehr messen kann. Mit der Detektion ist in diesem Zusammenhang gemeint, dass die Onlinemesssysteme in der Lage sind, einen retroreflektierenden Punkt zu erkennen und eine Bildkoordinate für diesen zu bestimmen. Die Decodierung bezieht sich darauf, dass die Onlinemesssysteme den Code der Anco-Marken aus den detektierten Punkten ermitteln. Demnach ist die Detektion eine zwingende Voraussetzung für die Decodierung. Sobald der Adapter sich aus dem Bildbereich der Kamera(s) bewegt, haben die Onlinemesssysteme ein Problem mit der Decodierung sowie mit der Detektion. Aus diesem Grund werden die folgenden Messreihen in die zwei Bereiche der Abbildung 5.18 unterteilt. Die einzelnen Parametereinstellungen der Messreihen fasst die Tabelle 5.5 zusammen.

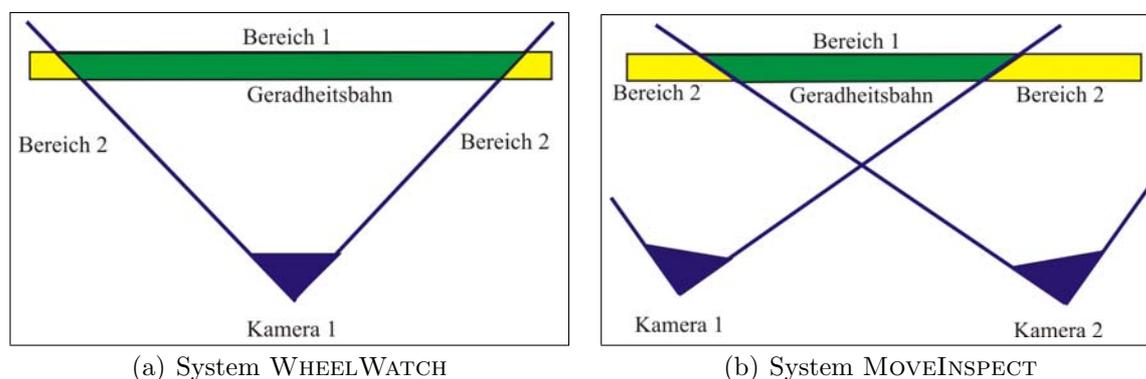
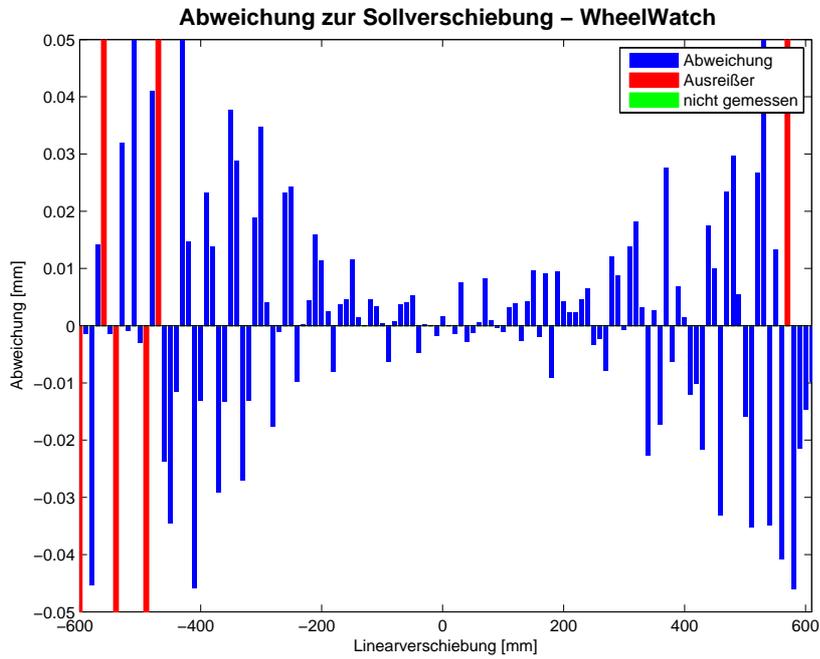


Abbildung 5.18: Decodierungs- beziehungsweise Detektionsbereiche der Onlinemesssysteme an der Geradheitsbahn der Universität Bonn

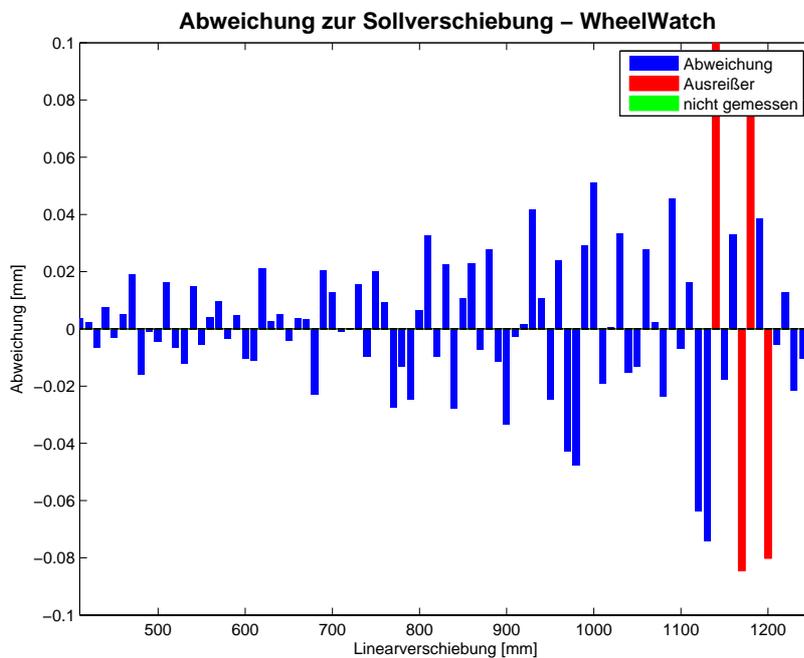
<b>Für alle nachfolgenden Messungen gilt:</b>			
Art der Messung:	statisch		
Fokussierung:	800mm		
Bildfrequenz:	50Hz		
Wiederholungsmessungen:	20		
Sollverschiebung:	≈ 10mm		
Messreihe	Messsystem	Bewegungsrichtung	Messbereich [mm]
WW_16	WHEELWATCH	horizontal	1220
WW_17	WHEELWATCH	in Aufnahmerichtung	850
MI_14	MOVEINSPECT	horizontal	960
MI_15	MOVEINSPECT	in Aufnahmerichtung	850

Tabelle 5.5: Parametereinstellungen der Onlinemesssysteme und des Interferometers bei den Messungen an der Geradheitsbahn der Universität Bonn

**Auswertung des Systems WHEELWATCH.** Die Auswertung der beschriebenen vier Messungen erfolgt zunächst getrennt zwischen den beiden Onlinemesssystemen. Begonnen wird mit dem System WHEELWATCH. Die Graphik 5.19a zeigt die Ergebnisse des Soll-Ist-Vergleichs der WHEELWATCH-Messung, bei der sich der Schlitten parallel zur Kamera bewegt. Der erste Bereich, in dem der Adapter von WHEELWATCH voll erkannt wird, liegt zwischen den Positionen  $-410\text{mm}$  bis  $+420\text{mm}$  des Schlittens. Die Asymmetrie dieses Bereichs bezogen auf die Nullposition des Schlittens, liegt in der Bestimmung dieser Nullposition. Die Festlegung erfolgt per Augenmaß an der Stelle, wo der Adapter ungefähr in der Mitte des Messbereichs steht. Im vorliegenden Fall ist diese Nullposition offensichtlich etwa um  $5\text{mm}$  falsch ausgewählt worden. Trotz dieser Asymmetrie ist der Graphik zu entnehmen, dass die Abweichungen zu den Sollverschiebungen am kleinsten sind, wenn der gesamte Adapter im Bild zu erkennen ist. Je weiter der Adapter zum Bildrand wandert und dann auch aus diesem heraus, desto



(a) Parallel zur Bildebene



(b) In Aufnahme­richtung

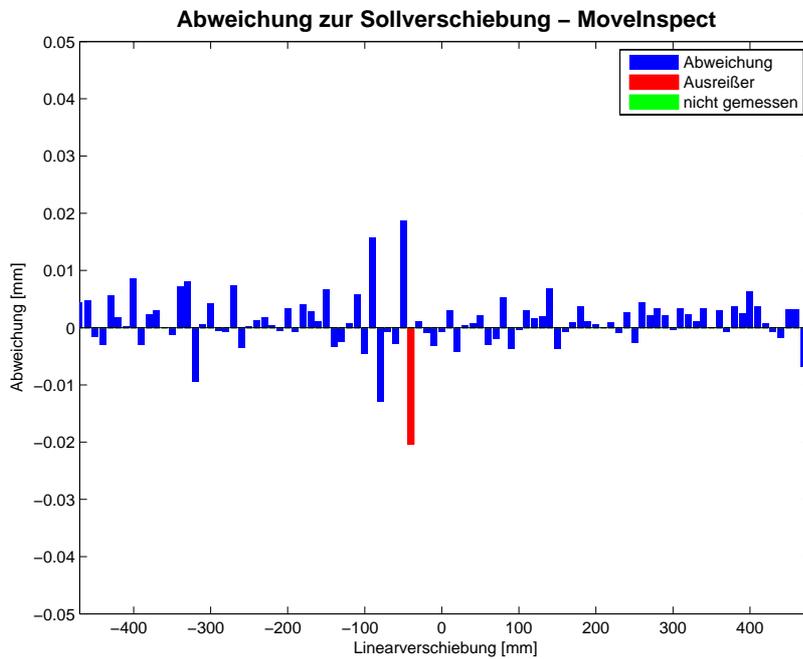
Abbildung 5.19: Ergebnisse des Soll-Ist-Vergleichs des Systems WHEELWATCH und dem Laserinterferometer bei der Überprüfung des Distanzverhaltens über den gesamten Messbereich (Fokussierung: 800mm)

größere Abweichungen vom Sollwert werden von WHEELWATCH gemessen. Im idealen Bildbereich (Schlittenpositionen von etwa  $\pm 250\text{mm}$ ) weicht WHEELWATCH um maximal  $\pm 20\mu\text{m}$  von den Sollabständen ab. An den restlichen Positionen des Schlittens vergrößern sich die Abweichungen auf mehr als das doppelte. Für diese Messreihe liegt die Standardabweichung der von WHEELWATCH gemessenen Distanzen bei  $26\mu\text{m}$ .

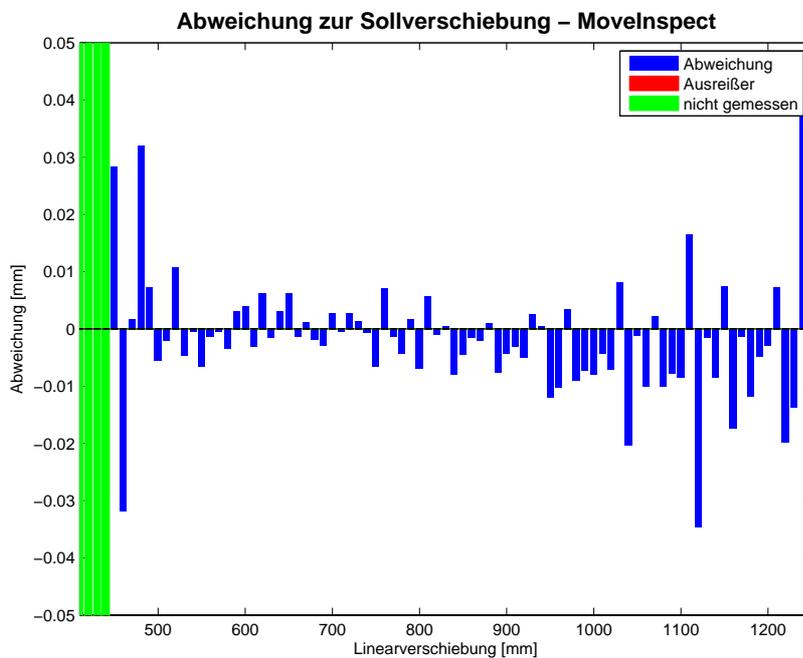
Als nächstes erfolgt die Auswertung der Messreihe, in der die Distanzmessung in Aufnahme-richtung von WHEELWATCH überprüft wird. Das Messergebnis der Abweichungen von den Sollverschiebungen ist in Abbildung 5.19b dargestellt. Während dieser Messung ist der Adapter lediglich an den Schlittenpositionen mit einer Entfernung von über  $1220\text{mm}$  nicht mehr komplett erkannt worden. Im restlichen Messbereich ist WHEELWATCH in der Lage alle Marken des Adapters zu decodieren. Die Messabweichungen von zum Teil mehr als  $50\mu\text{m}$  ist auf die Entfernung des Adapters von der Kamera zurückzuführen. Je weiter der Adapter von der Kamera entfernt ist, desto kleiner wird dieser im Bild abgebildet. Ursächlich dafür ist, dass der Adapter mit steigender Entfernung ungenauer von der Software detektiert und deshalb seine Position schlechter berechnet werden kann. Dies ist die Ursache dafür, dass die Abweichungen des Soll-Ist-Vergleichs mit steigender Entfernung zwischen Adapter und Kamera immer schlechter werden. Bis zu einer Entfernung von  $600\text{mm}$  liegen diese Abweichungen unter  $20\mu\text{m}$ . Sie vergrößern sich bis auf  $27\mu\text{m}$  bei einer Entfernung von bis zu  $800\text{mm}$ . Bei noch größerem Abstand steigen die Abweichungen zwischen Soll- und Istwerten noch einmal etwa um den Faktor vier an. Die Maximale Abweichung dieser Messreihe liegt bei  $116\mu\text{m}$ , welche jedoch als Ausreißer detektiert worden ist. Die größeren Abweichungen dieser Messreihe führen dazu, dass die Standardabweichung um  $5\mu\text{m}$  schlechter ist als die vorher ausgewertete ( $\hat{\sigma}_D = 31\mu\text{m}$ ).

Die verhältnismäßig großen Abweichungen zwischen den Soll- und Istwerten spiegelt sich auch in der Berechnung des Mittelwerts und des Medians wider. Beide Messreihen ermitteln einen Mittelwert, der bei knapp  $20\text{mm}$  liegt. Der Median von  $10,004\text{mm}$  (WW\_16) beziehungsweise  $10,003\text{mm}$  (WW\_17) gibt bei beiden Messreihen den Sollwert von etwa  $10\text{mm}$  bedeutend besser an. Diese großen Differenzen zwischen diesen beiden Kenngrößen ist auf die größere Anzahl an Ausreißern in diesen Messreihen zurückzuführen. Eine Auflistung der exakten Zahlenwerte für Median und Mittelwert der Messreihen an der Universität Bonn befindet sich in der Tabelle A.10 des Anhangs.

**Auswertung des Systems MOVEINSPECT.** Als nächstes folgen die Auswertungen der korrespondierenden Messreihen des Systems MOVEINSPECT. Das Ergebnis der Messreihe MI\_14, in der die Distanzgenauigkeit parallel zur Basis überprüft werden soll, ist in Abbildung 5.20a graphisch veranschaulicht. Der Bereich, in dem beide Kameras des Systems in der Lage sind den Adapter vollständig zu detektieren bzw. decodieren, befindet sich zwischen den Schlittenpositionen von  $-290\text{mm}$  und  $+270\text{mm}$ . Innerhalb dieses Bereichs weichen die Messungen mit MOVEINSPECT um maximal  $8\mu\text{m}$  von den Sollverschiebungen des Schlittens ab, mit Ausnahme von vier Messungen. Diese vier größeren Abweichungen, zwischen  $13\mu\text{m}$  und  $20\mu\text{m}$ , beruhen auf Ungenauigkeiten der Sollwerte der Interferometermessung, wie die Überprüfung der zweiten Messungen



(a) Parallel zur Basis



(b) In Aufnahme­richtung

Abbildung 5.20: Ergebnisse des Soll-Ist-Vergleichs des Systems MOVEINSPECT und dem Laserinterferometer bei der Überprüfung des Distanzverhaltens über den gesamten Messbereich (Fokussierung: 800mm)

dieses Systems an den vier Positionen zeigen. Die beiden abgespeicherten Interferometermessungen weisen an diesen Positionen eine Differenz von  $17\mu\text{m}$  auf. Dies kann unter anderem auf Temperaturveränderungen oder Bewegungen des Schlittens zurückzuführen sein. Unter Berücksichtigung dieser Tatsache kann die Größenordnungen dieser vier Messergebnisse von MOVEINSPECT erklärt werden. An den Schlittenpositionen, wo der Adapter nicht mehr in beiden Kamerabildern voll sichtbar ist, bleiben die Abweichungen von den Sollverschiebungen unterhalb von  $10\mu\text{m}$ . Mit MOVEINSPECT können demnach Distanzen von 10mm, die parallel zur Basis verlaufen, auf weniger als  $10\mu\text{m}$  gemessen werden, auch wenn der aufzumessende Adapter bei beiden Kameras nicht mehr voll im Bildbereich liegt. In diesem Punkt ist das Zweikamerasystem robuster als das Einkamerasystem, da dieses deutlich schlechtere Ergebnisse liefert, sobald der Adapter nicht mehr voll im Bild sichtbar ist. Außerdem ist die Standardabweichung mit  $10\mu\text{m}$  deutlich kleiner, als die von der korrespondierenden Messreihe WW\_16 von WHEELWATCH.

Die letzte Messreihe überprüft die Genauigkeit der Distanzen von MOVEINSPECT in Aufnahme­richtung. Wie der Abbildung 5.20b zu entnehmen ist, können beide Kameras den Adapter zwischen den Schlittenpositionen von 540mm bis 1130mm erkennen (Bereich 1). Dieser Bereich muss hier noch weiter unterteilt werden. Von 540mm bis 950mm weichen die Messungen nicht mehr als  $8\mu\text{m}$  von den Sollwerten ab. Dies entspricht der Größenordnung, die bei der letzten ausgewerteten MOVEINSPECT-Messungen ebenfalls erreicht werden konnte (MI\_14). Wächst die Entfernung zwischen Kameras und Adapter weiter an, steigen auch die Unterschiede in den Ermittlungen der Distanzen zwischen Soll- und Istwerten. Diese Unterschiede steigen zunächst auf knapp  $35\mu\text{m}$  (Entfernung bis zu 1240mm) und dann auf mehr als  $50\mu\text{m}$ . Dieser Effekt kann wie bei WHEELWATCH wiederum auf die Größe der Abbildung des Adapters im Bild der Kameras zurückgeführt werden. Genau wie bei dem System WHEELWATCH können die beiden Kameras die Anco-Marken nicht mehr decodieren, was zu einem schlechteren Messergebnis bei MOVEINSPECT führt. Die Abweichungen von bis zu  $32\mu\text{m}$  in dem Schlittenbereich von weniger als 540mm ist darauf zurückzuführen, dass der Adapter dort nicht mehr in beiden Kamerabildern voll detektiert werden kann. Sobald der Adapter noch näher an die Kameras heran geschoben wird, ist das System nicht mehr in der Lage eine Messung auszuwerten. Für die gesamte Messreihe beträgt die Standardabweichung  $10\mu\text{m}$ .

Aus diesen vier Messungen ist ersichtlich, dass bei den Messungen in Aufnahme­richtung die Adaptergröße im Bild beachtet werden muss. Dies ist insbesondere ab einem Abstand von ca. 950mm (MOVEINSPECT) bzw. 800mm (WHEELWATCH) zu beachten. Sobald dieser zu klein abgebildet wird, verschlechtert sich die Bestimmung der Positionen, was größere Abweichungen der Distanzen der Onlinemesssysteme zu den Sollwerten zur Folge hat. Außerdem ist darauf zu achten, dass der Adapter voll im Bildbereich von allen beteiligten Kameras liegt, da ansonsten wiederum mit schlechteren Messergebnissen zu rechnen ist.

### 5.2.3 Fazit der Voruntersuchungen

Dieser Abschnitt führt die wichtigsten Erkenntnisse aus den Voruntersuchungen zur Distanzgenauigkeit von den Onlinemesssystemen WHEELWATCH und MOVEINSPECT auf. Mit Hilfe dieser Ergebnisse wird ein Testverfahren zur Genauigkeitsbeurteilung von Distanzen für WHEELWATCH und MOVEINSPECT entwickelt.

Zunächst ist die Tauglichkeit der Lineareinheit in Bezug auf die Erzeugung von Sollwerten überprüft worden (s. Anhang A.6). Diese eignet sich nur zur Erzeugung von 3D-Distanzen, die maximal 1mm betragen. Deshalb werden für die Durchführung eines Genauigkeitstests Distanzen von 0,5mm gewählt. Im Zuge der gleichzeitigen Messung mit WHEELWATCH und MOVEINSPECT ist festzustellen, dass dessen a priori Werte zur Distanzgenauigkeit zu pessimistisch für eine optimal erreichbare Genauigkeit sind. Deshalb findet eine Anpassung der a priori Standardabweichung von WHEELWATCH auf  $33\mu\text{m}$  und von MOVEINSPECT auf  $5\mu\text{m}$  statt. Diese Werte beziehen sich auf eine Messung, bei der keine Positionsänderung vorliegt. Hiermit lassen sich äußere Einflüsse durch eine Bewegung vermeiden. Sowohl die statischen als auch die dynamischen Messungen weisen eine geringere Standardabweichung auf.

Ursächlich dafür ist zum einen, dass die Distanzen bei den Tests nur in eine vorgegebene Bewegungsrichtung überprüft werden, wohingegen sich der a priori Wert auf eine beliebige dreidimensionale Bewegung bezieht. Zum anderen erfolgt eine Verbesserung der Angabe durch den Mittelungsprozess aus 20 Wiederholungsmessungen bei den statischen Messungen.

Die Ergebnisse der Voruntersuchung verschiedener Einflussfaktoren werden im Folgenden zusammengefasst. Diese beziehen sich auf die Messungen in den Abschnitten 5.2.2 und 5.2.2.5.

Der Abschnitt 5.2.2 zeigt, dass weder Aufnahmefrequenz noch das Umgebungslicht einen Einfluss auf die Ergebnisse der Genauigkeitsuntersuchung der Distanzen besitzen. Deshalb ist eine Berücksichtigung dieser Faktoren bei der Entwicklung des Genauigkeitstest nicht erforderlich.

Generell eignen sich kontinuierliche Messungen besser zur Beurteilung von Messsystemen für dynamische Vorgänge. Aufgrund der fehlenden Synchronisation liegt keine Möglichkeit vor, die Messwerte der unterschiedlichen Geräte exakt in Verbindung zu setzen. Deshalb wird im Zuge des Testverfahrens auf dynamische Messungen verzichtet. Ein weiterer Aspekt stellt die Durchführung von Wiederholungsmessungen dar. Die statischen Messungen liefern aufgrund der Mittelbildung aus den Wiederholungsmessungen einen optimistischen Wert der Standardabweichung. Wie bereits aufgeführt, heben sich allerdings dadurch die systematischen Einflüsse hervor. Deshalb werden die Voruntersuchungen mit Wiederholungsmessungen durchgeführt. Für das Testverfahren sind zusätzlich Einzelmessungen vorgesehen, da die Onlinemesssysteme diese in der Regel ausführen.

Die Genauigkeit der Distanzen ist bei WHEELWATCH und MOVEINSPECT von der Aufnahmekonfiguration und der Bewegungsrichtung abhängig. WHEELWATCH liefert

im Gegensatz zu MOVEINSPECT deutlich schlechtere Messergebnisse bei exzentrischen Messungen. Dies wird auch im Abschnitt 5.2.2.5 deutlich, in dem Messungen als Querschnitt durch den Messbereich durchgeführt werden. Deshalb ist ein Testverfahren sinnvoll, dass die Genauigkeitsverteilung im gesamten Messbereich der Systeme darstellt. Des Weiteren ist eine Unterscheidung der Richtung der Distanzmessungen erforderlich. In vertikaler und horizontaler Verschieberichtung zeigen sich systematische Fehlereinflüsse, die Hardware (CCD-Chip) bedingt sind. Die Distanzmessungen in Aufnahme- richtung können die Onlinemesssysteme am schlechtesten bestimmen.

### 5.3 Testverfahren zur Beurteilung der Distanzgenauigkeit

Die Genauigkeitsbeurteilung von photogrammetrischen Onlinemesssystemen wird durch ein Testverfahren, das im Zuge dieser Diplomarbeit entwickelt wurde, durchgeführt. Hierbei wird in der Genauigkeitsbetrachtung zwischen Winkeln und Strecken unterschieden. Das Testverfahren zur Beurteilung der Genauigkeit von Winkeln ist in Kapitel 4.4 beschrieben. Hier wird im Folgenden das Testverfahren zur Genauigkeitsbeurteilung von Distanzen erläutert und mit den Systemen WHEELWATCH und MOVEINSPECT getestet. Die Ergebnisse beider Systeme werden anschließend miteinander verglichen.

Die folgenden Teile 5.3.1 und 5.3.2.1 bis 5.3.2.2 beschreiben zunächst den Ablauf des Testverfahrens. Dieses Verfahren wurde im Verlauf dieser Arbeit unter Berücksichtigung der Messergebnisse des Kapitels 5.2 entwickelt. Abschnitt 5.3.2.3 erläutert die durchgeführten Messungen mit den Systemen WHEELWATCH und MOVEINSPECT, dessen Ergebnisse anschließend dargestellt und beurteilt werden.

#### 5.3.1 Implementation des Testverfahrens

Die Testreihe wird mittels der im Zuge dieser Diplomarbeit erstellten Software „Messauswertung für Lineareinheit“ ausgewertet. Hierzu wird mit dem Aufruf der Matlabfunktion „genauigkeitstestDistanz.m“ das Programm gestartet und die Benutzeroberfläche (s. Abbildung 5.21) erscheint. Die weitere Dokumentation zur Benutzung des Programms befindet sich im Anhang A.3. An dieser Stelle werden nur die Berechnungsmethoden zur Bestimmung der Genauigkeit beschrieben.

Eine Testreihe besteht aus mehreren Messreihen. Hiermit setzt sich die Auswertung der Testreihe aus zwei Teilen zusammen. Zunächst wird jede Messreihe einzeln ausgewertet. Dies dient zur Qualitätsbeurteilung der einzelnen Messreihen, damit das Testergebnis nicht durch grobe Fehler in den Messdaten verfälscht wird. Hierbei werden lediglich die drei Translationsparameter betrachtet, da zur Beurteilung der Distanzgenauigkeit die rotatorische Lage des Objekts im Raum nicht von Bedeutung ist. Der zweite Teil der Auswertung verbindet die einzelnen Messreihen zu einer Veranschaulichung der Messgenauigkeit im Aufnahmebereich des Messsystems.

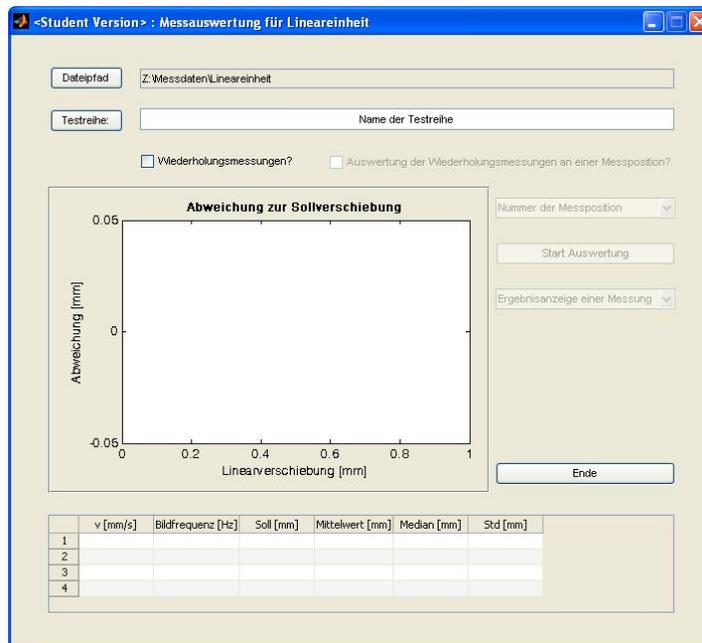


Abbildung 5.21: Benutzeroberfläche der Software „Messauswertung für Lineareinheit“

**Auswertung einer einzelnen Messreihe** Die Auswertung einer einzelnen Messreihe setzt sich aus den nachfolgenden Berechnungsschritten zusammen. Einzelne Teile der Auswertung wurden bereits in der Modellbeschreibung zur Auswertung der Messdaten in Abschnitt 5.1 vorgestellt. Diese und eine Erweiterung der dort beschriebenen Berechnungsschritte werden im Folgenden zu einem Schema zusammengestellt und die einzelnen Schritte ausführlich erläutert.

1. Im ersten Schritt werden die Koordinaten der Wiederholungsmessungen gemittelt und daraus die Distanzen  $\hat{D}_u$  zwischen den aufeinander folgenden Positionen berechnet (s. Formel 5.1). In allen Berechnungen zur Auswertung der Messungen mit der Lineareinheit ist dieser Schritt erforderlich.
2. Die berechneten Distanzen werden anschließend mit den Soll-Daten der Lineareinheit verglichen (s. hierzu auch Abschnitt 5.1). Für den Soll-Ist-Vergleich werden die Abweichungen zwischen Soll- und Ist-Wert benötigt, die den Verbesserungen  $v_D$  entsprechen. Diese werden mit Hilfe der Differenzbildung berechnet (s. Formel A.22 auf Seite 195). Über diese Abweichungen lässt sich die Standardabweichung der berechneten Distanzen nach Formel A.14 ermitteln.

Diese empirische Standardabweichung wird über einen Globaltest mit der a priori Angabe verglichen. Als Ergebnis liefert dieser Test einen Hinweis darauf, ob Modellfehler vorliegen. Bei der Vermutung eines Fehlers im stochastischen Ansatz sollte überprüft werden, inwieweit die a priori Standardabweichung der Realität entspricht. Dies kann zum Beispiel über eine statische Messreihe überprüft werden, in der keine Verschiebungen stattfinden. Der Verzicht von einem bewegten Objekt dient zur Vermeidung von äußeren Einflüssen, die nicht durch das optische

Messsystem selbst verursacht werden.

Als nächstes wird automatisch die Modellannahme von normalverteilten Messungen überprüft. Dies wird im Punkt 3 erläutert und wurde in den im Vorfeld durchgeführten Messungen (s. Auswertungen im Abschnitt 5.2) noch nicht untersucht.

3. Das Auswertungsmodell geht von normalverteilten Messungen aus. Da die Distanzen nach Formel 5.1 auf Seite 62 aus diesen normalverteilten Koordinaten berechnet werden, sind auch die Distanzen normalverteilt. Dies wird mit einem  $\chi^2$ -Anpassungstest nach Abschnitt A.2.1 überprüft. In diesem Fall werden die Zufallsvariablen, also die Distanzen, auf Normalverteilung überprüft. Zur Bestimmung des empirischen Histogramms werden 20 Klassen gewählt. Mit Hilfe des Mittelwerts der Distanzen (Formel A.12 auf Seite 191) und dessen Standardabweichung (Formel A.13 auf Seite 192) wird das theoretische Histogramm der Normalverteilung ermittelt. Die Werte der beiden Histogramme werden nach Formel A.16 auf Seite 194 zu der Testgröße zusammengefasst. Mit diesen Angaben wird der Test durchgeführt. Falls der Test nicht bestanden ist, werden die weiteren Berechnungen der Auswertung unterbrochen. Dem Nutzer wird eine graphische Darstellung des empirischen und theoretischen Histogramms zur Verfügung gestellt, mit deren Hilfe er entscheiden kann, ob die Messreihe weiter ausgewertet werden soll. In diesem Fall wird mit dem nächsten Schritt fortgefahren.
4. Wenn nicht normalverteilte Messungen vorliegen, kann dies an groben Fehlern in den Messdaten liegen. Deshalb wird im nächsten Schritt ein Ausreißertest durchgeführt. Dieser wurde im Abschnitt A.2.1 beschrieben. Die detektierten Ausreißer werden aus dem Datensatz der berechneten Distanzen eliminiert. Danach werden die Punkte 2 bis 3 erneut berechnet und überprüft.

Dem Nutzer stehen nach dieser Auswertung der einzelnen Messreihen die verschiedenen Ergebnisse der Hypothesentests zur Verfügung. Mit deren Hilfe kann er beurteilen, ob die vorliegende Messreihe in die eigentliche Genauigkeitsuntersuchung mit einfließen soll. Falls die Tests nicht bestanden werden, sollen die graphischen Darstellungen der Testergebnisse bei der weiteren Fehleranalyse der Messreihe helfen. Diese Möglichkeit bestand in den Voruntersuchungen noch nicht. Als **Genauigkeitsmaß** wird die einfache Standardabweichung einer Messreihe, berechnet aus den Soll-Ist-Verbesserungen der Distanzen, ausgegeben. Mit diesem Wert können die einzelnen Messreihen in Bezug auf ihre Genauigkeit miteinander verglichen werden.

**Auswertung der Messgenauigkeit im gesamten Aufnahmebereich** Im Anschluss an die Auswertung der einzelnen Messreihen fügt der zweite Teil diese Messreihen mit Hilfe des statistischen Approximationsverfahrens Ordinary Kriging zusammen. Hierzu werden zunächst die Standardabweichungen der Distanzen aus jeweils zehn Positionen berechnet. Hiermit liegen mehr als nur ein Genauigkeitswert pro Messreihe vor, die in die folgende Berechnung des Verfahrens Ordinary Kriging eingehen. Dies ermöglicht eine genauere Schätzung der Genauigkeitsveränderung über den gesamten

Messbereich. Aus den lokal verteilten Daten werden für den gesamten Messbereich die Distanzgenauigkeiten mit Hilfe des Verfahrens Ordinary Kriging (s. Abschnitt 2.2) geschätzt. Hierbei wird für die Erstellung des theoretischen Variogramms das exponentielle Modell gewählt, das in diesem Fall eine realistische Lösung liefert. Als Ergebnis der Schätzung mit Ordinary Kriging erhält man eine Graphik über den Messbereich mit der Genauigkeitsverteilung der Messung von Distanzen. Die Güte dieser Schätzung lässt sich mit Hilfe der Kreuzvalidierung beurteilen. Unterscheidet sich der berechnete Wert signifikant von Null, liegt ein Modellfehler vor und die Schätzung sollte nicht als Ergebnis verwendet werden. Eine Anpassung der Trendabspaltung oder des Variogramms könnte den Fehler beheben. Außerdem zeigt die Darstellung der Krigingvarianz, wie genau die Approximation der einzelnen geschätzten Werte ist.

### 5.3.2 Durchführung und Auswertung des Testverfahrens

Das implementierte Modell des Testverfahrens impliziert einen speziellen Testaufbau, der sich aus der Verwendung der Lineareinheit als Referenzsystem ergibt. Für die Beurteilung im gesamten Messbereich der Onlinemesssysteme müssen mehrere Messreihen aufgenommen werden. Die Lage dieser Messreihen innerhalb des Messvolumen stellt Abschnitt 5.3.2.1 dar. Die Durchführung mit den entsprechenden Parametereinstellungen für die Lineareinheit und die Onlinemesssysteme erörtert Abschnitt 5.3.2.2. Anschließend zeigt Abschnitt 5.3.2.3 die Ergebnisse des Testverfahrens am Beispiel der Onlinemesssysteme WHEELWATCH und MOVEINSPECT.

#### 5.3.2.1 Testaufbau

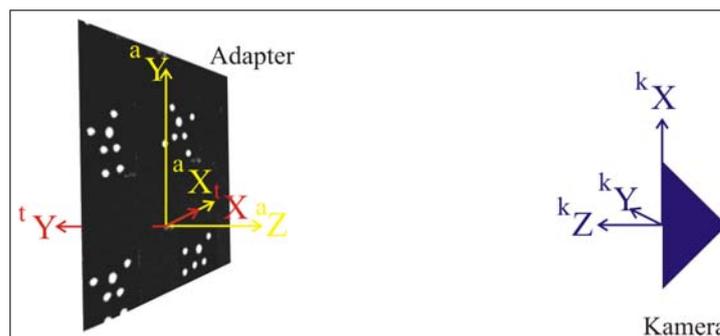


Abbildung 5.22: Relative Lage der drei Koordinatensysteme Kamerasystem  $S_k$ , Adaptersystem  $S_a$  und Testsystem  $S_t$

Die Lineareinheit und das optische Onlinemesssystem sind für den Test in der nach Abbildung 5.23 vorgegebenen Weise zueinander aufzubauen. Bei diesem Aufbau ist darauf zu achten, dass die  $xz$ -Ebene des Adaptersystems und die  $yz$ -Ebene des Kamerasystems näherungsweise parallel zueinander liegen. Der Abstand zwischen diesen beiden Ebenen sollte möglichst gering sein (s. Abbildung 5.22). Damit alle Messreihen einer Testreihe miteinander in Beziehung gesetzt werden können, werden alle Messreihen

in ein neues Koordinatensystem, dem Testsystem  $S_t$ , transformiert. Dabei entspricht die  $xy$ -Ebene des Testsystems der  $yz$ -Ebene des Kamerasystems. Der Ursprung des Testsystems liegt, wie in Abbildung 5.23 ersichtlich, in der Null-Position der ersten aufzunehmenden Messreihe. Für eine Testreihe ergeben sich elf Messreihen an elf unterschiedlichen Standorten der Lineareinheit.

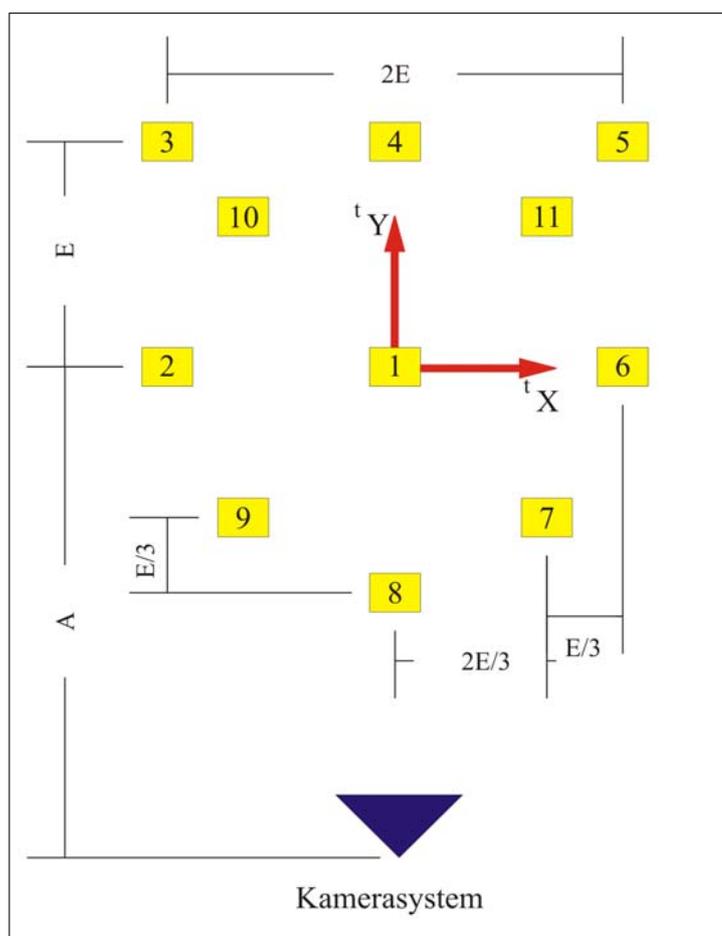


Abbildung 5.23: Positionen einer Messreihe für die Genauigkeitsbeurteilung von Onlinemesssystemen mit der Entfernung der Fokussierung  $A$  und der Breite des Messbereichs  $2E$  sowie des Testsystems  $S_t$

Die Entfernungen zwischen den einzelnen Standorten der Lineareinheit und dem Messsystem ergeben sich aus dem gewünschten Messbereich und damit der Fokussierung der Hochgeschwindigkeitskameras. Die erste Position liegt in der Mitte des Messbereichs. Auf diese Entfernung ist die Kamera fokussiert. Die Positionen zwei bis neun legen den Rand des Messbereichs fest. Bei der Bestimmung der Grenzen des Messbereichs ist darauf zu achten, dass der Adapter von dem messenden Kamerasystem komplett erkannt wird. Als zusätzliche Stützpunkte für die Auswertung dienen die Standpunkte zehn und elf der Lineareinheit. Im vorderen Messbereich würden diese zusätzlichen Positionen den zwei Positionen sieben und neun der Messbereichsbegrenzung entsprechen. Da diese Messpositionen hiermit schon vorliegen, wird auf diese zwei weiteren Positio-

nen verzichtet. Die relativen Entfernungen, die sich aus dem Messbereich ergeben, sind in der genannten Graphik angegeben. Die Testreihe wird mit dem Aufbau der ersten Position begonnen.

Der Adapter ist nach der in Abschnitt 5.2.2.1 beschriebenen Art an der Lineareinheit anzubringen. Für den Test kommen davon zwei Arten in Frage. Zum einen kann mit der Anbringung nach Abbildung 5.3b die Genauigkeit von Distanzmessungen in Aufnahme­richtung beurteilt werden. Zum anderen wird die Genauigkeit in horizontaler Richtung bestimmt, wenn der Adapter nach Graphik 5.2b bzw. 5.2d an die Lineareinheit angebracht wird. Während einer Testreihe darf die Anbringungsart nicht verändert werden.

### 5.3.2.2 Testdurchführung

Vor Beginn der Messungen ist das Messsystem vorzubereiten. Die entsprechenden Schritte für die Kameraeinstellungen und dessen Kalibrierung sind in Abschnitt 3.1.3 beschrieben. Dort wird auch beschrieben, dass im Zuge der Kalibrierung bei WHEELWATCH eine Startposition festgelegt werden muss. Diese Festlegung erfolgt beim Aufbau der Lineareinheit an der ersten Messposition, wenn die Lineareinheit zusätzlich noch in seiner Nullposition steht. Die Nullposition kann wahlweise als Positives oder Negatives Limit festgelegt werden, wobei die Wahl keinen Einfluss auf die Messergebnisse hat. Während der gesamten Testreihe dürfen die Kalibrierdaten dann nicht mehr verändert werden, damit die Messungen in einem Koordinatensystem vorliegen. Die Kalibrierung von MOVEINSPECT ist, wie in Abschnitt 3.1.3.1 beschrieben, durchzuführen. Der Ursprung des Koordinatensystems wird hierbei in das Kamerazentrum der ersten Kamera gelegt und ist unabhängig von einer Position der Lineareinheit.

Jede Messreihe an den elf Standorten beginnt in der Nullposition der Lineareinheit. Von dieser Nullposition wird die Lineareinheit in 0,5mm Schritten über den gesamten Messbereich der Lineareinheit von 50mm verschoben. Damit ergeben sich 101 Messpositionen der Lineareinheit. Es kann entschieden werden, ob nur jeweils eine Einzelmessung oder Wiederholungsmessungen des Kamerasystems aufgenommen werden. Bei Wiederholungsmessungen werden an jeder Stelle  $W = 20$  Aufnahmen durchgeführt. Damit besteht jede Messreihe aus 2020 Messungen von WHEELWATCH bzw. MOVEINSPECT. Hierbei ist für diese beiden Onlinemesssysteme generell eine beliebige Aufnahmefrequenz möglich, da im Vorfeld festgestellt wurde, dass diese Wahl keinen Einfluss auf die Genauigkeit besitzt. Falls dies für andere Kamerasysteme untersucht werden soll, sind mehrere Messreihen mit unterschiedlicher Frequenzeinstellung aufzunehmen und wie in den Voruntersuchungen in Abschnitt 5.2.2 miteinander zu vergleichen.

### 5.3.2.3 Ergebnisse zur Distanzgenauigkeit

Mit Hilfe des entwickelten Testverfahrens wird eine Genauigkeitsaussage über die optischen Onlinemesssysteme WHEELWATCH und MOVEINSPECT getroffen. Diese wird mit den von der Firma AICON 3D Systems GmbH angegebenen a priori Genauigkeiten

(s. Tabelle 5.6) verglichen.

	WHEELWATCH	MOVEINSPECT
3D-Positionsgenauigkeit	$\pm 0,1\text{mm}$	$\pm 0,1\text{mm}$
Messvolumen	$1\text{m} \times 1\text{m} \times 0,5\text{m}$	

Tabelle 5.6: A priori Positionsgenauigkeitsangaben der Firma AICON 3D Systems GmbH zu den optischen Onlinemesssystemen WHEELWATCH und MOVEINSPECT (Angaben entnommen aus (Aicon, 2008))

Für jedes System werden zwei Testreihen zur Beurteilung der Genauigkeit von Distanzänderungen aufgenommen. Zum einen wird die Genauigkeit einer Distanzmessung von 0,5mm in Aufnahme­richtung beurteilt und zum anderen bei einer horizontalen Bewegung, senkrecht zur Aufnahme­richtung. Die Fokussierung wird bei beiden Systemen auf 800mm durchgeführt. Hiermit ergibt sich ein Messbereich von 800mm  $\times$  800mm für das System WHEELWATCH. Mit dem Onlinemesssystem MOVEINSPECT kann bei gleicher Fokussierung lediglich ein Bereich von 600mm  $\times$  600mm abgedeckt werden. Diese Testreihen werden sowohl als Wiederholungsmessungen als auch als Einzelmessung mit dem „Testverfahren zur Distanzgenauigkeit“ nach Abschnitt 5.3 ausgewertet. Damit ergeben sich vier Auswertungen pro Onlinemesssystem. Die Einstellungen der Messsysteme sind in Tabelle 5.7 zusammengestellt. Die Systeme nehmen die Positionen eines Adapters mit zehn Anco-Marken auf.

<b>Für alle nachfolgenden Messungen gilt:</b>			
Art der Messung:			statisch
Fokussierung:			800mm
Bildfrequenz:			50Hz
Sollverschiebung:			0,5mm
Testreihe	Messsystem	Bewegungsrichtung	Wiederholungsmessungen
TestWW_3	WHEELWATCH	in Aufnahme­richtung	20
TestWW_4	WHEELWATCH	horizontal	20
TestML_3	MOVEINSPECT	in Aufnahme­richtung	20
TestML_4	MOVEINSPECT	horizontal	20
TestWW_5	WHEELWATCH	in Aufnahme­richtung	1
TestWW_6	WHEELWATCH	horizontal	1
TestML_5	MOVEINSPECT	in Aufnahme­richtung	1
TestML_6	MOVEINSPECT	horizontal	1

Tabelle 5.7: Parametereinstellungen der Onlinemesssysteme und der Lineareinheit für die Genauigkeitsbeurteilung von Distanzen

In den folgenden zwei Paragraphen findet die Auswertung der Testreihen mit WHEELWATCH und MOVEINSPECT statt. Zunächst werden die Messreihen des jeweiligen Systems einzeln ausgewertet. Im Anhang A.8 befindet sich hierzu eine Zusammenstellung

der einzelnen Kenngrößen aller Messreihen, die nicht im einzelnen erläutert werden. Es wird vor allem auf die Ergebnisse der einzelnen Hypothesentests eingegangen. Diese lassen sich in einer allgemeinen Aussage für alle Messungen zusammenfassen.

Unsere Auswertesoftware gibt als Ergebnis die Genauigkeitsverteilung der ermittelten Distanzen im Messbereich aus. Diese Graphiken werden in den Paragraphen „Wiederholungsmessungen“ und „Einzelmessung“ gezeigt und erläutert. Zu beachten ist, dass für die „Einzelmessung“ keine neuen Testreihen aufgenommen werden. Die Daten, die den Testreihen TestWW\_5, TestWW\_6, TestMI\_5 und TestMI\_6 der Einzelmessungen zugrunde liegen, stammen aus den Testreihen TestWW\_3, TestWW\_4, TestMI\_3 und TestMI\_4 mit Wiederholungsmessungen. Der Unterschied besteht darin, dass für die Einzelmessauswertung lediglich der erste Messwert der 20 Wiederholungsmessungen für die Auswertung herangezogen wird. Diese Auswertung findet in den Absätzen „Einzelmessung“ zu den Systemen WHEELWATCH und MOVEINSPECT statt. Die Absätze „Wiederholungsmessungen“ werten die Testreihen TestWW\_3, TestWW\_4, TestMI\_3 und TestMI\_4 aus, in denen alle 20 Wiederholungsmessungen berücksichtigt werden.

**Ergebnisse zum System WHEELWATCH.** Die Auswertung der einzelnen Messreihen von dem Onlinemesssystem WHEELWATCH liefert die Ergebnisse zu den durchgeführten Hypothesentests, die in den Auswerteschritten 2 und 3 (s. Abschnitt 5.3.1) beschrieben sind. Hiermit wird die Qualität der einzelnen Messreihen beurteilt, bevor diese in das Approximationsverfahren Ordinary Kriging mit einfließen.

Die Analyse zeigt, dass der Globaltest generell nicht bestanden wird. Dies bedeutet, dass eine Überprüfung des stochastischen und des deterministischen Modells erforderlich ist. Der stochastische Ansatz wird mit Hilfe der Standardabweichungen der einzelnen Messreihen näher untersucht. Der Globaltest wird für das System WHEELWATCH mit einer a priori Angabe von  $\tilde{\sigma}_D = 33\mu\text{m}$  durchgeführt. Die Standardabweichungen der einzelnen Messreihen variieren jedoch zwischen  $2\mu\text{m}$  und  $54\mu\text{m}$  je nach Position und Bewegungsrichtung der Lineareinheit. Hiermit liegen zum einen erheblich bessere Standardabweichungen als der a priori Wert vor. Dies lässt sich durch die Mittelbildung der Wiederholungsmessungen erklären, die im a priori Wert nicht berücksichtigt sind. Außerdem liegen diese guten Werte bei Messreihen vor, die im optimalen Messbereich der Onlinemesssysteme aufgenommen werden. Zum anderen zeigen sich innerhalb der Testreihen auch deutlich schlechtere Standardabweichungen im Vergleich zu der a priori Angabe, welche an schlechten Positionen des Messbereichs aufgenommen werden. Die a priori Angabe bezieht sich jedoch auf die zentrische Messposition im Abstand der Fokussierung. Die Genauigkeit der Distanzen ist nach Abschnitt 5.2.2.1 bereits bei exzentrischen Messungen schlechter. Somit ist der hier ermittelte Bereich der Standardabweichungen durchaus realistisch. Eine Festlegung eines einheitlichen a priori Wertes über den gesamten Messbereich ist jedoch schwierig zu realisieren.

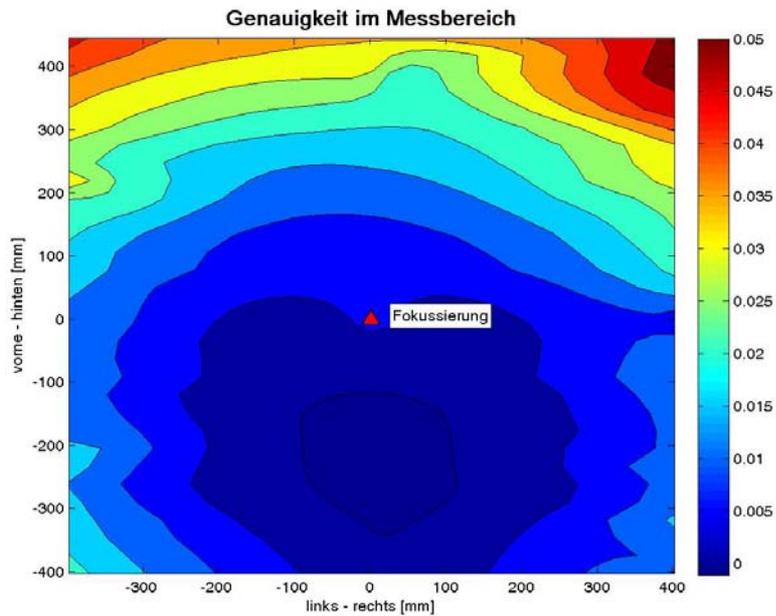
Der  $\chi^2$ -Anpassungstest zur Überprüfung der Distanzmessungen auf Normalverteilung ist bei allen Messreihen erfolgreich. Folglich stimmt das stochastische Modell in Hinblick auf diese Annahme.

Die einzelnen Messreihen weisen keine großen Auffälligkeiten in den Testergebnissen auf. Deshalb berücksichtigt der Algorithmus mit Ordinary Kriging alle Messreihen für die Auswertung der jeweiligen Testreihen. Die folgenden Abschnitte beschreiben die Ergebnisse, die dieses Verfahren liefert.

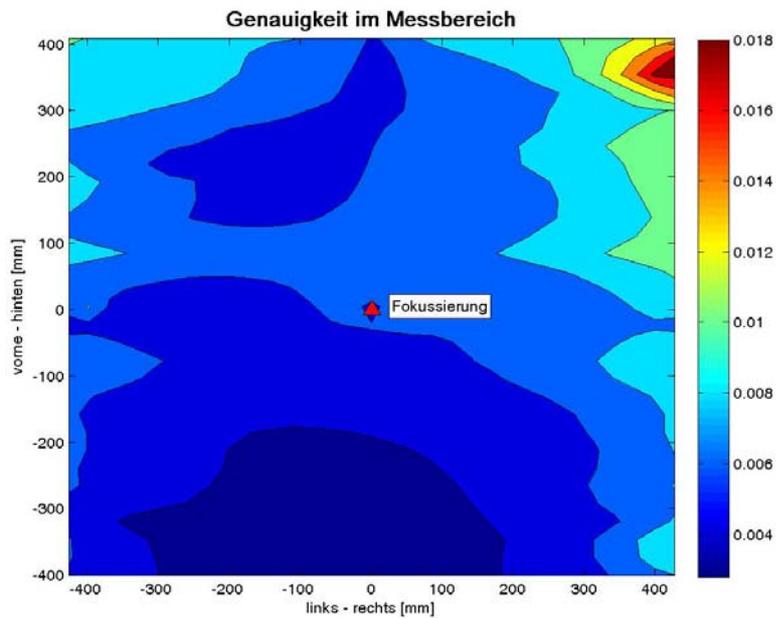
**Wiederholungsmessungen mit WHEELWATCH.** Zunächst wird die Genauigkeit der Wiederholungsmessungen mit WHEELWATCH betrachtet. In Abbildung 5.24a ist das Ergebnis für den Aufnahmebereich von WHEELWATCH dargestellt, bei denen die Genauigkeiten von Distanzmessungen in Aufnahme­richtung des Systems gezeigt sind. Die Genauigkeit des Systems liegt zwischen  $5\mu\text{m}$  und  $50\mu\text{m}$ , wobei die Genauigkeit der Distanzen zum Rand des Messbereichs hin abnimmt. Im vorderen Bereich zwischen 400mm und 800mm Entfernung zur Kamera ist die Standardabweichung mit  $5\mu\text{m}$  am geringsten und somit die Genauigkeit des Systems am besten. Dies liegt an der Ab­bildungsgröße der Marken auf dem CCD-Chip der Kamera. Je größer die codierten Marken abgebildet werden, desto genauer wird dessen Position und somit die Distanz bestimmt. Mit zunehmender Entfernung des Adapters zur Kamera wird die Genauigkeit schlechter. Des Weiteren kann WHEELWATCH am Rand des Messbereichs, besonders im hinteren äußeren Teilbereich (im Bereich der Messpositionen drei und fünf), nicht mehr alle Marken decodieren. Dadurch wird die Bestimmung der Position des Adapters instabiler und ungenauer. Hier liegt nur noch eine Standardabweichung von  $50\mu\text{m}$  vor.

Die Krigingvarianz der geschätzten Genauigkeit im Messbereich ist in Bild 5.25 dargestellt. Diese Abbildung verdeutlicht, dass die geschätzten Genauigkeiten in Abbildung 5.24a an den gemessenen Positionen zuverlässiger sind. Zwischen den Messpositionen ist die Krigingvarianz mit einem Faktor von etwa fünf deutlich höher. Dies liegt daran, dass dieses statistische Verfahren die Werte mit Hilfe der Messwerte approximiert. Mit zunehmender Entfernung zu den Messwerten wird die Approximation schlechter. Diese Aussage gilt generell für die durchgeführten Testreihen. Deshalb wird nur für diese erste Testreihe die Krigingvarianz dargestellt. Alle weiteren Bilder befinden sich im Anhang A.8.

Das Ergebnis der zweiten Testreihe TestWW\_4 wird in Abbildung 5.24b dargestellt. Diese Graphik visualisiert die Distanzgenauigkeit bei einer Streckenmessung mit einer horizontalen Sollverschiebung von 0,5mm. Diese bezieht sich auf Wiederholungsmessungen mit dem System WHEELWATCH. Die Standardabweichungen liegen in einem Bereich von  $2\mu\text{m}$  bis  $13\mu\text{m}$ . Im Vergleich zu der Bewegung in Aufnahme­richtung nimmt das System WHEELWATCH horizontale Positionsveränderungen mit einer Genauigkeit auf, die um den Faktor vier besser ist. Außerdem zeigt sich eine deutliche Verschlechterung der Genauigkeit lediglich direkt am Rand des Messbereichs, wo die Marken nicht vollständig decodiert werden. Die Distanzen in horizontaler Richtung können also mit einer gleichbleibenden Genauigkeit in einem größeren Bereich von etwa  $600\text{mm} \times 700\text{mm}$  bestimmt werden. In Aufnahme­richtung ist dies lediglich in einem Bereich von  $400\text{mm} \times 400\text{mm}$  möglich.



(a) Distanzgenauigkeit des Messbereichs von WHEELWATCH bei einer Streckenmessung in Aufnahme­richtung mit einer Sollverschiebung von 0,5mm



(b) Distanzgenauigkeit des Messbereichs von WHEELWATCH bei einer Streckenmessung in horizontaler Richtung mit einer Sollverschiebung von 0,5mm

Abbildung 5.24: Ergebnis des Testverfahrens für Wiederholungsmessungen mit dem Systems WHEELWATCH

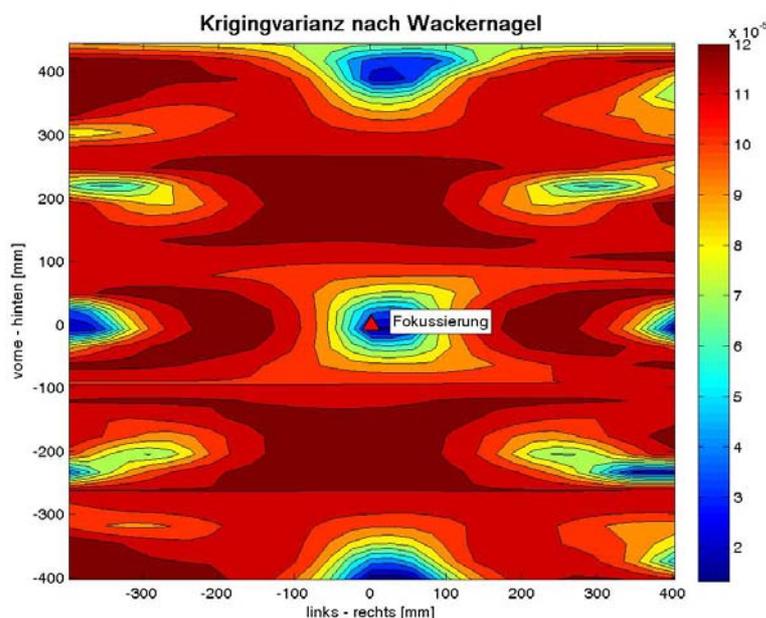
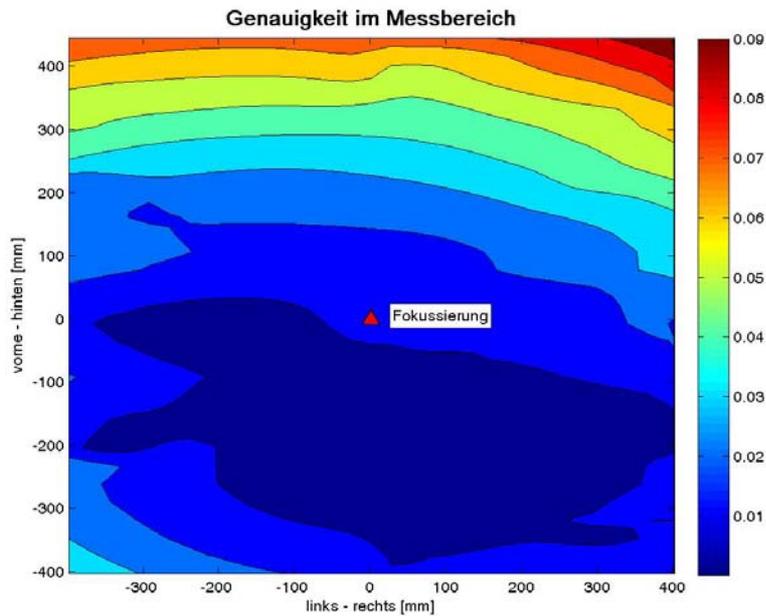


Abbildung 5.25: Krigingvarianz nach Wackernagel für die geschätzte Distanzgenauigkeit einer Bewegung in horizontaler Richtung bei Wiederholungsmessungen des Systems WHEELWATCH

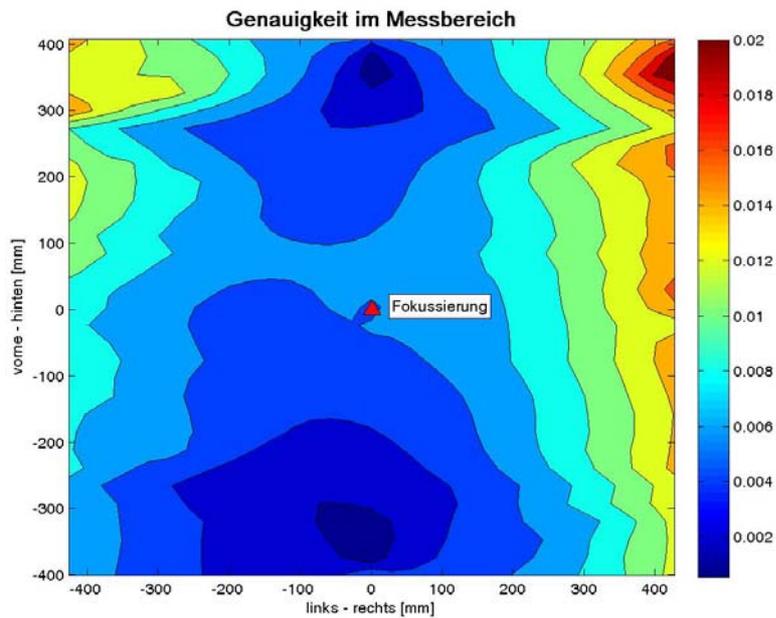
**Einzelmessung mit WHEELWATCH.** Im Vergleich zu den Wiederholungsmessungen werden im nächsten Schritt die Messungen mit WHEELWATCH als Einzelmessung betrachtet. Hierzu wird jeweils der erste aus den 20 Wiederholungsmessungen ausgewertet. Für die Genauigkeit der Distanzmessungen in Aufnahme­richtung wird somit aus der Testreihe TestWW\_3 mit Wiederholungsmessungen die Testreihe TestWW\_5 einer Einzelmessung gewonnen.

Eine Bewertung der Genauigkeit bei Einzelmessungen ist sinnvoll, da im Allgemeinen die Positionsbestimmung und damit die Distanzbestimmung nicht aus gemittelten Messungen besteht, sondern dynamisch mit einzelnen Messwerten stattfindet. Es ist allerdings auch möglich mehrere Messungen innerhalb der Software TRACECAMF zu mitteln, weshalb die Messung mit Wiederholungsmessungen eine optimal erreichbare Genauigkeit der Systeme wiedergibt. Die Auswertung der Einzelmessungen ergibt dagegen einen realistischen Wert für die praktische Anwendung.

Zunächst zeigt die Abbildung 5.26a die Genauigkeitsverteilung einer Einzelmessung in Aufnahme­richtung (Testreihe TestWW\_5). Die Standardabweichung der einzelnen Messreihen beträgt je nach Messposition  $7\mu\text{m}$  bis  $101\mu\text{m}$ . Damit ist die Einzelmessung um den Faktor zwei schlechter als die Genauigkeit mit Wiederholungsmessungen. Der Genauigkeitsverlauf innerhalb des Messbereichs ist ähnlich zur Testreihe TestWW\_3. Zu den Rändern des Messbereichs nimmt die Genauigkeit ab. Mit zunehmender Entfernung von Kamera zu Messobjekt ist dieser Effekt stärker als zu den linken und rechten Grenzen des Messbereichs.



(a) Distanzgenauigkeit des Messbereichs von WHEELWATCH bei einer Streckenmessung in Aufnahme­richtung mit einer Sollverschiebung von 0,5mm



(b) Distanzgenauigkeit des Messbereichs von WHEELWATCH bei einer Streckenmessung in horizontaler Richtung mit einer Sollverschiebung von 0,5mm

Abbildung 5.26: Ergebnis des Testverfahrens für Einzelmessungen mit dem Systems WHEELWATCH

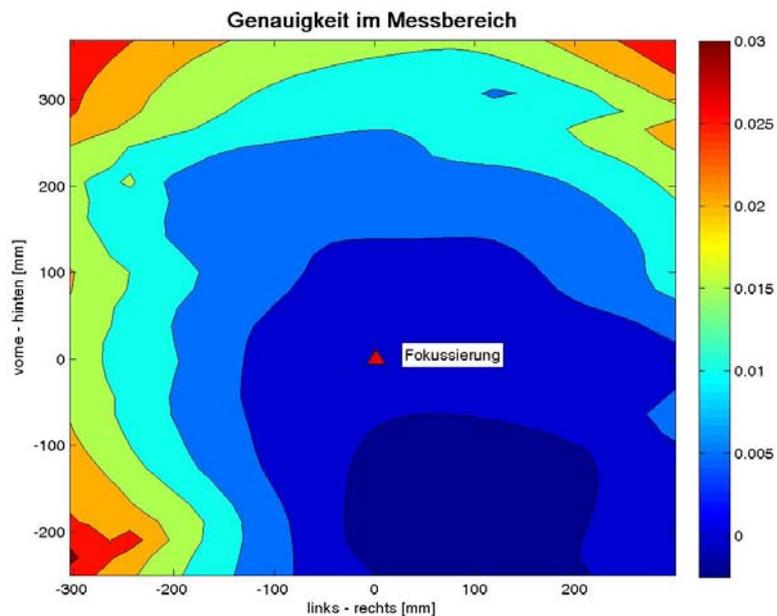
Als nächstes findet die Auswertung der Testreihe TestWW\_6 statt. Die berechnete Genauigkeitsverteilung der Einzelmessung variiert in einer Größenordnung von  $3\mu\text{m}$  bis  $17\mu\text{m}$  (s. Abbildung 5.26b). Die Standardabweichung der Distanzen bei einer horizontalen Verschieberichtung verschlechtert sich von der Wiederholungsmessung zu der Einzelmessung nur um maximal  $4\mu\text{m}$ . Der Vergleich zwischen Wiederholungsmessung und Einzelmessung zeigt, dass der Genauigkeitsverlauf ähnlich ist. Allerdings ist die Standardabweichung einer Einzelmessung größer.

**Ergebnisse zum System MOVEINSPECT.** Dieser Abschnitt stellt die Auswertung der Testreihen mit dem Onlinemesssystem MOVEINSPECT dar. Zunächst werden allgemeine Aussagen zu der Auswertung der einzelnen Messreihen nach Abschnitt 5.3.1 innerhalb der Testreihen mit MOVEINSPECT getroffen. Danach geht der Paragraph „Wiederholungsmessungen“ auf die Testreihen TestML\_3 und TestML\_4 ein. Die Testreihen TestML\_5 und TestML\_6 stellt der Abschnitt „Einzelmessung“ dar.

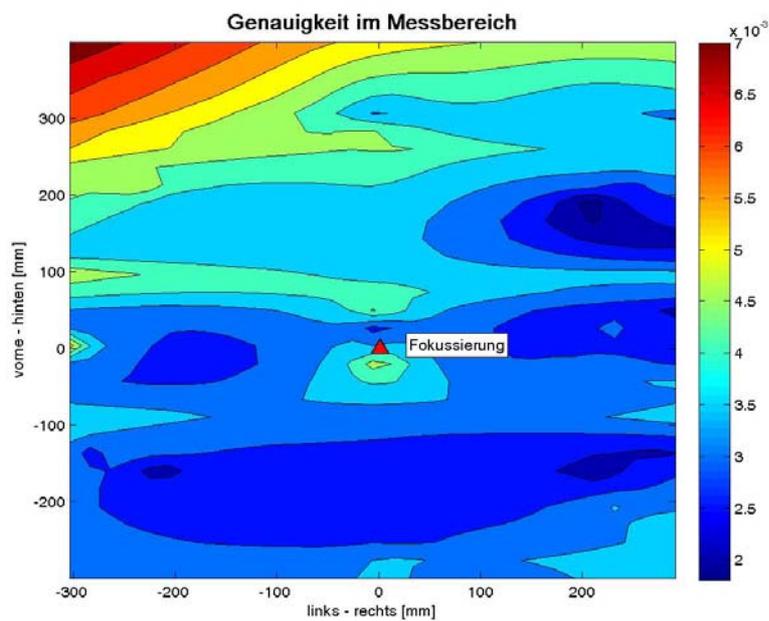
Im Allgemeinen gelten für die Auswertung der einzelnen Messreihen des Messsystems MOVEINSPECT die gleichen Aussagen wie für das System WHEELWATCH. Diese Aussagen in Bezug zu den Ergebnissen der Hypothesentests gibt der erste Teil des Abschnitts 5.3.2.3 wieder. Bei der Auswertung der Messreihen einer Distanzmessung in Aufnahme-richtung (Testreihen TestML\_3 und TestML\_5) liegt bei den Messungen mit MOVEINSPECT allerdings eine Auffälligkeit vor. Bei jeweils der dritten Messreihe dieser beiden Testreihen werden alle Nullhypothesen der durchgeführten Tests abgelehnt. Aufgrund dieser Ergebnisse der Hypothesentests werden diese Messreihen näher untersucht. Im Folgenden wird lediglich die Messreihe drei der Testreihe TestML\_3 überprüft, da sich die Testreihe der Einzelmessung TestML\_5 aus dieser ableitet.

Der Mittelwert und der Median der Distanzen der dritten Messreihe in Aufnahme-richtung weichen um  $0,1\text{mm}$  voneinander ab und die berechnete Standardabweichung beträgt  $\hat{\sigma}_D = 241\mu\text{m}$ . Fließen die detektierten Ausreißer nicht mit in die Berechnung der Standardabweichung ein, verringert sich diese auf  $\hat{\sigma}_D = 123\mu\text{m}$ . Die anderen Messreihen, bei denen Mittelwert und Median durchschnittlich um  $1\mu\text{m}$  voneinander abweichen, besitzen eine Standardabweichung mit Ausreißern zwischen  $3\mu\text{m}$  und  $38\mu\text{m}$ . Der Unterschied zwischen der Standardabweichung vor und nach Elimination der Ausreißer beträgt maximal wenige Mikrometer. Damit sind diese Kennwerte der dritten Messreihe deutlich höher als die der übrigen. In der Ergebnisdatei der Messreihe ist sichtbar, dass der Adapter nur bei etwa einem Zehntel aller Messungen erkannt wird. Aus diesem Grund fließt diese Messreihe an der Position drei, sowohl für die Auswertung der Wiederholungsmessungen als auch bei der Betrachtung von Einzelmessungen, nicht weiter in das Ergebnis des Ordinary Krigings ein.

**Wiederholungsmessungen mit MOVEINSPECT.** Das Auswertungsergebnis zur Genauigkeitsbetrachtung im gesamten Aufnahmebereich von MOVEINSPECT (Auswertung nach Abschnitt 5.3.1) gibt die Abbildung 5.27 für Wiederholungsmessungen wieder. Dieses wird zunächst für Wiederholungsmessungen bei einer Bewegung in Aufnahme-



(a) Distanzgenauigkeit des Messbereichs von MOVEINSPECT bei einer Streckenmessung in Aufnahme­richtung mit einer Sollverschiebung von 0,5mm



(b) Distanzgenauigkeit des Messbereichs von MOVEINSPECT bei einer Streckenmessung in horizontaler Richtung mit einer Sollverschiebung von 0,5mm

Abbildung 5.27: Ergebnis des Testverfahrens für Wiederholungsmessungen mit dem Systems MOVEINSPECT

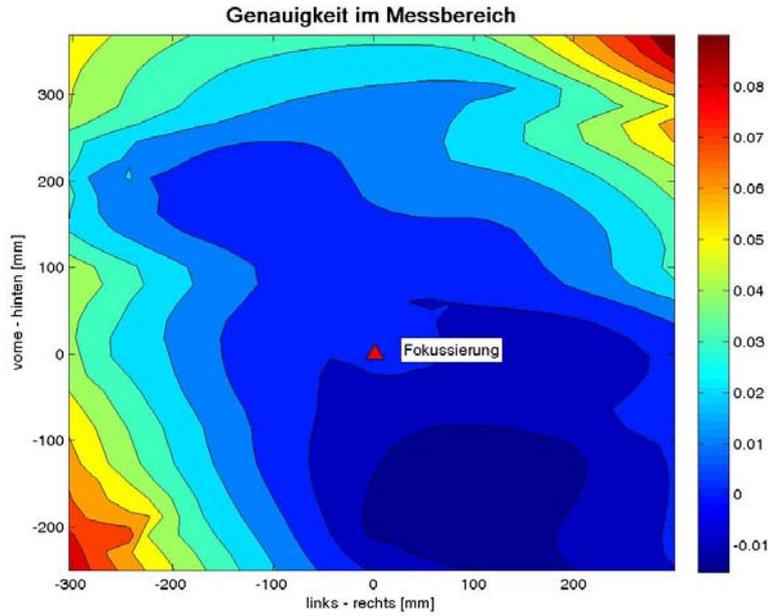
merichtung beschrieben. Für die Sollverschiebung von 0,5mm in Aufnahme- richtung ergeben sich in einem Messbereich von ca. 600mm × 600mm Standardabweichungen im Bereich zwischen 3µm und 38µm. Die Genauigkeitsverteilung im Messbereich ist in Abbildung 5.27a dargestellt. Es ist auffällig, dass die Verteilung nicht symmetrisch zur y-Achse des Testkoordinatensystems ist, wie es bei WHEELWATCH der Fall ist. Dies liegt am Aufbau der beiden Kameras. Die Kameras sind leicht zueinander gedreht. Falls dies nicht symmetrisch ist, wirkt sich das auf die Bildbereiche der Kameras aus und somit auf die Genauigkeit in den unterschiedlichen Bereichen. Bei dieser Messung liegt in einem Bereich von 400mm Breite und etwa 350mm Tiefe eine gleichbleibende Genauigkeit von ca. 3µm vor. Zu den Randbereichen des gesamten Messbereichs hin steigt die Standardabweichung kontinuierlich auf bis zu 27µm an.

Als nächstes liefert der folgende Abschnitt das Genauigkeitsverhalten von MOVEINSPECT bei einer horizontalen Bewegungsrichtung. Im gesamten Messbereich des Systems liegt die Genauigkeit im Bereich von 2µm bis 7µm. Damit ist die Standardabweichung der Distanzaufnahme parallel zur Basis von MOVEINSPECT um den Faktor 4,5 besser als in Aufnahme- richtung. In dem vorderen Messbereich in einer Entfernung von 500mm bis zu 900mm vom Messsystem (s. Zeichnung 5.27b Bereich von -300mm bis +100mm) werden Distanzen mit einer Standardabweichung von 2µm bis 3µm gemessen. Dies wird auch zum rechten und linken Rand des Messbereichs hin nur unmerklich schlechter. Mit zunehmender Entfernung nimmt im hinteren Teil die Genauigkeit ab. Im hinteren rechten Bereich (Messposition 5) liegt die Standardabweichung bei bis zu 5µm. Dagegen sinkt die Genauigkeit im hinteren linken Teil (Messposition 3) auf eine Standardabweichung von 7µm ab. Hier ist wieder die zuvor erwähnte Asymmetrie wie bei der Bewegung in Aufnahme- richtung erkennbar.

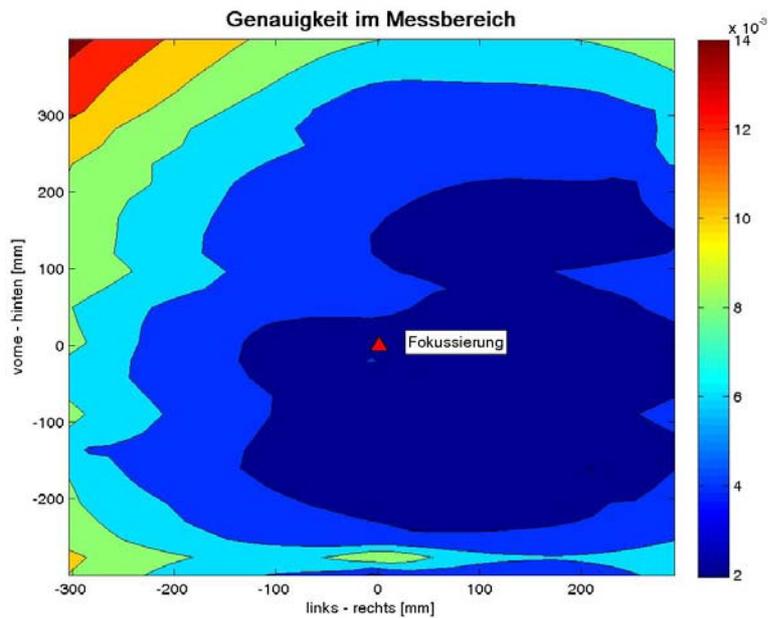
**Einzelmessung mit MOVEINSPECT.** Als nächstes zeigt dieser Paragraph die Genauigkeit von Distanzen bei Einzelmessungen. Sowohl bei den Distanzmessungen in Aufnahme- richtung als auch bei den horizontalen Distanzaufnahmen verläuft die Genauigkeitsverteilung einer Einzelmessung genauso wie die der Wiederholungsmessungen. Allerdings unterscheiden sich die Verteilungen in Bezug auf die Größenordnung der Standardabweichungen.

Die Genauigkeit einer Einzelmessung in Aufnahme- richtung liegt im Bereich von 3µm bis zu 44µm (Testreihe TestMI\_5). Dies bedeutet, dass auch bei MOVEINSPECT eine Verschlechterung um etwa den Faktor zwei von Wiederholungsmessung zu Einzelmessung vorliegt. An den Messpositionen drei und fünf (linke und rechte hintere Ecke) zeigt diese Testreihe allerdings schlechtere Standardabweichungen von bis zu 99µm. An diesen Stellen besteht sogar eine Verschlechterung um den Faktor vier. Da an der Messposition drei keine konstanten Messungen durchgeführt werden konnten, ist zu vermuten, dass auch an der Messposition fünf die codierten Marken schlecht erkannt werden.

Als nächstes fasst dieser Abschnitt die Ergebnisse einer Einzelmessung mit einer horizontalen Verschiebung kurz zusammen. Ähnlich wie bei WHEELWATCH ist kein signifikanter Unterschied zwischen Wiederholungsmessungen und Einzelmessung bei der



(a) Distanzgenauigkeit des Messbereichs von MOVEINSPECT bei einer Streckmessung in Aufnahme­richtung mit einer Sollverschiebung von 0,5mm



(b) Distanzgenauigkeit des Messbereichs von MOVEINSPECT bei einer Streckmessung in horizontaler Richtung mit einer Sollverschiebung von 0,5mm

Abbildung 5.28: Ergebnis des Testverfahrens für Einzelmessungen mit dem Systems MOVEINSPECT

Genauigkeit einer horizontalen Bewegung zu erkennen. Die Standardabweichung einer Einzelmessung liegt im gesamten Messbereich zwischen  $3\mu\text{m}$  und  $9\mu\text{m}$ . Dies ist lediglich eine Verschlechterung um  $2\mu\text{m}$  im Vergleich zu der Genauigkeit der Wiederholungsmessungen.

## 5.4 Fazit der Untersuchungen der Distanzgenauigkeit

Die Genauigkeit der Systeme ist von verschiedenen Faktoren abhängig. Hierzu gehören unter anderem die Aufnahmegeometrie und die Richtung der Distanzmessungen sowie die Verwendung von Wiederholungsmessungen oder einer Einzelmessung.

Vom Hersteller liegt für beide Messsysteme die Angabe von  $0,14\text{mm}$  für die Distanzgenauigkeit vor. Die Genauigkeitsergebnisse der Testreihen bestätigen diesen Wert als obere Grenze, die von den ermittelten Standardabweichungen nicht überschritten wird. Die größte berechnete Standardabweichung einer Einzelmessung des Systems WHEELWATCH beträgt  $101\mu\text{m}$ . Für das System MOVEINSPECT liegt dieser Wert bei  $99\mu\text{m}$ . Diese ermittelten Genauigkeitsangaben gelten für eine Fokussierung von  $800\text{mm}$  und bedingt dadurch zu einem horizontalen Messbereich von  $800\text{mm} \times 800\text{mm}$  des Systems WHEELWATCH beziehungsweise  $600\text{mm} \times 600\text{mm}$  des Systems MOVEINSPECT. Des Weiteren beziehen sich diese Werte auf eine Adaptermessung.

Unter idealen Bedingungen erreichen beide Systeme eine Genauigkeit der Distanzen von wenigen Mikrometern. Für ideale Messbedingungen befindet sich das Messobjekt im optimalen Messbereich des jeweiligen Systems. Dieser Bereich liegt bei einem maximalen Abstand des Kamerasystems zum Objekt von  $800\text{mm}$ . Dies entspricht dem hier gewählten Fokussierbereich. Die Breite des optimalen Messbereichs beträgt ungefähr  $400\text{mm}$ . Außerdem reduziert sich die Standardabweichung, wenn Wiederholungsmessungen statt einer Einzelmessung durchgeführt werden. Der Unterschied zwischen Wiederholungsmessung und Einzelmessung liegt bei einer Bewegung in Aufnahme­richtung bei einem Faktor von zwei. Die horizontale Bewegung zeigt hier keine signifikante Veränderung der Standardabweichungen. Dies zeigt, dass auch die Bewegungsrichtung der Distanzmessung einen Einfluss auf die ermittelte Genauigkeit besitzt. Zwischen einer Distanzmessung in Aufnahme­richtung und in horizontale Bewegungsrichtung liefert die Auswertung des Genauigkeitstests einen Faktor von 4 bis 4,5 als Unterschied in den Standardabweichungen. Die Bewegung in Aufnahme­richtung wird hierbei von beiden Systemen schlechter gemessen. Aufgrund dieser großen Unterschiede der Standardabweichungen in der Bewegungsrichtung und innerhalb des Messvolumens ist es schwierig, einen einheitlichen Genauigkeitswert für die Systeme festzulegen. Es bietet sich an, die Standardabweichung der Messsysteme, die mindestens oder höchstens erreicht werden kann, anzugeben. Für das Testverfahren bedeutet dies, dass das verwendete stochastische Modell in Hinblick auf einen entfernungs- und richtungsabhängigen a priori Wert angepasst werden müsste.

Mit Kenntnis über die Objektgröße und der hiermit verbundenen Fokussierung sowie der Position des Objekts zum Kamerasystem ist eine bessere Genauigkeit als der Her-

stellerwert mit den Onlinemesssystemen WHEELWATCH und MOVEINSPECT möglich. Außerdem ist das System MOVEINSPECT bei der Bestimmung der Distanzen durchschnittlich um den Faktor 1,5 bis 2 besser als WHEELWATCH.

## 6 Ausblick

Die Onlinemesssysteme MOVEINSPECT und WHEELWATCH sind photogrammetrische Systeme, die in vielen verschiedenen Gebieten eingesetzt werden können. Die in den letzten Abschnitten durchgeführten Tests berücksichtigen lediglich einen kleinen Teil der möglichen Aufnahmegeometrien und Einsatzmöglichkeiten dieser Systeme. Dieser Abschnitt führt einige Aspekte auf, die als Erweiterung der vorliegenden Untersuchungen als sinnvoll erachtet werden. Des Weiteren werden anschließend Vorschläge zur Verbesserung der entwickelten Testverfahren vorgestellt.

### 6.1 Weiterführende Genauigkeitsuntersuchungen

Die erste Erweiterungsmöglichkeit besteht in der Untersuchung von Distanzen und Winkeln bei kontinuierlichen Messreihen. Diese Untersuchungen wurden hier auf Grund der fehlenden Synchronisation nicht weiter ausgeführt. Aufgrund dessen, dass die Onlinemesssysteme für die Aufnahme von dynamischen Vorgängen ausgelegt sind, sollte dieser Aspekt auch bei den Genauigkeitstests berücksichtigt werden. Prinzipiell ist die entwickelte Software für die Testverfahren in der Lage statische wie auch kontinuierliche Messreihen auszuwerten. Mit der Synchronisation ist auch die Abspeicherung der Istwerte der Lineareinheit erforderlich. Diese sind im Anschluss noch in die Auswertesoftware zu integrieren.

Eine weitere Untersuchung in Bezug auf die Genauigkeit von Winkeln besteht in der Durchführung von Testreihen mit dem Radadapter der Firma AICON 3D Systems GmbH (s. Abbildung 7.1 auf Seite 116). Die Besonderheit dieses Adapters sind vier Pyramiden, die auf einer Ebene angebracht sind. Diese Pyramiden ermöglichen den Onlinemesssystemen den Messbereich der Winkelmessungen zu vergrößern. Allerdings sind die Onlinemesssysteme bedingt durch diese Pyramidenstruktur nicht mehr in der Lage alle Anco-Marken, die zu einem Radadapter gehören, gleichzeitig im Bild messen zu können. Bei der Untersuchung ist deshalb von Interesse, welchen Einfluss diese Verdeckung auf das Messergebnis besitzt. Außerdem liegen die Anco-Marken durch die Pyramiden nicht mehr in einer Ebene. In wie weit diese Tatsache einen Einfluss auf die Ergebnisse von Winkel- und der Distanzmessungen hat, kann ebenfalls durch weitere Testreihen untersucht werden.

Eine weitere Einsatzmöglichkeit der Onlinemesssysteme besteht in der Detektion von Bewegungsänderungen eines Objekts bezogen auf ein Referenzobjekt. Dabei nehmen die Systeme das starre Referenzobjekt als auch das bewegliche Objekt gleichzeitig auf. Diese Referenzbewegungen fließen bisher in keinsten Weise in den Genauigkeitstest mit

ein. Da diese Messungen in der Praxis zum Einsatz kommen, ist eine Berücksichtigung dieser Konfiguration im Testverfahren sinnvoll.

Das Messsystem MOVEINSPECT ist in der Lage neben Adaptern auch uncodierte Einzelpunkte zu messen. In den vorliegenden Tests sollte der Unterschied zwischen den beiden Systemen MOVEINSPECT und WHEELWATCH untersucht werden. Da WHEELWATCH nicht in der Lage ist Einzelpunkte zu messen, ist bei den vorliegenden Tests auf diese Messungen auch bei MOVEINSPECT verzichtet worden. Für das System MOVEINSPECT ist diese weiterführende Untersuchung jedoch sinnvoll. Dafür muss die Software dahingehend erweitert werden, dass die Auswertung von Einzelpunktmessungen in die Benutzeroberfläche integriert wird. Bisher besteht die Möglichkeit innerhalb des Quellcodes mehrere gekennzeichnete Zeilen einzukommentieren, um diese Auswertung durchzuführen.

## 6.2 Verbesserungsvorschläge der entwickelten Testverfahren

Die bisher durchgeführten Tests haben gezeigt, dass es sinnvoll ist die a priori Angaben der Genauigkeiten anzupassen. Diese Anpassung ist jedoch von verschiedenen Faktoren abhängig. So zum Beispiel von der Position des Objekts in Bezug auf die Onlinemesssysteme. Die Software kann dahingehend erweitert werden, dass diese detaillierteren a priori Werte in die Auswertung mit einfließen.

Außerdem besteht über einen Algorithmus, der von dem Institut für Geodäsie und Geoinformation der Universität Bonn entwickelt wurde, die Möglichkeit den Test zu erweitern. Mit diesem so genannten „Benchmark“-Verfahren besteht die Möglichkeit des direkten Vergleichs verschiedener Messreihen, bei denen die sechs Orientierungsparameter der Kamera berechnet werden. Dabei setzt das „Benchmark“-Verfahren die Kovarianzmatrizen der Translationen und Rotationen zweier Datensätze miteinander in Verbindung. Diese stehen von den Onlinemesssystemen nicht zur Verfügung, weshalb dieses Verfahren noch nicht integriert werden konnte. Liegen diese vor, ergeben sich unter anderem die folgenden Kombinationsmöglichkeiten für die Gegenüberstellung von zwei Messreihen:

- Zwei Messreihen eines Systems an unterschiedlichen Positionen
- Zwei Messreihen eines Systems an der gleichen Position, aber mit unterschiedlicher Richtung der Distanzaufnahme
- Zwei Messreihen von zwei unterschiedlichen Systemen mit gleichem Messaufbau

Als Ergebnis liefert das Verfahren zum einen die Konsistenz  $c$  und das Genauigkeitsniveau  $p$ , die zum Vergleich der Systeme MOVEINSPECT und WHEELWATCH herangezogen werden können. Ein weiterer Vergleichswert ist die berechnete Standardabweichung der Differenzen. Aus diesen drei Werten kann eine Beurteilung darüber getroffen werden, welcher Datensatz eine bessere Genauigkeit besitzt. In Hinsicht auf den gesamten

Messbereich ist eine Beurteilung der Auswertergebnisse der Testreihen erforderlich. Hierzu ist eine Betrachtung der graphischen Veranschaulichung der Genauigkeitsverteilung sinnvoll. Die näheren Informationen dieses Verfahrens finden sich in (Dickscheid u. a., 2008) und (Läbe u. a., 2008).

Der Vorteil des „Benchmark“-Verfahrens gegenüber dem bisher entwickelten Testverfahren besteht darin, dass die Genauigkeit aller Orientierungsparameter miteinander verglichen wird. Die entwickelten Testverfahren gehen getrennt auf die Translations- beziehungsweise Rotationsparameter ein. Außerdem berücksichtigt das Testverfahren zur Überprüfung der Genauigkeiten von Winkeln lediglich die Rotation um die  $z$ -Achse.

## Teil II

# Räumlicher Rückwärtsschnitt

## 7 Einleitung des zweiten Teils

### 7.1 Motivation

Das Einkamerasystem WHEELWATCH basiert auf dem Verfahren des RRS zur Bestimmung der Parameter der ÄO. Aus diesen Parametern können dann die für die unterschiedlichen Anwendungsbeispiele benötigten Bewegungsänderungen abgeleitet werden. Mit dem bisherigen Algorithmus der Firma AICON 3D Systems GmbH für das System WHEELWATCH ist es möglich eine Bewegung in Echtzeit zu messen und auszuwerten. Eine Gewährleistung der Echtzeitfähigkeit soll auch in Zukunft mit leistungsfähigerer und schnellerer Informationstechnologischer Ausstattung (IT-Ausstattung) vorliegen. Eine höhere Rechnerleistung hat eine Laufzeitverringerung der verschiedenen Algorithmen zur Folge. Damit diese Laufzeit nicht zum zeitbegrenzenden Faktor wird, ist die Firma AICON 3D Systems GmbH daran interessiert den Algorithmus des RRS weiter zu entwickeln.

Bisher bestimmt die Firma AICON 3D Systems GmbH die Parameter der ÄO mittels eines iterativen Verfahrens. Dieses hat den Vorteil stabile Ergebnisse zu liefern. Allerdings benötigt das iterative Verfahren gute Näherungswerte, damit die Anzahl der Iterationen möglichst gering gehalten werden kann. Aus diesem Grund befasst sich dieser Teil der Arbeit mit verschiedenen direkten Lösungsansätzen des RRS, welches als Näherungsverfahren in den Algorithmus der Firma AICON 3D Systems GmbH eingebunden werden soll.

### 7.2 Aufgabenstellung

Aus der Motivation der Firma AICON 3D Systems GmbH heraus, die Laufzeit für den RRS zu verringern, ergibt sich für diese Diplomarbeit die Aufgabe eine echtzeitfähige direkte Lösung des RRS zu entwickeln. Außerdem sollte dieser Algorithmus bei dem speziellen Anwendungsfall von WHEELWATCH eine stabile Lösung liefern. Dies bedeutet, dass das aufzunehmende Objekt der in Abbildung 7.1 dargestellte Radadapter ist, über welchen die Parameter der ÄO bestimmt werden müssen.

Dieser Radadapter besteht ausschließlich aus codierten Marken. Die Decodierung dieser Marken erfolgt vor der Berechnung des RRS. Aus diesem Grund gelten für den Algorithmus folgende Voraussetzungen:

- Als Objekt liegt ein Radadapter vor, dessen codierte Anco-Marken in einem lokalen Objektkoordinatensystem bekannt sind.

- Im Bild gemessene Marken liegen decodiert im Bildsystem vor.
- Das Modell der IO der Firma AICON 3D Systems GmbH ist bekannt (s. Abschnitt 3.1.3.1) und alle benötigten Parameter stehen zur Verfügung.

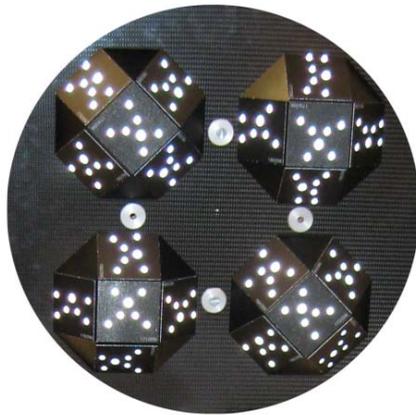


Abbildung 7.1: Radadapter der Firma AICON 3D Systems GmbH

### 7.3 Aufbau

Dieser Teil der Arbeit ist so gegliedert, dass der Abschnitt 8 zunächst drei Algorithmen vorstellt, die eine direkte Lösung des RRS darstellen. Von allen drei Algorithmen werden in diesem Abschnitt die Vorgehensweisen mit den benötigten Formeln beschrieben. Außerdem gibt dieser Abschnitt einen Überblick über die zusätzlichen Restriktionen der einzelnen Algorithmen. Innerhalb des nächsten Kapitels 9 erfolgt die Auswertung der drei Algorithmen auf ein allgemeines Fallbeispiel einer Legolandszene. Die Szenerie und damit verbundene geometrische Voraussetzungen dieses Beispiels werden ebenfalls kurz innerhalb des genannten Teils vorgestellt. Im darauffolgenden Abschnitt 10 wird die Problematik der drei entwickelten Algorithmen mit dem speziellen Anwendungsbeispiel des Systems WHEELWATCH der Firma AICON 3D Systems GmbH dargestellt. Außerdem findet eine Diskussion über mögliche Lösungsansätze statt, die die vorhandenen Schwierigkeiten versuchen zu lösen. Eine Zusammenfassung aller Kapitel dieses Teils bietet der Abschnitt 11. Außerdem enthält dieser einen Ausblick, wie die erzielten Ansätze noch weiter verbessert werden können und welche Voraussetzungen für diese geschaffen werden müssen.

## 8 Verfahren zur direkten Lösung des Räumlichen Rückwärtsschnitts

In dieser Arbeit werden drei Verfahren aufgezeigt, die eine direkte Lösung des RRS darstellen. Die Funktionsweisen und Voraussetzungen der Algorithmen sind sehr verschieden. Das erste Verfahren ermittelt die Parameter der ÄO in drei Schritten, wohingegen das zweite Verfahren ein Polynom vierten Grades als Hilfsmittel verwendet. Der letzte Algorithmus bestimmt die Parameter der ÄO mittels einer Singulärwertzerlegung (SVD). Alle drei Verfahren stellen spezielle Anforderungen an die Aufnahmekonfiguration beziehungsweise an das aufzunehmende Objekt. Die Vorstellung der Verfahren mit den jeweiligen Anforderungen und Voraussetzungen stellt dieser Abschnitt nacheinander vor.

### 8.1 Algorithmus A: Verfahren in drei Schritten

Dieser Abschnitt stellt eine Möglichkeit vor, um die Parameter der ÄO auf direktem Wege zu bestimmen. Ausgangspunkt dieses Verfahrens ist die Abbildungsgleichung, in der die Projektionsmatrix wie folgt aufgesplittet wird:

$$\mathbf{x}' = \mathbf{P}\mathbf{X} \quad (8.1)$$

$$= \mathbf{KR}[I_3 | -\mathbf{Z}]\mathbf{X} \quad (8.2)$$

mit

$\mathbf{x}'$	... gemessenen Bildkoordinaten
$\mathbf{X}$	... Objektkoordinaten
$\mathbf{P}$	... Projektionsmatrix
$\mathbf{K}$	... Kalibriermatrix
$\mathbf{R}$	... Rotationsmatrix zwischen Objekt- und Kamerasystem
$I_3$	... $3 \times 3$ Einheitsmatrix
$\mathbf{Z}$	... Projektionszentrum

In dieser Gleichung ist die Rotationsmatrix und das Projektionszentrum unbekannt, welche nacheinander in den drei folgenden Schritten bestimmt werden:

1. Bestimmung der Rotationsparameter
  - (a) Drehung der Bildebene in den Normalfall  $\rightarrow {}^k R_n$
  - (b) Drehung des Kamerasystems, so dass alle drei Achsen dieses Systems parallel zu denen des Objektsystems liegen  $\rightarrow {}^n R_p$
2. Bestimmung der Translationsparameter (Projektionszentrum)  $\rightarrow \mathbf{Z}$

Damit diese drei Schritte ausgeführt werden können, splittet sich die Gleichung 8.2 wie folgt auf:

$$\mathbf{x}' = \mathbf{K}^k R_n {}^n R_p [I_3] - \mathbf{Z} \mathbf{X} \quad (8.3)$$

$$(8.4)$$

mit

- $\mathbf{x}'$     ... gemessenen Bildkoordinaten
- $\mathbf{X}$     ... Objektkoordinaten
- $\mathbf{K}$     ... Kalibriermatrix
- ${}^k R_n$  ... Rotationsmatrix vom System  $S_k$  zum System  $S_n$
- ${}^n R_p$  ... Rotationsmatrix vom System  $S_n$  zum System  $S_p$
- $I_3$     ...  $3 \times 3$  Einheitsmatrix
- $\mathbf{Z}$     ... Projektionszentrum

Vor diesen Schritten müssen die Parameter der IO an die gemessenen Bildkoordinaten angebracht werden, so dass anschließend ideale Bildkoordinaten im Kamerasystem vorliegen. Die weiteren Schritte dieses Verfahrens setzen voraus, dass ideale Bildkoordinaten in die Berechnungen einfließen.

$${}^k \mathbf{x}' = \mathbf{K}^{-1} \mathbf{x} \quad (8.5)$$

mit

- ${}^k \mathbf{x}'$  ... ideale Bildkoordinaten im Kamerasystem  $S_k$
- $\mathbf{x}'$     ... unkorrigierte gemessene Bildkoordinaten
- $\mathbf{K}$     ... Kalibriermatrix

Dies erfolgt im Allgemeinen über die Formel 8.5. Die Firma AICON 3D Systems GmbH bringt diese Parameter in einzelnen Schritten an. Diese spezielle Vorgehensweise ist im Anhang 3.1.3.1 nachzuschlagen. Für das hier vorgestellte Verfahren ist es gleichgültig, wie das Modell der IO aussieht. Voraussetzung für den Algorithmus ist nur, dass ideale Bildkoordinaten vorliegen.

### 8.1.1 Rotation in den Normalfall

In der Luftbildphotogrammetrie oder bei der Aufnahme von ebenen Objekten gibt es die Aufnahmekonfiguration des Normalfalls. Darunter ist zu verstehen, dass die Bildebene parallel zu der Objektebene liegt. Im Falle der Luftbildphotogrammetrie liegt die Bildebene also parallel zur Erdoberfläche, wie in Abbildung 8.1 ersichtlich ist. Diese

Konfiguration wird hier auf dreidimensionale Objekte erweitert. Bei dreidimensionalen Objekten liegen prinzipiell drei Koordinatenebenen vor, zu denen die Bildebene parallel gedreht werden kann. Die Wahl der Koordinatenebene hängt hier von den Voraussetzungen des Berechnungsschemas ab.

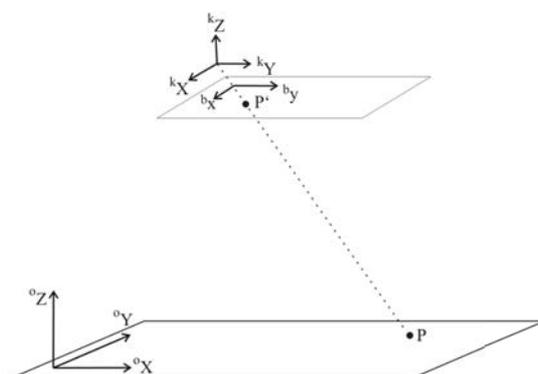
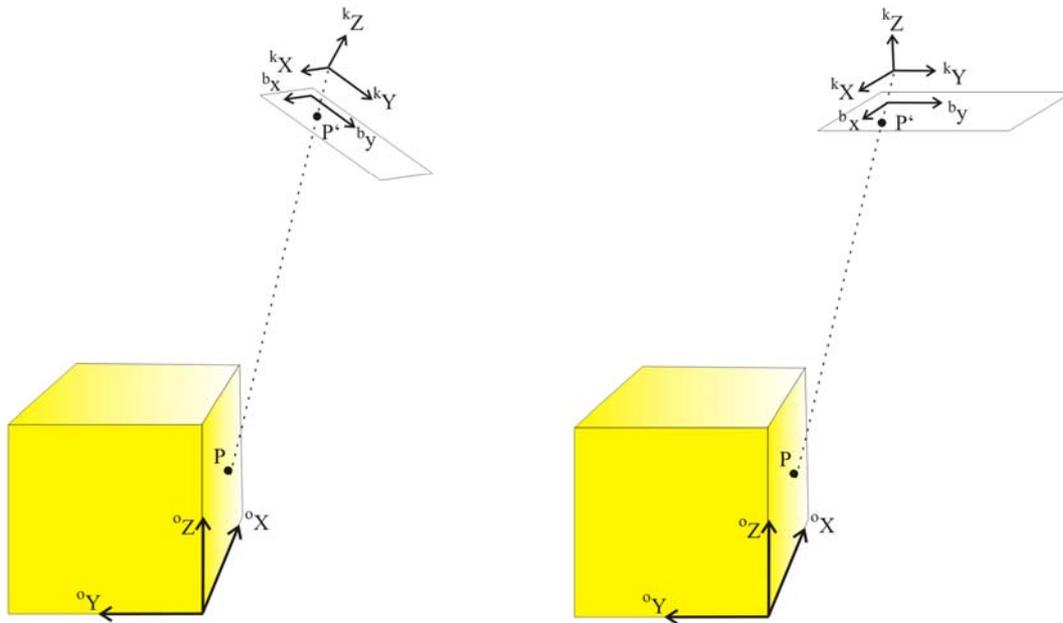


Abbildung 8.1: Normalfall in der Luftbildphotogrammetrie

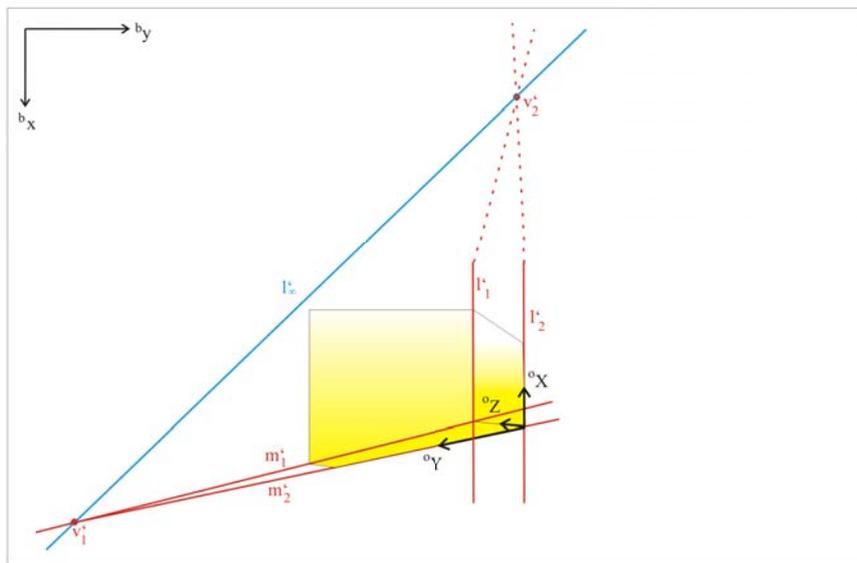
Der Algorithmus setzt voraus, dass im Objekt zwei Parallelenpaare vorliegen, die im Bild sichtbar sind (s. Abbildung 8.2c). Aus denen im Bild abgebildeten Parallelenpaaren können zwei Fluchpunkte  $\mathbf{v}'$  berechnet werden. Diese beiden unendlich fernen Punkte, repräsentieren innerhalb der Bildebene zwei Positionen des abgebildeten Horizonts. Daraus folgt, dass die Verbindungslinie  $l'_\infty$  der beiden Fluchpunkte das Bild des Horizonts innerhalb der Bildebene darstellt. Dieses Abbild des Horizonts bestimmt nun die Objektebene, zu welcher die Bildebene parallel gedreht werden soll. Der in der Bildebene abgebildete Horizont liegt innerhalb einer der drei Ebenen des Objektkoordinatensystems. Zu dieser Koordinatenebene wird die Bildebene parallel gedreht. Zur Verdeutlichung dieser Geometrien dienen die Graphiken 8.2. Innerhalb dieser wird die Bildebene parallel zur  $xy$ -Ebene des Objektsystems gedreht. Die mathematischen Berechnungen, über welche aus den zwei abgebildeten Parallelenpaaren im Bild das Abbild des Horizonts bestimmt werden kann, befinden sich im Anhang B.2.

Für das Berechnungsschema des Algorithmus ist es nun erforderlich aus den gerade geschilderten geometrischen Beziehungen die korrekte Rotationsmatrix  ${}^kR_n$  abzuleiten. Das Ziel dieser Matrix ist es die Bildebene in den hier definierten Normalfall zu drehen. Die Ermittlung der Rotationsmatrix  ${}^kR_n$  erfolgt dabei über ein Quaternion  ${}^n\mathbf{q}$ , welches sich aus der Darstellung einer Rotationsachse  ${}^n\mathbf{r}$  und eines Rotationswinkels  ${}^n\omega$  ableitet. Dabei werden die Berechnungsschritte, wie man von einer Rotationsachse und einem Rotationswinkel eine Rotationsmatrix aufstellt, als bekannt vorausgesetzt. Sie können gegebenenfalls im Anhang B.1 oder in (Förstner, 2008) nachgelesen werden.



(a) Allgemeinfall der Abbildung

(b) Normalfall: Bildebene parallel zur xy-Ebene des Objektsystems



(c) Bild des Objekts mit geometrischen Zusammenhängen

Abbildung 8.2: Geometrische Zusammenhänge der Rotation in den hier definierten Normalfall.

### 8.1.1.1 Bestimmung der Rotationsachse

Ausgangspunkt für die Berechnung der Rotationsachse ist das Abbild der unendlich fernen Geraden, also des Horizonts, innerhalb der Bildebene. Diese Gerade liegt in der Normalenform

$$\mathbf{I}'_{\infty} = \begin{bmatrix} \cos \alpha \\ \sin \alpha \\ -d \end{bmatrix} \quad (8.6)$$

mit

$\mathbf{I}'_{\infty}$  ... Abbild der unendlich fernen Geraden im Bild in der Normalenform  
 $\alpha$  ... Richtungswinkel der Geraden  
 $d$  ... Abstand der Geraden zum Ursprung

vor. Über die Formel

$$\mathbf{v}'_l = \mathbf{C}_{\perp} \mathbf{I}'_{\infty}, \text{ mit } \mathbf{C}_{\perp} = \begin{bmatrix} 0 & -1 & 0 \\ 1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 \end{bmatrix} \quad (8.7)$$

(8.8)

mit

$\mathbf{v}'_l$  ... Richtung der unendlich fernen Geraden im Bild  
 $\mathbf{I}'_{\infty}$  ... Abbildung der unendlich fernen Geraden im Bild  
 $\mathbf{C}_{\perp}$  ... Matrix zur Bestimmung der Orthogonalen einer Geraden

ermittelt sich die Richtung der unendlich fernen Geraden im Bild. Diese Richtung entspricht gleichzeitig der Richtung der gesuchten Rotationsachse  ${}^n\mathbf{r}$ . Im Unterschied zum Abbild der unendlich fernen Geraden im Bild verläuft die Rotationsachse durch den Ursprung des Kamerakoordinatensystems. Aus diesem Grund erfolgt eine sphärische Normierung der Richtung der unendlich fernen Geraden im Bild  $\mathbf{v}'_l$ , da in dieser Darstellung der Abstand zum Ursprung und die Richtung der Geraden direkt abgelesen werden können (s. Formel 8.9). Die Rotationsachse setzt sich dann aus der Richtung der unendlich fernen Geraden im Bild und dem Abstand Null zum Ursprung des Kamerakoordinatensystems zusammen (s. Formel 8.11).

$$\mathbf{v}'_l = \begin{bmatrix} \mathbf{v}'_{l_h} \\ v'_{l_0} \end{bmatrix} \quad (8.9)$$

$$\Rightarrow \mathbf{v}'_{\text{norm}} = \frac{1}{|\mathbf{v}'_{l_h}|} \mathbf{v}'_l = \begin{bmatrix} \mathbf{v}'_{\text{norm}_h} \\ v'_{\text{norm}_0} \end{bmatrix} \quad (8.10)$$

$$\Rightarrow {}^n \mathbf{r} = \begin{bmatrix} \mathbf{v}'_{\text{norm}_h} \\ 0 \end{bmatrix} \quad (8.11)$$

- $\mathbf{v}'_l$  ... Richtung der unendlich fernen Geraden im Bild mit ihrem homogenen  $\mathbf{v}'_{l_h}$  und euklidischen  $v'_{l_0}$  Anteil
- $\mathbf{v}'_{\text{norm}}$  ... sphärisch normierte Richtung der unendlich fernen Geraden im Bild mit ihrem homogenen  $\mathbf{v}'_{\text{norm}_h}$  und euklidischen  $v'_{\text{norm}_0}$  Anteil
- ${}^n \mathbf{r}$  ... Rotationsachse

### 8.1.1.2 Bestimmung des Rotationswinkels

Für die Ermittlung des Rotationswinkels werden die Kamerakonstante und der Abstand des Bildes der unendlich fernen Geraden zum Ursprung des Kamerakoordinatensystems benötigt. Angesichts dessen, dass diese Berechnungen hier mit den idealen Bildkoordinaten im Kamerasystem erfolgen, hat die Kamerakonstante  $c$  den Wert eins. Der Abstand des Abbilds der unendlich fernen Geraden zum Ursprung des Kamerasystems kann aus deren Normalenform dieser Geraden direkt abgegriffen werden (s. Formel 8.6). Der negative Abstand  $d$  entspricht dem dritten Element dieser Darstellung. Aus diesen beiden Größen ermittelt sich der Rotationswinkel über

$${}^n \omega = \arctan \frac{d}{c}, \text{ mit } c = 1 \quad (8.12)$$

mit

- ${}^n \omega$  ... Rotationswinkel
- $d$  ... Abstand der Rotationsachse zum Ursprung
- $c$  ... Kamerakonstante.

### 8.1.1.3 Transformation der Bildkoordinaten in den Normalfall

Sobald die Rotationsmatrix bekannt ist, wird diese an die Bildkoordinaten angebracht. Die Transformation der Bildkoordinaten in den Normalfall erfolgt über die Formel 8.13 mit anschließender Normierung der Bildkoordinaten (s. Formel 8.14).

$${}^n\mathbf{x}' = {}^nR_k {}^k\mathbf{x}' \quad (8.13)$$

$${}^n\mathbf{x}' = \frac{{}^nx'_o}{{}^nx'_h} \quad (8.14)$$

mit

- ${}^n\mathbf{x}'$  ... in den Normalfall transformierte homogene Bildkoordinaten
- ${}^nR_k$  ... Rotationsmatrix zur Drehung in den Normalfall
- ${}^k\mathbf{x}'$  ... ideale Bildkoordinaten im Kamerasystem

### 8.1.2 Rotation zu parallelen Kamera- und Objektsystemen

Im letzten Schritt wurde das Kamerasystem bereits in den Normalfall gedreht. Dies hat zur Folge, dass die z-Achsen des Kamera- und des Objektsystems Parallelen darstellen. Als nächstes soll erreicht werden, dass auch die x- und die y-Achsen der Systems parallel zueinander verlaufen. Dafür ist eine weitere Rotation nötig. In der Graphik 8.3 ist die Situation vor und nach der zweiten Rotation graphisch veranschaulicht.

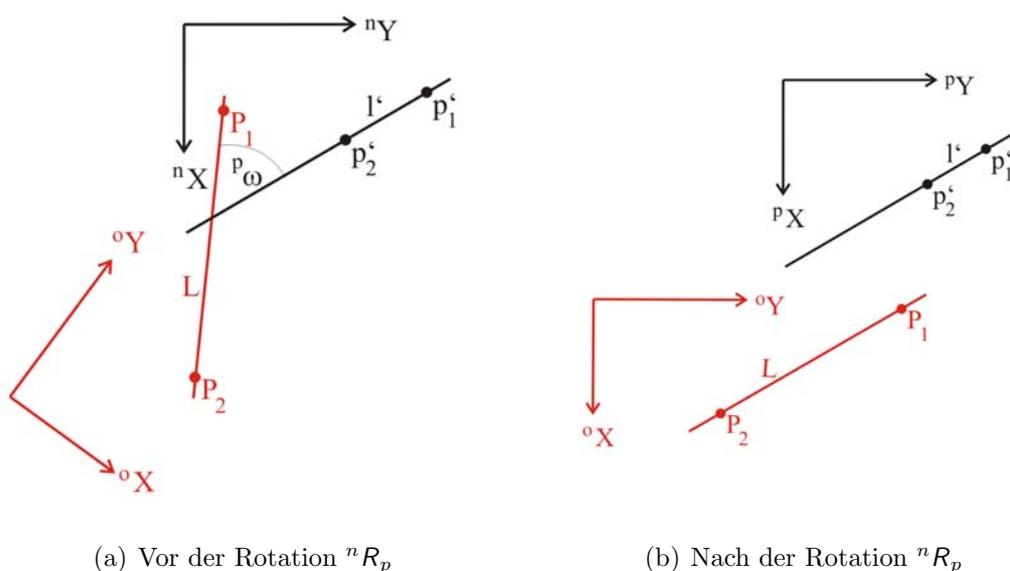


Abbildung 8.3: Geometrischer Zusammenhang der Rotation  ${}^nR_p$ , die bewirkt, dass alle Achsen des Kamera- und des Objektsystem parallel verlaufen.

Dieser Abbildung ist ebenfalls zu entnehmen, dass die zweite Rotation um die z-Achse des Kamerasystems erfolgt. Diese Achse entspricht demnach der Rotationsachse  ${}^p\mathbf{r}$ .

$${}^p\mathbf{r} = \mathbf{e}^{(3)} = \begin{bmatrix} 0 \\ 0 \\ 1 \end{bmatrix} \quad (8.15)$$

mit

${}^p\mathbf{r}$  ... Rotationsachse  
 $\mathbf{e}^{(3)}$  ... Einheitsvektor

Anschließend muss der Rotationswinkel bestimmt werden. Dieser berechnet sich aus dem Winkel zwischen zwei korrespondierenden Geraden. Die erste Gerade befindet sich im Objektsystem und die zweite im Kamerasystem, welches in den Normalfall gedreht ist (s. Abbildung 8.3). In diesen beiden Systemen werden jeweils zwei korrespondierende Punkte ausgewählt, aus deren Schnitt sich die beiden benötigten Geraden berechnen lassen.

Wie oben bereits erwähnt, liegen die xy-Ebenen des Kamera- und des Objektsystems bereits parallel zueinander. Aus diesem Grund sind die z-Komponenten der Objektkoordinaten für die Bestimmung des Rotationswinkels irrelevant und können zu Null gesetzt werden. Deshalb berechnen sich die beiden benötigten Geraden über

$${}^n\mathbf{m}' = {}^n\mathbf{x}'_1 \times {}^n\mathbf{x}'_2 \quad (8.16)$$

$$\mathbf{M} = \mathbf{X}_1 \times \mathbf{X}_2 = \begin{bmatrix} X_1 \\ Y_1 \\ 0 \end{bmatrix} \times \begin{bmatrix} X_2 \\ Y_1 \\ 0 \end{bmatrix} \quad (8.17)$$

mit

${}^n\mathbf{m}'$  ... Gerade im System  $S_n$   
 $\mathbf{M}$  ... Gerade in der xy-Ebene des Objektsystems  
 ${}^n\mathbf{x}'_1, {}^n\mathbf{x}'_2$  ... homogenisierte Bildkoordinaten im Normalfall  
 $\mathbf{X}_1, \mathbf{X}_2$  ... Objektkoordinaten

Aus den Richtungen dieser zweidimensionalen Geraden berechnet sich der Rotationswinkel über die Formel 8.18.

$${}^p\omega = \arccos \left( \frac{|{}^n\mathbf{m}'_h \cdot \mathbf{M}_h|}{|{}^n\mathbf{m}'_h| |\mathbf{M}_h|} \right) \quad (8.18)$$

mit

${}^p\omega$  ... Rotationswinkel  
 ${}^n\mathbf{m}'_h$  ... homogener Anteil der Gerade  ${}^n\mathbf{m}'$   
 $\mathbf{M}_h$  ... homogener Anteil der Gerade  $\mathbf{M}$

Wie bei der Aufstellung der Rotationsmatrix  ${}^kR_n$ , kann nun die Rotationsmatrix  ${}^nR_p$  aus der Rotationsachse  ${}^p\mathbf{r}$  und dem dazugehörigen Rotationswinkel  ${}^p\omega$  aufgestellt werden (Formel s. Anhang B.1). Anschließend erfolgt die Transformation der Bildkoordinaten über die Formel

$${}^p\mathbf{x}' = {}^pR_n \quad {}^n\mathbf{x}' \quad (8.19)$$

mit

${}^p\mathbf{x}'$  ... Bildkoordinaten im Kamerasystem, dessen Achsen parallel zum Objektsystem liegen  
 ${}^n\mathbf{x}'$  ... in den Normalfall gedrehte Bildkoordinaten im Kamerasystem  
 ${}^pR_n$  ... Rotationsmatrix zur Drehung paralleler Koordinatensysteme.

### 8.1.3 Bestimmung des Projektionszentrums

Als Letztes erfolgt die Bestimmung der drei Translationsparameter. Diese entsprechen den Koordinaten des Projektionszentrums im Objektsystem. Dies geschieht über die Lösung der Gleichung

$$\lambda \quad {}^p\mathbf{x}' = [I_3 | -\mathbf{Z}] \quad \mathbf{X} \quad (8.20)$$

mit

$\lambda$  ... Faktor  
 ${}^p\mathbf{x}'$  ... Bildkoordinaten im Kamerasystem, dessen Achsen parallel zum Objektsystem liegen  
 $I_3$  ...  $3 \times 3$  Einheitsmatrix  
 $\mathbf{Z}$  ... Projektionszentrums  
 $\mathbf{X}$  ... Objektkoordinaten,

wozu jeweils zwei Objekt- und Bildpunkte

$$\mathbf{X}_1 = \begin{bmatrix} X_1 \\ Y_1 \\ Z_1 \\ 1 \end{bmatrix}, \mathbf{X}_2 = \begin{bmatrix} X_2 \\ Y_2 \\ Z_2 \\ 1 \end{bmatrix} \quad (8.21)$$

$${}^p\mathbf{x}'_1 = \begin{bmatrix} x_1 \\ y_1 \\ z_1 \end{bmatrix}, {}^p\mathbf{x}'_2 = \begin{bmatrix} x_2 \\ y_2 \\ z_2 \end{bmatrix} \quad (8.22)$$

$$(8.23)$$

mit

$\mathbf{X}_1, \mathbf{X}_2 \dots$  Objektkoordinaten

${}^p\mathbf{x}'_1, {}^p\mathbf{x}'_2 \dots$  Bildkoordinaten

benötigt werden, aus deren Komponenten sich dann das Projektionszentrums

$$\mathbf{Z} = \begin{bmatrix} U \\ V \\ W \end{bmatrix} \quad (8.24)$$

mit

$\mathbf{Z} \dots$  Projektionszentrums

über die Formeln

$$U = \frac{-x_1 z_2 X_2 + x_1 x_2 Z_2 - x_1 Z_1 x_2 + X_1 x_2 z_1}{-z_2 x_1 + x_2 z_1} \quad (8.25)$$

$$V = \frac{-y_1 z_2 X_2 + y_1 x_2 Z_2 - z_2 Y_1 x_1 + z_2 y_1 X_1 - Z_1 y_1 x_2 + x_1 Y_1 x_2}{-z_2 x_1 + x_2 z_1} \quad (8.26)$$

$$W = \frac{-Z_1 z_2 x_1 - z_1 z_2 X_2 + z_1 x_2 Z_2 + z_1 z_2 X_1}{-z_2 x_1 + x_2 z_1} \quad (8.27)$$

ermittelt.

## 8.2 Algorithmus B: Polynom vierten Grades

(Haralick u. a., 1994) entwickelte diesen Algorithmus. Deshalb wird im Folgenden nicht jeder einzelne Berechnungsschritt des Algorithmus aufgeführt. Dieser Abschnitt dient lediglich dazu die Vorgehensweise des Algorithmus aufzuzeigen, damit der Leser die Problemstellung in den Abschnitten 9 und 10 nachvollziehen kann. Alle weiterführenden Berechnungsschritte können entweder in (Haralick u. a., 1994) oder in (McGlone, 2004, S. 787-788) nachgeschlagen werden.

Für diesen Algorithmus werden zunächst drei Objektpunkte

$$\mathbf{X}_i = \begin{bmatrix} X_i \\ Y_i \\ Z_i \end{bmatrix}, \text{ mit } i = 1, 2, 3 \quad (8.28)$$

$\mathbf{X}_i$  ...  $i$ -te Objektkoordinate

in beliebiger Lage benötigt. Außerdem müssen die normierten Raumstrahlen der dazugehörigen Bildkoordinaten

$$\mathbf{x}'_i = \begin{bmatrix} u_i \\ v_i \\ 1 \end{bmatrix}, \text{ mit } i = 1, 2, 3 \quad (8.29)$$

$$\mathbf{m}'_i = \frac{\mathbf{K}^{-1}\mathbf{x}'_i}{|\mathbf{K}^{-1}\mathbf{x}'_i|}, \text{ mit } i = 1, 2, 3 \quad (8.30)$$

$\mathbf{x}'_i$  ...  $i$ -te Bildkoordinate

$\mathbf{m}'_i$  ...  $i$ -te normierte Raumstrahl

$\mathbf{K}$  ... Kalibriermatrix

bekannt sein. Diese Größen fließen in ein Polynom vierten Grades (s. (Haralick u. a., 1994)) ein, über welches die Parameter der ÄO bestimmt werden. Da bei einem Polynom vierter Ordnung bis zu vier Lösungen möglich sind, können als Zwischenergebnis bis zu vier Rotationsmatrizen und dazugehörige Projektionszentren vorliegen.

$$R_j, \mathbf{Z}_j \quad (8.31)$$

mit

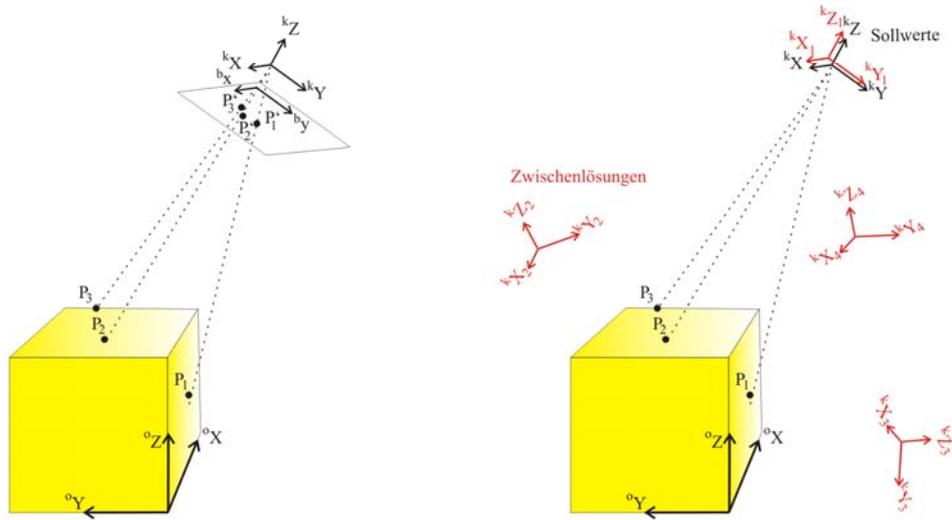
$R_j$  ...  $j$ -te Rotationsmatrix

$\mathbf{Z}_j$  ...  $j$ -tes Projektionszentrum

$j$  ... Anzahl der Lösungsmöglichkeiten (max. 4)

Diese vier Zwischenergebnisse und die weiteren geometrischen Zusammenhänge veranschaulicht die Abbildung 8.4.

In einem nächsten Schritt gilt es herauszufinden, welche der bis zu vier möglichen Zwischenergebnisse die korrekte Lösung ist. Dies ist mit Hilfe eines vierten Objekt- und Bildpunktes möglich. Dazu wird der vierte Objektpunkt über die ermittelten Lösungsvorschläge der Parameter der ÄO ins Bild projiziert (s. Formeln 8.32f). Anschließend



(a) Geometrie zwischen den Objekt- und Bildkoordinaten (b) Beispielhafte Darstellung der vier Zwischenergebnisse des Algorithmus B

Abbildung 8.4: Darstellung der geometrischen Zusammenhänge des Algorithmus B

kann über den Vergleich der Abstände zwischen den projizierten Bildpunkten und des gemessenen Bildpunktes die korrekte Lösung detektiert werden (s. Formel 8.34).

$$P_j = KR_j [I_3 - Z_j] \tag{8.32}$$

$${}^p\mathbf{x}'_j = P_j \mathbf{X}_4 \tag{8.33}$$

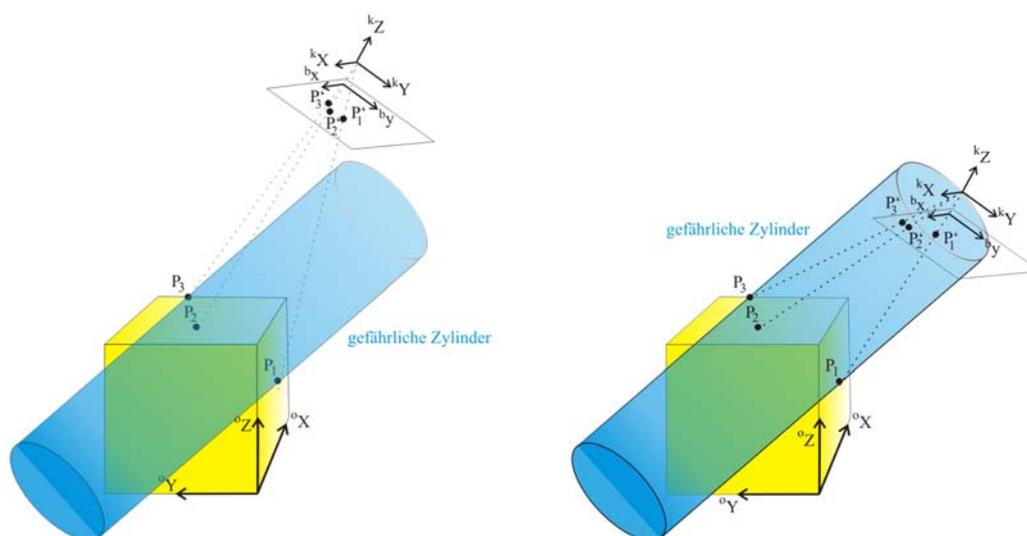
$$d_{\min} = |{}^p\mathbf{x}'_j - {}^p\mathbf{x}'_4| \tag{8.34}$$

mit

- $P_j$  ...  $j$ -te Projektionsmatrix
- $R_j$  ...  $j$ -te Rotationsmatrix
- $Z_j$  ...  $j$ -tes Projektionszentrum
- $I_3$  ...  $3 \times 3$  Einheitsmatrix
- $j$  ... Anzahl der Lösungsmöglichkeiten (max. 4)
- ${}^p\mathbf{x}'_j$  ...  $j$ -ter projizierte Bildpunkt
- $\mathbf{X}_4$  ... vierter Objektpunkt
- ${}^p\mathbf{x}'_4$  ... vierter gemessene Bildpunkt
- $d_{\min}$  ... kleinster Abstand zwischen den  $j$  projizierten Bildpunkten und dem vierten gemessenen Bildpunkt

Diese Detektion der korrekten Lösung aus den ermittelten Zwischenergebnissen ist bei einer Aufnahmeconfiguration nicht möglich. Für diese Konfiguration ist die Lage der Objektpunkte relativ zum Projektionszentrum relevant. Der Graphik 8.5a ist

zu entnehmen, dass durch die ersten drei Objektpunkte, die in die Berechnung des Polynoms mit einfließen, zunächst ein Kreis gelegt wird. Aus diesem Kreis lässt sich ein Zylinder aufspannen. Liegt das Projektionszentrum ebenfalls auf diesem Zylinder (s. Abbildung 8.5b), ist es nicht möglich die korrekte Lösung zu detektieren. Aus diesem Grund wird dieser Zylinder auch „gefährlicher Zylinder“ genannt. Je weiter das Projektionszentrum von diesem gefährlichen Zylinder entfernt ist, desto genauer kann die korrekte Lösung detektiert werden.



(a) Projektionszentrum liegt nicht auf dem gefährlichen Zylinder  
(b) Projektionszentrum liegt auf dem gefährlichen Zylinder

Abbildung 8.5: Darstellung zweier Aufnahmekonfigurationen des Algorithmus B mit dem gefährlichen Zylinder

Die Überprüfung dieser Konfiguration kann über den Schnitt des Projektionszentrums mit dem „gefährlichen Zylinder“ erfolgen. Die Berechnung des Zylinders aus den drei gegebenen Objektpunkten sowie die Berechnung eines Schnittes des Zylinders mit einem dreidimensionalen Punkt können in (McGlone, 2004) nachgeschlagen werden.

Außerdem ist eine stabilere Lösung des Algorithmus B zu erwarten, je weiter die drei Objektpunkte, die den gefährlichen Zylinder aufspannen, auseinander liegen.

### 8.3 Algorithmus C: Singulärwertzerlegung

Dieser Algorithmus unterscheidet sich von den beiden anderen dahingehend, dass hier die Parameter der IO und der ÄO in einem Berechnungsschritt gemeinsam geschätzt werden. Als Ergebnis liefert dieses Verfahren die Projektionsmatrix. Damit das Ergebnis dieses Verfahrens mit denen der beiden anderen Algorithmen vergleichbar ist, werden die Kalibrier- und Rotationsmatrix und das Projektionszentrum aus der Projekti-

onsmatrix berechnet. Da eine eindeutige Beziehung zwischen der Projektionsmatrix auf der einen Seite und der Kalibrier-, Rotationsmatrix und dem Projektionszentrum auf der anderen Seite besteht, wird das Ergebnis durch diese Umformung nicht verändert. Diese Berechnungen gehören jedoch nicht mehr zu dem eigentlichen Algorithmus und können deshalb in (McGlone, 2004, S.779) nachgeschlagen werden.

Ausgangspunkt des Algorithmus C ist die allgemeine Abbildungsgleichung

$$\mathbf{x}'_i = \mathbf{P}\mathbf{X}_i \quad (8.35)$$

$$= (\mathbf{I}_3 \otimes \mathbf{X}^T) \text{vec}(\mathbf{P}^T) \quad (8.36)$$

mit

$\mathbf{x}'_i$  ...  $i$ -ter gemessener Bildpunkt

$\mathbf{P}$  ... Projektionsmatrix

$\mathbf{X}_i$  ...  $i$ -ter Objektpunkt

$\mathbf{I}_3$  ...  $3 \times 3$  Einheitsmatrix.

Aus der Bedingung, dass der Objektpunkt  $\mathbf{X}_i$  im Bild dem Punkt  $\mathbf{x}'_i$  entspricht, lässt sich nach (Förstner, 2008) die Bedingungsgleichung

$$\mathbf{S}(\mathbf{x}'_i) (\mathbf{I}_3 \otimes \mathbf{X}^T) \text{vec}(\mathbf{P}^T) = \mathbf{0} \quad (8.37)$$

mit

$\mathbf{S}(\mathbf{x}'_i)$  ... Schiefsymmetrische Matrix des  $i$ -ten gemessenen Bildpunktes

$\mathbf{P}$  ... Projektionsmatrix

$\mathbf{X}_i$  ...  $i$ -ter Objektpunkt

$\mathbf{I}_3$  ...  $3 \times 3$  Einheitsmatrix

ableiten. Mittels einer so genannten SVD

$$\mathbf{S}(\mathbf{x}'_i) (\mathbf{I}_3 \otimes \mathbf{X}^T) = \mathbf{U} \mathbf{D} \mathbf{V}^T \quad (8.38)$$

mit

$\mathbf{U}$  ... Matrix

$\mathbf{V}^T$  ... Matrix

$\mathbf{D}$  ... Diagonalmatrix

$\mathbf{S}(\mathbf{x}'_i)$  ... Schiefsymmetrische Matrix des  $i$ -ten gemessenen Bildpunktes

$\mathbf{X}_i$  ...  $i$ -ter Objektpunkt

$\mathbf{I}_3$  ...  $3 \times 3$  Einheitsmatrix

kann nun die Projektionsmatrix aus der letzten Spalte der Matrix  $V^T$  zusammengesetzt werden. Die Berechnungsschritte der SVD werden hier als bekannt vorausgesetzt. Sie können bei Bedarf beispielsweise in (Helfrich, 2004, S. 24ff) nachgeschlagen werden. Für die Bestimmung der 12 Elemente der Projektionsmatrix werden sechs nicht koplanare Objektpunkte mit dazugehörigen Bildpunkten benötigt, die in die SVD mit einfließen.

Die Projektionsmatrix vereint alle Parameter der IO und ÄO. Aus dieser Matrix können die Kalibrier- und die Rotationsmatrix sowie das Projektionszentrum bestimmt werden.

## 9 Auswertung der Algorithmen

Innerhalb dieses Teils findet die Auswertung der drei theoretisch vorgestellten Algorithmen aus Abschnitt 8 statt. Angesichts dessen, dass das anwendungsbezogene Beispiel der Firma AICON 3D Systems GmbH mit dem Radadapter einige problematische Besonderheiten aufweist, erfolgt hier zunächst die Betrachtung eines allgemeinen Fallbeispiels. Dies bezieht sich auf eine Legolandszene, deren Vorstellung vor der eigentlichen Auswertung im nächsten Teilabschnitt erfolgt. Anschließend gibt der Abschnitt 9.5 einen Überblick über die Ergebnisse der Verfahren. Dazu gehört zum einen die Betrachtung der Stabilität und Zuverlässigkeit der Algorithmen und zum anderen der Vergleich der Laufzeiten.

### 9.1 Fallbeispiel: Legolandszene

Als Fallbeispiel dient die in Abbildung 9.1 abgebildete Legolandszene. Die bekannten Parameter der IO geben an, dass eine euklidische Kamera vorliegt. Dies bedeutet, dass keine Fehler bezüglich der Scherung, des Maßstabs und der Verzeichnungen vorliegen. Die angegebene Kalibriermatrix lautet

$$K_{\text{Soll}} = \begin{bmatrix} c & 0 & x'_H \\ 0 & c & y'_H \\ 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 3118 & 0 & 972 \\ 0 & 3118 & 1472 \\ 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} [\text{pel}] \quad (9.1)$$

mit

$K$  ... Kalibriermatrix mit Sollwerten  
 $c$  ... Kamerakonstante  
 $x'_H, y'_H$  . Bildhauptpunktskoordinaten.

Als Parameter der ÄO liegen für das dargestellte Bild als Sollwerte die Rotationsmatrix

$$R_{\text{Soll}} = \begin{bmatrix} 0.2958 & 0.5672 & 0.7686 \\ -0.8594 & 0.5093 & -0.0452 \\ -0.4171 & -0.6472 & 0.6381 \end{bmatrix} \quad (9.2)$$

mit

$R_{\text{Soll}}$  ... Rotationsmatrix mit Sollwerten

und die Koordinaten des Projektionszentrums

$$\mathbf{Z}_{\text{Soll}} = \begin{bmatrix} X \\ Y \\ Z \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 182,309 \\ -460,274 \\ 658,112 \end{bmatrix} \text{ [mm]} \quad (9.3)$$

mit

$\mathbf{Z}_{\text{Soll}}$  ... Projektionszentrum mit Sollwerten  
 $X, Y, Z$  . Koordinaten des Projektionszentrums

vor. Außerdem sind die in Abbildung 9.1 eingezeichneten Punkte koordinatenmäßig im Objekt und im Bild bekannt.

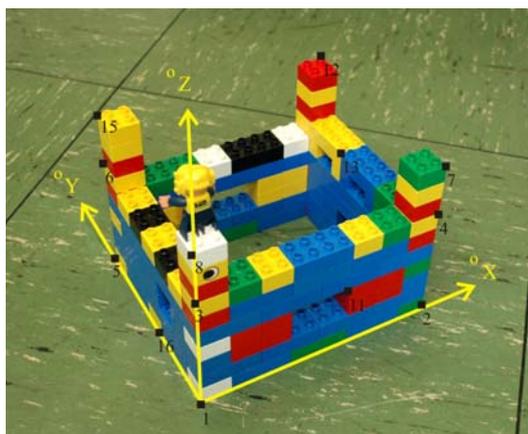


Abbildung 9.1: Photographie der Legolandszene als erstes Fallbeispiel mit eingezeichnetem Objektsystem  $S_o$  und Bildpunkte der gegebenen Objektkoordinaten

Für keine dieser Angaben stehen Genauigkeitsangaben zur Verfügung, so dass diese nicht mit in die Berechnungen mit einfließen können.

## 9.2 Auswertung des Algorithmus A

Innerhalb dieses Teils findet die Auswertung des Algorithmus A anhand der oben vorgestellten Legolandszene statt. Als erstes erfolgt die Bestimmung der benötigten Eingangsgroßen. Wie in Abschnitt 8.1 bereits erläutert wurde, muss das Abbild des Horizonts in der Bildebene bestimmt werden. Dazu werden zwei Parallelenpaare benötigt. In diesem Fallbeispiel bilden die zwei Geraden der Punkte 1 – 2 und 8 – 7 das erste Parallelenpaar und die Geraden 1 – 5 und 8 – 15 das zweite. Aus dieser Wahl folgt, dass die Bildebene nach der Drehung in den Normalfall parallel zu der  $xy$ -Ebene des Objektkoordinatensystems liegt, wie die Graphik 8.2 aus Abschnitt 8.1.1 zeigt. Die Auswahl der korrespondierenden Geraden im Objekt- und Kamerasystem für die zweite Rotation, nach der alle Achsen dieser beiden Systeme parallel zueinander verlaufen, fällt hier auf die Gerade 1 – 2. Die letzten Eingangsgroßen beziehen sich auf die Berechnung des Projektionszentrums. Hierfür benötigt der Algorithmus zwei korrespondierende Bild- und Objektpunkte. In diesem Fall fällt die Wahl auf die Punktnummern 12 und 13.

	$\Delta^n\omega$ [°]	$\Delta^p\omega$ [°]	$\Delta\mathbf{Z}_{12-13}$ [mm]	$\Delta\mathbf{Z}_{7-8}$ [mm]
Fallbeispiel	-7,9	2,6	248,04	97,58
Testbeispiel T1	-7,0	2,9	293,77	103,47
Testbeispiel T2	-6,0	2,0	258,15	94,06
Testbeispiel T3	$2 \cdot 10^{-5}$	$-6 \cdot 10^{-4}$	0,17	0,02
Testbeispiel T4	2,9	-2,2	253,22	105,84

Tabelle 9.1: Differenzen der des Algorithmus A zu den Sollwerten anhand des Fallbeispiels der Legolandszene und von Testbeispielen

Das Ergebnis mit diesen Eingangsgroßen zeigt, dass die Lage des Projektionszentrums um einen Abstand von 248,04mm von der Sollage abweicht. Der Tabelle 9.1 Zeile „Fallbeispiel“ ist außerdem zu entnehmen, dass die Rotationen ebenfalls nicht korrekt bestimmt sind. Der Rotationswinkel  $^n\omega$  der Drehung in den Normalfall (s. Formel 8.12) weicht um  $-7,9^\circ$  vom Sollwinkel ab. Der zweite Rotationswinkel  $^p\omega$  (s. Formel 8.18) differiert nur um  $2,6^\circ$ . Für die Bewertung dieser Ergebnisse stellt sich die Frage, auf welche Ursachen diese Abweichungen zurückzuführen sind.

Eine mögliche Ursache liegt in der Wahl der Eingangsgroßen, die zu unterschiedlichen Konfigurationen führen und demnach andere Ergebnisse zur Folge haben können. Dies zeigt sich in der Wahl der Punkte, die zur Berechnung des Projektionszentrums herangezogen werden. Aus der Tabelle 9.1 ist zu entnehmen, dass diese Wahl einen entscheidenden Einfluss auf das Ergebnis hat. Werden alle Eingangsgroßen beibehalten, lediglich mit den Punktnummern 7 und 8 findet die Berechnung des Projektionszentrums statt, dann verringert sich die Differenz zwischen zu der Sollposition des Projektionszentrums auf 97,58mm. Die Veränderung der anderen Eingangsgroßen führt allerdings zu keinen signifikanten Einflüssen auf das Ergebnis, wie weitere Testbeispiele zeigen.

Eine weitere Begründung für die Differenzen zu den Sollwerten können in den Unge-

naugigkeiten der einzelnen Koordinaten und der Parameter der IO liegen, die von diesem Fallbeispiel nicht bekannt sind. Aus diesem Grund erfolgen einige Untersuchungen an generierten Testbeispielen, die darauf abzielen die Ursachen der fehlerhaften Ergebnisse zu erklären. Diese generierten Testbeispiele beruhen auf der Grundlage des Fallbeispiels der Legolandszene.

Dafür erfolgt die Überprüfung der fehlenden Genauigkeitsangaben der Koordinaten und der Parameter der IO. Damit ein Vergleich der bereits vorliegenden Ergebnisse möglich ist, werden die gleichen Eingangsgrößen verwendet, die oben angegeben sind. Für die Berechnung des Projektionszentrums werden dabei zum einen die Punktnummern 12 und 13 und zum anderen die Nummern 7 und 8 herangezogen. Der Unterschied in diesen Testbeispielen liegt in der Betrachtung der Genauigkeiten. Der Abgriff der Objektkoordinaten an der Legolandszene erfolgt vermutlich mit Hilfe eines Lineals. Deshalb ist davon auszugehen, dass diese Koordinaten einer Genauigkeit von 1mm aufweisen. Die Bildkoordinaten greift ein Nutzer manuell innerhalb einer generierten Oberfläche ab. Aus diesem Grund erscheint es plausibel, dass die Bildkoordinaten lediglich auf 3pel genau bestimmt werden können. Das Bild ist mit einer NIKON D70s aufgenommen. Es ist davon auszugehen, dass diese Kamera keiner euklidischen Kamera entspricht, wie es die Angaben der IO aus Formel 9.1 implizieren. Aus diesem Grund wird die Genauigkeit der Kalibriermatrix  $K_{\text{Soll}}$  auf 1pel gesetzt. Diese Genauigkeitsangaben fließen in das Testbeispiel T1 mit ein. Dies bedeutet, dass zunächst die Objektkoordinaten und die Kalibriermatrix mit einem zufälligen normalverteilten Rauschen, welches eine Standardabweichung der geschätzten Genauigkeitsangaben aufweist, versehen werden. Aus diesen Werten und den gegebenen Sollwerten der Parameter der IO erfolgt eine Projektion der Bildkoordinaten ins Bild. Anschließend werden diese Bildkoordinaten ebenfalls mit einem zufälligen normalverteilten Rauschen mit einer Standardabweichung von 3pel versehen.

In die Berechnung des Algorithmus A für das Testbeispiel T1 fließen nun die fehlerbehafteten projizierten Bildkoordinaten und die fehlerbehafteten Objektkoordinaten mit ein. Als Kalibriermatrix wird ebenfalls die fehlerbehaftete herangezogen. Das Ergebnis in Tabelle 9.1 zeigt, dass die Ergebnisse näherungsweise mit denen des eigentlichen Fallbeispiels übereinstimmen. Aus diesem Grund ist davon auszugehen, dass die Abweichungen zu den Sollwerten durch die nicht geachteten Genauigkeiten verursacht werden.

Drei weitere Testbeispiele untersuchen die Einflüsse der fehlenden Genauigkeiten noch detaillierter. Dazu stehen die gleichen Eingangsgrößen zur Verfügung, wie bisher. Der Unterschied zum Testbeispiel T1 liegt darin, dass lediglich nacheinander entweder die Objektkoordinaten (T2), die Bildkoordinaten (T3) oder die Parameter der IO (T4) mit einem zufälligen normalverteilten Rauschen versehen werden. Die Untersuchungsergebnisse aus Tabelle 9.1 zeigen, dass vor allem die Ungenauigkeiten der Objektkoordinaten berücksichtigt werden sollten. Hingegen haben die Ungenauigkeiten der Bildkoordinaten und der Parameter der IO keinen signifikanten Einfluss auf das Ergebnis.

Die Laufzeituntersuchung für diesen Algorithmus zeigt, dass die Berechnungsschritte innerhalb von 1,43s bewältigt sind. Diese verhältnismäßig lange Laufzeit muss

berücksichtigt werden, sobald das Verfahren als Näherungsverfahren innerhalb eines echtzeitfähigen Algorithmus eingesetzt werden soll.

Als Fazit ist aus all diesen Untersuchungen zu ziehen, dass die Ungenauigkeiten der Koordinaten und der Parameter der IO berücksichtigt werden sollten, damit das Ergebnis nicht verfälscht wird. Insbesondere die Genauigkeit der Objektkoordinaten hat signifikante Auswirkungen zur Folge. Lediglich die Wahl der Eingangsgrößen zur Berechnung des Projektionszentrums ist entscheidend, da nur diese einen signifikanten Einfluss auf das Ergebnis besitzt. Bei den anderen Größen konnte dieser Einfluss nicht festgestellt werden. Zusätzlich muss die Laufzeit berücksichtigt werden, sobald dieses Verfahren als Näherungsverfahren innerhalb eines echtzeitfähigen Algorithmus zur Anwendung kommt.

### 9.3 Auswertung des Algorithmus B

Der Algorithmus B ermittelt die Parameter der ÄO über ein Polynom vierter Ordnung. Als Eingabegrößen benötigt das Verfahren vier korrespondierende Punkte im Objekt- und Bildkoordinatensystem. Hier fällt die Wahl auf die Punktnummern 7, 12 und 13 sowie den Punkt 11.

Diese Wahl führt bei dem Fallbeispiel der Legolandszene dazu, dass das Projektionszentrum einen Abstand von 20,71mm zu der Sollage aufweist. Die Einträge der Rotationsmatrix weichen um maximal 0,021rad von denen der Sollrotationsmatrix ab. Genau wie bei der Auswertung des Algorithmus A folgt nun die Untersuchung nach den Ursachen dieser Differenzen. Dazu werden auch hier die Testbeispiele T1 bis T4 des letzten Abschnitts herangezogen und die Resultate miteinander verglichen. Aus der Tabelle 9.2, die die Ergebnisse zusammenstellt, ist zu entnehmen, dass die Ursachen der Differenzen wiederum in den nichtbeachteten Genauigkeiten zu finden sind. Die Annahmen, dass die Objektkoordinaten eine Genauigkeit von 1mm, die Bildkoordinaten von 3pel und die Kalibriermatrix von 1pel aufweisen, können mit dem Algorithmus B bestätigt werden. Die genauere Betrachtung der Fehlereinflüsse durch die Ungenauigkeiten zeigt, dass die Güte des Ergebnisses des Algorithmus B signifikant von der Güte der Bildkoordinaten abhängt. Die Testbeispiele T2 und T4 zeigen, dass weder das zufällige normalverteilte Rauschen der Objektkoordinaten noch der Kalibriermatrix zu signifikanten Änderungen in der Lage des Projektionszentrums führen, im Verhältnis zu der Sollage. Die Differenz von 18,96mm des Testbeispiels T3 zeigen, dass die Genauigkeit der Bildkoordinaten zum einen einen signifikanten Einfluss auf das Ergebnis des Algorithmus hat und zum anderen, dass die Genauigkeitsangabe von 3pel plausibel zu sein scheint. Die können auch die Differenzen der Einträge der ermittelten Rotationsmatrix zur Sollrotationsmatrix bestätigen.

Als nächstes erfolgt die Untersuchung der Eingangsgrößen. Für einen Vergleich mit der bisherigen Punktwahl berechnet der Algorithmus hier die Parameter der ÄO über die Punkte 4, 5 und 8 sowie den Punkt 11. Die Zusammenstellung der Tabelle 9.3 zeigen, dass diese Punktwahl ein noch besseres Ergebnis liefert. Bei dieser Wahl beträgt die

	$\Delta Z$ [mm]	$\Delta R$ [rad]
Fallbeispiel	20,71	$\begin{bmatrix} 0,021 & 0,005 & -0,012 \\ 0,011 & 0,018 & 0,001 \\ -0,007 & 0,019 & 0,014 \end{bmatrix}$
Testbeispiel T1	17,55	$\begin{bmatrix} 0,025 & -0,001 & -0,010 \\ 0,002 & 0,0043 & 0,024 \\ 0,015 & 0,003 & 0,013 \end{bmatrix}$
Testbeispiel T2	0,06	$10^{-4} \cdot \begin{bmatrix} -0,89 & 0,03 & 0,58 \\ -0,02 & -0,02 & 0,03 \\ -0,13 & -0,21 & -0,39 \end{bmatrix}$
Testbeispiel T3	0,06	$10^{-4} \cdot \begin{bmatrix} -0,90 & 0,04 & 0,58 \\ -0,01 & 0,01 & -0,01 \\ -0,16 & -0,19 & -0,39 \end{bmatrix}$
Testbeispiel T4	18,96	$\begin{bmatrix} 0,026 & 0,003 & -0,012 \\ 0,008 & 0,014 & 0,013 \\ 0,003 & 0,013 & 0,015 \end{bmatrix}$

Tabelle 9.2: Differenzen des Algorithmus B zu den Sollwerten anhand des Fallbeispiels der Legolandszene und von Testbeispielen. Die Berechnungen finden mit den Punktnummern 7, 12 und 13 sowie den Punkt 11 statt.

	$\Delta Z$ [mm]	$\Delta R$ [rad]
Fallbeispiel 2	8,68	$\begin{bmatrix} 0,005 & 0,006 & -0,006 \\ 0,003 & 0,005 & -0,004 \\ -0,003 & 0,009 & 0,007 \end{bmatrix}$

Tabelle 9.3: Differenzen des Algorithmus B zu den Sollwerten anhand des Fallbeispiels der Legolandszene. Die Berechnungen finden mit den Punktnummern 4, 5 und 8 sowie den Punkt 11 statt.

Differenz zwischen der Solllage des Projektionszentrums und der berechneten Lage nur 8,68mm und die Rotationsparameter weichen auf weniger als 0,009rad von den Soll Drehungen ab. Dies zeigt, dass die Wahl der Objektpunkte einen Einfluss auf das Ergebnis hat, jedoch sind die Differenzen zu den tatsächlichen Parametern in einem Bereich, die für ein Näherungsverfahren akzeptabel sind. Die Zeitauswertung spricht ebenfalls dafür, dass dieser Algorithmus als echtzeitfähiges Näherungsverfahren einsetzbar ist, da für einen Durchlauf lediglich etwa 0,270s benötigt werden.

## 9.4 Auswertung des Algorithmus C

Als letztes erfolgt nun die Auswertung des Algorithmus C anhand des Fallbeispiels der Legolandszene. Dafür findet als erstes die Auswahl der benötigten sechs korrespondierenden Punkte im Objekt- und Kamerasystem statt. Die Wahl fällt hier auf die Punkte mit den Nummern 1 bis 4, 11 und 12. Mit diesen Punkten berechnet der Algorithmus C die Lage des Projektionszentrums in einer Entfernung von 16,35mm von der Solllage. Die Rotationsmatrix differiert um bis zu 0,008rad zu der vorgegebenen Rotationsmatrix. Als nächstes findet auch bei diesem Algorithmus die genauere Untersuchung der Ursachen für diese Differenzen statt. Dabei werden im Folgenden wieder die Testbeispiele T1 bis T4 herangezogen. Wie der Tabelle 9.4 zu entnehmen ist, haben die Ungenauigkeiten der Objektkoordinaten und der Kalibriermatrix keinen signifikanten Einfluss auf das Messergebnis. Lediglich die Ungenauigkeit in den Bildkoordinaten, die durch das zufällige normalverteilte Rauschen simuliert wird, ist die Ursache für die Differenz zwischen den Sollwerten und den berechneten Werten des Algorithmus C.

Zusätzlich zu diesen Untersuchungen fasst die Tabelle 9.5 weitere Ergebnisse des Fallbeispiels zusammen, in denen mit anderen Punktnummern gerechnet wird. Diese Ergebnisse zeigen, dass die Wahl der Punktnummern einen signifikanten Einfluss auf das Resultat des Algorithmus hat. Nur bedingt durch die Wahl der Punktnummern steigt die Differenz zwischen Soll- und Istlage des Projektionszentrums um mehr als das zwölfwache auf 217,25mm. Aus diesem Grund ist dieser Algorithmus als sehr instabil einzustufen. Obwohl die Laufzeit dieses Algorithmus bei 0,061s liegt, ist dieses Verfahren aufgrund seiner Instabilität nicht als Näherungsverfahren geeignet.

## 9.5 Fazit der Auswertungen

Als Fazit dieses allgemeinen Fallbeispiels ist für alle drei Algorithmen zu ziehen, dass die Genauigkeitsangaben der verwendeten Parameter und Komponenten bekannt sein sollten, damit sie innerhalb der Verfahren berücksichtigt werden können. Dies gilt insbesondere für die Objektkoordinaten innerhalb des Algorithmus A und für die Bildkoordinaten für die beiden anderen Algorithmen. Außerdem ist die Wahl der Eingangsgrößen für die Güte der Ergebnisse der Algorithmen entscheidend. Vor allem die Punktwahl zur Berechnung des Projektionszentrums des Algorithmus A und Punktwahl des Algorithmus C ist entscheidend für das Ergebnis. Die Differenzen, die diese beiden Verfahren

	$\Delta Z$ [mm]	$\Delta R$ [rad]
Fallbeispiel	16,35	$\begin{bmatrix} 0,004 & 0,008 & -0,007 \\ 0,0014 & 0,002 & -0,003 \\ -0,001 & 0,008 & 0,008 \end{bmatrix}$
Testbeispiel T1	13,16	$\begin{bmatrix} -0,036 & -0,400 & 0,183 \\ -0,062 & -0,172 & 0,237 \\ 0,128 & -0,279 & -0,397 \end{bmatrix}$
Testbeispiel T2	$1 \cdot 10^{-7}$	$10^{-4} \cdot \begin{bmatrix} -0,706 & 0,333 & 0,290 \\ -0,031 & -0,029 & 0,0334 \\ 0,025 & 0,038 & -0,038 \end{bmatrix}$
Testbeispiel T3	$1 \cdot 10^{-7}$	$\begin{bmatrix} -0,156 & 0,403 & -0,966 \\ -0,019 & -0,480 & -0,431 \\ -0,039 & 0,887 & 0,219 \end{bmatrix}$
Testbeispiel T4	15,62	$\begin{bmatrix} 0,001 & 0,005 & -0,004 \\ 0,014 & 0,020 & -0,023 \\ -0,027 & 0,021 & 0,002 \end{bmatrix}$

Tabelle 9.4: Differenzen des Algorithmus C zu den Sollwerten anhand des Fallbeispiels der Legolandszene und von Testbeispielen. Die Berechnungen finden mit den Punktnummern 1 bis 4, 11 und 12 statt.

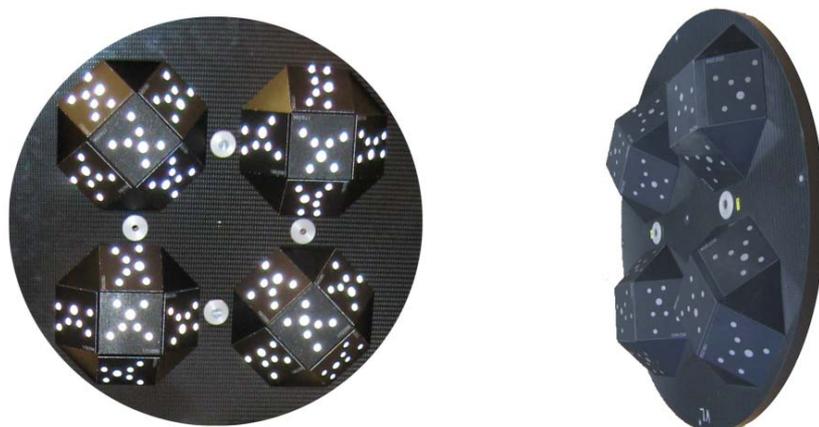
	$\Delta Z$ [mm]	$\Delta R$ [rad]
Fallbeispiel 2	217,25	$\begin{bmatrix} -0,296 & -0,322 & 0,201 \\ 0,859 & 0,460 & -0,200 \\ -0,583 & 0,647 & -0,638 \end{bmatrix}$

Tabelle 9.5: Differenzen des Algorithmus C zu den Sollwerten anhand des Fallbeispiels der Legolandszene. Die Berechnungen finden mit den Punktnummern 3, 4, 6, 8, 12 und 13 statt.

für die ermittelten Parameter der ÄO aufweisen, sind so gravierend, dass diese nicht als Näherungsverfahren geeignet sind. Der Algorithmus B liefert stabile Ergebnisse, die als Näherungsverfahren herangezogen werden können. Die Laufzeituntersuchungen haben zusätzlich ergeben, dass der Algorithmus B mit durchschnittlich 0,27s als Näherungsverfahren innerhalb eines echtzeitfähigen Algorithmus zur Anwendung kommen kann. Lediglich der Algorithmus C besitzt eine schnellere Laufzeit, allerdings liefert dieser auch deutlich instabilere Ergebnisse.

## 10 Problemstellung des Radadapters

Nachdem im letzten Abschnitt die Ergebnisse der drei Algorithmen anhand des Beispiels einer Legolandszene vorgestellt wurden, beschreibt dieser Abschnitt die Problematik mit dem sogenannten Radadapter der Firma AICON 3D Systems GmbH. Wie bereits zu Beginn erläutert wurde, ist WHEELWATCH dafür konzipiert das Fahrverhalten eines Fahrzeugs während der Fahrt zu messen. Zu diesem Zweck wird der Radadapter an Stelle der Radkappe am Reifen befestigt. Die Position dieses Radadapters muss WHEELWATCH dann bei allen Achslagen bestimmen können. In Abbildung 10.1 ist die Sichtweise der Kamera auf den Radadapter bei zwei unterschiedlichen Stellungen des Lenkrades veranschaulicht. Damit WHEELWATCH auch bei kompletter Lenkradeinschlagung in der Lage ist, die Anco-Marken auf dem Radadapter zu erkennen, hat AICON 3D Systems GmbH die in den Graphiken sichtbare Pyramidenstruktur entwickelt. Auf diesen befinden sich die Anco-Marken. Wie ebenfalls in der Abbildung 10.1b erkennbar ist, hat diese Pyramidenstruktur den Nachteil, dass durch Verdeckungen nicht alle Anco-Marken gleichzeitig sichtbar sind.



(a) Sichtweise bei Fahrt geradeaus (b) Sichtweise bei vollem Lenkradeinschlag

Abbildung 10.1: Zwei Sichtweisen der Kamera auf den Radadapter der Firma AICON 3D Systems GmbH

Die Herausforderung der drei Algorithmen besteht nun darin, eine stabile und zuverlässige Lösung unter den von WHEELWATCH gestellten Rahmenbedingungen liefern

zu können. Für jedes Einzelne der drei Verfahren stellen diese Voraussetzungen jedoch Probleme dar, die gelöst werden müssen. Im Folgenden werden für jeden Algorithmus die Probleme definiert und anschließend nach Lösungsmöglichkeiten gesucht.

## 10.1 Problematik mit dem Algorithmus A

Das erste vorgestellte Verfahren bestimmt die Parameter der ÄO in drei Schritten, wie der Abschnitt 8.1 zeigt. Der erste Schritt bestand darin, die Bildebene in den Normalfall zu drehen. Zur Bestimmung der hierzu benötigten Rotationsmatrix werden zwei sogenannte Fluchtpunkte benötigt. Wie in der Graphik 8.2c veranschaulicht ist, werden hierfür zwingend zwei Parallelenpaare benötigt. Nur wenn diese Voraussetzung gegeben ist, kann die Rotationsmatrix zur Drehung in den Normalfall aufgestellt werden. Diese Voraussetzung ist bei dem speziellen Anwendungsbeispiel von WHEELWATCH nur sehr eingeschränkt gegeben. Dies liegt an der relativen Lage der vier Pyramiden mit den Anco-Marken. Nur dann, wenn alle vier Marken, die sich auf den Spitzen der Pyramiden befinden, detektiert werden können, ist die Voraussetzung der parallelen Geraden gegeben. Dieser Fall ist in Abbildung 10.2 mit den gelb eingezeichneten Parallelen dargestellt. Sobald bereits eine dieser vier Marken nicht mehr erkannt werden kann, müssen die Parallelen auf eine andere Art und Weise bestimmt werden.

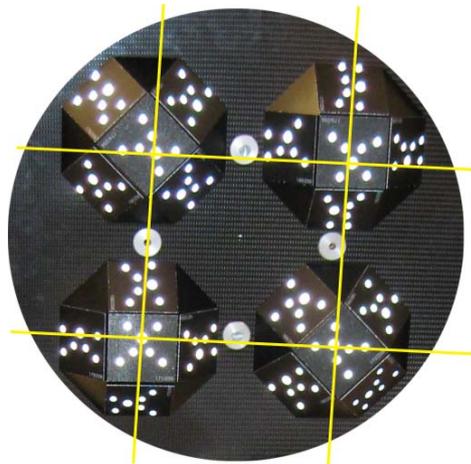


Abbildung 10.2: Radadapter der Firma AICON 3D Systems GmbH mit eingezeichneten gelben Parallelen

Zu diesem Zweck werden die Anco-Marken an sich betrachtet. Die in Abbildung 10.3a blau eingekreisten drei Punkte der Anco-Marke sind bei allen Marken dieser Art identisch. Dies hat zur Folge, dass die Lage dieser drei Punkte auf einer der Pyramidenseiten immer die gleiche ist. Aus diesem Grund können aus zwei Anco-Marken die Parallelen gebildet werden, in dem jeweils durch zwei dieser drei Punkte die Parallelen aufgespannt werden. Dies ist in Abbildung 10.3b graphisch veranschaulicht. Problematisch an diesem Lösungsansatz ist die Tatsache, dass die drei Punkte auf der Anco-Marke nur näherungsweise die gleiche Lage auf der Pyramide besitzen. Der Grund dafür liegt in der Anbringung der Marken auf den Pyramiden. Diese werden einzeln per Hand

aufgeklebt, wodurch sich die relative Lage auf den Pyramidenseiten durchaus um 1mm unterscheiden können. Diese Tatsache stellt ein Problem dar, da im Abschnitt 9.2 bereits festgestellt wurde, dass der Algorithmus A hohe Genauigkeitsanforderungen an das Objekt stellt. Bei dem Radadapter kann auf Grund seiner Fertigung nicht gewährleistet werden, dass die benötigten Parallelen in der geforderten Genauigkeit vorliegen.

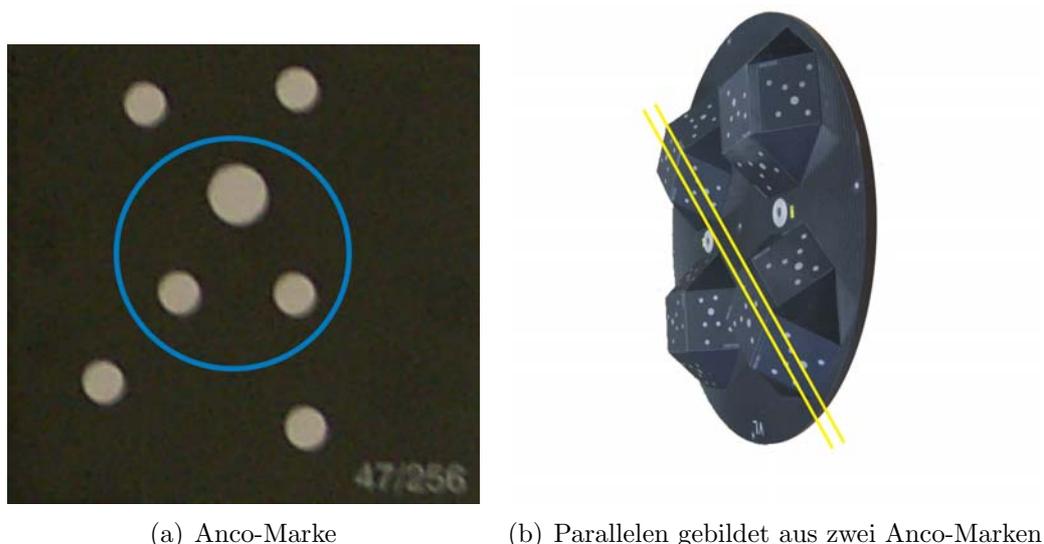


Abbildung 10.3: Bestimmung der Parallelen über Anco-Marken

Ein weiterer Lösungsansatz ist die Vergrößerung der Pyramidenseiten, so dass mehrere Anco-Marken auf einer Seite Platz finden. Allerdings ist dann das Problem der Verdeckung so groß, dass aus Mangel an genügend sichtbaren Marken die Fluchtpunkte nicht bestimmt werden können. Angesichts dessen, dass das System WHEELWATCH nicht in der Lage ist uncodierte einzelne Punkte zu messen, besteht nicht die Möglichkeit mit diesen die Bestimmung der Parallelen zu verbessern.

Fazit dieser Untersuchung ist deshalb, dass der Algorithmus A nicht als Näherungsverfahren für den speziellen Anwendungsfall von WHEELWATCH geeignet ist.

## 10.2 Problematik mit dem Algorithmus B

Der Algorithmus B bestimmt die Parameter der ÄO über ein Polynom vierten Grades. Wie in Abschnitt 9.3 bereits erläutert wurde, liefert das Verfahren bei der Konstellation des gefährlichen Zylinders keine eindeutige Lösung der sechs Parameter. Die Graphik 10.4 zeigt den üblichen Messaufbau bei einer Fahrzeugvermessung des Systems WHEELWATCH. Je nachdem, welche Punkte am Objekt zur Berechnung des Algorithmus B herangezogen werden, besteht die Möglichkeit, dass das Projektionszentrum auf dem gefährlichen Zylinder liegt. Dies ist in der oben genannten Graphik eben-

falls veranschaulicht. Der Algorithmus B ist jedoch in der Lage diese Konstellation zu detektieren. Sobald dies der Fall ist, werden drei neue Objektpunkte ausgewählt, mit denen das Verfahren dann durchgeführt werden kann. Dies bedeutet, dass der Algorithmus B auch unter den Bedingungen des anwendungsspezifischen Beispiels des Systems WHEELWATCH stabile Lösungen liefert. Deshalb stellt dieses Verfahren für die Bestimmung der Näherungswerte eine Alternative zum bisherigen iterativen Verfahren dar.



Abbildung 10.4: Problematik des gefährlichen Zylinders mit dem Radadapter der Firma AICON 3D Systems GmbH

### 10.3 Problematik mit dem Algorithmus C

Als Letztes wird nun der Algorithmus C überprüft, inwieweit dieser mit den Bedingungen des Systems WHEELWATCH in Einklang zu bringen ist. Die einzige geometrische Voraussetzung dieses Algorithmus besteht darin, dass keine Koplanarität zwischen den sechs benötigten Objektpunkten besteht. Diese Bedingung stellt bei dem Radadapter ein Problem dar, welches durch die Pyramidenstruktur nur teilweise entgegengewirkt werden kann. Eine Pyramide des Radadapters hat eine Höhe von 4cm. Da die Punkte der Anco-Marken nicht die komplette Fläche ausnutzen, weichen die Punkte, die in den Algorithmus einfließen, weniger als 4cm von einer Ebene ab. Diese Voraussetzung des Radadapters führt dazu, dass mit diesem Verfahren keine guten Näherungswerte zu erwarten sind. Daraus folgt, dass der Algorithmus C in Verbindung mit dem Anwendungsbeispiel von WHEELWATCH nicht als Näherungswertverfahren für die Parameter der AO heanzuziehen ist.

### 10.4 Fazit der Problematiken des Radadapters

Das Anwendungsbeispiel des Systems WHEELWATCH besitzt einige Voraussetzungen, die bei den hier vorgestellten drei Algorithmen einige Probleme verursachen. Dies führt

dazu, dass nur der Algorithmus B als Näherungsverfahren für diesen Anwendungsfall geeignet ist. Die geometrische Konfiguration, dass das Projektionszentrum auf dem gefährlichen Zylinder liegt, kann umgangen werden, so dass dieser Algorithmus zuverlässige Ergebnisse der Parameter der ÄO liefert.

Die Bedingungen der beiden anderen Algorithmen können nicht mit den Voraussetzungen des Radadapters in Einklang gebracht werden. Für den Algorithmus A stehen die benötigten Parallelen nicht mit der geforderten Genauigkeit zur Verfügung. Der Algorithmus C hingegen ist nicht geeignet für ein koplanares Objekt, welches der Radadapter näherungsweise darstellt. Aus diesen Gründen können die beiden genannten Verfahren nicht als Näherungsverfahren in den Algorithmus des Systems WHEELWATCH miteingebunden werden.

## 11 Fazit und Ausblick

Als Fazit aus den Untersuchungen der drei vorgestellten direkten Lösungsansätze für den RRS ist festzuhalten, dass lediglich der Algorithmus B in der Praxis überzeugt hat. Dieses Verfahren stellt als einzige Bedingung, dass die Aufnahmeconfiguration nicht dem gefährlichen Zylinder entspricht. Am Fallbeispiel der Legolandszene können ausreichend Konfigurationen gefunden werden, die dazu führen, dass die sechs Parameter der ÄO mit einer ausreichenden Genauigkeit ermittelt werden. Die Ergebnisse zeigen, dass die Abweichungen zu den Translationsparametern im cm-Bereich liegen. Die Rotationsparameter weichen im Bereich von maximal rad von der Sollrotationsmatrix ab. Außerdem ist es möglich mit dem Spezialfall des Radadapters der Firma AICON 3D Systems GmbH die gewünschten Ergebnisse zu erzielen. Die geometrischen Voraussetzungen des Radadapters erfüllen bei allen Radstellungen die Bedingungen des Algorithmus B. Aus diesen Gründen kann das Verfahren B als Näherungsverfahren für das System WHEELWATCH eingesetzt werden. Dies bestätigt auch die durchgeführte Laufzeituntersuchung dieses Algorithmus.

Die anderen beiden Algorithmen liefern keine so zuverlässigen Ergebnisse. Beide Verfahren zeigen bereits bei dem allgemeinen Fallbeispiel der Legolandszene, dass die Differenzen zu den gegebenen Sollparametern der ÄO zu groß sind, um als Näherungsverfahren eingesetzt zu werden. Außerdem sind beide Verfahren von der Wahl der Eingangsgrößen abhängig, die die Verfahren instabil machen. Dies hat zur Folge, dass beispielsweise die translatorischen Differenzen zu den Sollparametern im dm-Bereich liegen können, je nachdem welche Eingangsgrößen für die Verfahren herangezogen werden. Zusätzlich zu diesen Problemen treten mit dem Spezialfall des Radadapters weitere geometrische Schwierigkeiten auf. Die Bedingung des Algorithmus A von parallelen Objektgeraden, die im Bild sichtbar sein müssen, ist bis auf wenige Ausnahmen nicht erfüllt. Aus diesem Grund stellt der Algorithmus A keine Alternative zu dem bestehenden Verfahren des RRS der Firma AICON 3D Systems GmbH dar. Der Algorithmus C benötigt sechs nichtkoplanare Objektpunkte, die zur Lösung der Parameter der ÄO herangezogen werden. Diese Voraussetzung erfüllt der Radadapter nicht, da dieser

näherungsweise ein koplanares Objekt darstellt. Deshalb kann auch der Algorithmus C nicht als Näherungsverfahren innerhalb der Software des Systems WHEELWATCH eingebunden werden.

Zusätzliche Verbesserungen für einen beliebigen Algorithmus, der die Aufgabe des RRS löst, können unter anderem durch die Verwendung von statistischen Hilfsmitteln erfolgen. Sobald die Genauigkeit der Bild- und Objektkoordinaten vorhanden sind, können diese in die Berechnung des RRS miteinfließen. Dadurch kann eine Genauigkeitsaussage über die ermittelten Parameter der ÄO getroffen werden. Im Moment ist diese Aussage nicht möglich, da die Firma AICON 3D Systems GmbH diese Angaben in der benötigten Form nicht bestimmt. Für das Fallbeispiel der Legolandszene stehen diese ebenfalls nicht zur Verfügung. Aus diesem Grund können diese während der Verfahren des RRS nicht weiter gearbeitet werden.

Eine weitere Möglichkeit der Verbesserung besteht darin, die einzelnen Aufnahmen miteinander in Beziehung zu setzen. Zur Zeit wird jede Aufnahme lediglich separat für sich betrachtet und die Parameter der ÄO bestimmt. Mit der Verknüpfung der einzelnen Bilder können zeitlich stabilere Lösungen der sechs Parameter erzielt werden. Ein echtzeitfähiges Verfahren in diesem Zusammenhang ist der Kalman-Filter (s. (Niemeier, 2002)). Dieses statistische Verfahren schätzt die neuen Parameter unter Berücksichtigung aller vorher bekannten Informationen. Je mehr Vorinformationen dabei zur Verfügung stehen desto stabiler können die neuen Parameter bestimmt werden. Vor allem bei längeren Messreihen bietet der Kalman-Filter daher eine gute Möglichkeit, um die Parameter der ÄO stabil und schnell zu ermitteln. Der Kalman-Filter ist jedoch ebenfalls ein statistisches Verfahren, für welches die Standardabweichungen und Kovarianzmatrizen bekannt sein müssen. Da diese bisher nicht zur Verfügung stehen, konnte dieses Verfahren im Zuge dieser Arbeit nicht umgesetzt werden.

## Teil III

# Zuordnung von homologen Punkten

## 12 Einleitung des dritten Teils

Der zweite und dritte Teil dieser Diplomarbeit beschäftigt sich mit der Untersuchung der Algorithmik von Onlinemesssystemen. Die im Teil II durchgeführte Untersuchung des Räumlichen Rückwärtsschnitts bezieht sich auf Einkamerasysteme. Hier wird ein Aspekt der Berechnungsverfahren zur Punktbestimmung bei einem Zweikamerasystem näher betrachtet. Die Untersuchung bezieht sich auf das Korrespondenzproblem für nicht codierte Punkte.

### 12.1 Motivation

Die Photogrammetrie beschäftigt sich unter anderem mit der Rekonstruktion von Objekten aus Bildern. Dieser Vorgang ist wichtig für das Reverse Engineering, bei dem aus einem existierenden Produkt die einzelnen Konstruktionselemente ermittelt werden, und bei der Auswertung von Verformungsvorgängen. Zur Analyse eines Objekts werden zum Beispiel 3D-Modelle aus Stereoaufnahmen erstellt. Hierzu werden in den aufgenommenen Bildern korrespondierende Objekte, zum Beispiel Punkte oder Linien, benötigt. Die Suche nach diesen korrespondierenden Objekten in zwei oder mehr Bildern ist in der Literatur unter dem Begriff des Korrespondenzproblems oder der Zuordnung zu finden. Dieser Teil der Diplomarbeit beschäftigt sich mit der Verbesserung von Zuordnungsverfahren im Zweikamerasystem.

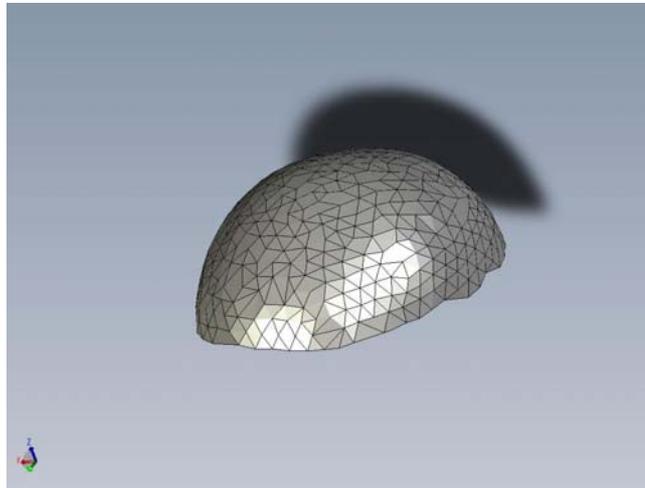
Zuordnungsverfahren basieren häufig auf der Epipolargeometrie. Diese beschreibt die geometrischen Beziehungen zwischen den Bildern. Mit einer bekannten Orientierung der Bilder lässt sich für einen Punkt im ersten Bild der Suchbereich für einen homologen, also korrespondierenden, Punkt in dem zweiten Bild als Epipolargerade vorhersagen. Auf dieser Epipolargeraden können mehrere mögliche Kandidaten für den korrespondierenden Punkt vorliegen. Besonders bei einer hohen Punktdichte mit einer rasterförmigen Anordnung entlang der Epipolargeraden tritt eine große Zahl an Mehrdeutigkeiten auf. Zur Reduzierung dieser Mehrdeutigkeiten stützt sich die Zuordnung innerhalb des Suchbereichs entweder auf Intensitäten innerhalb eines Bildteils (intensity based) oder auf markante Objekte (feature based). Häufig werden zum Beispiel die Kreuzkorrelation oder das Least-Squares Matching als Zuordnungsverfahren verwendet (s. hierzu (McGlone, 2004, S. 482 ff.)). Hierbei sind die Grauwerte des Bildteils beziehungsweise Attribute eines markanten Objekts notwendig.

Die optischen Messsysteme, mit denen sich diese Arbeit beschäftigt, liefern jedoch lediglich die Punktkoordinaten von signalisierten Punkten. Deshalb ist eine Zuordnung mit den genannten Zuordnungsverfahren nicht möglich. Auch eine Zuordnung mit Hilfe

von detektierten Linien oder Flächen innerhalb der Bilder wie sie (Bay u. a., 2005) vorschlägt, kann nicht realisiert werden, da lediglich einzelne Punktkoordinaten vorliegen.



(a) Haube mit Messpunkten



(b) Modell des Kopfes (Quelle: Firma AICON 3D Systems GmbH)

Abbildung 12.1: Vermessung eines Kopfes

Die Firma AICON 3D Systems GmbH, in deren Kooperation diese Arbeit entstand, beschäftigt sich mit mehreren Projekten, die diese Problematik enthalten. Eins dieser Projekte beschäftigt sich mit der Vermessung des Kopfes. Auf einer Haube, die sich dem Kopf anpasst, befindet sich eine große Menge an Messpunkten (s. Graphik 12.1a). Aus den aufgenommenen Messdaten soll ein Modell des Kopfes (s. Abbildung 12.1b) erstellt werden, mit deren Hilfe ein individueller und passgenauer Helm angefertigt werden kann. Diese Aufgabe ist mit der aktuellen Zuordnungsalgorithmik des Zweikamerasystems nicht lösbar, da die Mehrdeutigkeiten nicht aufgelöst werden können. Aus diesem Grund findet in dieser Arbeit eine Untersuchung alternativer Zuordnungsverfahren statt.

## 12.2 Aufgabenstellung zum zweiten Teil

Das Thema der Zuordnung von homologen Punkten im Zweikamerasystem beinhaltet das Korrespondenzproblem für nicht codierte identische Punkte. Die auftretenden Mehrdeutigkeiten sollen im Zuge von zusätzlichen Informationen verringert werden. Als Vorinformationen dienen Angaben über die Art der Objektoberfläche, die in einen alternativen Zuordnungsalgorithmus integriert werden sollen.

Ausgangspunkt der Untersuchung ist das erreichte Zuordnungsergebnis mit der Software der Firma AICON 3D Systems GmbH. Dieser Algorithmus verwendet als Grundlage die Epipolargeometrie für die Zuordnung markanter Punkte mit der zusätzlichen Restriktion zur Tiefenausdehnung des Objekts. Zur Beurteilung des Einflusses dieser

Restriktion auf das Zuordnungsergebnis wird der allgemeine Algorithmus der Epipolargeometrie zusätzlich ohne diese Angabe betrachtet.

Für die Entwicklung weiterer Zuordnungsverfahren liegen aus der Aicon-Software die Bildkoordinaten der detektierten Messpunkte mit den ermittelten Standardabweichungen in beiden Bildern vor. Diese unterteilen sich in nummerierte zugeordnete Punkte und unnummerierte nicht zugeordnete Punkte. Für die zugeordneten Bildpunkte liegen zusätzlich die berechneten Objektkoordinaten mit Standardabweichungen vor. Des Weiteren sind sowohl die Innere als auch die Äußere Orientierung der Kameras bekannt. Mit diesen Daten soll die Zuordnungsproblematik verbessert werden. Die Verbesserung besteht zum einen in der Zuordnung weiterer Punkte und zum anderen in der Vermeidung von falsch zugeordneten Punkten und dessen Detektion.

Hierzu werden innerhalb dieser Diplomarbeit zwei Lösungsansätze näher untersucht. Zum einen findet eine Verbesserung der Zuordnung mit Vorwissen über die Form des Objekts statt. Hierzu wird zunächst eine Oberflächenklassifikation erstellt, die verschiedene Objektformen, die in der Industrievermessung von Bedeutung sind, berücksichtigt. Mit der Angabe der Oberflächenart lässt sich die Objektform aus bereits zugeordneten Punkten schätzen und mit deren Hilfe weitere Punkte zuordnen. Zum anderen zeigt die Arbeit einen Ansatz, der topologische Relationen für die Zuordnung verwendet. Hier werden die Nachbarschaftsbeziehungen der Bildpunkte in die Zuordnung mit einbezogen. Der vorgestellte Ansatz verwendet die Delaunay Triangulation. Beide Verfahren ermöglichen eine Verkleinerung des Suchbereichs für homologe Punkte, die bei der vorliegenden Problemstellung für die Reduzierung der vorliegenden Mehrdeutigkeiten notwendig ist.

## 12.3 Aufbau des dritten Teils

Der dritte Teil der Diplomarbeit untergliedert sich in vier Abschnitte. Nach der hier beschriebenen Problem- und Aufgabenstellung folgt in Abschnitt 13 die Erläuterung der drei Zuordnungsverfahren, die in dieser Arbeit behandelt werden. Die Ausführungen zu den Verfahren beinhalten die Voraussetzungen und die verwendete Methodik der einzelnen Zuordnungsverfahren. Die eigene Implementation der Verfahren in Matlab findet nach der in diesem Abschnitt dargestellten Methodik statt. Diese wird anschließend in Abschnitt 14 an drei Beispieldatensätzen getestet. Hier findet die empirische Beurteilung der Verfahren statt. Im Anschluss werden die Ergebnisse des dritten Teils in Abschnitt 15.1 zusammengefasst und ein Ausblick auf nicht behandelte Möglichkeiten der Verfahren in Abschnitt 15.2 gegeben.

## 13 Zuordnungsverfahren

Der folgende Abschnitt zeigt drei Ansätze für die Zuordnung von korrespondierenden Punkten. Diese werden im Anschluss an die hier durchgeführte Erläuterung der Methodik an drei Beispielen getestet und bewertet.

Zuerst beschreibt der Abschnitt 13.1 ein Zuordnungsverfahren mit der Bestimmung des Suchbereiches für markante Punkte aufgrund der geometrischen Beziehungen zwischen zwei Bildern. Die grundlegenden geometrischen Beziehungen erläutert hierzu Abschnitt C.1 im Anhang. Außerdem werden hier die Zuordnungsbedingungen, unter denen zwei Punkte als homolog gelten, erläutert. Die zwei weiteren Verfahren benötigen die Ergebnisse dieses ersten Verfahrens als Grundlage. Weiterhin finden diese geometrischen Grundlagen der Zuordnung auch in den nachfolgenden zwei Verfahren Anwendung. Hierbei werden jedoch zusätzliche Restriktionen eingeführt, die die Zuordnungsergebnisse verbessern. Das Verfahren in Abschnitt 13.2 verwendet eine Oberflächenschätzung zur Verminderung von Mehrdeutigkeiten bei der Suche nach korrespondierenden Punkten. Die letzte in dieser Arbeit vorgestellte Zuordnungsmethode in Abschnitt 13.3 basiert auf Nachbarschaftsbeziehungen.

Für alle drei Verfahren liegen Bildkoordinaten von uncodierten Punkten in zwei Bildern vor. Die Verfahren gehen von idealen Bildkoordinaten aus. Diese lassen sich durch Anbringung der Verzeichnungskorrektur an die beobachteten Bildkoordinaten berechnen (Formeln s. Anhang A.1.2). Das Verfahren über die Objektoberfläche nutzt zusätzlich die berechneten Objektkoordinaten der bereits zugeordneten Punkte aus dem Algorithmus der Firma AICON 3D Systems GmbH. Für eine numerisch stabile Lösung ist es erforderlich, die Objektkoordinaten zu konditionieren, so dass diese im Wertebereich von  $[-1, 1]$  liegen.

### 13.1 Epipolargeometrie

Als erstes Verfahren stellt dieser Abschnitt den Zuordnungsalgorithmus nach (Maas, 1992) vor. Diese Methode wird im Folgenden als „Epipolargeometrie“ bezeichnet, da dieses Verfahren lediglich auf diesen geometrischen Grundlagen basiert.

Mit Hilfe der geometrischen Beziehung der Epipolargeometrie (s. Anhang C.1) lässt sich die Lage eines Bildpunktes, der im ersten Bild vorliegt, im zweiten Bild vorhersagen. Der korrespondierende Punkt zu einem Bildpunkt aus dem ersten Bild liegt im zweiten Bild auf der Epipolarlinie beziehungsweise der Epipolargeraden dieses Bildpunktes. Die Epipolargerade  $l''$  lässt sich als Prädiktion des Bildpunktes  $\mathbf{x}'$  über

$$l'' = F^T \mathbf{x}' \quad (13.1)$$

mit

$l''$  ... Epipolarlinie im zweiten Bild

$\mathbf{x}'$  ... Punktkoordinaten im ersten Bild

$F$  ... Fundamentalmatrix

berechnen. Aufgrund von Messunsicherheiten der Bildkoordinaten und der Unsicherheit der Orientierungsparameter besitzt die Epipolargerade ein hyperbelförmiges Fehlerband (Näheres zur Unsicherheit von Linien s. (Meidow u. a., 2008)). Approximativ wird der Suchbereich auf ein Band erweitert, dass die Breite von  $2d$  besitzt. Hierbei steht  $d$  für die Festlegung eines maximalen Abstandes zur Epipolarlinie. Für die Zuordnungsbedingung unterteilt sich das Fehlerband des Suchbereichs in zwei Teile. Der erste Bereich besitzt eine maximale Entfernung  $m$  zur Epipolarlinie vom Wert  $m > 0$ . Für den zweiten Bereich wird eine maximale Distanz von  $d = s \cdot m$  mit dem Signifikanzniveau  $s \geq 1$  festgelegt. Ein Bildpunkt des ersten Bildes wird eindeutig zu einem Bildpunkt des zweiten Bildes zugeordnet, wenn nur ein Bildpunkt im zweiten Bild einen geringeren Abstand als  $s \cdot m$  zu der Epipolarlinie besitzt. Bei Mehrdeutigkeiten wird der beste Kandidat mit der Entfernung  $d_{\text{best}}$  ermittelt. Dieser muss die drei Bedingungen

$$d_{\text{best}} < m, \quad (13.2)$$

$$d_i > m, \quad (13.3)$$

$$\frac{d_i}{d_{\text{best}}} > s \quad (13.4)$$

mit

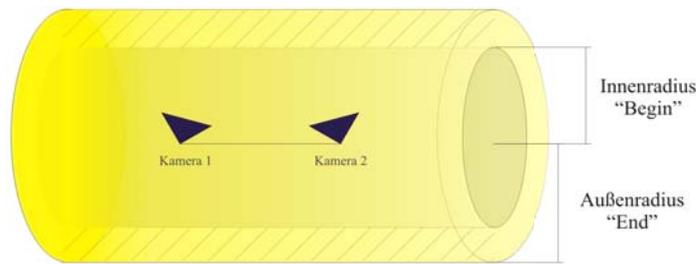
$d_{\text{best}}$  ... Abstand zur Epipolarlinie des besten Kandidaten  
 $d_i$  ... Abstand zur Epipolarlinie aller weiteren Kandidaten  
 $m$  ... Maximale Entfernung zur Epipolarlinie  
 $s$  ... Signifikanzniveau

erfüllen. Die Länge des Suchbereichs kann zusätzlich durch die Angabe einer minimalen und maximalen Entfernung zwischen Kamerasystem und Objekt eingegrenzt werden.

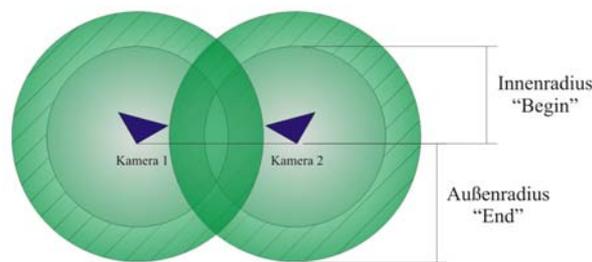
Abbildung 13.1 veranschaulicht drei Möglichkeiten zur Eingrenzung des Suchbereichs mit Hilfe der minimalen und maximalen Entfernung des Objekts zum Kamerasystem. Hierzu stehen die Varianten „Basis“, „Kamera“ und „Beide“ zur Verfügung. Die Funktion „Basis“ legt einen virtuellen Hohlzylinder um die Basis des Kamerasystems (s. Abbildung 13.1a). Hierbei stellt die Basis die Zylinderachse dar und die Radien sind durch den minimalen und maximalen Abstand gegeben. Lediglich im Zwischenraum zwischen dem inneren und äußeren Zylinder wird nach uncodierten homologen Punkten gesucht. Die Variante „Kamera“ arbeitet nicht mit Zylindern sondern mit Kugeln. Dabei werden zwei Hohlkugeln um die beiden Kameras gelegt. Der Suchbereich beschränkt sich hier auf die Schalen der beiden Hohlkugeln (s. Abbildung 13.1b). Die letzte Variante („Beide“) kombiniert die Optionen „Basis“ und „Kamera“ miteinander. Der Bereich, der über die Zylinder-Einschränkung detektiert wird, wird hier zusätzlich noch durch die Kugelvariante seitlich begrenzt (s. Abbildung 13.1c).<sup>2</sup>

Bei den Punktzuordnungen mit dem beschriebenen Verfahren können Mehrdeutigkeiten

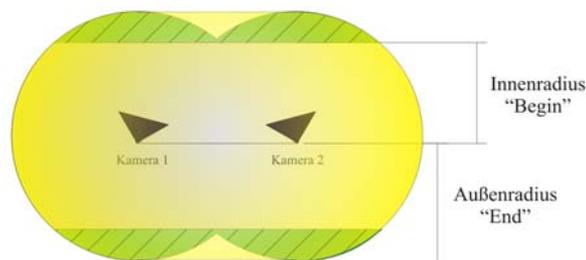
<sup>2</sup>Die Angaben zur Einschränkung des Suchbereichs durch die Tiefenangabe des Objekts beruhen auf der Auskunft der Firma AICON 3D Systems GmbH



(a) Option „Basis“



(b) Option „Kamera“



(c) Option „Beide“

Abbildung 13.1: Graphische Veranschaulichung der Einschränkung des Suchbereichs nach uncodierten Punkten innerhalb des Verfahrens der Epipolargeometrie

auftreten. (Maas, 1992) leitete hierzu eine Abschätzung der Anzahl der Mehrdeutigkeiten her, die bei der Zuordnung von zufällig verteilten Punkten im Raum auftreten können. Die Wahrscheinlichkeit von Mehrdeutigkeiten liegt bei

$$P_a = 1 - e^{-n \cdot \frac{f}{F}} \tag{13.5}$$

mit

- $P_a$  ... Wahrscheinlichkeit für Mehrdeutigkeiten
- $n$  ... Anzahl der Punkte pro Bild
- $f$  ... Fläche des epipolaren Suchbereichs mit  $f = 2 \cdot d \cdot l$
- $d$  ... Maximaler Abstand zur Epipolarlinie
- $l$  ... Länge des Suchbereichs
- $F$  ... Bildfläche

Die Gesamtzahl der Mehrdeutigkeiten lässt sich über

$$N_a = (n^2 - n) \cdot \frac{2 \cdot c \cdot d \cdot b \cdot (Z_{\max} - Z_{\min})}{F \cdot Z_{\min} \cdot Z_{\max}} \quad (13.6)$$

mit

$n$	... Anzahl der Punkte pro Bild
$c$	... Kamerakonstante
$d$	... Maximaler Abstand zur Epipolarlinie
$b$	... Basis im Objektraum
$F$	... Bildfläche
$Z_{\min}, Z_{\max}$	... Tiefenbereich im Objektraum ( $Z_{\min} < Z < Z_{\max}$ )

abschätzen (Herleitung s. (Maas, 1992, S. 97 f.)). Hiermit lässt sich beurteilen, inwieweit eine Verbesserung des Zuordnungsverfahrens zur Reduzierung der Mehrdeutigkeiten erforderlich ist. Für die im Abschnitt 14 behandelten Beispiele liegt die Anzahl zwischen vier und 123 Mehrdeutigkeiten für zufällig verteilte Punkte. Für rasterförmig angeordnete Objektpunkte, besonders bei einem Raster parallel zu den Epipolarlinien, erhöht sich diese Anzahl und ist deshalb nicht zu vernachlässigen.

Die hier beschriebene Zuordnung beruht lediglich auf den geometrischen Beziehungen zwischen zwei Bildern und a-priori Wissen über die Tiefenausdehnung des Objekts. Zur Reduzierung der Mehrdeutigkeiten sind weitere Kenntnisse erforderlich. (Maas, 1992) schlägt unter anderem die Verwendung von Form- und Helligkeitsparametern vor. Dies ist bei identischen signalisierten Punkten jedoch nicht sinnvoll. Deshalb wird im Folgenden Vorwissen über die Objektform und die Nachbarschaftsbeziehungen berücksichtigt.

## 13.2 Zuordnung über die Objektoberfläche

Mit dem Algorithmus der Epipolargeometrie lässt sich ein Teil der signalisierten Punkte eindeutig zuordnen und dessen 3D-Koordinaten berechnen. Auf dieser Grundlage baut die weitere Zuordnung, die in diesem Abschnitt erläutert wird, auf. Das Verfahren setzt die Kenntnis über die Objektoberfläche voraus. Der Abschnitt 13.2.1 beschreibt zunächst die Einteilung der Objekte in verschiedene Oberflächenklassen. Auf diese Klassifikation bezieht sich das entwickelte Zuordnungsverfahren über die Objektoberfläche, für die auch die mathematische Beschreibung der Oberfläche erforderlich ist, die in diesem Absatz aufgeführt wird. Der zweite Teil in Abschnitt 13.2.2 erläutert anschließend die einzelnen Schritte dieses Zuordnungsverfahrens.

### 13.2.1 Oberflächeneinteilung

Die Objektoberfläche lässt sich im Allgemeinen mathematisch approximieren. Hierzu bietet sich als allgemeine Flächendarstellung die Fläche zweiter Ordnung, die auch als

Quadrik bezeichnet wird, an. Diese lässt sich in der impliziten Form  $f(X, Y, Z)$  nach Formel 13.7 darstellen. Die Matrixschreibweise in Formel 13.8 ergibt sich mit Hilfe von homogenen Koordinaten.

$$0 = a \cdot X + b \cdot Y + c \cdot Z + d \cdot X^2 + e \cdot XY + f \cdot XZ + g \cdot Y^2 + h \cdot YZ + i \cdot Z^2 + j \quad (13.7)$$

$$0 = [X \ Y \ Z \ 1] \begin{bmatrix} d & \frac{1}{2}e & \frac{1}{2}f & \frac{1}{2}a \\ \frac{1}{2}e & g & \frac{1}{2}h & \frac{1}{2}b \\ \frac{1}{2}f & \frac{1}{2}h & i & \frac{1}{2}c \\ \frac{1}{2}a & \frac{1}{2}b & \frac{1}{2}c & j \end{bmatrix} \begin{bmatrix} X \\ Y \\ Z \\ 1 \end{bmatrix} = \mathbf{X}^T \mathbf{Q} \mathbf{X} \quad (13.8)$$

mit

$X, Y, Z$  ... Objektkoordinaten  
 $a - j$  ... Flächenparameter  
 $Q$  ... Quadrik

Mit dieser Darstellung lassen sich viele Flächenformen, die bei der Rekonstruktion von Industrieobjekten von Bedeutung sind, beschreiben. Abbildung 13.2 zeigt die typischen Regelgeometrien. Aus den praktischen Anwendungsbeispielen der Firma AICON 3D Systems GmbH ergeben sich drei spezielle Flächenformen, die innerhalb dieser Arbeit näher untersucht werden. Die folgenden Formeln dieser drei Flächenformen sind in der Hauptachsenform mit Mittelpunkt  $\mathbf{X}_0 = [X_0 \ Y_0 \ Z_0]^T$  angegeben.

- Ebene:

$$a \cdot X + b \cdot Y + c \cdot Z - 1 = 0 \quad (13.9)$$

- Kugel:

$$\frac{(X - X_0)^2}{r^2} + \frac{(Y - Y_0)^2}{r^2} + \frac{(Z - Z_0)^2}{r^2} - 1 = 0 \quad (13.10)$$

- Zylinder:

$$\frac{(X - X_0)^2}{r^2} + \frac{(Y - Y_0)^2}{r^2} - 1 = 0 \quad (13.11)$$

mit

$X, Y, Z$  ... Objektkoordinaten  
 $X_0, Y_0, Z_0$  ... Mittelpunktskoordinaten  
 $a, b, c$  ... Flächenparameter

Diese drei Regelgeometrien und die allgemeine Form der Fläche zweiter Ordnung werden in der weiteren Diplomarbeit als Oberflächenklassen verwendet. Für die Zuordnung

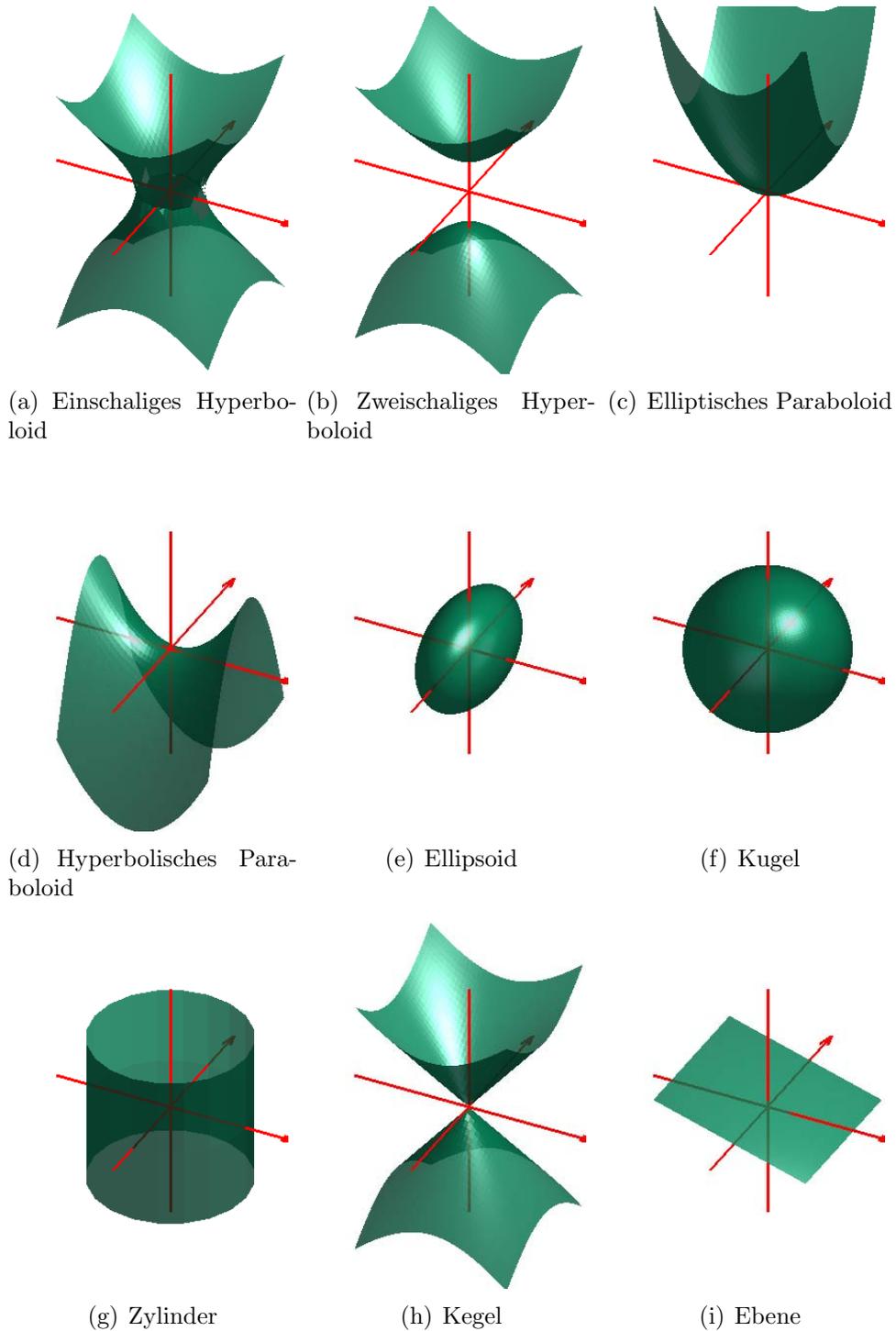


Abbildung 13.2: Darstellung der für die Ingenieurgeodäsie relevanten Quadriken

wird ein Algorithmus entwickelt, der die Flächenparameter aus den 3D-Koordinaten der zuvor zugeordneten Punkte schätzt und über diese Fläche die nicht zugeordneten Bildpunkte des ersten Bildes in das zweite Bild projiziert. Das Verfahren beschränkt sich auf glatte Objekte, deren Oberfläche sich durch die Fläche zweiter Ordnung approximieren lässt. Im Folgenden werden die einzelnen Schritte des Algorithmus erläutert.

### 13.2.2 Algorithmus für die Zuordnung über die Objektoberfläche

**1. Oberflächenklassifikation.** Vor der Schätzung der Flächenparameter der gesamten Objektoberfläche werden die 3D-Punkte der bereits zugeordneten Punkte in Oberflächenklassen sortiert. Diese Einteilung ermöglicht zum einen die Detektion von Punkten, die nicht zum angegebenen Flächentyp gehören. Des Weiteren verringert sich so die Punktmenge für die Lokalisation und Schätzung einer speziellen Fläche. Dies vereinfacht besonders die Schätzung von mehreren Flächentypen innerhalb einer Aufnahme. Im Folgenden werden zwei Klassifikationsmöglichkeiten vorgestellt.

	$K > 0$	$K = 0$	$K < 0$
$H < 0$	peak	ridge	saddle ridge
$H = 0$	(none)	flat	minimal surface
$H > 0$	pit	valley	saddle valley

Tabelle 13.1: Einteilung der Flächenpunkte nach (Besl und Jain, 1988)

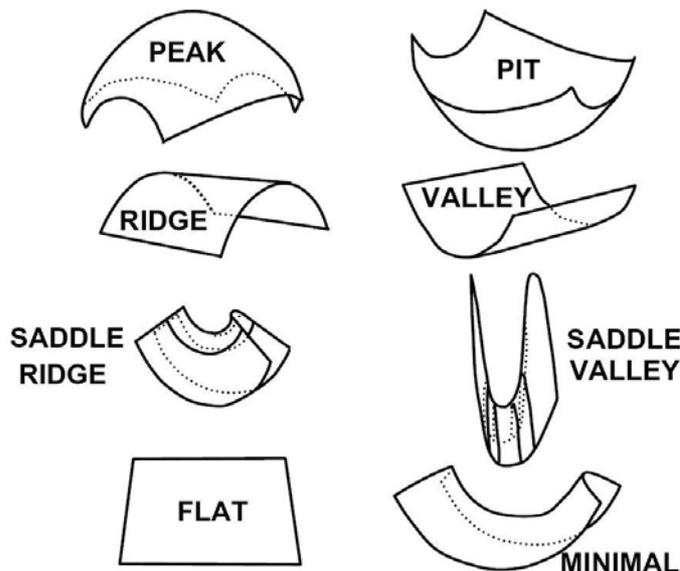


Abbildung 13.3: Darstellung der Flächeneinteilung basierend auf den Krümmungsparametern (Quelle: (Besl und Jain, 1988))

Die Oberflächenpunkte lassen sich zum Beispiel über die Krümmungsparameter in verschiedene Klassen einteilen. (Besl und Jain, 1988) schlagen die Einteilung in Tabel-

le 13.1 beziehungsweise Bild 13.3 vor, die die Flächenpunkte in acht Klassen mit Hilfe der Gauß'schen Krümmung  $K$  und der mittleren Krümmung  $H$  einordnet.

Die Formparameter lassen sich bei einer glatten Repräsentation der Oberfläche lokal schätzen. Hierzu werden die Nachbarpunkte eines Oberflächenpunktes benötigt. Die Nachbarn innerhalb eines vorgegebenen Abstandes lassen sich entweder mit Hilfe des  $k$ -dimensionalen-Baums, einem Suchbaum zur Speicherung von Punkten im  $k$ -dimensionalen Raum, oder der Distanzmatrix mit allen Abständen zwischen den 3D-Punkten bestimmen. In Bezug auf die Schnelligkeit der Suche nach Nachbarpunkten ist der  $k$ -d-Baum zu bevorzugen. Dies lässt sich über die Komplexität  $O$ , also die Abschätzung der Anzahl der Berechnungsschritte des Algorithmus, begründen. Für die Erstellung des  $k$ -d-Baums mit  $n$  Punkten werden  $n \log n$  Berechnungsschritte benötigt. Somit beträgt die Komplexität  $O(n \log n)$ . Die anschließende Suche im  $k$ -d-Baum nach dem nächsten Nachbarn benötigt lediglich eine Komplexität von  $O(\log n)$ , womit die Komplexität für das gesamte Verfahren  $O(n \log n)$  beträgt. Die einzelnen Berechnungsschritte zum Aufbau und zur Suche im  $k$ -d-Baum können in (Moore, 1991) nachgelesen werden. Die Distanzmatrix wird in  $n \cdot (n - 1)/2$  Schritten aufgebaut. Somit beträgt die Komplexität zum Aufbau der Distanzmatrix bereits  $O(n^2)$  und ist größer als die Komplexität des  $k$ -d-Baums.<sup>3</sup>

Mit diesen Nachbarpunkten wird die Fläche lokal als Quadrik geschätzt und dessen Krümmungsparameter bestimmt. Die Berechnungsschritte zur Ermittlung dieser Formparameter können in (Förstner, 2007/2008b, S. 5-2 f.) nachgelesen werden.

Nach der Einteilung der einzelnen 3D-Punkte in die acht Klassen der Flächenpunkte lassen sich diese den einzelnen Oberflächenklassen zuordnen. Die Punkte der Klasse „flat“ gehören zur Oberflächenform der Ebene. Der Zylinder besitzt die Gauß'sche Krümmung von null und die mittlere Krümmung größer oder kleiner als null. Diese Punkte sind also parabolisch und befinden sich in den Klassen „valley“ oder „ridge“. Für eine Kugel ist die Gauß'sche Krümmung positiv und die mittlere Krümmung ungleich null. Damit fügt sich diese Fläche aus Punkten der Klassen „peak“ oder „pit“ zusammen. Innerhalb einer Fläche zweiter Ordnung können alle acht Punktklassen vorkommen.

	$D > 0$	$D < 0$	$D = 0$	
$A \neq 0$	Hyperboloid	Ellipsoid	Kegel	
$A = 0$	Paraboloid		$B \neq 0$	Zylinder
			$B = 0$	Zwei Ebenen

Tabelle 13.2: Klassifizierung dreidimensionaler Quadriken im Determinantenansatz nach (Kutterer und Schön, 1999) (vereinfachte Darstellung)

Als zweite Möglichkeit für die Klassifikation der Oberflächenpunkte schlagen (Kutterer und Schön, 1999) eine Einteilung vor, die auf der Analyse der Form von Quadriken beruht. Hierzu wird ebenfalls für jeden 3D-Punkt die lokale Form der Quadrik aus mindestens neun 3D-Punkten geschätzt. Zur statistischen Analyse einer Quadrik verwen-

<sup>3</sup>Die Implementation des  $k$ -d-Baum in Matlab liegt von Guy Shechter, guy@jhu.edu, Juni 2004 vor.

det Kutterer den Determinantenansatz. Aus der Matrix der Quadrik  $Q = \begin{bmatrix} Q_{hh} & \mathbf{q}_{h0} \\ \mathbf{q}_{h0}^T & q_{00} \end{bmatrix}$  werden die Bewegungsinvarianten

$$D = \det Q \quad (13.12)$$

$$A = \det Q_{hh} \quad (13.13)$$

$$B = \det Q_{11} + \det Q_{22} + \det Q_{33} \quad (13.14)$$

$$J = \det Q_{hh_{11}} + \det Q_{hh_{22}} + \det Q_{hh_{33}} \quad (13.15)$$

mit

$D, A, B, J$  ... Bewegungsinvarianten

$Q_{ii}$  ... Untermatrix von  $Q$  ohne die  $i$ -te Zeile und Spalte

gebildet. Die Bewegungsinvarianten bieten sich zur Klassifikation an, da sich diese bei einer Bewegung oder Rotation der Quadrik im Raum nicht verändern. Tabelle 13.2 zeigt die Zuordnung zu den entsprechenden Regelgeometrien, die für diese Arbeit von Interesse sind. Auf eine weitere Unterteilung, die (Kutterer und Schön, 1999) durchführen, wird hier verzichtet. Deshalb besitzt die Invariante  $J$  hier keine Bedeutung.

**2. Schätzung der Objektoberfläche.** Der vorherige Schritt führt die Gruppierung der einzelnen Flächenpunkte durch. Diese basiert auf der lokalen Schätzung der Oberfläche. In diesem Schritt wird die gesamte Oberfläche als Quadrik geschätzt. Hierzu werden mit allen Punkten, die zu der vorgegebenen Flächenart gehören, die Flächenparameter bestimmt.

Die Schätzung der Flächenparameter findet mit dem so genannten Random Sample Consensus (RANSAC)-Verfahren statt (s. (Fischler und Bolles, 1981)), das nach den richtigen Flächenpunkten sucht. Dadurch können zum einen Ausreißer detektiert werden und zum anderen ermöglicht es die Erweiterung des implementierten Algorithmus zur Schätzung von mehreren Flächenstücken innerhalb eines Datensatzes. Für das RANSAC-Verfahren wird zunächst die Minimalanzahl an benötigten Punkten zufällig aus der entsprechenden Punktklasse ausgesucht. Aus diesen Punkten wird die Fläche über eine direkte Lösung geschätzt (Berechnungsschritte s. Anhang C.2). Dies wird  $N$ -mal wiederholt, wobei sich die Anzahl  $N$  aus der Wahrscheinlichkeit  $P$  ergibt, mit der mindestens einmal eine ausreißerfreie Teilmenge für die direkte Lösung vorliegt.

$$N = \frac{\log(1 - P)}{\log(1 - (1 - \epsilon)^s)} \quad (13.16)$$

mit

$N$  ... Anzahl an Wiederholungen

$P$  ... Wahrscheinlichkeit für eine ausreißerfreie Teilmenge

$\epsilon$  ... Anteil an Ausreißern

$s$  ... Minimalanzahl an benötigten Punkten für die Flächenschätzung

Als beste Lösung werden die Flächenparameter ausgewählt, bei der am meisten Punkte in einer maximalen Entfernung  $d$  zu der Fläche liegen. Mit diesen Punkten wird die Fläche anschließend mittels dem Ausgleichsverfahren des Gauß-Helmert-Modells ermittelt. Die Grundlagen zum Gauß-Helmert-Modell können zum Beispiel in (Niemeier, 2002, S. 153 ff.) und (Koch, 1997, S. 231 f.) nachgelesen werden. Für die benötigten Näherungswerte werden die Parameter der direkten Lösung verwendet. Vor dem Ausgleich findet eine Überprüfung statt, ob der Nullpunkt auf der Fläche liegt. Der Nullpunkt entspricht bei konditionierten Daten im Wertebereich  $[-1, 1]$  dem Schwerpunkt der Objektpunkte. Falls dies der Fall ist, iterieren die verwendeten Modelle nicht, da die Modellgleichungen für den Nullpunkt nicht erfüllt werden können. Deshalb wird die Punktwolke in Aufnahme­richtung verschoben. Hierbei wird angenommen, dass sich die Objektfläche senkrecht zu der Aufnahme­richtung befindet.

**3. Projektion der Bildpunkte in das zweite Bild.** Mit der Kenntnis, dass die Raumpunkte der abgebildeten nicht zugeordneten Bildpunkte auf der im letzten Schritt ermittelten Fläche liegen, lassen sich die nicht zugeordneten Punkte des ersten Bildes in das zweite Bild projizieren um sie anschließend zuzuordnen. Hierzu wird zunächst der Schnittpunkt der projizierenden Geraden der nicht zugeordneten Punkte des ersten Bildes mit der Fläche berechnet. Folgende Berechnungsschritte sind notwendig:

1. Die projizierende Gerade lässt sich in der Punkt-Richtungsform

$$\mathbf{X} = \mathbf{Z} + \alpha \mathbf{Y} \quad (13.17)$$

mit

$\mathbf{X}$  ... Beliebiger Punkt auf der Geraden  
 $\mathbf{Z}$  ... Festgelegter Punkt auf der Geraden  
 $\mathbf{Y}$  ... Richtung der Geraden  
 $\alpha$  ... Faktor

darstellen. Auf der projizierenden Geraden liegt als Punkt  $\mathbf{Z}$  das Projektionszentrum. Die Richtung der Geraden lässt sich über

$$\mathbf{Y} = (\mathbf{KR})^{(-1)} \mathbf{x}' \quad (13.18)$$

mit

$\mathbf{Y}$  ... Richtung der Geraden  $\mathbf{K}$  ... Kalibriermatrix  
 $\mathbf{R}$  ... Rotationsmatrix  
 $\mathbf{x}'$  ... Bildkoordinaten im ersten Bild

bestimmen.

2. Für die Berechnung des Schnittpunkts  $\mathbf{X}$  der projizierenden Geraden mit der Quadrik  $Q$  wird der Parameter  $\alpha$  benötigt. Dieser lässt sich durch Auflösen der homogenen Schnittpunktgleichung bestimmen:

$$0 = \mathbf{X}^T \mathbf{Q} \mathbf{X} \quad (13.19)$$

$$= (\mathbf{Z} + \alpha \mathbf{Y})^T \mathbf{Q} (\mathbf{Z} + \alpha \mathbf{Y}) \quad (13.20)$$

$$= \mathbf{Z}^T \mathbf{Q} \mathbf{Z} + 2\mathbf{Z}^T \mathbf{Q} \mathbf{Y} \alpha + \mathbf{Y}^T \mathbf{Q} \mathbf{Y} \alpha^2 \quad (13.21)$$

$$\alpha = \frac{-(\mathbf{Z}^T \mathbf{Q} \mathbf{Z})}{2\mathbf{Y}^T \mathbf{Q} \mathbf{Y}} \pm \sqrt{(\mathbf{Z}^T \mathbf{Q} \mathbf{Z})^2 - 4(\mathbf{Y}^T \mathbf{Q} \mathbf{Y})(\mathbf{Z}^T \mathbf{Q} \mathbf{Y})} \quad (13.22)$$

mit

- $\mathbf{X}$  ... Schnittpunkt
- $Q$  ... Quadrik
- $\mathbf{Z}$  ... Festgelegter Punkt auf der Geraden
- $\mathbf{Y}$  ... Richtung der Geraden
- $\alpha$  ... Faktor

Der Ausdruck unter der Wurzel, die Diskriminante  $D$ , entscheidet, ob die Gleichung einen ( $D = 0$ ), zwei ( $D > 0$ ) oder keinen ( $D < 0$ ) reellen Schnittpunkt besitzt. Bei zwei Schnittpunkten wird der Schnittpunkt ausgewählt, der sich vor der Kamera befindet. Falls sich beide Schnittpunkte vor der Kamera befinden, wird der Schnittpunkt ausgewählt, der am nächsten zu einem der 3D-Objektpunkte der bereits zugeordneten Punkte liegt.

Die Schnittpunkte werden mit Formel 13.23 als Punkte in das zweite Bild projiziert.

$$\mathbf{x}'' = \mathbf{P} \mathbf{X} \quad (13.23)$$

$$= \mathbf{K} \mathbf{R} [\mathbf{I}_3 | -\mathbf{Z}] \mathbf{X} \quad (13.24)$$

mit

- $\mathbf{x}''$  ... Projizierte Bildkoordinaten
- $\mathbf{X}$  ... Objektkoordinaten
- $\mathbf{P}$  ... Projektionsmatrix
- $\mathbf{K}$  ... Kalibriermatrix
- $\mathbf{R}$  ... Rotationsmatrix
- $\mathbf{I}_3$  ...  $3 \times 3$  Einheitsmatrix
- $\mathbf{Z}$  ... Projektionszentrum

Die beschriebenen Schritte zur Projektion eines Bildpunktes  $\mathbf{x}'$  über die Objektfläche in das zweite Bild stellen eine homogene Transformation, auch als Homographie bezeichnet, dar.

**4. Zuordnung.** Als letzter Schritt findet die Zuordnung der homologen Punkte statt. Die homogene Transformation der Bildpunkte  $\mathbf{x}'$  über die Quadrik, die im Schritt 3 beschrieben wurde, ermöglicht die Prädiktion des korrespondierenden Bildpunktes im zweiten Bild. Dadurch liegen im zweiten Bild die gemessenen nicht zugeordneten Bildkoordinaten und die Projektionen der im ersten Bild nicht zugeordneten Punkte vor. Der Suchbereich für die Zuordnung dieser Punkte zueinander beschränkt sich somit auf den Fehlerbereich des jeweiligen projizierten Bildpunktes. Die Ermittlung des besten Kandidaten für die Zuordnung wird analog zu den Abstandsbedingungen der Epipolargeometrie (s. Formeln 13.2 ff. auf Seite 149) durchgeführt. Der Abstand bezieht sich hierbei auf den Abstand zwischen den gemessenen Bildpunkten und den über die Quadrik projizierten Punkten.

Im Gegensatz zur Epipolargeometrie lässt sich mit diesem Verfahren also der Suchbereich für die Zuordnung von einem Fehlerband auf den Fehlerbereich der projizierten Bildpunkte reduzieren.

### 13.3 Delaunay Triangulation

Als drittes Zuordnungsverfahren wird innerhalb dieser Arbeit eine Methode entwickelt, die die topologischen Beziehungen zwischen den markanten Punkten nutzt. Es handelt sich hierbei lediglich um einen einfachen Ansatz, da die Hauptaufgabe dieses Teils aus der Erstellung einer Oberflächenklassifikation mit anschließender Zuordnung über die geschätzte Objektoberfläche besteht, wie sie in Abschnitt 13.2 beschrieben wurde. Mit diesem Ansatz wird die Möglichkeit aufgezeigt, topologische Relationen mit Hilfe der Delaunay Triangulation für die Zuordnung von Punkten zu nutzen.

Ebenso wie bei dem zuvor dargestellten Verfahren der Homographie werden auch hier bereits zugeordnete Punkte benötigt. Allerdings ist die Kenntnis über dessen 3D-Koordinaten nicht erforderlich, da das Verfahren lediglich auf Bildkoordinaten beruht.

Das Verfahren beruht zum einen auf der Verwendung der Delaunay Triangulation. Diese Triangulation stellt aus einer Menge von 2D-Punkten ein Dreiecksnetz her, wobei die Innenwinkel der Dreiecke möglichst groß sind. Dies ist erreicht, wenn innerhalb des Kreises durch die Eckpunkte einer Dreiecksmasche keine weiteren Punkte mehr liegen. Zum anderen integriert das Zuordnungsverfahren die Koplanaritätsbedingung für die Zuordnung innerhalb der einzelnen Dreiecksmaschen. Das entwickelte Verfahren besteht aus drei Schritten, die iterativ durchgeführt werden.

**1. Erstellung der Delaunay Triangulation im ersten Bild.** Das erste Bild enthält detektierte Punkte, von denen sowohl zugeordnete als auch nicht zugeordnete Punkte vorliegen. Mit den zugeordneten Punkten wird die Delaunay Triangulation erstellt. Hierzu stellt Matlab die Funktion `TRI = delaunay(x,y)` zur Verfügung.

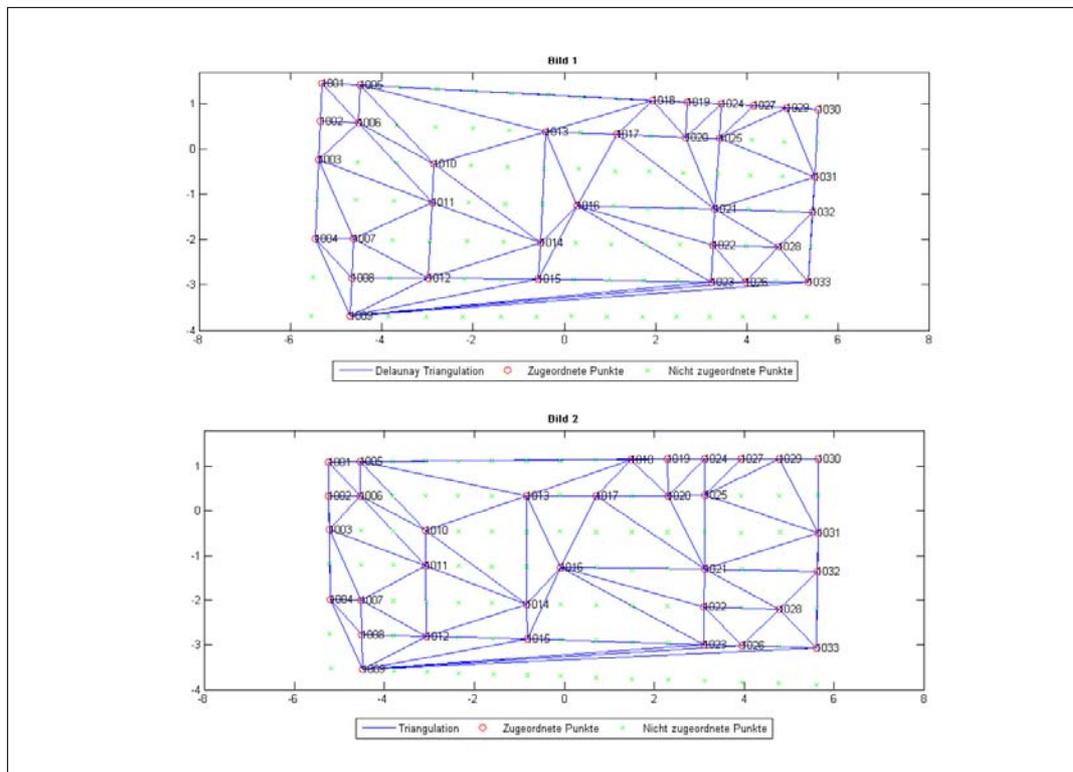
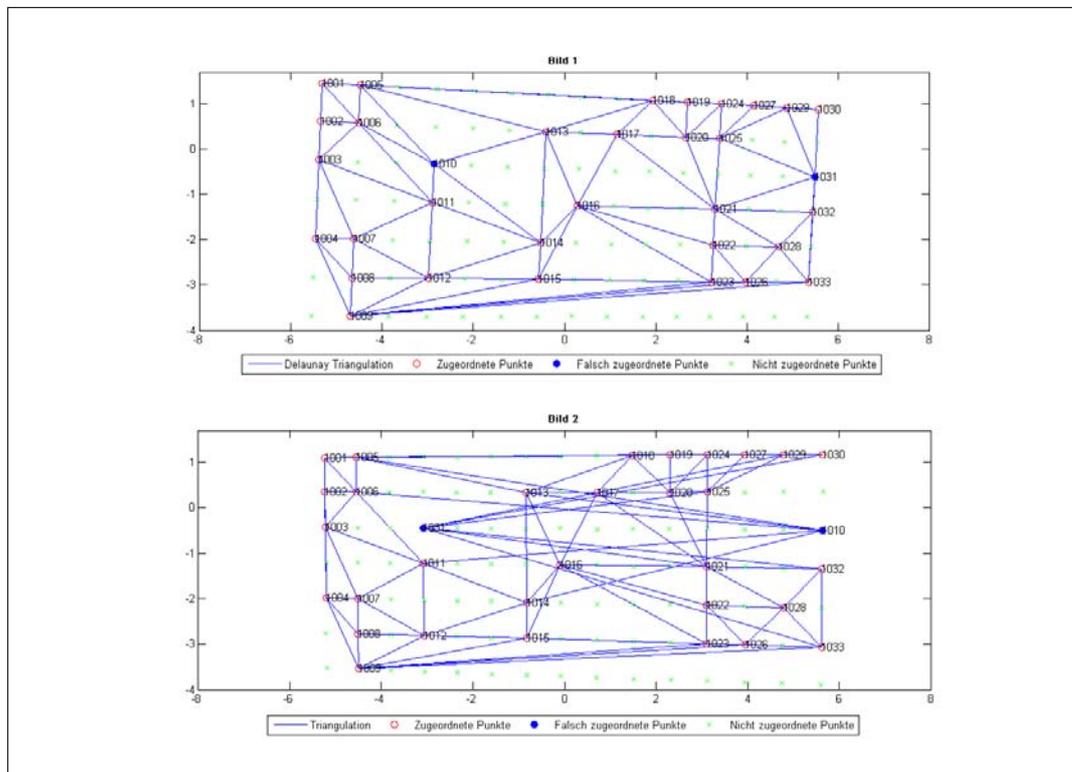


Abbildung 13.4: Darstellung einer Delaunay Triangulation

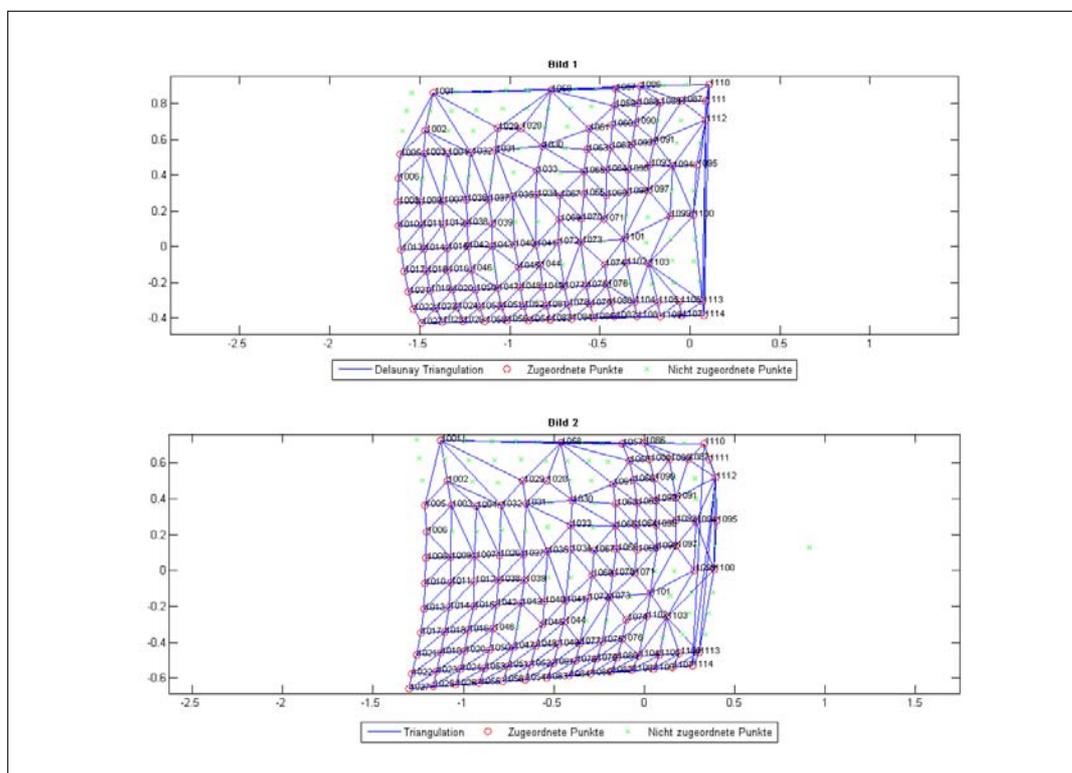
**2. Übertragung der Delaunay Triangulation in das zweite Bild.** Im zweiten Bild wird eine Triangulation der zugeordneten Bildkoordinaten erstellt, indem die Delaunay Triangulation des ersten Bildes mit Hilfe der Punktnummern auf das zweite Bild übertragen wird (s. Graphik 13.4). Hiermit ergibt sich eine Dreiecksvermaschung, die aufgrund des Abbildungsvorgangs und der Ungenauigkeit der Bildkoordinatenbestimmung nicht den Bedingungen der Delaunay Triangulation entspricht. Jedoch gilt für ein ebenes Objekt, auf denen sich die markanten Punkte befinden, dass ein beliebiger Objektpunkt in beiden Bildern in derselben Masche abgebildet wird. Diese Aussage bildet die Grundlage der Zuordnung der Punkte mit Hilfe der Delaunay Triangulation im ersten Bild und der korrespondierenden Dreiecksvermaschung im zweiten Bild.

**3. Zuordnung.** Der Suchbereich für homologe Punkte reduziert sich mit diesem Verfahren auf die jeweilige Masche. Die möglichen Kandidaten innerhalb der Masche können nach den Bedingungen der Epipolargeometrie nach Abschnitt 13.1 überprüft werden. Somit wird ein Punkt eindeutig zugeordnet, falls sich im zweiten Bild nur ein Bildpunkt innerhalb derselben Masche und auf der Epipolarlinie des Bildpunktes aus dem ersten Bild befindet.

Bei dieser Zuordnungsmethode bietet sich eine iterative Durchführung an, um die Anzahl der zugeordneten Punkte zu vergrößern. Hierzu wird in jedem Iterationsschritt die Delaunay Triangulation durch die bereits bekannten und die neu zugeordneten Punk-



(a) Delaunay Triangulation bei Vorliegen eines Ausreißers



(b) Delaunay Triangulation bei einer gekrümmten Fläche

Abbildung 13.5: Darstellung von zwei fehlerhaften Delaunay Triangulationen im zweiten Bild

te der vorherigen Iterationsschritte erstellt und mit dieser Dreiecksvermaschung nach neuen Paaren von Bildpunkten gesucht, die eindeutig zugeordnet werden können.

Das hier vorgestellte Verfahren besitzt zwei Einschränkungen. Zum einen gilt die Aussage des zweiten Schritts nur, wenn keine falsch zugeordneten Punkte vorliegen. Bereits ein falsch zugeordneter Punkt führt zu einer veränderten Dreiecksvermaschung im zweiten Bild (s. Bild 13.5a) und somit zu einer falschen Auflösung der Mehrdeutigkeiten. Des Weiteren gilt diese Aussage nur für ebene Objekte. Abbildung 13.5b zeigt die Triangulation einer gekrümmten Oberfläche. Dadurch fallen einige der korrespondierenden Punkte nicht in die gleiche Dreiecksmasche. Deshalb ist das Verfahren, so wie es hier beschrieben wurde, nur für ebene Punktwolken sinnvoll.

## 14 Ergebnisse

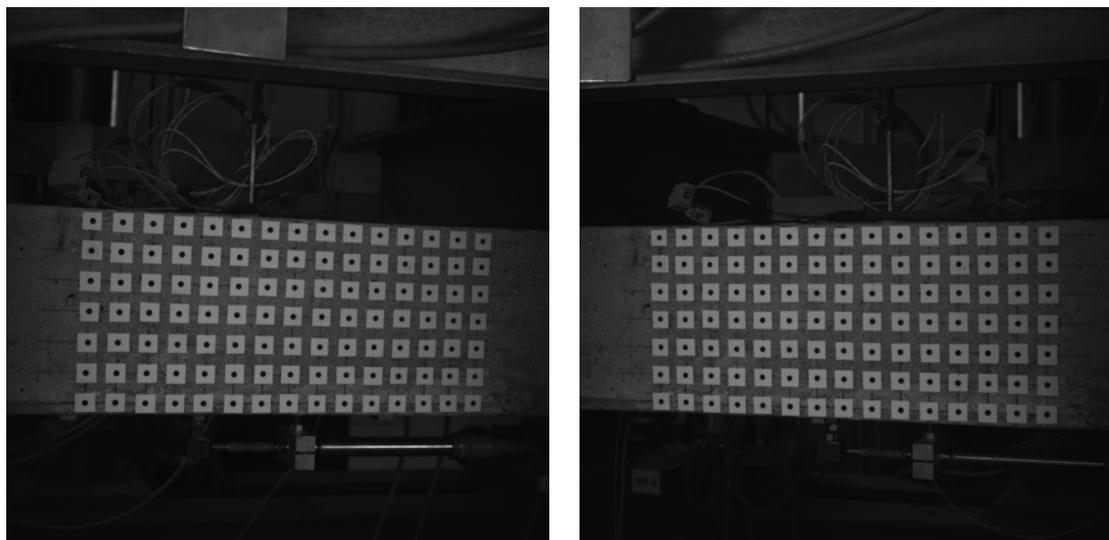
In diesem Abschnitt wird die Effektivität und Zuverlässigkeit der in Kapitel 13 entwickelten Zuordnungsverfahren untersucht. Hierzu liegen drei Testobjekte vor, die die Objektform einer Ebene, eines Zylinders und eines Kopfes besitzen. Die Testobjekte werden nacheinander in den Teilen 14.1, 14.2 und 14.3 beschrieben und die Zuordnungsergebnisse erläutert. Die Auswertung erfolgt mit dem Matlab Programm „Gui-Zuordnung.m“, das im Zuge dieser Arbeit nach den in Abschnitt 13 vorgestellten Methoden selbst implementiert wurde. Für das Verfahren der Epipolargeometrie besteht in dieser Implementation, im Gegensatz zu der Software der Firma AICON 3D Systems GmbH, keine Möglichkeit, die Tiefenausdehnung des Objekts zu berücksichtigen. Dieser Unterschied dient zur Verdeutlichung der Bedeutung dieser Parametereinstellungsmöglichkeit, der im Vergleich der Zuordnungsergebnisse sichtbar wird.

Ein weiterer Unterschied in der Implementierung zur Methodenbeschreibung besteht bei dem Verfahren über die Objektoberfläche. Die Einteilung der Oberflächenpunkte nach (Besl und Jain, 1988) oder (Kutterer und Schön, 1999) wird für die drei Testobjekte nicht verwendet. Da keine Daten über die Genauigkeit der Orientierungsparameter vorliegen und die Punktgenauigkeiten mit zu wenig Nachkommastellen angegeben sind, ist mit diesen unzureichenden Angaben keine statistisch korrekte Einteilung möglich.

### 14.1 Ebenes Objekt

Bei dem ersten Testobjekt handelt es sich um ein ebenes Objekt in einer Größe von ca. 60mm × 90mm, das von zwei Kameras mit dem Messsystem MOVEINSPECT aufgenommen wurde (Abbildung 14.1). Die 105 signalisierten Punkte sind in einem Raster von 15 × 7 Marken angeordnet.

Zunächst beschreibt dieser Abschnitt die Ergebnisse, die unter dem Verfahren der Epipolargeometrie nach Abschnitt 13.1 erreicht werden. Der theoretisch abgeschätzte Wert nach Formel 13.6 ergibt vier bis fünf Mehrdeutigkeiten für zufällig verteilte Punkte. Da es sich hier um rasterförmig angeordnete Punkte handelt, ist mit einer wesent-



(a) Bild 1

(b) Bild 2

Abbildung 14.1: Aufnahme des ersten Testobjekts mit einem Stereokamerasystem

Software	Zugeordnete Punkte		Nicht zugeordnete Punkte
	richtig	falsch	
TRACECAMF (AICON)	33	0	72
Eigene Software $s = 1, m = 5\mu\text{m}$	8	0	97
Eigene Software $s = 2, m = 5\mu\text{m}$	4	0	101
Eigene Software $s = 3, m = 5\mu\text{m}$	1	0	104

Tabelle 14.1: Ergebnisse der Zuordnung mit dem Verfahren Epipolargeometrie im Fallbeispiel der ersten Aufnahme der Ebene

lich größeren Anzahl zu rechnen. Dies zeigt Tabelle 14.1 empirisch mit den Anzahlen an homologen Punkten, die eindeutig zugeordnet werden können. Diese Zuordnungsergebnisse beziehen sich auf die erste Aufnahme der Ebene mit MOVEINSPECT, die hier exemplarisch vorgestellt wird. Die Ergebnisse der weiteren Aufnahmen liegen im Anhang C.3 vor.

Die Tabelle 14.1 enthält zum einen das Ergebnis der Zuordnung, das die Firma AICON 3D Systems GmbH mit ihrer Software TRACECAMF erreicht. Diese Software ordnet 33 von 105 Punkten eindeutig zu. Das entspricht einem Anteil von 31%. Zum anderen listet die Tabelle das Ergebnis des in dieser Arbeit implementierten Algorithmus der Epipolargeometrie als Vergleich auf. Hier wird die Tiefenausdehnung des Objekts nicht berücksichtigt. Ohne diese Angabe kann nur ein Bruchteil der Punkte zugeordnet werden. Mit kleiner werdendem Signifikanzniveau  $s$  steigt die Anzahl der zugeordneten Punkte auf maximal acht zugeordnete homologe Punkte. Diese Anzahl bezieht sich auf einen maximalen Abstand zur Epipolarlinie von  $m = 5\mu\text{m}$ , der für die Zuordnung mit der AICON-Software ebenfalls verwendet wird. In den nachfolgenden Beispielen wird

dieser Wert beibehalten.

Diese Ergebnisse zeigen, dass für eine eindeutige Zuordnung aller Punkte mit dem Verfahren der Epipolargeometrie die Kenntnis des Abstandes des Aufnahmesystems zum Objekt von essenzieller Bedeutung ist. Dies liegt an der kleinen Größe des Messobjekts und an der rasterförmigen Anordnung der uncodierten Punkte, die die Mehrdeutigkeiten hervorrufen.

Aufgrund dieser Ergebnisse wird im Folgenden untersucht, ob und inwieweit die zwei weiteren Verfahren (s. Abschnitt 13.2 und 13.3) die Mehrdeutigkeiten reduzieren. Beide basieren auf den bereits zugeordneten Punkten des Zuordnungsalgorithmus der Firma AICON 3D Systems GmbH.

**Zuordnung über die Objektoberfläche.** Der implementierte Zuordnungsalgorithmus für das Zuordnungsverfahren über die Objektoberfläche nach Abschnitt 13.2 basiert auf der Flächeneinteilung nach Absatz 13.2.1. Hier stehen die Flächenformen der Ebene, des Zylinders und der Kugel zur Verfügung. Des Weiteren integriert das Programm eine allgemeine Lösung für die Fläche zweiter Ordnung. Somit bietet sich für das vorliegende Beispiel die Angabe der Ebene als Flächenform an. Als weitere Möglichkeit wird untersucht, inwieweit sich die Oberfläche auch ohne Kenntnis der genauen Flächenform als Fläche zweiter Ordnung darstellen lässt.

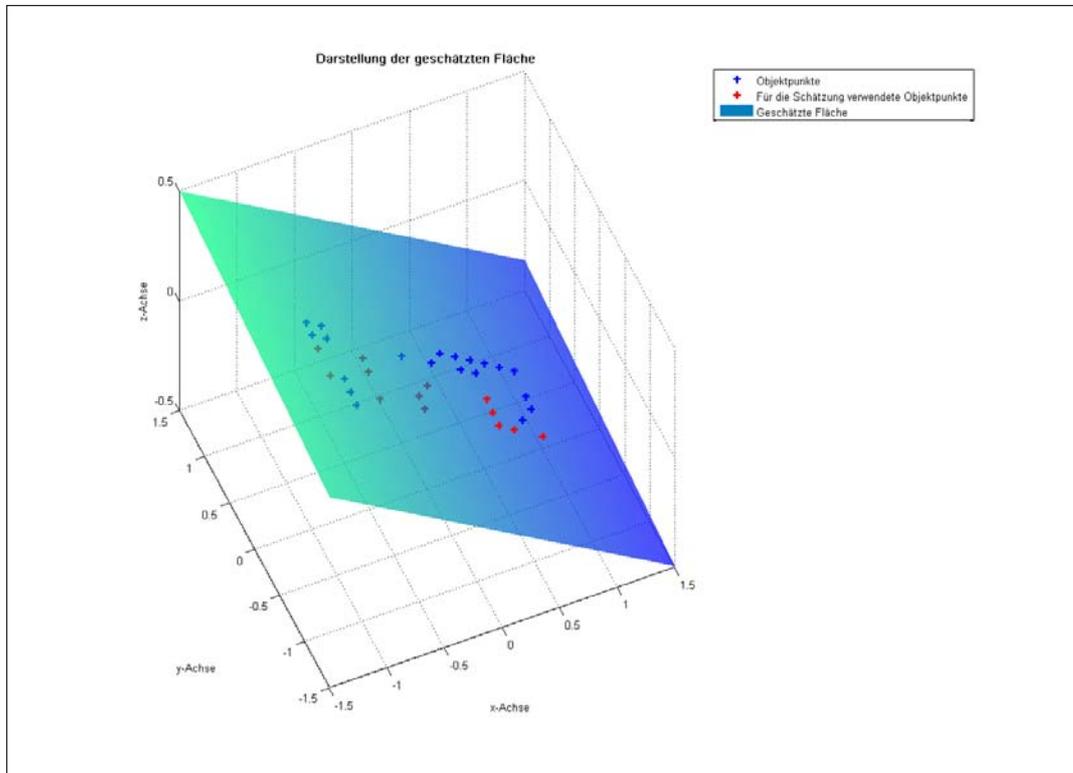
Zusätzlich zu der Angabe der Flächenform benötigt der implementierte Algorithmus 3D-Objektpunkte. Diese berechnet die Software der Firma AICON 3D Systems GmbH aus den bereits zugeordneten Punkten. Somit liegen 33 Objektpunkte für die Objektoberflächenschätzung vor.

Typ der Oberfläche	Neu zugeordnete Punkte		Nicht zugeordnete Punkte
	richtig	falsch	
Ebene	72	0	0
Quadrik	72	0	0
Quadrik	58	0	14

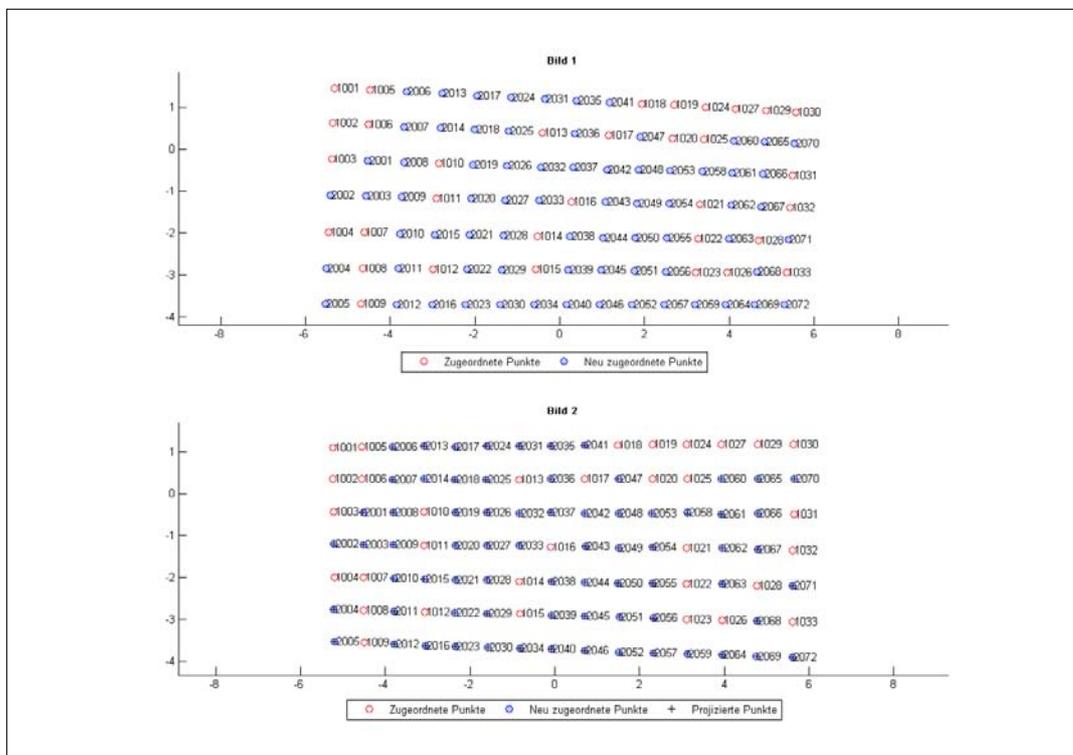
Tabelle 14.2: Ergebnisse der Zuordnung mit dem Zuordnungsverfahren über die Objektoberfläche im Fallbeispiel der ersten Aufnahme der Ebene

Für die Schätzung einer Ebene reichen bereits drei Punkte aus, von denen die 3D-Punktkoordinaten bekannt sind. Weitere Punkte stabilisieren das Ergebnis und ermöglichen außerdem, falsch zugeordnete Punkte zu detektieren. Dies erreicht der Algorithmus zur Schätzung der Flächenparameter durch das integrierte RANSAC-Verfahren.

Mit der Kenntnis über den Typ der Objektoberfläche beschränkt sich der Suchbereich für den jeweiligen korrespondierenden Punkt, wie in Abschnitt 13.2 beschrieben, auf die Fehlerellipse des projizierten Punktes. Dadurch lassen sich im vorliegenden Beispiel alle Punkte eindeutig und richtig mit der geschätzten Ebene zuordnen. Das Ergebnis der Zuordnung ist in Abbildung 14.2 dargestellt und in Tabelle 14.2 aufgelistet.

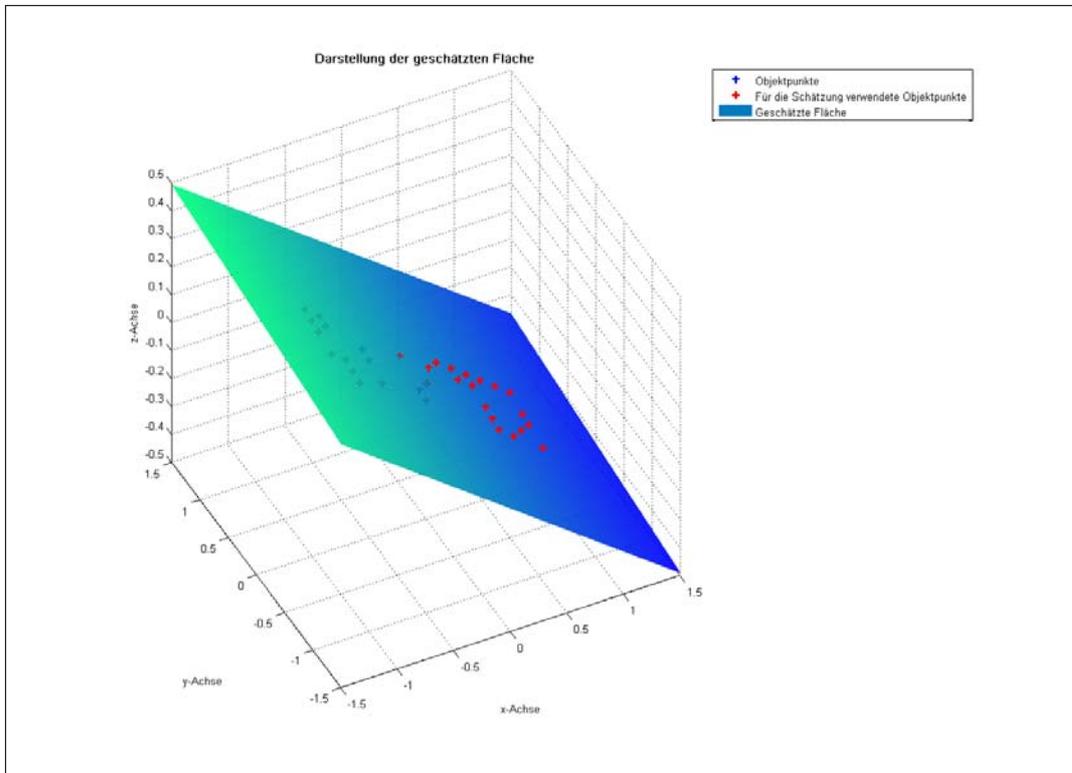


(a) Schätzung der Ebene

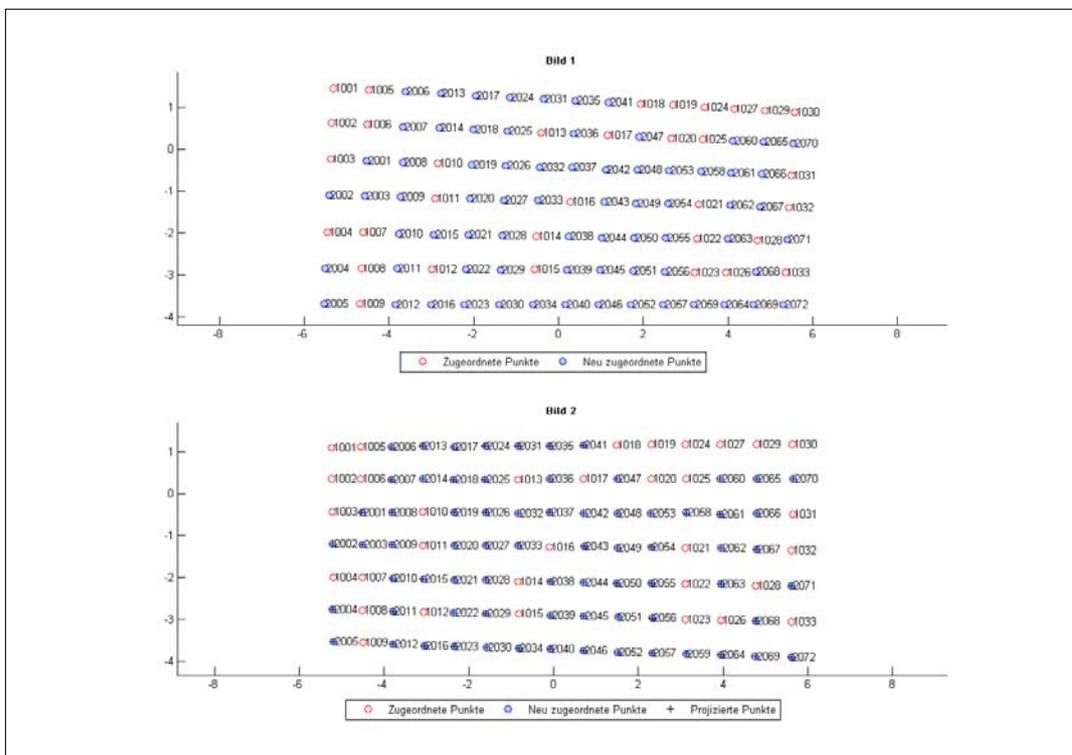


(b) Zuordnungsergebnis

Abbildung 14.2: Ergebnisse des Zuordnungsalgorithmus mit Kenntnis über die Oberflächenform als Ebene (Testobjekt 1)

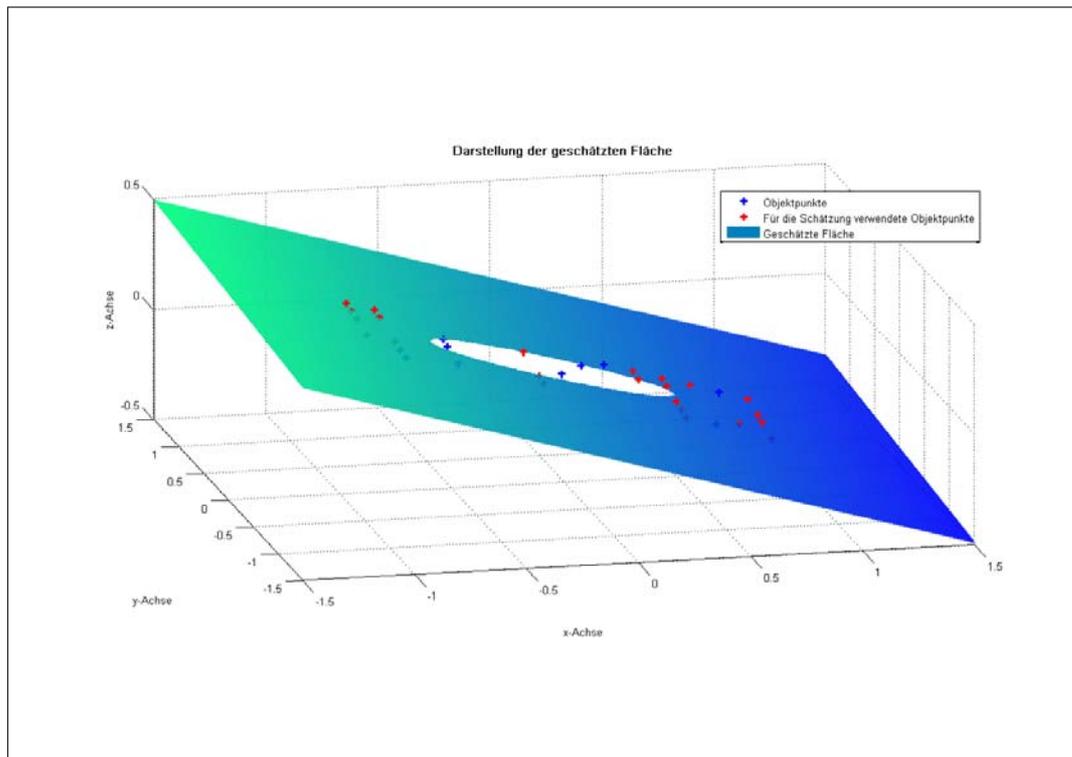


(a) Schätzung der Quadrik

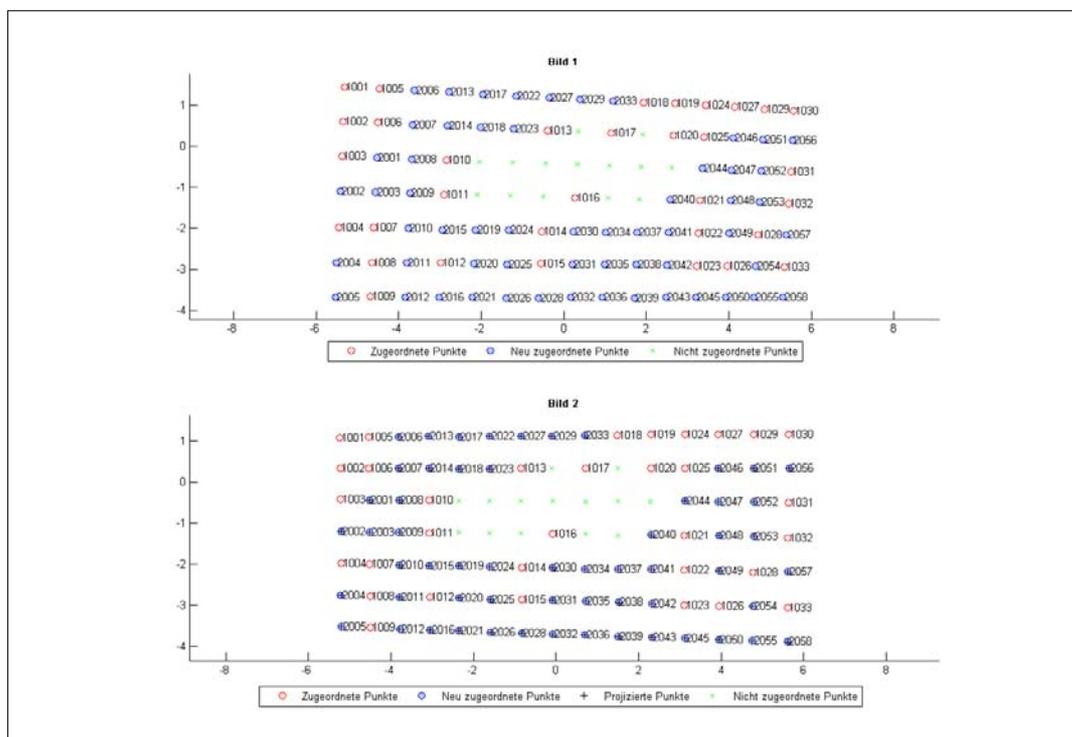


(b) Zuordnungsergebnis

Abbildung 14.3: Ergebnisse des Zuordnungsalgorithmus ohne Kenntnis über die Oberflächenform als Ebene (Testobjekt 1, Durchlauf 1)



(a) Schätzung der Quadrik



(b) Zuordnungsergebnis

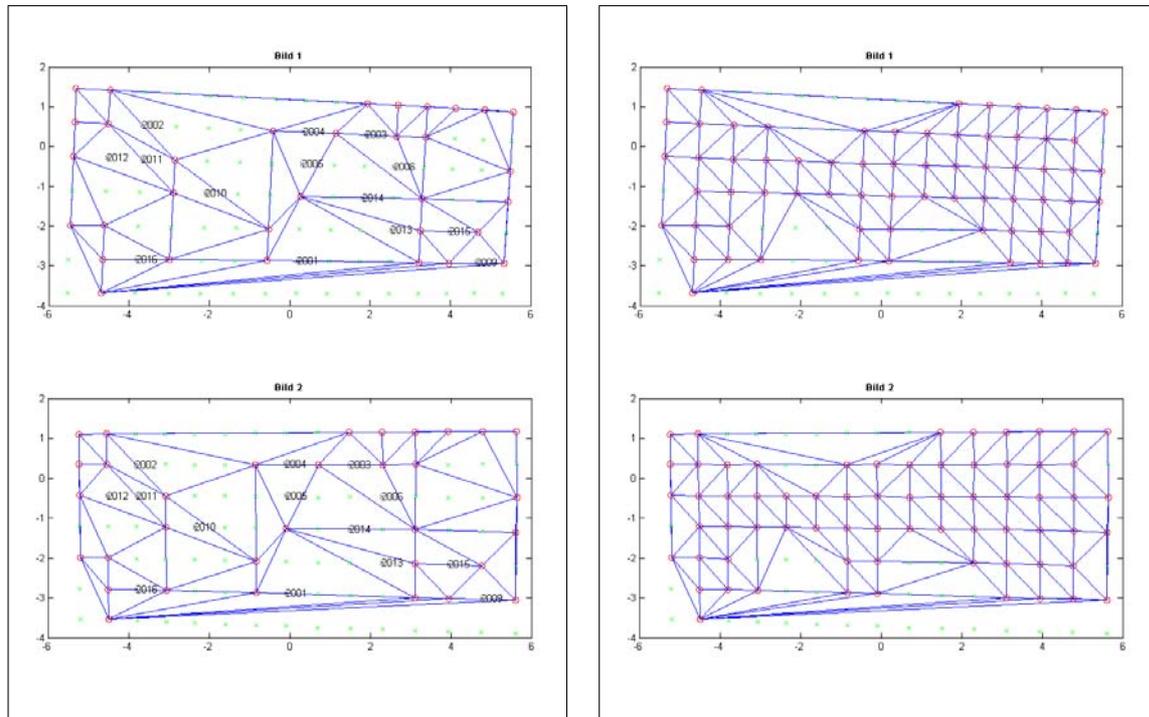
Abbildung 14.4: Ergebnisse des Zuordnungsalgorithmus ohne Kenntnis über die Oberflächenform als Ebene (Testobjekt 1, Durchlauf 2)

Ohne Kenntnis des Typs der Oberfläche besteht die Möglichkeit, eine glatte und stetige Oberfläche als Quadrik zu beschreiben. Für die Schätzung einer Fläche zweiter Ordnung werden mindestens neun bereits zugeordnete Punkte benötigt. Mit einer größeren Anzahl an Freiheitsgraden als für die vorliegende Ebenenform benötigt, ist die Berechnung numerisch instabiler als bei der Schätzung der Ebenenparameter. Dies wird empirisch dadurch bestätigt, dass die geschätzte Fläche zweiter Ordnung nur näherungsweise einer Ebene entspricht. Hierzu zeigen die Abbildungen 14.3a und 14.4a zwei Ergebnisse der Flächenschätzung, die von zwei Durchläufen des Zuordnungsverfahrens der Homographie mit gleichen Einstellungen stammen. Die Unterschiede der Schätzung liegen an dem verwendeten RANSAC-Verfahren, das aus zufällig ausgewählten Punkten die Fläche als direkte Lösung bestimmt. Je nachdem welche 3D-Punkte als zur Fläche zugehörig klassifiziert werden, kann die Quadrik bei dem anschließenden Ausgleich variieren. Die erste ermittelte Quadrik zeigt, dass die ermittelte Oberflächenform einer Ebene durch alle Objektpunkte ähnelt. Mit Hilfe dieser Quadrik lassen sich alle Punkte eindeutig und richtig zuordnen (s. Bild 14.3b). Die Zuordnung entspricht dem Ergebnis aus Abbildung 14.2b.

Die Oberflächenform des zweiten Durchlaufs entspricht keiner durchgängigen Ebene. Dies wird durch die zusätzlichen Freiheitsgrade der Fläche zweiter Ordnung in Bezug zur Ebene hervorgerufen. Somit lässt sich hier die Auflösung aller Mehrdeutigkeiten nicht garantieren. Das Zuordnungsergebnis in Graphik 14.4b zeigt, dass 14 Punkte nicht in das zweite Bild projiziert und zugeordnet werden können. Dies liegt an der geschätzten Flächenform, bei der sich keine reellen Schnittpunkte der Projektionsstrahlen dieser Punkte mit der geschätzten Fläche ergeben.

**Delaunay Triangulation.** Eine alternative Auflösung der Mehrdeutigkeiten, die nach der Zuordnung mit dem Verfahren der Epipolargeometrie noch vorliegen, beschreibt Abschnitt 13.3. Dieses Verfahren verwendet die Delaunay Triangulation zur Beschreibung der gegenseitigen Lage der Bildpunkte. Zu dessen Erstellung benötigt der implementierte Algorithmus bereits zugeordnete Bildpunkte. Die AICON-Software liefert hierzu die zugeordneten Bildkoordinaten mit entsprechenden Punktnummern für beide Bilder einer Aufnahme. Das Verfahren wird am gleichen Datensatz getestet, der auch für die Zuordnung über die Objektoberfläche zur Verfügung steht.

In der ersten Iteration findet die Zuordnung der Punkte mit der in Abbildung 14.5a dargestellten Delaunay Triangulation statt. Der Zuordnungsalgorithmus findet in diesem Iterationsschritt 16 weitere homologe Punkte. In drei weiteren Iterationsschritten werden nochmals 19 Punkte zugeordnet, so dass insgesamt 65% der Bildpunkte als homologe Punkte mit den zwei Zuordnungsverfahren der Epipolargeometrie und der Delaunay Triangulation detektiert sind. Die Zuordnungsergebnisse der einzelnen Iterationsschritte fasst Tabelle 14.3 zusammen. Im Gegensatz zu der Zuordnung über die Objektoberfläche ist dies kein zufriedenstellendes Ergebnis. Die Delaunay Triangulation nach der letzten Iteration in Graphik 14.5b verdeutlicht zwei Probleme dieses Verfahrens. Die Bildpunkte, die außerhalb der Delaunay Triangulation liegen, können keiner Masche zugeordnet werden und somit findet auch keine Zuordnung für diese Punkte



(a) Iteration 1: 16 neu zugeordnete Punkte

(b) Iteration 5: 0 neu zugeordnete Punkte



(c) Darstellung des Zuordnungsergebnisses innerhalb der Benutzeroberfläche

Abbildung 14.5: Zuordnungsergebnis mit Verfahren der Delaunay Triangulation

Iteration	Neu zugeordnete Punkte		Nicht zugeordnete Punkte
	richtig	falsch	
1	16	0	56
2	12	0	44
3	5	0	39
4	2	0	37
Gesamt	35	0	37

Tabelle 14.3: Ergebnisse der Zuordnung mit dem Verfahren der Delaunay Triangulation im Fallbeispiel der ersten Aufnahme der Ebene

statt. Des Weiteren liegen mit dieser Triangulation einige Bildpunkte aufgrund der rasterförmigen Anordnung auf den Maschengrenzen, wodurch homologe Punkte teilweise durch die Unsicherheit der Bildkoordinaten in unterschiedliche Maschen fallen. Diese Punkte können ohne die Berücksichtigung eines entsprechenden Toleranzbereiches um die Masche ebenfalls nicht zugeordnet werden. Ein weiteres Problem dieses Verfahrens, das bereits im Vorfeld in Abschnitt 13.3 angesprochen wurde, liegt darin, dass das Verfahren keine Ausreißerdetektion beinhaltet und nur für ebene Flächen sinnvoll ist. Die Möglichkeiten, dieses Verfahren zu verbessern, werden innerhalb dieser Arbeit nicht näher untersucht. Allerdings zeigt der Ausblick einige Ansätze zur Verbesserung dieses Verfahrens auf.

## 14.2 Zylinder

Das zweite Testobjekt, dargestellt in der Abbildung 14.6, besteht aus einem zylinderförmigen Körper. In der Industrievermessung liegen häufig zylinderförmige Objekte innerhalb des Messvolumens vor. Dies können zum Beispiel Rohre, Leitungen oder Schornsteine sein. Deshalb ist eine spezielle Untersuchung dieser Objektform ebenfalls sinnvoll. Hier liegt ein Zylinder mit einem Krümmungsradius von etwa 140mm vor. Auf diesem Objekt befinden sich 168 uncodierte Marken in einem  $14 \times 12$  Raster.

Software	Zugeordnete Punkte		Nicht zugeordnete Punkte
	richtig	falsch	
TRACECAMF (AICON)	105	0	63
Eigene Software $s = 1, m = 5\mu\text{m}$	39	0	129
Eigene Software $s = 2, m = 5\mu\text{m}$	14	0	154
Eigene Software $s = 3, m = 5\mu\text{m}$	4	0	164

Tabelle 14.4: Ergebnisse der Zuordnung mit dem Verfahren Epipolargeometrie im Fallbeispiel der ersten Aufnahme des Zylinders

Nach Formel 13.6 auf Seite 151 ist für dieses Objekt etwa mit 20 Mehrdeutigkeiten bei

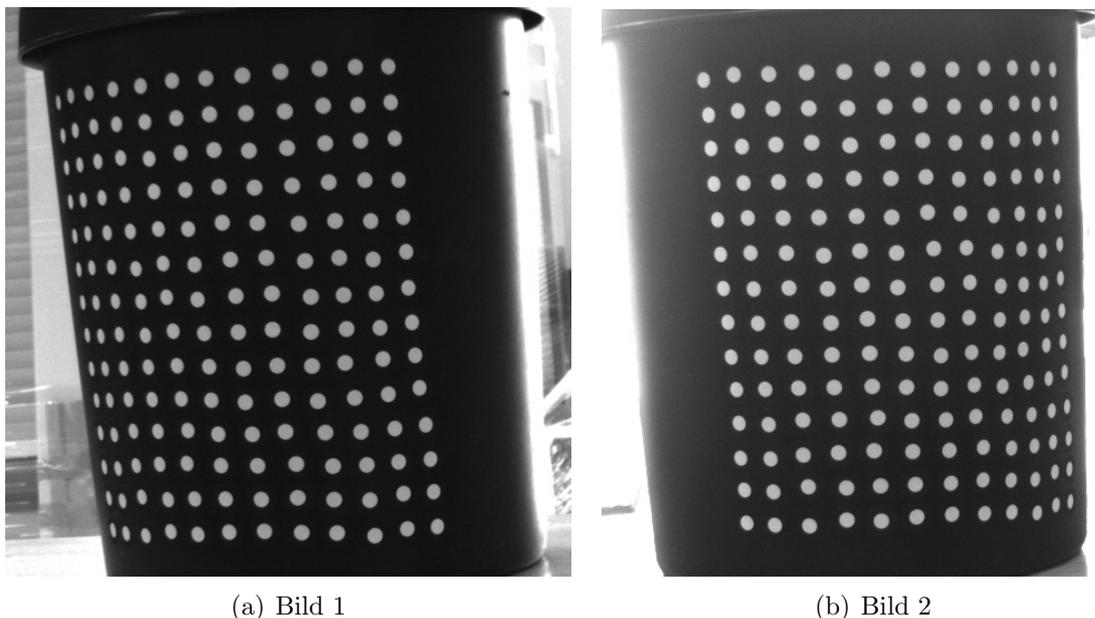
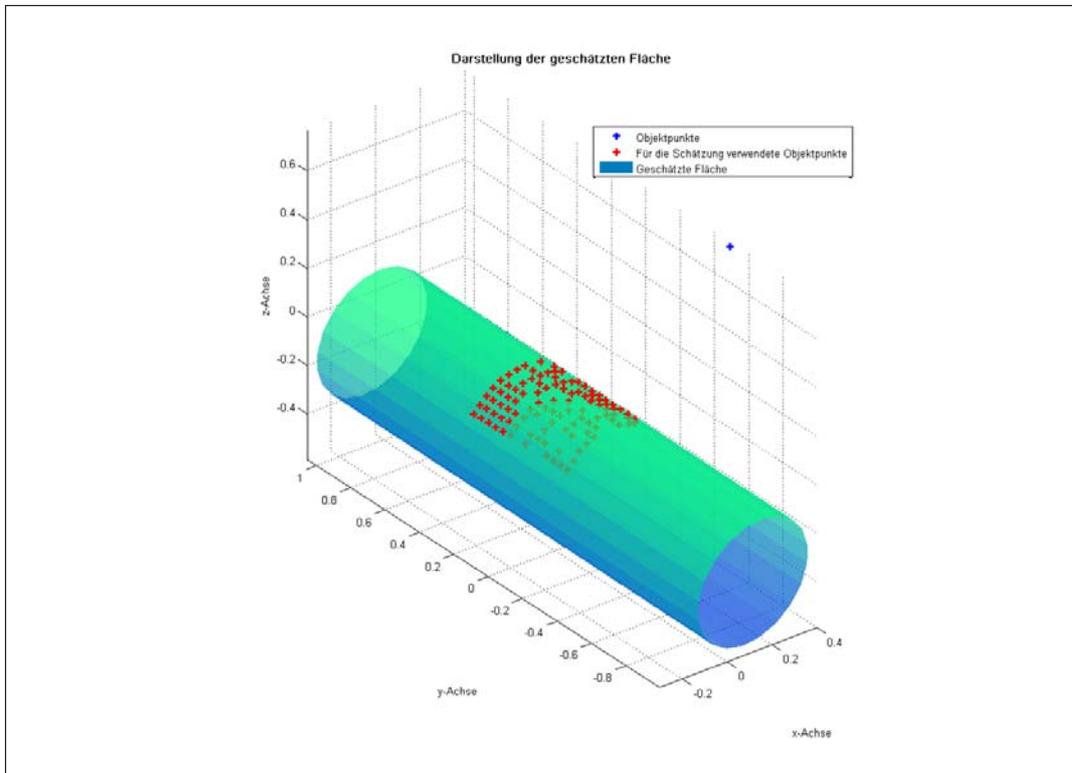


Abbildung 14.6: Aufnahme des zweiten Testobjekts mit einem Stereokamerasystem

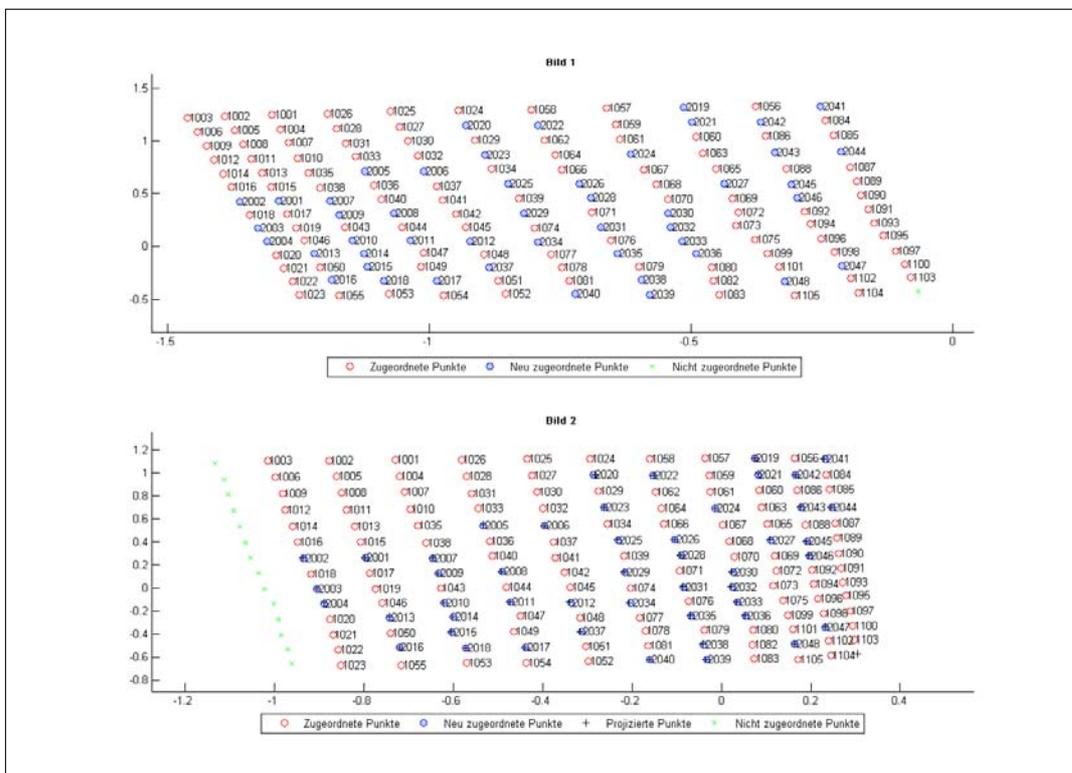
zufällig verteilten Daten zu rechnen. Der Anstieg im Gegensatz zum Beispiel der Ebene aus Abschnitt 14.1 liegt an der steigenden Anzahl an Punkten, mit der die Anzahl der Mehrdeutigkeiten etwa quadratisch zunimmt. Mit dem Zylinder liegt hier allerdings ein größeres Objekt vor. Damit ermöglicht der Zuordnungsalgorithmus der Firma AICON 3D Systems GmbH eine richtige Zuordnung von 105 Punkten für die erste Aufnahme des Objekts mit MOVEINSPECT. Bei 153 Punkten, die in beiden Bildern sichtbar sind, entspricht dies einem Anteil von 68%. Im Beispiel der Ebene konnten lediglich 31% der Punkte mittels des Verfahrens der Epipolargeometrie zugeordnet werden. Ohne Kenntnisse der Ausdehnung des Objekts ist die Zuordnung von bis zu 39 Punkten mit dem selbst implementierten Algorithmus möglich. In Tabelle 14.4 sind diese und weitere Zuordnungsergebnisse für unterschiedliche Signifikanzniveaus zusammengefasst.

Aufgrund der komplexeren Form des Objekts ist auch hier eine Zuordnung von möglichst vielen Punkten wünschenswert. Deshalb wird im nächsten Absatz die Zuordnung über die geschätzte Zylinderoberfläche untersucht. Für die Zuordnung mit der Delaunay Triangulation werden bei einem Zylinder die Voraussetzungen nicht erfüllt und somit wird dieses Verfahren hier nicht betrachtet.

**Zuordnung über die Objektoberfläche.** Das Zuordnungsverfahren über die Objektoberfläche benötigt die ermittelten 3D-Koordinaten der bereits zuordneten Punkte. Für die erste Aufnahme stehen 105 Objektpunkte aus dem AICON-Algorithmus zur Verfügung. Hiervon gehört ein Punkt nicht zu der Objektoberfläche. Somit kann in diesem Beispiel getestet werden, inwieweit der Zuordnungsalgorithmus durch einen einzelnen Ausreißer beeinflusst wird beziehungsweise inwieweit dieser Ausreißer detektiert werden kann.

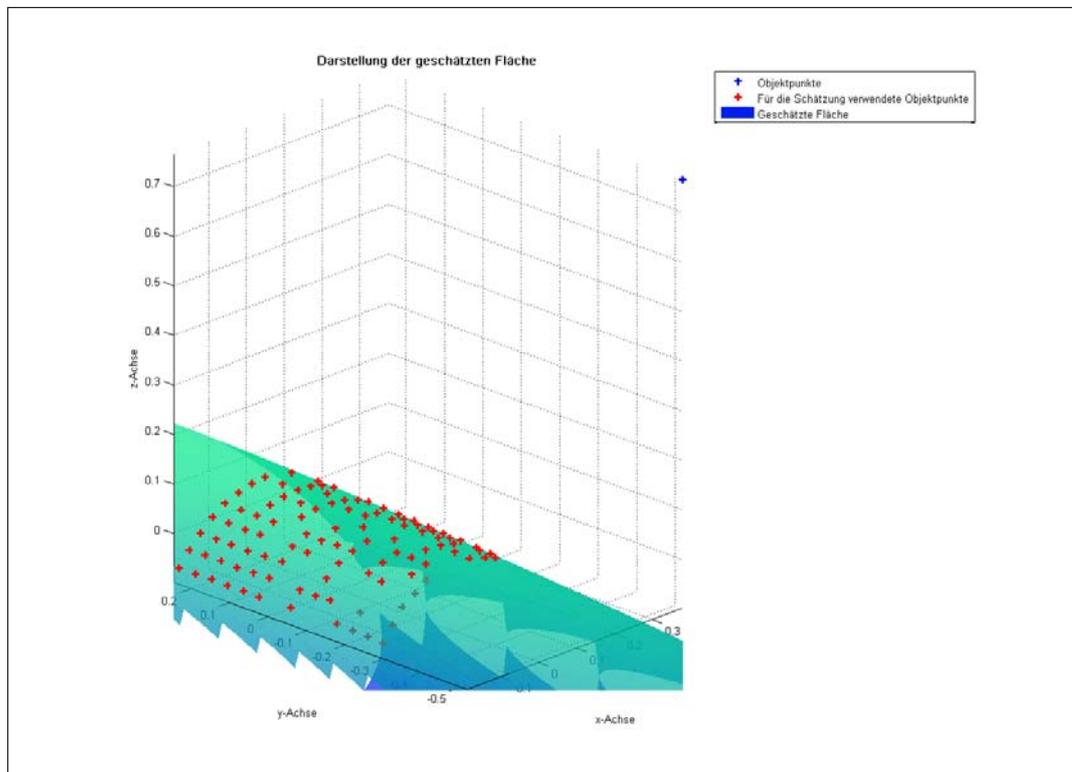


(a) Schätzung des Zylinders

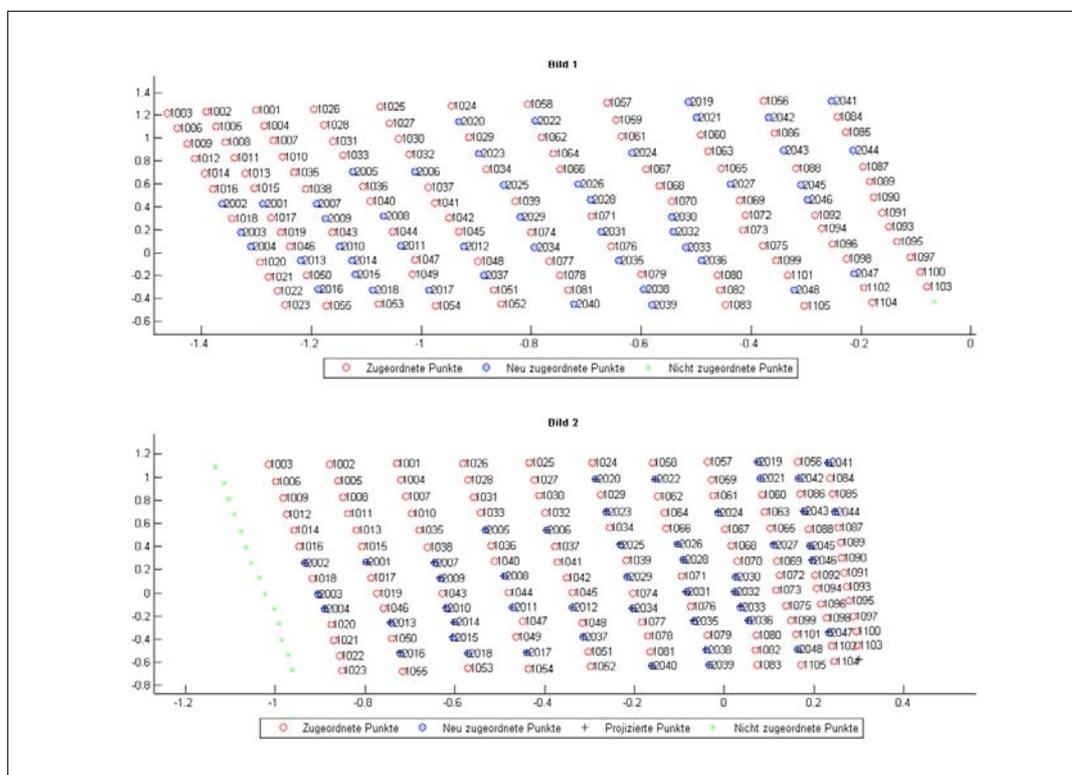


(b) Zuordnungsergebnis

Abbildung 14.7: Ergebnisse des Zuordnungsalgorithmus mit Kenntnis über die Oberflächenform als Zylinder (Testobjekt 2)

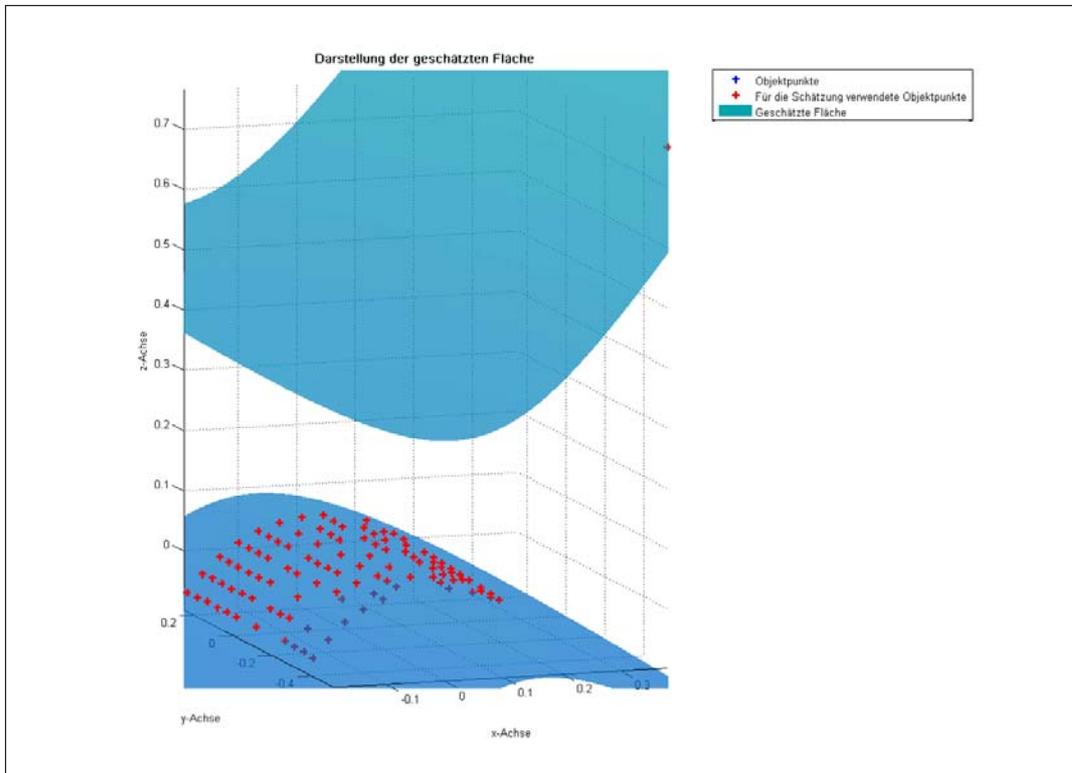


(a) Schätzung der Quadrik

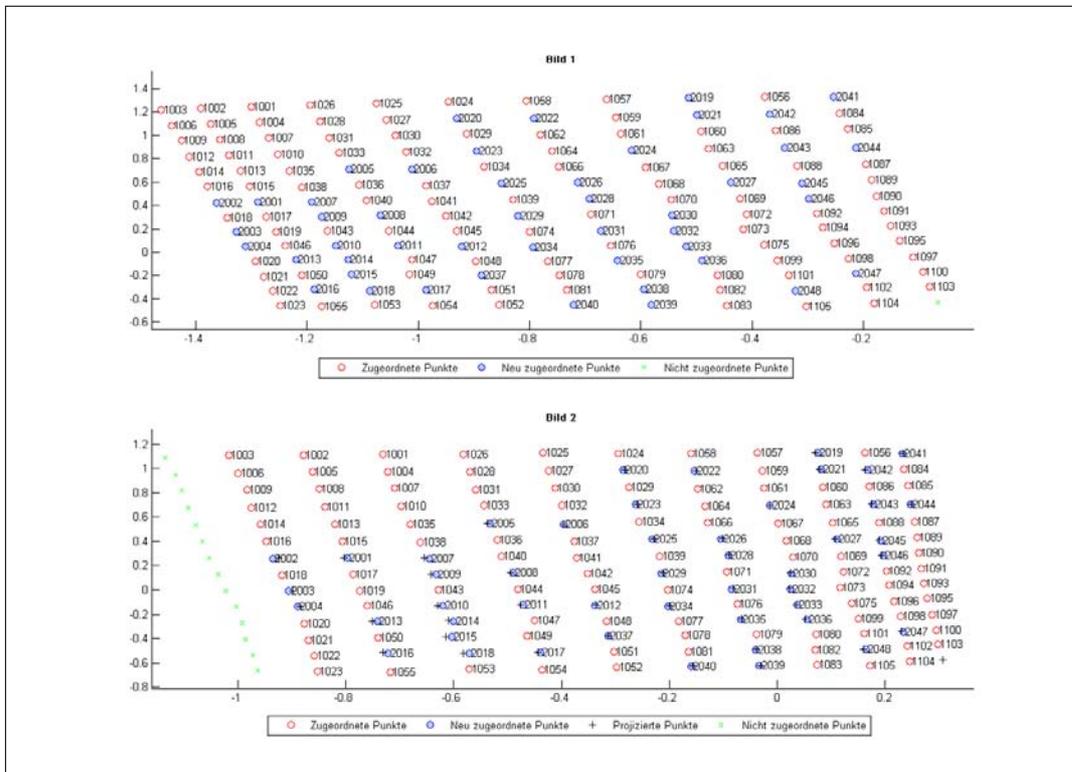


(b) Zuordnungsergebnis

Abbildung 14.8: Ergebnisse des Zuordnungsalgorithmus ohne Kenntnis über die Oberflächenform als Zylinder (Testobjekt 2, Durchlauf 1)



(a) Schätzung der Quadrik



(b) Zuordnungsergebnis

Abbildung 14.9: Ergebnisse des Zuordnungsalgorithmus ohne Kenntnis über die Oberflächenform als Zylinder (Testobjekt 2, Durchlauf 2)

Typ der Oberfläche	Neu zugeordnete Punkte		Nicht zugeordnete Punkte
	richtig	falsch	
Zylinder	48	0	0
Quadrik	48	0	0
Quadrik	48	0	0

Tabelle 14.5: Ergebnisse der Zuordnung mit dem Zuordnungsverfahren über die Objektoberfläche im Fallbeispiel der ersten Aufnahme des Zylinders

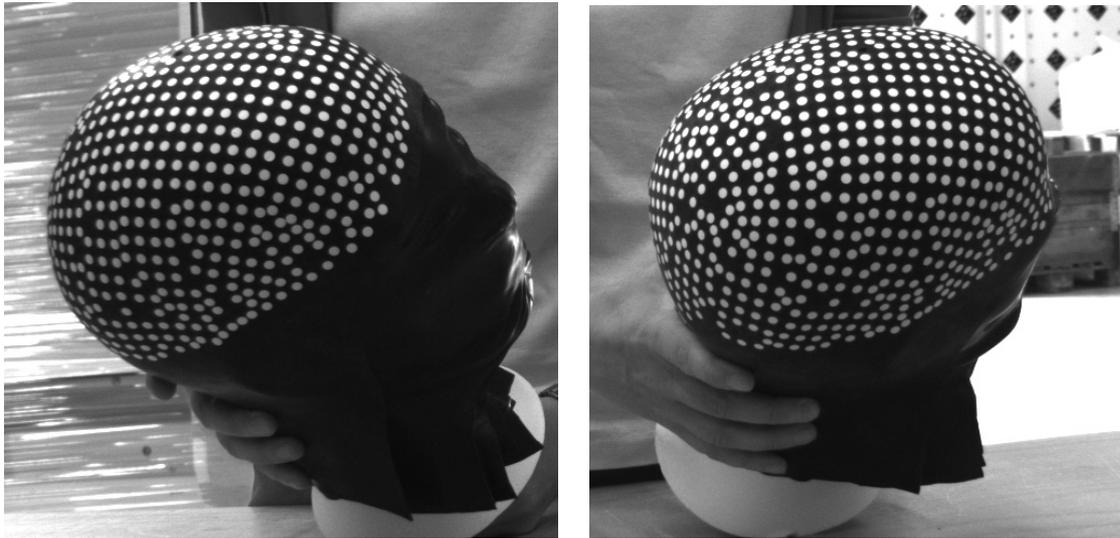
Die Oberfläche wird zuerst als Zylinder approximiert. Die geschätzte Zylinderoberfläche stellt Bild 14.7a dar. Der Ausreißer wird bei dem Zylinderausgleich nicht verwendet und besitzt somit keinen Einfluss auf die Oberflächenschätzung und die anschließende Zuordnung. Alle Punktepaare, die in beiden Bildern sichtbar sind, können mit diesem Zuordnungsalgorithmus eindeutig und richtig zuordnet werden (s. Abbildung 14.7b und Tabelle 14.5).

Als nächstes zeigen die Abbildungen 14.8a und 14.9a zwei Flächenschätzungen als Quadrik. Hierbei wird von einer unbekanntenen Flächenform ausgegangen. Im ersten Durchlauf wird der Ausreißer detektiert und die Flächenform zylinderförmig geschätzt. Der zweite Durchlauf integriert den Ausreißer in die Flächenschätzung, so dass die geschätzte Flächenform einen hyperbolischen Zylinder darstellt. Für die Projektion der Bildpunkte aus dem ersten Bild in das zweite Bild wird bei zwei berechneten Schnittpunkten des Projektionsstrahls mit der Quadrik der ausgewählt, der am nächsten an einem der vorliegenden 3D-Punktkoordinaten liegt. Somit liegen die Schnittpunkte alle auf dem richtigen Flächenstück und ermöglichen mit beiden geschätzten Oberflächen eine richtige Zuordnung aller vorliegenden homologen Punktepaare. Die Abbildungen 14.8b und 14.9b veranschaulichen diese Zuordnungsergebnisse graphisch.

Insgesamt liegen acht Aufnahmen des zylinderförmigen Objekts in unterschiedlichen Positionen vor. Tabelle C.2 im Anhang C.3 stellt die Ergebnisse mit dem Zuordnungsverfahren über die Objektoberfläche für alle durchgeführten Aufnahmen zusammen. Lediglich bei einer der acht Aufnahmen des Zylinders, kann ein homologes Punktepaar über die Quadrik nicht zugeordnet werden. Mit der Schätzung der Oberfläche als Zylinder ist diese Zuordnung jedoch garantiert. Eine genaue Kenntnis und Schätzung der Objektoberfläche verbessert somit das Zuordnungsergebnis.

### 14.3 Kopf

Dieses dritte Testobjekt beruht auf einem anwendungsbezogenen Projekt. Hierbei soll die Form eines Kopfes bestimmt werden. Auf einem Modell (s. Graphik 14.10) befinden sich hierzu möglichst zufällig etwa 1200 Punkte. Die zwei Kameras nehmen jeweils einen unterschiedlichen Objektausschnitt auf, der sich je nach Größe der Basis und Neigung der Kameras in einem bestimmten Bereich überschneidet. In jedem Bild werden ungefähr 300 Punkte abgebildet, wobei davon etwa 150 Punkte im Überlappungsbereich



(a) Bild 1

(b) Bild 2

Abbildung 14.10: Aufnahme des dritten Testobjekts mit einem Stereokamerasystem

der beiden Bilder liegen. Für die erste Aufnahme liegen 290 Bildpunkte im ersten Bild und 317 Bildpunkte im zweiten Bild vor. Davon sind 156 Punkte in beiden Bildern abgebildet.

Software	Zugeordnete Punkte		Nicht zugeordnete Punkte
	richtig	falsch	
TRACECAMF (AICON)	71	19	82
Eigene Software $s = 1, m = 5\mu\text{m}$	2	3	154
Eigene Software $s = 2, m = 5\mu\text{m}$	0	1	156
Eigene Software $s = 3, m = 5\mu\text{m}$	0	0	156

Tabelle 14.6: Ergebnisse der Zuordnung mit dem Verfahren Epipolargeometrie im Fallbeispiel der ersten Aufnahme des Kopfes

Für dieses Beispiel sind etwa 125 Mehrdeutigkeiten zu erwarten. Tabelle 14.6 zeigt die Zuordnungsergebnisse der Epipolargeometrie. Die 90 zugeordneten Punkte mit der Software der Firma AICON 3D Systems GmbH bestätigen diese abgeschätzte Anzahl. Allerdings zeigt sich bei Betrachtung der nummerierten Punkte in Abbildung 14.11, dass 19 Punkte falsch zugeordnet werden. Ohne Berücksichtigung der Tiefenausdehnung des Objekts bestimmt der Algorithmus lediglich zwei von fünf identifizierten homologen Punktpaaren richtig. Deshalb ist die Berücksichtigung der Tiefenausdehnung des Objekts für eine weitere Zuordnung unumgänglich.

Dieses Beispiel stellt die Herausforderung, aus der bereits zugeordneten Punktemenge etwa 20% Ausreißer zu detektieren. Weiterhin ist eine Zuordnung möglichst vieler Punkte für die Bestimmung der komplexen Form des Kopfes erforderlich. Deshalb wird

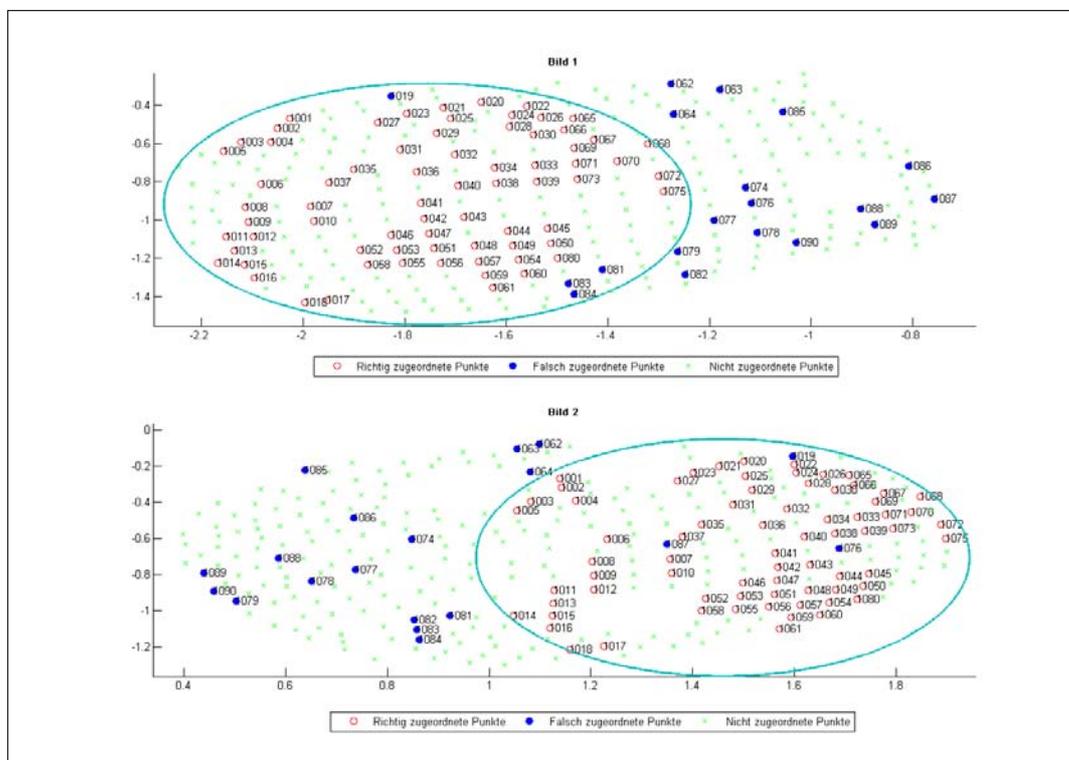
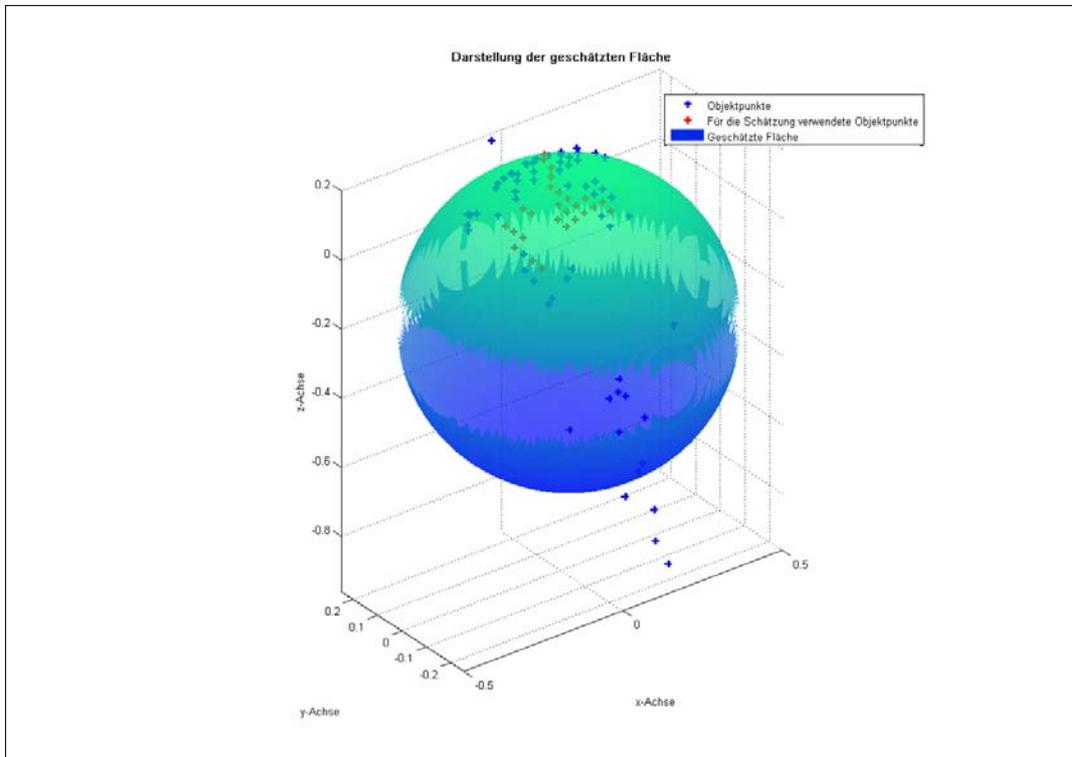


Abbildung 14.11: Darstellung des Zuordnungsergebnis mit der Software der Firma AICON 3D Systems GmbH. Der Überlappungsbereich, in dem die in beiden Bildern sichtbaren homologen Punkte liegen, ist mit einer cyanfarbenen Ellipse gekennzeichnet.

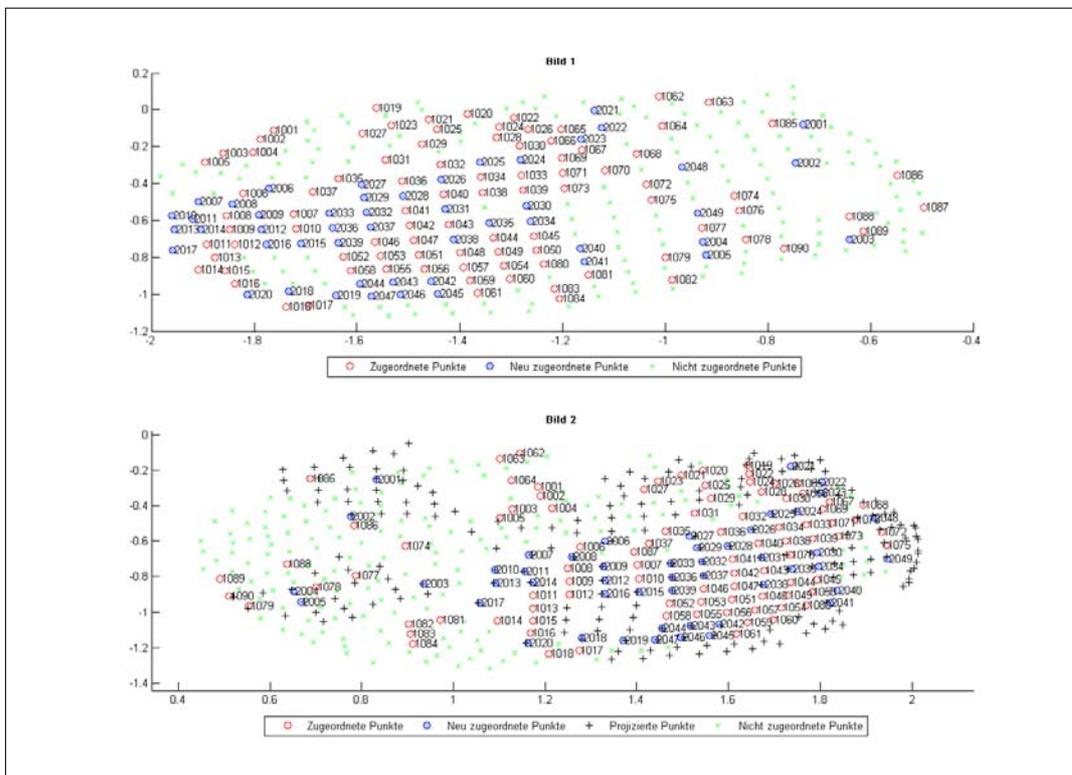
im Folgenden untersucht, inwieweit die Oberfläche mit den vorgegebenen Oberflächenklassen approximiert und so die Zuordnung verbessert werden kann.

**Zuordnung über die Objektoberfläche.** Aus den ermittelten 3D-Koordinaten der Software der Firma AICON 3D Systems GmbH wird im Folgenden die Oberfläche approximativ mit den Modellen einer Kugel und einer Fläche zweiter Ordnung geschätzt. Als weiteres Modell zur Beschreibung der Objektoberfläche bietet sich für die Form eines Kopfes das Ellipsoid an. Die Schätzung der Parameter eines Ellipsoids ist im Programm allerdings nicht integriert, da eine Reduzierung der Parameter in Bezug zur Fläche zweiter Ordnung nicht erforderlich ist. Ebenso wie die Quadrik wird das Ellipsoid durch neun Parameter beschrieben.

Zuerst wird der erste Datensatz der Kopfaufnahmen mit der Zuordnung über eine Kugeloberfläche betrachtet. Das Ergebnis der Flächenschätzung ist zusammen mit dem Resultat der Zuordnung in Abbildung 14.12 dargestellt und in Tabelle 14.7 aufgelistet. Die Kugelschätzung bezieht sich vor allem auf Objektpunkte, die sich im mittleren Bereich der aufgenommenen 3D-Punkte befinden. Somit können in diesem Bereich die weiteren 44 gemessenen Bildpunkte richtig zugeordnet werden. Außerhalb dieses Bereiches werden fünf Bildkoordinatenpaare fälschlicherweise als korrespondierend zugeordnet und 41 Punktpaare nicht zugeordnet. Das entspricht einem Zuordnungsanteil von

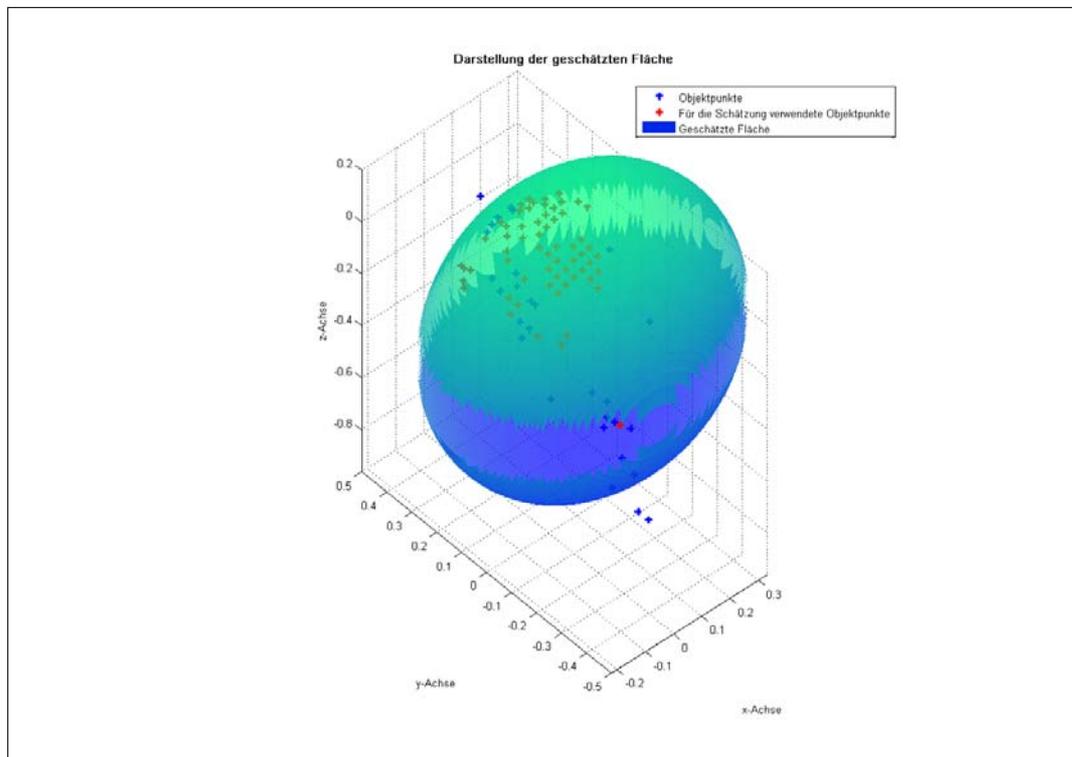


(a) Schätzung der Kopfoberfläche als Kugel

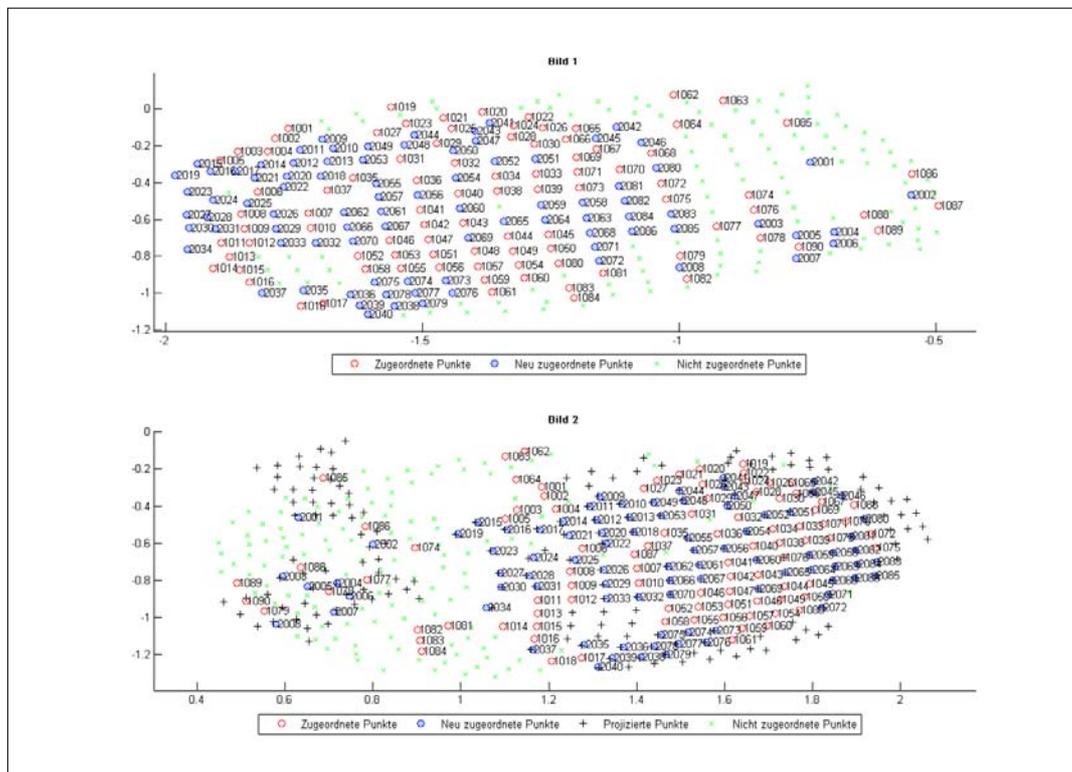


(b) Zuordnungsergebnis

Abbildung 14.12: Ergebnisse des Zuordnungsalgorithmus mit Kenntnis über die Oberflächenform als Kugel (Testobjekt 3)



(a) Schätzung der Kopfoberfläche als Quadrik



(b) Zuordnungsergebnis

Abbildung 14.13: Ergebnisse des Zuordnungsalgorithmus ohne Kenntnis über die ellip-  
tische Oberflächenform (Testobjekt 3)

Typ der Oberfläche	Neu zugeordnete Punkte		Nicht zugeordnete Punkte
	richtig	falsch	
Kugel	44	5	41
Quadrik	78	8	4

Tabelle 14.7: Ergebnisse der Zuordnung mit dem Zuordnungsverfahren über die Objektoberfläche im Fallbeispiel der ersten Aufnahme des Kopfes

etwa 50% der homologen Punkte, die mit der Epipolargeometrie noch nicht zugeordnet werden konnten, über eine Kugeloberfläche mit einem Fehleranteil von 10%. Damit ist diese Oberflächenart für die Approximation der Kopfoberfläche nicht geeignet. Dies entspricht der Erwartung, da die Kopfform eher einem Ellipsoid als einer Kugel ähnelt.

Die Abbildung 14.13 zeigt das Zuordnungsergebnis mit der Schätzung der Kopfform als Fläche zweiter Ordnung. Bild 14.13a zeigt die ermittelte Oberflächenform mit den für die Schätzung verwendeten Objektpunkten. Diese liegen auf zwei entgegengesetzten Seiten der Fläche. Das zeigt, dass für die Schätzung der Quadrik auch falsch zugeordnete Punkte verwendet werden, da dessen Objektkoordinaten ebenfalls auf der geschätzten Quadrik liegen. Es ergeben sich mit der geschätzten Fläche acht falsch zugeordnete Punkte und 78 richtig zugeordnete Punkte. Lediglich vier Paare von Bildpunkten, die in beiden Bildern sichtbar sind, konnten nicht zugeordnet werden.

Mit der Schätzung der Kopfoberfläche als Quadrik liefert dieses Zuordnungsverfahren für verschiedene Aufnahmen durchschnittlich eine richtige Zuordnung von 90% der noch zuzuordnenden Bildpunkte mit einem Fehleranteil von 3%. Die einzelnen Zuordnungsergebnisse für die Aufnahmen befinden sich in Tabelle C.3 im Anhang C.3.

## 15 Fazit des dritten Teils

Abschnitt 15.1 stellt die Ergebnisse des dritten Teils der Diplomarbeit zusammen. Anschließend wird im Abschnitt 15.2 ein Ausblick auf die Erweiterung der implementierten Lösungen gegeben.

### 15.1 Zusammenfassung der Zuordnungsergebnisse

In dieser Arbeit wurden zwei weitere Zuordnungsverfahren zum Lösungsverfahren der Epipolargeometrie, die in dem implementierten Algorithmus als Grundlage für die neuen Verfahren dient, vorgestellt. Das Zuordnungsergebnis der Firma AICON 3D Systems GmbH führt in den drei vorgestellten Beispielen zu keinem zufriedenstellendem Ergebnis, so dass eine weitere Zuordnung notwendig ist. Die integrierte Berücksichtigung der Tiefenausdehnung des Objekts stellt sich als erforderlich heraus, da ohne diese im schlechtesten Fall keine Punkte zugeordnet werden können.

Das Verfahren über die Objektoberfläche beruht auf der Oberflächenklassifikation in Ebene, Zylinder, Kugel und Fläche zweiter Ordnung. Damit liegt die Voraussetzung für dieses Verfahren vor, dass das Objekt durch eine dieser Flächentypen beschrieben werden kann. Des Weiteren müssen für die Ebene mindestens drei, für die Kugel mindestens vier, für den Zylinder mindestens fünf und für die Fläche zweiter Ordnung mindestens neun bereits zugeordnete Punkte auf der Objektoberfläche vorliegen. Mit dem Verfahren über die Objektoberfläche lassen sich je nach Beispiel 90 bis 100% der Punkte richtig zuordnen mit einem durchschnittlichen Fehleranteil von etwa 3%. Dies stellt zu der Epipolargeometrie eine Verbesserung dar und führt zu dem besten Zuordnungsergebnis der drei vorgestellten Verfahren.

Das Verfahren der Delaunay Triangulation kann nur im Fall eines ebenen Objekts angewendet werden. Um eine Dreiecksvermaschung zu erstellen sind mindestens drei richtig zugeordnete Punkte notwendig. Aus der Beschreibung des Verfahrens in Abschnitt 13.3 auf Seite 159 geht hervor, dass falsch zugeordnete Punkte zu einer falschen Vermaschung und damit falschen Zuordnung weiterer Punkte führt. Deshalb dürfen für dieses Verfahren keine falsch zugeordneten Punkte in den Daten, die der Zuordnungsalgorithmus nutzt, vorliegen. Für das vorliegende Beispiel der Ebene führt das Verfahren auf ein Zuordnungsergebnis von 65% richtig zugeordneter Punkte. Im Gegensatz zu der Epipolargeometrie liegt auch hier eine Verbesserung der Zuordnung vor. Allerdings ist eine Zuordnung aller Punkte, wie sie bei der Zuordnung über die Ebenenoberfläche erreicht wird, nicht möglich.

Die Zuordnung über die Objektoberfläche stellt sich in Verbindung mit dem Algorithmus der Firma AICON 3D Systems GmbH als bestes Zuordnungsverfahren heraus. Es kann für verschiedene Objektoberflächen verwendet werden und führt auf ein gutes Zuordnungsergebnis. Bis auf einzelne Ausnahmen können alle Objektpunkte, die in beiden Bildern gemessen wurden, rekonstruiert werden.

## 15.2 Ausblick

Der vorherige Abschnitt zeigte, dass mit der Zuordnung über die Objektoberfläche ein zufriedenstellendes Zuordnungsergebnis erreicht wird. Eine Verbesserung dieses und der anderen vorgestellten Verfahren ist weiterhin möglich. Dieser Abschnitt zeigt einige Möglichkeiten auf, die in dieser Arbeit nicht realisiert werden konnten. Zunächst führt der folgende Paragraph Verbesserungsvorschläge für alle drei Verfahren auf. Danach werden noch spezielle Erweiterungen für die Zuordnungsverfahren über die Objektoberfläche und mit der Delaunay Triangulation vorgestellt.

**Verbesserungsmöglichkeiten für die Zuordnungsverfahren.** Die Zuordnung stützt sich in der Implementation auf die Grundlagen der Epipolargeometrie. Hierbei werden für die Zuordnungsbedingung die Angaben über den maximalen Abstand zur Epipolarlinie beziehungsweise zum projizierten Punkt und dem Signifikanzniveau verwendet. Dieses Verfahren approximiert den Fehlerbereich der Epipolarlinie als Band

und den eines Punktes als Kreis. Zur genauen Berücksichtigung des Fehlerbereichs ist es notwendig, die statistischen Angaben der Punktgenauigkeiten in die Zuordnungsbedingung zu integrieren. Hierzu kann ein statistisches Testverfahren verwendet werden, das die Koplanaritätsbedingung (Formel C.1 auf Seite 276) überprüft. Es wird der Quotient aus dem Widerspruch  $w$  der Koplanaritätsbedingung und dessen Standardabweichung  $\sigma_w$  auf Normalverteilung überprüft.<sup>4</sup> Falls der Betrag der Testgröße kleiner als der Quantilwert ist, wird die Vermutung angenommen, dass die beiden Punkte homolog sind. Falls für einen Bildpunkt im ersten Bild mehrere homologe Punkte gefunden werden, wird der Bildpunkt mit der kleinsten Testgröße als der beste Kandidat zugeordnet. Aufgrund fehlender Genauigkeitsinformationen der Inneren und Äußeren Orientierung und unzureichender Angabe der Standardabweichung der Bildkoordinaten konnte dieser Test mit den vorliegenden Beispieldaten nicht streng durchgeführt werden und führte auf kein besseres Zuordnungsergebnis. Deshalb wurde diese Zuordnungsbedingung für die vorliegenden Datensätze nicht verwendet. Aus diesem Grund lieferte auch die Punktklassifikation nach (Besl und Jain, 1988) oder (Kutterer und Schön, 1999) innerhalb des Zuordnungsverfahrens über die Objektoberfläche nicht die erwarteten Ergebnisse und wurde nicht verwendet.

Als weitere Möglichkeit die Zuverlässigkeit der drei vorgestellten Verfahren zu steigern bietet sich die folgende Erweiterung an. Die Methoden basieren bisher lediglich auf der Prädiktion der Bildpunkte in das zweite Bild. Mit einer zusätzlichen Projektion der Bildpunkte aus dem zweiten Bild in das erste Bild lässt sich die Zuordnung bidirektional erweitern.

**Erweiterungsmöglichkeit für die Zuordnung über die Objektoberfläche.** Im Zuge der Zuordnung über die Objektoberfläche zeigt sich, dass die Integration spezieller Flächen zu einer Stabilisierung der Ergebnisse führt. Hierzu könnte noch untersucht werden, inwieweit sich die Hinzunahme weiterer spezieller Flächenschätzungen auf die Zuordnung auswirkt.

**Erweiterungsmöglichkeiten für die Zuordnung mit der Delaunay Triangulation.** In Bezug auf die Zuordnung mit der Delaunay Triangulation wurde innerhalb dieser Arbeit nur dessen Ansatz vorgestellt, da der Hauptschwerpunkt auf der Oberflächenklassifikation liegt. Dadurch liegen hier noch einige Verbesserungsmöglichkeiten vor. Zunächst fehlt bis jetzt eine Auswertung der vorhandenen 3D-Koordinaten. Mit den entsprechenden Genauigkeitsangaben der Koordinaten kann zum Beispiel eine Punktklassifikation nach (Besl und Jain, 1988) oder (Kutterer und Schön, 1999) durchgeführt werden. Hierdurch können zum einen Unstetigkeiten in der ansonsten glatten Fläche detektiert werden. Zum anderen kann hierdurch eine Ausreißersuche integriert werden. Diese kann auch durch einen zusätzlichen Algorithmus realisiert werden, der die lokalen Strukturelemente berücksichtigt. Aguilar u. a. (2008) entwickelt hierzu ein

---

<sup>4</sup>Für die Fehlerfortpflanzung steht die Funktion „var\_prop\_unscented\_neu.m“ zur unparfümierten Varianzfortpflanzung (unscented Transformation) von Wolfgang Förstner und Richard Steffen der Universität Bonn, 2006/2007 zur Verfügung.

robustes „Graph Transformation Matching“ (GTM). Dies kann sowohl für die Ausreißersuche am Anfang des Algorithmus als auch für die Zuordnung weiterer Punkte genutzt werden. Erste Untersuchungen in diese Richtung zeigten jedoch, dass die lokalen Strukturen sich bei einer rasterförmigen Punktanordnung ähneln und dadurch keine Verbesserung der Zuordnung erreicht werden kann.<sup>5</sup>

Zusätzlich ist eine Verbesserung der Zuordnung innerhalb der Maschen möglich. Unter Betrachtung der x-Parallaxe der Punkte zueinander könnten weitere Mehrdeutigkeiten eliminiert werden. Außerdem müsste eine äußere Masche erstellt werden, um alle Punkte in das Zuordnungsverfahren zu integrieren.

Die zwei neu entwickelten Verfahren bieten also noch einiges Potenzial an Verbesserungsmöglichkeiten. Aufgrund der Testergebnisse zeigt besonders das Zuordnungsverfahren über die Objektoberfläche gute Möglichkeiten, die Zuordnung uncodierter Punkte zu verbessern. Im Gegensatz zu der Delaunay Triangulation ist der Einsatz dieses Verfahrens flexibler gegenüber der Oberflächenart und bietet sich somit an, in das bisherige Lösungsverfahren von AICON 3D Systems GmbH integriert zu werden.

---

<sup>5</sup>Eine Implementierung des GTM-Algorithmus in Matlab liegt von Timo Dickscheid, Universität Bonn vor.

## Glossar

Ähnlichkeitstransformation	Transformation, die den Maßstab und die Bewegung zwischen zwei Systemen miteinander in Beziehung setzt
Anco-Marken	Codierte Messmarken der Firma AICON 3D Systems GmbH. Der Anco-Code besteht aus sieben Punkten.
Basis	Abstand zwischen den Projektionszentren von zwei Kameras
Bewegungsinvariante	Merkmal eines Objekts, das sich durch eine Verschiebung und/oder Drehung nicht verändert
Hebeleffekte	Kleine Ungenauigkeiten, die große Auswirkungen an anderen Stellen haben
Histogramm	Graphische Darstellung von sortierten Daten, die in Klassen eingeteilt werden.
Homolog	Homolog bedeutet gleichartig. Unter homologen Punkten versteht man Bildpunkte in unterschiedlichen Bildern, die von einem Objektpunkt stammen.
Homologer Punkt	Bildpunkte in verschiedenen Bildern, die den gleichen Objektpunkt abbilden. Auch als korrespondierender Punkt bezeichnet.
K-d-Baum	Suchbaum zur Speicherung von Punkten des k-dimensionalen Raums
Komplexität	Abschätzung für die Anzahl der Berechnungsschritte eines Algorithmus.
Markanter Punkt Mehrdeutigkeit	Punkt mit besonderem Merkmal Vorhandensein mehrerer möglicher Kandidaten bei der Zuordnung von homologen Punkten
Nest	Halterung für das Kugelprisma des Lasertrackers

Passpunkt	Passpunkte dienen zur Orientierung von Bildern. Ihre Lage im Raum ist bekannt.
Quadrik	Fläche zweiter Ordnung
Quantilwert	Beschreibt bestimmte Punkte einer statistischen Verteilungsfunktion.
Raumstrahl	Verbindungsgerade zwischen Projektionszentrum und Objektpunkt
Siemensstern	Testmuster der Bildverarbeitung, der aus einem Kreis mit abwechselnd weißen und schwarzen sternförmigen Sektoren besteht.
Sobelfilter	Filter zur Detektion von Kanten in digitalen Bildern
Weißes Rauschen	Konstantes Rauschverhalten eines zufälligen Signals oder Prozesses in einem festen Bereich

## Abkürzungsverzeichnis

AO	Absolute Orientierung
CFK	Kohlenstofffaserverstärkter Kunststoff
DIN	Deutsche Industrie Norm
DPA	Digitale Photogrammetrie Analyse
EDM	Elektrooptisches Distanzmessgerät
ÄO	Äußere Orientierung
FPGA	Field-Programmable Gate Array: Ein vom Anwender programmierter Logikbaustein
IO	Innere Orientierung
IT-Ausstattung	Informationstechnologische Ausstattung
RANSAC	Random Sample Consensus
RO	Relative Orientierung
RRS	Räumlicher Rückwärtsschnitt
RVS	Räumlicher Vorwärtsschnitt
SVD	Singulärwertzerlegung
SyncBox	Synchronisationsbox

## Teil IV

# Anhang

## A Genauigkeitsbeurteilung

### A.1 Photogrammetrische Grundlagen

#### A.1.1 Kameraorientierung

Für die Auswertung von Bilddaten ist es wichtig, den Abbildungsvorgang vom Objekt bis zum Bild zu kennen, der in Abbildung A.1 graphisch dargestellt ist. Dieser Abbildungsvorgang wird durch verschiedene Orientierungsparameter beschrieben, die in den folgenden Abschnitten einzeln erläutert werden. Als Grundlage und für weiterführende Informationen dient hierbei (McGlone, 2004).

Im Folgenden wird der Abbildungsvorgang kurz zusammengefasst. Die Lage des Objekts und der Kamera in einem übergeordneten Koordinatensystem wird durch die Absolute Orientierung (AO) beschrieben. Daraus lässt sich die Position der Kamera zum Objekt ableiten. Diese wird in den Parametern der ÄO wiedergegeben. Der Abbildungsvorgang von der Kamera ins Bild lässt sich mit Hilfe der IO beschreiben. Bei der Mehrbildauswertung ist noch die Lage der Kameras zueinander von Interesse. Diese wird durch die Parameter der RO definiert.

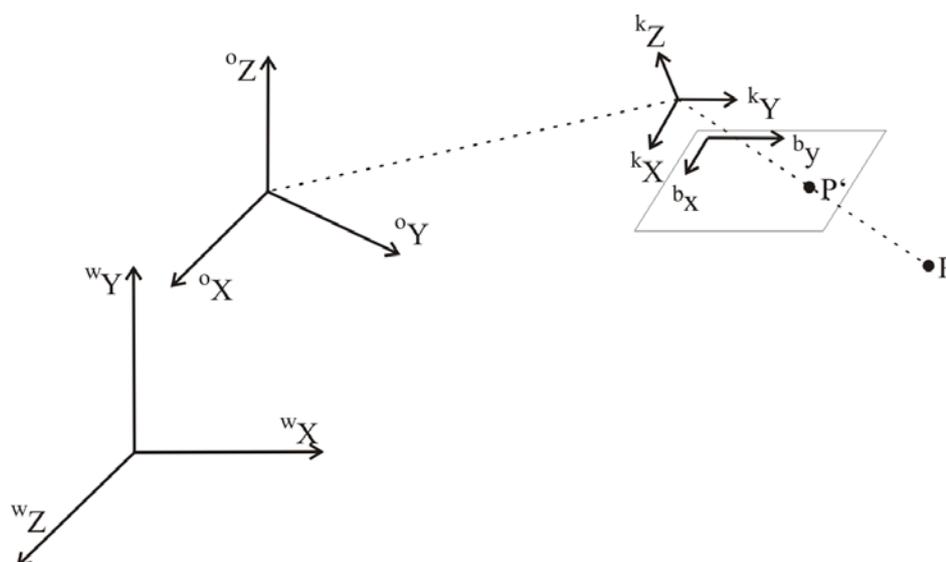


Abbildung A.1: Abbildungsvorgang von einem Objektpunkt  $P$  ins Bild mit Darstellung der beteiligten Koordinatensysteme: Übergeordnetes Koordinatensystem  $S_w$ , Objektkoordinatensystem  $S_o$ , Kamerakoordinatensystem  $S_k$ , Bildkoordinatensystem  $S_b$

**Innere Orientierung (IO).** Die IO steht für die Parameter der Kamera, die die Abbildung zwischen dem Kamerakoordinatensystem  $S_k$  und dem Bildkoordinatensystem  $S_b$  beschreiben. Zu den Kameraparametern gehören die Kamerakonstante  $c$ , der Bildhauptpunkt  $\mathbf{x}'_H = [x'_H \ y'_H]^T$ , die Scherung  $s$  und der Maßstabsunterschied  $m$  in  $x$ - und  $y$ -Koordinatenrichtung, sowie die Verzeichnungsparameter  $\mathbf{q}$ . Diese Parameter werden nach (McGlone, 2004) in der allgemeinen Kalibriermatrix

$$\mathbf{K} = \begin{bmatrix} c & cs & \Delta\mathbf{x}'(x'_H, \mathbf{q}) \\ 0 & (1+m)c & \Delta\mathbf{y}'(y'_H, \mathbf{q}) \\ 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \quad (\text{A.1})$$

mit

$c$	... Kamerakonstante
$x'_H, y'_H$	... Koordinaten des verzeichnungsfreien Hauptpunkts $\mathcal{H}$
$\Delta\mathbf{x}', \Delta\mathbf{y}'$	... Korrekturen des Hauptpunktes mit Berücksichtigung der Verzeichnungen
$m$	... Maßstabsfaktor
$s$	... Scherung
$\mathbf{q}$	... Verzeichnungsparameter

zusammengefasst.

**Äußere Orientierung (EO).** Die Lage der Kamera zum Objektkoordinatensystem  $S_o$  wird durch die ÄO beschrieben. Die Transformation vom Kamerakoordinatensystem zum Objektkoordinatensystem stellt eine räumliche Bewegung mit sechs Parametern dar. Diese Parameter sind zum einen die drei Translationen in  $X$ -,  $Y$ - und  $Z$ -Richtung, die durch die Koordinaten des Projektionszentrums  $\mathbf{Z}$  im Objektsystem angegeben werden. Zum anderen werden zur vollständigen Angabe der Äußeren Orientierung noch drei Rotationsparameter  $\omega$ ,  $\phi$  und  $\kappa$  benötigt, die in der Rotationsmatrix  $R$  enthalten sind.

Die Parameter der Inneren und Äußeren Orientierung werden in der Projektionsmatrix  $\mathbf{P}$  über die Beziehung

$$\mathbf{P} = \mathbf{K}R [I_3 | -\mathbf{Z}] \quad (\text{A.2})$$

mit

$\mathbf{K}$	... Kalibriermatrix
$R$	... Rotationsmatrix
$I_3$	... $3 \times 3$ -Einheitsmatrix
$\mathbf{Z}$	... Projektionszentrum

zusammengefasst (McGlone, 2004).

**Relative Orientierung (RO).** Die RO beschreibt die Lage der zweiten Kamera bezogen auf die erste. Die fünf unabhängigen Orientierungsparameter der RO setzen sich aus der Rotation der zweiten Kamera gegenüber der ersten und aus der Verbindungsrichtung zwischen den beiden Projektionszentren zusammen. Die Verbindung der Projektionszentren der beiden Kameras wird als Basis  $B$  bezeichnet (s. Abbildung A.2).

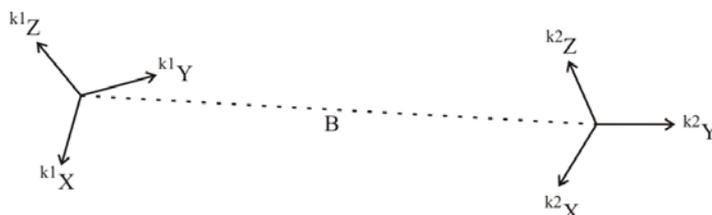


Abbildung A.2: Relative Orientierung von zwei Kameras mit ihren Koordinatensystemen  $S_{k_i}$  und der Basis  $B$

Mit der Kenntnis über die ÄO der beiden Kameras ist auch die RO bekannt.

**Absolute Orientierung (AO).** Die Lage der Kamera in einem übergeordneten System  $S_w$  wird über die AO beschrieben. Damit die Position der Kamera im übergeordneten System angegeben werden kann, muss eine Ähnlichkeitstransformation zwischen dem Kamerasystem und dem übergeordneten System durchgeführt werden. Die benötigten Parameter setzen sich aus drei Translationen, drei Rotationen und einem Maßstabsfaktor zusammen. Für die Berechnung der Transformationsparameter sind mindestens drei Passpunkte erforderlich.

### A.1.2 Verzeichnungskorrektur

Verzeichnungskorrekturen nach (Godding, 2006):

- Radialsymmetrische Verzeichnungskorrektur  $dx'_{\text{sym}}$  und  $dy'_{\text{sym}}$

$$dr_{\text{sym}} = A_1 \cdot (r^3 - r_0^2 r) + A_2 \cdot (r^5 - r_0^4 r) + A_3 \cdot (r^7 - r_0^6 r) \quad (\text{A.3})$$

$$dx'_{\text{sym}} = \frac{dr_{\text{sym}}}{r} \cdot x' \quad (\text{A.4})$$

$$dy'_{\text{sym}} = \frac{dr_{\text{sym}}}{r} \cdot y' \quad (\text{A.5})$$

mit

- $A_1, A_2, A_3$  ... Koeffizienten der radialsymmetrischen Verzeichnung
- $r_0$  ... Zweiter Nulldurchgang der Verzeichnungskurve
- $r$  ... Bildradius  $r^2 = x'^2 + y'^2$
- $x', y'$  ... Unkorrigierte Bildkoordinaten

- Radialasymmetrische und tangentiale Verzeichnungskorrektur  $dx'_{\text{asy}}$  und  $dy'_{\text{asy}}$

$$dx'_{\text{asy}} = B_1 \cdot (r^2 + 2x^2) + 2B_2 x' y' \quad (\text{A.6})$$

$$dy'_{\text{asy}} = B_2 \cdot (r^2 + 2y^2) + 2B_1 x' y' \quad (\text{A.7})$$

mit

$B_1, B_2$  ... Koeffizienten der radialsymmetrischen und tangentialen Verzeichnung  
 $r$  ... Bildradius  $r^2 = x^2 + y^2$   
 $x', y'$  ... Unkorrigierte Bildkoordinaten

- Verzeichnungskorrektur  $dx'_{\text{aff}}$  und  $dy'_{\text{aff}}$  für Affinität

$$dx'_{\text{aff}} = C_1 x' + C_2 y' \quad (\text{A.8})$$

$$dy'_{\text{aff}} = 0 \quad (\text{A.9})$$

mit

$C_1, C_2$  ... Koeffizienten der affinen Verzeichnung  
 $x', y'$  ... Unkorrigierte Bildkoordinaten

Zur Berechnung der idealen Bildkoordinaten  ${}^k x'$  und  ${}^k y'$  werden alle Verzeichnungskorrekturen und die Korrektur des Hauptpunktes an die gemessenen Bildkoordinaten angebracht.

$${}^k x' = x' - x'_H - dx'_{\text{sym}} - dx'_{\text{asy}} - dx'_{\text{aff}} \quad (\text{A.10})$$

$${}^k y' = y' - y'_H - dy'_{\text{sym}} - dy'_{\text{asy}} - dy'_{\text{aff}} \quad (\text{A.11})$$

mit

$x', y'$  ... Unkorrigierte Bildkoordinaten  
 $x'_H, y'_H$  ... Bildkoordinaten des Bildhauptpunktes

### A.1.3 Räumlicher Rückwärtsschnitt (RRS)

Das Verfahren des RRS kommt in der Einbildauswertung zum Einsatz. Darunter ist die Bestimmung der Parameter der ÄO der Kamera zu verstehen. Das Verfahren des RRS setzt dabei voraus, dass die Parameter der IO der Kamera bekannt sind. Dann können die drei Translations- und die drei Rotationsparameter der ÄO ermittelt werden.

### A.1.4 Räumlicher Vorwärtsschnitt (RVS)

In der Mehrbildauswertung wird für die Berechnung von 3D-Koordinaten eines Objektpunktes der RVS verwendet. Dieses Verfahren setzt voraus, dass die Parameter der Inneren und Relativen Orientierung der Kameras bekannt sind. Mit Hilfe der Projektionsmatrix (s. Formel A.2) werden die Raumstrahlen der gemessenen Bildkoordinaten ermittelt. Aus den Raumstrahlen von homologen Punkten, also identischen Punkten in den Bildern, erfolgt mittels des RVS die Rekonstruktion der Objektpunkt im 3D-Raum (Förstner, 2007/2008a).

## A.2 Statistische Grundlagen

Die hier vorgestellten statistischen Testverfahren zur Qualitätsbeurteilung von Messungen beziehen sich auf (Niemeier, 2002) und (Bosch, 2005), in denen die Verfahren vertiefend nachgelesen werden können.

### A.2.1 Hypothesentest

Für die Beurteilung von Messungen stehen verschiedene statistische Kennwerte zur Verfügung. Im Folgenden werden die wichtigsten kurz erläutert. Anschließend werden unterschiedliche Verfahren zur Überprüfung dieser statistischen Größen vorgestellt.

Aus einer Messreihe können verschiedene statistische Kennwerte abgeleitet werden. Dazu gehören zunächst das arithmetische Mittel, auch Mittelwert genannt,

$$\hat{l} = \frac{1}{N} \cdot \sum_{n=1}^N l_n \quad (\text{A.12})$$

mit

$\hat{l}$  ... Mittelwert

$l$  ... Messwert

$N$  ... Anzahl der Messwerte

und der Median. Dieser entspricht dem Wert an der Stelle  $\frac{N+1}{2}$  der nach Größe sortierten Messwerte. Im Allgemeinen sollten diese beiden Werte nah beieinander liegen. Ist dies nicht der Fall, ist zu vermuten, dass innerhalb der Messung grobe Fehler vorliegen. Dadurch wird der Mittelwert verfälscht und der Median gibt einen besseren Erwartungswert wieder, da er im Gegensatz zum arithmetischen Mittel robuster gegen Ausreißer ist.

Des Weiteren wird im Allgemeinen die Varianz  $\sigma^2$  bzw. die Standardabweichung  $\sigma$  als Qualitätsmaß angegeben. Hierbei wird die a priori Varianz, die im Vorfeld der Messungen schon bekannt ist, mit  $\sigma_0^2$  bezeichnet. Die empirische Varianz, die aus den

Messungen nach den folgenden Gleichungen A.13 oder A.14 geschätzt wird, wird mit  $\hat{\sigma}^2$  gekennzeichnet.

$$\hat{\sigma} = \sqrt{\hat{\sigma}^2} = \sqrt{\frac{1}{N-1} \cdot \sum_{n=1}^N (l_n - \hat{l})^2} \quad (\text{A.13})$$

mit

$\hat{\sigma}$  ... Empirische Standardabweichung  
 $\hat{l}$  ... Mittelwert  
 $l$  ... Messwert  
 $N$  ... Anzahl der Messwerte

Diese Werte stellen ein Maß für die Streuung um den Mittelwert dar.

Alternativ kann die Varianz bzw. Standardabweichung einer Messung mittels der quadratischen Verbesserungen aus einem Ausgleichungsmodell berechnet werden. Als Ausgleichungsmodell sei hier das in Abschnitt 2.1 bereits erwähnte Gauß-Markov-Modell genannt, das auf der Methode der kleinsten Quadrate beruht und in (Niemeier, 2002) ausführlich erläutert ist. Des Weiteren wird auf den Allgemeinfall der Ausgleichungsrechnung, das Gauß-Helmert-Modell (s. (Niemeier, 2002, S. 153 ff.)), verwiesen.

Die geschätzte Varianz ergibt sich zu

$$\hat{\sigma}^2 = \frac{\mathbf{v}^T \mathbf{P} \mathbf{v}}{R} = \frac{\hat{\Omega}^2}{R} \quad (\text{A.14})$$

mit

$\hat{\sigma}$  ... Empirische Standardabweichung  
 $\mathbf{v}$  ... Verbesserungen  
 $\mathbf{P} = \Sigma_u^{-1}$  ... Gewichtsmatrix (berechnet aus der Kovarianzmatrix der Beobachtungen)  
 $\hat{\Omega}^2$  ... Gewogene Quadratsumme der Residuen  
 $R = N - U$  ... Redundanz, Anzahl der Freiheitsgrade  
 $N$  ... Anzahl der Messungen  
 $U$  ... Anzahl der Parameter

Wird mit einem Ausgleichungsmodell nach dem Prinzip der kleinsten Quadrate lediglich der ungewichtete Mittelwert als Parameter geschätzt, sind die Formeln A.13 und A.14 identisch.

Diese Werte der beschreibenden Statistik und die Ergebnisse der Ausgleichungsrechnung können mit Hilfe von Hypothesentests überprüft werden. Hypothesentests bestehen aus einer Nullhypothese  $H_0$  und einer Alternativhypothese  $H_A$ . Mittels einer Testgröße wird überprüft, welche der Hypothesen mit einer Wahrscheinlichkeit von  $1 - \alpha$  eintritt. Diese Wahrscheinlichkeit wird Signifikanzniveau genannt. Der Wert  $\alpha$  steht für

die Irrtumswahrscheinlichkeit und wird meistens mit  $\alpha = 5\%$  angegeben. Näheres hierzu ist in (Niemeier, 2002, S. 78 ff.) nachzulesen. Im Folgenden werden der Globaltest, der  $\chi^2$ -Anpassungstest und der Parametertest als Hypothesentests vorgestellt.

**Globaltest.** Der Globaltest nach (Niemeier, 2002) dient zur Überprüfung der deterministischen und stochastischen Modellannahmen. Hierbei wird die vorgegebene a priori Varianz mit der empirischen, also berechneten, Varianz verglichen. Die Nullhypothese  $H_0$  besteht in der Annahme, dass die beiden Varianzen übereinstimmen. Ist die aus den Messwerten berechnete Varianz größer als die a priori-Varianz wird von einem Fehler im Modell ausgegangen. Dies entspricht der Alternativhypothese  $H_A$ .

$$\begin{aligned} H_0 : \quad & \hat{\sigma}^2 = \sigma_0^2 \\ H_A : \quad & \hat{\sigma}^2 > \sigma_0^2 \end{aligned}$$

Die Testgröße lautet:

$$T = R \cdot \frac{\hat{\sigma}^2}{\sigma_0^2} \sim \chi_R^2 \quad (\text{A.15})$$

mit

$\hat{\sigma}^2$  ... Empirische Varianz  
 $\sigma_0^2$  ... A priori Varianz  
 $\chi_R^2$  ...  $\chi^2$ -Verteilung mit  $R$  Freiheitsgraden

Die Nullhypothese wird bestätigt, wenn die Testgröße kleiner oder gleich dem Quantilwert der  $\chi^2$ -Verteilung mit  $R$  Freiheitsgraden und einem Signifikanzniveau von  $1 - \alpha$  ist. Damit wird das Modell als korrekt angenommen und die weiteren Berechnungen erfolgen mit der a priori Standardabweichung. Diese Aussage kann mit der Wahrscheinlichkeit von  $\beta$ , die sich aus der Alternativhypothese berechnen lässt, falsch sein und wird Fehler 2. Art genannt. Bei einer Ablehnung der Nullhypothese und somit der Annahme der Alternativhypothese wird von einem Modellfehler ausgegangen. Zur Anpassung des Modells wird mit der empirischen Standardabweichung weitergerechnet. Dabei kann der Fehler 1. Art auftreten. Dies bedeutet, dass die Nullhypothese mit einer Irrtumswahrscheinlichkeit von  $\alpha$  fälschlicherweise abgelehnt wurde. Es ist sinnvoll die Modellannahmen zu überprüfen, falls der Globaltest nicht bestanden wird.

**$\chi^2$ -Anpassungstest.** Mit dem  $\chi^2$ -Anpassungstest wird nach (Bosch, 2005) überprüft, ob eine Zufallsvariable eine bestimmte Verteilung besitzt. Die Messung einer Position kann z. B. auf Normalverteilung untersucht werden. Hierzu wird zur Aufstellung der Testgröße ein empirisches und ein theoretisches Histogramm benötigt. Das empirische Histogramm berechnet sich aus den Messungen, die in  $r$  Klassen unterteilt werden. Die Anzahl der Beobachtungen pro Klasse  $i$  entspricht der Häufigkeit  $h_i$ . Zur

Ermittlung des theoretischen Histogramms werden die Parameter der Verteilungsfunktion benötigt. Jede Verteilungsfunktion kann durch  $m$  Parameter vollständig beschrieben werden. Die Normalverteilung lässt sich zum Beispiel durch die zwei Parameter, Mittelwert und Standardabweichung, bestimmen. Die  $\chi^2$ -Verteilung ist dagegen nur von einem Parameter, der Anzahl der Freiheitsgrade, abhängig. Falls die Parameter der Verteilungsfunktion unbekannt sind, werden diese aus den Messdaten geschätzt. Mit deren Hilfe können die theoretischen Wahrscheinlichkeiten  $q_i$  für die Klassen  $r_i$  berechnet werden. Über die Anzahl  $n$  der Beobachtungen erhält man die berechneten Häufigkeiten  $n \cdot q_i$ . Falls diese kleiner als fünf sind, sollten die entsprechenden Klassen mit ihrer Nachbarklasse zusammengefasst werden. Mit diesen Angaben kann die  $\chi^2$ -verteilte Testgröße berechnet werden:

$$T = \sum_{i=1}^r \frac{(h_i - n \cdot q_i)^2}{n \cdot q_i} \sim \chi_F^2 \quad (\text{A.16})$$

$$F = r - m - 1 \quad (\text{A.17})$$

mit

$h$	... Gemessene Häufigkeit
$n \cdot q_i$	... Berechnete Häufigkeit mit Wahrscheinlichkeit $q_i$
$n$	... Anzahl an Beobachtungen
$r$	... Anzahl an Klassen
$m$	... Anzahl der unbekannt Parameter der Verteilungsfunktion
$\chi_F^2$	... $\chi^2$ -Verteilung mit $F$ Freiheitsgraden

Die Beobachtungen besitzen die angenommene Verteilungsfunktion, falls die Testgröße  $T$  kleiner als der Quantilwert der  $\chi^2$ -Verteilung mit  $F$  Freiheitsgraden und einer Irrtumswahrscheinlichkeit von  $\alpha$  ist.

$$T < \chi_{F,1-\alpha}^2$$

Mit diesem Test kann also unter anderem die Modellannahme von normalverteilten Messwerten überprüft werden. In diesem Fall entspricht die Nullhypothese  $H_0$  der Annahme, dass die vorliegenden Messungen eine Normalverteilung besitzen.

**Parametertest.** Der Parametertest wird zur Überprüfung der ausgeglichenen Parameter verwendet. Hierzu wird der geschätzte Parameter  $\hat{x}_n$  mit einer Prüfgröße  $x_{\text{prüf}}$ , zum Beispiel dem Sollwert, verglichen. Die Hypothesen lauten:

$$H_0 : \hat{x}_n = x_{\text{prüf}} \quad (\text{A.18})$$

$$H_A : \hat{x}_n \neq x_{\text{prüf}} \quad (\text{A.19})$$

Es wird also überprüft, ob der geschätzte Parameter und die Prüfgröße mit einem vorgegebenen Wahrscheinlichkeitsniveau übereinstimmen. Die Berechnung und Vertei-

lung der Testgröße hängt von der Varianz ab. Bei einer bekannter Varianz  $\sigma_0^2$  wird die Testgröße mit

$$T = \frac{\hat{x}_n - x_{\text{prüf}}}{\sigma_0^2} \sim N(0, 1) \quad (\text{A.20})$$

mit

$\sigma_0^2$  ... A priori Varianz  
 $\hat{x}_n$  ... Geschätzter Parameter  
 $x_{\text{prüf}}$  ... Prüfgröße  
 $N(0, 1)$  ... Standardnormalverteilung

berechnet und ist standardnormalverteilt. Ist die Varianz unbekannt, lässt sich die Hypothese mit der studentverteilten Testgröße

$$T = \frac{\hat{x}_n - x_{\text{prüf}}}{\hat{\sigma}^2} \sim t_R \quad (\text{A.21})$$

mit

$\hat{\sigma}^2$  ... Empirische Varianz  
 $\hat{x}_n$  ... Geschätzter Parameter  
 $x_{\text{prüf}}$  Prüfgröße  
 $t_R$  ... Student-Verteilung mit  $R$  Freiheitsgraden

überprüfen.

### A.2.2 Soll-Ist-Vergleich

Mit Hilfe eines Soll-Ist-Vergleichs können Messabweichungen beurteilt werden. Die Messabweichungen ergeben sich aus der Differenz von den gemessenen Ist-Werten zu den vorgegebenen Soll-Werten

$$\mathbf{v}_D = \mathbf{D}_{\text{Soll}} - \mathbf{D}_{\text{Ist}} \quad (\text{A.22})$$

mit

$\mathbf{D}_{\text{Soll}}$  ... Soll-Werte  
 $\mathbf{D}_{\text{Ist}}$  ... Ist-Werte.

Die Soll-Werte können aus Messungen gewonnen werden. Es sollte jedoch darauf geachtet werden, dass diese mit übergeordneter Genauigkeit von mindestens einer dreifach kleineren Streuung vorliegen. Mit Hilfe der Messabweichungen, die den Verbesserungen

entsprechen, lässt sich die Standardabweichung nach Formel A.14 ermitteln. Hierbei sind eventuelle Korrelationen der berechneten Differenzen zu beachten. Die Standardabweichung der Differenzen stellt ein Maß für die Messunsicherheit dar.

### A.3 Dokumentation zur Messauswertung des Genauigkeitstests

Die Messauswertung des Genauigkeitstests unterteilen sich in die zwei Programmteile „Messauswertung für Drehtisch“ und „Messauswertung für Lineareinheit“. Diese dienen zur Auswertung von Messungen mit WHEELWATCH und MOVEINSPECT die im Zuge einer Vergleichsmessung mit einem Drehtisch bzw. einer hochgenauen Lineareinheit durchgeführt werden. Die zwei Programmteile beziehen sich je nach Vergleichseinheit zwar auf unterschiedliche Auswerteschritte, werden aber gleich bedient. Unterschiede werden in dieser Dokumentation explizit benannt. Als Ergebnis liefern die Auswerteprogramme zum einen die Messabweichungen zwischen den Sollwerten der Lineareinheit beziehungsweise des Drehtischs und den Istwerten der Messungen der Onlinemesssysteme. Zum anderen gibt das Programm die Genauigkeit innerhalb des Messbereichs wieder, der mit den durchgeführten Messungen abgedeckt wird.

#### A.3.1 Aufnahme der Messreihen

Bei der Aufnahme einer Testreihe sind folgende Punkte zu beachten:

- Die Namen der einzelnen Messreihen einer Testreihe mit WHEELWATCH oder MOVEINSPECT müssen im Allgemeinen die Form „name\_nummer“ besitzen. Hierbei wird eine durchgehende Nummerierung beginnend mit „1“ vorausgesetzt. Diese Messreihen sind in einem übergeordneten Ordner des Namens „name“ abzuspeichern. Der Name „name“ kann beliebig gewählt werden.
- Es kann vorkommen, dass eine Messreihe aus mehreren einzelnen Teilmessreihen zusammengesetzt werden soll. Dann weicht die Benennung dieser Teilmessreihen von der Benennungsform einer gesamten Messreihe ab. Hierbei werden Dateien mit den Namen „name\_nummer.i“ aneinandergesetzt. Der Buchstabe „i“ steht für die Nummerierung der zusammenzufügenden Teilmessreihen beginnend mit Eins. Diese Benennungsform gilt für alle Messreihen, die zu einer Testreihe zusammengesetzt werden sollen. Besteht eine Testreihe aus nur einer Messreihe, muss diese trotzdem mit „name\_nummer.i“ benannt sein.
- Die erste Position der ersten Messreihe wird als der Punkt angenommen, auf den die Fokussierung der Onlinemesssysteme stattgefunden hat. Diese Position wird in der Ergebnisgraphik als Punkt der Fokussierung markiert. Dies gilt nur für die „Messauswertung mit Lineareinheit“.

- Die Sollwerte des Drehtischs beziehungsweise der hochgenauen Lineareinheit sollten einer konstanten Änderung entsprechen. Liegen die Sollwerte als Messungen eines anderen Systems vor, die nicht konstant sind, ist ein Bezug zu diesen Werten innerhalb des Quellcodes möglich.

### A.3.2 Einstellungen in der Auswertesoftware

Die Matlabfunktion „genauigkeitstestWinkel.m“ ruft den Programmteil „Messauswertung für Drehtisch“ auf. Das Auswerteprogramm „Messauswertung für Lineareinheit“ wird dagegen über den Aufruf der Matlabfunktion „genauigkeitstestDistanz.m“ gestartet. Die Benutzeroberflächen sind in Abbildung A.3 dargestellt.

Im Vorfeld der Auswertung sind folgende Einstellungen durchzuführen:

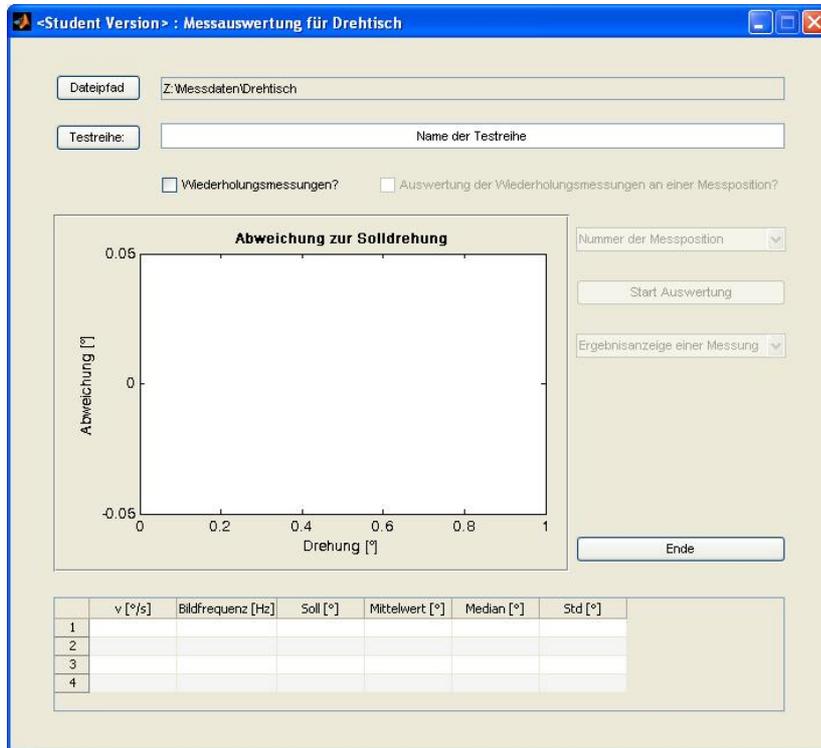
1. Als erstes ist der Dateipfad einzustellen, indem sich der Ordner der Testreihe befindet. Hierzu kann der Button „Dateipfad“ gedrückt und der Pfad mit Hilfe des Dateibrowsers bestimmt werden. Alternativ kann der Pfadname auch direkt in das nebenstehende Textfeld eingegeben werden.
2. Nach der Einstellung des Dateipfads muss der Name der Testreihe in das nächste Textfeld eingegeben werden. Hierzu ist die Beschriftung „Name der Testreihe“ zu ersetzen. Es besteht auch die Möglichkeit den nebenstehenden Button „Testreihe“ auszuwählen, der wiederum die Möglichkeit bietet den Testordner über einen Dateibrowser auszuwählen.
3. Mit der Angabe des Namens der Testreihe wird der Button „Start Auswertung“ aktiviert, mit dem die Berechnung zur Beurteilung der Messungen begonnen werden können. Falls Wiederholungsmessungen an den einzelnen Messpositionen vorliegen, können alternativ zur Gesamtauswertung auch die Wiederholungsmessungen an einer bestimmten Position der Messreihe betrachtet werden. Hierzu sind vor dem Start der Auswertung die Kontrollkästchen „Wiederholungsmessungen?“ und „Auswertung der Wiederholungsmessungen an einer Messposition?“ anzuhaken und die Nummer der Messposition auszuwählen.

### A.3.3 Auswertung

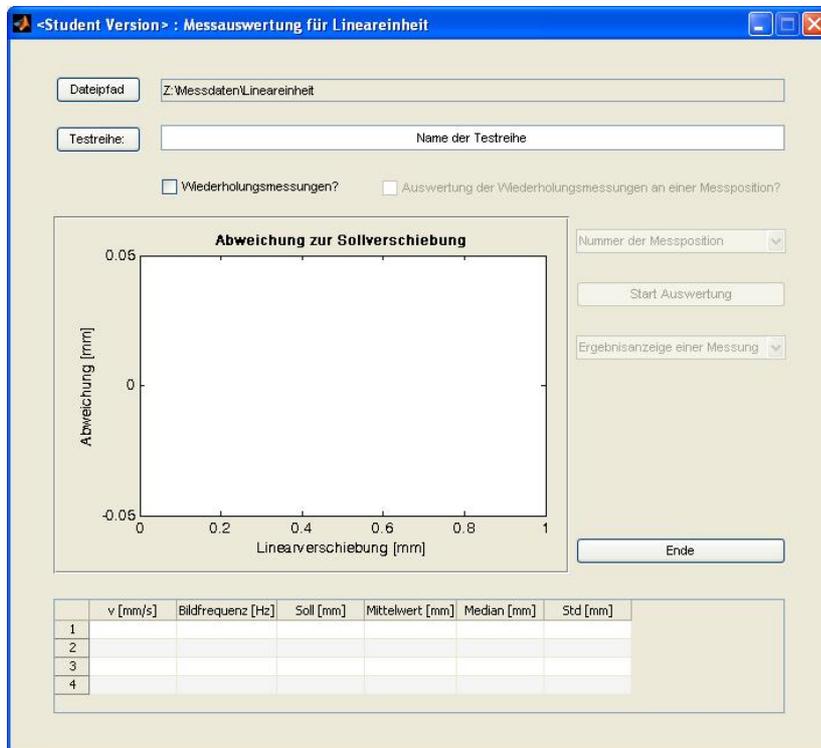
Die Auswertung der Testreihe wird mit Betätigung des Buttons „Start Auswertung“ begonnen. Bei der ersten Auswertung der Testreihe werden zunächst die Einstellungen bei der Messung abgefragt. Die Einstellmöglichkeiten hängen davon ab, ob kontinuierliche Messungen oder Wiederholungsmessungen an einer Position gemacht wurden. Die anzugebenden Werte sind in den Abbildungen A.4a und A.4b dargestellt.

Für beide Messvarianten sind im Einzelnen folgende Werte anzugeben:

- Auswahl des Messsystems: Ankreuzen von WHEELWATCH oder MOVEINSPECT

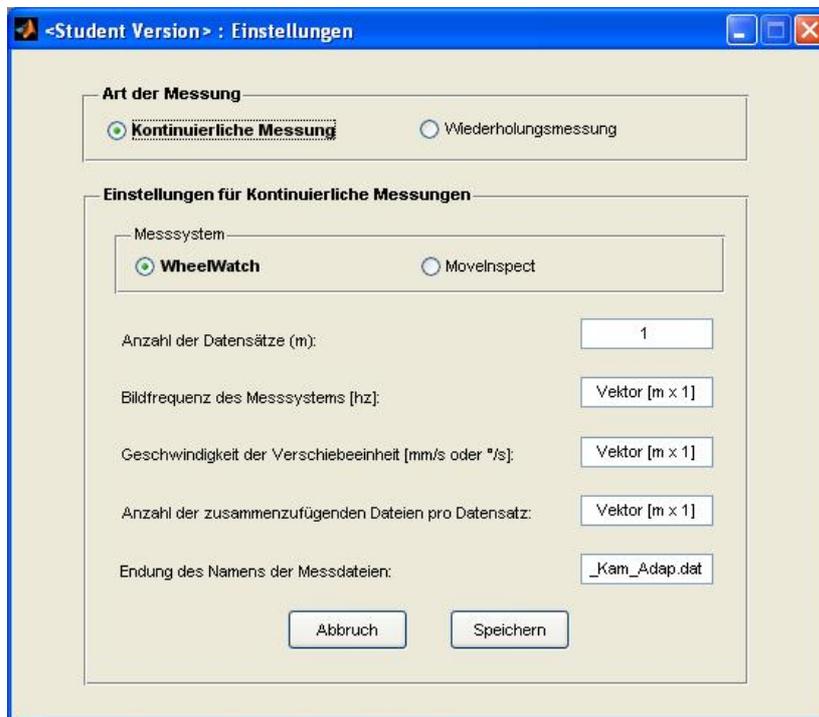


(a) Software „Messauswertung für Drehtisch“

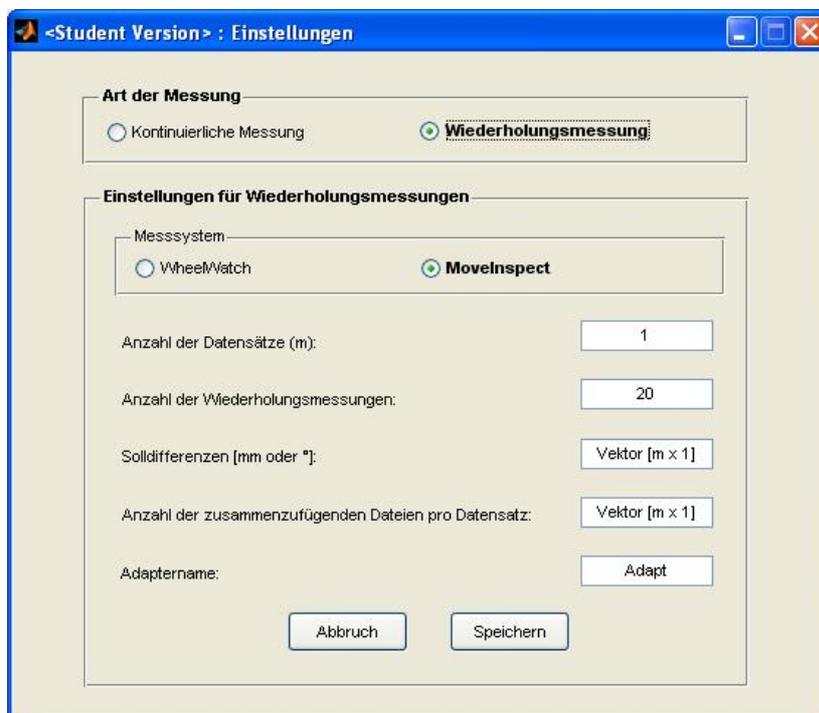


(b) Software „Messauswertung für Lineareinheit“

Abbildung A.3: Benutzeroberfläche der Auswertesoftware



(a) Einstellungen für kontinuierliche Messungen



(b) Einstellungen für Wiederholungsmessungen bei einer statischen Testreihe

Abbildung A.4: Benutzeroberfläche zur Angabe der Einstellungen der durchgeführten Testreihe

- Anzahl der Datensätze: Angabe eines ganzzahligen Wertes  $m$  für die Anzahl der Messreihen.
- Anzahl der zusammenzufügenden Dateien pro Datensatz: Für diese Einstellung müssen Dateien der Form „name\_nummer\_i“ vorliegen. Die Anzahl der Dateien, die zusammengefügt werden sollen, kann für jede Messreihe variieren. Deshalb ist die Anzahl für jeden Datensatz einzeln innerhalb eines Vektors der Größe  $m \times 1$  anzugeben. Als Trennzeichen zwischen den einzelnen Angaben kann ein Leerzeichen verwendet werden, so dass zum Beispiel für drei vorliegende Messreihen die Eintrag in der Form 3 1 4 angegeben werden kann. Falls keine zusammenzufügenden Dateien vorliegen, ist dieses Feld zu ignorieren.
- Endung des Names der Messdatei (WHEELWATCH): Diese Einstellung wird nur für das System WHEELWATCH benötigt. Die Messdateien von dem System WHEELWATCH besitzen in ihrem Namen sowohl den Namen der Messung, als auch eine Ergänzung mit dem Namen der Kamera (die ersten drei Buchstaben) und den Adapternamen mit den ersten vier Buchstaben. Außerdem wird der Name durch „rt“ bei real-time Messungen erweitert. Deshalb ist die Endung der Dateinamen anzugeben, damit die Messdateien automatisch eingelesen werden können. Die Endung „\_Kam\_Adap.dat“ ist voreingestellt und muss entsprechend der vorliegenden Dateinamen angepasst werden.
- Adaptername (MOVEINSPECT): Für MOVEINSPECT ist eine Anpassung der Dateiendung nicht erforderlich, da die Messdaten einheitlich mit dem Dateinamen „results.dat“ abgespeichert werden. Allerdings wird der Adaptername zum Sortieren der Messdatei benötigt. Deshalb ist bei dem Messsystem MOVEINSPECT die Angabe zum Adapternamen erforderlich. Hierbei ist ein Adaptername voreingestellt, der den Wortteil „Adapt“ enthält. In diesem Feld kann der Adaptername geändert werden.

Bei kontinuierlichen Messungen werden zusätzlich die folgenden Angaben benötigt.

- Bildfrequenz des Messsystems [Hz]: Für jede Messreihe ist hier ein Wert für die Aufnahme­frequenz von WHEELWATCH bzw. MOVEINSPECT anzugeben. Hierbei wird ein Vektor der Größe  $m \times 1$  mit den Angaben benötigt.
- Geschwindigkeit der Verschiebeeinheit [mm/s oder °/s]: Die eingestellte Geschwindigkeit an der Lineareinheit in [mm/s] bzw. des Drehtischs in [°/s] ist hier für jede Messreihe in einem Vektor der Größe  $m \times 1$  anzugeben. Für das Vorzeichen der Geschwindigkeitsangabe des Drehtischs gilt die Festlegung, dass bei einer Drehrichtung mit dem Uhrzeigersinn der Wert mit negativen Vorzeichen angegeben wird und gegen den Uhrzeigersinn mit positivem Vorzeichen.

Für statische Messungen müssen die nachfolgenden Punkte für die Auswertung vorliegen.

- Anzahl der Wiederholungsmessungen: Angabe einer ganzen Zahl, die der Anzahl der Wiederholungsmessungen an einer Messposition entspricht. Hier ist nur ein Wert einzutragen, der für alle Messreihen gleich ist. Als Standardwert werden 20 Wiederholungsmessungen an einer Position angenommen. Diese Angabe ist bei Bedarf zu ändern.
- Solldifferenzen [mm oder °]: Die Messdaten werden mit den Solländerungen der Verschiebeeinheiten verglichen. Hierzu ist die Linearänderung in [mm] oder die Winkeländerung in [°] anzugeben. Die Angabe ist für jede Messreihe erforderlich. Dazu werden die Solldifferenzen innerhalb eines Vektors der Größe  $m \times 1$  eingegeben. Die Solldrehung des Drehtischs ist als negativer Wert bei einer Drehbewegung mit dem Uhrzeigersinn anzugeben und als positiver Wert gegen den Uhrzeigersinn.

Die Daten werden durch Drücken des Buttons „Speichern“ gespeichert. Danach erfolgen die weiteren Auswerteschritte automatisch. Die Berechnungsschritte werden im Hauptteil der Diplomarbeit in Abschnitt 4.4.1 für die „Messauswertung für Drehtisch“ bzw. in Abschnitt 5.3.1 für die „Messauswertung für Lineareinheit“ erläutert.

Falls die Hypothesentests fehlschlagen, wird eine graphische Darstellung des Testergebnisses ausgegeben. Hiermit kann der Nutzer entscheiden, ob die Messreihen weiter ausgewertet oder die Berechnungen abgebrochen werden sollen. Der Nutzer kann durch Drücken einer beliebigen Taste die Berechnung fortsetzen. Durch Drücken der Tastenkombination Strg + C wird die Auswertung abgebrochen.

#### A.3.4 Ergebnisausgabe

Nach der Auswertung stehen die graphischen Visualisierungen der Messabweichungen zur Verfügung. Durch Auswahl der entsprechenden Messreihe in dem Feld „Ergebnisanzeige einer Messreihe“ wird das Ergebnisbild innerhalb der Benutzeroberfläche angezeigt. Hierbei wird nur die Auswertung der gesamten Messreihe angezeigt. Die Ergebnisdarstellung der Auswertung einer Wiederholungsmessung an der ausgewählten Position findet in externen Fenstern statt. Ebenso wird das Ergebnis der Auswertung der gesamten Testreihe als Kreisdiagramm beziehungsweise mittels Kriging in einem separatem Graphikfenster geöffnet.

Des Weiteren sind in der Tabelle die Angaben zum berechneten Mittelwert und Median der Winkel bzw. Distanzänderungen und dessen Standardabweichung für die Messreihen zusammengestellt. Mit den graphischen Ergebnisvisualisierungen und diesen Daten kann die Genauigkeit des Messsystems beurteilt werden.

Zusätzlich werden diese Ergebnisse mit den Graphiken in einem Pdf-Dokument abgespeichert. Neben den Ergebnisbildern stehen auch die zugehörigen Daten der Messabweichungen als Exceltabellen zur Verfügung. Diese bestehen aus vier Spalten, in denen die Positionsangabe des Drehtischs bzw. der Lineareinheit [mm oder °], die Soll-Ist Differenz [mm oder °], die detektierten Ausreißer mit Angabe der Messabweichung

[mm oder °] und die nicht gemessenen Positionen (mit „1“ markiert) angegeben sind. Diese Daten stehen auch nach Beendigung des Programms zur Verfügung.

Das Auswerteprogramm kann über den Button „Ende“ geschlossen werden.

## A.4 Ergebniszusammenstellung der Messreihen mit dem Drehtisch

Messreihe	Drehrichtung	Sollverschiebung [°]	Mittelwert [°]		Median [°]		Standardabweichung [°]	
			ohne	mit	ohne	mit	ohne	mit
WW_1	gegen Uhrzeigersinn	0,100	0,100	0,100	0,100	0,004	0,005	
WW_1	im Uhrzeigersinn	-0,100	-0,100	-0,100	-0,100	0,003	0,008	
WW_1	gesamt					0,004	0,007	
WW_2	gegen Uhrzeigersinn	0,100	0,100	0,100	0,100	0,004	0,006	
WW_2	im Uhrzeigersinn	-0,100	-0,100	-0,100	-0,100	0,004	0,015	
WW_2	gesamt					0,004	0,011	
MI_1	gegen Uhrzeigersinn	0,100	0,100	0,098	0,100	0,004	0,178	
MI_1	im Uhrzeigersinn	-0,100	-0,100	-0,102	-0,100	0,004	2,500	
MI_1	gesamt					0,004	1,772	
MI_2	gegen Uhrzeigersinn	0,100	0,100	-0,092	0,100	0,005	1,346	
MI_2	im Uhrzeigersinn	-0,100	-0,100	-0,139	-0,100	0,003	0,757	
MI_2	gesamt					0,004	1,092	

Tabelle A.1: Zentrisch vs. Exzentrisch: Messergebnisse der beiden Onlinemesssystemen WHEELWATCH und MOVE-INSPECT zur Überprüfung der Genauigkeiten von Winkeln der beiden Onlinemesssysteme (Spalten „mit“/„ohne“: Ergebnisse mit/ohne Berücksichtigung der Ausreißer)

Messreihe	Drehrichtung	Sollverschiebung [°]	Mittelwert [°]		Median [°]		Standardabweichung [°]	
			ohne	mit	ohne	mit	ohne	mit
WW_3	gegen Uhrzeigersinn	0, 100	0, 100	0, 100	0, 100	0, 100	0, 006	0, 012
WW_3	im Uhrzeigersinn	-0, 100	-0, 100	-0, 100	-0, 100	-0, 100	0, 006	0, 013
WW_3	gesamt						0, 006	0, 013
MI_3	gegen Uhrzeigersinn	0, 100	0, 100	0, 100	0, 100	0, 100	0, 006	0, 094
MI_3	im Uhrzeigersinn	-0, 100	-0, 100	-0, 102	-0, 100	-0, 100	0, 007	0, 057
WW_3	gesamt						0, 006	0, 078

Tabelle A.2: Statistisch vs. Kontinuierlich: Messergebnisse der beiden Onlinemesssystemen WHEELWATCH und MOVEINSPECT zur Überprüfung der Genauigkeiten von Winkeln der beiden Onlinemesssysteme (Spalten „mit“/„ohne“: Ergebnisse mit/ohne Berücksichtigung der Ausreißer)

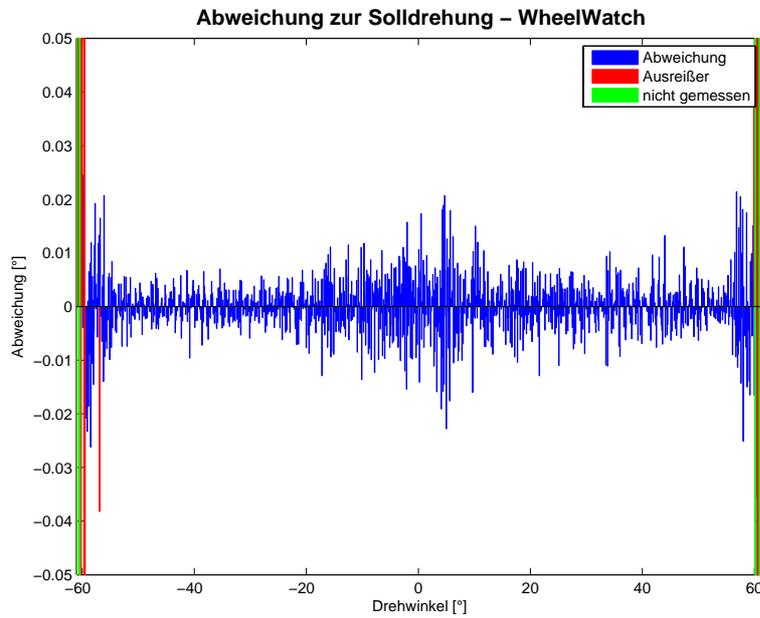
Messreihe	Drehrichtung	Sollverschiebung [°]	Mittelwert [°]		Median [°]		Standardabweichung [°]	
			ohne	mit	ohne	mit	ohne	mit
WW_4	gegen Uhrzeigersinn	0, 100	0, 100	0, 100	0, 100	0, 100	0, 004	0, 007
WW_4	im Uhrzeigersinn	-0, 100	-0, 100	-0, 100	-0, 100	-0, 100	0, 004	0, 009
WW_4	gesamt						0, 004	0, 008
WW_5	gesamt	0, 200	0, 198	0, 165	0, 199	0, 194	0, 005	0, 025
MI_4	gegen Uhrzeigersinn	0, 100	0, 100	-0, 099	0, 100	0, 100	0, 004	0, 301
MI_4	im Uhrzeigersinn	-0, 100	-0, 100	-0, 099	-0, 100	-0, 100	0, 005	0, 258
WW_4	gesamt						0, 005	0, 280
MI_5	gesamt	0, 200	0, 196	0, 175	0, 199	0, 195	0, 005	0, 087

Tabelle A.3: Bildfrequenz: Messergebnisse der beiden Onlinemesssystemen WHEELWATCH und MOVEINSPECT zur Überprüfung der Genauigkeiten von Winkeln der beiden Onlinemesssysteme (Spalten „mit“/„ohne“: Ergebnisse mit/ohne Berücksichtigung der Ausreißer)

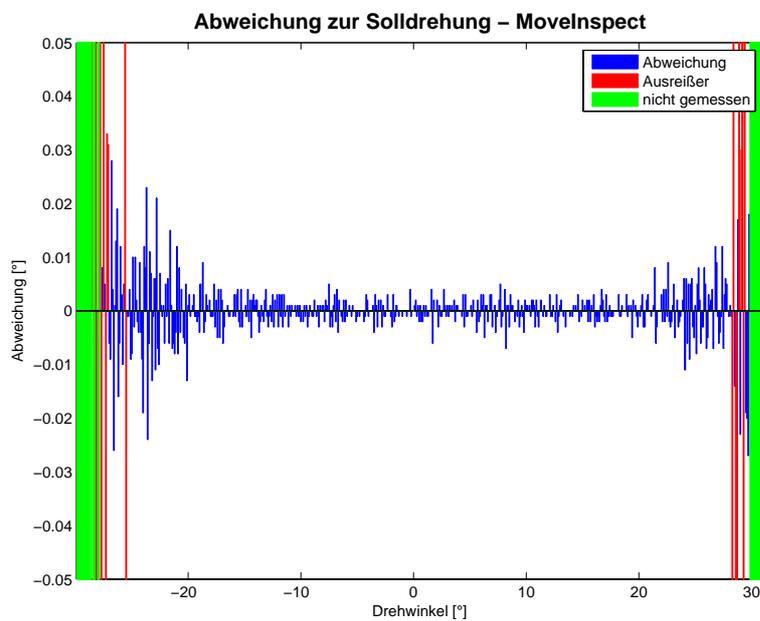
## A.5 Ergebnisse der Testreihen zur Überprüfung der Winkelgenauigkeit

Messreihe	Drehrichtung	Sollverschiebung [°]	Mittelwert [°]		Median [°]		Standardabweichung [°]	
			ohne	mit	ohne	mit	ohne	mit
TestWW_2	gegen Uhrzeigersinn	0,100	0,100	0,100	0,100	0,006	0,016	
TestWW_2	im Uhrzeigersinn	-0,100	-0,100	-0,100	-0,100	0,006	0,015	
TestWW_2	gesamt					0,006	0,016	
TestMI_2	gegen Uhrzeigersinn	0,100	0,100	0,100	0,100	0,004	0,013	
TestMI_2	im Uhrzeigersinn	-0,100	-0,100	-0,100	-0,100	0,006	0,038	
TestMI_2	gesamt					0,005	0,028	

Tabelle A.4: Wiederholungsmessung vs. Einzelmessung: Messergebnisse der beiden Onlinemesssystemen WHEELWATCH und MOVEINSPECT zur Überprüfung der Genauigkeiten von Winkeln der beiden Onlinemesssysteme (Spalten „mit“/„ohne“: Ergebnisse mit/ohne Berücksichtigung der Ausreißer)



(a) WHEELWATCH



(b) MOVEINSPECT

Abbildung A.5: Vergleich der Messabweichungen der Winkelveränderungen von  $0,1^\circ$  bei einem zentrischen Aufbau mit einer Einzelmessung

## A.6 Überprüfungsmessungen mit dem Lasertracker

Generell ermöglichen die durchgeführten Messungen zur Genauigkeitsuntersuchung der Onlinemesssysteme einen Vergleich zu den Sollwerten der hochgenauen Verschiebeeinheiten. Durch den zusätzlichen Einsatz des Lasertrackers als dritte Komponente ist eine weitere Kontrolle der Messergebnisse gegeben. Der dafür nötige Aufbau ist von der Grundstruktur her identisch zu den zentrischen Aufbauten in Abbildung 4.3a beziehungsweise 4.3b. Zusätzlich zu diesen Komponenten steht der Lasertracker in einem Abstand  $A_{LT}$  von etwa einem Meter auf der entgegengesetzten Seite der Basis (MOVEINSPECT) beziehungsweise der Kamera (WHEELWATCH) wie die Lineareinheit. Die graphische Veranschaulichung dieser beiden Messaufbauten stellt die Abbildung A.6 dar. Die beiden Onlinemesssysteme messen hier die Position eines flachen Adapters mit zehn Ancomarken. Dieser Adapter wird bei allen Messungen mit der Lineareinheit verwendet. Angesichts dessen, dass der Lasertracker nicht in der Lage ist die codierten Ancomarken des Adapters zu messen, muss ein so genanntes Nest mit Heißkleber auf dem Adapter befestigt werden. Dieses Nest ist die magnetische Halterung für ein Kugelprisma, welches der Lasertracker als Zielpunkt verwendet.

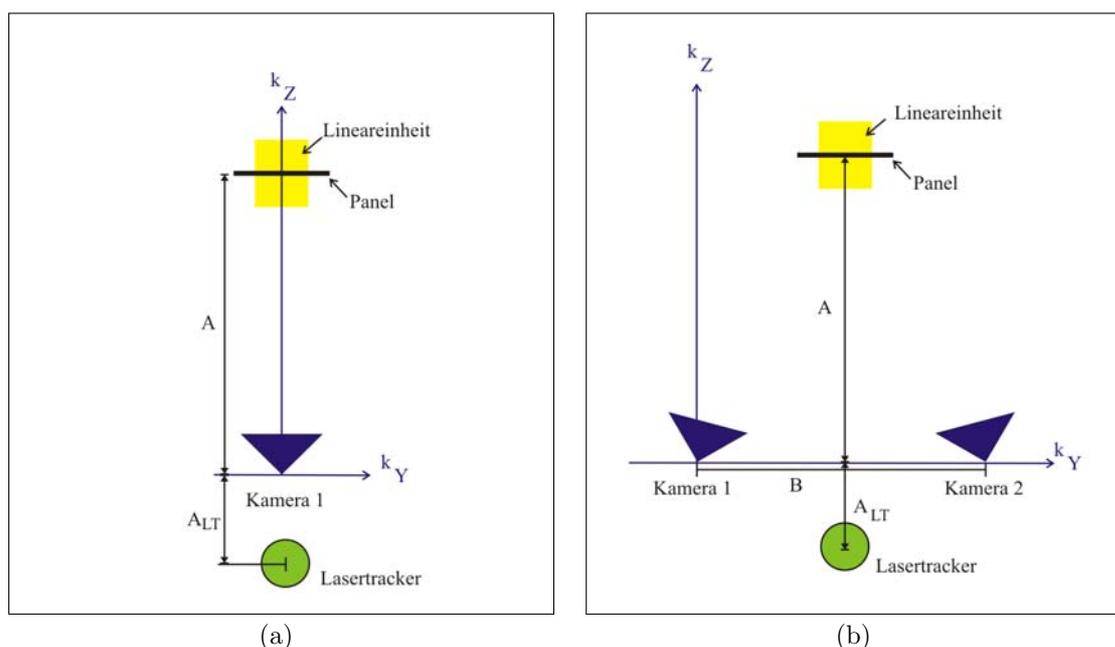


Abbildung A.6: Aufbau der Systeme Lasertracker, Lineareinheit und WHEELWATCH [A.6a] beziehungsweise MOVEINSPECT [A.6b]

Die Lineareinheit wird für diese Messung so aufgebaut, dass sie lineare Verschiebungen in Aufnahme­richtung realisiert. Dieser Aufbau wird im Abschnitt 5.2.2.1 näher beschrieben.

**Messdurchführung.** Die Messungen werden zentrisch durchgeführt, wobei eine Bewegung der Lineareinheit in Aufnahme­richtung stattfindet. Die Distanzveränderungen

der Lineareinheit nehmen die Onlinemesssysteme und der Lasertracker sowohl mit einer statischen als auch einer kontinuierlichen Messung auf. In Tabelle A.5 sind die durchgeführten Messungen zusammengestellt. Alle Messungen der Onlinemesssysteme führt der Lasertracker gleichzeitig mit den identischen Einstellungen durch.

<b>Für alle nachfolgenden Messungen gilt:</b>				
Adapterposition:		zentrisch		
Bewegungsrichtung:		in Aufnahme­richtung		
Fokussierung:		800mm		
Wiederholungsmessungen:		20 (bei statischen Messungen)		
Messreihe	Messsystem	Art der Messung	Bildfrequenz [Hz]	Sollverschiebung [ mm]
WW_18	WHEELWATCH	statisch	50	1,0
WW_19	WHEELWATCH	kontinuierlich	10	0,05
WW_20	WHEELWATCH	kontinuierlich	10	0,0
MI_16	MOVEINSPECT	statisch	50	1,0
MI_17	MOVEINSPECT	kontinuierlich	10	0,05
MI_18	MOVEINSPECT	kontinuierlich	10	0,0
LT_1	Lasertracker	statisch	–	1,0
LT_2	Lasertracker	kontinuierlich	10	0,05
LT_3	Lasertracker	kontinuierlich	10	0,0

Tabelle A.5: Parametereinstellungen der Onlinemesssysteme und der Lineareinheit für deren Überprüfung mit dem Lasertracker

Die statischen Messungen finden jeweils nach einer Distanzänderung von 1mm der Lineareinheit statt. Die optischen Onlinemesssysteme führen an einer Position 20 Wiederholungsmessungen mit einer Bildfrequenz von 50Hz aus. Der Lasertracker speichert jeweils einen Messwert pro Messposition ab. Hiermit wird überprüft, ob die angegebene Distanz der Lineareinheit der gemessenen 3D-Distanz des Lasertrackers entspricht. Es besteht weiterhin eine direkte Vergleichsmöglichkeit zu den Messungen mit WHEELWATCH und MOVEINSPECT. Hierbei ist zu beachten, dass die durchgeführte Auswertung bei den Onlinemesssystemen eine erreichte Genauigkeit mit Wiederholungsmessungen ausgibt. Der Genauigkeitswert des Lasertrackers bezieht sich auf eine Einzelmessung.

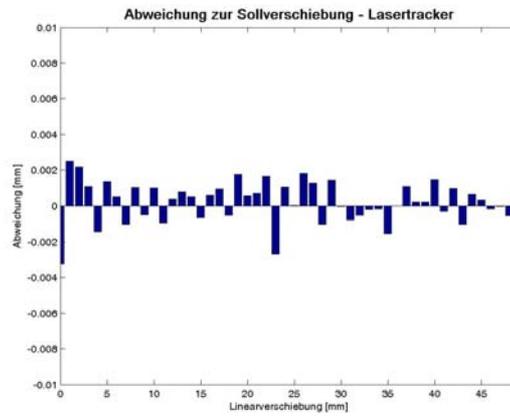
WHEELWATCH und MOVEINSPECT dienen zur Aufnahme von dynamischen Prozessen. Deshalb ist auch eine Beurteilung der Genauigkeit mit einer kontinuierlichen Messung sinnvoll. Da keine Synchronisation der Systeme vorliegt, muss sich die Lineareinheit kontinuierlich bewegen. Bei einer gleichbleibenden Aufnahme­frequenz ergibt sich somit immer die gleiche Distanz zwischen zwei aufeinander folgenden Messungen. Diese kann über die Geschwindigkeit der Lineareinheit und der Aufnahme­frequenz des Messsystems bestimmt werden. Die Geschwindigkeit der Lineareinheit wird auf 0,05mm/s eingestellt. Die Onlinemesssysteme und der Lasertracker nehmen die Messwerte mit einer Frequenz von 10Hz auf. Als Distanzen ergeben sich somit 0,005mm. Die Lineareinheit

besitzt ein integriertes Zeitlimit zum Anfahren der positiven beziehungsweise negativen Limits. Wenn das Limit nach drei Minuten noch nicht erreicht wird, stoppt die Lineareinheit in ihrer Bewegung. Bei der eingestellten Geschwindigkeit von 0,05mm/s kann deshalb lediglich um eine Strecke von insgesamt 9mm kontinuierlich verschoben werden. Mit der zusätzlichen Messung des Lasertrackers wird überprüft, ob die konstanten Abstände von 0,005mm mit der Genauigkeit des Absolute Trackers realisiert werden. Außerdem zeigt der Soll-Ist-Vergleich der Distanzmessungen in Bezug zum ersten Messwert, inwieweit die Lineareinheit zur Beurteilung von größeren Distanzen geeignet ist.

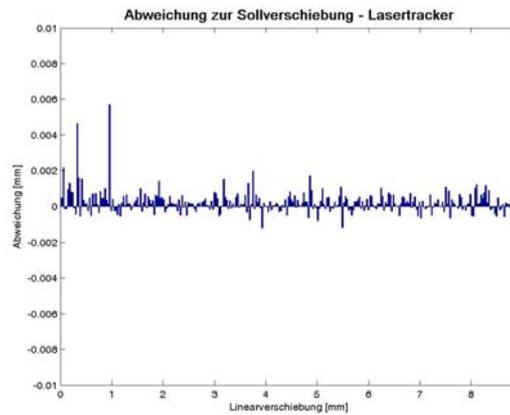
Des Weiteren wird mit jedem System eine Messreihe erstellt, in der sich das Messobjekt nicht bewegt. Hierbei nehmen sowohl WHEELWATCH und MOVEINSPECT als auch der Lasertracker etwa 1000 Messwerte auf. Zwischen den Messwerten dieser Messreihen liegt keine äußere Verschiebung vor. Hiermit ist eine Aussage über die Streuung der Distanz zwischen zwei Messwerten möglich, ohne dass dieser durch Einflüsse der Lineareinheit verfälscht wird. Zur Beurteilung der Streuung wird bei der Auswertung dieser Messreihen die Distanzberechnung zwischen zwei Werten immer auf den ersten Messwert bezogen. Somit gibt die Standardabweichung einen ungefähren Wert wieder, mit welcher Genauigkeit das jeweilige Messsystem Distanzen bestimmen kann und welche Distanz noch sinnvoll ist aufzulösen.

**Auswertung des Lasertrackers.** Zunächst werden die Daten der Lineareinheit mit den Messungen des Absolute Trackers verglichen. Der Lasertracker besitzt bei einer Entfernung von 2m eine a priori Distanzgenauigkeit von  $\sigma_{LT} = 1\mu\text{m}$ . Dies ist ungenauer als die Distanzgenauigkeit der Lineareinheit im sub $\mu\text{m}$ -Bereich. Deshalb kann mit dem Lasertracker nicht die Genauigkeit der Lineareinheit überprüft werden. Allerdings besitzt der Lasertracker eine übergeordnete Genauigkeit zu den Angaben der Onlinemesssysteme. Somit lässt sich überprüfen, ob die Lineareinheit sich zur Erzeugung von Sollwerten für den Vergleich mit WHEELWATCH und MOVEINSPECT eignet.

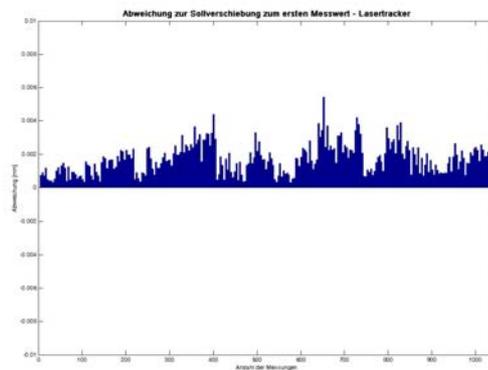
Die Messwertauswertung der durchgeführten Messungen mit dem Lasertracker ergibt, dass kein signifikanter Unterschied zwischen Mittelwert und Median der gemessenen Distanz vorliegt. Außerdem stimmen diese Werte mit dem Sollwert überein. Dies gilt für alle durchgeführten Messungen mit dem Lasertracker und wird deshalb nicht bei jeder einzelnen Messreihe explizit erwähnt. In den Graphiken A.7a und A.7b ist erkennbar, dass die Messabweichungen zwischen Lineareinheit und Absolute Tracker im Bereich von  $\pm 2\mu\text{m}$  streuen mit einer berechneten Standardabweichung von  $\hat{\sigma}_{LT} = 1\mu\text{m}$ . Die größte Abweichung beträgt  $3\mu\text{m}$  bei der statischen Messung. In der kontinuierlichen Messung sind zwei Ausreißer in einer Größenordnung von  $5\mu\text{m}$  enthalten. Die hier angegebenen Werte zeigen, dass sich sowohl der Lasertracker als auch die Lineareinheit zur Erzeugung der Sollwerte für den Vergleich mit den Onlinemesssystemen eignen. Dies ist damit zu begründen, dass zum einen die a priori Herstellerangabe der Distanzgenauigkeit des Absolute Trackers durch die ermittelte Standardabweichung aus den durchgeführten Messungen bestätigt wird. Zum anderen liegen die größten Abweichungen noch unterhalb der angegebenen Messgenauigkeit der Onlinemesssysteme.



(a) Messabweichungen der statischen Messung mit 1mm Distanzen

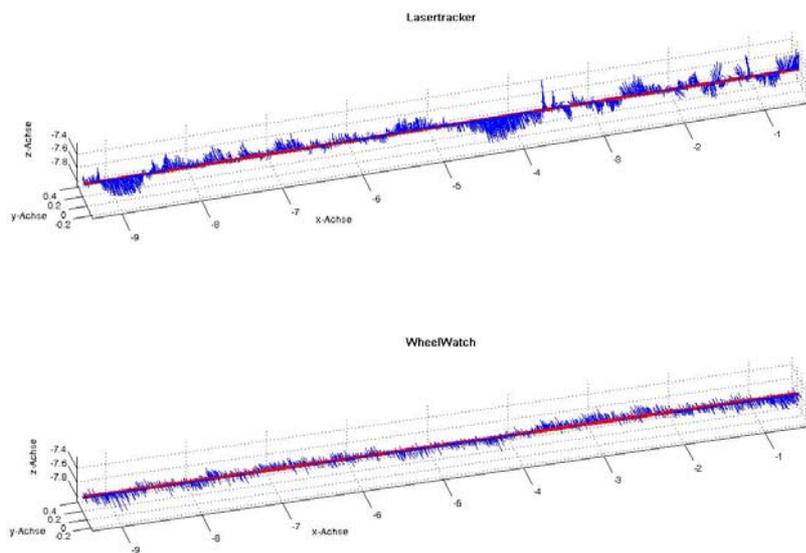


(b) Messabweichungen bei Distanzmessungen von 0,005mm der kontinuierlichen Messung

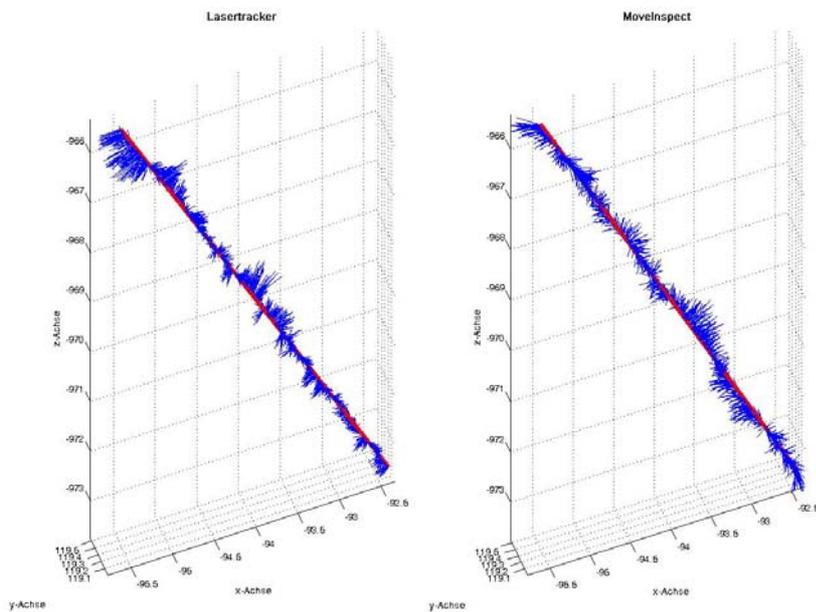


(c) Messabweichungen zum ersten Messwert ohne Distanzänderung

Abbildung A.7: Abweichungen der berechneten Distanzen des Lasertrackers zu den Sollangaben der Lineareinheit.



(a) Lasertracker (oben) und WHEELWATCH (unten)



(b) Lasertracker (links) und MOVEINSPECT (rechts)

Abbildung A.8: Graphische Visualisierung der Messwertauswertung der kontinuierlichen Messungen. Die ausgleichende Gerade durch die gemessenen 3D-Koordinaten der jeweiligen Messsysteme wird zusammen mit den zweifach überhöhten Abweichungen dargestellt.

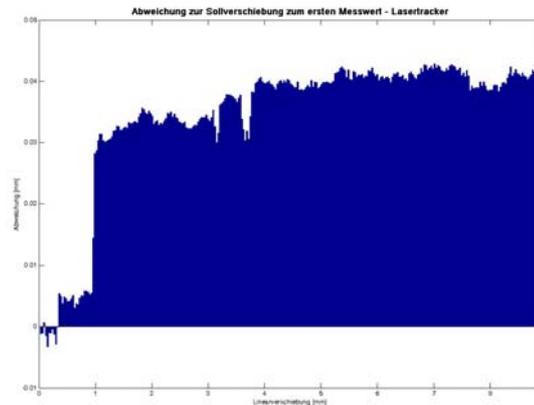


Abbildung A.9: Messabweichungen bezogen auf den ersten Messwert der kontinuierlichen Messreihe LT\_2

Die Abbildungen A.8a und A.8b zeigen die ausgleichende Gerade durch die gemessenen 3D-Koordinaten des Lasertrackers mit Vergleich zu der ausgleichenden Geraden der Messungen mit den Onlinemesssystemen.<sup>6</sup> Des Weiteren sind die Abweichungen zwischen 3D-Koordinate und der dargestellten Geraden zweifach überhöht abgebildet. Es fällt sowohl in den Messungen des Lasertrackers als auch in den Messungen der Onlinemesssysteme eine spiralförmige Bewegung der Lineareinheit auf. Die Abweichung der Messwerte zu der ausgleichenden Geraden liegen mit dem Lasertracker bei maximal  $8\mu\text{m}$ . Bei der Lineareinheit kann also nicht von einer geradlinigen Bewegung ausgegangen werden. Dies ist auch in der Graphik A.9 des Soll-Ist-Vergleich der Distanzen in Bezug zum ersten Messwert erkennbar. Ab einem Millimeter Entfernung liegen die Abweichungen zwischen der gemessenen Distanz und dem Sollwert deutlich über einer Genauigkeit von wenigen Mikrometern. Eine mögliche Ursache für die beobachtete Spiralbewegung könnte in der Motorbewegung der Lineareinheit liegen.

Aus den beschriebenen Beobachtungen ist zu schließen, dass sich die Lineareinheit nicht zur Erzeugung von absoluten 3D-Distanzen eignet. Für die Distanzen von  $0,005\text{mm}$  und von  $1\text{mm}$  ist die Standardabweichung allerdings kleiner als die Abweichungen zur ausgleichenden Geraden, so dass die spiralförmige Bewegung keinen Einfluss auf die Genauigkeit von diesen Distanzen der Lineareinheit besitzt (s. Abbildung A.7a und A.7b). Mit der Standardabweichung von  $1\mu\text{m}$  bis  $2\mu\text{m}$  des Lasertrackers eignet sich die Lineareinheit zur Erzeugung von Sollwerten für Streckendifferenzen, die nicht größer als  $1\text{mm}$  sind. Dies gilt sowohl für statische als auch für dynamische Messungen. Allerdings können bei dynamischen Messungen die Messwerte der Lineareinheit denen der Onlinemesssysteme nicht eindeutig zugeordnet werden, da die Systeme nicht synchronisiert sind.

Eine Zusammenstellung der Auswertergebnisse liegt im Anhang A.7 vor. Diese enthält auch die Ergebnisse der Systeme WHEELWATCH und MOVEINSPECT, die in den folgenden zwei Abschnitten erläutert werden.

<sup>6</sup>Zur Berechnung der ausgleichenden Geraden wird die Matlab-Implementation der Least-Squares Lösung von Ian Smith, Centre for Mathematics and Scientific Computing, England, 2002 verwendet.

**Auswertung des Systems WHEELWATCH.** Die Abweichungen des Soll-Ist Vergleichs der statischen Messung ist in Abbildung A.10a graphisch dargestellt. Als Standardabweichung der Messabweichungen ergibt sich  $\hat{\sigma}_D = 16\mu\text{m}$  bei Distanzmessungen von 1mm. Der Mittelwert und der Median entsprechen dem Sollwert. Diese Angabe bezieht sich auf den gemittelten Wert aus 20 Wiederholungsmessungen.

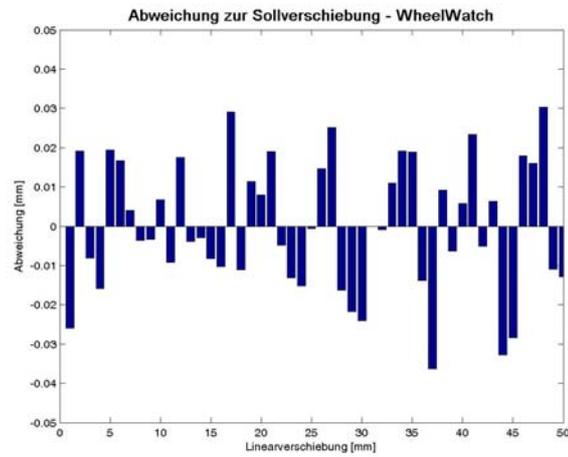
Die Ergebnisse der dynamischen Messung (s. Abbildung A.10b) liefern für die Messung mit WHEELWATCH überwiegend zu große Distanzen im Vergleich zu den Sollwerten von  $5\mu\text{m}$ . Bei der Auswertung dieser Messung ergibt sich ein Mittelwert der berechneten Distanzen von  $14\mu\text{m}$  (Median =  $11\mu\text{m}$ ) mit einer Standardabweichung von  $9\mu\text{m}$ . Damit liegt zum einen eine größere Standardabweichung vor als die gemessenen Distanzen. Zum anderen lässt sich daraus schließen, dass WHEELWATCH aufgrund der Messgenauigkeit keine Distanz, die kleiner als die Größenordnung des Mittelwerts bzw. des Medians ist, messen kann. Dies stellt eine Aussage über das Auflösungsvermögen des Systems WHEELWATCH dar.

Die Messung ohne Bewegung der Lineareinheit liefert eine Standardabweichung von  $33\mu\text{m}$  (s. Abbildung A.10c). Diese Genauigkeitsangabe weicht um den Faktor vier von dem a priori Wert von  $0,14\text{mm}$  ab. Dieser Herstellerwert bezieht sich auf eine Genauigkeitsangabe, die auch unter schwierigen Bedingungen für eine Einzelmessung erreicht werden kann. Diese Arbeit zeigt, welche Genauigkeit die Systeme WHEELWATCH und MOVEINSPECT unter idealen Voraussetzungen erreichen können. Deshalb wird diese Angabe für diese Bedingungen als zu pessimistisch eingestuft und die einfache a priori Standardabweichung auf  $33\mu\text{m}$  angepasst. Dieser Wert bezieht sich auf eine Adaptermessung mit neun Anco-Marken, bei der die Entfernung zwischen der Kamera von WHEELWATCH und dem Objekt der Fokussierung entspricht und sich das Objekt zentrisch vor der Kamera befindet.

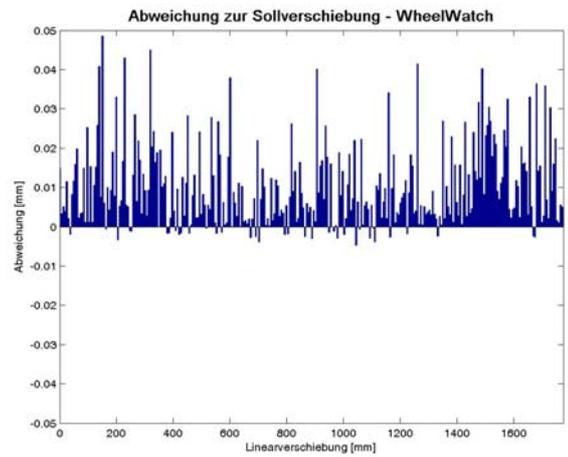
Der Vergleich von verschiedenen Einflüssen auf die Distanzgenauigkeit von WHEELWATCH findet ausführlich in Abschnitt 5.2.2 statt. Diese Auswertung zeigt lediglich die erreichbare Genauigkeit mit dem Onlinemesssystem.

**Auswertung des Systems MOVEINSPECT.** Die Messungen der Distanzen weisen bei dem Onlinemesssystem MOVEINSPECT eine Standardabweichung von  $4\mu\text{m}$  bei einer konstanten Verschiebung von 1mm auf. Dieser Wert bezieht sich auf die statische Messung mit 20 Wiederholungsmessungen. Sowohl zwischen Mittelwert und Median als auch zum Sollwert der Lineareinheit liegen bei den Messungen mit MOVEINSPECT keine signifikanten Unterschiede vor. Die kontinuierliche Messung liefert eine etwas geringere Standardabweichung von  $2\mu\text{m}$  bei einer Solldistanz von  $5\mu\text{m}$ . Die Grenze der Auflösbarkeit von Distanzen liegt bei MOVEINSPECT also in diesem Bereich.

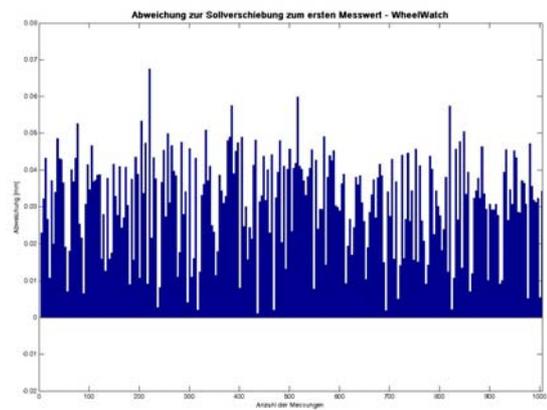
Auffällig ist, dass die Standardabweichung der statischen Messung mit Wiederholungsmessungen an einer Position größer als die Standardabweichung der kontinuierlichen Messung ist. Mit dem Mittelungsprozess der Wiederholungsmessungen werden die zufälligen Einflüsse minimiert und somit sind die systematischen Abweichungen deutlicher erkennbar. Hinzu kommt, dass sich die statische Messung auf größere Distanzen



(a) Statische Messung

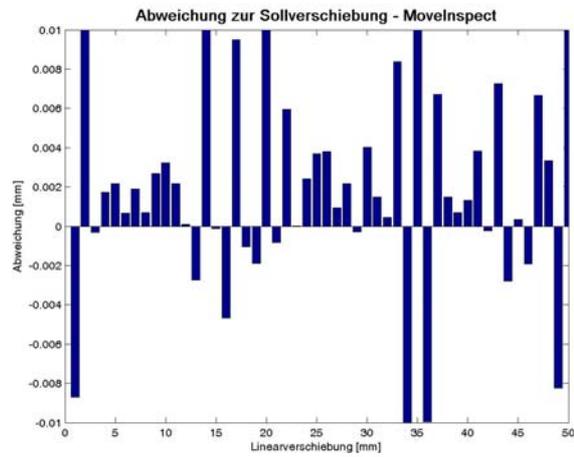


(b) Kontinuierliche Messung

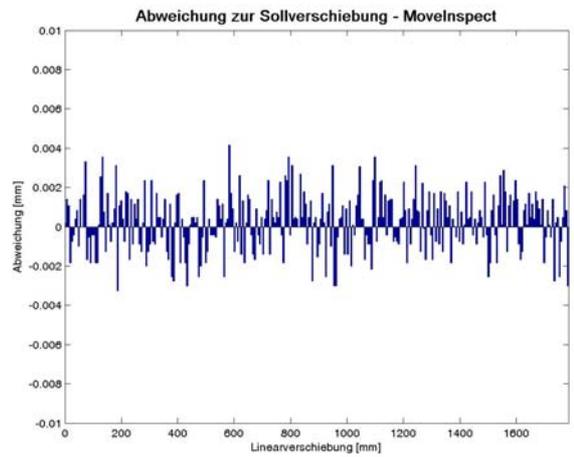


(c) Messung einer Position

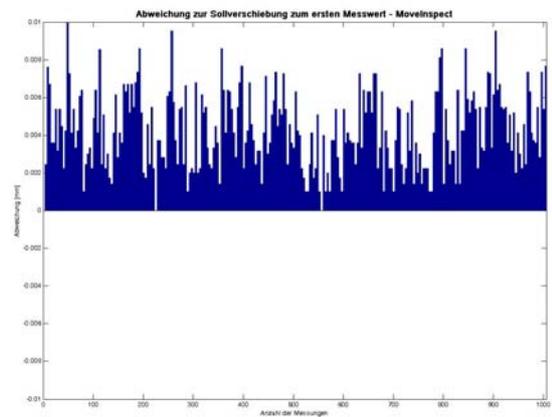
Abbildung A.10: Abweichungen des Soll-Ist-Vergleichs der Messungen mit WHEEL-WATCH



(a) Statische Messung



(b) Kontinuierliche Messung



(c) Messung einer Position

Abbildung A.11: Abweichungen des Soll-Ist-Vergleichs der Messungen mit MOVEIN-SPECT

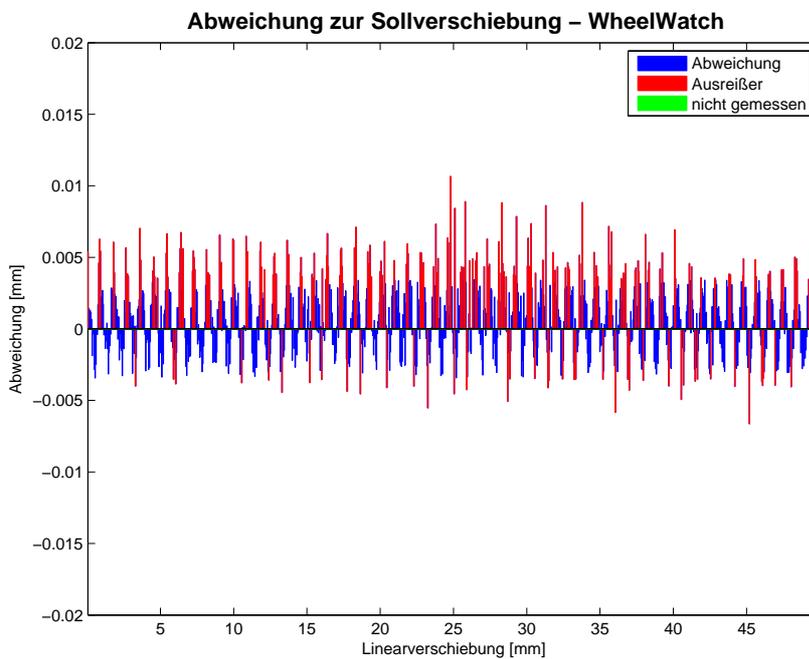
bezieht. Deshalb sind hier die statische und die dynamische Messung nicht direkt miteinander vergleichbar. In Abschnitt 5.2.2 wird diese Beziehung näher untersucht.

Die Standardabweichung der Messreihe an einer festen Position beträgt für das System MOVEINSPECT  $5\mu\text{m}$ . Diese Angabe bestätigt die zuvor getroffene Aussage zum Auflösungsvermögen von MOVEINSPECT. In Bezug auf die a priori Standardabweichung von  $0,14\text{mm}$  stellt die empirisch ermittelte Standardabweichung eine Verbesserung um den Faktor 28 dar. Hierbei ist zu berücksichtigen, dass sich die a priori Angabe zum einen auf die Genauigkeit eines Einzelpunktes bei einer Einzelmessung bezieht. Die Messungen in dieser Arbeit werden allerdings zum direkten Vergleich mit WHEELWATCH ebenfalls mit einem Adapter durchgeführt. Zum anderen bezieht sich die Herstellerangabe wie bereits erwähnt nicht auf die beste erreichbare Genauigkeit, die hier untersucht wird. Deshalb findet auch bei dem System eine Anpassung des a priori Wertes statt. Dieser wird auf den Wert von  $5\mu\text{m}$  festgelegt. Ebenso wie bei WHEELWATCH bezieht sich der Wert auf einen zentrischen Messaufbau mit einer Entfernung zwischen Onlinemesssystem und Objekt, die dem Fokussierungsabstand entspricht.

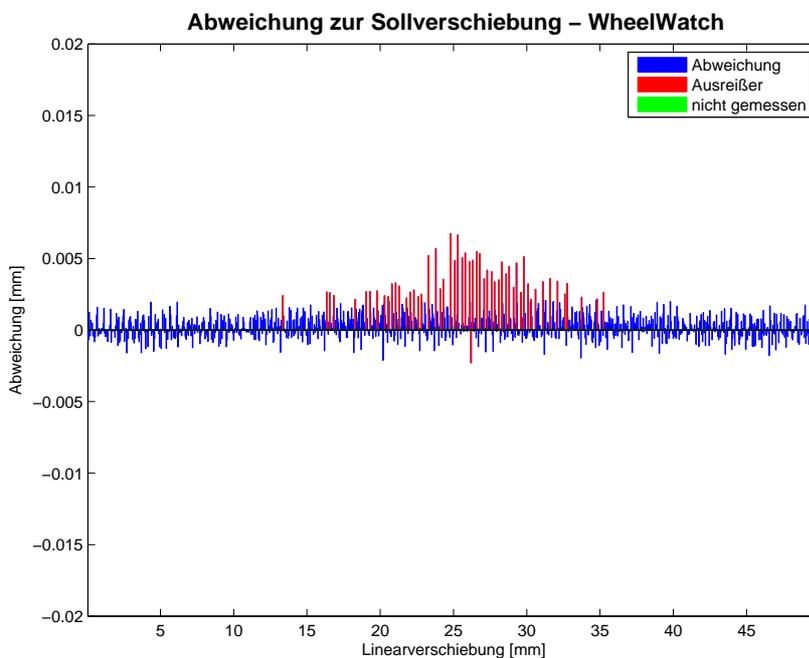
## A.7 Ergebniszusammenstellung der Messreihen mit der Linearität

Messreihe	Sollverschiebung [mm]	Mittelwert [mm]	Median [mm]	Standardabweichung [mm]
WW_18	1,000	1,000	0,998	0,016
WW_19	0,005	0,014	0,011	0,009
WW_20	0,000	0,016	0,013	0,033
MI_16	1,000	1,002	1,001	0,007
MI_17	0,005	0,005	0,005	0,002
MI_18	0,000	0,003	0,002	0,005
LT_1	1,000	1,000	1,000	0,001
LT_2	0,005	0,005	0,005	0,001
LT_3	0,000	0,001	0,001	0,002

Tabelle A.6: Messergebnisse der Überprüfungsmessungen mit dem Lasertracker



(a) Messreihe WW\_21



(b) Messreihe WW\_22

Abbildung A.12: Messabweichungen der Distanzmessungen von 0,05mm bei einem zentralen Aufbau des Systems WHEELWATCH

Messreihe	Sollverschiebung [mm]	Mittelwert [mm]	Median [mm]	Standardabweichung [mm]
WW_6	0,500	0,502	0,502	0,010
WW_7	0,500	0,500	0,500	0,005
WW_8	0,500	0,501	0,501	0,008
WW_9	0,500	0,501	0,500	0,007
WW_10	0,500	0,501	0,501	0,006
WW_11	0,500	0,501	0,501	0,009
WW_12	0,500	0,501	0,500	0,019
WW_13	0,500	0,501	0,500	0,008
WW_14	0,100	0,100	0,100	0,018
WW_15	0,100	0,100	0,099	0,018
MI_6	0,500	0,500	0,500	0,001
MI_7	0,500	0,500	0,500	0,001
MI_8	0,500	0,501	0,501	0,003
MI_9	0,500	0,501	0,500	0,002
MI_10	0,500	0,500	0,500	0,004
MI_11	0,500	0,500	0,500	0,004
MI_12	0,500	0,500	0,500	0,006
MI_13	0,500	0,500	0,500	0,003

Tabelle A.7: Messergebnisse der Messreihen zur Überprüfung der Distanzgenauigkeiten der beiden Onlinemesssysteme

<b>Für alle nachfolgenden Messungen gilt:</b>		
Art der Messung:	statisch	
Adapterposition:	zentrisch	
Bewegungsrichtung:	vertikal	
Fokussierung:	800mm	
Bildfrequenz:	50Hz	
Wiederholungsmessungen:	20	
Sollverschiebung:	0,05mm	
Messreihe	Messsystem	Entfernung A
WW_21	WHEELWATCH	800mm
WW_22	WHEELWATCH	400mm

Tabelle A.8: Parametereinstellungen der Onlinemesssysteme und der Lineareinheit bei den zusätzlich Messungen zur Überprüfung des systematischen periodischen Einflusses

Messreihe	Sollverschiebung [mm]	Mittelwert [mm]	Median [mm]	Standardabweichung [mm]
WW_21	0,050	0,051	0,051	0,002
WW_22	0,050	0,050	0,050	0,001

Tabelle A.9: Messergebnisse der zusätzlichen Messungen zur Überprüfung des systematischen periodischen Einflusses

Messreihe	Sollverschiebung [mm]	Mittelwert [mm]	Median [mm]	Standardabweichung [mm]
WW_16	10,000	19,840	10,003	0,026
WW_17	10,000	19,771	10,004	0,031
MI_14	10,000	19,795	9,999	0,010
MI_15	10,000	9,997	9,999	0,010

Tabelle A.10: Messergebnisse der Messreihen zur Distanzgenauigkeit im Verhältnis zum Messbereich

## A.8 Ergebnisse der Testreihen zur Überprüfung der Distanzgenauigkeit

Testreihe	Messname
TestWW_3	KrigingWW
TestWW_4	KrigingWWlr
TestMI_3	Kriging16MI
TestMI_4	KrigingMIrl
TestWW_5	KrigingWWEinzel
TestWW_6	KrigingWWlrEinzel
TestWW_5	Kriging16MIEinzel
TestWW_6	KrigingMIrlEinzel

Tabelle A.11: Tabelle mit der Bezeichnung der Testreihe in dieser Diplomarbeit und den vergebenen Messnamen in den folgenden Ergebnisdateien

Ergebnisse/KrigingWW.tex

Abendroth, zur Mühlen

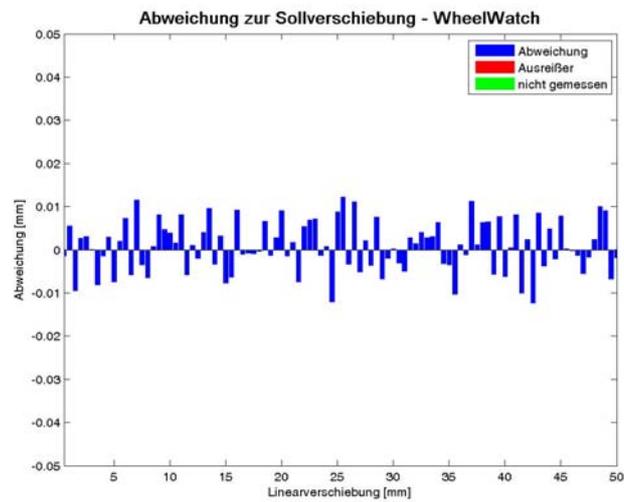


Abbildung 1: Bilder/KrigingWW/KrigingWW1Abb1

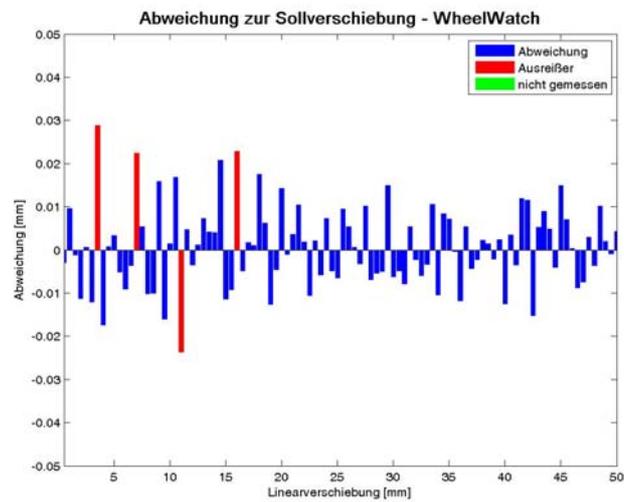


Abbildung 2: Bilder/KrigingWW/KrigingWW2Abb1

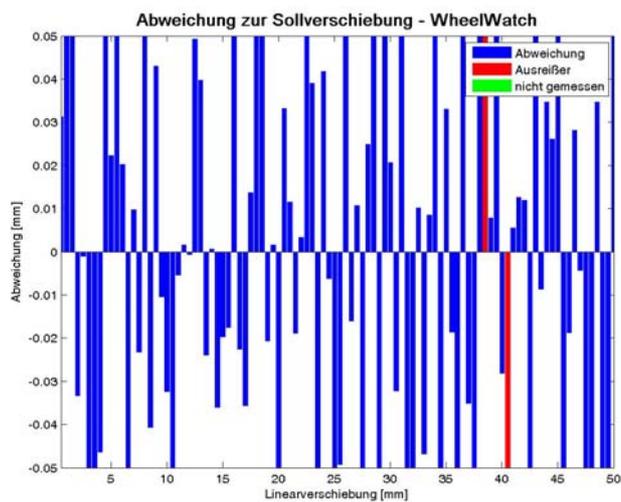


Abbildung 3: Bilder/KrigingWW/KrigingWW3Abb1

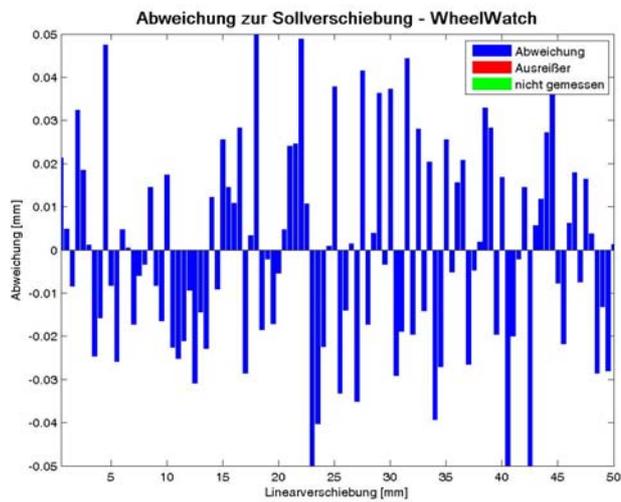


Abbildung 4: Bilder/KrigingWW/KrigingWW4Abb1

Ergebnisse/KrigingWW.tex

Abendroth, zur Mühlen

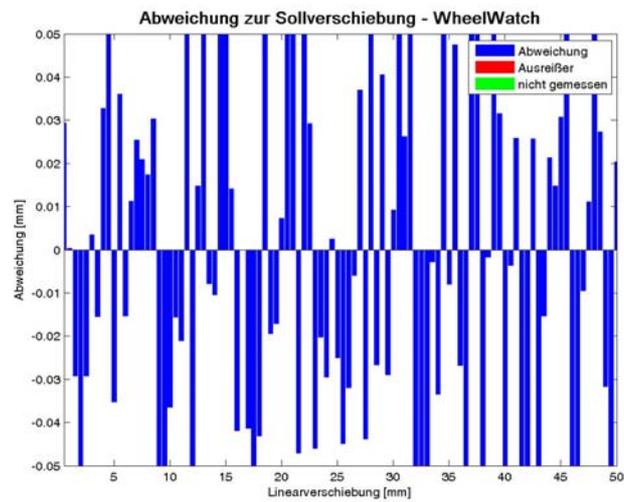


Abbildung 5: Bilder/KrigingWW/KrigingWW5Abb1

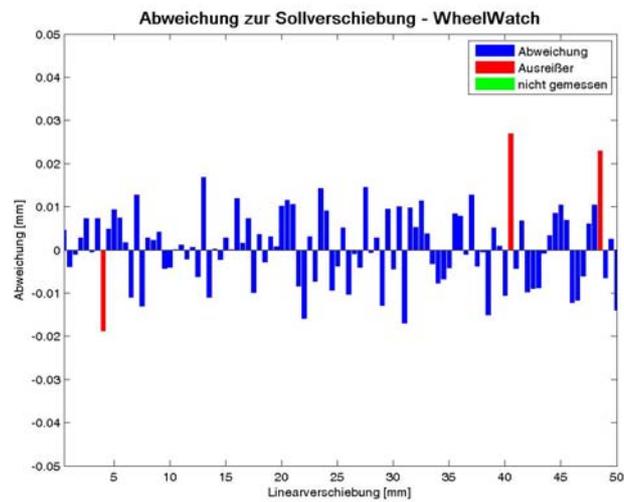


Abbildung 6: Bilder/KrigingWW/KrigingWW6Abb1

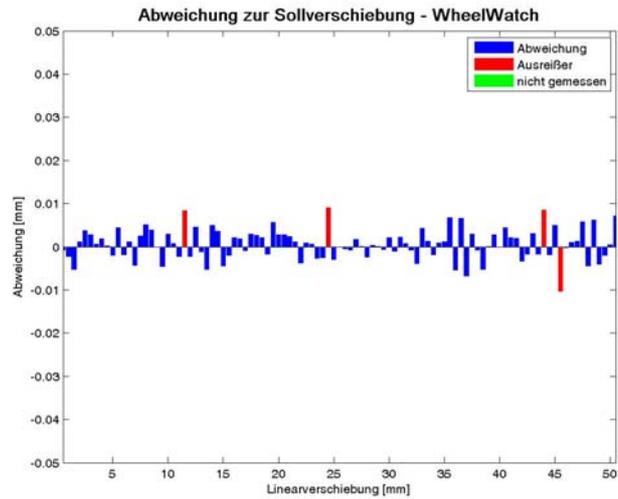


Abbildung 7: Bilder/KrigingWW/KrigingWW7Abb1

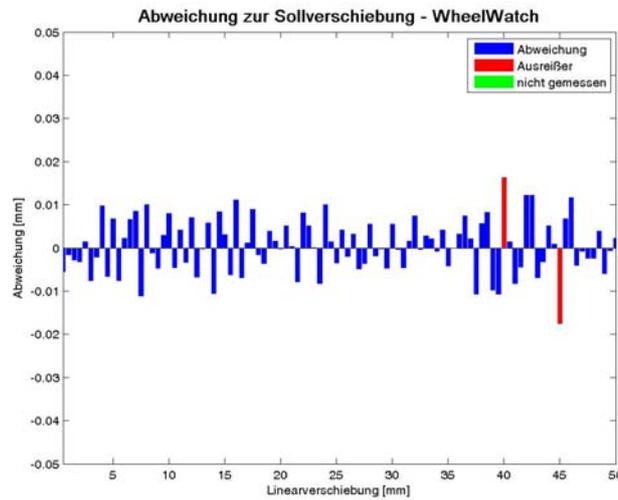


Abbildung 8: Bilder/KrigingWW/KrigingWW8Abb1

Ergebnisse/KrigingWW.tex

Abendroth, zur Mühlen

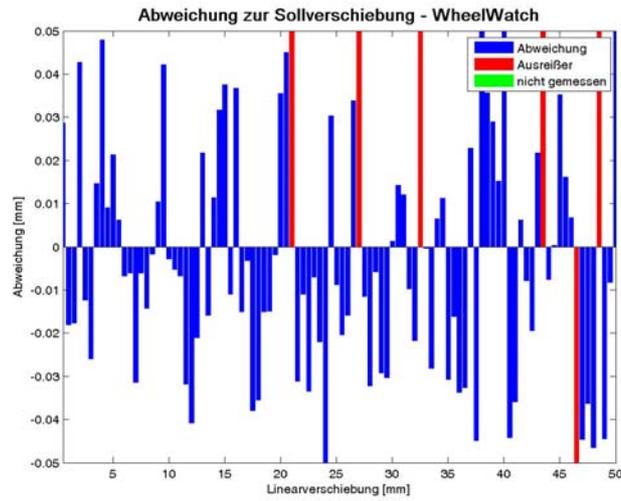


Abbildung 9: Bilder/KrigingWW/KrigingWW9Abb1

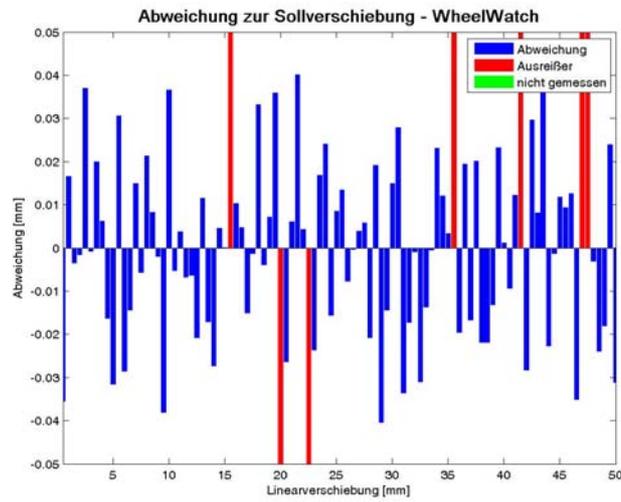


Abbildung 10: Bilder/KrigingWW/KrigingWW10Abb1

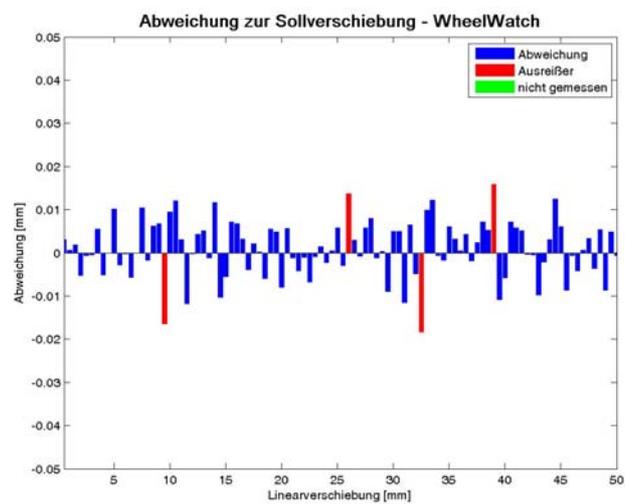


Abbildung 11: Bilder/KrigingWW/KrigingWW11Abb1

Ergebnisse/KrigingWW.tex

Abendroth, zur Mühlen

KrigingWW	v [mm/s]	Bildfrequenz [Hz]	Soll [mm]	Mittelwert [mm]	Median [mm]	Std [mm]	d [mm]
1	NaN	NaN	0.500	0.501	0.501	0.006	NaN
2	NaN	NaN	0.500	0.501	0.501	0.011	NaN
3	NaN	NaN	0.500	0.500	0.501	0.056	NaN
4	NaN	NaN	0.500	0.499	0.498	0.025	NaN
5	NaN	NaN	0.500	0.500	0.497	0.047	NaN
6	NaN	NaN	0.500	0.501	0.501	0.009	NaN
7	NaN	NaN	0.500	0.501	0.501	0.004	NaN
8	NaN	NaN	0.500	0.500	0.500	0.007	NaN
9	NaN	NaN	0.500	0.500	0.493	0.030	NaN
10	NaN	NaN	0.500	0.501	0.500	0.025	NaN
11	NaN	NaN	0.500	0.501	0.501	0.007	NaN

Tabelle 1: Ergebnisse der Messreihe KrigingWW mit dem Messsystem WheelWatch

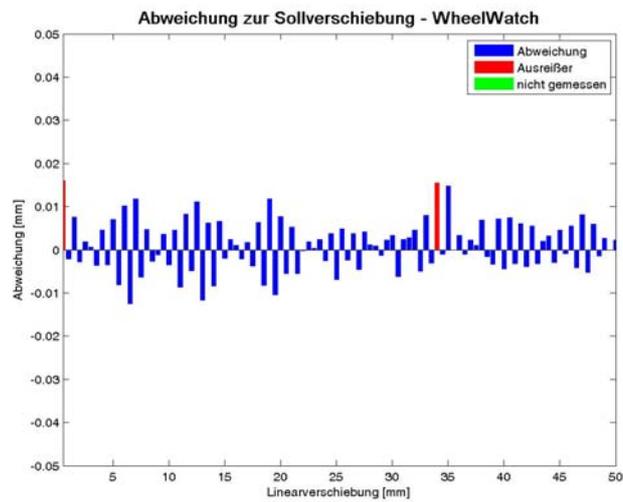


Abbildung 1: Bilder/KrigingWWlr/KrigingWWlr1Abb1

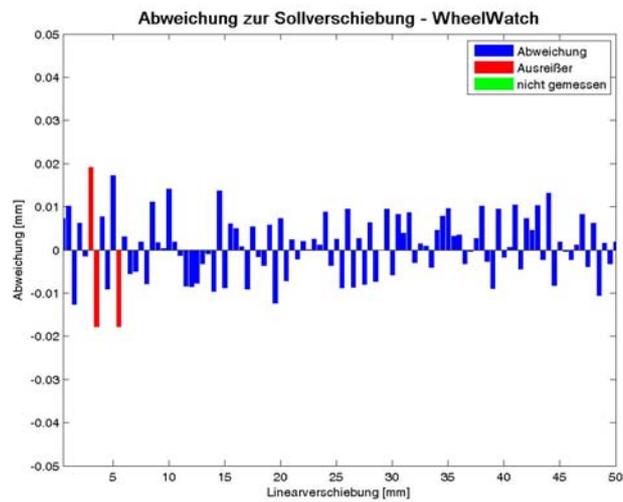


Abbildung 2: Bilder/KrigingWWlr/KrigingWWlr2Abb1

Ergebnisse/KrigingWWlr.tex

Abendroth, zur Mühlen

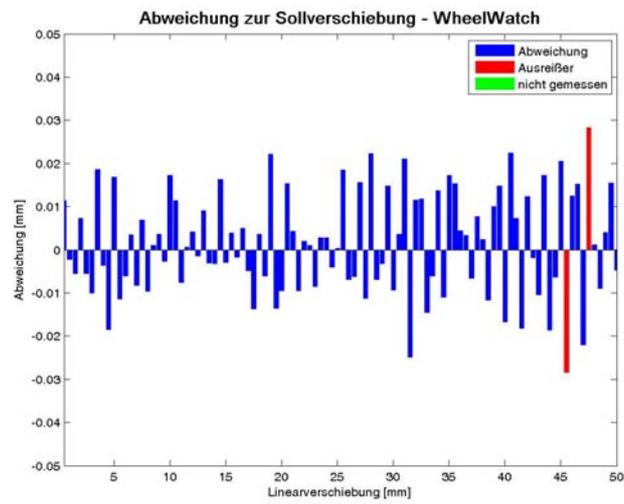


Abbildung 3: Bilder/KrigingWWlr/KrigingWWlr3Abb1

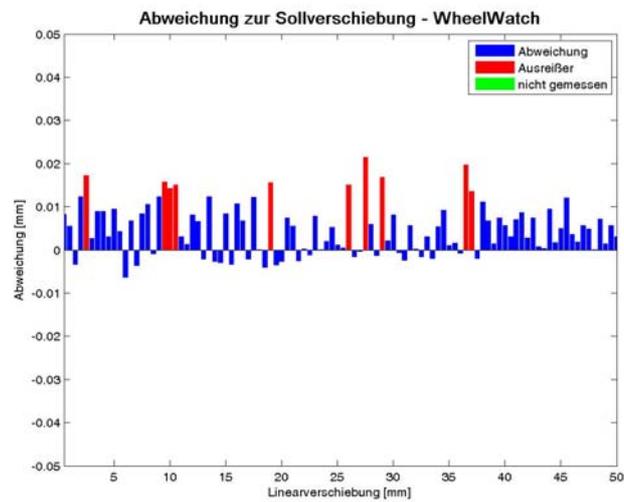


Abbildung 4: Bilder/KrigingWWlr/KrigingWWlr4Abb1

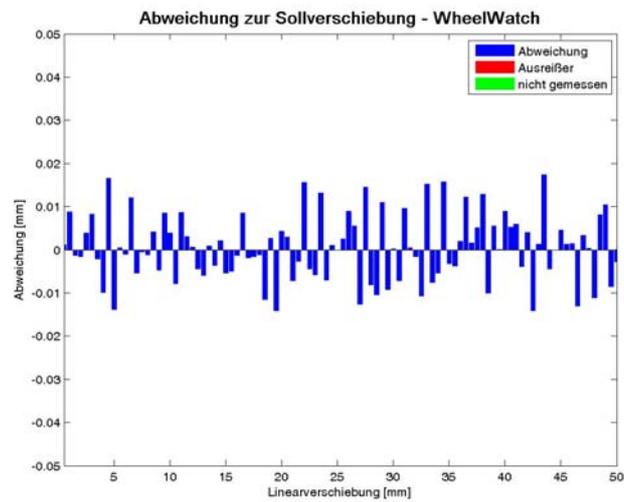


Abbildung 5: Bilder/KrigingWWlr/KrigingWWlr5Abb1

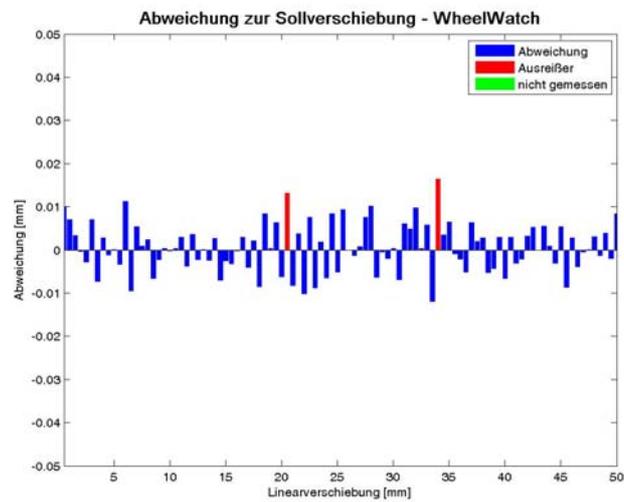


Abbildung 6: Bilder/KrigingWWlr/KrigingWWlr6Abb1

Ergebnisse/KrigingWWlr.tex

Abendroth, zur Mühlen

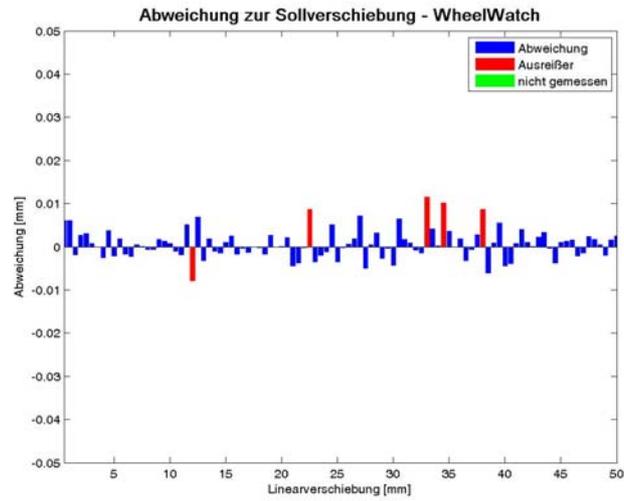


Abbildung 7: Bilder/KrigingWWlr/KrigingWWlr7Abb1

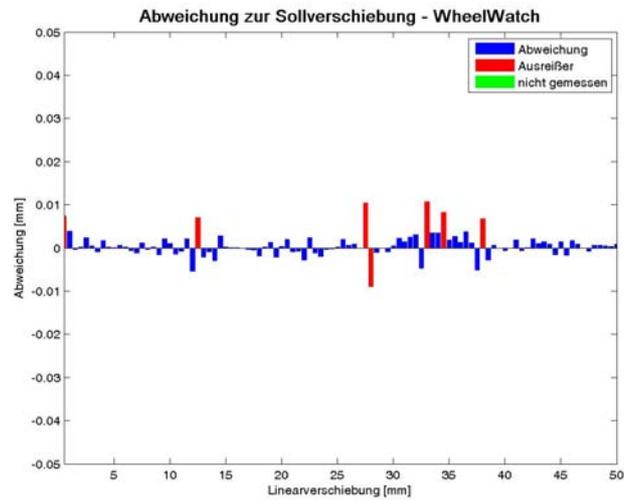


Abbildung 8: Bilder/KrigingWWlr/KrigingWWlr8Abb1

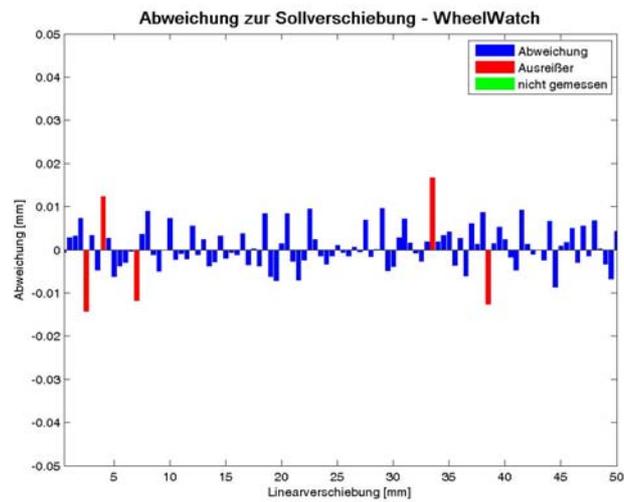


Abbildung 9: Bilder/KrigingWWlr/KrigingWWlr9Abb1

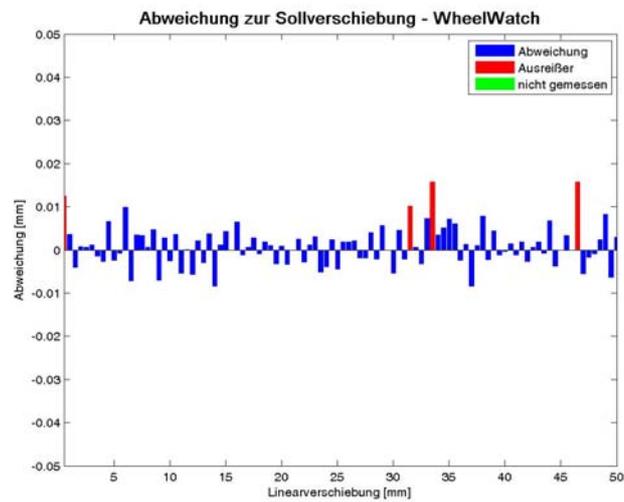


Abbildung 10: Bilder/KrigingWWlr/KrigingWWlr10Abb1

Ergebnisse/KrigingWWlr.tex

Abendroth, zur Mühlen

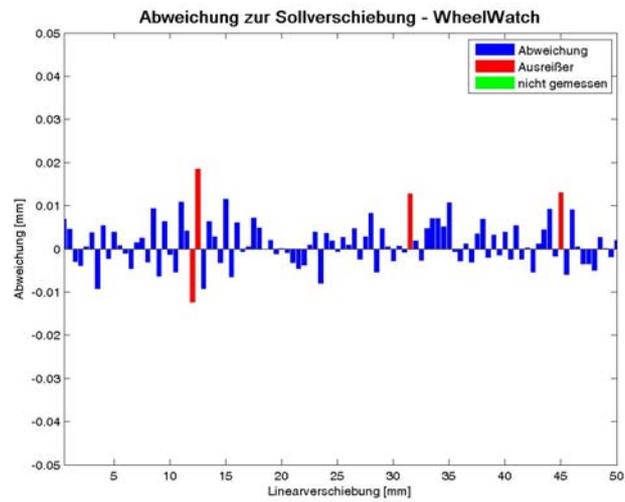


Abbildung 11: Bilder/KrigingWWlr/KrigingWWlr11Abb1

KrigingWWlr	v [mm/s]	Bildfrequenz [Hz]	Soll [mm]	Mittelwert [mm]	Median [mm]	Std [mm]	d [mm]
1	NaN	NaN	0.500	0.501	0.501	0.008	NaN
2	NaN	NaN	0.500	0.501	0.501	0.009	NaN
3	NaN	NaN	0.500	0.501	0.501	0.014	NaN
4	NaN	NaN	0.500	0.505	0.505	0.006	NaN
5	NaN	NaN	0.500	0.500	0.500	0.009	NaN
6	NaN	NaN	0.500	0.501	0.500	0.007	NaN
7	NaN	NaN	0.500	0.501	0.500	0.004	NaN
8	NaN	NaN	0.500	0.501	0.500	0.003	NaN
9	NaN	NaN	0.500	0.500	0.500	0.006	NaN
10	NaN	NaN	0.500	0.501	0.501	0.005	NaN
11	NaN	NaN	0.500	0.501	0.501	0.006	NaN

Tabelle 1: Ergebnisse der Messreihe KrigingWWlr mit dem Messsystem WheelWatch

Ergebnisse/Kriging16MI.tex

Abendroth, zur Mühlen

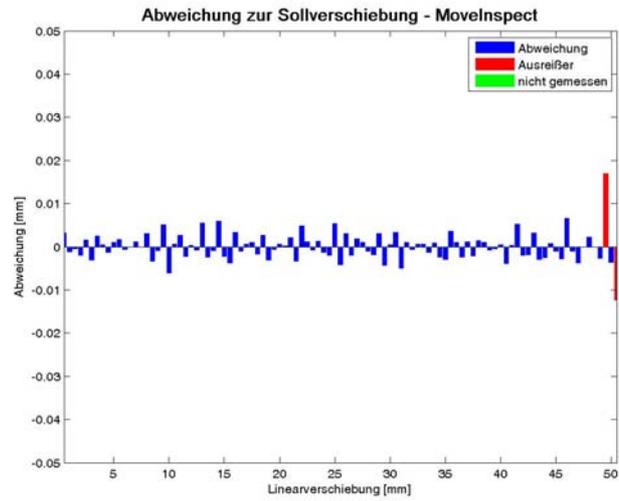


Abbildung 1: Bilder/Kriging16MI/Kriging16MI1Abb1

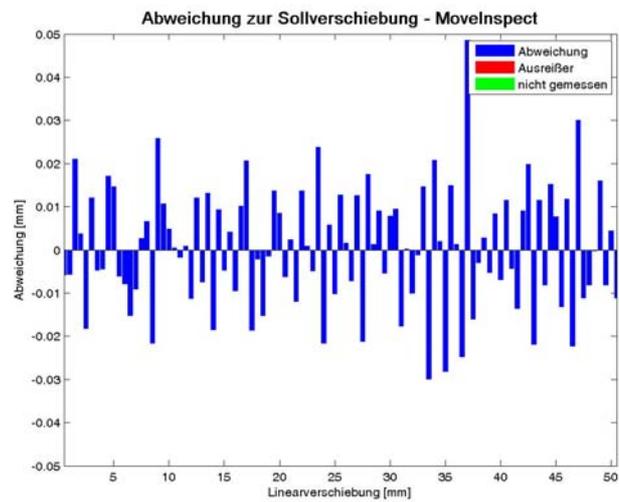


Abbildung 2: Bilder/Kriging16MI/Kriging16MI2Abb1

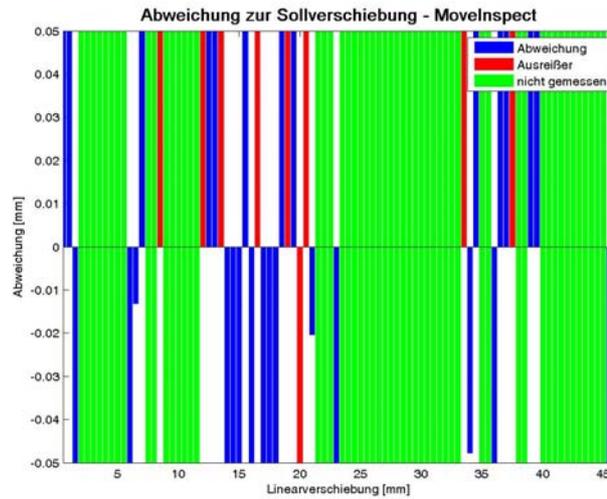


Abbildung 3: Bilder/Kriging16MI/Kriging16MI3Abb1

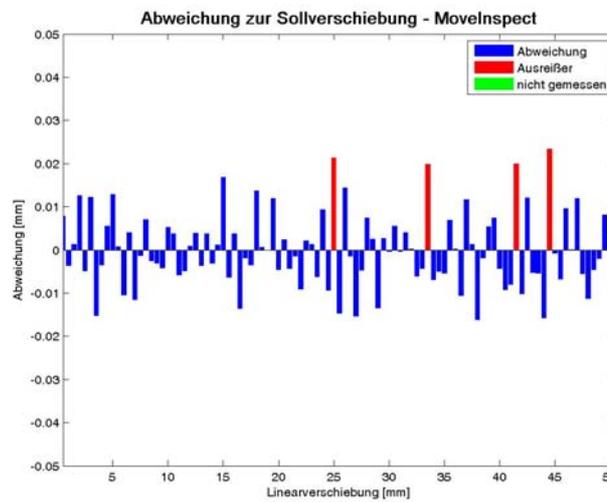


Abbildung 4: Bilder/Kriging16MI/Kriging16MI4Abb1

Ergebnisse/Kriging16MI.tex

Abendroth, zur Mühlen

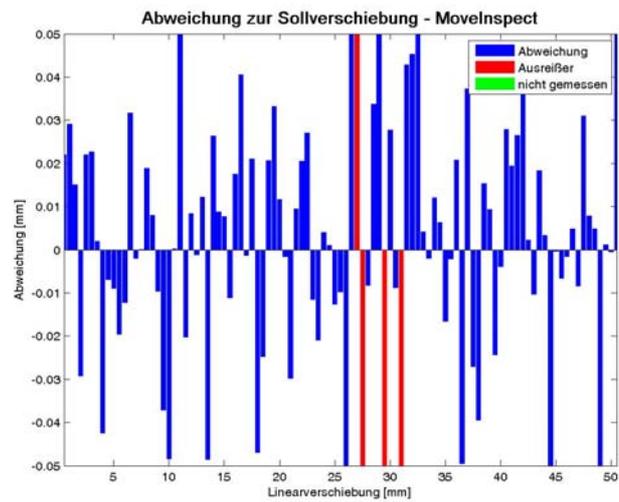


Abbildung 5: Bilder/Kriging16MI/Kriging16MI5Abb1

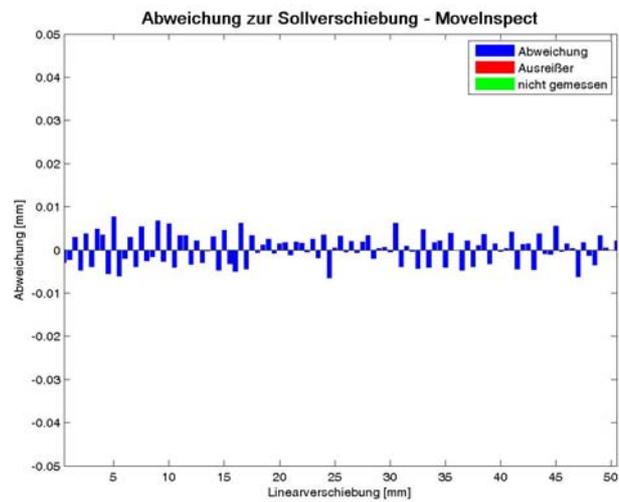


Abbildung 6: Bilder/Kriging16MI/Kriging16MI6Abb1

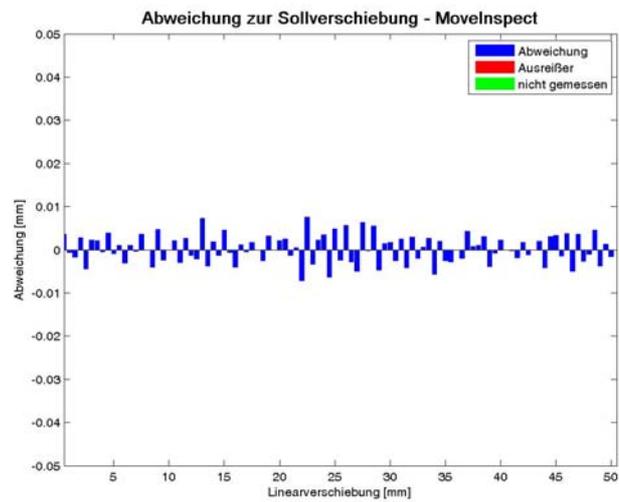


Abbildung 7: Bilder/Kriging16MI/Kriging16MI7Abb1

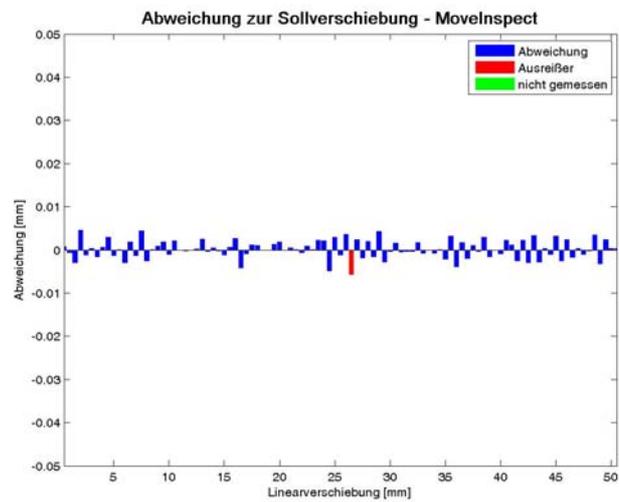


Abbildung 8: Bilder/Kriging16MI/Kriging16MI8Abb1

Ergebnisse/Kriging16MI.tex

Abendroth, zur Mühlen

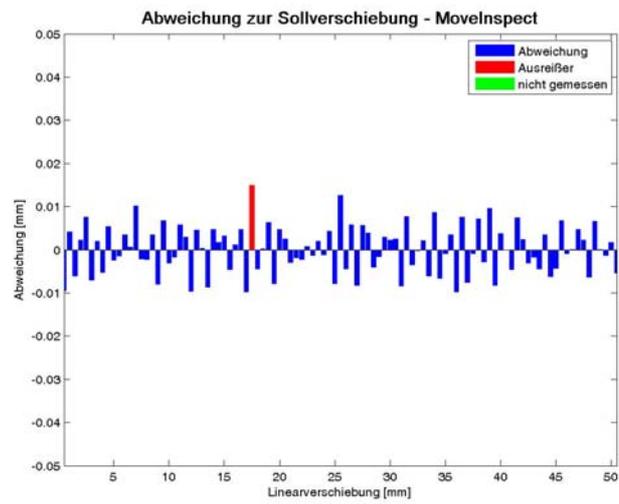


Abbildung 9: Bilder/Kriging16MI/Kriging16MI9Abb1

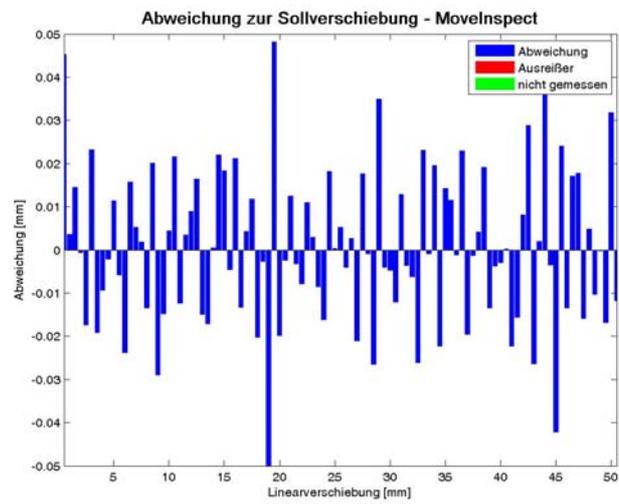


Abbildung 10: Bilder/Kriging16MI/Kriging16MI10Abb1

Ergebnisse/Kriging16MI.tex

Abendroth, zur Mühlen

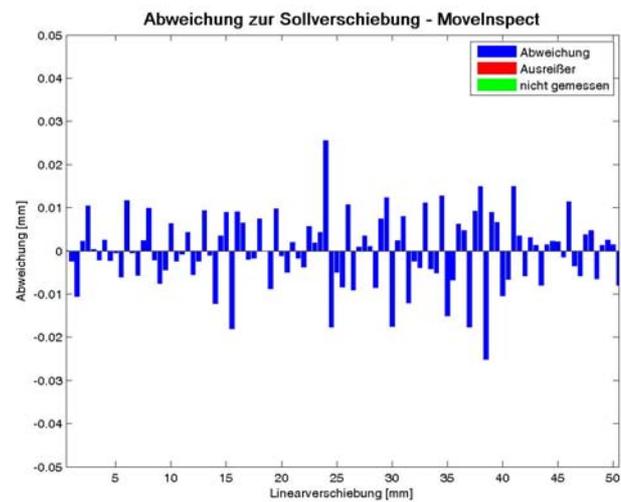


Abbildung 11: Bilder/Kriging16MI/Kriging16MI11Abb1

Ergebnisse/Kriging16MI.tex

Abendroth, zur Mühlen

Kriging16MI	v [mm/s]	Bildfrequenz [Hz]	Soll [mm]	Mittelwert [mm]	Median [mm]	Std [mm]	d [mm]
1	NaN	NaN	0.500	0.500	0.500	0.004	NaN
2	NaN	NaN	0.500	0.500	0.500	0.017	NaN
3	NaN	NaN	0.500	0.610	0.596	0.241	NaN
4	NaN	NaN	0.500	0.500	0.499	0.010	NaN
5	NaN	NaN	0.500	0.501	0.502	0.038	NaN
6	NaN	NaN	0.500	0.500	0.500	0.004	NaN
7	NaN	NaN	0.500	0.500	0.500	0.004	NaN
8	NaN	NaN	0.500	0.500	0.500	0.003	NaN
9	NaN	NaN	0.500	0.500	0.500	0.007	NaN
10	NaN	NaN	0.500	0.500	0.499	0.021	NaN
11	NaN	NaN	0.500	0.500	0.500	0.010	NaN

Tabelle 1: Ergebnisse der Messreihe Kriging16MI mit dem Messsystem MoveInspect

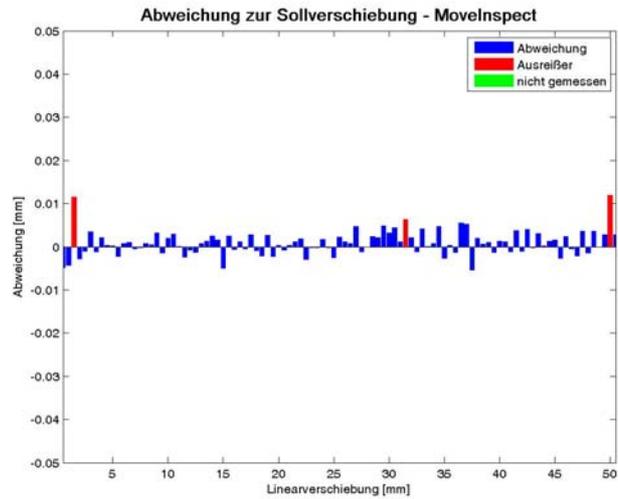


Abbildung 1: Bilder/KrigingMlrl/KrigingMlrl1Abb1

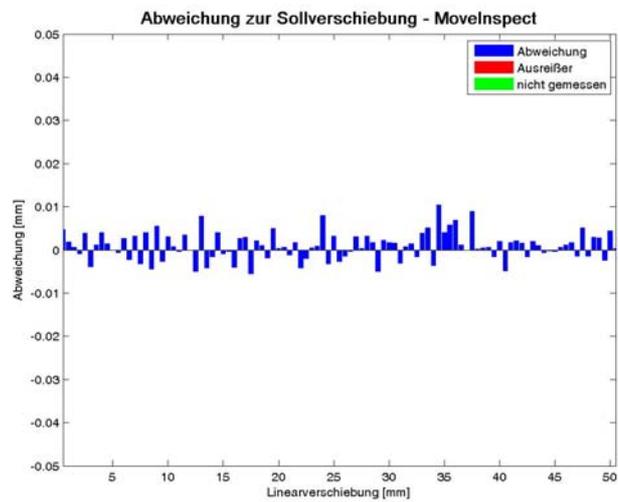


Abbildung 2: Bilder/KrigingMlrl/KrigingMlrl2Abb1

Ergebnisse/KrigingMlrl.tex

Abendroth, zur Mühlen

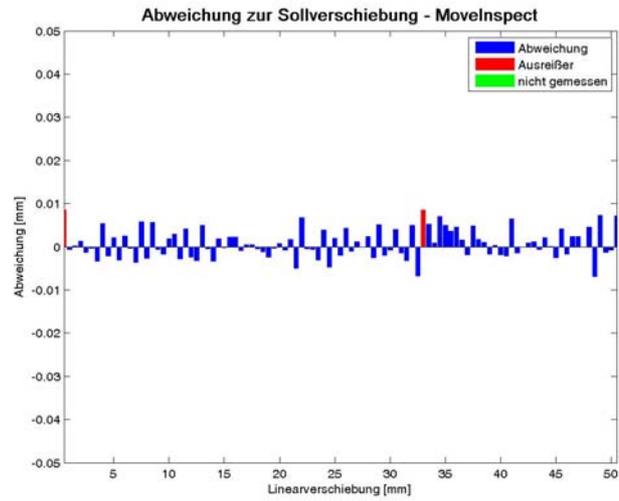


Abbildung 3: Bilder/KrigingMlrl/KrigingMlrl3Abb1

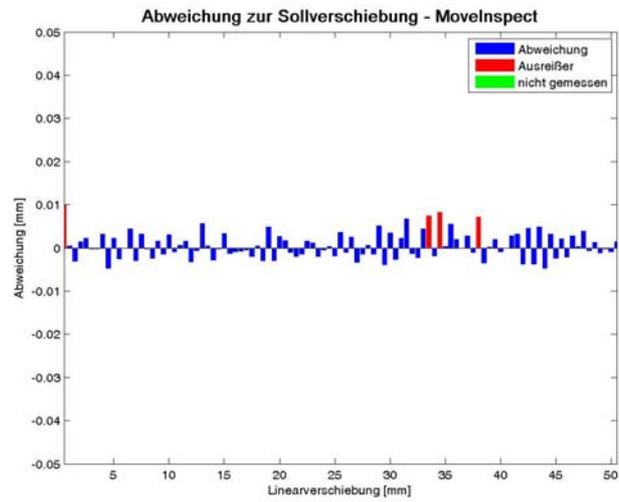


Abbildung 4: Bilder/KrigingMlrl/KrigingMlrl4Abb1

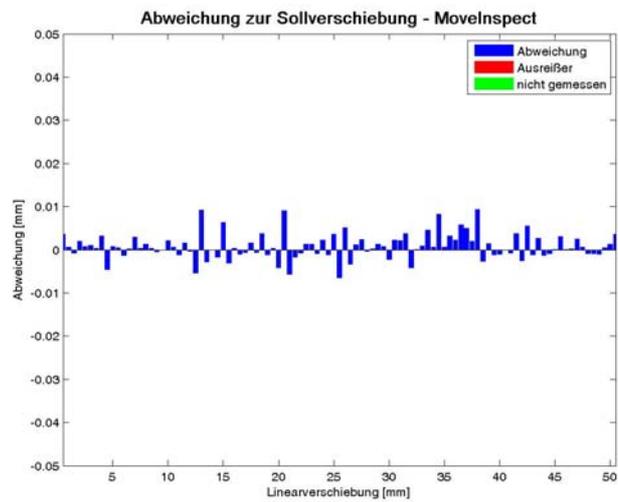


Abbildung 5: Bilder/KrigingMlrl/KrigingMlrl5Abb1

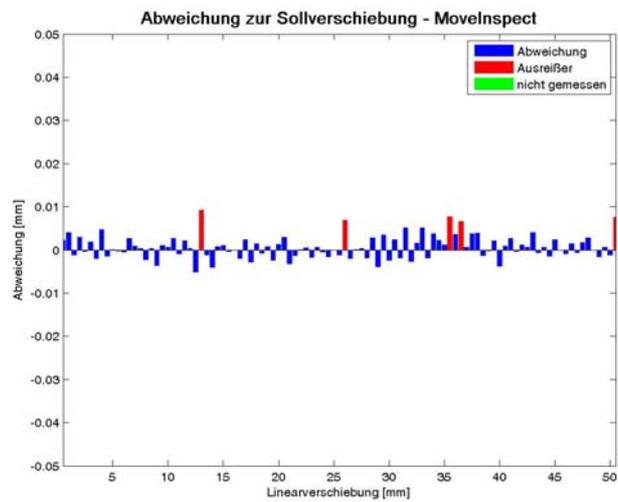


Abbildung 6: Bilder/KrigingMlrl/KrigingMlrl6Abb1

Ergebnisse/KrigingMIrl.tex

Abendroth, zur Mühlen

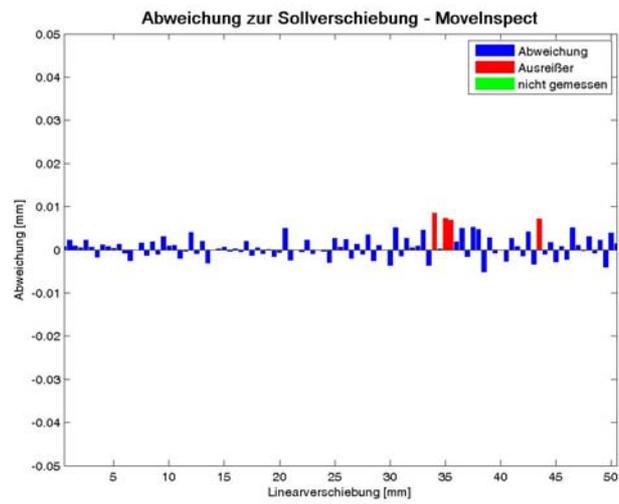


Abbildung 7: Bilder/KrigingMIrl/KrigingMIrl7Abb1

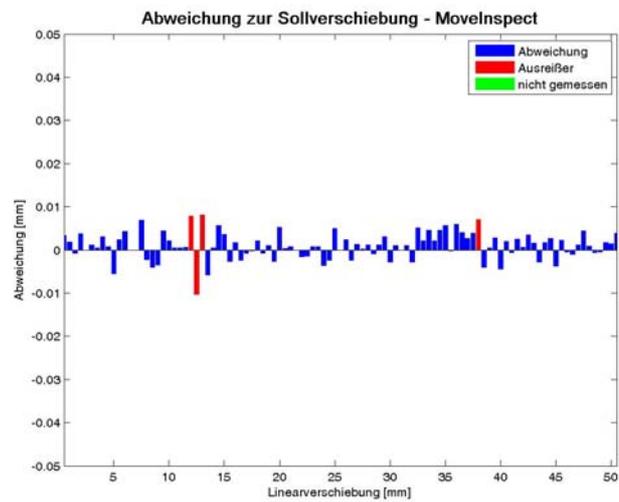


Abbildung 8: Bilder/KrigingMIrl/KrigingMIrl8Abb1

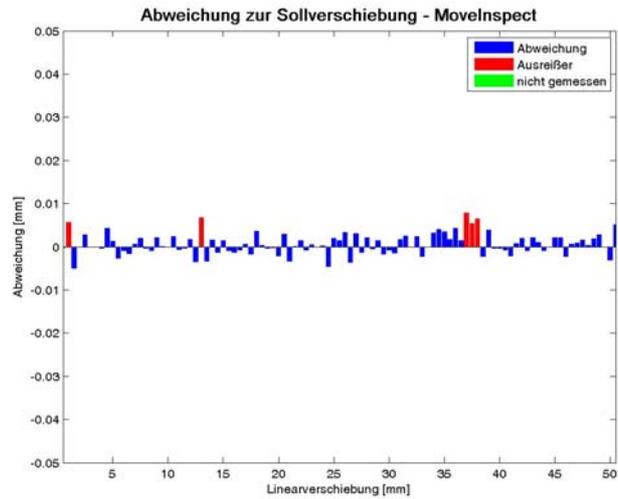


Abbildung 9: Bilder/KrigingMlrl/KrigingMlrl9Abb1

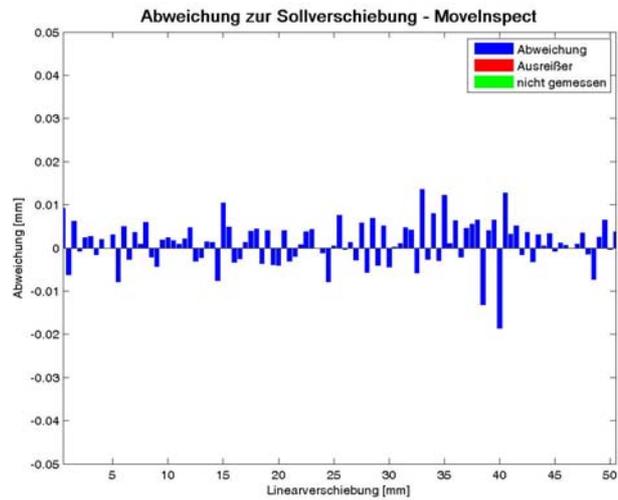


Abbildung 10: Bilder/KrigingMlrl/KrigingMlrl10Abb1

Ergebnisse/KrigingMlrl.tex

Abendroth, zur Mühlen

KrigingMlrl	v [mm/s]	Bildfrequenz [Hz]	Soll [mm]	Mittelwert [mm]	Median [mm]	Std [mm]	d [mm]
1	NaN	NaN	0.500	0.501	0.501	0.003	NaN
2	NaN	NaN	0.500	0.501	0.501	0.004	NaN
3	NaN	NaN	0.500	0.501	0.500	0.004	NaN
4	NaN	NaN	0.500	0.501	0.500	0.004	NaN
5	NaN	NaN	0.500	0.501	0.500	0.003	NaN
6	NaN	NaN	0.500	0.501	0.500	0.003	NaN
7	NaN	NaN	0.500	0.501	0.500	0.003	NaN
8	NaN	NaN	0.500	0.501	0.501	0.004	NaN
9	NaN	NaN	0.500	0.501	0.500	0.003	NaN
10	NaN	NaN	0.500	0.501	0.501	0.006	NaN

Tabelle 1: Ergebnisse der Messreihe KrigingMlrl mit dem Messsystem MoveInspect

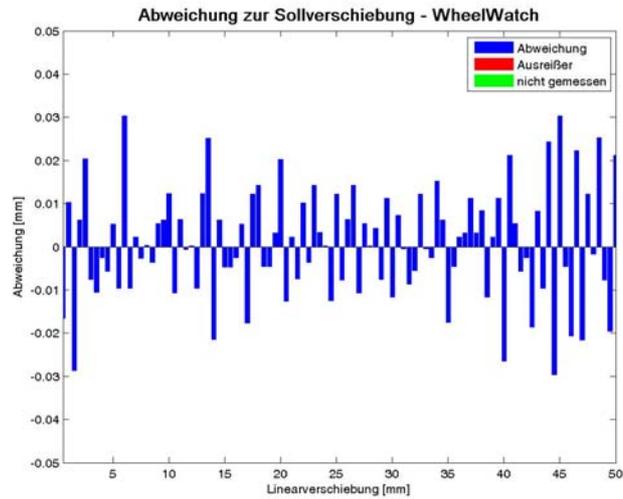


Abbildung 1: Bilder/KrigingWWEinzel/KrigingWWEinzel1Abb1

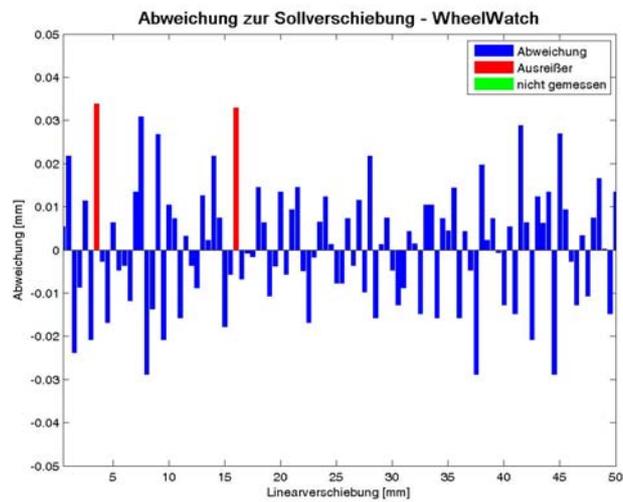


Abbildung 2: Bilder/KrigingWWEinzel/KrigingWWEinzel2Abb1

Ergebnisse/KrigingWWEinzel.tex

Abendroth, zur Mühlen

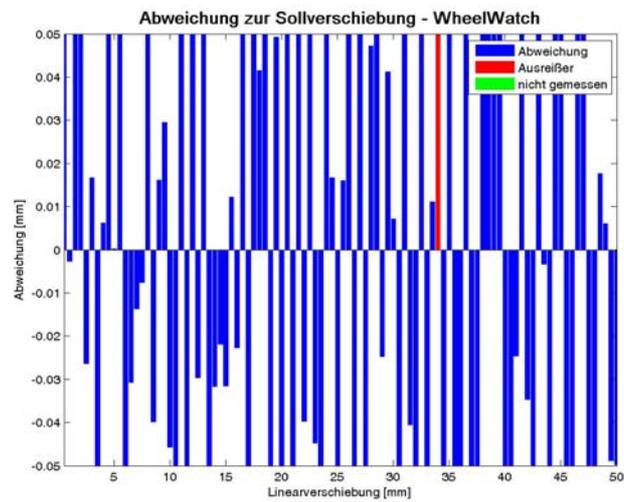


Abbildung 3: Bilder/KrigingWWEinzel/KrigingWWEinzel3Abb1

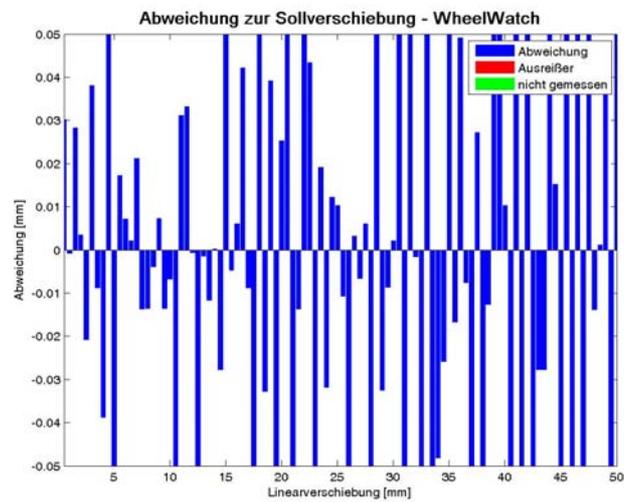


Abbildung 4: Bilder/KrigingWWEinzel/KrigingWWEinzel4Abb1

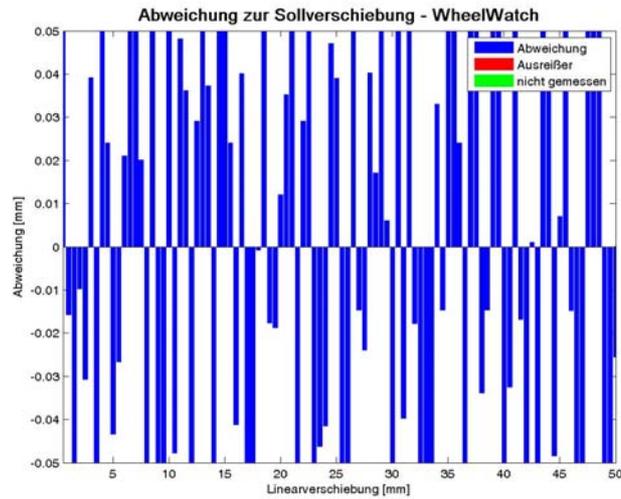


Abbildung 5: Bilder/KrigingWWEinzel/KrigingWWEinzel5Abb1

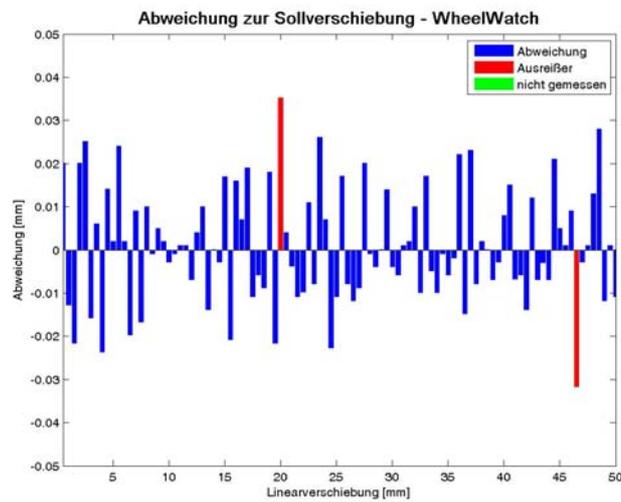


Abbildung 6: Bilder/KrigingWWEinzel/KrigingWWEinzel6Abb1

Ergebnisse/KrigingWWEinzel.tex

Abendroth, zur Mühlen

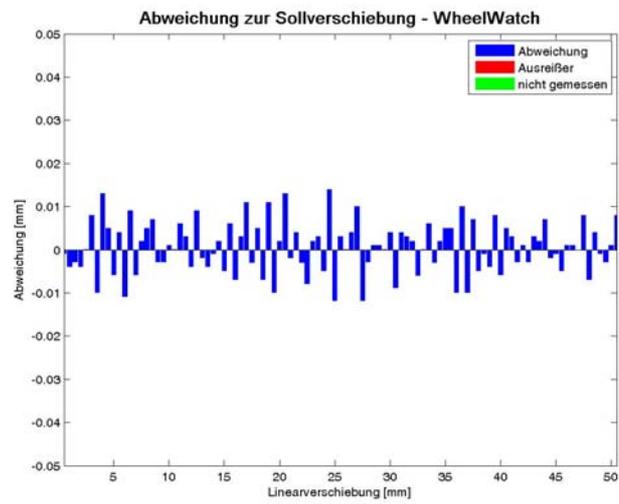


Abbildung 7: Bilder/KrigingWWEinzel/KrigingWWEinzel7Abb1

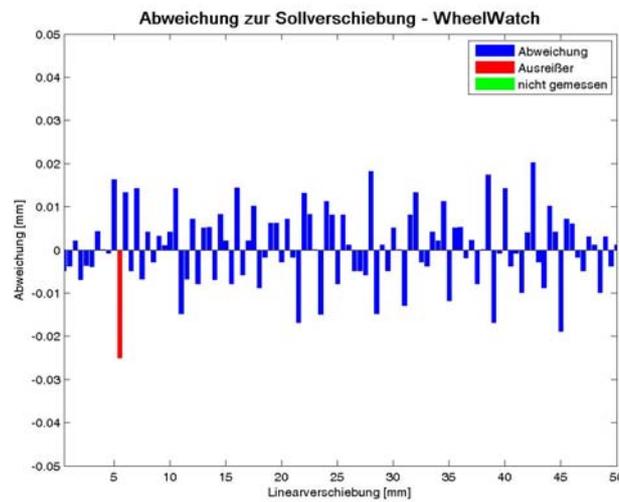


Abbildung 8: Bilder/KrigingWWEinzel/KrigingWWEinzel8Abb1

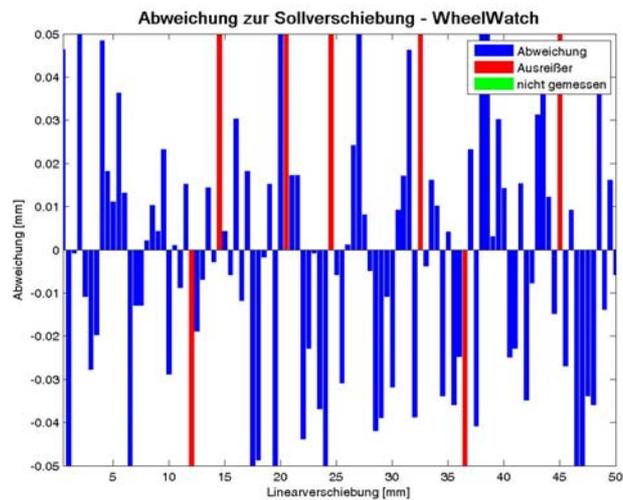


Abbildung 9: Bilder/KrigingWWEinzel/KrigingWWEinzel9Abb1

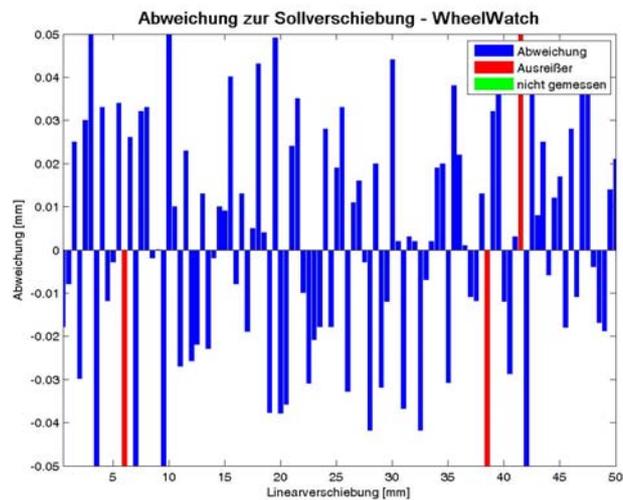


Abbildung 10: Bilder/KrigingWWEinzel/KrigingWWEinzel10Abb1

Ergebnisse/KrigingWWEinzel.tex

Abendroth, zur Mühlen

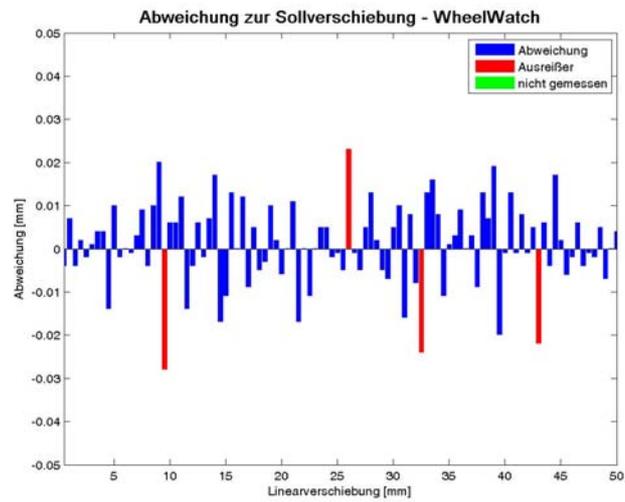


Abbildung 11: Bilder/KrigingWWEinzel/KrigingWWEinzel11Abb1

KrigingWWEinzel	v [mm/s]	Bildfrequenz [Hz]	Soll [mm]	Mittelwert [mm]	Median [mm]	Std [mm]	d [mm]
1	NaN	NaN	0.500	0.501	0.500	0.016	NaN
2	NaN	NaN	0.500	0.501	0.501	0.016	NaN
3	NaN	NaN	0.500	0.500	0.499	0.101	NaN
4	NaN	NaN	0.500	0.500	0.499	0.070	NaN
5	NaN	NaN	0.500	0.500	0.504	0.073	NaN
6	NaN	NaN	0.500	0.501	0.500	0.015	NaN
7	NaN	NaN	0.500	0.500	0.501	0.007	NaN
8	NaN	NaN	0.500	0.500	0.501	0.010	NaN
9	NaN	NaN	0.500	0.500	0.499	0.036	NaN
10	NaN	NaN	0.500	0.502	0.502	0.035	NaN
11	NaN	NaN	0.500	0.501	0.501	0.011	NaN

Tabelle 1: Ergebnisse der Messreihe KrigingWW mit dem Messsystem WheelWatch

Ergebnisse/KrigingWWlrEinzel.tex

Abendroth, zur Mühlen

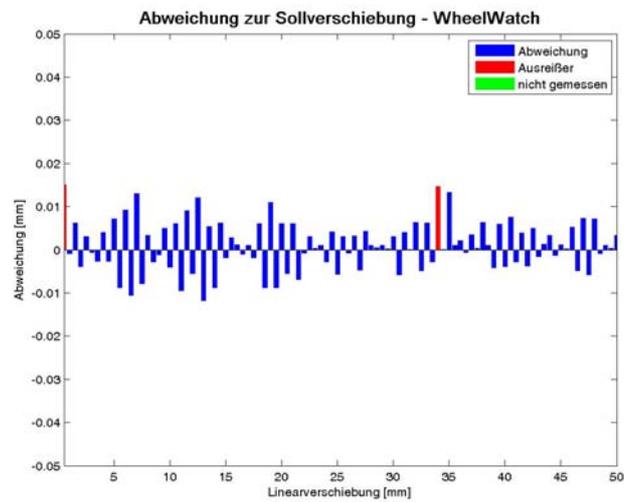


Abbildung 1: Bilder/KrigingWWlrEinzel/KrigingWWlrEinzel1Abb1

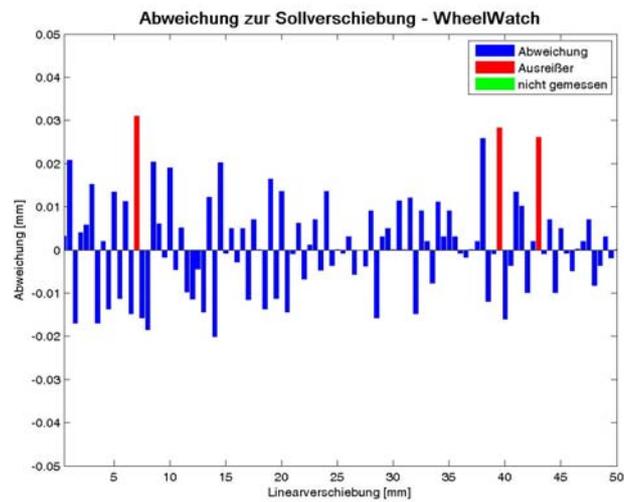


Abbildung 2: Bilder/KrigingWWlrEinzel/KrigingWWlrEinzel2Abb1

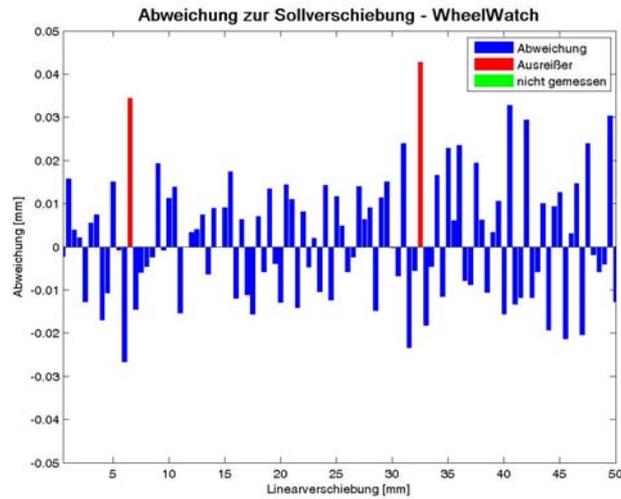


Abbildung 3: Bilder/KrigingWWlrEinzel/KrigingWWlrEinzel3Abb1

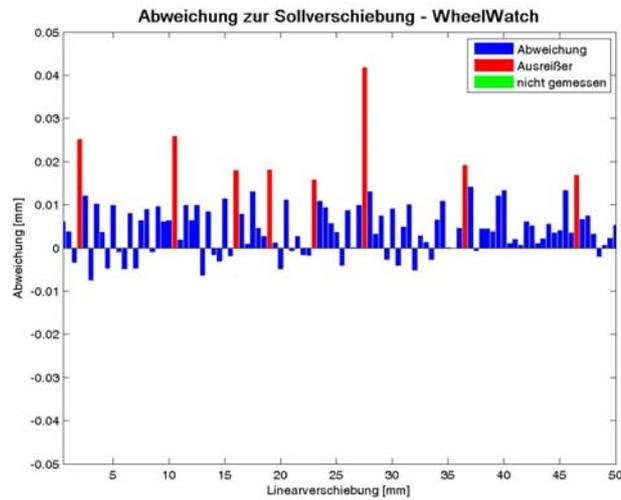


Abbildung 4: Bilder/KrigingWWlrEinzel/KrigingWWlrEinzel4Abb1

Ergebnisse/KrigingWWlrEinzel.tex

Abendroth, zur Mühlen

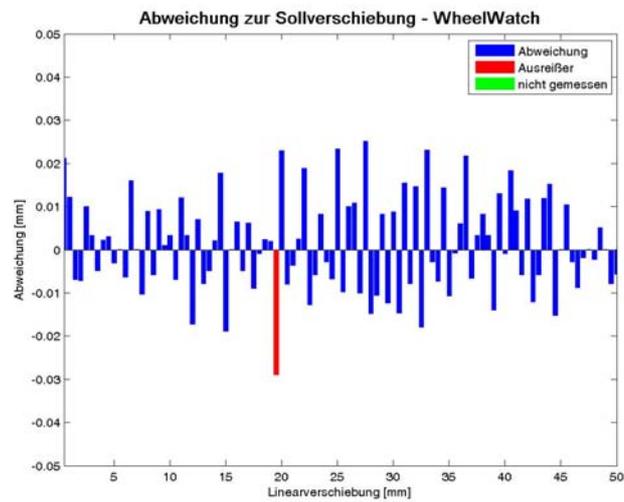


Abbildung 5: Bilder/KrigingWWlrEinzel/KrigingWWlrEinzel5Abb1

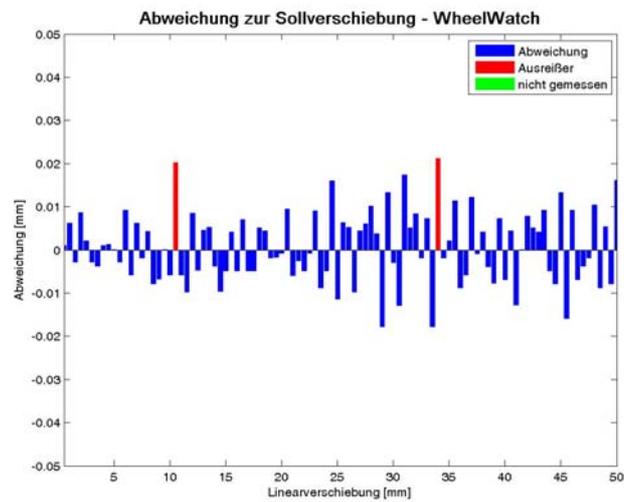


Abbildung 6: Bilder/KrigingWWlrEinzel/KrigingWWlrEinzel6Abb1

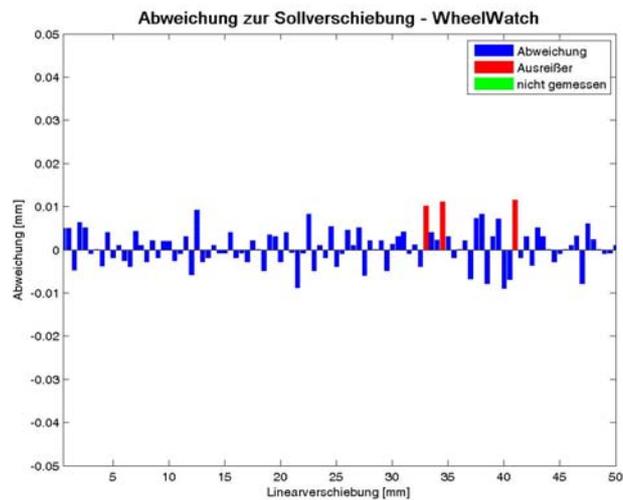


Abbildung 7: Bilder/KrigingWWlrEinzel/KrigingWWlrEinzel7Abb1

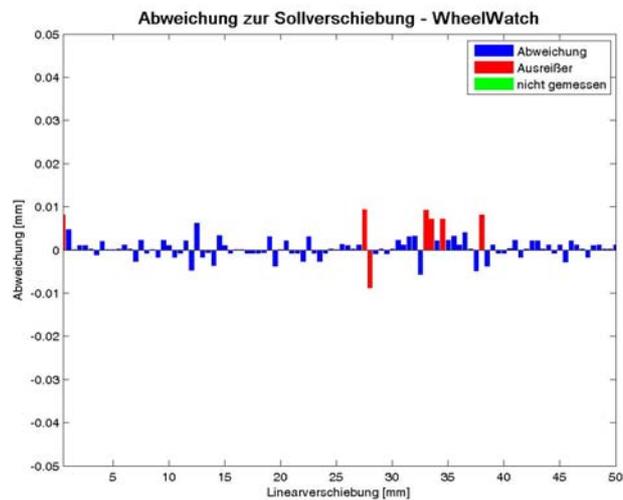


Abbildung 8: Bilder/KrigingWWlrEinzel/KrigingWWlrEinzel8Abb1

Ergebnisse/KrigingWWlrEinzel.tex

Abendroth, zur Mühlen

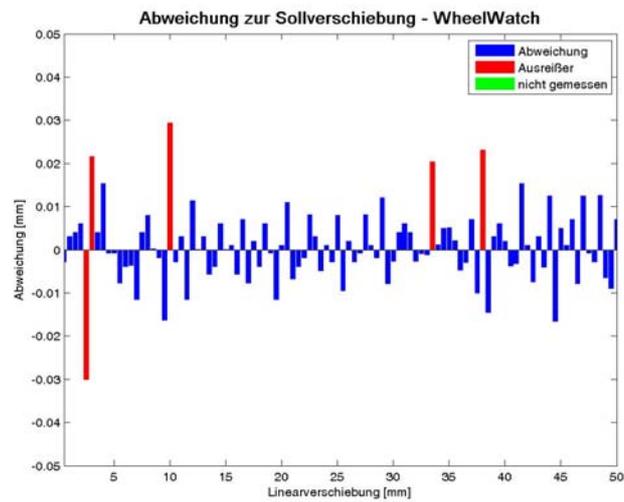


Abbildung 9: Bilder/KrigingWWlrEinzel/KrigingWWlrEinzel9Abb1

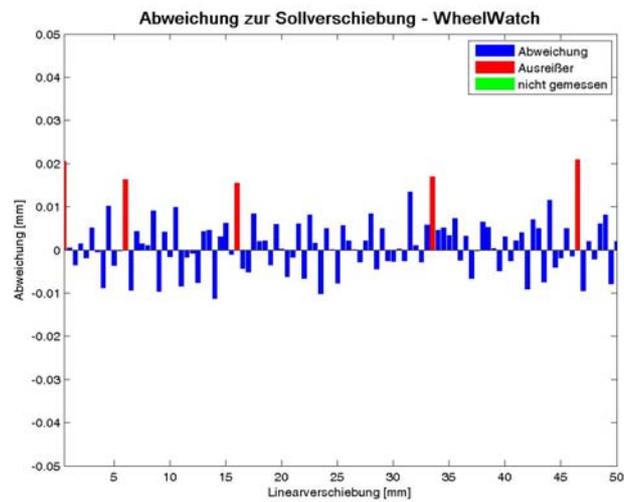


Abbildung 10: Bilder/KrigingWWlrEinzel/KrigingWWlrEinzel10Abb1

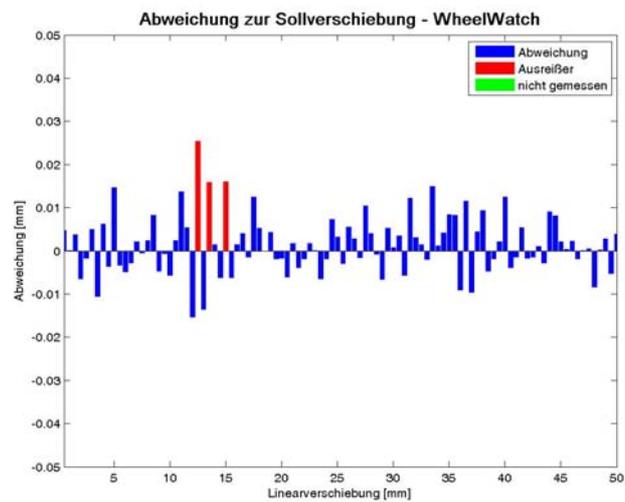


Abbildung 11: Bilder/KrigingWWlrEinzel/KrigingWWlrEinzel11Abb1

Ergebnisse/KrigingWWlrEinzel.tex

Abendroth, zur Mühlen

KrigingWWlrEinzel	v [mm/s]	Bildfrequenz [Hz]	Soll [mm]	Mittelwert [mm]	Median [mm]	Std [mm]	d [mm]
1	NaN	NaN	0.500	0.501	0.501	0.007	NaN
2	NaN	NaN	0.500	0.501	0.500	0.013	NaN
3	NaN	NaN	0.500	0.502	0.501	0.017	NaN
4	NaN	NaN	0.500	0.505	0.505	0.008	NaN
5	NaN	NaN	0.500	0.501	0.500	0.013	NaN
6	NaN	NaN	0.500	0.501	0.500	0.010	NaN
7	NaN	NaN	0.500	0.501	0.501	0.005	NaN
8	NaN	NaN	0.500	0.501	0.500	0.003	NaN
9	NaN	NaN	0.500	0.501	0.501	0.010	NaN
10	NaN	NaN	0.500	0.501	0.501	0.008	NaN
11	NaN	NaN	0.500	0.501	0.501	0.008	NaN

Tabelle 1: Ergebnisse der Messreihe KrigingWWlr mit dem Messsystem WheelWatch

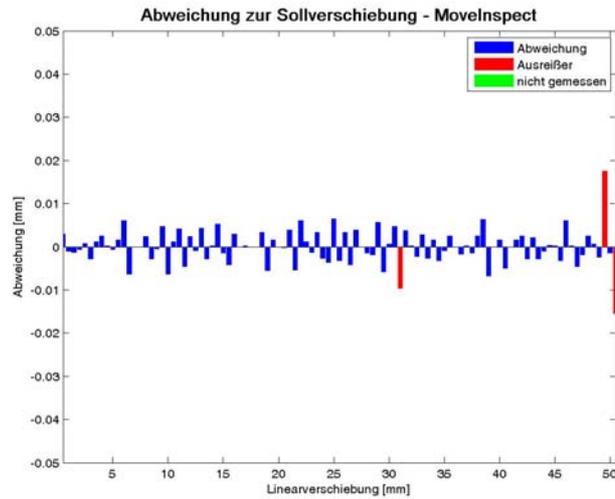


Abbildung 1: Bilder/Kriging16MIEinzel/Kriging16MIEinzel1Abb1

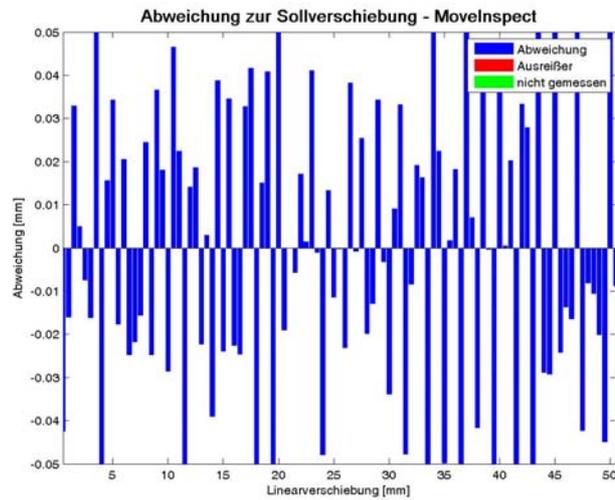


Abbildung 2: Bilder/Kriging16MIEinzel/Kriging16MIEinzel2Abb1

Ergebnisse/Kriging16MIEinzel.tex

Abendroth, zur Mühlen

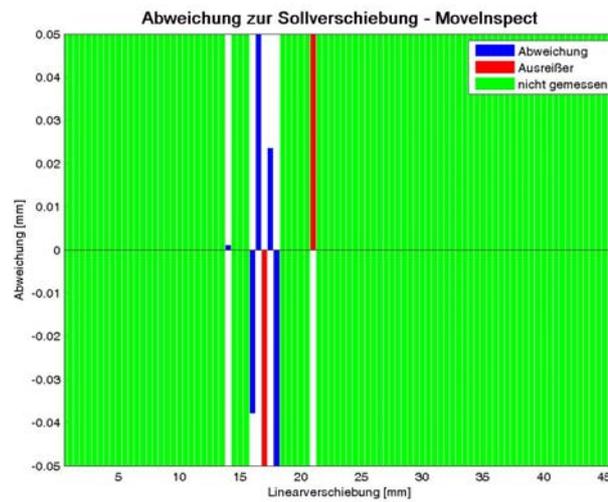


Abbildung 3: Bilder/Kriging16MIEinzel/Kriging16MIEinzel3Abb1

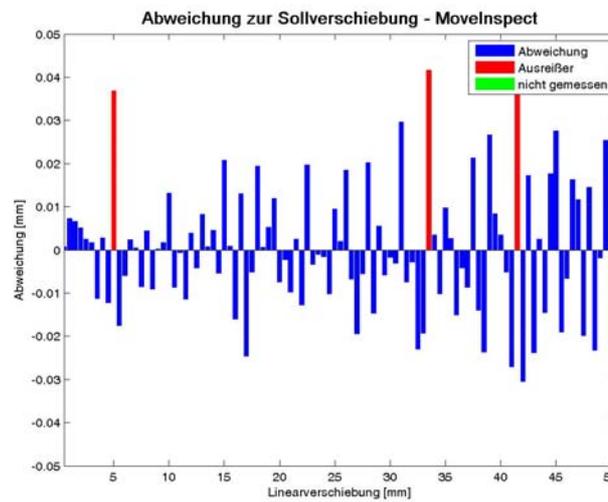


Abbildung 4: Bilder/Kriging16MIEinzel/Kriging16MIEinzel4Abb1

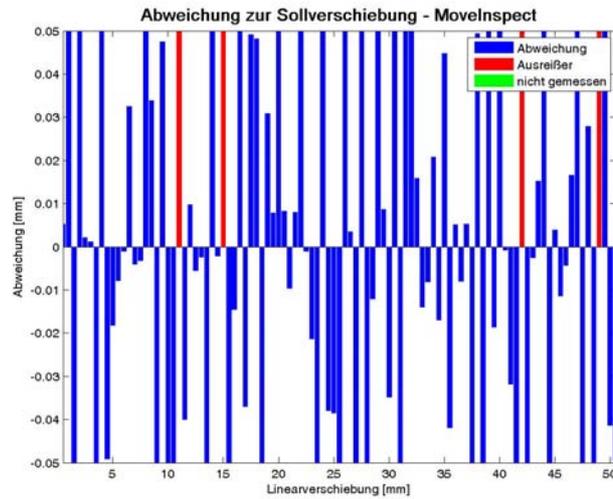


Abbildung 5: Bilder/Kriging16MIEinzel/Kriging16MIEinzel5Abb1

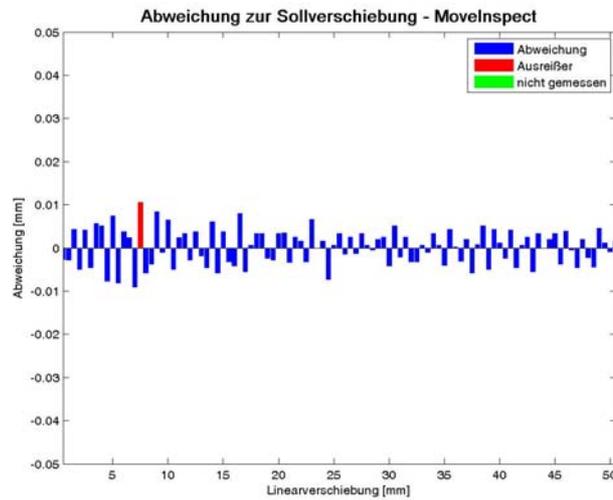


Abbildung 6: Bilder/Kriging16MIEinzel/Kriging16MIEinzel6Abb1

Ergebnisse/Kriging16MIEinzel.tex

Abendroth, zur Mühlen

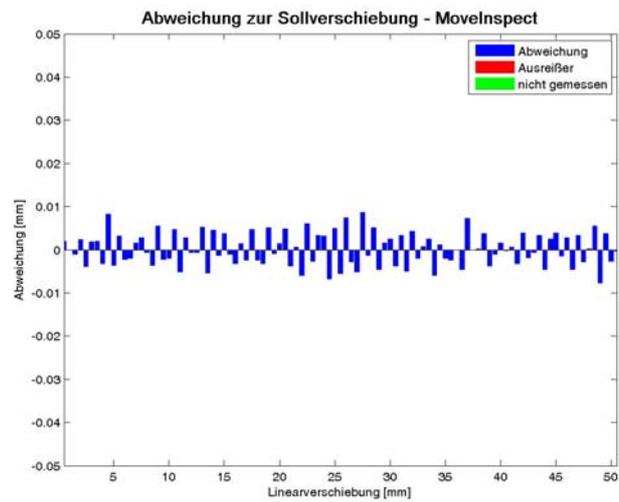


Abbildung 7: Bilder/Kriging16MIEinzel/Kriging16MIEinzel7Abb1

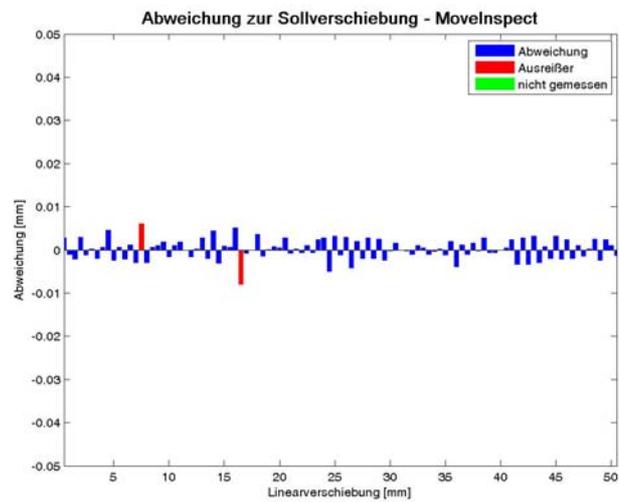


Abbildung 8: Bilder/Kriging16MIEinzel/Kriging16MIEinzel8Abb1

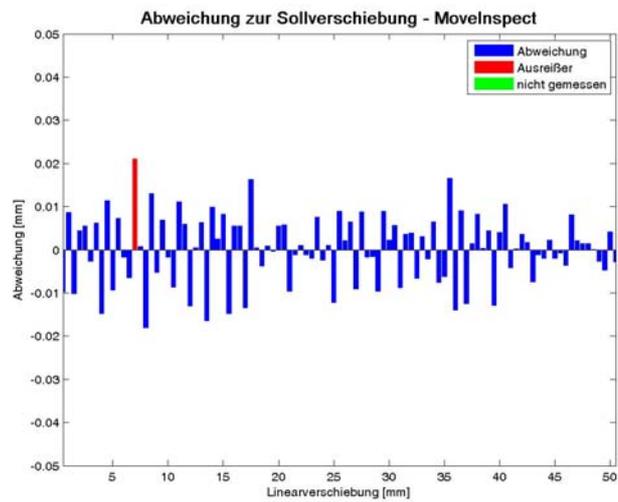


Abbildung 9: Bilder/Kriging16MIEinzel/Kriging16MIEinzel9Abb1

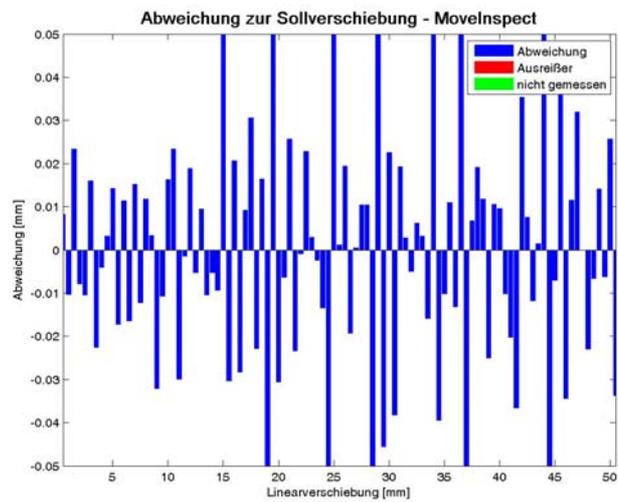


Abbildung 10: Bilder/Kriging16MIEinzel/Kriging16MIEinzel10Abb1

Ergebnisse/Kriging16MIEinzel.tex

Abendroth, zur Mühlen

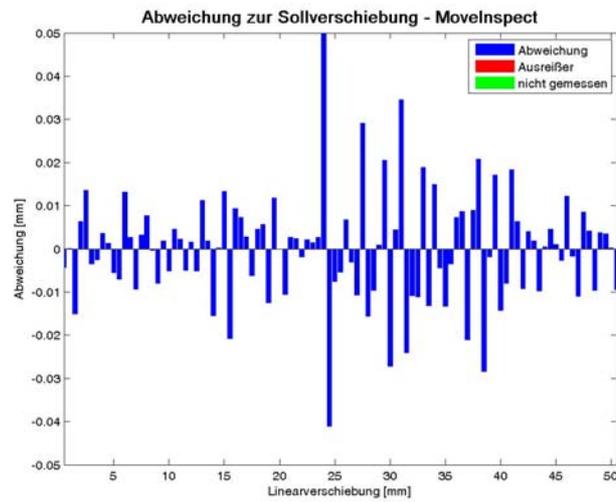


Abbildung 11: Bilder/Kriging16MIEinzel/Kriging16MIEinzel11Abb1

Kriging16MIEinzel	v [mm/s]	Bildfrequenz [Hz]	Soll [mm]	Mittelwert [mm]	Median [mm]	Std [mm]	d [mm]
1	NaN	NaN	0.500	0.500	0.500	0.005	NaN
2	NaN	NaN	0.500	0.500	0.499	0.044	NaN
3	NaN	NaN	0.500	0.503	0.501	0.059	NaN
4	NaN	NaN	0.500	0.500	0.500	0.018	NaN
5	NaN	NaN	0.500	0.502	0.499	0.099	NaN
6	NaN	NaN	0.500	0.500	0.501	0.005	NaN
7	NaN	NaN	0.500	0.500	0.500	0.005	NaN
8	NaN	NaN	0.500	0.500	0.500	0.003	NaN
9	NaN	NaN	0.500	0.500	0.501	0.010	NaN
10	NaN	NaN	0.500	0.500	0.500	0.035	NaN
11	NaN	NaN	0.500	0.500	0.501	0.015	NaN

Tabelle 1: Ergebnisse der Messreihe Kriging16MI mit dem Messsystem MoveInspect

Ergebnisse/KrigingMlrlEinzel.tex

Abendroth, zur Mühlen

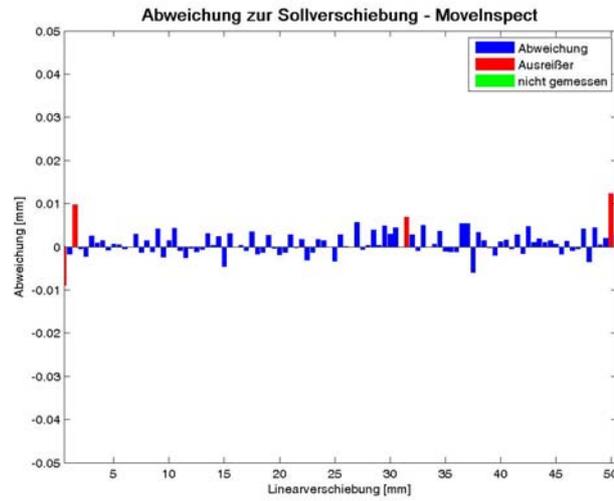


Abbildung 1: Bilder/KrigingMlrlEinzel/KrigingMlrlEinzel1Abb1

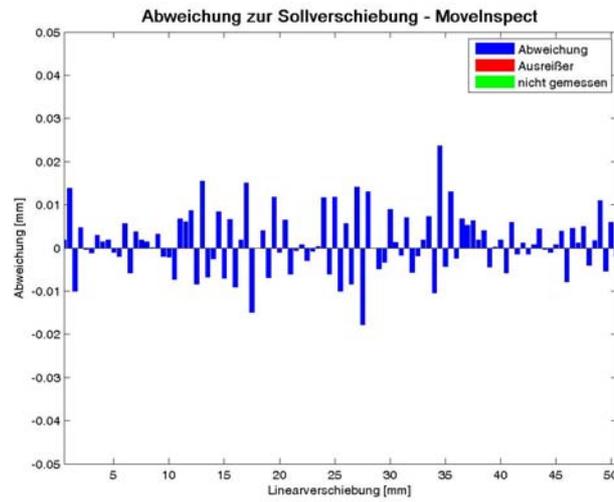


Abbildung 2: Bilder/KrigingMlrlEinzel/KrigingMlrlEinzel2Abb1

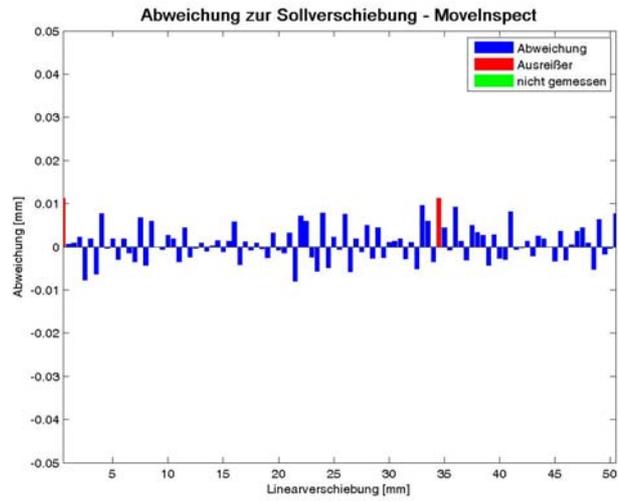


Abbildung 3: Bilder/KrigingMlrlEinzel/KrigingMlrlEinzel3Abb1

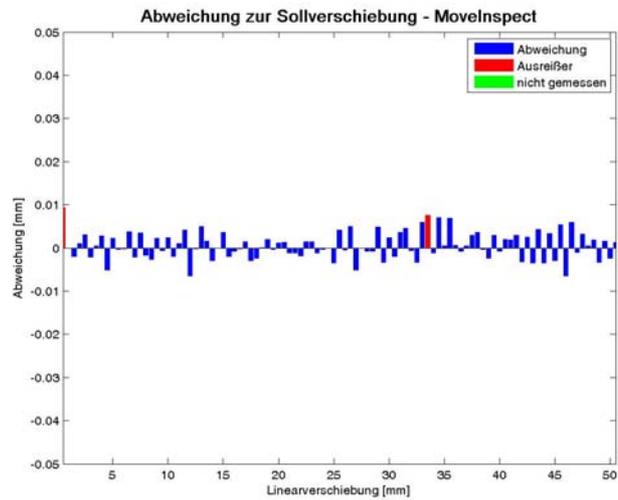


Abbildung 4: Bilder/KrigingMlrlEinzel/KrigingMlrlEinzel4Abb1

Ergebnisse/KrigingMlrlEinzel.tex

Abendroth, zur Mühlen

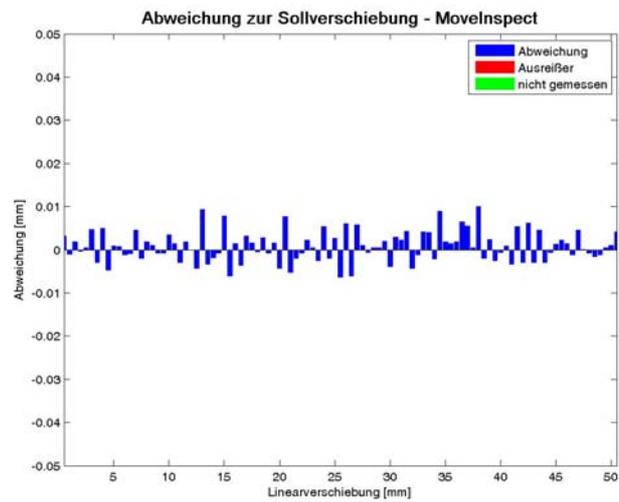


Abbildung 5: Bilder/KrigingMlrlEinzel/KrigingMlrlEinzel5Abb1

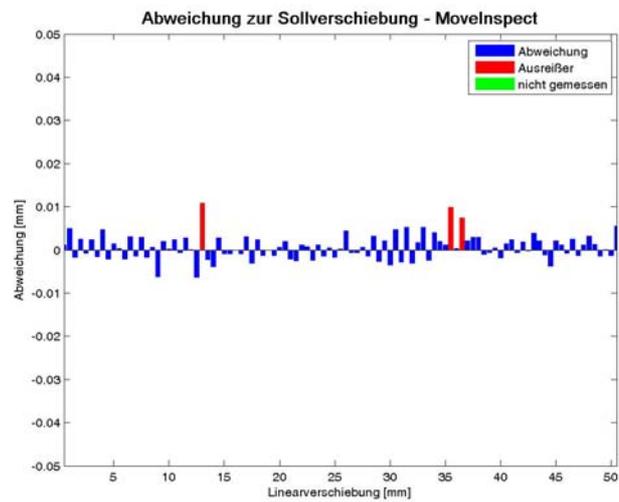


Abbildung 6: Bilder/KrigingMlrlEinzel/KrigingMlrlEinzel6Abb1

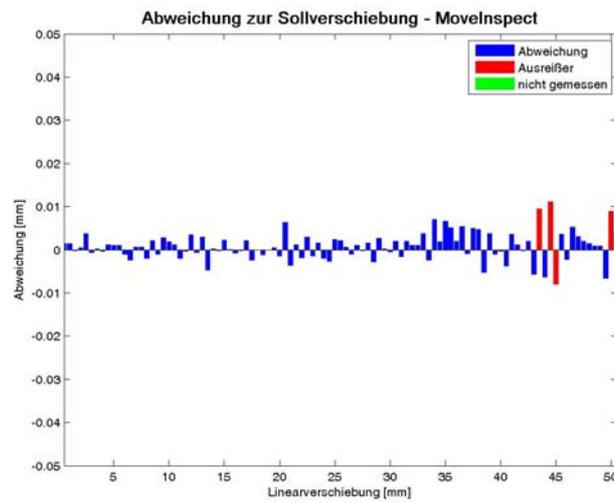


Abbildung 7: Bilder/KrigingMlrlEinzel/KrigingMlrlEinzel7Abb1

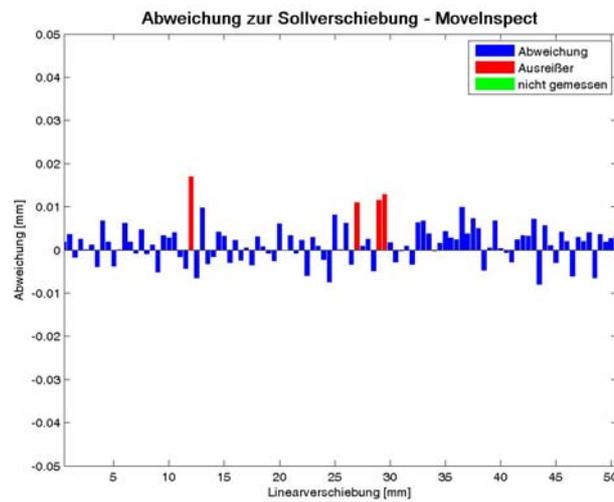


Abbildung 8: Bilder/KrigingMlrlEinzel/KrigingMlrlEinzel8Abb1

Ergebnisse/KrigingMlrlEinzel.tex

Abendroth, zur Mühlen

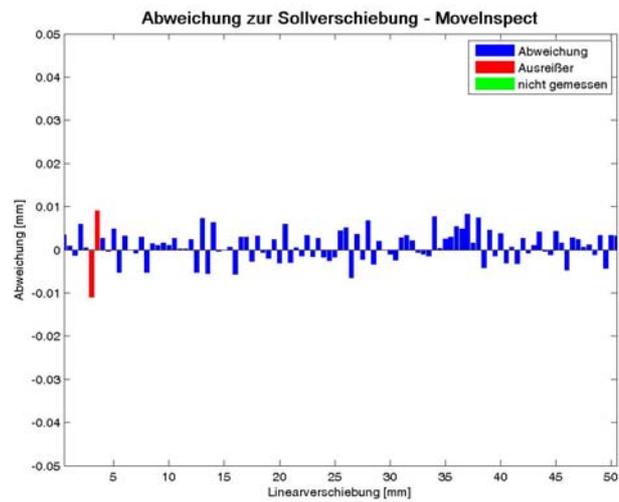


Abbildung 9: Bilder/KrigingMlrlEinzel/KrigingMlrlEinzel9Abb1

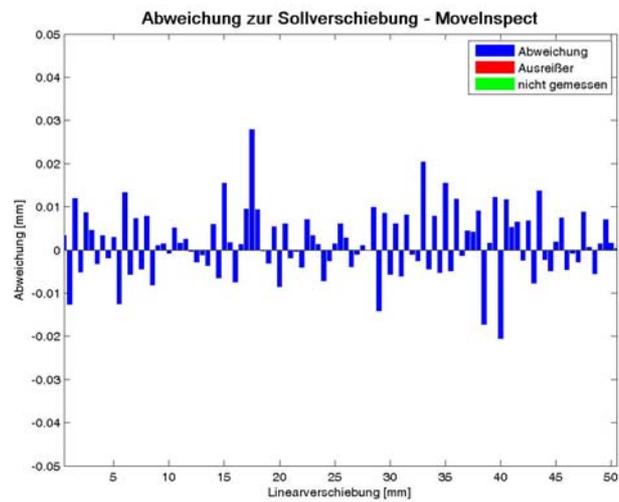


Abbildung 10: Bilder/KrigingMlrlEinzel/KrigingMlrlEinzel10Abb1

KrigingMlrlEinzel	v [mm/s]	Bildfrequenz [Hz]	Soll [mm]	Mittelwert [mm]	Median [mm]	Std [mm]	d [mm]
1	NaN	NaN	0.500	0.501	0.501	0.003	NaN
2	NaN	NaN	0.500	0.501	0.501	0.009	NaN
3	NaN	NaN	0.500	0.501	0.501	0.005	NaN
4	NaN	NaN	0.500	0.501	0.500	0.004	NaN
5	NaN	NaN	0.500	0.501	0.501	0.004	NaN
6	NaN	NaN	0.500	0.501	0.500	0.003	NaN
7	NaN	NaN	0.500	0.501	0.501	0.004	NaN
8	NaN	NaN	0.500	0.502	0.502	0.005	NaN
9	NaN	NaN	0.500	0.501	0.501	0.004	NaN
10	NaN	NaN	0.500	0.501	0.501	0.009	NaN

Tabelle 1: Ergebnisse der Messreihe KrigingMlrl mit dem Messsystem MoveInspect

## B Räumlicher Rückwärtsschnitt

### B.1 Bestimmung einer Rotationsmatrix aus einem Quaternion

Aus einer Rotationsachse und einem Rotationswinkel berechnet sich das Quaternion  $\mathbf{q}$  über

$$\mathbf{q} = \begin{bmatrix} q_0 \\ q_1 \\ q_2 \\ q_3 \end{bmatrix} = \cos(\omega/2) \cdot \begin{bmatrix} 1 \\ 0 \\ 0 \\ 0 \end{bmatrix} + \sin(\omega/2) \cdot \begin{bmatrix} 0 \\ \mathbf{r} \end{bmatrix} \quad (\text{B.1})$$

mit

$\mathbf{q}$  ... Quaternion  
 $\omega$  ... Rotationswinkel  
 $\mathbf{r}$  ... Rotationsachse.

Die Rotationsmatrix setzt sich dann wie folgt aus den Elementen des Quaternions zusammen:

$$R = \frac{1}{q_0^2 + q_1^2 + q_2^2 + q_3^2} \begin{bmatrix} q_0^2 + q_1^2 - q_2^2 - q_3^2 & 2(q_1q_2 - q_0q_3) & 2(q_1q_3 + q_0q_2) \\ 2(q_1q_2 + q_0q_3) & q_0^2 - q_1^2 + q_2^2 - q_3^2 & 2(q_2q_3 - q_0q_1) \\ 2(q_1q_3 - q_0q_2) & 2(q_2q_3 + q_0q_1) & q_0^2 - q_1^2 - q_2^2 + q_3^2 \end{bmatrix} \quad (\text{B.2})$$

mit

$R$  ... Rotationsmatrix  
 $\mathbf{q}$  ... Quaternion

### B.2 Bestimmung zweier Fluchtpunkte

Zwei Fluchtpunkte können jeweils als Schnittpunkt aus zwei Fluchtgeraden berechnet werden. Für zwei Fluchtgeraden gilt die Bedingung, dass sie im Objekt parallel zueinander verlaufen. Nur wenn diese Bedingung eingehalten ist, repräsentiert der Schnittpunkt dieser beiden Fluchtgeraden einen unendlich fernen Punkt.

$$\mathbf{v}'_{\infty 1} = \mathbf{l}_1 \times \mathbf{l}_2 \quad (\text{B.3})$$

$$\mathbf{v}'_{\infty 2} = \mathbf{m}_1 \times \mathbf{m}_2 \quad (\text{B.4})$$

und es gilt:

$$\mathbf{L}_1 \parallel \mathbf{L}_2 \text{ und } \mathbf{M}_1 \parallel \mathbf{M}_2 \quad (\text{B.5})$$

mit

$\mathbf{v}'_{\infty_1}, \mathbf{v}'_{\infty_2}$  ... beiden Fluchtpunkten

$\mathbf{l}_i, \mathbf{m}_i$  ... Fluchtgeraden im Bild

$\mathbf{L}_i, \mathbf{M}_i$  ... korrespondierende Fluchtgeraden im Objekt

## C Zuordnung

### C.1 Grundlagen der Epipolargeometrie

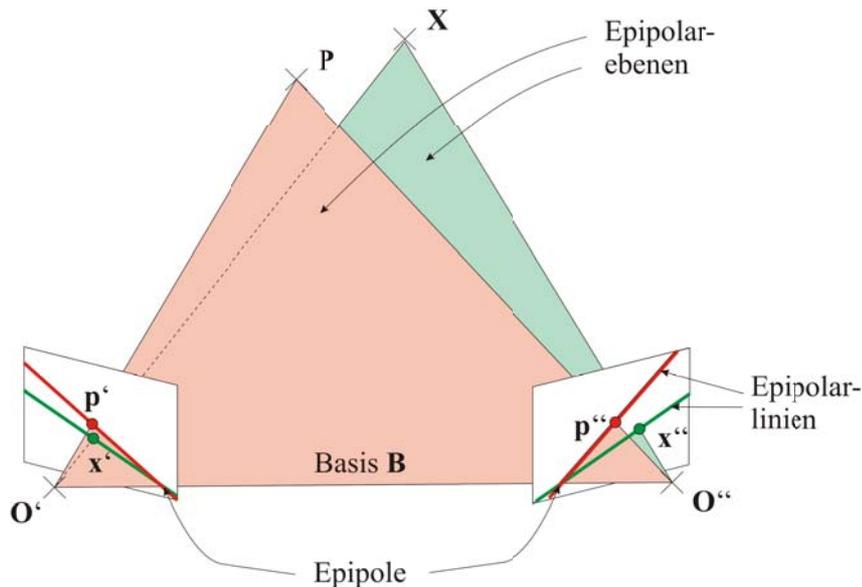


Abbildung C.1: Veranschaulichung der Epipolargeometrie. Die Objektpunkte  $\mathbf{X}$  und  $\mathbf{P}$  werden als Bildpunkte  $\mathbf{x}'$  und  $\mathbf{p}'$  in das erste Bild und als  $\mathbf{x}''$  und  $\mathbf{p}''$  in das zweite Bild abgebildet.

Die Epipolargeometrie veranschaulicht die geometrischen Beziehungen zwischen zwei Bildern. Die Lage der Bilder im Raum ist durch die Innere und Äußere Orientierung der Kameras bestimmt. Mit Hilfe der Verzeichnungsparameter, die mit der Inneren Orientierung beschrieben sind, lässt sich die vorliegende Abbildung auf eine geradentreue Beziehung reduzieren. Hiermit vereinfachen sich die geometrischen Beziehungen zwischen zwei Bildern, die in Abbildung C.1 graphisch veranschaulicht sind. Die Epipolarebene wird durch den jeweiligen Objektpunkt und die Projektionszentren  $\mathbf{O}'$  und  $\mathbf{O}''$  aufgespannt. Der Schnitt dieser Epipolarebene mit den Bildebenen wird als Epipolarlinie bezeichnet und auf diesen Geraden liegen die Bildpunkte. Alle Epipolarlinien schneiden sich im Epipol, der das Bild des Projektionszentrums im jeweils anderen Bild darstellt.

Aus der Epipolargeometrie lässt sich die Koplanaritätsbedingung geradentreu abbildender Kameras ableiten. Zwei Punkte sind koplanar, wenn die Bedingung

$$\mathbf{x}'^T \mathbf{F} \mathbf{x}'' = 0 \quad (\text{C.1})$$

mit

- $\mathbf{x}'$  ... Punktkoordinaten im ersten Bild  
 $\mathbf{x}''$  ... Punktkoordinaten im zweiten Bild  
 $F$  ... Fundamentalmatrix  $F = (K')^{-T} R' S_B (R'')^T (K'')^{-1}$   
 $K$  ... Kalibriermatrix  
 $R$  ... Rotationsmatrix  
 $S_B$  ... Schiefsymmetrische Matrix der Basis  $B$

erfüllt ist. Eine Erläuterung dieser grundlegenden geometrischen Beziehungen eines Bildpaares findet sich in (McGlone, 2004, S. 243 ff.).

## C.2 Direkte Lösungen zur Bestimmung der Flächenparameter

Die nachfolgenden Formeln wurden dem Skript (Förstner, 2007/2008b) entnommen.

### C.2.0.1 Ebene:

- Bestimmung der Ebenenparameter  $\mathbf{A}$  durch Lösen des homogenen linearen Gleichungssystems

$$\begin{bmatrix} \mathbf{X}_1 \\ \mathbf{X}_2 \\ \mathbf{X}_3 \end{bmatrix} \mathbf{A} = \mathbf{0} \quad (\text{C.2})$$

mit

$\mathbf{X}_i$  ... Homogene Objektkoordinaten

### C.2.0.2 Kugel:

- Bestimmung des Mittelpunkts  $\mathbf{X}_0$  und der Hilfsvariablen  $U$  durch Lösen des linearen Gleichungssystems

$$\begin{bmatrix} 1 & -2X_1 & -2Y_1 & -2Z_1 \\ 1 & -2X_2 & -2Y_2 & -2Z_2 \\ 1 & -2X_3 & -2Y_3 & -2Z_3 \\ 1 & -2X_4 & -2Y_4 & -2Z_4 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} U \\ X_0 \\ Y_0 \\ Z_0 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} X_1^2 + Y_1^2 + Z_1^2 \\ X_2^2 + Y_2^2 + Z_2^2 \\ X_3^2 + Y_3^2 + Z_3^2 \\ X_4^2 + Y_4^2 + Z_4^2 \end{bmatrix} \quad (\text{C.3})$$

- Ermittlung des Radius  $R$  über

$$R = \sqrt{X_0^2 + Y_0^2 + Z_0^2 - U} \quad (\text{C.4})$$

### C.2.0.3 Zylinder:

- Schätzung der Normalen  $\mathbf{N}_i$  an den Punkten  $\mathbf{X}_i$

2. Berechnung der normierten Richtung  $\mathbf{M}$  der Zylinderachse aus zwei Normalen mit

$$\mathbf{M} = \mathbf{N}(\mathbf{N}_1 \times \mathbf{N}_2) \quad (\text{C.5})$$

und anschließender Berechnung der Rotationsparameter  $s$  und  $t$  als Elemente des Imaginärteils  $\mathbf{q}$  des Quaternions  $\mathbf{q} = \begin{bmatrix} q \\ \mathbf{q} \end{bmatrix}$  über

$$\begin{bmatrix} s \\ t \\ 0 \end{bmatrix} = \tan \frac{\alpha}{2} \cdot (\mathbf{e}_3 \times \mathbf{M}) \quad (\text{C.6})$$

mit

- $\alpha$  ... Winkel zwischen  $z$ -Richtung des Objektkoordinatensystem und der geschätzten Richtung der Zylinderachse  $\mathbf{M}$   
 $\mathbf{e}_3$  ... Einheitsvektor in  $z$ -Richtung des Objektkoordinatensystem  
 $\mathbf{M}$  ... Richtung der Zylinderachse

3. Drehung des Koordinatensystems in die Normale  
 4. Berechnung des Kreismittelpunktes  $\mathbf{x}_0$  und der Hilfsvariablen  $u$  mit den gedrehten  $X$ - und  $Y$ -Koordinaten durch Lösen des Gleichungssystems

$$\begin{bmatrix} 1 & -2X_1 & -2Y_1 & +(X_1^2 + Y_1^2) \\ 1 & -2X_2 & -2Y_2 & +(X_2^2 + Y_2^2) \\ 1 & -2X_3 & -2Y_3 & +(X_3^2 + Y_3^2) \\ 1 & -2X_4 & -2Y_4 & +(X_4^2 + Y_4^2) \end{bmatrix} \begin{bmatrix} u \\ x_0 \\ y_0 \\ 1 \end{bmatrix} = \mathbf{0} \quad (\text{C.7})$$

und Ermittlung des Radius über

$$r = \sqrt{x_0^2 + y_0^2 - u} \quad (\text{C.8})$$

#### C.2.0.4 Fläche zweiter Ordnung:

1. Ermittlung der Quadrikparameter  $\mathbf{Q}$  durch Lösen des linearen Gleichungssystems

$$\begin{bmatrix} (\mathbf{X}_1^T \otimes \mathbf{X}_1^T) \\ (\mathbf{X}_2^T \otimes \mathbf{X}_2^T) \\ (\mathbf{X}_3^T \otimes \mathbf{X}_3^T) \\ (\mathbf{X}_4^T \otimes \mathbf{X}_4^T) \\ (\mathbf{X}_5^T \otimes \mathbf{X}_5^T) \\ (\mathbf{X}_6^T \otimes \mathbf{X}_6^T) \\ (\mathbf{X}_7^T \otimes \mathbf{X}_7^T) \\ (\mathbf{X}_8^T \otimes \mathbf{X}_8^T) \\ (\mathbf{X}_9^T \otimes \mathbf{X}_9^T) \end{bmatrix} \text{vecQ} = \mathbf{0} \quad (\text{C.9})$$

### C.3 Ergebnistabellen

<b>Für alle nachfolgenden Auswertungen gilt:</b>						
Wahrscheinlichkeit $P$ für RANSAC:				0,99		
Fehleranteil $e$ für RANSAC:				0,1		
Signifikanzniveau:				3		
Maximaler Abstand zur Epipolarlinie:				5 $\mu$ m		
Datensatz	Zugeordnete Punkte		Flächenart	Neu zugeordnete Punkte		Nicht zugeordnete Punkte
	richtig	falsch		richtig	falsch	
Ebene1	33	0	Ebene	72	0	0
Ebene1	33	0	Quadrik	72	0	0
Ebene1	33	0	Quadrik	58	0	14
Ebene2	38	0	Ebene	67	0	0
Ebene3	38	0	Ebene	67	0	0
Ebene4	43	0	Ebene	62	0	0
Ebene5	43	0	Ebene	62	0	0
Ebene6	40	0	Ebene	65	0	0

Tabelle C.1: Zusammenstellung der Zuordnungsergebnisse mit dem Verfahren der Epipolargeometrie (Zugeordnete Punkte) und über die Objektoberfläche (Neu zugeordnete Punkte) für das Testobjekt der Ebene

<b>Für alle nachfolgenden Auswertungen gilt:</b>						
Wahrscheinlichkeit $P$ für RANSAC:				0,99		
Fehleranteil $e$ für RANSAC:				0,1		
Signifikanzniveau:				3		
Maximaler Abstand zur Epipolarlinie:				5 $\mu$ m		
Datensatz	Zugeordnete Punkte		Flächenart	Neu zugeordnete Punkte		Nicht zugeordnete Punkte
	richtig	falsch		richtig	falsch	
Zylinder0	106	0	Zylinder	48	0	0
Zylinder0	106	0	Quadrik	48	0	0
Zylinder0	106	0	Quadrik	48	0	0
Zylinder1	124	0	Zylinder	32	0	0
Zylinder1	124	0	Quadrik	32	0	0
Zylinder2	115	0	Zylinder	53	0	0
Zylinder2	115	0	Quadrik	53	0	0
Zylinder3	114	0	Zylinder	54	0	0
Zylinder3	114	0	Quadrik	54	0	0
Zylinder4	125	0	Zylinder	41	0	0
Zylinder4	125	0	Quadrik	41	0	0
Zylinder5	93	0	Zylinder	33	0	0
Zylinder5	93	0	Quadrik	33	0	0
Zylinder6	85	0	Zylinder	27	0	0
Zylinder6	85	0	Quadrik	27	0	0
Zylinder7	99	0	Zylinder	39	0	0
Zylinder7	99	0	Quadrik	38	0	1

Tabelle C.2: Zusammenstellung der Zuordnungsergebnisse mit dem Verfahren der Epipolargeometrie (Zugeordnete Punkte) und über die Objektoberfläche (Neu zugeordnete Punkte) für das Testobjekt des Zylinders

<b>Für alle nachfolgenden Auswertungen gilt:</b>						
Wahrscheinlichkeit $P$ für RANSAC:				0,99		
Fehleranteil $e$ für RANSAC:				0,5		
Signifikanzniveau:				3		
Maximaler Abstand zur Epipolarlinie:				5 $\mu$ m		
Datensatz	Zugeordnete Punkte		Flächenart	Neu zugeordnete Punkte		Nicht zugeordnete Punkte
	richtig	falsch		richtig	falsch	
Kopf0	71	19	Kugel	44	5	41
Kopf0	71	19	Quadrik	78	8	4
Kopf1	49	19	Quadrik	33	0	15
Kopf3	40	8	Quadrik	19	1	7
Kopf4	24	8	Quadrik	3	0	1
Kopf5	19	7	Quadrik	31	0	0
Kopf6	46	6	Quadrik	47	0	0
Kopf7	43	11	Quadrik	57	4	1
Kopf8	86	6	Quadrik	70	5	4
Kopf9	77	23	Quadrik	92	0	6
Kopf10	77	15	Quadrik	68	2	0

Tabelle C.3: Zusammenstellung der Zuordnungsergebnisse mit dem Verfahren der Epipolargeometrie (Zugeordnete Punkte) und über die Objektoberfläche (Neu zugeordnete Punkte) für das Testobjekt des Kopfes

## Literatur

- [Aguilar u. a. 2008] AGUILAR, Wendy ; FRAUEL, Yann ; ESCOLANO, Francisco ; MARTINEZ-PEREZ, M. E. ; ESPINOSA-ROMERO, Arturo ; LOZANO, Miguel A.: A robust Graph Transformation Matching for non-rigid registration. In: *Image and Vision Computing* (2008)
- [Aicon 2008] AICON 3D SYSTEMS GMBH: *Homepage*. [www.aicon.de](http://www.aicon.de). 2008. – [Stand: Dezember 2008]
- [Bay u. a. 2005] BAY, Herbert ; FERRARI, Vittorio ; VAN GOOL, Luc: Wide-Baseline Stereo Matching with Line Segments. In: *Computer Vision and Pattern Recognition, IEEE Computer Society Conference on* 1 (2005), S. 329–336
- [Besl und Jain 1988] BESL, P. J. ; JAIN, R. C.: Segmentation through Variable-Order Surface Fitting. In: *IEEE Transactions on Pattern Analysis and Machine Intelligence* 10 (1988), Nr. 2, S. 167–192
- [Bosch 2005] BOSCH, Karl: *Elementare Einführung in die angewandte Statistik*. Wiesbaden : Vieweg, Juli 2005
- [Dickscheid u. a. 2008] DICKSCHEID, Timo ; LÄBE, Thomas ; FÖRSTNER, Wolfgang: Benchmarking Automatic Bundle Adjustment Results. In: *21st Congress of the International Society for Photogrammetry and Remote Sensing (ISPRS)*. Beijing, China, 2008
- [DIN1319 ] DEUTSCHES INSTITUT FÜR NORMUNG E.V.: *DIN 1913 Grundlagen der Meßtechnik*. Berlin : Beuth Verlag GmbH
- [DIN1319-1 1995] DEUTSCHES INSTITUT FÜR NORMUNG E.V.: *DIN 1913-1 Grundlagen der Meßtechnik; Grundbegriffe*. Berlin : Beuth Verlag GmbH, Januar 1995
- [DIN1319-2 2005] DEUTSCHES INSTITUT FÜR NORMUNG E.V.: *DIN 1913-2 Grundlagen der Meßtechnik; Begriffe für Messmittel*. Berlin : Beuth Verlag GmbH, Oktober 2005
- [DIN1319-3 1996] DEUTSCHES INSTITUT FÜR NORMUNG E.V.: *DIN 1913-3 Grundlagen der Meßtechnik; Auswertung von Messungen einer einzelnen Messgröße*. Berlin : Beuth Verlag GmbH, Mai 1996
- [DIN1319-4 1999] DEUTSCHES INSTITUT FÜR NORMUNG E.V.: *DIN 1913-4 Grundlagen der Meßtechnik; Auswertung von Messungen*. Berlin : Beuth Verlag GmbH, Februar 1999
- [DIN55350 ] DEUTSCHES INSTITUT FÜR NORMUNG E.V.: *DIN 55350 Begriffe der Qualitätssicherung und Statistik*. Berlin : Beuth Verlag GmbH
- [DIN55350-13 1987] DEUTSCHES INSTITUT FÜR NORMUNG E.V.: *DIN 55350-13 Begriffe der Qualitätssicherung und Statistik; Begriffe zur Genauigkeit von Ermittlungsverfahren und Ermittlungsergebnissen*. Berlin : Beuth Verlag GmbH, Juli 1987

- [DIN55350-21 1982] DEUTSCHES INSTITUT FÜR NORMUNG E.V.: *DIN 55350-21 Begriffe der Qualitätssicherung und Statistik; Begriffe der Statistik; Zufallsgrößen und Wahrscheinlichkeitsverteilungen*. Berlin : Beuth Verlag GmbH, Mai 1982
- [DIN55350-24 1982] DEUTSCHES INSTITUT FÜR NORMUNG E.V.: *DIN 55350-24 Begriffe der Qualitätssicherung und Statistik; Begriffe der Statistik; Schließende Statistik*. Berlin : Beuth Verlag GmbH, November 1982
- [Fischler und Bolles 1981] FISCHLER, M. A. ; BOLLES, R. C.: A RANSAC-based approach to model fitting and its application to finding cylinders in range data. In: *Proceedings of the International Joint Conference on Artificial Intelligence*, 1981, S. 637–643
- [Förstner 2007/2008a] FÖRSTNER, Wolfgang: *Photogrammetrie II*. 2007/2008. – Vorlesungsskript
- [Förstner 2007/2008b] FÖRSTNER, Wolfgang: *Punktwolken*. 2007/2008. – Vorlesungsskript
- [Förstner 2008] FÖRSTNER, Wolfgang: *Projektive Geometrie*. 2008. – Vorlesungsskript
- [Godding 2006] GODDING, Robert: Camera Calibration. In: HORNBERG, Alexander (Hrsg.): *Handbook of Machine Vision*. 5. Weinheim : WILEY-VCH Verlag GmbH & Co.KGaA, 2006, S. 333–359
- [Haralick u. a. 1994] HARALICK, R. M. ; LEE, C.-N. ; OTTENBERG, K. ; NÖLLE, M.: Review and Analysis of Solutions of the Three Point Perspective Pose Estimation Problem. In: *International Journal of Computer Vision* 13 (1994), Nr. 3, S. 331–356
- [Helfrich 2004] HELFRICH, Hans-Peter: *Mathematisches Seminar der Landwirtschaftlichen Fakultät*. 2004. – Vorlesungsskript
- [Joeckel und Stober 1999] JOECKEL, Rainer ; STOBER, Manfred: *Elektronische Entfernungs- und Richtungsmessung*. 4. Stuttgart : Wittwer, 1999
- [Koch 1997] KOCH, Karl-Rudolf: *Parameterschätzung und Hypothesentests*. 3. Bonn : Dümmler, 1997
- [Kutterer und Schön 1999] KUTTERER, Hansjörg ; SCHÖN, Steffen: Statistische Analyse quadratischer Formen – der Determinatenansatz. In: *Allgemeine Vermessungsnachrichten*, 10 1999, S. 322–330
- [Läbe u. a. 2008] LÄBE, Thomas ; DICKSCHEID, Timo ; FÖRSTNER, Wolfgang: On the Quality of Automatic Relative Orientation Procedures. In: *21st Congress of the International Society for Photogrammetry and Remote Sensing (ISPRS)*. Beijing, China, 2008

- [Maas 1992] MAAS, Hans-Gerd: *Digitale Photogrammetrie in der dreidimensionalen Strömungsmeßtechnik*. Zürich, Schweiz, Eidgenössische Technische Hochschule Zürich, Dissertation, 1992
- [McGlone 2004] MCGLONE, J. C. (Hrsg.): *Manual of Photogrammetry*. 5. Maryland, USA : American Society for Photogrammetry and Remote Sensing (asprs), 2004
- [Meidow u. a. 2008] MEIDOW, Jochen ; BEDER, Christian ; FÖRSTNER, Wolfgang: Reasoning with uncertain points, straight lines, and straight line segment in 2D. In: *ISPRS Journal of Photogrammetry & Remote Sensing* (2008)
- [Moore 1991] MOORE, Andrew: *A tutorial on kd-trees*. Extract from PhD Thesis. 1991
- [Niemeier 2002] NIEMEIER, Wolfgang: *Ausgleichsrechnung*. Berlin, New York : Walter de Gruyter, 2002
- [Wackernagel 1995] WACKERNAGEL, Hans: *Multivariate Geostatistics*. Berlin : Springer, 1995