

---

Institut für Photogrammetrie und GeoInformation  
Fachbereich Nahbereichsphotogrammetrie

Airbus Operations GmbH

B r e m e n 2 0 1 1

Optimierung der existierenden optischen Prozesskette bei der  
Airbus Operations GmbH Bremen

Masterarbeit  
von

B. Sc. Martin Reich

Referent: Prof. Dr.-Ing. Christian Heipke  
Betreuer: Dr.-Ing. Manfred Wiggenhagen

Martin Reich  
Graf-Moltke-Straße 62  
28211 Bremen

Hiermit erkläre ich an Eides statt, dass ich die von mir vorgelegte Arbeit selbstständig verfasst habe, dass ich die verwendeten Quellen, Internet-Quellen und Hilfsmittel vollständig angegeben habe und dass ich die Stellen der Arbeit – einschließlich Tabellen, Karten und Abbildungen –, die anderen Werken oder dem Internet im Wortlaut oder dem Sinn nach entnommen sind, auf jeden Fall unter Angabe der Quelle als Entlehnung kenntlich gemacht habe.

Bremen, den 28. Oktober 2011

---

Martin Reich

# Inhaltsverzeichnis

<b>1</b>	<b>Einführung</b>	<b>1</b>
1.1	Motivation und Zielsetzung . . . . .	1
1.2	Literaturüberblick . . . . .	3
1.3	Aufbau und Kapitelübersicht . . . . .	4
<b>2</b>	<b>Grundlagen</b>	<b>6</b>
2.1	Grundlagen der Photogrammetrie . . . . .	6
2.1.1	Aufnahmegeometrie . . . . .	6
2.1.2	Innere und äußere Orientierung . . . . .	7
2.1.3	Kollinearitätsgleichungen . . . . .	8
2.2	Grundlagen der Statistik . . . . .	9
2.2.1	Genauigkeitsmaße . . . . .	9
2.2.2	Monte-Carlo-Methode . . . . .	10
2.3	Photogrammetrie bei der <i>Airbus Operations GmbH</i> Bremen . . . . .	11
2.3.1	Photogrammetrie-Messsystem <i>V-STARs</i> . . . . .	11
2.3.2	Photogrammetrie-Auswertesoftware <i>Australis</i> . . . . .	13
<b>3</b>	<b>Genauigkeitsanalyse</b>	<b>15</b>
3.1	Optische Prozesskette . . . . .	15
3.2	Vorbereitung . . . . .	17
3.2.1	Maßstäbe und Adapter . . . . .	17
3.2.2	Zielmarken . . . . .	20
3.2.3	Bestückung des Messobjektes . . . . .	28
3.2.4	Kameraparameter . . . . .	33
3.3	Bildaufnahme . . . . .	37
3.3.1	Einflüsse durch die Umgebung . . . . .	37
3.3.2	Aufnahmestandorte . . . . .	38
3.4	Auswertung des Bündels . . . . .	43
3.5	Zusammenfassung . . . . .	45

<b>4</b>	<b>Optimierungsmöglichkeiten</b>	<b>48</b>
4.1	Optimierung der Adaptermaße . . . . .	48
4.2	Optimierung der Zielmarkengröße . . . . .	50
4.3	Aufnahmegeometrie . . . . .	51
4.3.1	Praktische Messung im <i>Multi</i> -Modus . . . . .	52
4.3.2	Praktische Messung im <i>Single</i> -Modus . . . . .	55
4.3.3	Zusammenfassung . . . . .	61
<b>5</b>	<b>Entwicklung von Kenngrößen</b>	<b>63</b>
5.1	Entwicklung einer Kenngröße für den Schnittwinkel . . . . .	63
5.1.1	Iterative Methode . . . . .	64
5.1.2	Allgemeine Methode . . . . .	68
5.1.3	Anwendung der Kenngröße . . . . .	69
5.2	Entwicklung einer Kenngröße für die Betrachtungsrichtung . . . . .	73
5.2.1	Herleitung . . . . .	74
5.2.2	Anwendung der Kenngröße . . . . .	76
5.3	Zusammenfassung . . . . .	78
<b>6</b>	<b>Zusammenfassung und Ausblick</b>	<b>79</b>
	<b>Abbildungsverzeichnis</b>	<b>84</b>
	<b>Tabellenverzeichnis</b>	<b>86</b>
	<b>Literaturverzeichnis</b>	<b>88</b>
	<b>A Quellen</b>	<b>90</b>
	<b>B Daten-CD</b>	<b>91</b>

# Kapitel 1

## Einführung

### 1.1 Motivation und Zielsetzung

Die Frage nach der Genauigkeit einer Messung ist alt. Sowohl im sozial- als auch im naturwissenschaftlichen Bereich ist die Angabe einer statistischen Unsicherheit für erhobene Daten essentiell. Mit der Relevanz dieser Daten für eine gewisse Fragestellung steigt ebenso die Relevanz deren Genauigkeit.

Eine Antwort auf die Frage nach einer angemessenen Genauigkeit existiert bereits längere Zeit:

„Der Gebildete treibt die Genauigkeit nicht weiter, als es der Natur der Sache entspricht.“<sup>1</sup>

Eine Einschränkung für eine Optimierung der Genauigkeit liegt demnach in der Natur der Sache. Eine Herausforderung liegt sicherlich darin, diesen Zusammenhang genauer zu definieren. Zunächst lässt sich der Begriff Genauigkeit zerlegen in Präzision und Richtigkeit [DIN55350-13 1987]. Die Präzision einer Messung gibt Auskunft über die zufälligen Abweichungen vom Erwartungswert bei wiederholter Durchführung, bei der Richtigkeit handelt es sich um die systematische Variation zwischen dem Erwartungs- und dem wahren Wert. Je nach verwendetem Messmittel gibt es eine Reihe von Faktoren, welche Richtigkeit und Präzision und somit die Unsicherheit einer Messung beeinflussen. Laut [KESSEL 2001] resultiert diese Unsicherheit aus der unvollständigen Kenntnis über den Messprozess. Im Sinne einer Optimierung der Genauigkeit ist es essentiell, diese Faktoren zu definieren und zu analysieren.

In der Luftfahrtindustrie sind die zulässigen Toleranzen der Fertigung aufgrund der hohen Sicherheitsanforderungen für das Endprodukt sehr niedrig. Daten, welche die Gestalt der Bauteile beschreiben, haben also eine hohe Relevanz für die Qualität des Produktes. Die Datenerfassung obliegt daher hohen Genauigkeitsanforderungen<sup>2</sup>, um vernünftige Aussagen bezüglich der Gestalt des Objektes treffen zu können. Gerade deshalb ist die Frage

---

<sup>1</sup>Aristoteles, griechischer Philosoph (384 - 322 v. Chr.)

<sup>2</sup>Die Genauigkeit sollte etwa 15-20% des Toleranzfeldes betragen [KLEIN 2007], S. 5

nach der Optimierung der Datenerfassung hinsichtlich einer gesteigerten Genauigkeit in der Luftfahrtindustrie von großer Bedeutung.

Im Werk der *Airbus Operations GmbH* in Bremen wird für die Trennstellenvermessung in der Rumpfmontage der Transportmaschine A400M seit einigen Jahren das photogrammetrische Messsystem *V-STARs* von *Geodetic Systems Inc. (GSI)* für die Qualitätssicherung eingesetzt. Dabei gilt es, Toleranzen im Submillimeterbereich auf Einhaltung zu überprüfen. Das Messsystem besteht aus zwei Messkameras des Modells *INCA*<sup>3</sup> und der Auswertesoftware *V-STARs*. Die Dokumentation des Messsystems gibt auf die Frage nach der Genauigkeit 25 bis  $50\mu\text{m}$  als ein typisches Intervall für ein etwa  $3\text{m}$  großes Messobjekt an, die lange Antwort auf die Frage sei allerdings komplexer [GSI 2009b]. Mit der VDI-Richtlinie 2634 ist seit einigen Jahren ein einheitliches Verfahren zur Prüfung photogrammetrischer Systeme verfügbar [RAUTENBERG und WIGGENHAGEN 2002]. Das Messsystem wird einmal im Jahr nach diesen Vorgaben kalibriert. Allerdings ist die Bestimmung der Güte des Systems als Ganzes mit diesem Verfahren lediglich deskriptiver Natur, die Untersuchung ursächlicher Faktoren findet nicht statt. Somit ist die hochpräzise Messung von Punkten mit dem Messsystem *V-STARs* möglich [BROWN 1997], [SETAN und IBRAHIM 2004], die Bestimmung von genauigkeitsbeeinflussenden Kausalitäten dennoch keine triviale Aufgabe. Immerhin impliziert das Intervall von 25 bis  $50\mu\text{m}$  eine mögliche Genauigkeitssteigerung von 50%, welche, abhängig von der Variation bestimmter Parameter, das Ergebnis der Messung beeinflusst. Die Genauigkeitsgrenze, um Bezug zum oben genannten Zitat zu nehmen, ist also ein Bereich. Die Natur der Sache als limitierendes Element ist somit nicht als konstant aufzufassen, sondern wird von variablen, die Genauigkeit beeinflussenden Faktoren repräsentiert.

Diese Arbeit soll einen Überblick über die Faktoren geben, die die Genauigkeit der photogrammetrischen Messung limitieren. Für eine Strukturierung dieser Faktoren eignet sich die von [WIGGENHAGEN und RAGUSE 2003] beschriebene optische Prozesskette:

- Vorbereitung der Aufnahme
- Bildaufnahme
- Ausgleichung des Bildverbandes

Ziel der Arbeit ist eine sowohl allgemeingültige als auch eine speziell auf die Trennstellenvermessung bei der *Airbus Operations GmbH* bezogene Analyse und Optimierung der Genauigkeit einzelner Bereiche der optischen Prozesskette. Dabei gilt es weniger das Genauigkeitspotential des photogrammetrischen Messsystems zu steigern als vielmehr darum, ein Verständnis für die beeinflussenden Faktoren zu bekommen:

„Die Qualität der dreidimensionalen Punktbestimmung wird von einer Unzahl von einzelnen Prozessen und Parametern beeinflusst.“ [WIGGENHAGEN und RAGUSE 2003]

---

<sup>3</sup>*INCA* steht für *INtelligent CAmera*

Dazu werden die drei Schritte der optischen Prozesskette in Teilbereiche aufgegliedert und zunächst theoretisch untersucht. Mit Hilfe von Simulationsrechnungen soll der Einfluss auf den gesamten Prozess verdeutlicht werden. In einem weiteren Teil werden Möglichkeiten für die Optimierung der Messergebnisse hinsichtlich einer gesteigerten Genauigkeit aufgezeigt. Da die Kamera und die Auswertesoftware als hoch entwickeltes Messsystem kaum Potential für die Optimierung bietet, beziehen sich die Möglichkeiten auf die Schritte der Vorbereitung und Aufnahme. Die Durchführung von praktischen Untersuchungen dient schwerpunktmäßig der Aufdeckung von Einflüssen der geometrischen Verteilung der Aufnahmestandpunkte und Triangulationsbedingungen. Die Ergebnisse werden als Grundlage für die Erstellung von Kenngrößen für die geometrische Güte der Aufnahmen herangezogen. Diese Kenngrößen werden mathematisch hergeleitet und auf eine Trennstellenvermessung angewendet. Mit ihnen lässt sich die Qualität der photogrammetrischen Messung bei der *Airbus Operations GmbH* kontrollieren. So lässt sich in Form von gezielten Nachmessungen die Genauigkeit in bestimmten Bereichen mit mangelnden aufnahmegeometrischen Konditionen verbessern.

## 1.2 Literaturüberblick

Die wichtigsten Literaturquellen, welche für diese Arbeit herangezogen werden, werden in diesem Teil kurz vorgestellt. Als Standardwerk für die Nahbereichsphotogrammetrie sei das Buch [LUHMANN 2003] erwähnt. Mit geschichtlichen und mathematischen Hintergründen erklärt es die theoretischen Ansätze und wichtigen Fakten der modernen Nahbereichsphotogrammetrie. Etwas allgemeiner werden in [KRAUS 2004] die Grundlagen der Photogrammetrie erläutert. Das Buch [KAHMEN 2006] beschreibt unter anderem die für diese Arbeit relevanten theoretischen Hintergründe zu den vermessungskundlichen Triangulationsverfahren. Grundlegende Fakten und Verfahren zur Ermittlung und Interpretation von Messunsicherheiten werden in [KESSEL 2001] vermittelt. Die Hintergründe zur Überprüfung photogrammetrischer Messsysteme nach VDI-Richtlinie 2634 sind in [RAUTENBERG und WIGGENHAGEN 2002] zusammengefasst. Dabei wird ebenfalls auf die Anwendung in der Praxis in Form von Beispielen mit verschiedenen Kameras eingegangen. In [WIGGENHAGEN und RAGUSE 2003] werden diverse Kenngrößen für genauigkeitsbeeinflussende Parameter strukturiert nach der optischen Prozesskette aufgestellt, die einen Richtwert für die hohe Güte einer Messung liefern sollen. Dabei wird insbesondere auf die Anwendbarkeit in der Praxis im Vorfeld der Messung Wert gelegt. Die Integration der Photogrammetrie in die Qualitätskontrolle bei der *Airbus Operations GmbH* in Form des Messsystems *V-STARs* wird in [SUDHOLT 2001] behandelt. Weitere Tests bezüglich der Genauigkeit des Messsystems werden in [BROWN 1997] beschrieben, in [SETAN und IBRAHIM 2004] werden die Ergebnisse von Vergleichsmessungen unter anderem zwischen *V-STARs*, *Australis* und Koordinatenmessmaschinen vorgestellt. Die Arbeit von [SCHLÖGELHOFER 1989] widmet sich neben Wirtschaftlichkeitsuntersuchungen im hohen Maße dem aufnahmegeometrischen Design photogrammetrischer Aufnahmen. Es werden im Hinblick auf die Anwendung für Simulationsrechnungen verschiedene Situationen unter-

sucht und grundsätzliche Bedingungen der Aufnahmeplanung hergeleitet. Das Ergebnis ist unter anderem eine Genauigkeitsformel, mit der abschätzend im Vorfeld einer photogrammetrischen Messung Aussagen über die zu erwartende Genauigkeit getroffen werden können. In der Dissertation [DOLD 1997] wird ein neues Systemkonzept für Aufnahme- und Auswertetechnik auf Grundlage der Réseautchnik vorgeschlagen sowie ein Prüfverfahren für solche Systeme vorgestellt. Es wird ebenfalls auf die Genauigkeit beeinflussende Faktoren eingegangen, insbesondere auf die Einflüsse maskierter Zielmarken und die Verzeichnungsparameter der Abbildung. Die Grundlage für die Untersuchung der Verzeichnungen einer Kamera liefert der Artikel [BROWN 1971], in dem die Parameter der inneren Orientierung definiert werden. Ansätze für eine bildabhängige Verzerrung durch mechanische Instabilitäten werden in den Artikeln [HAIG et al. 2006] und [HASTEDT et al. 2002] vorgestellt. In [NEUKAMM et al. 2010] wird die photogrammetrische Vermessung der Geometrie eines industriellen Röntgen-Computertomographen beschrieben und dabei detailliert auf die Prinzipien von Ellipsenoperatoren für die rechnerische Ermittlung von Zielmarkenmittelpunkten eingegangen. Eine Alternative zur bildanalytischen Mittelpunktbestimmung mittels Kantenoperatoren ist in dem Artikel [OUELLET und HÉBERT 2009] beschrieben. Diese soll insbesondere die Ellipse in Bildern mit niedrigem Kontrast beschreiben. Um die aufnahmebedingten Exzentrizitäten zwischen abgebildetem und wahren Mittelpunkt der Zielmarke zu minimieren, wird in [ОТЕПКА und FRASER 2004] und [ОТЕПКА 2004] ein Verfahren zur automatischen Extraktion der Zielmarkenebene vorgestellt, welches in die Auswertung integriert werden kann.

### 1.3 Aufbau und Kapitelübersicht

Die Arbeit ist in sechs Kapitel strukturiert. Nach der Einleitung mit einer Motivation für die Arbeit, der verfolgten Zielsetzung und einem kurzen Überblick über die für diese Arbeit verwendete Literatur, folgen im zweiten Kapitel theoretische Grundlagen aus den Bereichen der Photogrammetrie und der Statistik, welche zum Verständnis der Arbeit beitragen. Zudem wird in diesem Teil die Photogrammetrie im Werk der *Airbus Operations GmbH* in Bremen und das Messsystem *V-STARs* vorgestellt.

Das dritte Kapitel beschreibt zunächst die optische Prozesskette und stellt die in der anschließenden Genauigkeitsanalyse untersuchten Parameter strukturiert zusammen. In der Genauigkeitsanalyse werden die einzelnen Parameter auf ihren Einfluss auf die Güte der Messung untersucht. Die Untersuchung beinhaltet neben einer beschreibenden Erklärung des Effektes eine Einschätzung bezogen auf die photogrammetrische Vermessung bei der *Airbus Operations GmbH* sowie in einigen Fällen Simulationsrechnungen, welche den Einfluss genauer definieren und belegen.

Im darauf folgenden vierten Kapitel werden verschiedene Möglichkeiten für eine Genauigkeitsoptimierung der Messung evaluiert. Der Schwerpunkt liegt dabei auf der Beschreibung zweier im Rahmen der Arbeit durchgeführter Messungen und der Schlüsse, welche bezüglich

des aufnahmegeometrischen Designs einer photogrammetrischen Messung daraus zu ziehen sind. Sie bilden die Grundlage für Kriterien, welche im fünften Kapitel in Form von Kenngrößen angewendet werden und die Kontrolle der Messung ermöglichen. Diese Kenngrößen werden mathematisch hergeleitet und auf ihre Anwendbarkeit geprüft.

Abschließend soll Kapitel 6 den Inhalt und die Ergebnisse der Arbeit zusammenfassen und einen Ausblick für weitere Möglichkeiten und Untersuchungen geben.

# Kapitel 2

## Grundlagen

Dieses Kapitel soll dem Leser einige grundlegende Strategien der Photogrammetrie und der statistischen Auswertung näher bringen. Es werden die zum Verständnis der durchgeführten Analysen benötigten Begriffe erklärt und mathematisch sowie bildlich verdeutlicht.

### 2.1 Grundlagen der Photogrammetrie

Die Photogrammetrie ist vom Prinzip her kein neues Feld der Messtechnik<sup>1</sup>. Jedoch hat sich sowohl die Aufnahme- als auch die Auswertetechnik mit der Zeit grundlegend verändert. Durch die digitale Aufnahme und Verarbeitung der Daten ist eine hochgradige Automatisierung der Prozesse möglich geworden. Die Algorithmen basieren allerdings immer noch auf den seit langer Zeit existierenden funktionalen Zusammenhängen der Zentralprojektion des Raumes, die im Folgenden näher erklärt werden.

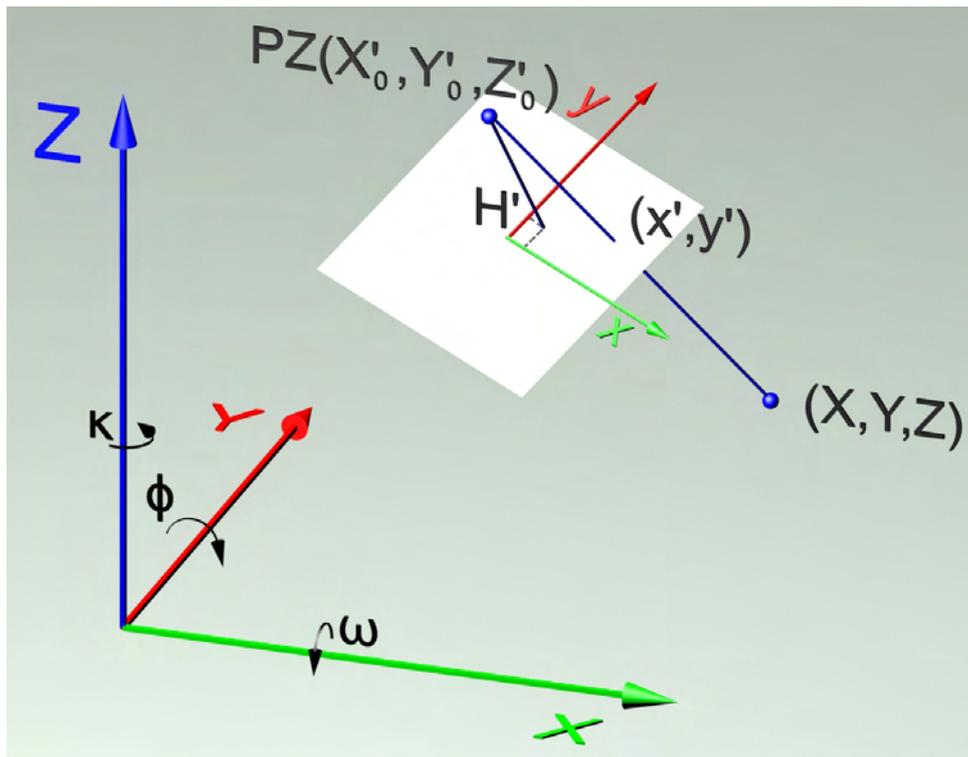
#### 2.1.1 Aufnahmegeometrie

Wie jede Messmethode basiert auch die Photogrammetrie auf der Beobachtung einer Größe, die mit der gesuchten Größe in einem funktionalen Zusammenhang steht. Beobachtet wird die Position eines zunächst beliebigen Punktes im Bild, dessen Position in einem übergeordneten Koordinatensystem gesucht wird. Mathematisch steht also eine Koordinatentransformation zwischen den beiden Größen, vom kartesischen Bildkoordinatensystem, dessen Ursprung in der Bildmitte liegt, ins übergeordnete Objektkoordinatensystem. Dieses ist, abhängig von der Messaufgabe, in der Regel lokal definiert. Geometrisch lässt sich der Zusammenhang mit der Strahlengeometrie veranschaulichen (Abbildung 2.1).

Die Aufnahme des Objektes geschieht zentralperspektivisch. Dem Kollinearitätsprinzip folgend verlaufen die Strahlen aller aufgenommenen Punkte geradlinig durch das Projektionszentrum  $PZ(X'_0, Y'_0, Z'_0)$  und werden auf die zweidimensionale Bildebene projiziert

---

<sup>1</sup>Die Anfänge der Photogrammetrie reichen bis Mitte des 19. Jahrhunderts zurück



**Abbildung 2.1:** Aufnahmegeometrie in der Photogrammetrie

[LUHMANN 2003]<sup>2</sup>. Durch die Projektion geht die Tiefeninformation eines Punktes verloren, den drei unbekannt Objektkoordinaten  $X$ ,  $Y$  und  $Z$  stehen lediglich die zwei gemessenen Bildkoordinaten  $x'$  und  $y'$  gegenüber. Der Punkt kann im übergeordneten System überall auf dem einfallenden Strahl liegen und lässt sich aus einem Bild nur mit bekanntem Bildmaßstab  $M_b$  ermitteln. Die Bildmaßstabszahl ist durch das Verhältnis von Aufnahmeentfernung und Bildweite (Entfernung der Bildebene zum Projektionszentrum) definiert. Die Aufnahmeentfernung ist für jeden Punkt individuell und, insbesondere in der Nahbereichsphotogrammetrie, a-priori nicht bekannt. Die Bestimmung der drei unbekannt Objektkoordinaten je Punkt lässt sich über die Hinzunahme weiterer Beobachtungen in einem zweiten Bild realisieren. Aus diesem Stereobildfall, in welchem beide Bilder den gesuchten Punkt abbilden, ergeben sich nun zwei Strahlen, die sich im Objektpunkt schneiden und somit vier Beobachtungen. Für eine erhöhte Redundanz und dem damit verbundenen Zuverlässigkeitsgewinn können auch weitere Bilder für die Punktbestimmung herangezogen werden.

### 2.1.2 Innere und äußere Orientierung

In aller Regel ist man an den Koordinaten der Messpunkte in einem übergeordneten System interessiert. Zudem müssen die in den einzelnen Bildern und somit in verschiedenen Bezugs-

<sup>2</sup>Tatsächlich gibt es bei mehrlinsigen Objektiven abhängig von Ein- und Austrittspupille zwei Projektionszentren und der Strahlenverlauf ist nur im Idealfall geradlinig (siehe Kapitel 3.2.4)

systemen beobachteten Bildkoordinaten in Zusammenhang gebracht werden, um daraus die gesuchten Objektkoordinaten ableiten zu können. Dafür werden im Falle eines zentralperspektivischen Bildes neun unabhängige Parameter benötigt [KRAUS 2004]. Die Position des Projektionszentrums im Bildkoordinatensystem ist durch die *innere Orientierung* der Kamera vorgegeben. Die Kammerkonstante  $c$  beschreibt hierbei den Abstand zur Bildebene und der Bildhauptpunkt  $H'(x'_0, y'_0)$  näherungsweise die Lage der Bildmitte. Zudem können Verzerrungsparameter  $\Delta x$  und  $\Delta y$ , welche Abweichungen vom zentralperspektivischen Modell beschreiben, neben Bildhauptpunkt und Kammerkonstante in einer Kalibrierung bestimmt (siehe Kapitel 3.2.4) oder auch als zusätzliche Parameter mitgeschätzt werden. Verschiebt man das Bildkoordinatensystem in das Projektionszentrum ergibt sich der Bildvektor  $\mathbf{x}'$  laut [LUHMANN 2003] zu:

$$\mathbf{x}' = \begin{pmatrix} x' \\ y' \\ z' \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} x' - x'_0 - \Delta x' \\ y' - y'_0 - \Delta y' \\ -c \end{pmatrix}. \quad (2.1)$$

Die Lage und Orientierung des Bildkoordinatensystems im übergeordneten Objektkoordinatensystem sind durch den Vektor  $\mathbf{X}_0$  des Projektionszentrums und der Rotationsmatrix  $\mathbf{R}$  mit den Drehungen  $\omega$ ,  $\phi$  und  $\kappa$  um die drei Koordinatenachsen definiert. Diese sechs Parameter werden als *äußere Orientierung* bezeichnet:

$$\begin{aligned} \mathbf{X}_0 &= \begin{pmatrix} X_0 \\ Y_0 \\ Z_0 \end{pmatrix} \quad (2.2) \\ \mathbf{R} &= \mathbf{R}_\omega \cdot \mathbf{R}_\phi \cdot \mathbf{R}_\kappa \\ &= \begin{pmatrix} \cos \phi \cos \kappa & & -\cos \phi \sin \kappa & \sin \phi \\ \cos \omega \sin \kappa + \sin \omega \sin \phi \cos \kappa & \cos \omega \cos \kappa - \sin \omega \sin \phi \sin \kappa & -\sin \omega \cos \phi \\ \sin \omega \sin \kappa - \cos \omega \sin \phi \cos \kappa & \sin \omega \cos \kappa + \cos \omega \sin \phi \sin \kappa & \cos \omega \cos \phi \end{pmatrix} \\ &= \begin{pmatrix} r_{11} & r_{12} & r_{13} \\ r_{21} & r_{22} & r_{23} \\ r_{31} & r_{32} & r_{33} \end{pmatrix}. \quad (2.3) \end{aligned}$$

Die äußere Orientierung muss für jedes Bild bestimmt werden. Bei der Verwendung der Kollinearitätsgleichungen (Kapitel 2.1.3) werden dafür mindestens drei Passpunkte benötigt [LUHMANN 2003]. Die Bestimmung der äußeren Orientierung gleicht dem Rückwärtseinschneiden nach [KAHMEN 2006].

### 2.1.3 Kollinearitätsgleichungen

Die Bestimmung eines Objektpunktes stellt sich geometrisch als eine Addition des Ortsvektors  $\mathbf{X}_0$  und dem Vektor vom Projektionszentrum zum Objektpunkt dar. Dieser Vektor ist nicht direkt zu bestimmen, lässt sich aber mit Hilfe des in Gleichung (2.1) beschriebenen

Bildvektors  $\mathbf{x}'$  darstellen, da beide aufgrund des Kollinearitätsprinzips dieselbe Orientierung haben. Dafür wird dieser mit einem Maßstabsfaktor  $m$  skaliert und in das übergeordnete System rotiert. Durch Addition mit dem Ortsvektor des Projektionszentrums  $\mathbf{X}_0$  ergibt sich der Objektpunkt im Objektkoordinatensystem:

$$\mathbf{X} = \mathbf{X}_0 + m \cdot \mathbf{R} \cdot \mathbf{x}' \quad (2.4)$$

$$\mathbf{x}' = \frac{1}{m} \cdot \mathbf{R}^{-1} \cdot (\mathbf{X} - \mathbf{X}_0)$$

$$\begin{pmatrix} x' - x'_0 - \Delta x' \\ y' - y'_0 - \Delta y' \\ -c \end{pmatrix} = \frac{1}{m} \cdot \begin{pmatrix} r_{11} & r_{21} & r_{31} \\ r_{12} & r_{22} & r_{32} \\ r_{13} & r_{23} & r_{33} \end{pmatrix} \cdot \begin{pmatrix} X - X_0 \\ Y - Y_0 \\ Z - Z_0 \end{pmatrix}. \quad (2.5)$$

Durch Division der ersten beiden Gleichungen des linearen Gleichungssystems in Gleichung (2.5) durch die dritte ergeben sich die vom unbekanntem Maßstabsfaktor unabhängigen Kollinearitätsgleichungen:

$$x' = x'_0 - c \cdot \frac{r_{11} \cdot (X - X_0) + r_{21} \cdot (Y - Y_0) + r_{31} \cdot (Z - Z_0)}{r_{13} \cdot (X - X_0) + r_{23} \cdot (Y - Y_0) + r_{33} \cdot (Z - Z_0)} + \Delta x'$$

$$y' = y'_0 - c \cdot \frac{r_{12} \cdot (X - X_0) + r_{22} \cdot (Y - Y_0) + r_{32} \cdot (Z - Z_0)}{r_{13} \cdot (X - X_0) + r_{23} \cdot (Y - Y_0) + r_{33} \cdot (Z - Z_0)} + \Delta y'. \quad (2.6)$$

Mit diesen Gleichungen ist ein Bezug zwischen den beobachteten Bildkoordinaten und den unbekanntem Objektkoordinaten sowie Elementen der inneren und äußeren Orientierung hergestellt. Die Gleichungen (2.6) lassen sich direkt als funktionaler Zusammenhang in einer Ausgleichung (siehe Kapitel 2.2) interpretieren.

## 2.2 Grundlagen der Statistik

Im Sinne einer zuverlässigen Lösung ist man bestrebt überbestimmte Ansätze zu verfolgen, in denen die Anzahl der Beobachtungen die Anzahl der Unbekannten übersteigt. Die so erhaltene Redundanz in den Beobachtungen erlaubt die Kontrolle und somit das Aufdecken grober Fehler. Zudem sind diese Ansätze essentiell für die Angabe von Genauigkeitsmaßen, die die Qualität des Ergebnisses widerspiegeln. Im Folgenden werden kurz die wichtigsten Genauigkeitsmaße vorgestellt und die numerische Varianzfortpflanzung mit Hilfe der Monte-Carlo-Methode erklärt.

### 2.2.1 Genauigkeitsmaße

Bei einer Messreihe ergeben sich im Sinne der Überbestimmung mehrere Werte für eine Beobachtung, welche im Rahmen der Statistik als Zufallsgröße charakterisiert werden kann [NIEMEIER 2001]. Eine adäquate Möglichkeit für die Schätzung des Erwartungswertes  $\mu_x$  für die Beobachtung  $x$  ist die Berechnung des empirischen Mittelwertes  $\bar{x}$  aus  $n$  Werten. Aus

den Abweichungen von diesem Mittelwert lässt sich die erwartungstreue empirische Varianz berechnen:

$$s_x^2 = \frac{1}{n-1} \sum_{i=1}^n (x_i - \bar{x}). \quad (2.7)$$

Die empirische Standardabweichung ist als die positive Wurzel der Varianz definiert<sup>3</sup>:

$$s_x = +\sqrt{s_x^2}. \quad (2.8)$$

Für eine unendlich große Messreihe  $n \rightarrow \infty$  ergeben sich theoretische Varianz und Standardabweichung  $\sigma_x^2$  bzw.  $\sigma_x$ , welche beispielsweise als Herstellerangabe für die Genauigkeit eines Messinstruments eine Rolle spielen. Insbesondere in der Photogrammetrie ist die Angabe einer relativen Genauigkeit von Bedeutung, zum Beispiel die relative Längenmessgenauigkeit, bei der die Standardabweichung auf die absolute Größe der Beobachtung (die Länge) bezogen wird:

$$\sigma_{xRel} = \frac{\sigma_x}{x}. \quad (2.9)$$

Mittelwert und Varianz sind die beiden ersten charakteristischen Kenngrößen einer Zufallsvariablen<sup>4</sup> und für die Beschreibung einer Messreihe stochastisch unsicherer Größen zum Beispiel in Form einer Normalverteilung entscheidend. Nach dem *zentralen Grenzwertsatz* sind voneinander unabhängige Zufallsvariablen, aus denen sich photogrammetrische Beobachtungen zusammensetzen, in der Regel normalverteilt.

## 2.2.2 Monte-Carlo-Methode

Häufig ist es das Ziel einer Analyse Unsicherheiten einzelner stochastischer Beobachtungen ( $\Sigma_{xx}$ ) auf eine daraus abgeleitete Zielgröße ( $\Sigma_{yy}$ ) zu übertragen. Dies gelingt mit Hilfe des allgemeinen *Varianz-Fortpflanzungs-Gesetzes*:

$$\Sigma_{yy} = \mathbf{A}\Sigma_{xx}\mathbf{A}^T. \quad (2.10)$$

Die Matrix  $\mathbf{A}$  ist die nicht-stochastische Funktionalmatrix (*Jacobi-Matrix*), in der die partiellen Ableitungen der Funktionen nach den Eingangsgrößen stehen. Bei einem nicht-linearen Zusammenhang sind die partiellen Ableitungen in der *Jacobi-Matrix* nicht mehr absolut und von Näherungswerten abhängig. Bei hochgradig nichtlinearen Systemen kann es so zu Fehlern in der Einschätzung der fortgepflanzten Varianzen kommen [SIMON 2006]. Eine Möglichkeit diese Fehler zu vermeiden ist die Verwendung der *Monte-Carlo-Methode*.

---

<sup>3</sup>Im Folgenden wird der *Root Mean Square (RMS)* als Maß für die Güte der Messung verwendet, welcher als Wurzel der Summe der quadratischen Abweichungen vom Mittel der empirischen Standardabweichung entspricht

<sup>4</sup>Weitere sind zum Beispiel Schiefe und Exzess

Sind die Verteilungen der einzelnen Beobachtungen bekannt, können unabhängige Zufallswerte generiert werden. Über den funktionalen Zusammenhang wird aus den Zufallswerten die Zielgröße berechnet. Eine hohe Anzahl Zufallswerte erlaubt eine signifikante empirische Schätzung des Mittelwertes und der Varianz der Zielgröße nach Gleichung (2.7). Die Monte-Carlo-Methode ist entgegen der Varianzfortpflanzung mit Gleichung (2.10) ein numerisches Verfahren, was zur Folge hat, dass bei einer großen Anzahl Zufallswerte die Berechnungszeit steigt, das Ergebnis jedoch umso sicherer wird.

## 2.3 Photogrammetrie bei der *Airbus Operations GmbH* Bremen

Die photogrammetrische Vermessung von Bauteilen ist seit 2007 in den Produktionsablauf der strategischen Transportmaschine A400M integriert. Das europäische Gemeinschaftsprojekt befindet sich noch in der Testphase. Ende 2009 flog der erste Prototyp seinen Jungfernflug und seit November 2010 werden die ersten Serienmodelle gefertigt. Dabei befindet sich sowohl die Landeklappenfertigung als auch die Rumpfmontage und die Ausrüstung in Bremen. Der Rumpf wird aus mehreren Sektionen zusammengesetzt (Abbildung 2.2), zudem werden am Rumpf Flügel, Fahrwerksgondel und Seitenleitwerk in Sevilla, die Rampe und das Frachttor in Bremen befestigt. Diese Trennstellen am Rumpf werden nach Abschluss der primären Arbeiten vermessen, um die Abweichungen vom Modell und somit die Qualität bestimmen und für die weitere Fertigung verwenden zu können. Bei der Vermessung einer Sektion werden zum Beispiel das Außen-Hautfeld und die Position der *Stringer*<sup>5</sup> überprüft. Hinzu kommen verschiedene Beschläge zum Beispiel für die Befestigung und Verriegelung der Rampe und des Frachttores. Für diese Bauteile sind speziell gefertigte Adapter<sup>6</sup> vorhanden, welche mit photogrammetrischen Zielmarken bestückt werden. Da es sich beim Außen-Hautfeld um ein flächenhaftes Bauteil handelt und die Überprüfung aller verbauten *Stringer* im Allgemeinen unnötig ist, wird in der sogenannten *Ground Test Instruction (GTI)* festgelegt, wo die jeweiligen Adapter zu befestigen sind. Über sogenannte *F-Holes*<sup>7</sup>, deren Position als fest angesehen wird, kann die Messung in das übergeordnete Flugzeugkoordinatensystem transformiert werden (Abbildung 2.3). An den anderen Trennstellen wird ähnlich verfahren, dabei wird bei einigen Messungen eine feste 3-2-1-Ausrichtung der Objektpunkte durchgeführt, bei anderen erfolgt eine überbestimmte Lagerung auf die Passpunkte.

Die Aufnahme des Objektes erfolgt mit dem photogrammetrischen Messsystem *V-STARs* welches im Folgenden kurz beschrieben wird.

### 2.3.1 Photogrammetrie-Messsystem *V-STARs*

Das Messsystem *V-STARs* von *GSI* wird in Deutschland von der *GDV-Systems GmbH* vertrieben. Das System bei *Airbus* in Bremen besteht aus der gleichnamigen Auswertesoftware

---

<sup>5</sup>*Stringer* sind Streben längs zur Flugrichtung, die der Steifigkeit der Sektion dienen

<sup>6</sup>*Kalay CNC Technik GmbH*

<sup>7</sup>F-Holes sind Fertigungsbohrungen in den ringförmigen Spanten, die ein Teil des Rumpfgerüsts bilden

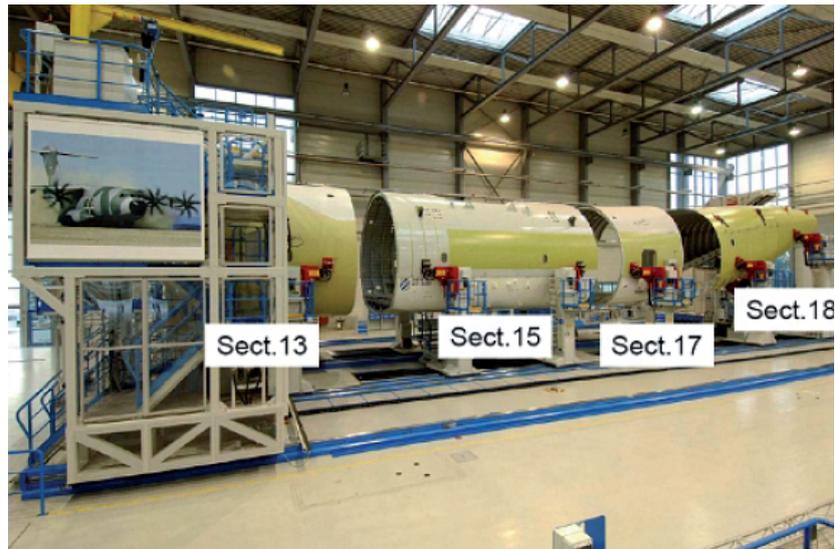


Abbildung 2.2: Rumpfsktionen der A400M [LOHSE 2008]

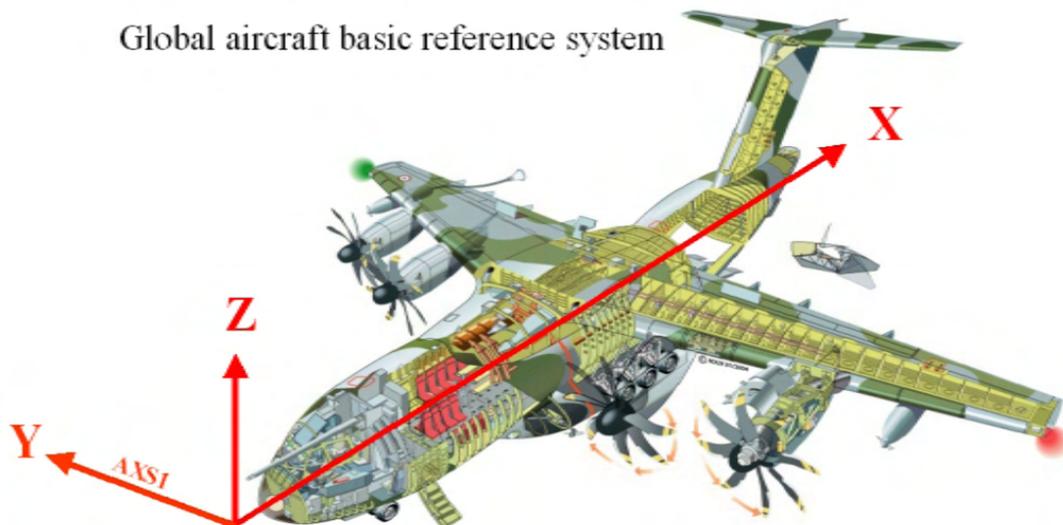
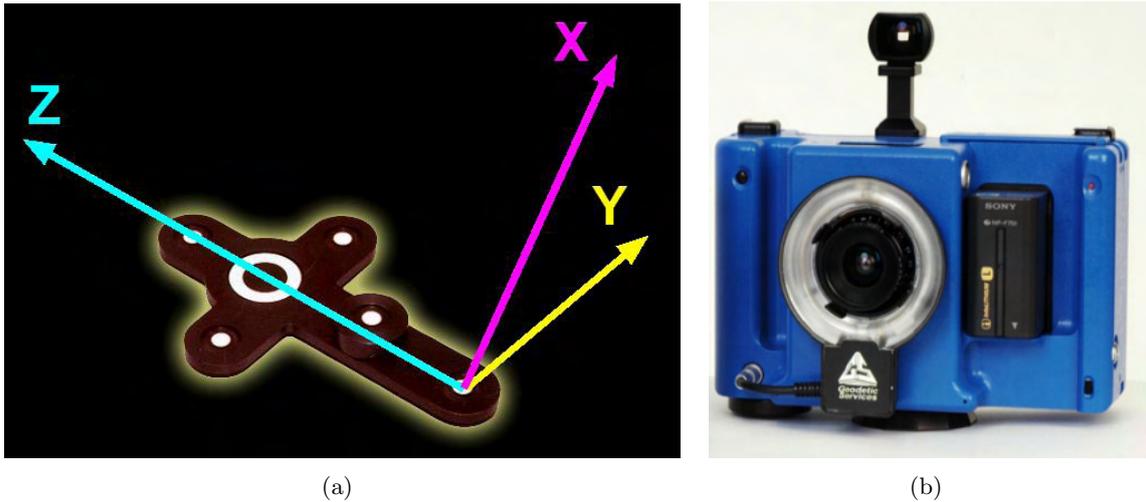


Abbildung 2.3: Flugzeug-Referenzsystem [LOHSE 2008]

und zwei *INCA3*-Kameras (Abbildung 2.4(b) und Tabelle 2.1) sowie dem nötigen Zubehör wie Stative und diverse Taster. Weiterhin kommen retroreflektierende Zielmarken von *Hubbs Machine & Manufacturing, Inc.* zum Einsatz. Das Matching der Bilder gelingt durch codierte Marken. Die *Autobar* bestimmt das Koordinatensystem, in dem die Bilder orientiert werden (Abbildung 2.4(a)).

Die Messung kann auf zweierlei Art und Weise stattfinden: Beim *Single*-Modus werden mit einer Kamera Bilder eines für die Dauer der Aufnahme in sich statischen Objektes gemacht und im Nachhinein ausgewertet (Offline-Modus). Der *Multi*-Modus basiert auf der zeitlich synchronisierten Aufnahme zweier Kameras, welche dieselbe Szene zum selben Zeitpunkt aus zwei verschiedenen Blickwinkeln aufzeichnen (Online-Modus). Die Orientierung



**Abbildung 2.4:** Autobar (a) und *INCA3*-Kamera (b) von *GSI* [GSI 2009a], [GSI 2009b]

Sensor	3500 x 2300px, 12-bit
Bildgröße	ca. 800kB komprimiert
Kammerkonstante	21mm
Sichtfeld	77° x 56°
Datenübertragung	PCMCIA-Card, Kabel oder WLAN
Gewicht	<2kg

**Tabelle 2.1:** Eigenschaften der *INCA3* Kamera

des Stereobildpaares geschieht dabei beispielsweise über einen zuvor ausgeführten *Single-Job*. Der Vorteil des *Multi-Modus* ist, dass nicht alle zu messenden Objektpunkte mit Messmarken ausgestattet sein müssen, sondern mit Tastern gemessen werden können. Für jeden auf diese Weise gemessenen Punkt steht somit nur ein Stereobildpaar für die Koordinatenbestimmung zur Verfügung, weshalb im Allgemeinen die Genauigkeit im *Single-Modus* etwas besser als im *Multi-Modus* ist, da durch die höhere Anzahl an Bildern mehr Strahlen zum Schnitt gebracht werden können<sup>8</sup>. Die Auswertung sowie die Koordinierung der Messung im *Multi-Modus* gelingt mit der Auswertesoftware *V-STARs*, welche abschließend die Objektkoordinaten und die Güte der Messung in Form von *RMS* und *plan quality factor*, einem Maß für die Netzgeometrie, ausgibt. Zusätzlich lassen sich auch die Kalibrierungsparameter der Kamera und die äußeren Orientierungen der Aufnahmen exportieren.

### 2.3.2 Photogrammetrie-Auswertesoftware *Australis*

Aufgrund der fehlenden Möglichkeit für den Anwender in *V-STARs* Bildkoordinaten zu exportieren, wird in dieser Arbeit zu Analysezwecken ebenfalls die Auswertesoftware *Australis*

<sup>8</sup>Die Genauigkeit eines *Single-Jobs* wird mit  $5\mu\text{m} + 5\frac{\mu\text{m}}{\text{m}}$ , die eines *Multi-Jobs* mit  $10\mu\text{m} + 10\frac{\mu\text{m}}{\text{m}}$ , bzw.  $100\mu\text{m} + 10\frac{\mu\text{m}}{\text{m}}$  bei Verwendung eines Tasters angegeben [GDV-SYSTEMS 2005]

von *Photometrix* verwendet. Diese Software wurde speziell für Offline-Messungen entwickelt und bietet im Allgemeinen dieselbe Funktionalität wie *V-STARs* mit dem Vorteil, dass sich hiermit separat für jedes Bild die Bildkoordinaten aller Punkte für die Weiterverarbeitung exportieren lassen. Allerdings wird das Bildformat der *INCA3*-Kamera nicht unterstützt, so dass die Bilder vor der Auswertung konvertiert werden müssen<sup>9</sup>. Beide Auswerteprogramme sind laut [SETAN und IBRAHIM 2004] in der Genauigkeit der Ergebnisse vergleichbar.

---

<sup>9</sup>Im Rahmen dieser Arbeit sind zu Analyse Zwecken *INCA3*-Aufnahmen durch Simon Cronk von der Firma *Photometrix* konvertiert worden

# Kapitel 3

## Genauigkeitsanalyse

Die Genauigkeit einer photogrammetrischen Messung lässt sich vorab mit Hilfe der Punktmessgenauigkeit und dem Bildmaßstab ermitteln. Die Punktmessgenauigkeit  $\sigma_{x'}$  entspricht der Unsicherheit einer Beobachtung, welche im funktionalen Zusammenhang mit der Bildmaßstabszahl  $m_b$  die Genauigkeit eines Objektpunktes  $\sigma_X$  darstellt:

$$\sigma_X = m_b \cdot \sigma_{x'}. \quad (3.1)$$

In der Literatur ([LUHMANN 2003], [SCHLÖGELHOFER 1989], [FRASER 1996]) werden Design-Faktoren  $q$  vorgeschlagen, welche die Varianz-Fortpflanzung entsprechend der geometrischen Aufnahmekonfiguration gewichten:

$$\sigma_X = q \cdot m_b \cdot \sigma_{x'}. \quad (3.2)$$

Diese Abschätzung ist allerdings rein theoretisch, in der Praxis hängt die Genauigkeit der photogrammetrischen Messung von einer Reihe Faktoren ab, die in diesem Kapitel genauer analysiert werden sollen. Dafür werden zunächst die optische Prozesskette erläutert und die Faktoren gemäß dieses Ablaufs strukturiert. Die Untersuchung umfasst eine Beschreibung und Quantifizierung des Einflusses. In einigen theoretischen Berechnungen soll das Unsicherheitspotential der Faktoren verdeutlicht werden. Die Erkenntnisse daraus werden dann in Beziehung zur Situation bei der *Airbus Operations GmbH* gebracht.

### 3.1 Optische Prozesskette

Die optische Prozesskette, wie sie von [WIGGENHAGEN und RAGUSE 2003] beschrieben wird, umfasst den groben, chronologischen Ablauf einer photogrammetrischen Messaufgabe:

- Vorbereitung der Aufnahme
- Bildaufnahme
- Auswertung des Bildverbandes

Für eine Analyse ist eine detailliertere Aufteilung der drei Teilprozesse hilfreich. Abbildung 3.1 zeigt schematisch die für eine Genauigkeitsanalyse relevanten Parameter.

Vorbereitung		
Ausrüstung	Maßstäbe und Adapter  Zielmarken  Kamera	- Konstruktions-Toleranzen  - Konstruktions-Toleranzen - Kontrast - Verdeckung u. Abschattung - Abb.-Exzentrizität u. Größe  - Innere Orientierung - Stellgrößen
Bestückung	Pass- und Verknüpfungspunkte	- Verteilung - Anzahl
Bildaufnahme		
Umgebung		- Temperatur - Lichtverhältnisse
Aufnahmestandpunkte		- Überdeckung - Schnittwinkel - Betrachtungsrichtung
Auswertung		
		- Stochastisches Modell - Datumsgebung - Linearisierung

**Abbildung 3.1:** Schematische Darstellung der Prozesskette und der zu untersuchenden Faktoren

Die Faktoren in diesen einzelnen Teilprozessen sind teilweise voneinander abhängig und beeinflussen sich gegebenenfalls gegenseitig. So führt ein niedriger Betrachtungswinkel zu einer Verdeckung und Abschattung bei einer maskierten Zielmarke, was sich wiederum in einem niedrigeren Kontrast im Bild äußern kann. In einigen Fällen lassen sich Fehler bei der Vorbereitung und Aufnahme durch eine hohe Redundanz kompensieren [WIGGENHAGEN und RAGUSE 2003]. Eine Betrachtung einzelner Faktoren hilft dagegen die Quellen der Unsicherheiten aufzudecken und bereits während der Messung die Auswirkungen abschätzen zu können, so dass diese Fehler vermieden werden können.

## 3.2 Vorbereitung

Die Vorbereitung des zu messenden Objektes impliziert alle Schritte, die nötig sind, bevor das Objekt aufgenommen werden kann. Bei *Airbus* erfolgt die Aufnahme von den Trennstellen in der Rumpffertigung (Kapitel 2.3). Dafür müssen die Bereiche, welche in der *GTI* aufgeführt und somit für die Qualitätsbeurteilung des Endproduktes von Bedeutung sind, mit speziellen Adaptern ausgerüstet werden, die dann mit Zielmarken unterschiedlicher Bauweise bestückt werden. Für die Verknüpfung des Bildverbandes werden codierte Marken geklebt und Maßstäbe für die Überführung in das metrische System platziert.

Diese Ausstattungselemente induzieren eine Reihe von Unsicherheiten in die Messung, welche zum einen konstruktionsbedingt sind, zum anderen aber auch vom betriebenen Aufwand bei der Vorbereitung und der geometrischen Konfiguration der Aufnahme abhängen. Ebenfalls entscheidend für die Aufnahme und Auswertung sind die Stellgrößen der Messkamera, wie Belichtungszeit und Blitzstärke.

### 3.2.1 Maßstäbe und Adapter

Bei den eingesetzten Maßstäben und Adaptern ergeben sich fertigungsbedingt unabdingbare Unsicherheiten, welche in das Endergebnis einfließen. So muss die Länge eines Maßstabs in der Ausgleichung als stochastisch unsicher aufgefasst werden. Diese Abweichung schlägt sich auf die zu messenden Punktpositionen nieder. In der Regel ist die Länge des Maßstabs auf wenige  $\mu m$  genau bestimmt. Aufgrund der zur Länge relativen Unsicherheit variiert die Varianz der photogrammetrischen Punktbestimmung mit dem Abstand der Punkte zueinander linear. Häufig ist es sinnvoll, Maßstäbe in der Größe des zu messenden Objektes zu verwenden, damit sich die relative Längenmessunsicherheit mit zunehmendem Punktabstand nicht so stark fortpflanzt. Zudem ist eine redundante Anzahl bekannter Längen zu kontrollzwecken sinnvoll. Die Anordnung sollte in drei senkrecht zueinander stehenden Richtungen erfolgen, um damit eine in alle Richtungen gleichmäßige Passinformation zu erreichen. Weiterhin ist eine möglichst zwangsfreie Positionierung erstrebenswert, um den Durchhang und eine Verbiegung zu vermeiden.

Bei der *Airbus Operations GmbH* in Bremen stehen Maßstäbe zwischen  $1m$  und  $3m$  zur



**Abbildung 3.2:** *Stringer* und *Buttstrap*-Adapter (Mitte) befestigt an der Außenhaut der Sektion 18

Verfügung, die für die jeweiligen Aufgaben herangezogen werden. Allerdings ist der Rumpfdurchmesser mit über  $5m$  beinahe doppelt und der Bereich des Flügelanschlusses mit mehr als  $15m$  Länge fünf mal so groß, weshalb die Fehlerfortpflanzung nicht optimal ist. Jedoch ist das Verwenden größerer Maßstäbe wegen der Handhabung sowie durch die Situation am Messobjekt erschwert, da häufig zu wenig Platz vorhanden ist oder diverse Bauteile die Platzierung der Maßstäbe behindern.

Bei der Fertigung der Messadapter aus Stahl sind ebenfalls Toleranzen im zweistelligen  $\mu m$ -Bereich üblich<sup>1</sup>. Allerdings haben diese Unsicherheiten keinen Einfluss auf die Präzision der photogrammetrischen Messung, aufgrund des systematischen Einflusses betreffen sie die Richtigkeit und somit die Zuverlässigkeit der Ergebnisse.

Beispielsweise ist der *Stringer*-Adapter mit drei Zielmarken bestückt, welche zusammen ein gleichseitiges Dreieck und eine Ebene aufspannen. Der repräsentierte Punkt liegt in einem definierten Abstand vom Schwerpunkt des Dreiecks entlang des Normalenvektors der Ebene am Befestigungsarm. Um die Unsicherheit des repräsentierten Punktes zu simulieren, wird dessen Position zunächst rechnerisch hergeleitet. Der Normalenvektor lässt sich aus Vektoren zwischen den drei Punkten  $\mathbf{x}_1$ ,  $\mathbf{x}_2$  und  $\mathbf{x}_3$  folgendermaßen bestimmen:

$$\mathbf{x}_n = \frac{\mathbf{x}_1 - \mathbf{x}_2 \times \mathbf{x}_1 - \mathbf{x}_3}{|\mathbf{x}_1 - \mathbf{x}_2| \times |\mathbf{x}_1 - \mathbf{x}_3|} = \frac{\begin{pmatrix} x_1 - x_2 \\ y_1 - y_2 \\ z_1 - z_2 \end{pmatrix} \times \begin{pmatrix} x_1 - x_3 \\ y_1 - y_3 \\ z_1 - z_3 \end{pmatrix}}{\left| \begin{pmatrix} x_1 - x_2 \\ y_1 - y_2 \\ z_1 - z_2 \end{pmatrix} \right| \times \left| \begin{pmatrix} x_1 - x_3 \\ y_1 - y_3 \\ z_1 - z_3 \end{pmatrix} \right|}. \quad (3.3)$$

Der Schwerpunkt des konstruierten gleichschenkligen Dreiecks resultiert als Mittel der drei Punktkoordinaten:

<sup>1</sup>Die von *Kalay CNC-Technik GmbH* gefertigten Adapter haben Toleranzen zwischen  $\pm 30 - 50 \mu m$

	Adapterpunkte [mm]			Stringer [mm]	VKM [mm <sup>2</sup> ]		
X	25834,81	25837,00	25835,92	26008,87	0,0034	0	0,0003
Y	-122,42	-121,22	-35,16	-92,81	0	0,0088	0
Z	2841,03	2741,04	2792,15	2795,20	0,0003	0	0,0157

**Tabelle 3.1:** Monte-Carlo-Simulation der Punktunsicherheit eines konstruierten *Stringer*-Punktes (Stichprobengröße: 10000)

$$\mathbf{x}_S = \frac{1}{3}(\mathbf{x}_1 + \mathbf{x}_2 + \mathbf{x}_3). \quad (3.4)$$

Der repräsentierte Punkt lässt sich nun über polares Anhängen mit der Strecke  $s$  vom Schwerpunkt in Richtung des Normalenvektors konstruieren:

$$\mathbf{x}_{Stringer} = \mathbf{x}_S + \begin{pmatrix} s \sin Z \cos r \\ s \sin Z \sin r \\ s \cos Z \end{pmatrix}. \quad (3.5)$$

Die Polarelemente ergeben sich aus dem normierten Normalenvektor  $Z = \arccos z_n$  und  $r = \arcsin \frac{y_n}{\sin(\arccos z_n)}$ .

Die konstruktionsbedingten Unsicherheiten der Bohrungen und die der Orthogonalität zwischen Ebene und Befestigungsarm pflanzen sich teilweise nichtlinear fort. Mithilfe der Monte-Carlo-Methode und einer Stichprobe von 10000 normalverteilten Zufallswerten, mit einem Mittelwert eines Punktes für jeden der drei Bohrungsmittelpunkte und die Länge des Befestigungsarmes kann der Einfluss auf den gesuchten Punkt in einer Simulation berechnet werden (Tabelle 3.1).

Die *Stringer*-Position spielt in radialer Richtung eine untergeordnete Rolle, wichtiger ist die Position in X- und in zum Rumpf tangentialer Richtung (siehe Abbildung 2.3). Für die Varianz in X-Richtung ist hauptsächlich die Unsicherheit der Länge des Befestigungsarmes entscheidend, weshalb die Varianz des *Stringer*-Punktes in dieser Richtung am geringsten ist. In den beiden anderen Richtungen ist die Position unsicherer. Die tangential zum Rumpf verlaufende Richtung liegt abhängig von der Lage des Adapters in der Y-Z-Ebene. Der im Beispiel oben am Rumpf befindliche Punkt ist tangential mit einer Varianz von  $0.0088mm^2$  bestimmt, was einer Standardabweichung von fast  $\frac{1}{10}mm$  entspricht.

Generell muss bei allen in ähnlicher Form konstruierten Punkten mit konstruktionsbedingten Unsicherheiten gerechnet werden, die sich in der Auswertung nicht als Impräzision bemerkbar machen. Da es sich jedoch mit Ausnahme des *Stringer*-Adapters häufig um relativ kompakte Adapter handelt, stellt die in Tabelle 3.1 simulierte Unsicherheit eine obere Grenze dar. Da es sich um einen systematischen Einfluss handelt, kann dieser Faktor nicht durch redundante Aufnahmen kompensiert werden und ist in der Auswertung zu berücksichtigen.

### 3.2.2 Zielmarken

Für photogrammetrische Messaufgaben mit hoher Genauigkeitsanforderung ist die Signalisierung von relevanten Punkten entscheidend, insbesondere im Hinblick auf eine automatisierte Punktdetektion in den Bildern. Die Signalisierung kann zum einen durch Befestigen von Zielmarken, zum anderen durch die Projektion eindeutiger Muster auf das Messobjekt geschehen. Zweiteres kann bei flächenhaften Objekten angewendet werden, wenn eine hohe Punktdichte gefordert ist, und wird in dieser Arbeit nicht weiter betrachtet. Mittels Zielmarken wird ein- und dasselbe Ziel, nämlich einen Objektpunkt eindeutig zu repräsentieren, auf unterschiedliche Art und Weise verwirklicht. Die häufigste Variante ist die kreisförmige Zielmarke, bei welcher der Objektpunkt durch den Kreismittelpunkt definiert ist. Aber auch hier gibt es Unterschiede in Art, Konstruktionsweise und Güte der Marke.

Die Beschaffenheit lässt sich prinzipiell in drei Gruppen unterteilen: Retroreflektierende Zielmarken (*Retromarken*) sind mit zwischen  $40\mu\text{m}$  und  $80\mu\text{m}$  großen, innen halb verspiegelten Glaskugeln beschichtet, die einfallendes Licht auf die verspiegelte Rückseite bündeln und parallel zum einfallenden Licht reflektieren [DOLD 1997]. Bei einer kameraseitigen Beleuchtung des Objektes bieten diese Zielmarken den Vorteil einer hohen Rückstrahlung und sorgen so für hohen Kontrast zwischen Zielmarke und Hintergrund im Bild. Eine andere Möglichkeit einen hohen Kontrast in den Bildern zu erzeugen ist die markenseitige Beleuchtung bei selbstleuchtenden Zielmarken [GÜLKER 2004], auf die im Folgenden nicht weiter eingegangen wird. Die Gruppe der diffus reflektierenden weißen Zielmarken bietet diesen Vorteil nicht. Weiterhin gibt es Unterschiede in der Konstruktionsweise. Weiße Zielmarken können beispielsweise bedruckt oder bei höheren Anforderungen an die Güte aus Epoxidharz gegossen und gedreht werden. Sie zeichnen sich besonders durch eine präzise Kreisform aus [HAIG et al. 2006]. Bei Retromarken findet man hingegen häufig maskierte Zielmarken, bei der die Glaskugel-Beschichtung mit einer Folie mit kreisförmiger Aussparung versehen wird. Ein anderes Verfahren ist das Bedrucken der Retrobeschichtung, was die Reflexion der Glaskugeln in den Randbereichen unterbindet. 3D-Zielmarken hingegen sind kugelförmig und erscheinen im Bild aus fast allen Perspektiven als Kreis, was ihre Abbildung unabhängig vom Betrachtungswinkel macht.

#### Konstruktions-Toleranzen

Bei *Airbus* in Bremen kommen ausschließlich Retromarken in vielerlei Ausführung zum Einsatz, da das *V-STARs*-Messsystem dafür optimiert ist und die Vorteile der Zielmarken in teilweise recht dunkler Umgebung<sup>2</sup> überwiegen. Natürlich muss auch bei den Zielmarken eine konstruktionsbedingte Unsicherheit in ihrer Form berücksichtigt werden. So ist bei steckbaren Zielmarken mit einem Zapfen der Durchstoßpunkt der Mittelachse des Zapfens durch die Zielmarkenebene nicht zwangsweise der Mittelpunkt des Kreises, den die Zielmarke darstellt. Laut [COLE-GRAHAM 2011] besitzen die Zielmarken eine Toleranz von etwa  $13\mu\text{m}$ , sowohl

---

<sup>2</sup>Zum Beispiel die nur an einer Seite offene Sektion 18 am Ende des Rumpfes

3D-Target	Radius [mm]	Rundheit [mm]
1	5.0759	0.008
2	5.0643	0.007
3	5.0602	0.028
4	5.0677	0.019
5	5.0688	0.012
6	5.0640	0.024

**Tabelle 3.2:** Radien und Rundheiten ausgewählter 3D-Targets

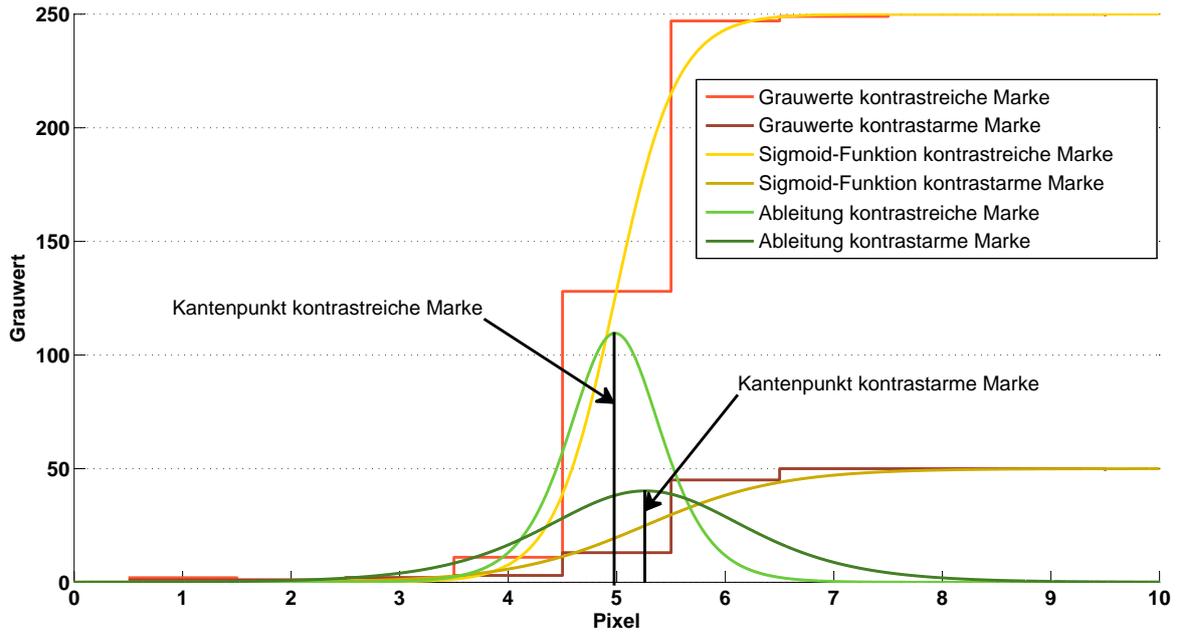
für die Koaxialität als auch für die Länge und den Zapfendurchmesser. Dadurch kumulieren sich die Punktunsicherheiten für konstruierte Punkte (siehe Beispiel in Kapitel 3.2). In Tabelle 3.2 sind die Radien und Rundheiten<sup>3</sup> einiger 3D-Targets dargestellt, die mit einer Koordinatenmessmaschine<sup>4</sup> eingemessen worden sind. Der Radius hat eine Standardabweichung von  $5.4\mu\text{m}$  und gibt Aufschluss über die Fertigungsgenauigkeit der Kugeln. Allerdings ist der Mittelpunkt im Bild nicht nur von der Größe des Radius betroffen, sondern auch vom Rundheitsmaß der Kugel. Maximale Abweichungen von fast  $30\mu\text{m}$  führen dazu, dass die Zielmarke im Bild nicht als Kreis dargestellt wird und die Berechnung des Mittelpunktes einem systematischen Einfluss unterworfen ist, welcher etwa doppelt so groß ausfällt wie der einer kreisförmigen Marke.

### Kontrast

Neben den konstruktionsbedingten Unsicherheiten der Zielmarken gibt es auch einige weitere Faktoren, welche die Messgenauigkeit in den Bildern beeinflussen. Retromarken haben den Vorteil, dass sie ankommendes Licht in die Ursprungsrichtung reflektieren. Bei einer Aufnahme mit Ringblitz, wie es beim Photogrammetriesystem *V-STARs* der Fall ist, wird das Licht gleichmäßig in Richtung Objektiv reflektiert. Dies resultiert in einem hohen Kontrast zwischen Zielmarke und Hintergrund im Bild, welcher bei weißen Zielmarken weniger stark ausfällt [OTEPEKA und FRASER 2004]. Die Messung kreis- und ellipsenförmiger Strukturen, als die sich kreisförmige Zielmarken im Bild darstellen, geschieht im Allgemeinen mit dem Stern- oder dem Zhou-Operator [LUHMANN 2003], basierend auf Algorithmen der digitalen Bildverarbeitung. Dabei wird ausgehend von einem Näherungswert für den Mittelpunkt, ermittelt nach einer Binärisierung des Bildes, nach Kanten in den Grauwerten gesucht, die den Rand der Ellipse beschreiben [NEUKAMM et al. 2010]. Aus diesen Punkten können Ellipsenparameter oder die Ellipsendurchmesser geschätzt werden. Die verwendeten Kantenoperatoren basieren auf den ersten oder zweiten Ableitungen des entlang von Schnitten interpolierten Grauwertverlaufs. Für eine korrekte Detektion der Kantenpunkte ist ein guter Kontrast zwischen Zielmarke und Hintergrund essentiell [OUELLET und HÉBERT 2009],

<sup>3</sup>Das Rundheitsmaß ist der minimale Abstand zweier konzentrischer Kugeln, die die erfassten Punkte einschließen

<sup>4</sup>Dr. Heinrich Schneider Messtechnik GmbH



**Abbildung 3.3:** Kantenzpunktbestimmung zweier Zielmarken mit unterschiedlichem Kontrast

Zielmarke	$\mu$ Kantenzpunkt $[Px]$	$\sigma$ Kantenzpunkt $[Px]$
kontrastreiche Zielmarke	4.894	0.042
kontrastarme Zielmarke	4.875	0.065

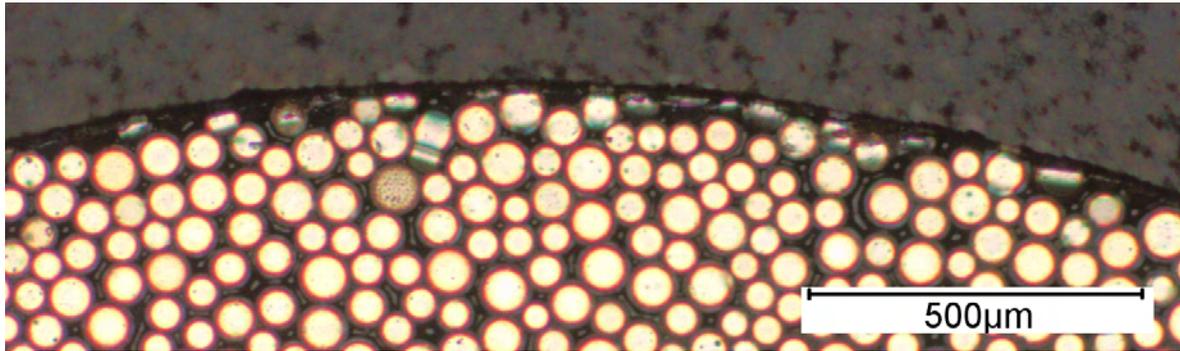
**Tabelle 3.3:** Monte-Carlo-Simulation der Berechnung von Kantenzpunkten zweier Zielmarken mit unterschiedlichem Kontrast (Stichprobengröße: 1000)

[OTEPKA und FRASER 2004].

Um den Einfluss des Kontrastes zu zeigen, werden zwei Grauwertverläufe simuliert, welche in Abbildung 3.3 dargestellt sind. Für die diskreten Grauwerte werden jeweils kontinuierliche Sigmoid-Funktionen geschätzt, deren Ableitung sich als Gaußsche Glockenkurve darstellt. Deutlich zu erkennen ist, dass die Ableitung der Sigmoid-Funktion bei der Zielmarke mit geringerem Kontrast sehr viel weiter gespreizt ist, was die Unsicherheit der Bestimmung des Kantenzpunktes erhöht.

In einer Monte-Carlo-Simulation werden je 1000 zufällige Grauwertschnitte generiert, in deren Mitte sich ein Sprung in den Grauwerten befindet. Dabei umfasst der Sprung in einem Fall fast das gesamte Grauwertspektrum, weitere 1000 haben ein Kontrastverhältnis von etwa einem Fünftel des Spektrums. Bei der Generierung der Grauwerte wird in den homogenen Bereichen vor und nach dem Sprung eine Standardabweichung von 0.5 Grauwerten angenommen. Im Bereich des Sprungs, das heißt bei Pixel 4, 5 und 6 wird von einer Standardabweichung von 2, 10 und 2 Grauwerten für die kontrastreiche bzw. 1, 3 und 1 Grauwerten für die kontrastarme Zielmarke ausgegangen. Die Ergebnisse sind in Tabelle 3.3 zusammengefasst.

Trotz der geringeren Stochastizität der simulierten Grauwerte, zeigt sich bei der kontrast-



**Abbildung 3.4:** 50-fache Vergrößerung des Randbereiches einer maskierten Zielmarke

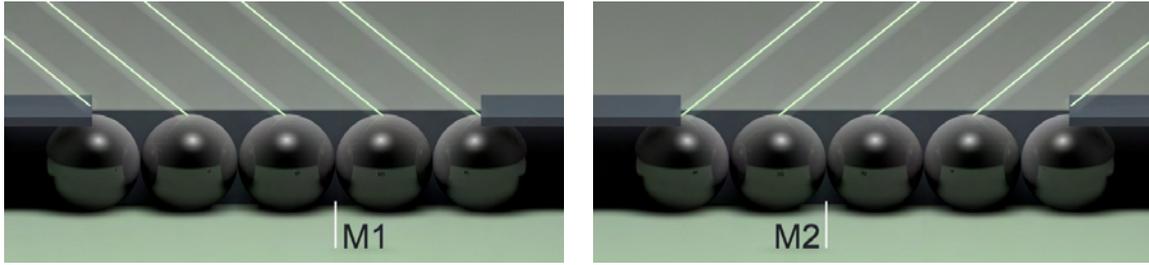
armen Zielmarke eine höhere Standardabweichung bei der Bestimmung des Kantenpunktes, welche sich auf die Lage des Mittelpunktes fortpflanzt. Erfolgt die Mittelpunktbestimmung mit Hilfe von Kantenoperatoren ist es also von Vorteil einen möglichst hohen Kontrast zwischen Zielmarke und Hintergrund im Bild zu haben, was auch die Verwendung retroreflektierender Zielmarken rechtfertigt.

### Verdeckung und Abschattung

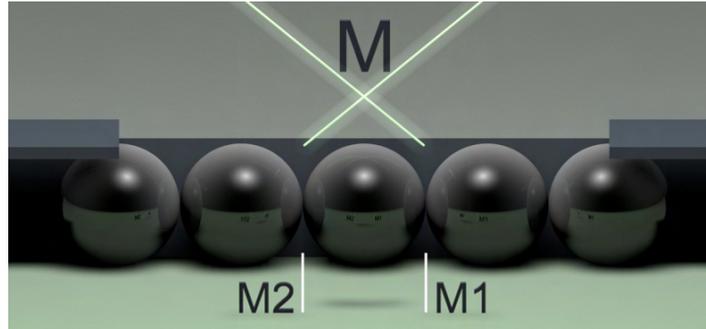
Bei Retromarken ist aufgrund ihrer Oberflächenbeschaffenheit die Realisierung einer exakten Kreisform nicht möglich. Bei einer Maskierung der Glaskugeln werden einige der Kugeln am Rand teilweise verdeckt. Abbildung 3.4 zeigt den Randbereich einer maskierten Zielmarke der *Airbus Operations GmbH* unter dem Mikroskop, in der die Verdeckung einiger Kugeln am Rand erkennbar ist. Je nach Beleuchtungs- und Betrachtungswinkel  $\alpha^5$ , welche bei der Aufnahme mit Ringblitz identisch sind, gelangt so mehr oder weniger Licht in diese Kugeln, um dort reflektiert zu werden. Dieser Effekt ist unkritisch, sobald die Zielmarke frontal beobachtet wird. Verringert sich der Betrachtungswinkel, verschiebt sich jedoch der berechnete Mittelpunkt, da sich die Stärke des reflektierten Lichts an den diametral gegenüberliegenden Seiten der Zielmarke genau antiproportional verhält (Abbildungen 3.5(a) und 3.5(b)). Wird der Mittelpunkt aus Beobachtungen unterschiedlicher Richtungen aber gleicher Betrachtungsrichtung gemittelt, befindet er sich oberhalb der Zielmarke (Abbildung 3.5(c)) [DOLD 1997]. Dies gilt jedoch nur, solange die Stärke der Verdeckung entlang des Randes und die Größe der Kugeln gleich ist. Variiert die Betrachtungsrichtung, die Stärke der Verdeckung oder die Größe der Kugeln, ergibt sich für den Mittelpunkt eine Unsicherheit in allen drei Dimensionen. Daher ist eine theoretische Quantifizierung des Einflusses schwierig. Je stärker eine Kugel verdeckt ist, desto größer ist der Betrachtungswinkel, bei welchem die Kugel kein Licht reflektiert aber desto kleiner ist der auftretende Effekt. Hinzu kommt die Heterogenität in der Verteilung der Kugeln also auch die Bereiche zwischen den Kugeln.

Die daraus resultierenden Abweichungen von der exakten Kreisform der Zielmarke machen

<sup>5</sup>Auftreffwinkel des Strahls von der Kamera auf die Zielmarkenebene



(a) Aufnahme und Belichtung von links, gemessener Mittelpunkt M1  
 (b) Aufnahme und Belichtung von rechts, gemessener Mittelpunkt M2



(c) Triangulation des Mittelpunktes M

**Abbildung 3.5:** Einfluss der Verdeckung von retroreflektierenden Kugeln durch die Maskierung

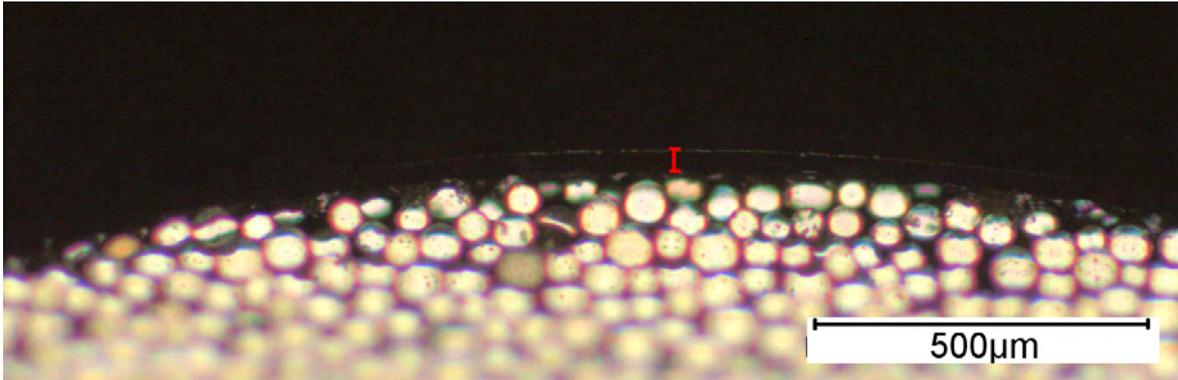
eine Korrektur des Effektes schwierig, praktische Untersuchungen in [DOLD 1997] zeigen eine Größenordnung von bis zu  $50\mu m$ . Im Hinblick auf die Bildaufnahme und Ausgleichung kann das Wissen über diesen Effekt bei der Wahl der Aufnahmestandpunkte (Kapitel 3.3.2) und der Gewichtung der Beobachtungen hilfreich sein.

Zusätzlich zur Verdeckung der zum Teil maskierten Glaskugeln spielt die durch die Dicke der Maskierung hervorgerufene Abschattung eine Rolle [DOLD 1997]. Diese Abschattung tritt ebenfalls bei einem Betrachtungswinkel  $\alpha \neq 90^\circ$  auf und verstärkt sich mit sinkendem  $\alpha$ . Abbildung 3.6 zeigt eine Schrägaufnahme des Randbereichs derselben Zielmarke aus Abbildung 3.4. In rot ist die gemessene Dicke der Zielmarke angedeutet, welche in etwa  $30\mu m$  entspricht.

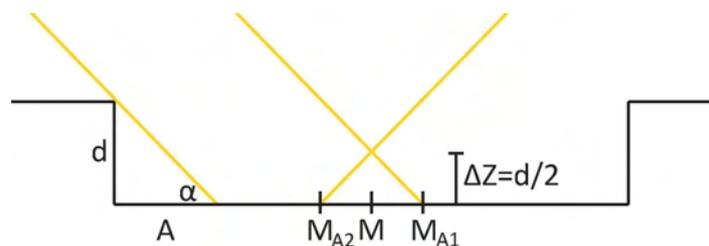
Trotz der mit sinkendem Betrachtungswinkel zunehmenden Abschattung bleibt der Einfluss für den Mittelpunkt konstant:

$$\tan \alpha = \frac{d}{A} = \frac{2\Delta Z}{A} \Leftrightarrow \Delta Z = \frac{d}{2}. \quad (3.6)$$

Nach Gleichung (3.6) führt die Abschattung  $A$  dazu, dass der Zielmarkenmittelpunkt abhängig von der Dicke  $d$  der Maskierung stets um  $\Delta Z = \frac{d}{2}$ , der halben Maskendicke, über dem wahren Mittelpunkt gemessen wird (Abbildung 3.7). Eine Abhängigkeit von der Betrachtungsrichtung  $\alpha$  besteht nicht. Die Abschattung führt also dazu, dass der gemessene Punkt stets etwa  $15\mu m$  über der eigentlichen Zielmarkenebene liegt. Dieser systematische



**Abbildung 3.6:** 50-fache Vergrößerung des Randbereiches einer maskierten Zielmarke in der Schrägansicht



**Abbildung 3.7:** Einfluss der Abschattung durch die Maskierung

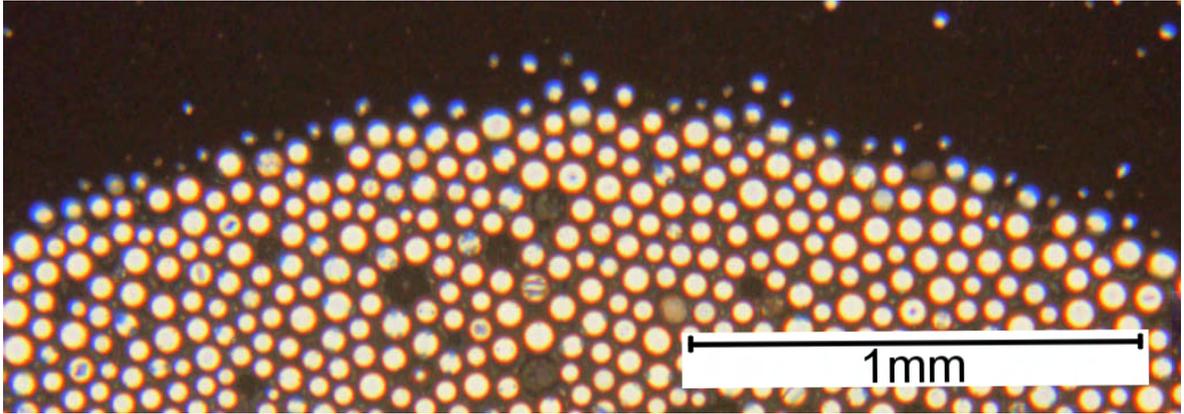
Effekt kann bei der Auswertung berücksichtigt werden.

Bei bedruckten Zielmarken bestehen diese Effekte nicht. Allerdings ist aufgrund der Oberflächenstruktur die Kreisform der Marke nur bedingt gegeben (Abbildung 3.8). Diese Art der Zielmarke kommt bei *Airbus* in Form von codierten Marken als Verknüpfungspunkt zum Einsatz. Sofern der ermittelte Mittelpunkt aus allen Richtungen derselbe ist, ist die Divergenz zum wahren Mittelpunkt unerheblich, da lediglich die Identität der Punkte von Bedeutung ist. Eine Imperfektion in der Kreisform korreliert nicht mit weiteren betrachtungsrichtungsabhängigen Einflüssen (Kapitel 3.3.2), weshalb die Konformität der Punkte gegeben ist.

### Abbildungsexzentrizität und Größe der Zielmarke

Die Betrachtungsrichtung hat einen Einfluss auf die Darstellung der kreisförmigen Zielmarke im Bild. Aufgrund der zentralperspektivischen Abbildung erscheint diese im Bild für  $\alpha \neq 90^\circ$  als Ellipse. Der berechnete Ellipsenmittelpunkt fällt dabei aufgrund der Projektion nicht mit dem Abbild des Zielmarkenmittelpunktes zusammen [DOLD 1997], [LUHMANN 2003]. Diese Abbildungsexzentrizität  $e$  hängt neben der Betrachtungsrichtung auch von der Entfernung zwischen Zielmarke und Kamera und der daraus resultierenden Größe der Zielmarke im Bild und in der Realität ab.

$$e = r_m - \frac{c}{2} \cdot \left( \frac{R_m + \frac{D}{2} \cdot \sin \alpha}{Z_m - \frac{D}{2} \cdot \cos \alpha} + \frac{R_m - \frac{D}{2} \cdot \sin \alpha}{Z_m + \frac{D}{2} \cdot \cos \alpha} \right) \quad (3.7)$$



**Abbildung 3.8:** 25-fache Vergrößerung des Randbereiches einer bedruckten Zielmarke

mit

$D$  Durchmesser der Zielmarke

$r_m$  Bildradius des abgebildeten Zielmarkenzentrums

$\alpha$  Betrachtungswinkel

$R_m$  Abstand zwischen Zielmarkenzentrum und Aufnahmeachse

$Z_m$  Aufnahmeentfernung

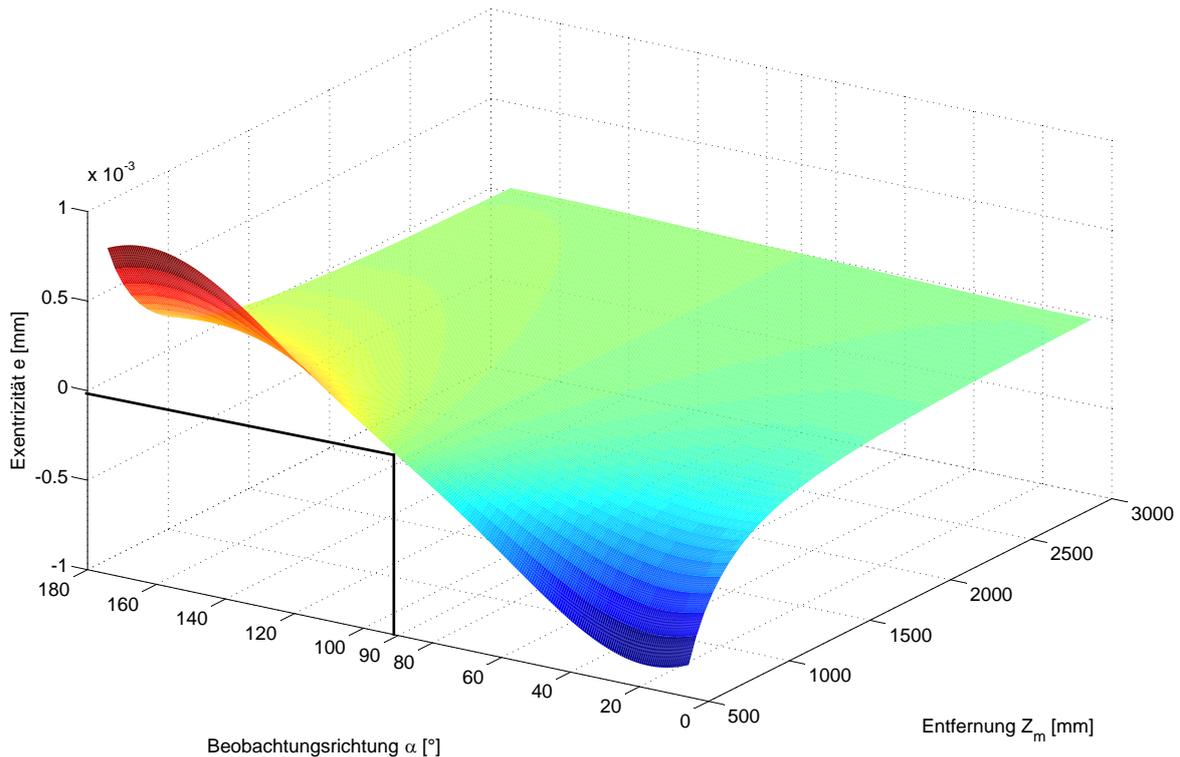
$c$  Kammerkonstante.

In Abbildung 3.9 ist die Exzentrizität in Abhängigkeit der Entfernung  $Z_m$  und dem Betrachtungswinkel  $\alpha$  aufgetragen, mit einer festen Kammerkonstante von  $c = 21mm$  und einer festen Zielmarkengröße von  $D = 6mm$ , welches der Situation bei *Airbus* entspricht. Dabei ergeben sich  $R_m$  und  $r_m$  gemäß der zentralperspektivischen Abbildung zu:

$$R_m = Z_m \cdot \sin(90^\circ - \alpha) \quad (3.8)$$

$$r_m = R_m \cdot \frac{c}{Z_m}. \quad (3.9)$$

Bei einem Betrachtungswinkel von  $\alpha = 90^\circ$ , also einer kreisförmigen Abbildung, ist der Einfluss der Exzentrizität null. Die maximale Exzentrizität tritt bei Winkeln von  $20^\circ$  bzw.  $170^\circ$  auf. Zudem wird sie mit zunehmendem Abstand schnell kleiner, sodass sie für Zielweiten ab  $2m$ , wie sie bei *Airbus* üblich sind, vernachlässigbar ist, sofern die Zielmarkengröße dieselbe bleibt. Eine andere Möglichkeit ist die rechnerische Korrektur des Einflusses mit Hilfe der in [OTEPKA und FRASER 2004] bzw. [OTEPKA 2004] vorgestellten Zielmarkenebenenbestimmung. Inwiefern diese Algorithmen in der Auswertung in *V-STARs* implementiert sind kann nicht geklärt werden.

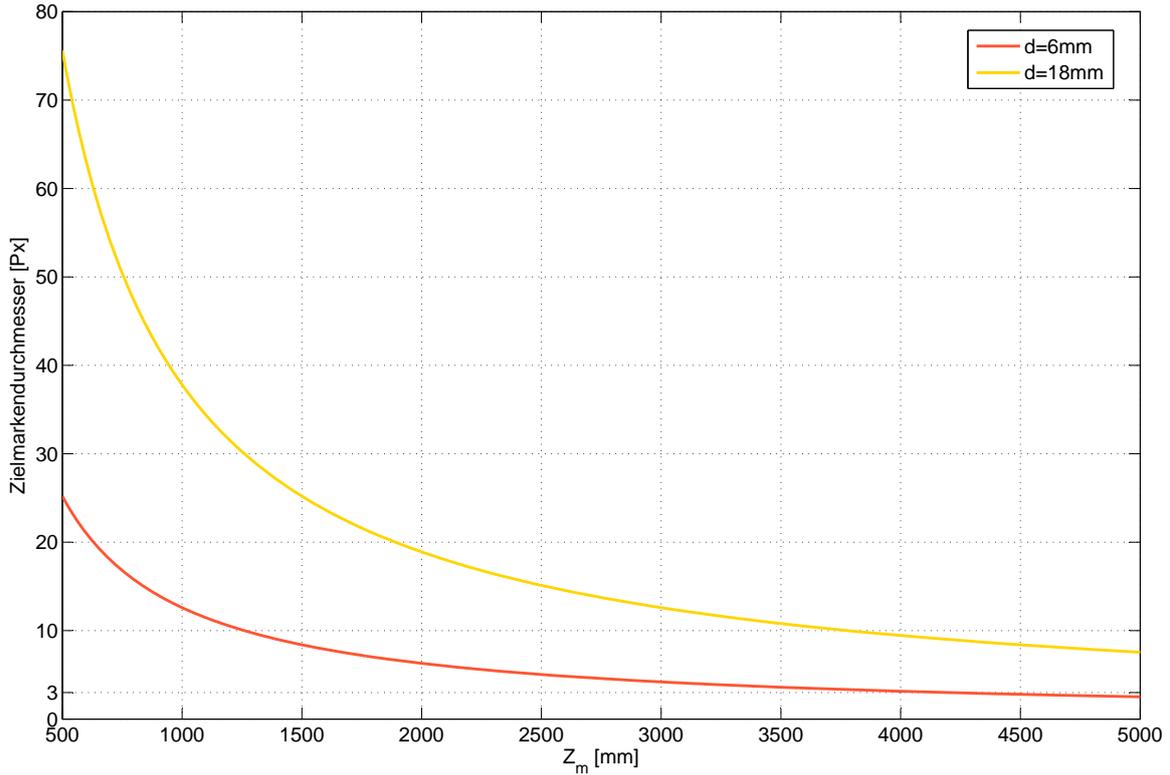


**Abbildung 3.9:** Einfluss der Exzentrizität bei variierendem Betrachtungswinkel und Abstand zwischen Zielmarke und Kamera. ( $c = 21mm, D = 6mm$ )

Aufgrund der Abbildungsexzentrizität besteht für die Größe der Zielmarke bei Einhaltung einer bestimmten Bildmessgenauigkeit eine obere Grenze. Nach Formel (3.7) sollte bei einer maximalen Abbildungsexzentrizität von  $e_{max} = 0.5\mu m^6$ , was  $\frac{1}{20}$  der Pixelgröße der *INCA3* entspricht, einem Aufnahmeabstand von  $Z_m = 2m$  und der gegebenen Kammerkonstanten  $c = 21mm$  die Zielmarke nicht größer als  $18mm$  sein. Betrachtet man dagegen die Art und Weise der Bestimmung des Ellipsenmittelpunktes mit Hilfe von Algorithmen der Bildverarbeitung wird deutlich, dass auch eine Mindestgröße für die Zielmarke gelten muss [WIGGENHAGEN und RAGUSE 2003]. Laut [GSI 2009b] sollte deren Durchmesser eine Größe von 3 Pixeln nicht unterschreiten, [DOLD 1997] nennt bei einer Verwendung eines Ellipsenoperators gar eine Mindestgröße von 20 Pixeln<sup>7</sup>. Im Sinne einer subpixelgenauen Bestimmung des Mittelpunktes, ist es erstrebenswert, dass eine Zielmarke von möglichst vielen Pixeln abgebildet wird. Unter der Berücksichtigung von  $e_{max} = 0.5\mu m$  ist eine Mindestgröße von 20 Pixeln mit einem Weitwinkelobjektiv mit  $c = 21mm$  nicht zu erreichen. Abbildung 3.10 zeigt die Größe ausgewählter Zielmarken im Bild. Die  $6mm$  große Marke hat nur bis etwa  $4.20m$  eine Größe von mehr als 3 Pixeln im Bild und erfüllt ab dann nicht mehr das von [GSI 2009b] beschriebene Kriterium.

<sup>6</sup>Das entspricht etwa der zweifachen Bildmessgenauigkeit

<sup>7</sup>Bildaufnahme mit  $c = 165mm$  bzw.  $c = 210mm$ . Durch den höheren Zoom-Faktor ist die Zielmarkengröße im Objektraum bei gleicher Pixelzahl nicht so groß, wie bei einer Aufnahme mit  $c = 21mm$



**Abbildung 3.10:** Zielmarkengröße im Bild zweier Modelle (6mm und 18mm) in Abhängigkeit zum Abstand. ( $c = 21mm$ , Pixelgröße =  $10\mu m$ )

Für Bauteile wie die Sektion 18, das Rumpfstück, bei dem aufgrund der Montageaufbauten die Sichtbarkeiten eingeschränkt und somit die Zielweiten eher klein sind, reicht ein Zielmarkendurchmesser von 6mm zur Einhaltung der unteren Grenze aus und ist aufgrund einiger Aufnahmen mit  $Z_m < 2m$  empfehlenswert. In einigen Bauplätzen können die Bauteile allerdings mit größeren Zielweiten aufgenommen werden. Bedingt durch die Messbarkeit im Bild sollten spätestens ab 4m Entfernung größere Zielmarken verwendet werden, welche aufgrund der Abbildungsexzentrizität einen Durchmesser von 18mm allerdings nicht überschreiten sollten.

### 3.2.3 Bestückung des Messobjektes

In der Bestückung wird das Messobjekt mit Adaptern und Zielmarken versehen. Dabei lassen sich, abgesehen von den Einflüssen durch Adapter und Zielmarken selbst (Kapitel 3.2.1 und 3.2.2), zwei Faktoren untersuchen, die die Genauigkeit der Messung beeinflussen: Die geometrische Verteilung, sowohl der Verknüpfungs- als auch der Passpunkte, sowie deren Anzahl.

## Verteilung

Die geometrische Verteilung der zu messenden Punkte ist in der *GTI* festgelegt, um einen Standard zu schaffen. Passpunkte liegen ebenfalls an fest vorgegebenen Stellen, allerdings wird der Bildverband zunächst auf das durch die *Autobar* definierte System bezogen und später in das gewünschte Zielkoordinatensystem transformiert. Lediglich die codierten Zielmarken für die Verknüpfung des Bildverbandes werden frei platziert. Das geschieht in der Regel nach Augenmaß, so dass zum einen eine genäherte gleichmäßige Verteilung gewährleistet ist und zum anderen alle Blickrichtungen der geplanten Kamerastandpunkte abgedeckt werden.

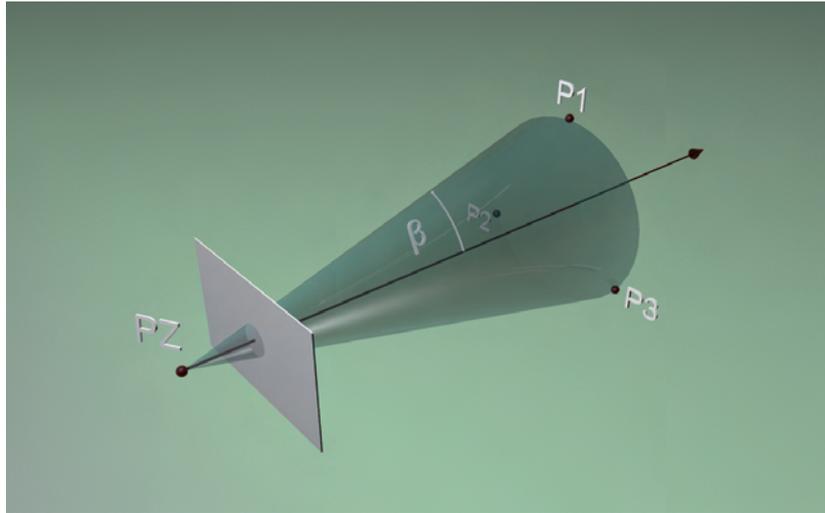
Da das *Autobar*-System die Größe des Messobjektes nicht repräsentativ erfasst<sup>8</sup>, wird es nur für die erste Näherung benutzt. Alle Punkte werden im Rahmen der Bündelausgleichung als stochastisch betrachtet, somit geschieht keine harte Lagerung. Auf die innere Genauigkeit des Bildverbandes hat somit die Verteilung der Passpunkte keinen Einfluss. Bei der Transformation auf die Passpunkte, insbesondere bei einer 3-2-1-Ausrichtung, ist deren räumliche Verteilung für die äußere Genauigkeit des Bildverbandes entscheidend, da eine schlechte Verteilung mitunter eine gewisse Hebelwirkung auf Punkte mit größerem Abstand zu den Passpunkten ausübt. Beispielsweise befinden sich in der Rumpfsktion 13 direkt hinter dem Cockpit alle Passpunkte in Fußbodennähe, da in erster Linie der Fußboden eine Ebene bilden soll. Kleine Unsicherheiten in diesem Bereich haben im oberen Teil des Rumpfes einen großen Einfluss. Laut [WIGGENHAGEN und RAGUSE 2003] sind Passpunkte insbesondere in den äußeren Bereichen des Bildverbandes erstrebenswert.

Die innere Genauigkeit des Bildverbandes ist dagegen von der Verteilung der Verknüpfungspunkte und nach einer initialen Berechnung des Bündels ebenfalls von der Verteilung der Objektpunkte abhängig. Funktional hängt die äußere Orientierung einer Aufnahme mit den Positionen der Verknüpfungs- und Objektpunkte über den Rückwärtsschnitt zusammen. Somit bildet eine über das ganze Bild verteilte Punktmenge bessere Schnittbedingungen als eine Punktmenge, die nur einen kleinen Bereich der Aufnahme abdeckt (siehe auch Kapitel 3.3.2).

In einer Monte-Carlo-Simulation lässt sich der Einfluss der Verteilung zeigen. Dafür wird aus der Minimalkonfiguration von drei bekannten Objektpunkten die äußere Orientierung eines Einzelbildes mit Hilfe der Kollinearitätsgleichungen (Gleichung (2.6)) im Gauß-Markov-Modell eindeutig berechnet. Entscheidend für die Simulation ist, dass außer dem Raumwinkel  $\beta$ , der sich aus dem durch die drei Punkte und das Projektionszentrum konstruierten Kegel ergibt (Abbildung 3.11), keine weiteren Faktoren die Güte der Berechnung beeinflussen. Deswegen ist die Distanz zwischen den Objektpunkten und dem Projektionszentrum immer gleich, die Punkte liegen also auf einer Kugel mit dem Projektionszentrum im Mittelpunkt. Die Bildebene liegt um  $21\text{mm}$  in Aufnahmerichtung ( $Z$ -Achse) vom Projektionszentrum versetzt, die Näherungswerte für die äußere Orientierung sind alle 0. Eine normalverteilte Stichprobe von 10000 Koordinaten pro Punkt mit einer Standardabweichung von  $1\text{mm}$  dient

---

<sup>8</sup>Die längste Distanz auf der *Autobar* misst unter  $30\text{cm}$



**Abbildung 3.11:** Geometrische Konfiguration in der Monte-Carlo-Simulation zum Einfluss der Verteilung

Punkt	Objektkoord.			Bildkoord.		Projektionszentrum					
	X	Y	Z	x	y	$X_0$	$Y_0$	$Z_0$	$\phi$	$\omega$	$\kappa$
P1	312,2	0	950	-6,90	0						
P2	0	312,2	950	0	-6,90						
P3	-114,2	-114,2	986,9	2,43	2,43						
<b>Mittelwert</b>	[mm]/[°]					-0,12	-0,09	0,02	0,01	0,01	0
<b>Standardabweichung</b>	[mm]/[°]					17,36	17,39	2,83	1,00	1,00	0,16

**Tabelle 3.4:** Monte-Carlo-Simulation der Berechnung der äußeren Orientierung aus drei Punkten mit einem Raumwinkel von etwa  $14^\circ$  (Stichprobengröße: 10000)

als Berechnungsgrundlage.

Tabelle 3.4 und 3.5 zeigen die Ergebnisse der Simulation für jeweils  $1000\text{mm}$  vom Projektionszentrum entfernt liegende Punkte. Die Standardabweichung für die Berechnung mit einer weiter im Raum verteilten Punktmenge (Tabelle 3.5) ist deutlich besser als die, in der die Punkte relativ zentral im Bild abgebildet sind (Tabelle 3.4). Allerdings ist die Standardabweichung in Aufnahme­richtung ( $Z$ -Achse) in beiden Fällen fast gleich niedrig im Gegensatz

Punkt	Objektkoord.			Bildkoord.		Projektionszentrum					
	X	Y	Z	x	y	$X_0$	$Y_0$	$Z_0$	$\phi$	$\omega$	$\kappa$
P1	577,4	577,4	577,4	-21	-21						
P2	-577,4	577,4	577,4	21	-21						
P3	0	-400	916,6	0	9,16						
<b>Mittelwert</b>	[mm]/[°]					-0,03	-0,01	0,02	0	0	0
<b>Standardabweichung</b>	[mm]/[°]					2,20	2,08	1,09	0,13	0,13	0,06

**Tabelle 3.5:** Monte-Carlo-Simulation der Berechnung der äußeren Orientierung aus drei Punkten mit einem Raumwinkel von etwa  $45^\circ$  (Stichprobengröße: 10000)

	$X_0$	$Y_0$	$Z_0$
<b>Mittelwert</b> [mm]	0	0,01	0
<b>Standardabweichung</b> [mm]	0,61	0,61	2,29

**Tabelle 3.6:** Monte-Carlo-Simulation der Berechnung des Projektionszentrums aus drei Punkten mit einem Raumwinkel von etwa  $14^\circ$  (Stichprobengröße: 10000)

	$X_0$	$Y_0$	$Z_0$
<b>Mittelwert</b> [mm]	-0,01	-0,01	0
<b>Standardabweichung</b> [mm]	0,85	0,72	0,88

**Tabelle 3.7:** Monte-Carlo-Simulation der Berechnung des Projektionszentrums aus drei Punkten mit einem Raumwinkel von etwa  $45^\circ$  (Stichprobengröße: 10000)

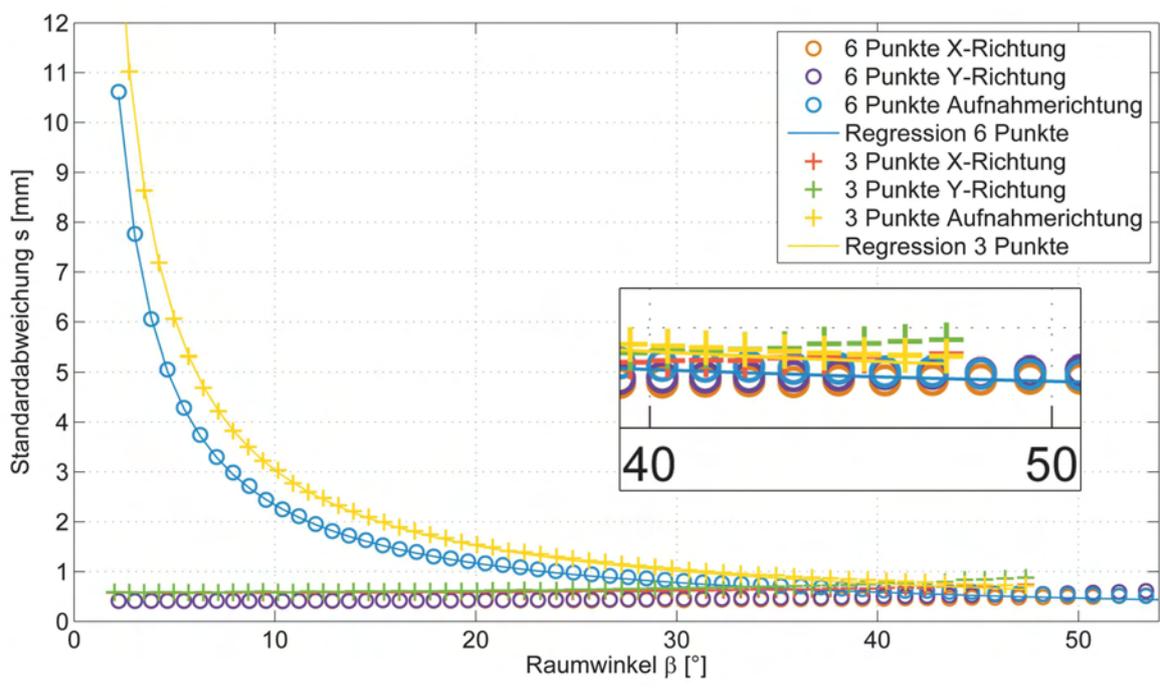
zu der Standardabweichung der beiden anderen Achsen. Erwartungsgemäß sollte die Genauigkeit in Richtung der  $Z$ -Achse im ersten Fall aufgrund der schlechteren Schnittbedingungen niedriger sein als quer dazu ( $X$ - und  $Y$ -Achse). In einer weiteren Simulation werden daher die Rotationswinkel der äußeren Orientierung als konstant angesehen und nicht mitgeschätzt, die restlichen Einstellungen bleiben dieselben. Hier zeigt sich der Einfluss des Raumwinkels nun deutlich in der Genauigkeit in Aufnahme­richtung (Tabelle 3.6 und 3.7). Bei einer gut über das Bild verteilten Punktmenge ist die Standardabweichung in allen Richtungen homogen, in  $X$ - und  $Y$ -Richtung allerdings etwas schlechter als bei der weniger gut verteilten Punktmenge, da sich die Schnittbedingungen in diesen Richtungen durch den größeren Raumwinkel verschlechtern. Die Unsicherheit in der Position des Projektionszentrums wird also durch die Verdrehung der Bildebene beeinflusst.

In Abbildung 3.12 sind die Standardabweichungen des Projektionszentrums, berechnet aus drei und sechs Punkten, in Abhängigkeit vom Raumwinkel, den diese Punkte aufspannen, dargestellt<sup>9</sup>. Die Werte in  $X$ - und in  $Y$ -Richtung steigen in beiden Fällen mit zunehmendem  $\beta$  langsam an, während sich die Genauigkeit in Aufnahme­richtung stark verbessert. Durch die Standardabweichungen in Aufnahme­richtung sind reziproke Regressionsfunktionen der Form  $s = \frac{a}{\beta}$  geschätzt. Diese passen sich den Beobachtungen mit einem geschätzten Varianzfaktor von  $\hat{\sigma}_3 = 0.0024mm$  bzw.  $\hat{\sigma}_6 = 0.0026mm$  sehr gut an. Wie zu erwarten kehrt sich das Genauigkeitsverhältnis zwischen Aufnahme­richtung und  $X$ - und  $Y$ -Richtung bei etwa  $45^\circ$ , dem optimalen Raumwinkel, um.

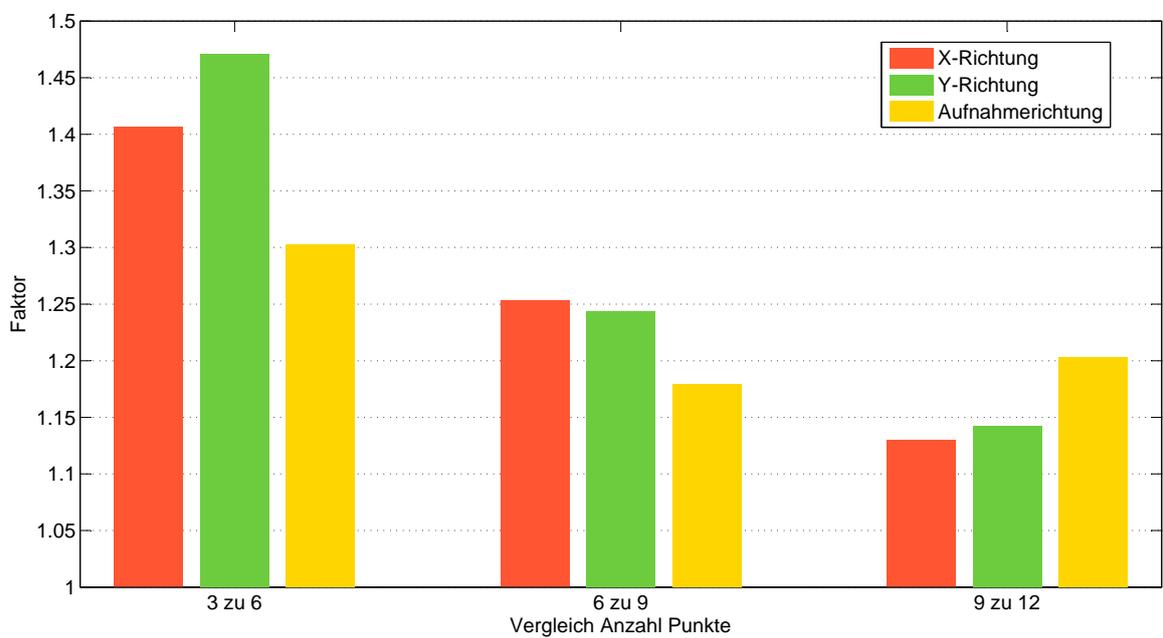
## Anzahl

Betrachtet man die absoluten Werte der Standardabweichungen in Abbildung 3.12, wird der Einfluss der Anzahl der gemessenen Punkte deutlich. So fallen die Standardabweichungen bei der doppelten Anzahl zur Verfügung stehender Punkte in allen Richtungen jeweils geringer aus.

<sup>9</sup>Bei der Berechnung aus sechs Punkten ist es der maximale sich ergebende Raumwinkel, alle Punkte liegen allerdings in etwa auf demselben Kegel



**Abbildung 3.12:** Standardabweichung der aus drei bzw. sechs Punkten berechneten Projektionszentren in Abhängigkeit vom Raumwinkel



**Abbildung 3.13:** Vergleich der mittleren Veränderung der Standardabweichung zwischen den Berechnungen mit unterschiedlich vielen Punkten

In Abbildung 3.13 ist zu erkennen, dass die Änderung der Standardabweichungen bei der kontinuierlichen Hinzunahme von jeweils drei weiteren Punkten zur Berechnung des Projektionszentrums im Mittel kleiner wird. Bei drei Punkten beispielsweise ist die Standardabweichung des Projektionszentrums in Aufnahme­richtung unabhängig vom Raumwinkel  $\beta$  etwa um den Faktor 1.3 höher als bei sechs Punkten. In den anderen beiden Richtungen liegt der Faktor etwas höher. Man kann also im Allgemeinen davon ausgehen, dass die Verbesserung der Genauigkeit abnimmt, je mehr Punkte gemessen sind. Allerdings ist dieser Faktor immer im Zusammenhang mit der Verteilung der Punkte zu betrachten, da allein eine hohe Anzahl mitunter schlecht verteilter Punkte die Genauigkeit des Bildverbandes nur geringfügig verbessert [LUHMANN 2003].

### 3.2.4 Kameraparameter

Die Kamera stellt die entscheidende Schnittstelle zwischen dem zu messenden Objekt und den Messergebnissen dar. In den letzten Jahren hat die digitale Aufnahmetechnik die analoge Aufnahme insbesondere in der Nahbereichsphotogrammetrie abgelöst. Zwar entfallen dadurch filmbezogene Unsicherheitsfaktoren, viele weitere allerdings bleiben erhalten, hinzu kommen Effekte wie das Überlaufen überbelichteter Pixel. Bedingt durch das Objektiv entstehen beispielsweise Abweichungen vom zentralperspektivischen Modell, zusammengefasst in der inneren Orientierung der Kamera. Die Stärke dieser Effekte hängt von der Bauart und der Spezifikation der Kamera ab. Eine Messkamera wie die *INCA3* ist auf eine hohe Stabilität und geringe Verzeichnung in der Abbildung ausgelegt. Das impliziert allerdings ebenfalls geringe Modifikationsmöglichkeiten durch den Anwender.

#### Innere Orientierung

Die konstruktionsbedingten Abweichungen von der zentralperspektivischen Abbildung müssen für eine hochgenaue Punktbestimmung berücksichtigt und modelliert werden. Aufgrund der mehrfachen Brechung des eintretenden Strahls im Objektiv und der Lage der Ein- und der Austrittspupille, welche in der Regel nicht mit den Hauptebenen der Linsen zusammenfallen, divergieren Ein- und Austrittswinkel des Strahls. Abhängig von der Einfallsrichtung ergibt sich daher eine unterschiedlich groß ausfallende *radial-symmetrische Verzeichnung*. Eine Dezentrierung oder Schiefstellung einzelner Linsen eines Objektivs führt dagegen zu einer *radial-asymmetrischen* und zu einer *tangentialen Verzeichnung* [LUHMANN 2003]. Zusammen mit der durch Ungleichmäßigkeiten der Sensorelemente hervorgerufenen Affinität und Scherung, der Kammerkonstante und den Bildhauptpunktskoordinaten beschreiben zehn Parameter die innere Orientierung [HAIG et al. 2006], [BROWN 1971]. Diese Parameter werden in der Kamerakalibrierung bestimmt, können jedoch auch bei ausreichender Überbestimmung in der Ausgleichung eines Bildverbandes simultan mitgeschätzt werden.

Neben dieser mathematischen Modellierung des Abbildungsvorgangs verbleiben in der Regel weitere Einflüsse im System, welche zu Abweichungen vom idealen zentralperspekti-

Bild- verband	RMS Ausgleichung [ $\mu m$ ]	Mittel d. Residuen der Aufnahmepositionen [ $\mu m$ ]	mittlere Punktanzahl
1	0.22	0.23	166
2	0.21	0.17	173

**Tabelle 3.8:** Untersuchungen zur Aufwärmzeit der *INCA3*. Bildverband 1: kalte Kamera, Bildverband 2: Kamera in Betriebstemperatur

vischen Modell führen. In [DOLD 1997] wird die Modellierung eines entfernungsabhängigen Einflusses der radial-symmetrischen Verzeichnung vorgeschlagen. Diese basiert auf den in [FRASER und SHORTIS 1992] beschriebenen empirischen Untersuchungen, die zeigen, dass die Verzeichnung bei konstanter Fokussierung abhängig von der Aufnahmeentfernung ist. Die Modellierung kann direkt in die simultane Kalibrierung integriert werden und verbessert sowohl innere als auch äußere Genauigkeit signifikant. Inwiefern dieses Modell in der Auswertesoftware *V-STARs* oder *Australis* implementiert ist kann wegen mangelnder Einsicht in den Auswertalgorithmus nicht geklärt werden. Lediglich die zehn Parameter, welche die oben genannten Einflüsse beschreiben, werden von beiden Programmen ausgegeben. [HAIG et al. 2006] gibt als weiteren Faktor mechanische Instabilitäten an, wie zum Beispiel den Einfluss der Gravitation auf das Objektiv. Die Untersuchungen basieren allerdings auf handelsüblichen Kameras, bei speziellen Messkameras, wie der *INCA3*, seien diese Effekte marginal [HASTEDT et al. 2002], [FRASER 2011]. Ebenfalls der Effekt der elektrischen Verzeichnung [GÜLKER 2004] sei hier erwähnt ohne näher darauf einzugehen.

Die während der Aufnahme entstehende Wärme in der Kamera kann die Abbildung ebenfalls beeinflussen. Zwar verfügt die *INCA3* über einen Lüfter zur Kühlung, im Rahmen dieser Arbeit durchgeführte Untersuchungen zeigen jedoch nach einem viertelstündigen Messeinsatz in einem temperierten Raum eine Erhöhung der Temperatur des Kamerarinnenraumes um etwa  $8^{\circ}C$ . Zum Vergleich sind in einer Rumpftrennstellenvermessung zwei Bildverbände zu je zwanzig Aufnahmen in einem zeitlichen Versatz von etwa 15 Minuten an nahezu identischen Kamerastandorten erstellt worden. Diese sind jeweils mit den restlichen Aufnahmen des Bildverbandes gemeinsam ausgewertet worden. Die Ergebnisse sind in Tabelle 3.8 dargestellt. Die Ausgleichung des Bildverbandes mit den ersten zwanzig Bildern (1) zeigt leicht schlechtere Ergebnisse gegenüber einer in Betriebstemperatur eingesetzten Kamera (2). Hier fällt der abschließende *RMS* etwas geringer aus. Auch die Betrachtung der Residuen der Aufnahmepositionen und die Anzahl der gemessenen Punkte in einer gemeinsamen Ausgleichung aller Aufnahmen zeigen Differenzen. Es besteht also die Möglichkeit eines durch die Temperatur der Kamera hervorgerufenen Einflusses.

### Stellgrößen

Neben den temperaturbedingten Einflüssen sowie den Restsystematiken, welche in der inneren Orientierung nicht modelliert werden und zu Abweichungen führen, gibt es bezüglich



(a) Belichtung:  $100ms$  Blitz: 0.5



(b) Belichtung:  $100ms$  Blitz: 10



(c) Belichtung:  $100ms$  Blitz: 21



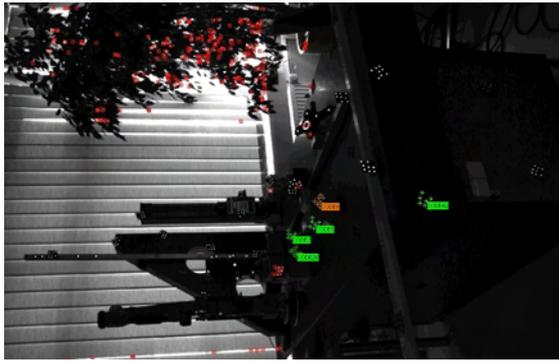
(d) Belichtung:  $8ms$  Blitz: 21

**Abbildung 3.14:** Aufnahmen mit unterschiedlichen Belichtungszeiten und Blitzstärken

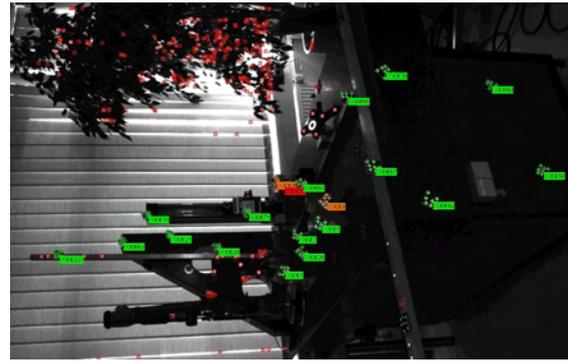
der Kamera variierbare Stellgrößen, welche die Qualität des Bildes für die Auswertung beeinflussen. Wegen der kompakten Bauweise mit konstanter Fokussierung lassen sich bei der *INCA3* lediglich Belichtungszeit und Blitzstärke einstellen. Bezüglich Länge und Stärke sollten diese Parameter für eine hohe Güte der Aufnahme prinzipiell antiproportional zueinander variiert werden. Für die durch eine hohe Blitzstärke zur Kamera reflektierte hohe Lichtintensität reicht eine kurze Belichtungszeit aus. So lässt sich beispielsweise eine durch Vibrationen hervorgerufene Bewegungsunschärfe im Bild minimieren. Jedoch kann es passieren, dass die Zielmarken bei zu starkem Blitz überstrahlen. Aufgrund der Reflektionseigenschaften der Retromarken hängt deren Helligkeit im Bild weniger mit der Belichtungszeit als vielmehr mit der Blitzstärke zusammen.

In den Abbildungen 3.14(a)-3.14(c) ist die Belichtungszeit konstant bei  $100ms$ . Man kann erkennen, dass die Variation der Blitzstärke, welche vom System in einer Skala von 0 bis 21 gemessen wird, fast ausschließlich einen Einfluss auf die Reflektion der Zielmarken hat, während sich die Helligkeit der Marken bei kürzerer Belichtungszeit kaum ändert (Abbildung 3.14(c) und 3.14(d)).

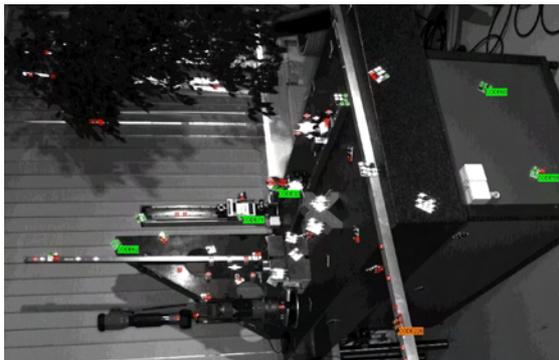
In Kapitel 3.2.2 wird gezeigt, dass ein hoher Kontrast zwischen Zielmarke und Hintergrund wichtig für eine sichere Mittelpunktbestimmung ist. Wie zu erwarten ist eine Blitzstärke



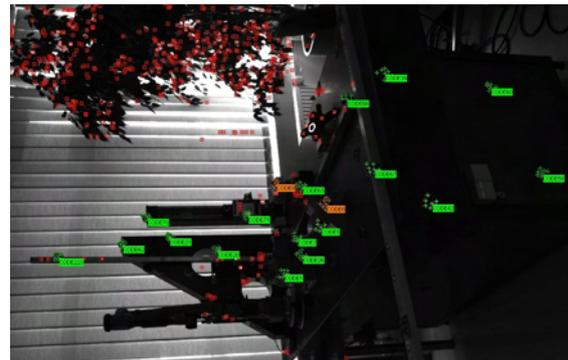
(a) Belichtung: 100ms Blitz: 0.5



(b) Belichtung: 100ms Blitz: 10



(c) Belichtung: 8ms Blitz: 21



(d) Belichtung: 500ms Blitz: 7

**Abbildung 3.15:** Aufnahmen mit unterschiedlichen Belichtungszeiten und Blitzstärken und die automatische Punktdetektion mittels *Australis*

von 0.5 sehr schwach und führt nur zu wenigen Punktdetektionen (Abbildung 3.15(a)), eine Blitzstärke von 21 dagegen zu stark, so dass die Marken überstrahlen. Die Software erkennt die Überstrahlung und das Überlaufen der Bildelemente in X-Richtung und wertet die Zielmarken trotz des hohen Kontrastes nicht als Punkt (Abbildung 3.15(c)). Dagegen werden bei einer Blitzstärke von 7 oder 10 (Abbildungen 3.15(d) und 3.15(b)) in etwa gleich viele Zielmarken gefunden. Die höhere Belichtungszeit führt zu einem helleren Hintergrund und schlägt sich lediglich in der erhöhten Anzahl von falsch detektierten Punkten nieder (rote Punkte im Bereich des Baumes).

Das Messsystem verträgt also einen gewissen Spielraum bei der Wahl der Belichtungszeit und Blitzstärke. Bei der handgeführten Messung im Offline-Modus empfiehlt es sich allerdings die Belichtungszeit möglichst klein zu halten um Unschärfefeffekte zu vermeiden. Diese beeinflussen die Punktmessung im Bild nicht, solange die Bewegung translativ symmetrisch zur Aufnahmeachse verläuft, bei einer rotativen oder asymmetrischen Bewegung führt die Unschärfe zu einem systematischen Fehler in den Bildkoordinaten. Die Kamera bietet die Funktion vor der Messung mittels einer Aufnahme des Objektes automatisch optimale Werte für die Belichtungszeit und die Blitzstärke zu finden. Dafür wird das Objekt von einem möglichst den gesamten Bildverband repräsentierenden Standpunkt aufgenommen. Da dieser

repräsentierende Standpunkt nicht immer ohne weiteres definierbar ist, werden Belichtungszeit und Blitzstärke bei *Airbus* in Bremen manuell auf Erfahrungswerte gesetzt.

### 3.3 Bildaufnahme

Während der Bildaufnahme darf das Objekt nicht betreten werden, da es während der Messung als statisch betrachtet wird. Somit sind alle Einflüsse, die auf den Zustand des ausgestatteten Objektes einwirken, als relevant für die Stabilität des Bildverbandes einzustufen. Dabei sind ebenso Faktoren zu berücksichtigen, welche die Abbildung des Objektes betreffen, wie beispielsweise zufällige Reflexionen. Weiterhin hat die Wahl der Standpunkte Einfluss auf Schnittwinkel, Überdeckung und Aufnahmewinkel der Aufnahmen bzw. Strahlen. Ebenso wie eine hohe Anzahl Punkte (Kapitel 3.2.3), ist auch eine ausreichend große Quantität der Aufnahmen für eine hohe Zuverlässigkeit und Präzision ausschlaggebend.

#### 3.3.1 Einflüsse durch die Umgebung

Die Photogrammetrie zeichnet sich insbesondere durch die Berührungslosigkeit des Messverfahrens aus. Dadurch, dass das Objekt während der Messung nicht betreten wird, minimieren sich die Einflüsse, welche auf das Objekt einwirken, auf Einflüsse aus der Umgebung. Dabei können Temperatur und Beleuchtung für die Ergebnisse der Messung von Bedeutung sein. Atmosphärische Refraktionen sind aufgrund der geringen Zielweiten vernachlässigbar. Sonstige Vibrationen, welche beispielsweise durch Arbeiten in der näheren Umgebung das Objekt in Schwingung versetzen, wirken ebenfalls auf die Kamera ein, weshalb bei gleicher Frequenz, Amplitude und Phase der Einfluss ebenfalls zu vernachlässigen ist.

Die verwendeten Maßstäbe bei *Airbus* bestehen aus Aluminium. Da die Bauteile zum großen Teil ebenfalls aus diesem Material bestehen, ist die Temperatur unerheblich für die Güte der Messung. Die kalibrierten Längen der Maßstäbe beziehen sich auf eine Temperatur von  $20^{\circ}\text{C}$ . Objekt und Maßstäbe haben denselben Ausdehnungskoeffizienten<sup>10</sup>, somit sind die Ergebnisse bei Reduktion auf die Maßstabslängen alle auf eine Temperatur von ebenfalls  $20^{\circ}\text{C}$  definiert. Hierbei ist zu bemerken, dass die meisten für das Bauteil relevanten Punkte mit Hilfe von mit Zielmarken bestückten Adaptern konstruiert werden (Kapitel 3.2.1). Diese bestehen aus Stahl und haben einen geringeren Ausdehnungskoeffizienten von etwa  $\frac{11 \cdot 10^{-6}}{\text{K}}$ . Die Temperatur in den im Sommer nicht klimatisierten Hallen ist insbesondere bei starker Sonneneinstrahlung nicht konstant. Es kommt zu Schwankungen von einigen Kelvin. Betrachtet man das Objekt aufgrund der Kompensierung durch die Maßstabslängen als konstant, würde eine deutliche Erhöhung der Temperatur um  $10^{\circ}\text{C}$  zum Beispiel eine Verlängerung des Befestigungsarmes eines *Stringer*-Adapters<sup>11</sup> von etwa  $20\mu\text{m}$  bedeuten. Dieser Wert liegt deutlich

---

<sup>10</sup>Aluminium hat einen Ausdehnungskoeffizienten je nach Art von etwa  $\frac{23 \cdot 10^{-6}}{\text{K}}$

<sup>11</sup>Länge:  $173\text{mm}$

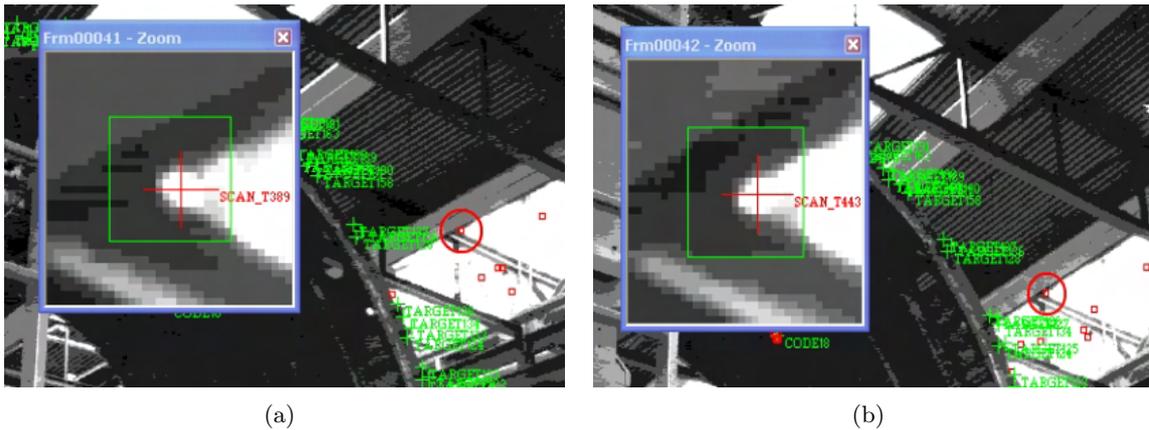


Abbildung 3.16: Punktdetektion in der Dachkonstruktion der Halle

unterhalb der Fertigungstoleranz von  $50\mu\text{m}$  (Kapitel 3.2.1) und ist somit vernachlässigbar<sup>12</sup>, da wesentlich stärkere Inkonsistenzen in der Temperatur nicht zu erwarten sind.

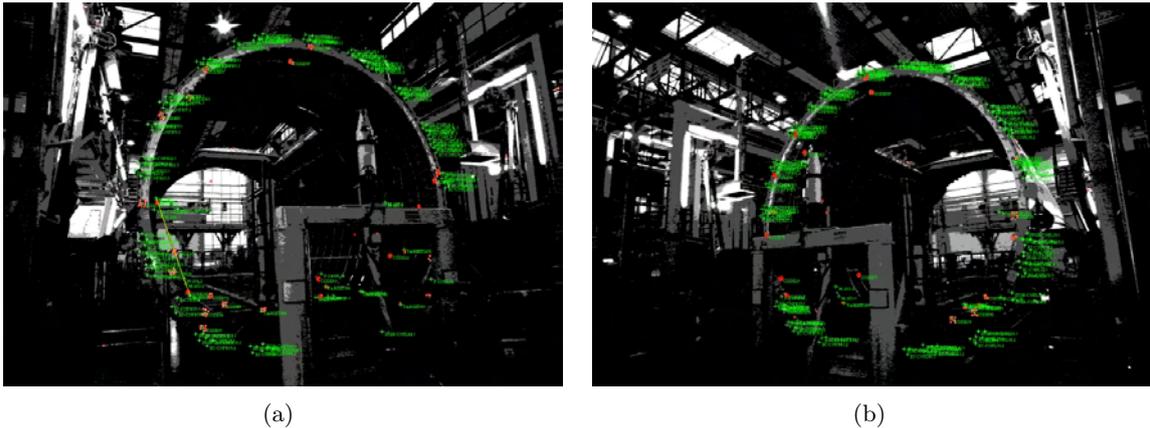
Retroreflektierende Zielmarken sorgen für einen hohen Kontrast zwischen sich und dem Hintergrund in den Bildern. Dennoch können künstliche Lichtquellen sowie Fenster und Reflexionen zu einer fehlerhaften Punktdetektion führen. In den meisten Fällen werden solche Punkte lediglich in einem Bild detektiert und nur selten eine Homologie in anderen Bildern gefunden. Abbildung 3.16 zeigt die Detektion von nicht signalisierten Punkten in der Dachkonstruktion durch *V-STARs*. Allerdings handelt es sich, trotz ähnlicher Lage, um zwei unterschiedlich klassifizierte Punkte.

Entscheidend für den Umgang mit diesen nicht gewollten Detektionen ist eine robuste Ausgleichung, welche solche Ausreißer aus der Berechnung ausschließt. In der praktischen Anwendung kann dieser Einfluss vernachlässigt werden, da selten zu gemessenen nicht signalisierten Punkten kommt. Selbst dann wäre die Identität dieser Punkte hoch genug die Kriterien der Ausgleichung zu erfüllen.

### 3.3.2 Aufnahmestandorte

Vorschläge für optimale Kamerastandorte sind in [WIGGENHAGEN und RAGUSE 2003] und [LUHMANN 2003] gegeben. Diese sind auf ein optimales Verhältnis aus Überdeckung, Schnittwinkel und Betrachtungswinkel ausgelegt. Weiterhin entscheidend ist die Aufnahmeentfernung und die resultierende Bildmaßstabszahl  $m_b$ . Eine zu kurze Aufnahmeentfernung führt zwar zur besseren Bildpunktmessung, verstärkt allerdings auch Effekte wie die Abbildungsexzentrizität (Kapitel 3.2.2). Bei der Aufnahme der Trennstellen bei *Airbus* sind die in den genannten Quellen beschriebenen optimalen Konfigurationen aufgrund der durch Baugestelle und sonstigen Aufbauten beschränkten Sichtbarkeiten oft nicht zu realisieren. Trotzdem lässt

<sup>12</sup>Vernachlässigbar, sofern die kalibrierten Maße der Adapter nicht in die Auswertung einfließen (siehe Kapitel 4.1)



**Abbildung 3.17:** Konvergente Aufnahme der Rumpftrennstelle der Sektion 15

sich die Standortwahl bezüglich der drei oben genannten Faktoren optimieren.

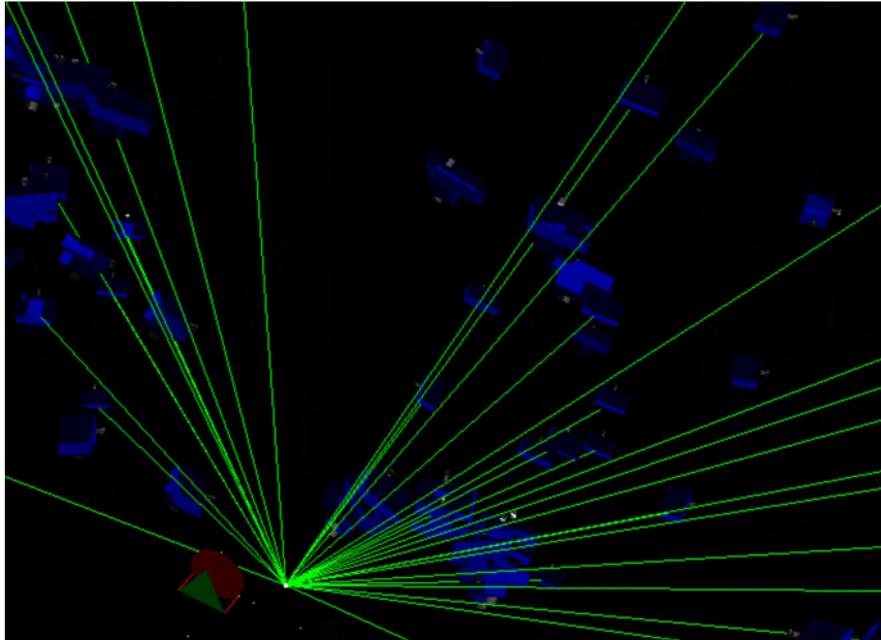
### Überdeckung

Eine gute Überdeckung ist entscheidend für die stabile Orientierung aller Aufnahmen des Bildverbandes und einer redundanten Punktbestimmung. Für eine hochgenaue Punktbestimmung sollte eine Überdeckung von 50% nicht unterschritten werden [WIGGENHAGEN und RAGUSE 2003]. Insbesondere Bilder, die den Randbereich des zu messenden Objektes darstellen, haben häufig nur eine einseitige Überdeckung. Das resultiert im Allgemeinen in einer einseitigen Verteilung der Punkte im Bild (Kapitel 3.2.3), weshalb die äußere Orientierung der Kamerastandorte in der Mitte des Bildverbandes in der Regel sicherer bestimmt ist als am Rand.

Wegen der überschaubaren Objektgröße und aufgrund der Weitwinkel-Aufnahmen der *INCA3*-Kamera ist eine hohe Überdeckung der einzelnen Bilder bei *Airbus* leicht realisierbar. Die konvergente Ausrichtung der Aufnahmen trägt dazu bei, dass in der Regel Überdeckungen von weit mehr als 50% erreicht werden (Abbildung 3.17).

### Schnittwinkel

Schnittwinkel sind die Winkel zwischen den Strahlen eines Punktes zu allen Aufnahmen, die diesen Punkt abbilden. Somit beeinflusst der Schnittwinkel direkt die Güte der dreidimensionalen Punktbestimmung. Es handelt sich dabei zwar um einen geometrischen Vorwärtsschnitt, jedoch lassen sich die Schnittwinkel der Strahlen an einem Punkt analog zu den Schnittbedingungen an einem Aufnahmestandpunkt, gegeben durch die Verteilung der Punkte, behandeln (Kapitel 3.2.3). Es gelten die Ergebnisse, welche in den Abbildungen 3.12 bis 3.13 dargestellt sind, ebenfalls für die Verteilung der Aufnahmestandpunkte gegenüber eines Punktes. Der Punkt sollte also möglichst aus vielen unterschiedlichen Richtungen aufgenommen worden sein, die einen Kegel mit einem Raumwinkel  $\beta$  von etwa  $45^\circ$



**Abbildung 3.18:** Strahlen von einem Punkt der Sektion 15 zu den Kamerastandorten

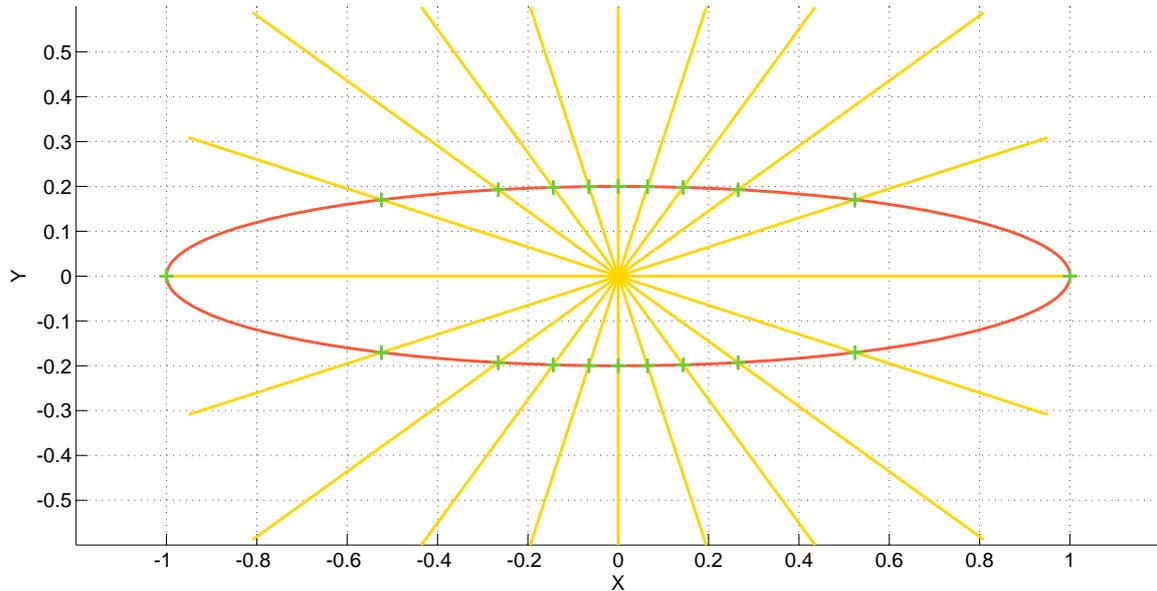
aufspannen.

In der Regel werden bei der photogrammetrischen Aufnahme der Rumpftrennstellen für die meisten Punkte relativ gute Schnittbedingungen erzielt. In Abbildung 3.18 sind die Strahlen eines oben am Rumpf befindlichen Punktes dargestellt. Die Strahlen treffen aus vielen Richtungen auf den Punkt, was gute Schnittbedingungen bedeutet und für eine gleichmäßig in alle Richtungen verteilte Unsicherheit essentiell ist.

Trennstellen, bei denen nicht alle zu messenden Punkte ausstattbar sind, werden im *Multi-Modus* vermessen. Für diese Punkte stehen zur Punktbestimmung lediglich zwei Strahlen zur Verfügung, weshalb der Schnittwinkel zwischen diesen beiden Strahlen aufgrund geringer Überbestimmung ein entscheidender Faktor für die Genauigkeit ist. In der Praxis lassen sich auch hier gute Aufnahmekonfigurationen realisieren. Die Zielweiten sind relativ gering (maximal  $2m$ ) und wegen der Aufnahme mit Weitwinkelobjektiv und der konvergenten Ausrichtung lässt sich eine ausreichend große Basis realisieren.

### **Betrachtungsrichtung**

In Kapitel 3.2.2 sind die Eigenschaften retroreflektierender Zielmarken dargestellt. Einige vorgestellte Faktoren sind dabei abhängig von der Betrachtungsrichtung. Abbildungsexzentrizität und Verdeckung rändlicher Retrokügelchen durch die Maskierung variieren mit abnehmendem Betrachtungswinkel. Auch der Kontrast zwischen Zielmarke und Hintergrund kann bei zu flachem Winkel abnehmen. All dies hat Einfluss auf die Güte der Punktmessung im Bild.



**Abbildung 3.19:** Geometrie bei der Bestimmung des Ellipsenmittelpunktes mit Hilfe des Stern-Operators

Neben diesen schwer quantifizierbaren Faktoren lässt sich die Bestimmung eines Ellipsenmittelpunktes aus den Randpunkten, detektiert mittels eines Stern-Operators (Kapitel 3.2.2), mit Hilfe der Monte-Carlo-Methode simulieren. Abbildung 3.19 zeigt den geometrischen Zusammenhang dieser Simulation. Dabei ist die Größe der Ellipse und die der Unsicherheit dimensionslos.

Der funktionale Zusammenhang zwischen den  $n$  beobachteten Randpunkten  $i = 1, \dots, n$  und dem Mittelpunkt stellt sich dar als:

$$\begin{aligned} x_0 &= x_i - a \cdot \cos t_i \\ y_0 &= y_i - b \cdot \sin t_i. \end{aligned} \tag{3.10}$$

mit

$a, b$  große und kleine Halbachsenlänge der Ellipse

Die Richtung  $t$  wird nicht als stochastisch betrachtet, lediglich die Koordinaten der Randpunkte  $x_i$  und  $y_i$ . Dabei kann aufgrund der Schnittbedingungen zwischen Suchstrahl und Ellipsenrand nicht von homogenen Unsicherheiten für alle Randpunkte ausgegangen werden. Ausgehend von einer konstanten Unsicherheit  $\sigma_R$  senkrecht zum Ellipsenrand lässt sie sich zunächst auf den Suchstrahl übertragen ( $\sigma_S$ ):

	Mittelpunkt	Standardabweichung
<b>X</b>	0	0.0279
<b>Y</b>	0	0.0195

**Tabelle 3.9:** Monte-Carlo-Simulation der Berechnung des Ellipsenmittelpunktes ( $a = 1, b = 0.2, \sigma_R = 0.1$ ) aus zwanzig Randpunkten (Stichprobengröße: 10000)

$$\begin{aligned} \sigma_{S_i} &= \frac{\sigma_R}{\cos \epsilon_i} && \text{mit} && (3.11) \\ \epsilon_i &= |\zeta_i - t_i| && \text{und} && \\ \zeta_i &= \arctan \frac{a \cdot \tan t_i}{b^2}. \end{aligned}$$

Daraus kann die Unsicherheitskomponente in X- und in Y-Richtung für jeden Punkt berechnet werden:

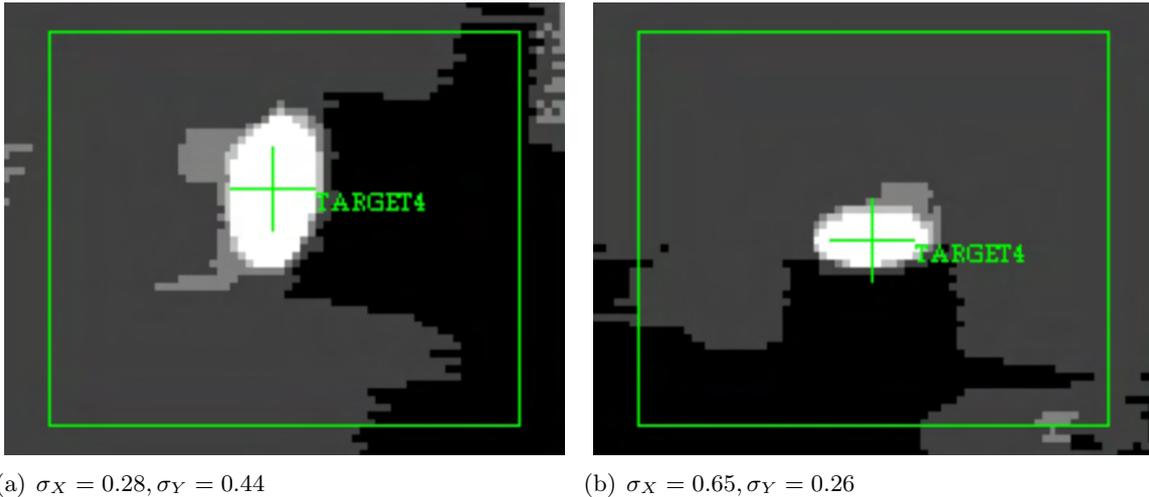
$$\begin{aligned} \sigma_{X_i} &= |\cos t_i \cdot \sigma_{S_i}| \\ \sigma_{Y_i} &= |\sin t_i \cdot \sigma_{S_i}|. \end{aligned} \quad (3.12)$$

Diese Annahme über die Unsicherheit hat zur Folge, dass bei flacher einfallendem Schnittwinkel zwischen Ellipsenrand und Suchstrahl die Unsicherheit größer wird. Die Kante des Grauwertschnittes ist dann weiter gespreizt, weshalb statistisch die Kantenpunktbestimmung weniger genau möglich ist als bei einem orthogonalen Schnitt zwischen Suchstrahl und Ellipsenrand<sup>13</sup>. Tabelle 3.9 zeigt die Ergebnisse der diesbezüglich durchgeführten Monte-Carlo-Simulation.

Der Mittelpunkt ist wegen der Schnittbedingungen zwischen Suchstrahlen und Ellipsenrand (Abbildung 3.19) in X-Richtung um etwa 45% schlechter bestimmt als in Y-Richtung. Je kleiner der Betrachtungswinkel ist, desto größer ist die numerische Exzentrizität der abgebildeten Ellipse und somit die Unsicherheit in Richtung der großen Halbachse  $a$ . Die Residuen der Bildmessung in *V-STARs* zeigen ebenfalls häufig eine Abhängigkeit von der Betrachtungsrichtung (Abbildung 3.20).

Bei einer optimalen Betrachtungsrichtung von  $\alpha = 90^\circ$ , senkrecht zur Zielmarkenebene, weist die Bildmessung in allen Richtungen eine homogene Genauigkeit auf und die restlichen Einflüsse der Zielmarke sind minimal. Dem gegenüber steht, dass ein optimaler Schnittwinkel von  $90^\circ$  Betrachtungswinkel von  $\alpha \neq 90^\circ$  impliziert. Laut [WIGGENHAGEN und RAGUSE 2003] soll der Betrachtungswinkel bei kreisförmigen Zielmarken nicht unter  $30^\circ$  liegen. Für hochgenaue Anwendungen muss allerdings die Heterogenität in der Bildmessgenauigkeit berücksichtigt werden.

<sup>13</sup>vergleichbar mit der Simulation der Bildpunktmessung bei unterschiedlichem Kontrast in Kapitel 3.2.2



**Abbildung 3.20:** Abbildung einer Zielmarke in zueinander gekanteten Aufnahmen

Beim Punkt in Abbildung 3.18 sind die Schnittbedingungen in einer Richtung zwar sehr gut, allerdings ist die Verteilung der Kamerastandorte mehrheitlich auf den Bereich unterhalb des Punktes beschränkt also nicht gleichmäßig um die Normale der Zielmarkenebene verteilt. Diese einseitige Betrachtungsrichtung führt nicht nur zu einer in den drei Richtungen ungleichmäßigen Unsicherheit. Die Verdeckung, welche ebenfalls nur eine Richtung betrifft, hat zur Folge, dass die Punktmessung nicht nur orthogonal zur Zielmarkenebene von der wahren Position abweicht, sondern auch quer dazu. Für solch extreme Lagen, wie beispielsweise auch im unteren Bereich des Rumpfes, ist die Standortverteilung aufgrund der begrenzten Zugänglichkeit nicht immer optimal.

### 3.4 Auswertung des Bündels

In der Auswertung werden mit Hilfe der beobachteten Bildkoordinaten der signalisierten Objektpunkte die unbekannt Parameter, das heißt die äußeren Orientierungen der Kamerastandorte, die Objektkoordinaten der Punkte und im Falle einer simultanen Kamerakalibrierung auch die innere Orientierung der Messkamera geschätzt. Die Auswertung umfasst dabei die Schritte der automatischen Punktmessung in den Bildern, das Lösen der Kamerastandorte, die Bildverknüpfung und die Bündelausgleichung [SETAN und IBRAHIM 2004]. Die Bildpunktmessung ist entscheidend für die Güte der Beobachtungen, laut [GSI 2009b] gelingt dies mit einer Genauigkeit von  $\frac{1}{50}$  Pixel. Diese Bildmessgenauigkeit hat einen entscheidenden Anteil an der Gesamtgenauigkeit der Messung und pflanzt sich unter Vernachlässigung jeglicher geometrischer Information über den Bildmaßstab auf die Objektkoordinaten fort (Gleichung (3.1)). Bei einer Aufnahmeentfernung von  $3m$  ergibt sich:

$$\sigma_X = \frac{3000mm}{21mm} \cdot \frac{0.01mm}{50} \approx 0.029mm. \quad (3.13)$$

Das Lösen der Kamerastandorte und die Bildverknüpfung dienen der Näherungswertbeschaffung für den letzten Schritt, die Bündelausgleichung. Dabei lässt sowohl das funktionale als auch das stochastische Modell der Ausgleichung Variationen zu, welche die Genauigkeit beeinflussen. Die Datumsgebung hat ebenfalls einen Einfluss auf die Verteilung von Unsicherheiten im Objektraum.

Das in der Bündelausgleichung verwendete Modell basiert auf den Kollinearitätsgleichungen, welche den Bezug zwischen Bild- und Objektkoordinaten herstellen [LUHMANN 2003]. Wegen der Nichtlinearität dieses funktionalen Zusammenhangs muss in der Ausgleichung linearisiert werden. Zudem werden Näherungswerte für die unbekannt Parameter benötigt. Die Linearisierung nichtlinearer funktionaler Zusammenhänge birgt das Risiko einer fehlerhaften Unsicherheitsabschätzung [SIMON 2006]. Dies gilt insbesondere für hochgradig nichtlineare Zusammenhänge und Inhomogenitäten in den Unsicherheiten der Beobachtungsgrößen. Allerdings hängt die Güte der Linearisierung auch von den Näherungswerten ab. Sind diese zu schlecht, wird an der falschen Stelle linearisiert, was bei hochgradiger Nichtlinearität zu Fehlern führen kann.

Das stochastische Modell der Bündelausgleichung lässt sich über die Gewichtung von Beobachtungen variieren. Da bei der *Airbus Operations GmbH* für die Vermessung einer Trennstelle meist nur eine Kamera verwendet wird, haben alle photogrammetrischen Beobachtungen zunächst die gleiche Genauigkeit. Entsprechend ihrer Relevanz für den Bildverband oder ihrer Residuen kann es jedoch sinnvoll sein, einzelne Beobachtungen anders zu gewichten und so die Ausgleichung im Hinblick auf die Genauigkeit zu optimieren. So lässt sich beispielsweise auch eine Genauigkeitsminderung aufgrund von Verdeckung und Abschattung (Kapitel 3.2.2) berücksichtigen.

Bei der Datumsgebung gibt es verschiedene Möglichkeiten. Aus den photogrammetrischen Beobachtungen allein lässt sich kein reguläres Normalgleichungssystem ableiten. Es besteht ein Datumsdefekt, da das Netz der Objektkoordinaten keine absolute Lage, Orientierung oder Maßstab hat. Mit Hilfe von Passpunkten oder Maßstäben lässt sich der Datumsdefekt in Form einer harten oder weichen Lagerung des Netzes auf diese Passinformationen beheben. Eine Alternative ist die freie Netzausgleichung, bei der die Näherungsinformationen zur Lagerung des Netzes dienen [LUHMANN 2003].

Die Auswertung der photogrammetrischen Beobachtungen offenbart großes Potential in der Optimierung der Bündelausgleichung bezüglich der erreichbaren Genauigkeit. Bei *Airbus* stellt die Auswertesoftware *V-STARs* ein hoch entwickeltes Instrument zum Umgang mit den gewonnenen Daten dar. Der kommerzielle Vertrieb und der damit einhergehende Schutz der Implementierung schließen eine tiefere Analyse des Auswerte-Algorithmus jedoch aus.

[SETAN und IBRAHIM 2004] zeigt einen Vergleich zwischen *V-STARs* und *Australis* mit dem Ergebnis, dass beide Programme ein ähnliches Genauigkeitspotential aufweisen. In einer weiteren Untersuchung beider Programme wird ein Bildverband aus 125 Aufnahmen, welcher in dieser Arbeit auch für weitere Analysen verwendet wird (Kapitel 4.3), in beiden Program-

Programm	# Punkte	# Bilder	RMS Ausglei chung [ $\mu\text{m}$ ]	innere Orientierung
<i>V-STARs</i>	121	124	0,25	21,896mm -0,0524mm -0,1482mm
<i>Australis</i>	126	120	0,60	21,893mm -0,0436mm -0,1513mm

**Tabelle 3.10:** Ergebnis der Auswertung eines Bildverbandes mit den Programmen *V-STARs* und *Australis*

men in Form einer freien Netzausgleichung<sup>14</sup> ausgewertet. Die Ergebnisse sind in Tabelle 3.10 zusammengefasst.

*V-STARs* zeigt einen deutlich kleineren RMS der gesamten Ausglei chung als *Australis*, zudem lassen sich Differenzen in der Anzahl der verwendeten Bilder und gemessenen Objektpunkte sowie in den ebenfalls ausgeglichenen Parametern der inneren Orientierung erkennen (dargestellt sind Kammerkonstante und Bildhauptpunktkoordinaten). Die Quelle dieser Disparitäten mag in der Konvertierung der *INCA3*-Aufnahmen für *Australis* in das *.tif*-Format liegen. Eine Identität der Ergebnisse beider Ausglei chungen kann demnach nicht bestätigt werden.

### 3.5 Zusammenfassung

Die Unsicherheit einer photogrammetrischen Messung hängt zum großen Teil von den Toleranzen der eingesetzten Adapter und Zielmarken ab. Neben den konstruktionsbedingten Unsicherheiten sind bei den Zielmarken noch eine Reihe weiterer Faktoren zu beachten, welche das Genauigkeitspotential der Messung beeinflussen. Für die Punktmessung im Bild ist ein hoher Kontrast zwischen Zielmarke und Umgebung erforderlich. Aufgrund der teilweise heterogenen Lichtverhältnisse innerhalb und außerhalb des Rumpfes sowie durch die Vorgaben des Messsystems eignen sich Retromarken. Verdeckung und Abschattung maskierter Retromarken sind Effekte, die bei der Standortwahl (Kapitel 3.3.2) und in der Auswertung (Kapitel 3.4) berücksichtigt werden können. Der Einfluss der Abschattung kann als Offset orthogonal zur Zielmarkenebene angenommen und korrigiert werden. Die Größe der Marken und die damit eng verbundene Abbildungsexzentrizität lassen sich im Vorhinein auf die Bedingungen der Messung anpassen und somit ist der Einfluss eher marginal. Fehlereinflüsse durch die Kamera werden in Form der zehn Parameter der inneren Orientierung korrigiert. Inwiefern weitere Parameter, wie die Entfernungsabhängigkeit der radial-symmetrischen Verzeichnung, berücksichtigt werden, bleibt offen. Eine Anpassung der Blitzstärke und Belichtungszeit ist mit der Automatik der Kamera sehr einfach möglich.

<sup>14</sup>ohne Pass- und Maßstabsinformation, zur Verfügung stehende Stellgrößen (minimale und maximale Zielmarkengröße etc.) sind in beiden Programmen identisch gewählt worden

Verteilung und Anzahl der Zielmarken sind zwei entscheidende Faktoren in der Vorbereitung einer Messung. Das Genauigkeitspotential verbessert sich signifikant bei einer gut über das Bild verteilten und hochredundanten Anzahl Punkte. Zudem kann durch eine gleichmäßige Verteilung der Einfluss von Hebelpunkten minimiert werden und der Bildverband als Ganzes wird stabiler. Bei Trennstellen wie zum Beispiel zwischen Flügel und Rumpf ist die Platzierung vieler, homogen verteilter Zielmarken gut möglich. Dagegen ist dies bei Rumpfteilstücken schwieriger, da sich durch die zylinderartige Form weniger Möglichkeiten für die Anbringung anbieten. Möglich ist in einigen Bauplätzen eine Platzierung von Punkten auf den Tragkonstruktionen, was die Verteilung verbessern würde (Abbildung 3.17). Die Aufnahme mit der *INCA3*-Kamera und ihrem Weitwinkelobjektiv hat den Vorteil, dass stets große Bereiche des Objektes und somit eine hohe Anzahl Punkte abgebildet werden.

Temperaturänderungen während der Bildaufnahme können prinzipiell vernachlässigt werden, da die Fertigungs-Toleranzen der Adapter größer sind als der auftretende Effekt. Verfolgt man eine Optimierung der äußeren Orientierung in Form des in Kapitel 4.1 vorgestellten Verfahrens, ist es sinnvoll die temperaturbedingte Änderung der Adaptermaße zu berücksichtigen.

Die optimale Standpunktkonfiguration stellt eine gleichmäßig um das Objekt verteilte Menge an Kamerastandorten dar. Eine gute Überdeckung ist aufgrund der hohen Redundanz und für einen stabilen Bildverband essentiell und bei *Airbus* gut realisierbar. Die Schnittwinkel und die Betrachtungsrichtungen empfiehlt es sich gemeinsam zu analysieren. Bei einem *Single*-Job ist es relevant den Schnittwinkel mehrdimensional zu betrachten, so dass eine mittlere Betrachtungsrichtung äquivalent dem Normalenvektor der Zielmarkenebene anzustreben ist. Dies ist aufgrund der Objektgröße und den Beschränkungen in der Zugänglichkeit bei *Airbus* nicht immer möglich, weshalb Unsicherheiten verstärkt im Randbereich zu erwarten sind. Die beim Vergleich von Rückwärts- und Vorwärtsschnitt bezüglich Verteilung und Anzahl der Punkte bzw. Aufnahmestandpunkte festgestellte Analogie führt auf die ebenfalls in [SUDHOLT 2001] beschriebene Relevanz der Quantität an Aufnahmen. Hingegen ist auch hier die Anzahl stets mit der Verteilung in Bezug zu setzen.

Das Auswertemodell von *V-STARs* wird hier nicht weiter untersucht, ein Vergleich mit der Software *Australis* zeigt jedoch signifikante Unterschiede in den Ergebnissen.

<b>Faktor</b>	<b>Einfluss [<math>\mu m</math>]</b>	<b>betroffen</b>
<b>Adapter</b>	30-120	Zuverlässigkeit
<b>Maßstab</b>	10-50	Zuverlässigkeit
<b>Zielmarke</b>		
Konstruktion	13-30	Zuverlässigkeit
Verdeckung	0-50	Zuverlässigkeit/ Präzision
Abschattung	15	Zuverlässigkeit
<b>Bildpunktmessung</b>	20-50	Präzision

**Tabelle 3.11:** Quantifizierbare Einflüsse auf die Zuverlässigkeit und Präzision der photogrammetrischen Messung im Objektraum

Tabelle 3.11 zeigt eine Übersicht über die Parameter, deren Einfluss sich quantifizieren lässt und sich stets auf die Genauigkeit der Messung auswirkt. Dabei wird von einer Aufnahmeentfernung zwischen  $2m$  und  $5m$  ausgegangen. Aufnahmegeometrische Effekte, welche die Homogenität der Unsicherheiten in bestimmten Richtungen beeinflussen, sind nicht berücksichtigt. Die stärksten Effekte betreffen die Zuverlässigkeit der Messung und sind auf Imperfektionen in der Fertigung der verwendeten Materialien zurückzuführen.

# Kapitel 4

## Optimierungsmöglichkeiten

Das Photogrammetrie-System *V-STARs* ist für eine hochgenaue Punktmessung ausgelegt. Seit über dreißig Jahren<sup>1</sup> wird das System vertrieben, entsprechend viel Erfahrung steckt in Soft- und Hardware. Eine Optimierung basierend auf Kamera oder Auswertesystem ist daher kein realistisches Ziel dieser Arbeit. Der Fokus liegt auf den Bereichen der Vorbereitung und der Bildaufnahme, insbesondere auf der durch die Verteilung der Messpunkte und durch die Kamerastandorte beeinflussten Aufnahmegeometrie.

### 4.1 Optimierung der Adaptermaße

Die von der *Kalay CNC Technik GmbH* gefertigten Adapter ermöglichen es einen Punkt am Messobjekt zu repräsentieren, welcher nicht direkt messbar ist. Allerdings beschränken sie die Zuverlässigkeit eines mit ihrer Hilfe konstruierten Punktes wegen ihrer Konstruktions-Toleranzen erheblich. Tabelle 3.11 zeigt, dass insbesondere bei der Varianzfortpflanzung bei einem *Stringer*-Adapter im ungünstigsten Fall Unsicherheiten von bis zu  $120\mu\text{m}$  auftreten. Das liegt unter anderem daran, dass die geometrische Konstruktion des Punktes mittels Minimalinformation geschieht (Kapitel 3.2.1). Wäre die Berechnung dieser geometrischen Elemente überbestimmt, gelänge eine zuverlässigere Konstruktion des interessierenden Punktes.

Neben diversen anderen Adaptern spielen *Stringer*- und *Buttstrap*-Adapter<sup>2</sup> bei der Messung der Rumpftrennstellen bezüglich der Anzahl der zu messenden Punkte eine übergeordnete Rolle. Wegen ihrer Größe bzw. der exzentrischen Repräsentierung des interessierenden Punktes, ist die Fortpflanzung der konstruktionsbedingten Unsicherheiten ungünstig. Die Fertigungstoleranzen von  $\pm 30 - 50\mu\text{m}$  liegen deutlich über den möglichen Messtoleranzen, welche beispielsweise mit einer Koordinatenmessmaschine erreichbar sind<sup>3</sup>. Daher existiert ein Messprotokoll, in welchem der Ist-Zustand für die Länge des Befestigungsarmes, der Ebenheit, Rechtwinkligkeit und Parallelität individuell für jeden Adapter

---

<sup>1</sup> *Geodetic.com*, letzter Zugriff 16.08.2011

<sup>2</sup> mit ihnen wird das Hautfeld des Rumpfes gemessen

<sup>3</sup> derzeit im niedrigen einstelligen  $\mu\text{m}$ -Bereich

Meßpunkte	1	2	3	3	4	4	5	6		
Kr <sub>i</sub>	Off-set Länge	Ebenheit	rechtwinklig	Parallelität	rechtwinklig	Parallelität	Bohrung Mitte *	3 x Bohrung *		
Soll-Wert in mm	173		8	8	8	8	8	8		
Toleranz in mm	±0,05	0.03	0.05	0.05	0.05	0.05	H7	H7		
Adapter Nr	Ist-Werte									
M533-70000-000G216-A400 Anf.61	173,033	0,004	0,010	0,010	0,013	0,001	i.O.	i.O.		
M533-70000-000G216-A400 Anf.62	173,031	0,013	0,018	0,005	0,014	0,005	i.O.	i.O.		
M533-70000-000G216-A400 Anf.63	173,035	0,008	0,001	0,004	0,026	0,012	i.O.	i.O.		
M533-70000-000G216-A400 Anf.64	173,044	0,014	0,001	0,009	0,006	0,011	i.O.	i.O.		
M533-70000-000G216-A400 Anf.65	173,02	0,005	0,020	0,003	0,009	0,01	i.O.	i.O.		
M533-70000-000G216-A400										

Abbildung 4.1: Ausschnitt aus dem Messprotokoll des *Stringer*-Adapters

verzeichnet ist (Abbildung 4.1).

Die Berechnung der interessierenden Punkte gelingt in *V-STARs* mit Hilfe sogenannter *Template*-Projekte. Da aufgrund der *GTI* die Positionen der Adapter am Objekt näherungsweise immer gleich sind, lassen sich die Punkte nach einmaliger manueller Definition automatisch rekonstruieren. Derzeit werden dafür die für jeden Adapter konstanten Soll-Werte zur Berechnung verwendet. Die äußere Genauigkeit der Messung könnte durch Hinzuziehen der Ist-Werte aus dem Protokoll erheblich verbessert werden. Die Schwierigkeit besteht darin die Werte jedes einzelnen Adapters den entsprechenden Messungen zuzuordnen. Zwar sind die Adapter nummeriert und somit der vorgegebenen Stelle zuzuordnen, allerdings sind die Vorgaben durch die *GTI* wegen des fehlenden Serienstandards Änderungen unterworfen, weshalb die bestehenden Sätze an Adaptern nicht komplett den aktuellen Bedingungen entsprechen. Häufig werden daher für Punkte, welche ursprünglich nicht bestückt werden sollten, laut aktueller *GTI* aber zu messen sind, beliebige Adapter aus einem anderen Satz genommen. Die Zuordnung der Adapternummern über ihre Befestigungspositionen ist also zur Zeit fehleranfällig, sicherlich aber die einfachste Methode, sobald ein fester Serienstandard erreicht ist.

Eine weitere Möglichkeit für die Zuordnung der Adapternummern zu den Abbildungen lässt sich mit Hilfe codierter Marken realisieren. Dabei wird jeder Adapter mit seinen Ist-Werten mit einer codierten Marke verknüpft und im *Template*-Projekt gespeichert. Dabei ist zu beachten, dass es sich bei den bestehenden Marken um einen 8-Bit-Code handelt, es also nur eine begrenzte Anzahl verschiedener Codes gibt. Für größere Objekte, wie beispielsweise die Sektion 18, wäre die verbleibende Anzahl Verknüpfungspunkte zu gering, somit würde

deren räumliche Verteilung darunter leiden. Zudem bedarf es einem gewissen Aufwand die Adapter vor jeder Messung mit den codierten Zielmarken zu versehen. Da es für jede Sektion eigene Adaptersätze gibt, wäre eine dauerhafte Bestückung der Adapter mit den codierten Zielmarken nur möglich, wenn auch die entsprechende Anzahl Sätze für codierte Zielmarken vorhanden wäre. Derzeit ist dies nicht der Fall.

Eine sicherlich aufwendigere und teurere Methode wäre eine von den bestehenden codierten Zielmarken unabhängige Codierung der Adapter, zum Beispiel mit Ring-Codes für die drei Adapterpunkte. Weiterhin wäre auch eine Codierung mit zusätzlichen Punkten auf jedem Adapter denkbar. Diese Variante hat den Vorteil, dass gleichzeitig die Redundanz in der Repräsentation des interessierenden Punktes erhöht werden könnte, indem die zusätzlichen Punkte zur Konstruktion hinzugezogen werden. Beide Möglichkeiten laufen allerdings auf neu zu konstruierende Adapter hinaus, weshalb der Kosten-Nutzen-Faktor genauer zu analysieren wäre.

Zunächst ließe sich allerdings ohne großen Mehraufwand die Genauigkeit steigern, indem für vorhandene, der *GTI* entsprechende Adapter, die kalibrierten Adapterlängen in das *Template*-Projekt übernommen werden. Da in diesem Falle keine Toleranz mehr in den Abmessungen der Adapter besteht, ist der Einfluss durch Temperaturänderungen während der Messung nun signifikant für die Zuverlässigkeit der Messung und muss berücksichtigt werden (Kapitel 3.3.1). Für hochgenaue Messungen ist somit eine kontinuierliche Aufzeichnung der Temperatur sinnvoll. Die Anwendbarkeit müsste in einer künftigen Trennstellenvermessung getestet werden.

## 4.2 Optimierung der Zielmarkengröße

Die Größe und Art der Zielmarke hat einen wesentlichen Einfluss auf die Genauigkeit der Messung. Im Sinne einer genauen Bildpunktmessung sollte die Zielmarke im Bild möglichst groß sein. Bei einer höheren Anzahl Pixel ist die Kantendetektion als präziser einzustufen [WIGGENHAGEN und RAGUSE 2003]. Kapitel 3.2.2 zeigt allerdings, dass aufgrund der Abbildungsexzentrizität, welche mit zunehmender Zielmarkengröße größer wird, eine maximale Größe für den Zielmarkendurchmesser gilt, bei der die Abweichungen die Bildmessgenauigkeit übersteigen. Hinzu kommen unabhängig vom Durchmesser Effekte durch Verdeckung und Abschattung von Randkugeln durch die Maske der Marke.

Für die Korrektur der Abbildungsexzentrizität bestehen zwar Algorithmen ([OTEPKA und FRASER 2004] und [OTEPKA 2004]), wegen fehlender Kenntnis ob ihrer Anwendung in *V-STARs* sollten die Limitierungen aus Kapitel 3.2.2 bei hohen Genauigkeitsansprüchen allerdings eingehalten werden.

Eine rein theoretische Überlegung besteht darin, inwiefern sich die Abbildungsexzentrizität und die Verdeckung der retroreflektierenden Zielmarke durch ihre Maskierung zueinander verhalten (siehe auch [OTEPKA 2004]). Der Einfluss der Verdeckung bewirkt, dass der Mittelpunkt in Richtung der zur Kamera abgewandten Kante der Zielmarke ermittelt wird

(Abbildungen 3.5(a) und 3.5(b)). Der Versatz der Abbildungsexzentrizität wirkt genau in die entgegengesetzte Richtung. Da beide Effekte vom Betrachtungswinkel  $\alpha$  abhängen, die Größe der Zielmarke und die Aufnahmeentfernung jedoch nur die Abbildungsexzentrizität beeinflussen, muss es einen bestimmten Zielmarkendurchmesser und eine bestimmte Entfernung geben, bei der sich beide Effekte aufheben.

Eine Optimierung hin zu einer bestimmten Aufnahmeentfernung ist jedoch nicht möglich, da die Variation der Verdeckung in Abhängigkeit von der Betrachtungsrichtung  $\alpha$  nicht allgemein bestimmbar ist. Zudem zeigen praktischen Untersuchungen (Kapitel 4.3.2), dass der Zusammenhang zwischen Verdeckung und Betrachtungswinkel nicht kontinuierlich ist. Ausgehend von einem Einfluss der Verdeckung von etwa  $50\mu m^4$  und einem Zielmarkendurchmesser von  $12mm$ , ist die Abbildungsexzentrizität für Distanzen von unter einem Meter in derselben Größenordnung. Diese geringe Aufnahmeweite wirkt sich nachteilig auf diverse andere Faktoren, wie die Verteilung und Anzahl der Objektpunkte im Bild, aus und ist daher einer Optimierung nicht dienlich.

Eine Anpassung der Zielmarken basierend auf ihren kalibrierten Ist-Werten wie für die Adapter (Kapitel 4.1) ist mangels effektiver Möglichkeiten zur Identifizierung einzelner Zielmarken und der Zuordnung ihrer kalibrierten Maße nicht möglich. Zudem sind Kalibrierprotokolle wie in Abbildung 4.1 für Zielmarken nicht verfügbar.

### 4.3 Aufnahmegeometrie

Die Aufnahmegeometrie ist ein relativ komplexer Faktor, der von einer Reihe sich teilweise widersprechender Einflüsse abhängt. Zunächst lässt sich Aufnahmegeometrie eingrenzen auf die Schritte der Vorbereitung und Bildaufnahme. Die primären Einflüsse sind die Verteilung und die Anzahl der Objektpunkte (Vorbereitung) und der Standpunkte (Bildaufnahme) und unterliegen uneingeschränkt dem Anwender, weshalb ein gewisses Optimierungspotential gegeben ist. Zwar sind beide Faktoren durch die Struktur und den Aufbau des Messobjektes in ihrer Vielfältigkeit beschränkt, dennoch ist es entscheidend das geometrische Design der Messung zu verstehen und gewisse Konfigurationen nach ihrer Güte klassifizieren zu können. Eine Optimierung ergäbe sich dann in einer sinnvollen Verteilung der Verknüpfungs- und Standpunkte. Entscheidend für die Qualität der Messung sind dabei zum einen der Schnittwinkel, zum anderen die Betrachtungsrichtung, sowohl am Objekt- als auch am Standpunkt.

In den Kapiteln 3.2.2, 3.2.3 und 3.3.2 sind dazu bereits einige theoretische Fakten und Untersuchungen dargestellt. Inwiefern die Schlussfolgerungen dieser Untersuchungen die Qualität einer Messung mit einem modernen, kommerziellen Messsystem wie *V-STARs* oder *Australis* beeinflussen ist allerdings nicht direkt einschätzbar. Um diese Einflüsse zu analysieren, sind praktische Untersuchungen mit diesem System durchgeführt worden, die im Folgenden näher erläutert werden.

---

<sup>4</sup>Wie in [DOLD 1997] beschrieben. Dieselbe Größenordnung zeigen auch die praktischen Messungen in Kapitel 4.3.2

### 4.3.1 Praktische Messung im *Multi-Modus*

In diesem Versuchsaufbau geht es primär darum, den Einfluss der Betrachtungsrichtung auf die Punktbestimmung zu simulieren. Hierfür ist ein Werkstück gefertigt worden, an welchem unterschiedliche Zielmarken befestigt werden können. Dieses soll in verschiedenen Ausrichtungen von den Kameras aufgenommen werden und die Punktbestimmung abhängig von der Betrachtungsrichtung evaluiert werden. Der Vorteil einer Messung im *Multi-Modus* ist, dass theoretisch nahezu alle Einflüsse in den zeitlich aufeinander folgenden Aufnahmen wegen der Synchronisierung und der festen Kamerastandpunkte dieselben sind. Um dies garantieren zu können ist die Untersuchung im Feinmessraum von *Airbus* mit günstigen<sup>5</sup> und konstanten klimatischen Bedingungen durchgeführt worden.

#### Vorarbeiten

Für die Vergleichbarkeit der Objektpunktkoordinaten in den verschiedenen Aufnahmen ist es essentiell ein System zu schaffen, welches die unterschiedlichen Ausrichtungen des interessierenden Punktes mitmacht. Da die Bestimmung der das System definierenden Punkte nicht durch die Veränderung der Betrachtungsrichtung beeinflusst werden soll, wird das Werkstück mit sechs 3D-Targets bestückt, welche aus allen Blickrichtungen mit gleichbleibender Genauigkeit gemessen werden können. Um die Ergebnisse kontrollierbar zu machen, werden diese sechs Punkte mit einer Koordinatenmessmaschine<sup>6</sup> eingemessen. Mit den absoluten Koordinaten ist es zudem möglich, zusätzliche Maßstabsfaktoren in die Messung einzubringen. Das lokale Koordinatensystem ist so ausgerichtet, dass die Ebene der interessierenden Zielmarke parallel zur  $X - Y$ -Ebene liegt.

Die Bewegung des Werkstückes gegenüber den Kameras wird mit Hilfe eines Drehtisches realisiert. Dies hat den Vorteil, dass es sich bei den Bewegungen um gleichmäßige Drehungen um eine Achse handelt, die Exzentrizität der elliptischen Abbildung also immer dieselbe Orientierung hat.

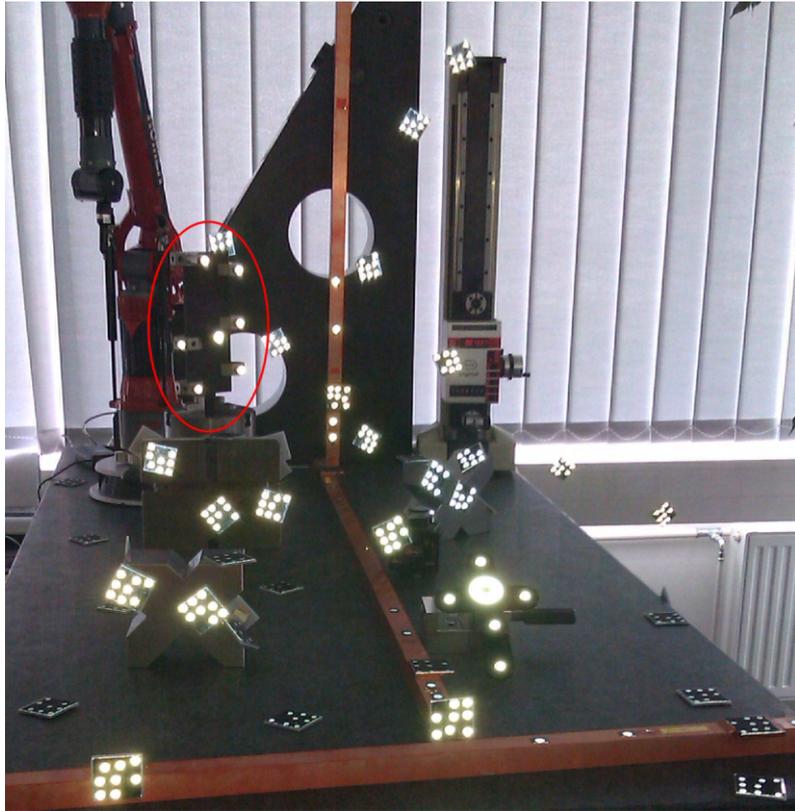
#### Versuchsaufbau

Eine Aufnahme im *Multi-Modus* ist eine Online-Messung, bei der zwei auf Stativen aufgebauete Kameras synchron zueinander eine Situation aufnehmen, welche direkt im Echtzeitrechner ausgewertet wird und sofort Objektpunktkoordinaten liefert. Die Orientierung der Aufnahmen gelingt über einen zuvor ausgeführten *Single-Job*, in dem die Objektkoordinaten der codierten Verknüpfungspunkte bestimmt werden. Die Kameras sind in einem Abstand von etwa  $3m$  zueinander und zum Objekt, repräsentiert durch das Werkstück, konvergent auf dessen Mitte ausgerichtet. Dadurch wird ein für bei *Airbus* durchgeführte Messungen im *Multi-Modus* realistischer Schnittwinkel am Objektpunkt von etwa  $60^\circ$  garantiert. Das in den Drehtisch eingespannte Werkstück mit dem zuvor definierten lokalen Koordinatensystem

---

<sup>5</sup>Temperatur von  $20^\circ C$

<sup>6</sup>*PMS-Serie, Dr. Heinrich Schneider Messtechnik GmbH*



**Abbildung 4.2:** Versuchsaufbau mit dem Werkstück (rote Markierung)

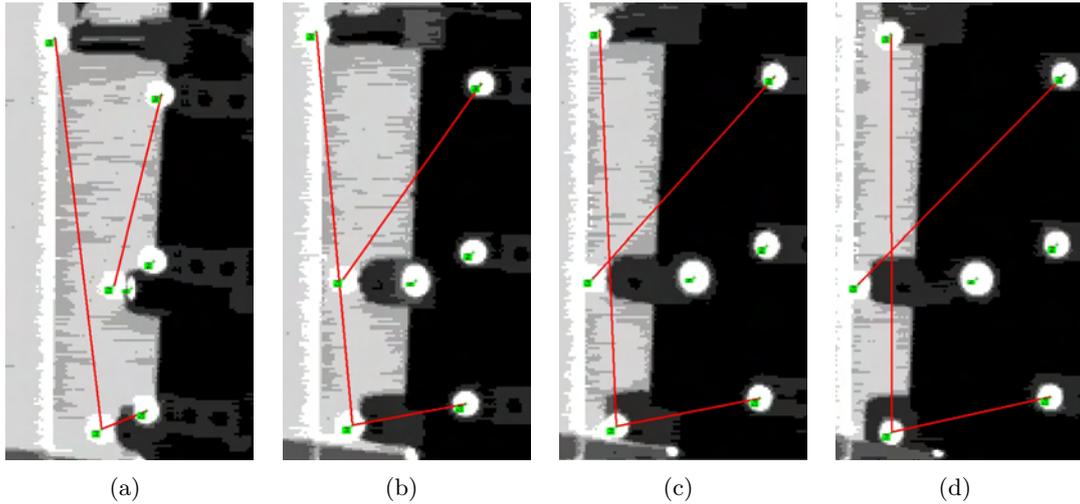
und der zu untersuchenden Zielmarke steht in der Mitte eines Messtisches. Im Umkreis von etwa einem Meter um das Zentrum herum sind codierte Zielmarken für die Verknüpfung der Bilder positioniert. Drei Maßstäbe mit jeweils vier Distanzen bis  $1.50m$  sind in drei senkrecht zueinander stehenden Richtungen platziert (Abbildung 4.2).

### Versuchsdurchführung

Das Werkstück lässt sich mit unterschiedlichen Zielmarken bestücken. Die folgende Beschreibung gilt für die Untersuchung eines *2D-Knopf-Targets*.

Nach einmaliger Durchführung zweier *Single-Jobs*<sup>7</sup> für die Orientierung der beiden Kameras wird zunächst die Zielmarke so ausgerichtet, dass der Betrachtungswinkel der einen Kamera minimal ist und die Zielmarke gerade eben als Punkt erkannt wird. Die Aufnahme sowie alle Einstellungsmöglichkeiten der beiden Kameras lassen sich über den Rechner steuern. Die Software erkennt die Punkte des Werkstückes als Neupunkte und berechnet deren Koordinaten im übergeordneten Koordinatensystem, gegeben durch die platzierte *Autobar*. Eine Transformation in das lokale System des Werkstückes erfolgt erst in der Nachbearbeitung. Nach jeder Aufnahme wird das Werkstück im Drehtisch um einen Betrag von  $5^\circ$  in Richtung

<sup>7</sup>Es wird nur ein *Single-Job* für die Orientierung benötigt, ein weiterer wird lediglich für die synchrone Kalibrierung der zweiten Kamera durchgeführt



**Abbildung 4.3:** Verschiedene Aufnahmeepochen einer Kamera. In rot sind die mit der Koordinatenmessmaschine gemessenen Strecken dargestellt

der Normalen der Basis und darüber hinaus gedreht, bis sich die Zielmarke außerhalb des messbaren Bereiches befindet. Abbildung 4.3 zeigt verschiedene Epochen einer Kamera. Bei der Startepoche (Bild 4.3(a)) ist der Betrachtungswinkel zum interessierenden Punkt sehr klein.

Die Aufnahmen können nun paarweise untersucht werden. Das geschieht mit der Auswertesoftware *Australis*. Dabei muss darauf geachtet werden, dass die Parameter der inneren Orientierung beider Kameras nicht mitgeschätzt, sondern den zuvor durchgeführten *Single-Jobs* entnommen und als konstant vorausgesetzt werden. Sind die Objektkoordinaten des interessierenden Punktes gelöst, wird eine 3-2-1 Transformation über die gemessenen Datumpunkte am Werkstück durchgeführt.

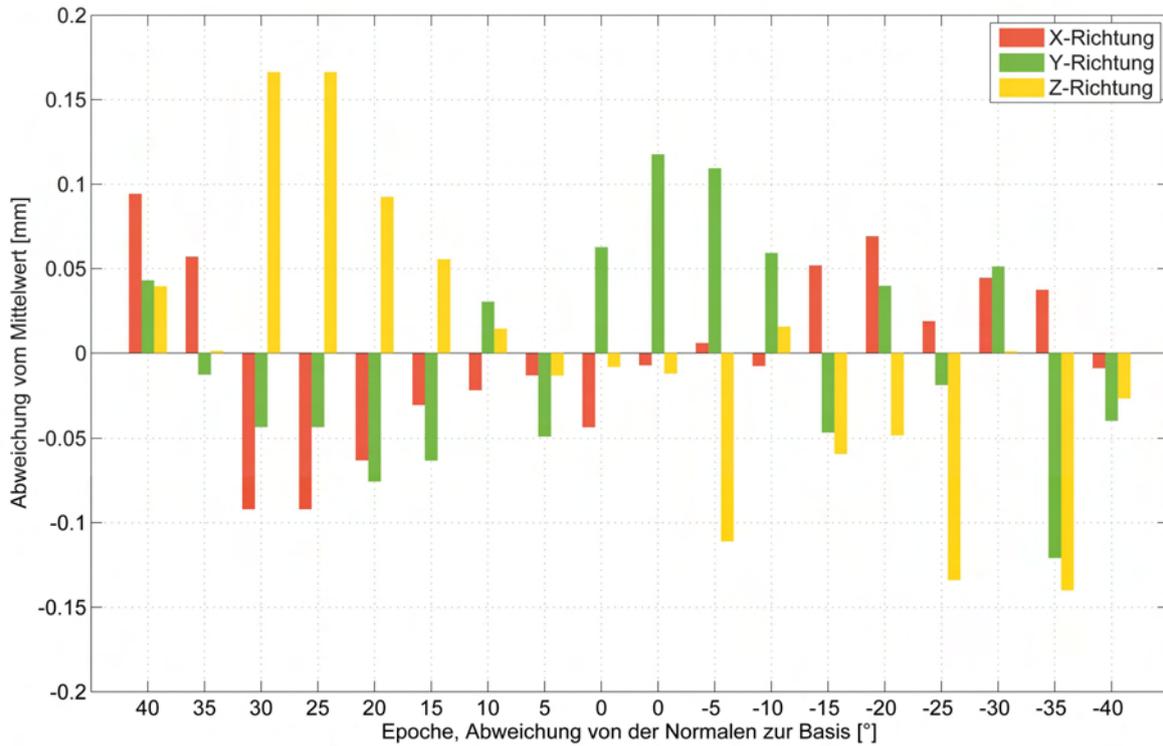
## Ergebnisse

Als Ergebnis lässt sich anschaulich die Variation der gemessenen Objektkoordinaten des Punktes in den verschiedenen Epochen darstellen. Abbildung 4.4 stellt die Abweichungen der gemessenen von der mittleren Punktposition in jede der drei Richtungen ( $X$ ,  $Y$ ,  $Z$ ) dar.

Die 18 Aufnahmeepochen umfassen dabei das gesamte Blickfeld der beiden Kameras. Epoche 9 und 10 entsprechen einer voneinander unabhängigen Orientierung der Zielmarke senkrecht zur Basis (Abweichung von der Normalen = 0).

Der 95 prozentige Konfidenzbereich mit den Intervallgrenzen  $a$  und  $b$  zeigt bei einer theoretischen Standardabweichung  $\sigma_{\mathbf{X}}$  von  $40\mu\text{m}$ <sup>8</sup>, dass die Abweichungen in  $X$ - und  $Y$ -Richtung in beinahe allen Epochen zufällig sind:

<sup>8</sup>Aus den Angaben für die Genauigkeit eines *Multi-Jobs* für ein etwa  $3\text{m}$  großes Objekt [GSI 2009b]



**Abbildung 4.4:** Variation der Punktmessung in den drei Koordinatenrichtungen abhängig von der Aufnahmeepoche

$$\frac{|a - b|}{2} = \sigma_{\mathbf{X}} \cdot y_{1-0,975} \Leftrightarrow 0.04\text{mm} \cdot 1,96 = 0.078\text{mm} \quad (4.1)$$

Lediglich in  $Z$ -Richtung liegen die Abweichungen über dem Konfidenzintervall. Diese sind, wie zu erwarten, bei einer Ausrichtung zur Basis am geringsten (mit Ausnahme der Epoche 11). Zudem besitzt die Unsicherheit in Abhängigkeit der Richtung der Verdrehung gegenüber der Basis ein anderes Vorzeichen. Trotz der Stochastizität der Abweichung in  $Y$ -Richtung zeigt sich eine schwingungshafte Systematik in den ersten 13 Epochen. Auch in  $X$ -Richtung ist ein Vorzeichenwechsel nach Überschreiten der mittleren Lage als Trend erkennbar.

Insgesamt reichen diese Ergebnisse für eine signifikante Aussage über den Effekt der Betrachtungsrichtung nicht aus, weshalb die Steigerung der Messgenauigkeit in einer weiteren Untersuchung unabdingbar ist.

### 4.3.2 Praktische Messung im *Single-Modus*

Eine Messung im *Single-Modus* ist in der Regel wegen der höheren Anzahl Aufnahmen genauer als eine Messung im *Multi-Modus*. Daher soll in dieser praktischen Messung neben der erneuten Untersuchung des Einflusses durch die Betrachtungsrichtung ein Augenmerk auf

den Schnittwinkel gelegt werden. Dieser hat wegen des konstanten Aufbaus bei der zuvor beschriebenen Messung im *Multi-Modus* keinen Einfluss gehabt.

### **Versuchsaufbau**

Der Versuchsaufbau ist prinzipiell ähnlich wie der in Kapitel 4.3.1 beschriebene. Die Ausnahme bildet der Wegfall des Drehtisches, da das Werkstück nun statisch aufgenommen wird. Unterschiedliche Betrachtungswinkel werden in dieser Messung mit Hilfe der verschiedenen Aufnahmestandpunkte realisiert. Das Werkstück liegt von allen Perspektiven gut einsehbar in der Mitte des Messtisches. Der interessierende Punkt wird durch ein *2D-Knopf-Target* repräsentiert, dessen Ebene waagrecht, parallel zur Tischebene verläuft. Die Anzahl, Ausrichtung und Verteilung der Verknüpfungspunkte unterscheidet sich insofern von dem zuvor beschriebenen Versuch, als dass in diesem Versuch nicht nur eine Aufnahme-richtung abgedeckt werden muss, sondern ein Rundumverband. Abgesehen davon bedarf es keinem Aufbau fester Kamerastationen.

### **Versuchsdurchführung**

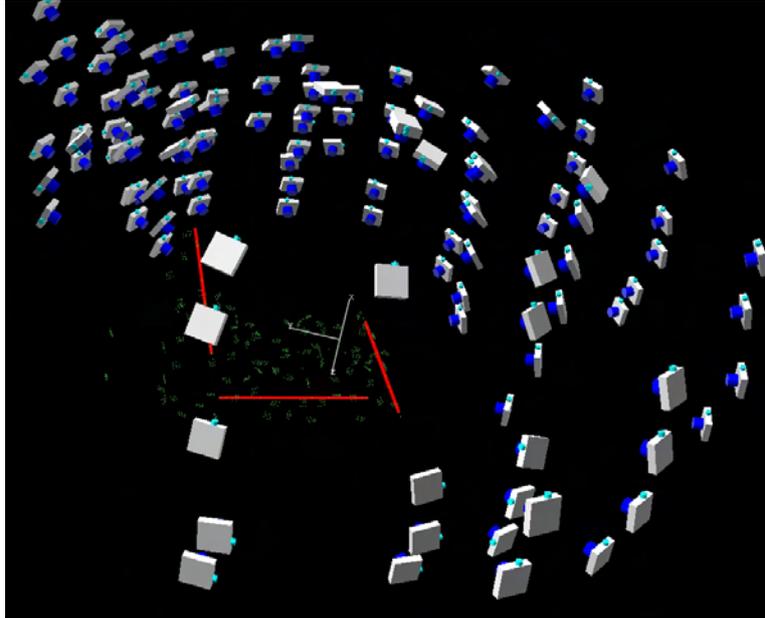
Die Durchführung der Untersuchung ähnelt einer standardmäßigen Aufnahme eines konventionellen Messobjektes, wie zum Beispiel einer Rumpftrennstelle. Das Objekt bleibt während der Messung statisch und muss frei von jeglichen Einflüssen sein, die die Situation verändern. Allerdings ist es essentiell, dass die Aufnahmestandpunkte gleichmäßig um das Objekt herum verteilt sind. Da eine Variation der Betrachtungsrichtung in den Bildern durch Aufnahmen in unterschiedlicher Höhe ermöglicht wird, bedarf es aus Gründen der Vergleichbarkeit identischen Höhenebenen im Verband. Insgesamt werden sechs Ebenen realisiert. Damit diese Aufnahmen unabhängig von anderen Faktoren, wie beispielsweise der Abbildungsexzentrizität sind, werden die Standpunkte so gewählt, dass sie in etwa über dieselbe Aufnahmeentfernung verfügen. Für die Untersuchung des Einflusses des Schnittwinkels der Strahlen werden aus einer Richtung clusterartig einige Aufnahmen sehr dicht beieinander gemacht (Abbildung 4.8).

In dieser Untersuchung werden 125 Bilder aufgenommen, die Verteilung ist in Abbildung 4.5 zu sehen. Die sechs Höhenebenen lassen sich gut an den fünf übereinander liegenden Standorten links im Bild und den senkrecht über der Situation befindlichen Standorten ausmachen.

Die Auswertung kann mit einer beliebigen Konfiguration von Aufnahmen geschehen, welche Erkenntnisse über die zu untersuchenden Faktoren, dem Einfluss der Betrachtungsrichtung und dem Schnittwinkel der Strahlen eines Punktes, verspricht.

### **Ergebnisse**

Die Ergebnisse einer Berechnung des gesamten Bündels mit allen Aufnahmen sind in Tabelle 3.10 im vorigen Kapitel zusammengefasst, die Koordinaten des interessierenden Punktes stellt



**Abbildung 4.5:** Verteilung der Aufnahmen im *Single-Job*

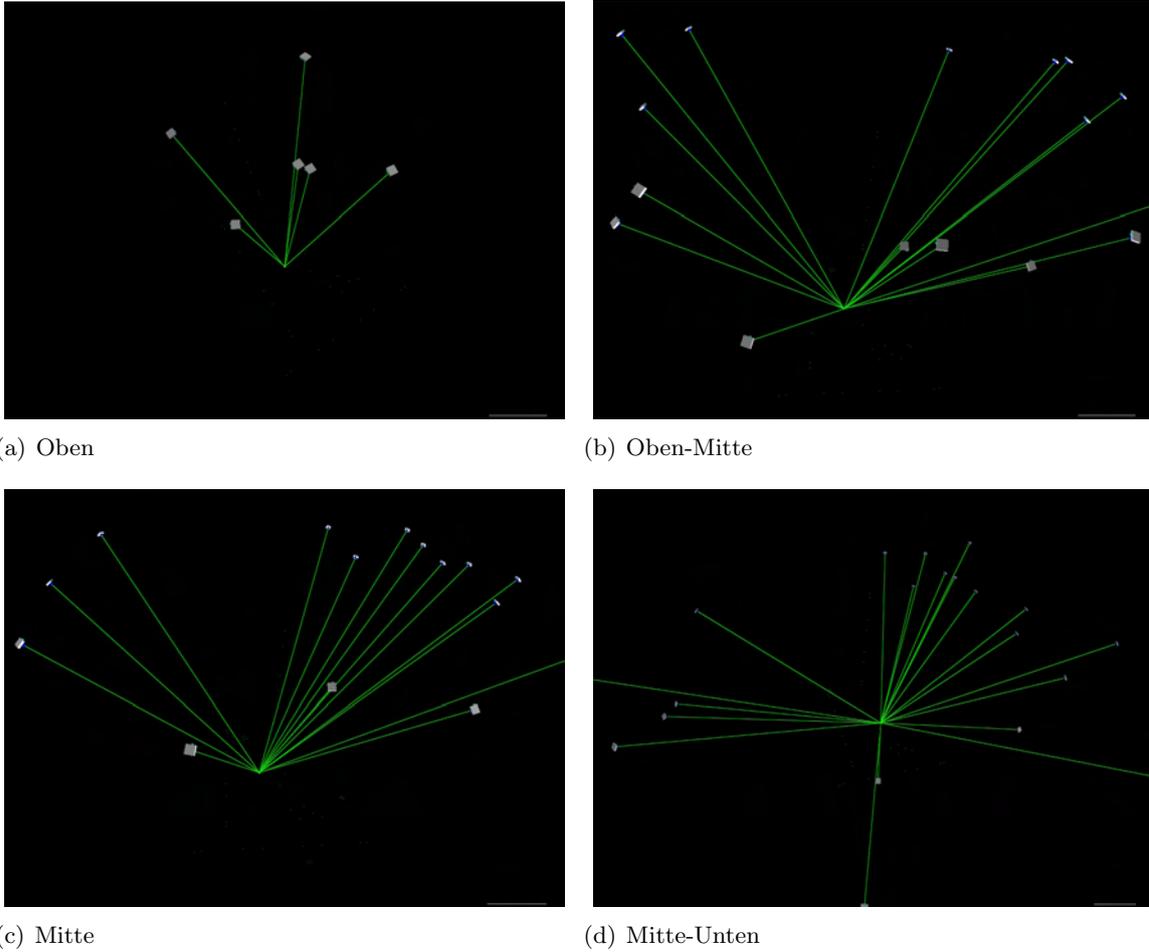
	<i>V-STARs</i>	<i>Australis</i>	Differenz	eigene BA
<b>Koordinaten d.</b>	58.4940	58.6852	0.1912	56.9184
<b>interess. Punktes [mm]</b>	224.1460	224.0393	-0.1067	218.6136
<b>(<i>X, Y, Z</i>)</b>	272.5170	272.4688	-0.0482	268.9951

**Tabelle 4.1:** Ergebnis der Punktbestimmung des gesamten Bündels mit den Programmen *V-STARs* und *Australis* und einer eigenen Bündelausgleichung

Tabelle 4.1 dar.

Die Punktmessung in beiden Programmen ist mit einer Differenz im Bereich bis zu  $200\mu m$  behaftet. Die Einflüsse der in dieser Messung zu untersuchenden Faktoren auf die Punktmessung sind erwartungsgemäß kleiner, weshalb ein Vergleich absoluter Koordinaten beider Programme in diesem Zusammenhang keinen Sinn macht. Dennoch wirft der Unterschied in den Ergebnissen Zweifel bezüglich der Zuverlässigkeit der photogrammetrischen Vermessung bei der *Airbus Operations GmbH* auf, welche aufgrund fehlender übergeordneter Bestimmung der Punktkoordinaten hier nicht geklärt werden können. Die Abweichungen zur eigens programmierten Bündelausgleichung liegen im Bereich einiger *mm*. Hier wird deutlich, welchen Einfluss eine unterschiedliche Modellbildung in der Ausgleichung haben kann.

Der Einfluss der Betrachtungsrichtung auf die Punktbestimmung lässt sich mit Hilfe von einzelnen Bündeln mit einer Auswahl an Aufnahmen analysieren, deren Betrachtungsrichtung in etwa gleich ist, die Zielmarke aber von unterschiedlichen Richtungen aus darstellen. Abbildung 4.6 zeigt vier der fünf realisierbaren Konfigurationen. Dabei ist zu beachten, dass beispielsweise das Bündel mit Blick von oben (Abbildung 4.6(a)) lediglich sechs Aufnahmen beinhaltet. Andere Bündel haben deutlich mehr Aufnahmen. Tabelle 4.2 zeigt ein



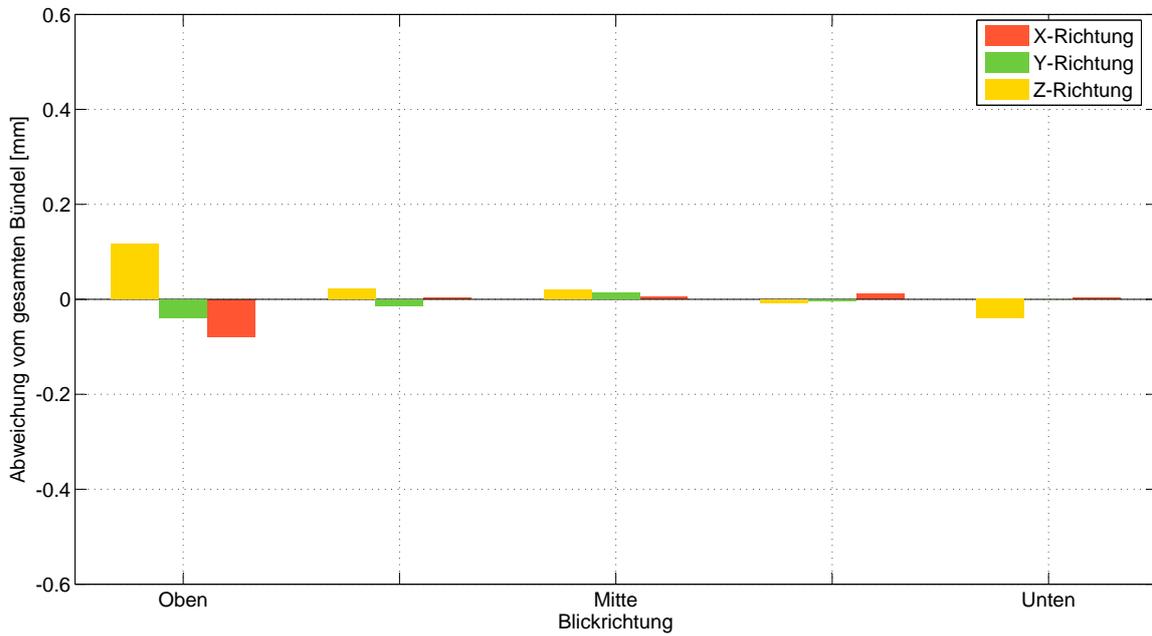
**Abbildung 4.6:** Konfigurationen für die Untersuchung des Betrachtungswinkels

	RMS <i>V-STARS</i> [ $\mu\text{m}$ ]	RMS <i>Australis</i> [ $\mu\text{m}$ ]
<b>Oben</b>	0.14	0.46
<b>Oben-Mitte</b>	0.17	0.53
<b>Mitte</b>	0.18	0.48
<b>Mitte-Unten</b>	0.23	0.55
<b>Unten</b>	0.23	0.58

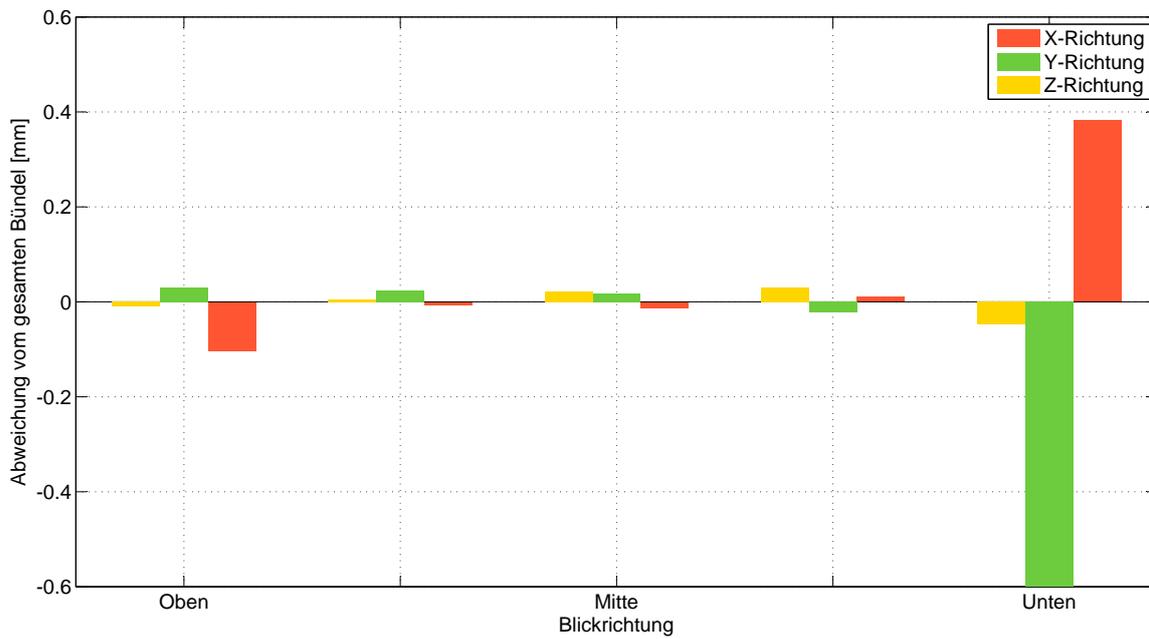
**Tabelle 4.2:** Genauigkeiten der einzelnen Bündel in den Programmen *V-STARS* und *Australis*

fast ausnahmslos stetes Anwachsen des RMS mit abnehmendem Betrachtungswinkel. Dieses Verhalten stützt die These einer sich nachteilig auf die Genauigkeit auswirkenden flachen Betrachtungsrichtung und das trotz höherer Anzahl an Aufnahmen.

Weitere Schlussfolgerungen lässt die Betrachtung der Koordinaten des interessierenden Punktes in den einzelnen Bündeln zu. Abbildung 4.7 zeigt die Abweichungen der Koordinaten in den drei Richtungen zu den Werten aus dem gesamten Bündel. Auffällig sind die Diskrepanzen zwischen beiden Programmen bei dem Bündel mit der Blickrichtung von unten.

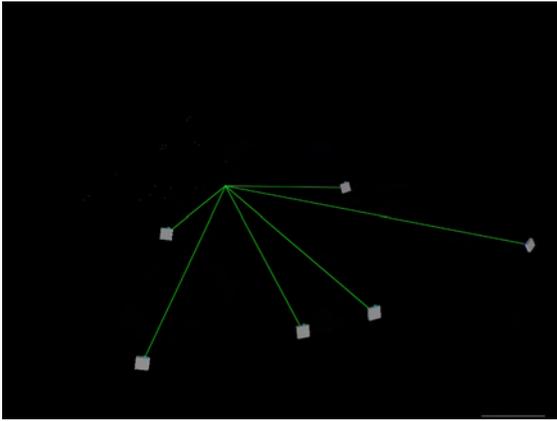


(a) *V-STARS*

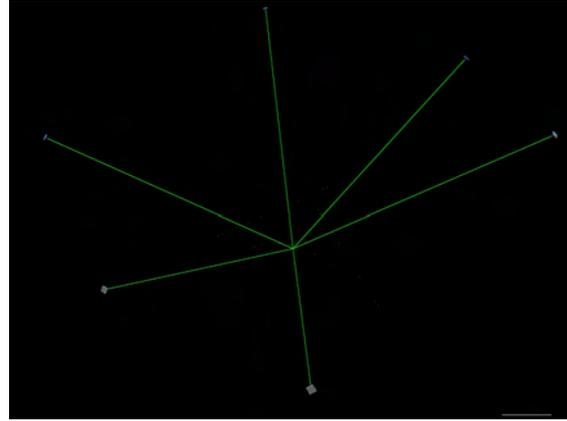


(b) *Australis*

**Abbildung 4.7:** Variation der Punktmessung in den drei Koordinatenrichtungen abhängig von der Betrachtungsrichtung in den Programmen *V-STARS* und *Australis*



(a) Clusterartige Anordnung



(b) Verteilte Anordnung

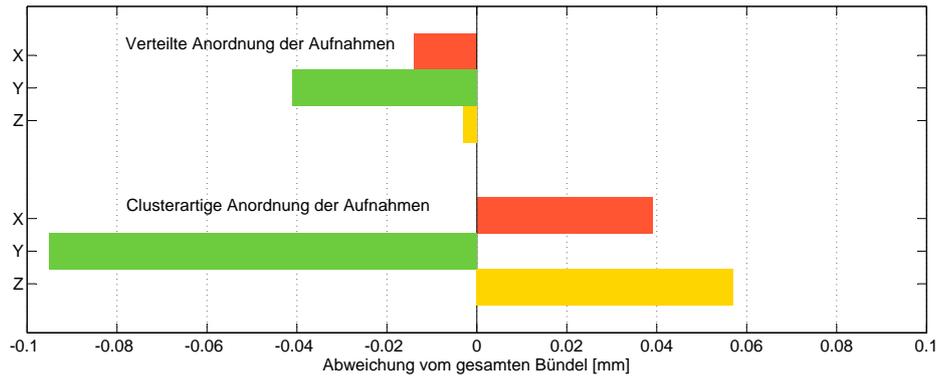
**Abbildung 4.8:** Konfigurationen für die Untersuchung des Schnittwinkels

Bei *V-STARs* sind lediglich geringe Abweichungen zur mittleren Position aus dem gesamten Bündel zu erkennen. Somit unterscheidet sich das Ergebnis nicht wesentlich von denen der anderen Blickrichtungen, mit Ausnahme der von oben. *Australis* berechnet aus den Aufnahmen mit flachem Blickwinkel deutlich andere Koordinaten für den betreffenden Punkt, als mit dem gesamten Bündel. Es ist möglich, dass *V-STARs* gewisse Systematiken, welche bei flacher Betrachtungsrichtung auftreten, in der Auswertung berücksichtigt, die in *Australis* nicht implementiert sind. Diese könnten zum Beispiel zielmarkenbedingt oder durch die Bildpunktmessung bedingt sein.

Weiterhin auffällig ist die Abweichung in  $X$ -Richtung, der orthogonal zur Zielmarkenebene verlaufenden Richtung, bei Blickrichtung von oben. In beiden Auswertungen liegt der Wert zwischen  $80\mu m$  und  $100\mu m$  unter dem Wert des gesamten Bündels. Dieses Phänomen lässt sich auf den Einfluss durch die Verdeckung und Abschattung der Retro-Randkugeln der maskierten Zielmarke zurückführen. Wie in Kapitel 3.2.2 beschrieben führt dieser dazu, dass der triangulierte Punkt über der Zielmarkenebene liegt. Bei einer Betrachtung von oben finden eine durch die Maskierung verursachte Verdeckung und Abschattung nicht statt, weshalb der Punkt in diesem Fall in  $X$ -Richtung tiefer liegt.

Effekte, die durch den Schnittwinkel zwischen den Strahlen zwischen Punkt und Kamerastandpunkten hervorgerufen werden, lassen sich durch einen Vergleich der Punktmessung von zwei verschiedenen Standpunktverteilungen untersuchen. Das eine Bündel wird mit Aufnahmen, welche sehr dicht beieinander liegen und eine clusterartige Anordnung bilden, berechnet. Das andere Bündel umfasst Aufnahmen, welche gut im Raum verteilt sind. Um fremde Einflussquellen zu mindern, werden Aufnahmen ausgewählt, welche im Mittel etwa die gleiche Betrachtungsrichtung aufweisen. Abbildung 4.8 zeigt die beiden Aufnahmekonfigurationen.

Die clusterartige Anordnung erzielt unter *V-STARs* einen  $RMS$  von  $0.14\mu m$ , die gut verteilte Anordnung kommt auf einen Wert von  $0.17\mu m$ . Ursache für diese Werte ist wohl der Grund, dass bei der verteilten Anordnung die Anteile weiterer die Genauigkeit beeinflus-



**Abbildung 4.9:** Variation der Punktmessung in den drei Koordinatenrichtungen abhängig vom Schnittwinkel

senden Faktoren größer sind. Der Punkt wird aus unterschiedlichen Perspektiven betrachtet, weitere Verknüpfungspunkte, die nur aus bestimmten Richtungen zu sehen sind, werden gemessen. Dies führt zu einem höheren Unsicherheitspotential. Vergleicht man dagegen lediglich die Koordinaten des interessierenden Punktes so wird deutlich, dass die Abweichungen gegenüber den aus dem gesamten Bündel berechneten Werten bei der verteilten Anordnung in allen Richtungen geringer ausfallen (Abbildung 4.9). Auffällig ist zudem die Abweichung in  $Y$ -Richtung bei der clusterartige Anordnung, welche etwa doppelt so hoch ist wie in den beiden anderen Koordinatenrichtungen. Da die  $Y$ -Richtung näherungsweise der mittleren Aufnahmerichtung bei der clusterartigen Anordnung entspricht, werden hiermit die Ergebnisse aus Kapitel 3.2.3 bestätigt.

### 4.3.3 Zusammenfassung

Die praktischen Untersuchungen zeigen, dass es Einflüsse in der Aufnahmegeometrie gibt, die sich negativ auf die Genauigkeit des Ergebnisses auswirken. Dabei bewirkt zum Beispiel die Verdeckung der retroreflektierenden Kügelchen durch die Maskierung einen konstanten Offset, welcher bei Kenntnis über die Zielmarkenebene korrigiert werden kann. Hierbei bietet sich der Algorithmus von [OTEPKA und FRASER 2004] bzw. [OTEPKA 2004] an, welcher eigentlich für die Korrektur der Abbildungsexzentrizität entwickelt wurde. Inwiefern diese Optimierung in eine kommerzielle Software implementierfähig ist muss weiter untersucht werden.

Zwar lässt sich in *V-STARs* kein negativer Einfluss durch einen niedrigen Betrachtungswinkel erkennen, die Ergebnisse aus der Berechnung in *Australis* zeigen jedoch, dass allgemein von einer Beeinträchtigung der Ergebnisse ausgegangen werden kann. Bei Verwendung von *V-STARs* bedeutet dies jedoch, dass eine Optimierung durch den Nutzer während der Vorbereitung und Bildaufnahme nur bedingt nötig ist. Entscheidend ist, dass das Objekt ausreichend mit gut verteilten Objektpunkten versehen ist. Eine Platzierung von Verknüpfungspunkten außerhalb des Objektes an der Tragkonstruktion kann aus Gründen der Verteilung und besserer resultierender Schnittwinkel für die Aufnahmestandorte vorteilhaft

sein. Allerdings besteht die Gefahr, dass sich Tragkonstruktion und Objekt während der Messung unterschiedlich bewegen, weshalb bei inkonstanten Bedingungen, hervorgerufen zum Beispiel durch Fertigungs-Tätigkeiten in der Nähe des Messobjektes oder wechselnden klimatischen Bedingungen<sup>9</sup> darauf verzichtet werden sollte.

Eine gute, weiträumige Verteilung der Aufnahmestandorte ist ebenfalls zu erstreben. Dadurch, dass sich in *V-STARs* Einflüsse durch die Betrachtungsrichtung zwar zeigen, in ihrer Stärke jedoch gering sind, ist im Sinne guter Schnittbedingungen und Objektkoordinaten homogener Genauigkeit das Objekt aus möglichst vielen Perspektiven aufzunehmen. Da *V-STARs* automatisch Beobachtungen mit zu kleinem Betrachtungswinkel aus der Berechnung ausschließt, besteht kein Risiko. Dabei spielt die Redundanz, also die Anzahl vergleichbarer Aufnahmen, eine eher untergeordnete Rolle. Es zeigt sich in den Versuchen, dass selbst Bündel mit einer geringen Anzahl Aufnahmen hohe Genauigkeiten aufweisen. Da eine Aufnahme im Vergleich zur Bestückung des Messobjektes allerdings nur wenig Aufwand bedarf, seien bezüglich ihrer Anzahl im Sinne einer Optimierung keine Grenzen gesetzt.

---

<sup>9</sup>Ein Wechsel zwischen direkter Sonneneinstrahlung und Schatten bewirken auf die Dauer einer Messung unter Umständen eine merkliche Änderung der Temperatur

# Kapitel 5

## Entwicklung von Kenngrößen

Die Entwicklung von Kenngrößen, welche die Güte der Aufnahmegeometrie angeben, soll eine allgemeingültige Möglichkeit sein die geometrische Güte eines Bündels zu beschreiben. So lassen sich die im vorigen Kapitel gewonnenen Erkenntnisse über die Ansprüche an das geometrische Design kontrollieren. Erweiternd zu den Kenngrößen aus [WIGGENHAGEN und RAGUSE 2003] werden in diesem Kapitel Kenngrößen für den Schnittwinkel und die Betrachtungsrichtung hergeleitet. Mit ihrer Hilfe können künftige Messungen bei *Airbus* dahingehend optimiert werden, dass sie den Kriterien dieser Kenngrößen entsprechen. Ihre Implementierung und Anwendung erfolgt mittels der Software *Matlab*. Tabelle 5.1 fasst die Kriterien, die für den Schnittwinkel und die Betrachtungsrichtung an Objekt- und Kamerastandpunkt im Allgemeinen gelten sollten, zusammen.

### 5.1 Entwicklung einer Kenngröße für den Schnittwinkel

Die Güte der Aufnahmegeometrie bezieht sich zum einen auf den Rückwärtsschnitt in Form der Verteilung der Objektpunkte, zum anderen auf den Vorwärtsschnitt bei Betrachtung der Verteilung der Aufnahmestandorte. Der Schnittwinkel beeinflusst die Güte der Messung bei Vorwärts- und Rückwärtsschnitt. Eine gute Punktverteilung im Raum hat eine gute geometrische Bestimmung der äußeren Orientierung der Aufnahme zur Folge, die Verteilung der Aufnahmestandorte wirkt sich auf die Genauigkeit der Objektpunktbestimmung aus. Kenngrößen für den Schnittwinkel müssen also unabhängig voneinander auf beide Situationen angewendet werden, die Entwicklung erfolgt in beiden Fällen analog.

Der Schnittwinkel zwischen zwei Strahlen ist definiert als Winkel zwischen den Richtungsvektoren der beiden Strahlen. Die Bestimmung des Schnittwinkels bei mehr als zwei Strahlen ist dagegen nicht trivial. Im Folgenden werden zwei Möglichkeiten vorgestellt, Kriterien für eine Schnittwinkel-Kenngröße zu berechnen. Dabei wird aus Gründen der Übersichtlichkeit der Schnittwinkel am Aufnahmestandort zur Herleitung herangezogen. Das Ziel beider Algorithmen ist es, jedem Strahl und somit jedem Objektpunkt eine Gewichtung abhängig vom Schnittwinkel zuzuordnen. Aus diesen einzelnen Gewichtungen lässt sich eine gesamte

	Wo	Kriterien
<b>Schnittwinkel</b>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Objekt-/Standpunkt</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Strahlen zueinander möglichst etwa <math>90^\circ</math> <ul style="list-style-type: none"> <li>→ kein schleifender Schnitt</li> </ul> </li> <li>• Strahlen aus möglichst vielen verschiedenen Richtungen <ul style="list-style-type: none"> <li>→ homogene Unsicherheit in alle Richtungen</li> </ul> </li> </ul>
<b>Betrachtungsrichtung</b>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Objektpunkt</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Strahl möglichst senkrecht auf Zielmarkenebene <ul style="list-style-type: none"> <li>→ kein Einfluss durch Verdeckung/ Abschattung</li> <li>→ keine Abbildungsexzentrizität</li> <li>→ guter Kontrast im Bild</li> </ul> </li> <li>• Strahlen aus möglichst vielen verschiedenen Richtungen <ul style="list-style-type: none"> <li>→ homogene Bildmessgenauigkeit der elliptischen Abbildung</li> </ul> </li> </ul>

**Tabelle 5.1:** Kriterien für den Schnittwinkel und die Betrachtungsrichtung

Gewichtung für den betreffenden Standpunkt ableiten.

### 5.1.1 Iterative Methode

Die iterative Methode basiert auf der Berechnung des Schnittwinkels  $\gamma_{iter}$  zweier beliebiger Strahlen und der iterativen Hinzunahme weiterer Strahlen. Der erste Iterationsschritt umfasst die Schnittwinkelberechnung von zwei Strahlen mit ihren Richtungen  $\mathbf{g}_1$  und  $\mathbf{g}_2$  und die Bestimmung des mittleren Richtungsvektors  $\mathbf{r}_{iter}$ :

$$\gamma_{iter_1} = \arccos \left( \frac{\mathbf{g}_1 \cdot \mathbf{g}_2}{|\mathbf{g}_1| \cdot |\mathbf{g}_2|} \right) \quad (5.1)$$

$$\mathbf{r}_{iter_1} = \frac{\mathbf{g}_1 + \mathbf{g}_2}{2}. \quad (5.2)$$

Im nächsten Iterationsschritt wird der Schnittwinkel zwischen dem mittleren Richtungsvektor aus dem vorigen Schritt und dem wiederum beliebig hinzugenommenen dritten Strahl berechnet. Der mittlere Richtungsvektor wird anschließend aus allen drei Strahlen gebildet. Die folgenden Iterationsschritte  $i = 2 \dots n$  mit  $n$  gleich der Anzahl Strahlen verlaufen analog:

$$\gamma_{iter_i} = \arccos \left( \frac{\mathbf{r}_{iter_{i-1}} \cdot \mathbf{g}_{i+1}}{|\mathbf{r}_{iter_{i-1}}| \cdot |\mathbf{g}_{i+1}|} \right) \quad (5.3)$$

$$\mathbf{r}_{iter_i} = \frac{1}{i+1} \sum_{j=1}^{i+1} \mathbf{g}_j. \quad (5.4)$$

Der so berechnete Schnittwinkel ist eindimensional und als Kenngröße für die Güte nicht ausreichend. Der Fall von Punkten, die im Bild alle auf einer Geraden liegen, verdeutlicht dies. Der Schnittwinkel eines hinzu genommenen, ebenfalls auf der Geraden befindlichen Punktes kann, sofern er am Ende der Geraden liegt, sehr gut sein. Er ist im Sinne einer guten Punktverteilung für die Güte der Messung aber nicht ausschlaggebend. Viel wichtiger für eine gleichmäßige Genauigkeit ist ein Punkt, welcher nicht auf der Geraden liegt. Der Schnittwinkel ist dabei nicht unbedingt größer. Somit ist als ein weiteres Kriterium der Winkel  $\delta_{iter}$  einzubeziehen, welcher diesen Überlegungen gerecht wird. Dafür wird im ersten Iterationsschritt zunächst die Differenz der beiden Strahlrichtungen  $\mathbf{d}_{iter}$  berechnet:

$$\mathbf{d}_{iter_1} = \mathbf{g}_1 - \mathbf{g}_2. \quad (5.5)$$

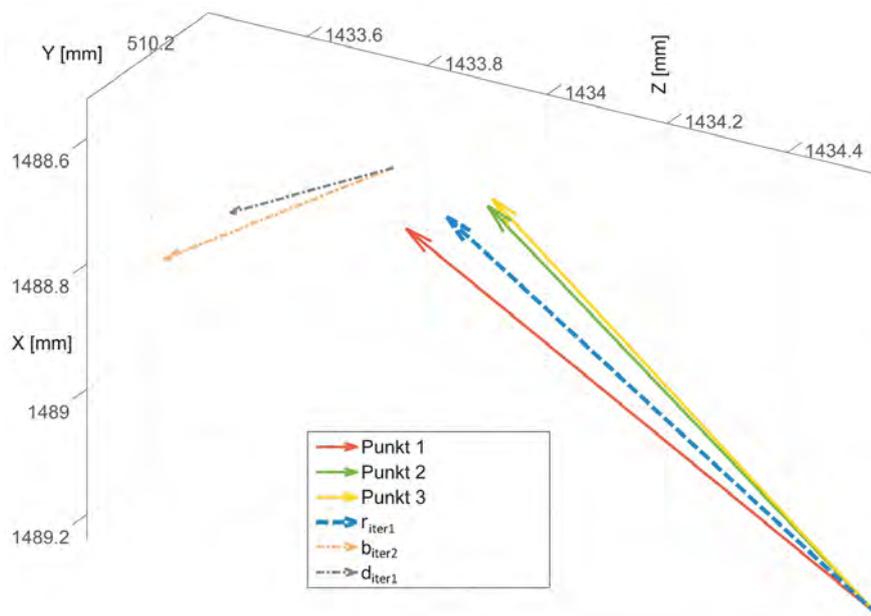
Im folgenden Schritt wird der Winkel  $\delta_{iter}$  zwischen dem Differenzvektor  $\mathbf{d}_{iter}$  und dem sich durch den neuen Punkt und die mittlere Richtung ergebenden Vektor  $\mathbf{b}_{iter}$  bestimmt:

$$\mathbf{b}_{iter_i} = \mathbf{r}_{iter_{i-1}} - \mathbf{g}_{i+1} \quad (5.6)$$

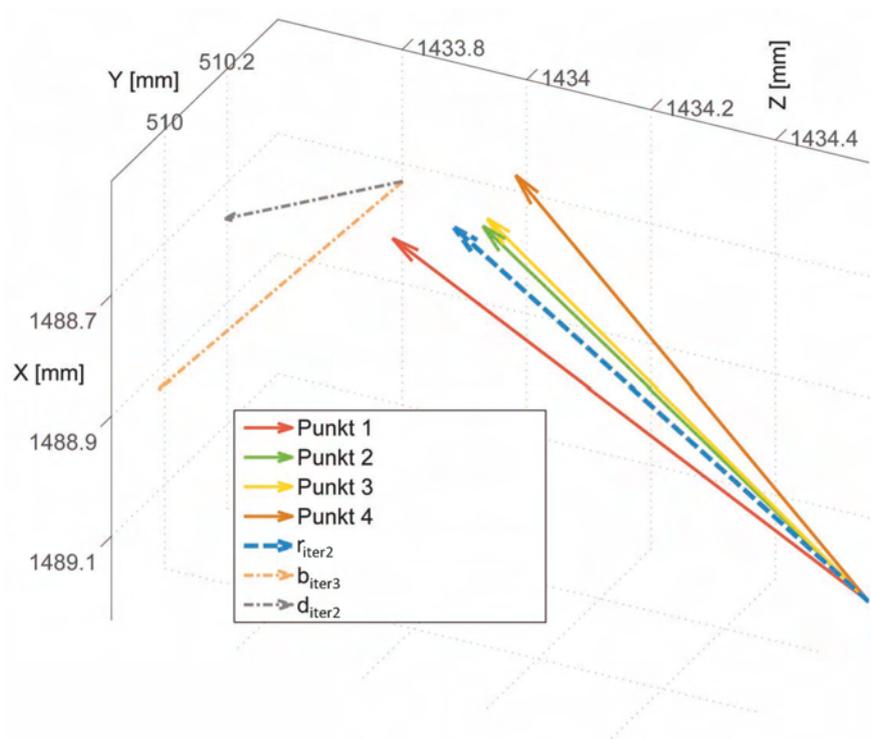
$$\delta_{iter_i} = \arccos \left( \frac{\mathbf{d}_{iter_{i-1}} \cdot \mathbf{b}_{iter_i}}{|\mathbf{d}_{iter_{i-1}}| \cdot |\mathbf{b}_{iter_i}|} \right) \quad (5.7)$$

$$\mathbf{d}_{iter_i} = \frac{1}{i} \sum_{j=1}^{i-1} \mathbf{d}_{iter_j} + \mathbf{b}_{iter_i}. \quad i = 2 \dots n \quad (5.8)$$

Liegt der neue Punkt in einer Geraden mit den beiden ersten Punkten, ist dieser Winkel null. Der optimale Winkel ist  $90^\circ$ . Dieses Kriterium kann lediglich ab der zweiten Iteration,



(a) 2. Schritt



(b) 3. Schritt

**Abbildung 5.1:** 2. und 3. Iterationsschritt der iterativen Schnittwinkelbestimmung

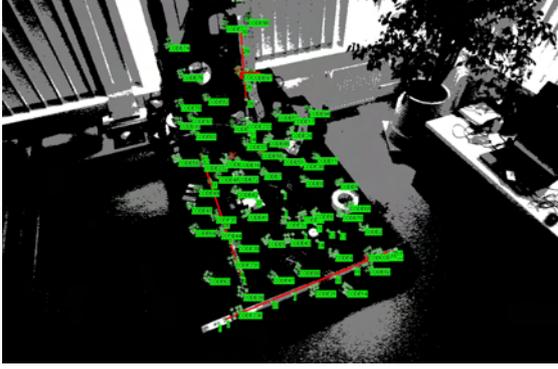
Nr. 1			Nr. 2		
Reihenfolge	$\gamma_{iter}$ [°]	$\delta_{iter}$ [°]	Reihenfolge	$\gamma_{iter}$ [°]	$\delta_{iter}$ [°]
1			1		
2	16,49		2	16,49	
3	11,64	6,16	4	12,93	38,92
4	11,00	46,82	6	17,38	52,92
5	12,45	55,92	5	13,89	26,66
6	11,81	30,20	3	9,23	16,89
<b>Summe</b>	<b>63,40</b>	<b>139,11</b>		<b>69,94</b>	<b>135,39</b>

**Tabelle 5.2:** Kriterien der Kenngröße für den Schnittwinkel bei der iterativen Methode in zwei unterschiedlichen Reihenfolgen

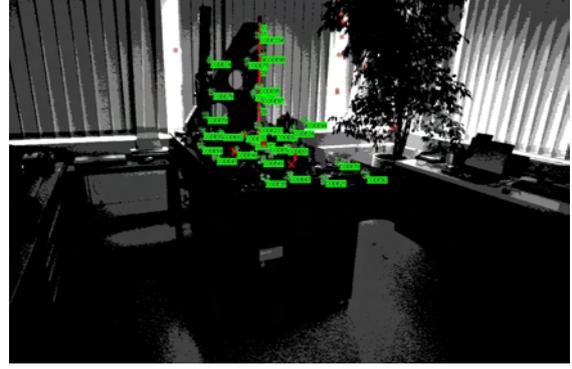
das bedeutet nicht für die ersten beiden Punkte, angegeben werden. Abbildung 5.1 zeigt den geometrischen Zusammenhang der beiden Kriterien anhand der Strahlen von der Kamera zu den Punkten. In 5.1(a) ist die Situation im zweiten Iterationsschritt dargestellt. Der neu hinzugekommene *Punkt 3* liegt in etwa auf der Geraden von *Punkt 1* und *Punkt 2*, welche durch den Vektor  $\mathbf{d}_{iter_1}$  repräsentiert wird. Die Richtung vom neuen *Punkt 3* zur mittleren Richtung  $\mathbf{r}_{iter_1}$ , repräsentiert durch  $\mathbf{b}_{iter_2}$ , weicht nur geringfügig von  $\mathbf{d}_{iter_1}$  ab. Der dritte Iterationsschritt in Abbildung 5.1(b) zeigt den neu hinzugekommenen *Punkt 4*. Der Winkel zwischen  $\mathbf{b}_{iter_3}$  und  $\mathbf{d}_{iter_2}$  ist größer, da *Punkt 4* nicht so dicht an der Linie von *Punkt 1*, *Punkt 2* und *Punkt 3* liegt.

Die beliebige Auswahl der Strahlen führt zu einem kombinatorischen Problem. Abhängig von den ersten beiden Punkten und der Wahl der folgenden entstehen unterschiedliche Ergebnisse. Tabelle 5.2 zeigt zwei Berechnungen durchgeführt mit unterschiedlicher Reihenfolge. Hier wird bei der Betrachtung von  $\delta_{iter}$  noch einmal der Unterschied zwischen Abbildung 5.1(a) und 5.1(b) deutlich. Bei der geordneten Reihenfolge, der Berechnung Nr.1, ist der Winkel beim dritten Punkt lediglich  $6,16^\circ$  groß, beim vierten  $46,82^\circ$ . Die Summen der beiden Berechnungen weichen geringfügig voneinander ab, was den Nachteil der iterativen Methode verdeutlicht.

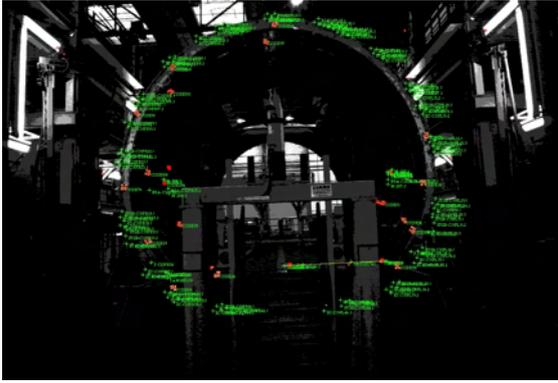
Abbildung 5.2 zeigt die beiden Kriterien für vier unterschiedliche Aufnahmen. 5.2(a) und 5.2(c) weisen eine günstige Konstellation auf, während in 5.2(b) und 5.2(d) die Punkte nur sehr lokal im Bild liegen. Deutlich wird dies insbesondere in den Werten für den mittleren Schnittwinkel  $\bar{\gamma}_{iter}$ , bei gleichmäßig über das Bild verteilten Punkten. Wie in Abbildung 5.2(c) zu sehen, ist der Wert für  $\bar{\delta}_{iter}$  kaum besser, als in Abbildung 5.2(b). Ebenfalls wird deutlich, dass  $\bar{\gamma}_{iter}$  projektbezogen interpretiert werden muss, da der Wert für die Abbildungen 5.2(a) und 5.2(d) ähnlich groß ist und nur im Vergleich mit Aufnahmen desselben Projektes die Kriterien repräsentiert.



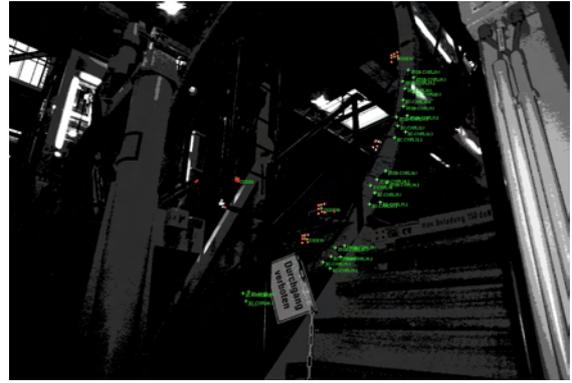
$$(a) \quad \bar{\gamma}_{iter} = 19.98^\circ \quad \bar{\delta}_{iter} = 48.08^\circ \\ \bar{\gamma}_a = 20.15^\circ \quad \bar{\delta}_a = 35.22^\circ$$



$$(b) \quad \bar{\gamma}_{iter} = 11.27^\circ \quad \bar{\delta}_{iter} = 35.89^\circ \\ \bar{\gamma}_a = 12.12^\circ \quad \bar{\delta}_a = 35.04^\circ$$



$$(c) \quad \bar{\gamma}_{iter} = 30.91^\circ \quad \bar{\delta}_{iter} = 37.92^\circ$$



$$(d) \quad \bar{\gamma}_{iter} = 21.05^\circ \quad \bar{\delta}_{iter} = 31.94^\circ$$

**Abbildung 5.2:** Kriterien der iterativen Methode für vier unterschiedliche Aufnahmen

### 5.1.2 Allgemeine Methode

Die allgemeine Methode basiert auf dem gesamten Strahlenbündel. Die Berechnung der Schnittwinkel  $\gamma_{a_i}$  bezieht sich auf die aus allen  $n$  Strahlen einer Aufnahme gemittelte Richtung  $\mathbf{r}_a$ :

$$\mathbf{r}_a = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n \mathbf{g}_i \quad (5.9)$$

$$\gamma_{a_i} = \arccos \left( \frac{\mathbf{r}_a \cdot \mathbf{g}_i}{|\mathbf{r}_a| \cdot |\mathbf{g}_i|} \right), \quad i = 1, \dots, n \quad (5.10)$$

Der Vorteil dieser Methode ist, dass das Ergebnis stets dasselbe ist und keine Abhängigkeit von der Reihenfolge besteht wie bei der iterativen Methode. Allerdings besteht auch hier das Problem, dass der Schnittwinkel allein nicht aussagekräftig ist. Entgegen der iterativen Methode wird die Richtung zur Berechnung von  $\delta_a$  aus den Bildkoordinaten  $\mathbf{x}_i$  aller in dieser Aufnahme gemessenen Punkte hergeleitet. Dafür wird eine ausgleichende Ellipse in die Punkt-

menge geschätzt, deren große Halbachse die Bezugsrichtung darstellt. Der Winkel  $\delta_a$  ergibt sich dann zu:

$$\delta_{a_i} = \arccos \left( \frac{\mathbf{d}_a \cdot \mathbf{b}_{a_i}}{|\mathbf{d}_a| \cdot |\mathbf{b}_{a_i}|} \right) \quad \text{mit} \quad (5.11)$$

$$\mathbf{d}_a = \begin{pmatrix} \cos \theta \\ \sin \theta \end{pmatrix} \quad (5.12)$$

$$\mathbf{b}_{a_i} = \mathbf{x}_M - \mathbf{x}_i. \quad i = 1, \dots, n \quad (5.13)$$

Auch der Winkel  $\delta_a$  ist unabhängig von der Reihenfolge, in der die Strahlen untersucht werden. Die Ergebnisse der Aufnahmen aus Abbildung 5.2(a) und 5.2(b) für den Schnittwinkel sind in etwa vergleichbar mit denen der iterativen Methode. Die Werte für  $\bar{\delta}_a$  unterscheiden sich für beide Aufnahmen nur unwesentlich.

### 5.1.3 Anwendung der Kenngröße

Die Kamera hat ein Sehfeld von etwa  $78^\circ \times 56^\circ$ . Ausgehend von dem Ziel einer in alle Richtungen homogenen Genauigkeit, ist es erstrebenswert einen mittleren Schnittwinkel  $\bar{\gamma}$  von etwa  $45^\circ$ <sup>1</sup> zu realisieren. Im Falle einer Anwendung der Kenngröße für Objektpunkte (Vorwärtsschnitt) gilt dieser Grundsatz. Da aufgrund der Limitierung des Sehfeldes ein solcher Schnittwinkel für den Rückwärtsschnitt nicht erreichbar ist, folgt die Gewichtung des Schnittwinkels der Maxime je größer, desto besser. Das gleiche gilt für den Winkel  $\bar{\delta}$ , welcher maximal  $90^\circ$  haben kann.

#### Anwendung beim Rückwärtsschnitt

Die Zuordnung einer Gewichtung für jeden Strahl kann im stochastischen Modell in einer freien Ausgleichung sinnvoll für eine Optimierung der Bestimmung der äußeren Orientierung sein, soll hier jedoch nicht weiter betrachtet werden. Anhand der beiden Kriterien  $\bar{\gamma}$  und  $\bar{\delta}$  wird eine Qualitätsaussage für den Standpunkt als Ganzes erstellt. Dabei ist zu evaluieren, inwiefern beide Kriterien bei der Zusammenfassung zu einer Kenngröße gewichtet werden. Bei der allgemeinen Methode ist für den Winkel  $\delta$  eine zusätzliche Gewichtung anhand des Verhältnisses aus langer und kurzer Halbachse der ausgleichenden Ellipse sinnvoll. Je größer der Unterschied der Längen beider Halbachsen, desto schmaler ist die Ellipse und desto ausgeprägter ist die lineare Verteilung der Punkte im Bild. Der Winkel  $\delta$  als Kriterium für die Güte des Punktes hat dann ein stärkeres Gewicht als beispielsweise bei einer homogenen Verteilung der Punkte, bei der die Ellipse kreisförmig ist. Die Gewichtung von  $\delta_{a_i}$  in der allgemeinen Methode ist in der Tabelle 5.3 spezifiziert und ist auf eine Gleichverteilung der Gewichtungen ausgelegt. Als Referenz gelten hierbei die Aufnahmen der in Kapitel 4.3.2

---

<sup>1</sup>Der Schnittwinkel zwischen den einzelnen Strahlen liegt dann im Mittel bei  $90^\circ$

Verhältnis $v = \frac{a}{b}$	Gewichtungsfaktor $k$
$v \leq 1,2$	0,5
$1,2 < v \leq 1,5$	0,8
$1,5 < v \leq 2$	1
$2 < v \leq 2,5$	1,2
$v > 2,5$	1,5

**Tabelle 5.3:** Gewichtung des Winkels  $\delta_{a_i}$  abhängig von dem Verhältnis der Ellipsenhalbachsen  $a$  und  $b$

beschriebenen Messung. Bei der iterativen Methode ist eine weitere Gewichtung der einzelnen Werte für  $\delta_{iter}$  nicht möglich.

Für die Qualitätsaussage über den Aufnahmestandort wird zunächst der Mittelwert beider Kriterien über alle Beobachtungen gebildet. Beide Kriterien werden zunächst individuell einer von drei Klassen zugeteilt:

$$C_{\bar{\gamma}} = \begin{cases} 1, & \bar{\gamma} > 25^\circ \\ 2, & 20^\circ < \bar{\gamma} \leq 25^\circ \\ 3, & \bar{\gamma} \leq 20^\circ \end{cases} \quad (5.14)$$

$$C_{\bar{\delta}} = \begin{cases} 1, & \bar{\delta} > 45^\circ \\ 2, & 35^\circ < \bar{\delta} \leq 45^\circ \\ 3, & \bar{\delta} \leq 35^\circ \end{cases} \quad (5.15)$$

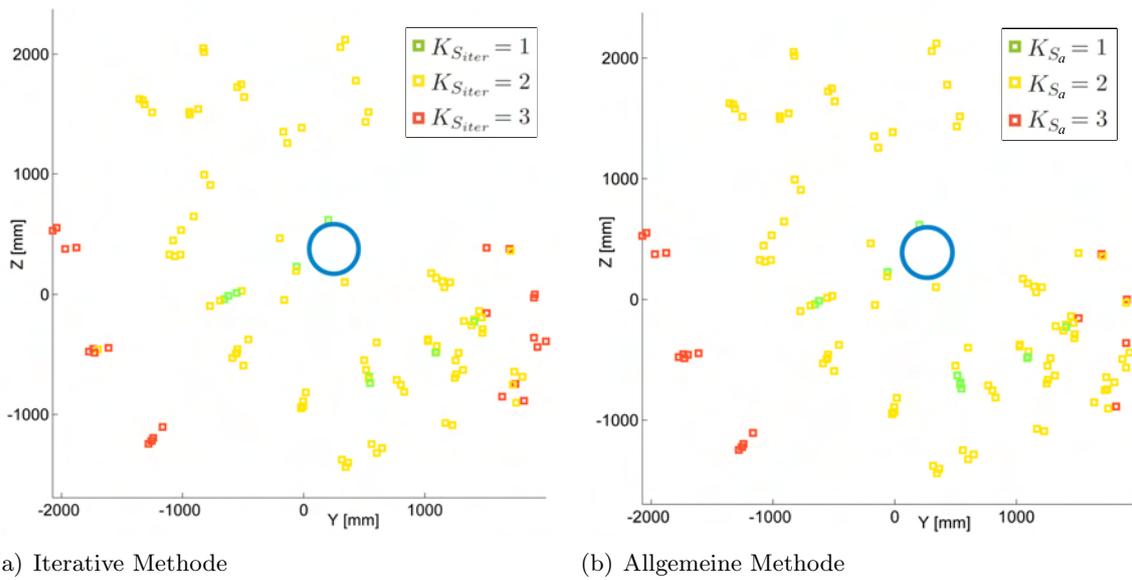
Dabei geschieht die Klasseneinteilung anhand der mittleren Werte für  $\bar{\gamma}$  und  $\bar{\delta}$  aller Aufnahmen der Messung aus Kapitel 4.3.2. Die Klassengrenzen sind gleichabständig um diese Mittelwerte verteilt. Der mittlere Schnittwinkel  $\bar{\gamma}$  ist bei Betrachtung einiger Ergebnisse für die Aufnahmen in Abbildung 5.2 als relevanter für die Güte einzustufen. Aus diesem Grund wird der Schnittwinkel bei der Berechnung der Kenngröße höher gewichtet:

$$K_{S_{iter}} = \begin{cases} 1, & 1 \leq 0,8 \cdot C_{\bar{\gamma}} + 0,2 \cdot C_{\bar{\delta}} < 1,5 \\ 2, & 1,5 \leq 0,8 \cdot C_{\bar{\gamma}} + 0,2 \cdot C_{\bar{\delta}} < 2,5 \\ 3, & 2,5 \leq 0,8 \cdot C_{\bar{\gamma}} + 0,2 \cdot C_{\bar{\delta}} < 3,5 \end{cases} \quad (5.16)$$

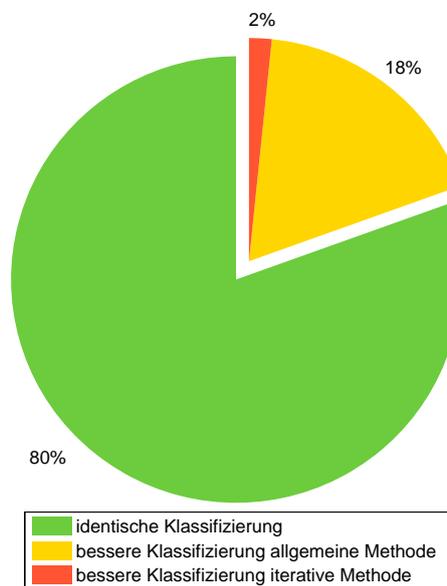
Bei Verwendung der allgemeinen Methode kann der Gewichtungsfaktor  $k$  in die Berechnung einfließen:

$$K_{S_a} = \begin{cases} 1, & 1 \leq (1 - k \cdot 0,2) \cdot C_{\bar{\gamma}} + k \cdot 0,2 \cdot C_{\bar{\delta}} < 1,5 \\ 2, & 1,5 \leq (1 - k \cdot 0,2) \cdot C_{\bar{\gamma}} + k \cdot 0,2 \cdot C_{\bar{\delta}} < 2,5 \\ 3, & 2,5 \leq (1 - k \cdot 0,2) \cdot C_{\bar{\gamma}} + k \cdot 0,2 \cdot C_{\bar{\delta}} < 3,5 \end{cases} \quad (5.17)$$

Für die Messung aus Kapitel 4.3.2 ergibt die Anwendung der Kenngröße recht plausible Ergebnisse (Abbildung 5.3). Die Aufnahmen, welche in größerer Entfernung zum Objekt und



**Abbildung 5.3:** Anwendung beider Methoden für die Schnittwinkel-Kenngröße auf die Messung aus Kapitel 4.3.2. In blau ist die Position des Messobjektes verzeichnet, die Blickrichtung ist von oben



**Abbildung 5.4:** Vergleich der Kenngrößenberechnung der beiden Methoden anhand der Aufnahmen aus Kapitel 4.3.2

flacherer Betrachtungsrichtung aufgenommen worden sind als andere, haben eine schlechtere Klassifizierung. Der Unterschied zwischen der iterativen und der allgemeinen Methode ist eher marginal. Abbildung 5.4 fasst zusammen, dass für die untersuchten Aufnahmen ein Anteil von 80% identisch klassifiziert wird. Generell ist die Klassifizierung der allgemeinen Methode mit  $\bar{K}_{S_a} = 2,37$  etwas besser als die der iterativen Methode ( $\bar{K}_{S_{iter}} = 2,55$ ). Die Aufnahmen der Rumpftrennstellenvermessung der Sektion 15 schneiden etwas besser ab ( $\bar{K}_{S_{iter}} = 1,36$ )<sup>2</sup>, da durch die Größe des Objektes die Punkte bei ähnlicher Aufnahmeentfernung besser verteilt sind. Somit ist die Interpretation der Kenngrößen projektabhängig, weshalb eine optimale Vergabe der Kenngrößen in weiteren Messungen zu evaluieren und insbesondere auf die Trennstellenvermessung anzupassen ist.

### Anwendung beim Vorwärtsschnitt

Die Berechnung der Schnittwinkel-Kenngröße für den Vorwärtsschnitt, also die Güte der Punktbestimmung betreffend, verläuft analog mit der Ausnahme, dass das Strahlenbündel jeweils eines Punktes untersucht wird. Da in der Regel die Aufnahmestandorte weiter verteilt sind als die Objektpunkte, ist der mittlere Schnittwinkel größer als bei der Schnittwinkel-Kenngröße für den Rückwärtsschnitt. Daher werden die Grenzen der Klassifizierung des mittleren Schnittwinkels  $\bar{\gamma}$  angepasst<sup>3</sup>:

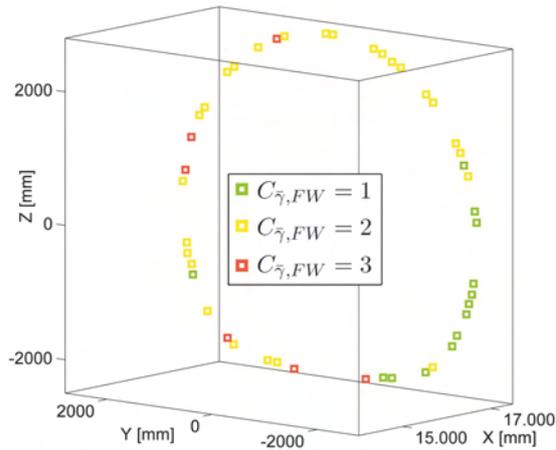
$$C_{\bar{\gamma},FW} = \begin{cases} 1, & 40^\circ < \bar{\gamma} \leq 50^\circ \\ 2, & 35^\circ < \bar{\gamma} \leq 40^\circ \\ 3, & \bar{\gamma} \leq 35^\circ \end{cases} \quad (5.18)$$

Die Berechnung von  $K_{S_{iter},FW}$  und  $K_{S_a,FW}$  verläuft analog zu den Gleichungen (5.16) und (5.17).

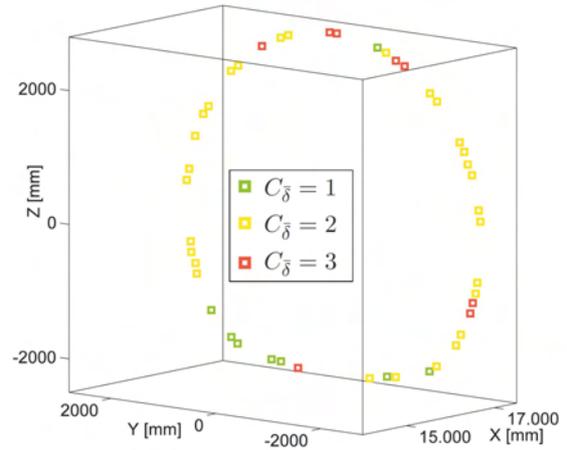
Abbildung 5.5 zeigt die Anwendung der iterativ berechneten Kenngröße auf die Trennstellenmessung der Sektion 15. In den Abbildungen 5.5(a) und 5.5(b) sind die beiden Kriterien  $C_{\bar{\gamma},FW}$  und  $C_{\bar{\delta}}$  für einige Punkte dargestellt. Die stärkere Gewichtung von  $C_{\bar{\gamma},FW}$  gegenüber  $C_{\bar{\delta}}$  lässt sich bei den Ergebnissen für die Kenngröße  $K_{S_{iter},FW}$  in Abbildung 5.5(c) erkennen. Die Differenzen zu Abbildung 5.5(a) sind klein. Bei Betrachtung der Punktgenauigkeiten aus der Ausgleichung des Bildverbandes in Abbildung 5.5(d) wird deutlich, dass die Kenngröße für den Schnittwinkel kein ausreichendes Maß zur Prädiktion von Punktsicherheiten ist und sich lediglich zur Kontrolle des geometrischen Designs der Messung eignet.

<sup>2</sup>Die Berechnung mit der allgemeinen Methode ist nicht möglich, da keine Bildkoordinaten der Punkte der Trennstellenvermessung zur Verfügung stehen

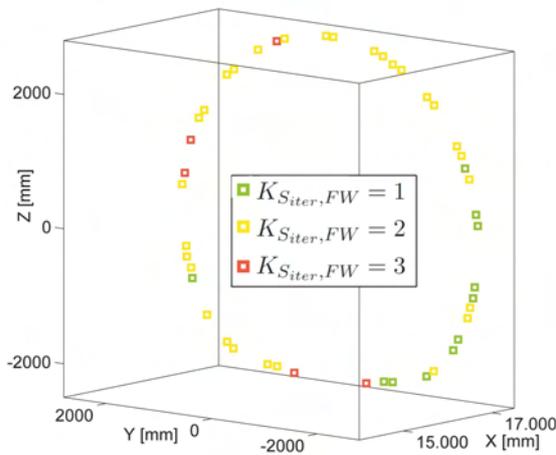
<sup>3</sup>Voraussetzung: der mittlere Schnittwinkel  $\bar{\gamma}$  ist nicht größer als  $50^\circ$



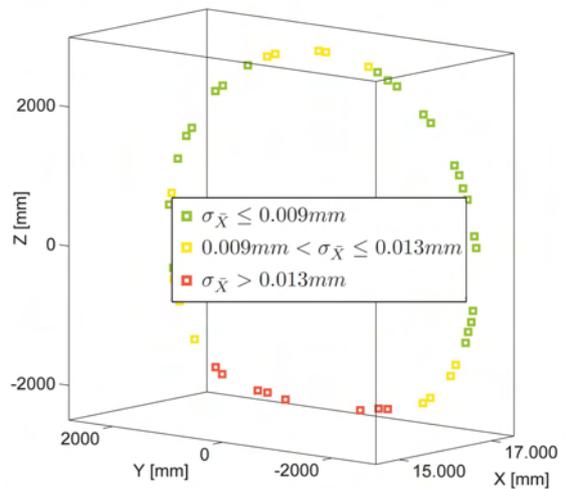
(a) Klassifizierung nach  $\bar{\gamma}$



(b) Klassifizierung nach  $\bar{\delta}$



(c) Kenngröße  $K_{S_{iter},FW}$



(d) Klassifizierung der mittleren Unsicherheit der Punkte

**Abbildung 5.5:** Ergebnis der Klassifizierungen und der Schnittwinkel-Kenngröße beim Vorwärtsschnitt im Vergleich zur mittleren Punktunsicherheit am Beispiel der Sektion 15

## 5.2 Entwicklung einer Kenngröße für die Betrachtungsrichtung

Der Betrachtungswinkel ist verantwortlich für Effekte wie Verdeckung und Abbildungsexzentrizität. Zur weiteren Kontrolle der geometrischen Aufnahmekonfiguration, lässt sich anhand der Kriterien aus Tabelle 5.1 eine Kenngröße für die Betrachtungsrichtung herleiten. Anders als beim Schnittwinkel gilt diese Kenngröße nur beim Vorwärtsschnitt, also für den Winkel zwischen Strahl und Zielmarkenebene. Zudem vereinfacht sich die Interpretation, da der Winkel zwischen dem variablen Strahl und der konstanten, für alle Strahlen gleichen Zielmarkenebene, gesucht wird. Die Problematik in der Berechnung stellt sich eher in der Bestimmung

der Zielmarkenebene. Eine Möglichkeit hierfür ist der bereits in Kapitel 4.3.3 angesprochene Algorithmus aus [ОТЕРКА und FRASER 2004] bzw. [ОТЕРКА 2004], bei dem die Ellipsenparameter der abgebildeten Zielmarke mit ihrer Kreisform im Objektraum verknüpft werden. Im Folgenden wird eine Methode vorgestellt, welche die Daten einer *V-STAR*S-Auswertung nutzt.

### 5.2.1 Herleitung

Diese Methode basiert auf der Bestimmung einer Ebene aus drei Punkten, deren repräsentierende Zielmarken alle dieselbe Ausrichtung haben. Die Ebene, die durch diese aufgespannt wird, ist parallel zur Zielmarkenebene der drei Punkte. Solche Punkte sind bei der Trennstellenvermessung zum Beispiel in Form von *Stringer*- oder *Buttstrap*-Adaptoren gegeben. Mit Ausnahme von Sektion 18, bei der Punkte auf anderen Adaptoren wie beispielsweise für die Rampe oder das Frachttor nicht berücksichtigt werden können, wird bei den anderen Sektionen der Großteil der interessierenden Punkte durch diese Adapter repräsentiert. In der Regel sind diese Punkte über das ganze Objekt verteilt, so dass eine Abschätzung über die Güte der Betrachtungsrichtung repräsentativ für das gesamte Messobjekt möglich ist.

Die Herleitung erfolgt hier für einen Adapter und kann dann analog für alle anderen Adapter angewendet werden.

Nach der Zuordnung der Adapternummer zu den zugehörigen Objektpunkten kann der Normalenvektor  $\mathbf{n}_{1,2,3}$  der Ebene aller drei Zielmarken  $\mathbf{g}_1$ ,  $\mathbf{g}_2$  und  $\mathbf{g}_3$  eines Adapters mit

$$\mathbf{n}_{1,2,3} = \frac{(\mathbf{g}_1 - \mathbf{g}_2) \times (\mathbf{g}_1 - \mathbf{g}_3)}{|(\mathbf{g}_1 - \mathbf{g}_2) \times (\mathbf{g}_1 - \mathbf{g}_3)|} \quad (5.19)$$

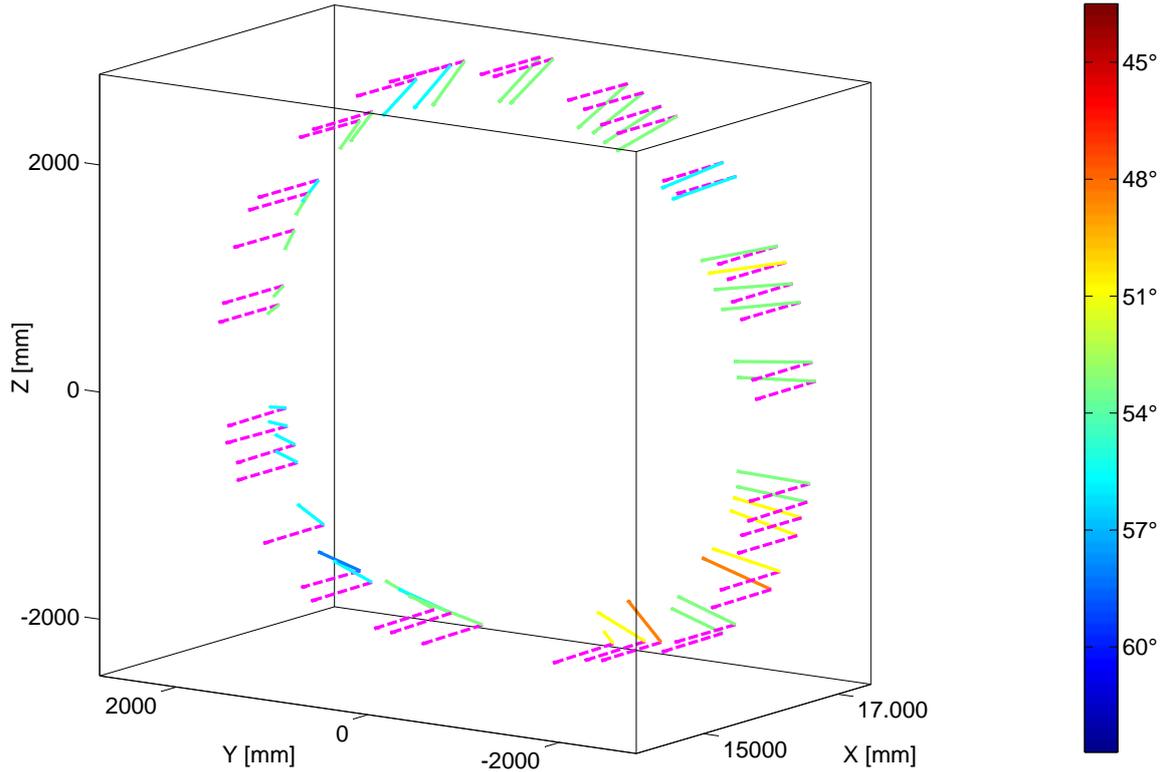
berechnet werden. Analog zur Gleichung (5.1) kann nun der Winkel  $\eta_{1,2,3_j}$  zwischen Normalenvektor  $\mathbf{n}_{1,2,3}$  und dem Strahl  $j$  berechnet werden, welcher sich als Mittel der Strahlen einer Aufnahme zu den drei Punkten eines Adapters darstellt. Dieser Winkel und der Betrachtungswinkel  $\alpha_{1,2,3_j}$  sind Komplementwinkel, somit ergibt sich:

$$\alpha_{1,2,3_j} = 90^\circ - \eta_{1,2,3_j}. \quad j = 1, \dots, m \quad (5.20)$$

$$(5.21)$$

m: Anzahl Strahlen pro Punkt

Die mittlere Betrachtungsrichtung  $\bar{\alpha}$  wird gemittelt aus allen Strahlen  $j$ , also allen Aufnahmen, die den entsprechenden Punkt beinhalten. Abbildung 5.6 zeigt die Verteilung der mittleren Betrachtungsrichtungen bei einer Messung der Rumpftrennstelle der Sektion 15. In magenta sind die Normalenrichtungen der Zielmarkenebenen dargestellt. Die homogene Ausrichtung der Zielmarken in  $X$ -Richtung ist deutlich erkennbar. Die mittleren Betrachtungswinkel sind nach Größe farblich klassifiziert. Die Punkte im unteren rechten Bereich der



**Abbildung 5.6:** Normalenvektoren der Zielmarkenebenen (magenta) und mittlere Betrachtungsrichtungen der Rumpftrennstelle der Sektion 15

Trennstelle in  $X$ -Richtung gesehen weisen einen etwas flacheren mittleren Betrachtungswinkel auf als die restlichen Punkte. Der Schwerpunkt der Aufnahmen liegt also nicht zentral.

Ein weiteres Kriterium für die Kenngröße ist die Vielfalt unterschiedlicher Richtungen der Strahlen. Vergleichbar mit dem Winkel  $\delta$  aus Kapitel 5.1 wird ein Parameter benötigt, der die räumliche Verteilung der Aufnahmestandpunkte beschreibt. Dafür wird zunächst die maximale Ausdehnung der Standpunktkoordinaten im Raum quer zur Normalenrichtung der Zielmarkenebene (näherungsweise  $X$ -Richtung) ermittelt:

$$dd_Y = \max(Y_j - Y_k) \quad (5.22)$$

$$dd_Z = \max(Z_j - Z_k), \quad j = 1 \dots m, \quad k = 1 \dots m \quad (5.23)$$

Aus den beiden Differenzen  $dd_Y$  und  $dd_Z$  werden nun zwei Faktoren berechnet, Die Rundheit  $rd$  und das Basis-Abstandsverhältnis  $ba$  zur jeweils vom Betrag her größeren Differenz:

$$rd = \begin{cases} \frac{ddy}{ddz}, & ddy > ddz \\ \frac{ddz}{ddy}, & ddz > ddy \end{cases} \quad (5.24)$$

$$ba = \begin{cases} \frac{ddy}{\left| \frac{1}{m} \sum_{j=1}^m \mathbf{X}_j - \mathbf{X}_{Punkt} \right|}, & ddy > ddz \\ \frac{ddz}{\left| \frac{1}{m} \sum_{j=1}^m \mathbf{X}_j - \mathbf{X}_{Punkt} \right|}, & ddz > ddy \end{cases} \quad (5.25)$$

Die Rundheit gibt das Verhältnis der Verteilung quer zur  $X$ -Richtung an. Liegt dieses nahe 1 kann von einer gleichmäßigen Verteilung ausgegangen werden. Das Basis-Abstandsverhältnis setzt die absoluten Differenzen  $ddy$  und  $ddz$  in Relation zur Aufnahmeweite gegeben durch den Abstand zwischen dem Schwerpunkt der Aufnahmestandpunkte und dem zu untersuchenden Punkt. Ist das Verhältnis sehr groß, bedeutet dies, dass zumindest einige Strahlen eine sehr flache Betrachtungsrichtung aufweisen. Entgegen der Maxime gute Schnittwinkel der Strahlen zu erreichen, was nicht in der Kenngröße für die Betrachtungsrichtung abgedeckt werden soll, ist also ein eher kleines Basis-Abstandsverhältnis zu bevorzugen.

### 5.2.2 Anwendung der Kenngröße

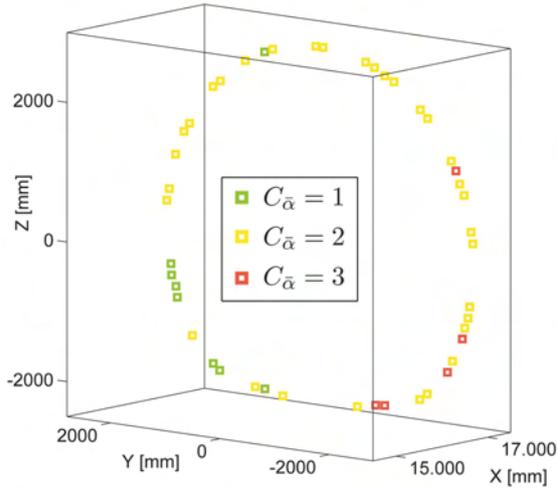
Eine Gewichtung jedes einzelnen Strahles wird wie in (Kapitel 5.1.3) bereits erwähnt in dieser Arbeit nicht weiter verfolgt. Zudem beziehen sich Rundheit und Basis-Abstandsverhältnis auf das gesamte Strahlenbündel eines Punktes und eignen sich nicht für eine individuelle Gewichtung. Wie in den Gleichungen (5.14) und (5.15) werden den drei Kriterien, der mittleren Betrachtungsrichtung, der Rundheit und dem Basis-Abstandsverhältnis eine von drei Klassen zugeordnet:

$$C_{\bar{\alpha}} = \begin{cases} 1, & \bar{\alpha} > 55^\circ \\ 2, & 50^\circ < \bar{\alpha} \leq 55^\circ \\ 3, & \bar{\alpha} \leq 50^\circ \end{cases} \quad (5.26)$$

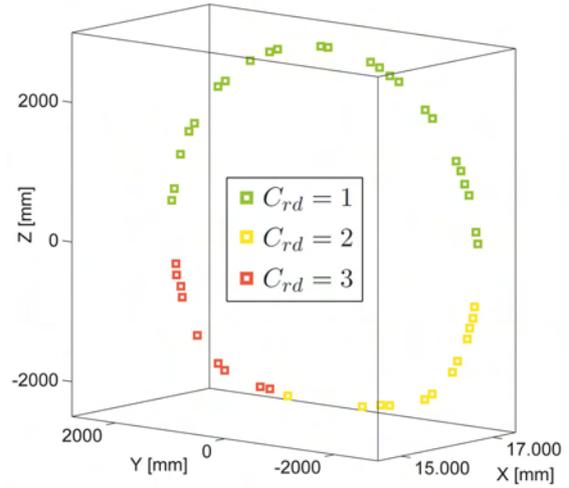
$$C_{rd} = \begin{cases} 1, & rd \leq 1.1 \\ 2, & 1.1 < rd \leq 1.2 \\ 3, & rd > 1.2 \end{cases} \quad (5.27)$$

$$C_{ba} = \begin{cases} 1, & ba \leq 1.2 \\ 2, & 1.2 < ba \leq 1.4 \\ 3, & ba > 1.4 \end{cases} \quad (5.28)$$

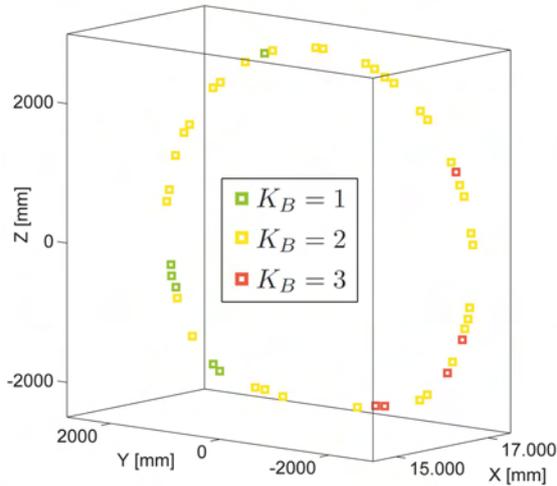
Dabei sind die Klassengrenzen so gewählt worden, dass sie gleichabständig in etwa um den Mittelwert der Kriterien und des Betrachtungswinkels aller untersuchter Punkte liegen. Die Datengrundlage dafür ist die Messung der Sektion 15. Eventuell ist eine Anpassung der Klassengrenzen anhand von weiteren Messungen nötig.



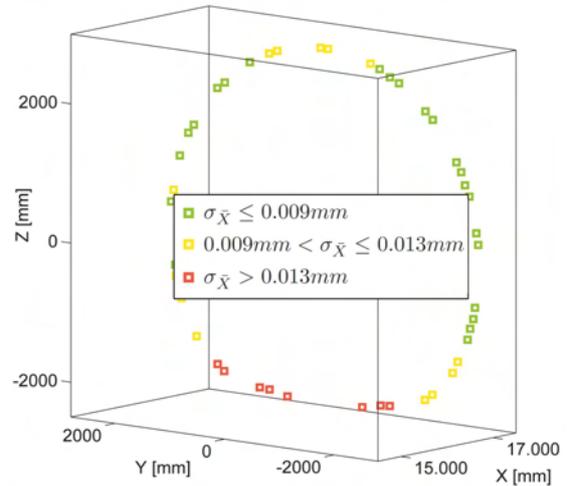
(a) Klassifizierung nach  $\bar{\alpha}$



(b) Klassifizierung nach  $rd$



(c) Kenngröße  $K_B$



(d) Klassifizierung der mittleren Unsicherheit der Punkte

**Abbildung 5.7:** Ergebnis der Klassifizierungen und der Kenngröße im Vergleich zur mittleren Punktunsicherheit am Beispiel der Sektion 15

Die Kenngröße wird nun aus den gewichteten Klassen der einzelnen Kriterien gebildet. Dabei wird der mittlere Betrachtungswinkel am stärksten gewichtet (70%), die Rundheit und das Basis-Abstandsverhältnis fließen jeweils zu 20% und 10% mit ein.

$$K_B = \begin{cases} 1, & 1 \leq 0.7 \cdot C_{\bar{\alpha}} + 0.2 \cdot C_{rd} + 0.1 \cdot C_{ba} < 1.5 \\ 2, & 1.5 \leq 0.7 \cdot C_{\bar{\alpha}} + 0.2 \cdot C_{rd} + 0.1 \cdot C_{ba} < 2.5 \\ 3, & 2.5 \leq 0.7 \cdot C_{\bar{\alpha}} + 0.2 \cdot C_{rd} + 0.1 \cdot C_{ba} < 3.5 \end{cases} \quad (5.29)$$

Abbildung 5.7 fasst die berechneten Größen grafisch am Beispiel der Trennstelle der Sektion 15 zusammen. Die Klassifizierung nach  $\bar{\alpha}$  (Abbildung 5.7(a)) spiegelt in etwa die Verteilung aus Abbildung 5.6 wider. Bei der Klassifizierung nach der Rundheit der Aufnahmestandort-

verteilung quer zur Normalenrichtung (Abbildung 5.7(b)) sind eindeutige Unterteilungen zu erkennen. Der obere Teil wird generell besser klassifiziert. In der resultierenden Kenngröße (Abbildung 5.7(c)) zeigt sich eindeutig die stärkere Gewichtung der Betrachtungsrichtung gegenüber den beiden anderen Kriterien, lediglich zwei Punkte werden herabgewertet. Beim Vergleich mit den der Programmausgleichung entnommenen Genauigkeitswerten wird deutlich, dass die Kenngröße der Betrachtungsrichtung nicht eindeutig mit der Genauigkeit der gemessenen Punkte korreliert (Abbildung 5.7(d)). Zwar sind einige Übereinstimmungen zu finden, zum Beispiel, dass der untere oder der obere mittlere Bereich der Trennstelle eher schlechter abschneidet, die eindeutige Unterteilung bei der Punktgenauigkeit an beiden Seiten lässt sich bei der Kenngröße für die Betrachtungsrichtung allerdings nicht wiederfinden.

### 5.3 Zusammenfassung

Die Entwicklung von Kenngrößen, welche die geometrische Güte einer Trennstellenvermessung bei der *Airbus Operations GmbH* angeben, basiert auf den Auswertungsergebnissen eines gemessenen Bündels. Dabei gibt für die Schnittwinkel-Kenngröße zwei Möglichkeiten, die sich in ihrer Berechnungsweise unterscheiden. Für die Berechnung mit der allgemeinen Methode werden Bildkoordinaten benötigt, die sich mit *V-STARs* nicht exportieren lassen. Die Berechnung mit der iterativen Methode kann aber mit den implementierten Algorithmen direkt nach der Berechnung des Bündels in *V-STARs* angewendet werden. Dabei ist es zum einen möglich Aufnahmestandpunkte bezüglich der Schnittbedingungen der zwischen ihnen und den Objektpunkten verlaufenden Strahlen zu klassifizieren zum anderen lassen sich die Strahlenbündel einzelner Punkte untersuchen. Ebenfalls besteht die Möglichkeit für einzelne Punkte eine Kenngröße für die Betrachtungsrichtung zu berechnen. Zwar lässt sich nicht zeigen, dass beide Kenngrößen direkt mit der Punktgenauigkeit korrelieren (Abbildungen 5.5 und 5.7), angesichts der großen Menge weiterer Unsicherheitsfaktoren ist dies jedoch nicht verwunderlich.

Die Anwendung der Kenngrößen kann direkt im Anschluss an die Auswertung geschehen und dient der Kontrolle der Messung. Da diese zum Teil direkt am Ort der Messung geschieht, ist es möglich die Messung nach den Kriterien der Aufnahmegeometrie zu beurteilen. Sind einige Punkte schlecht bestimmt, ist der abschließende *RMS* zu groß oder treten Fehler in der Messung auf, zum Beispiel in Form von nicht gemessenen Punkten, ist es möglich, dass sich die Ursachen in den Kenngrößen wiederfinden lassen. Die im Rahmen dieser Arbeit entwickelten Algorithmen visualisieren die Messung räumlich und stellen die Kenngrößen farblich dar. Zur schnellen und einfachen Interpretation werden die Messelemente drei Kategorien zugeordnet, welche die geometrische Güte beschreiben. Somit kann unmittelbar nach einer Messung agiert werden und zum Beispiel durch eine gezielte Neumessung die Messergebnisse verbessert werden. Da eine Abhängigkeit der Kriterien von vielen Parametern, zum Beispiel der Größe des Messobjektes oder der Aufnahmeentfernung, besteht, bedarf die Anpassung der Klassengrenzen an die entsprechende Art der Messung weiterer Analysen.

## Kapitel 6

# Zusammenfassung und Ausblick

Die Genauigkeit einer Messung hat eine große Bedeutung in der Messtechnik, insbesondere wenn es darum geht, Toleranzen des zu vermessenden Objektes einzuhalten. Im Flugzeugbau ist die messtechnische Kontrolle jedes Bauteils vorgeschrieben und die einzuhaltenden Toleranzen sind häufig sehr gering gefasst. Bei der Untersuchung des Genauigkeitspotentials eines Messgerätes ist es unumgänglich, die bei einer Messung ablaufenden Prozesse separat zu betrachten.

Diese Arbeit analysiert die optische Prozesskette der photogrammetrischen Vermessung von Trennstellen im Flugzeugbau. Im Fokus steht dabei, die Quellen der Unsicherheiten in der Punktmessung, sowohl allgemeingültig als auch speziell auf die Photogrammetrie bei *Airbus* Bremen bezogen, aufzudecken. Dafür werden dem in einzelne Teilprozesse gegliederten chronologischen Ablauf der Messung, bezeichnet als optische Prozesskette, Unsicherheitsfaktoren zugeordnet, welche die Messung auf eine bestimmte Art beeinflussen. In einem weiteren Teil werden Überlegungen zur Optimierung einzelner Faktoren angestellt. Zur praktischen Validierung dieser theoretischen Überlegungen werden Messungen durchgeführt und insbesondere im Hinblick auf die aufnahmegeometrische Konfiguration ausgewertet. Um den Einfluss der Aufnahmegeometrie auf die Genauigkeit der Messung zu bestimmen und zu visualisieren, werden Kenngrößen für den Schnittwinkel und die Betrachtungsrichtung entwickelt, welche als Kontrollelement in den Messablauf bei *Airbus* integriert werden können. Mit Hilfe der in dieser Arbeit durchgeführten Analysen kann der Nutzer eines photogrammetrischen Messsystems die Faktoren, welche auf die Genauigkeit des Messergebnisses einwirken, besser einschätzen. In der Vermessung des Messobjektes kann er die vermittelten Grundsätze einhalten und hat ein Kontrollelement zur Prüfung der geometrischen Güte der Messung.

Bei der theoretischen Genauigkeitsanalyse zeigt sich, dass durch das verwendete Material zur Bestückung des Messobjektes, wie zum Beispiel Adapter und Zielmarken, konstruktionsbedingt Unsicherheiten in das Messergebnis induziert werden. Im Falle der Zielmarken liegen diese im Bereich der angegebenen Messgenauigkeit des Photogrammetriesystems, im Falle der Adapter jedoch darüber. Diese während der Messung konstanten Abweichungen finden sich nicht im Schlussfehler der Messung wieder, schlagen sich aber auf die äußere Genauigkeit bei

der Bestimmung der interessierenden, durch Zielmarke und Adapter repräsentierten Punkte, nieder. Um diese Effekte zu minimieren wird in dieser Arbeit eine Methode entwickelt, welche die gemessenen Ist-Werte der Adapter in der Auswertung nutzt. Dadurch lassen sich sehr viel zuverlässigere Ergebnisse realisieren. Wegen des fehlenden Serien-Status der photogrammetrischen Vermessung im *Airbus*-Werk Bremen kann diese Methode noch nicht eingesetzt werden.

Eine nähere Betrachtung der kreisförmigen Zielmarke und ihrer Abbildung in der Aufnahme, welche sich durch Kontrast, Größe und Stärke der elliptischen Verzerrung kennzeichnet, zeigt die Vielfältigkeit der Faktoren, die die Genauigkeit der Messung beeinflussen. Die elliptische Abbildung führt zu einer heterogenen Genauigkeit der Bildpunktmessung, ebenso wie der Kontrast in der Abbildung auf die Güte der Kantenpunktbestimmung abfärbt. Diese Einflüsse, wie auch die Verdeckung am Rand der Zielmarke befindlicher Retro-Kügelchen durch die Maskierung und die Abbildungsexzentrizität, sind alle bedingt durch die Betrachtungsrichtung. Diese hängt wiederum von der Verteilung der Punkte in der Vorbereitung und der Wahl der Aufnahmestandpunkte während der Bildaufnahme ab. Somit kann gezeigt werden, dass die Aufnahmegeometrie nicht allein die Güte der Schnittbedingungen der Strahlen zwischen Punkt und Projektionszentrum beeinflusst. Die Unsicherheiten in der Messung rühren also zum großen Teil von der Varietät unterschiedlicher Betrachtungsrichtungen und Punktverteilungen her, welche die Punktmessung beeinflussen.

Einige Faktoren lassen sich im Rahmen dieser Arbeit nicht hinreichend analysieren. Darunter sind zum einen Resteinflüsse durch die Kamera, welche nicht modelliert und nicht ausgeschlossen werden können. Zum anderen bleibt offen, inwiefern bereits bekannte Einflüsse, wie zum Beispiel die Abschattung der Zielmarkenoberfläche durch die Maskierung oder die Abbildungsexzentrizität, in der Auswertung von *V-STARs* berücksichtigt und korrigiert werden. Dies kann aufgrund mangelnder Zugriffsmöglichkeiten nicht geklärt werden. Fakt ist allerdings die Erwärmung im Inneren der Kamera während der Aufnahme, die ein Hinweis auf zeitliche Inkonsistenzen in der Punktmessung sein kann.

In den durchgeführten praktischen Untersuchungen kann unter Anderem die Bedeutung der Auswertesoftware gezeigt werden. Die von *Airbus* eingesetzte Software *V-STARs* liefert im Vergleich zur Software *Australis* und einer im Rahmen dieser Arbeit programmierten eigenen Bündelausgleichung genauere Resultate mit ansonsten identischen Messdaten. Eine Untersuchung verschiedener Kombinationen von Aufnahmen verdeutlicht den Umgang des Photogrammetriesystems mit geometrischen Sonderfällen. Die Einflüsse von Schnittwinkel und Betrachtungsrichtung, wie sie im theoretischen Teil der Arbeit analysiert werden, können dadurch zum Teil bestätigt werden. Allerdings zeigt sich zum Beispiel auch, dass die Ergebnisse in *V-STARs* keinen Qualitätsverlust bei einer niedrigen Betrachtungsrichtung aufweisen. Dies kann als ein Beleg für die rechnerische Korrektur gewisser Faktoren angesehen werden. Lediglich Differenzen zur orthogonalen Aufnahme der Zielmarke weisen auf einen Verbleib des Einflusses der Verdeckung und Abschattung rändlicher Retro-Kügelchen hin, was zur Folge hat, dass die ermittelten Punktpositionen einen Offset senkrecht zur Zielmarkenebene haben.

Es kann allerdings keine kontinuierliche Beziehung zwischen Betrachtungsrichtung und Stärke des Einflusses der Verdeckung nachgewiesen werden, weshalb eine Optimierung der Zielmarke in Form eines Zusammenspiels von Größe, Abbildungsexzentrizität und Verdeckung nicht möglich ist.

Die Signifikanz der Ergebnisse der Messung im *Multi*-Modus ist fraglich, da die Variationen im Bereich der erreichbaren Genauigkeit liegen. Für die Vermessung bei der *Airbus Operations GmbH* bedeutet dies, dass die Betrachtungsrichtung im *Multi*-Modus neben der das Basis-Abstandsverhältnis bestimmenden und primär den Schnittwinkel betreffenden Aufnahmeconfiguration nur eine untergeordnete Rolle spielt.

Für die Kontrolle der meist recht schwer zu durchblickenden geometrischen Zusammenhänge zwischen Objekt- und Aufnahmestandpunkten werden Kenngrößen für die Schnittbedingungen und die Betrachtungsrichtung entwickelt. Diese erlauben es, einzelne Aufnahmen oder Punkte nach ihrer aufnahmegeometrischen Güte zu klassifizieren und so einen Überblick über das Design einer Messung zu erhalten. Dabei werden Kriterien für den Schnittwinkel einzelner Strahlen zwischen Objektpunkten und den Projektionszentren der Aufnahmen und dem Betrachtungswinkel zwischen diesen Strahlen und der Zielmarkenebene entwickelt. Rechnerisch werden Faktoren entworfen, welche diese Kriterien repräsentieren und auf die Messdaten angewendet werden können. Als Resultat wird jeder Aufnahmestandpunkt und Objektpunkt einer Klasse zugeteilt, welche deren Güte beschreibt. Dadurch ist es möglich nach jeder Messung zu prüfen, ob die interessierenden Punkte ausreichend gut bestimmbar sind. Mit einem direkten Einsatz am Messplatz können so direkt erweiternde Korrekturmessungen erfolgen, um das Ergebnis zu verbessern. Die vorgestellte allgemeine Methode zur Herleitung der Kenngrößen für den Schnittwinkel basiert allerdings auf den Bildkoordinaten der gemessenen Punkte. Da diese bei Verwendung von *V-STARs* nicht zur Verfügung stehen, bleibt die praktische Anwendung bei *Airbus* auf die iterative Methode beschränkt.

Da sich in den praktischen Untersuchungen zeigt, dass gewisse Einflüsse, hervorgerufen durch einen flachen Betrachtungswinkel, in den Messergebnissen verbleiben, kann es Ziel einer zukünftigen Arbeit sein, eine Korrektur dieser Einflüsse mit Hilfe von zum Teil bestehenden Algorithmen in die Auswertung mit *V-STARs* zu integrieren.

Weiterhin müssen die Anwendung der in dieser Arbeit entwickelten Kontrollmöglichkeiten und die Funktionalität der Kenngrößen in weiteren Messungen getestet werden. Da gegenwärtig die photogrammetrischen Vermessungen im *Airbus*-Werk in Bremen nur unregelmäßig stattfinden, kann im Rahmen dieser Arbeit keine umfangreiche Evaluierung geschehen. Die Kriterien und die Klassifizierungen beziehen sich auf eine Testmessung der Sektion 15 sowie die in Kapitel 4.3.2 vorgestellte Messung. Denkbar wäre neben einer Modifikation der Klassengrenzen auch eine Erweiterung um zusätzliche Parameter, welche die Kenngrößen für Schnittwinkel und Betrachtungsrichtung beschreiben. Für eine einfachere Anwendung wäre es ebenfalls vorteilhaft, die Algorithmen zum Auslesen der Daten und für die Berechnung der Kenngrößen in eine Benutzerumgebung einzubinden. In diesem Zusammenhang wäre zu überlegen, ob eine Implementierung in eine höhere Programmiersprache von Vorteil wäre, um

von der Software *Matlab* unabhängig zu sein.

Sobald ein Serienstatus in der photogrammetrischen Vermessung im *Airbus*-Werk in Bremen erreicht ist, ist eine Optimierung der in der Auswertung verwendeten Adapter-Maße mit Hilfe der Zuordnung über die Adapternummer möglich. So kann die Zuverlässigkeit der Messung erheblich gesteigert werden.

# Abbildungsverzeichnis

2.1	Aufnahmegeometrie in der Photogrammetrie . . . . .	7
2.2	Rumpfsektionen der A400M [LOHSE 2008] . . . . .	12
2.3	Flugzeug-Referenzsystem [LOHSE 2008] . . . . .	12
2.4	Autobar und <i>INCA3</i> -Kamera von <i>GSI</i> . . . . .	13
3.1	Schematische Darstellung der Prozesskette und der zu untersuchenden Faktoren	16
3.2	<i>Stringer</i> und <i>Buttstrap</i> -Adapter befestigt an der Außenhaut der Sektion 18 .	18
3.3	Kantenpunktbestimmung zweier Zielmarken mit unterschiedlichem Kontrast .	22
3.4	50-fache Vergrößerung des Randbereiches einer maskierten Zielmarke . . . . .	23
3.5	Einfluss der Verdeckung von retroreflektierenden Kugeln durch die Maskierung	24
3.6	50-fache Vergrößerung des Randbereiches einer maskierten Zielmarke in der Schrägansicht . . . . .	25
3.7	Einfluss der Abschattung durch die Maskierung . . . . .	25
3.8	25-fache Vergrößerung des Randbereiches einer bedruckten Zielmarke . . . . .	26
3.9	Einfluss der Exzentrizität bei variierendem Betrachtungswinkel und Abstand zwischen Zielmarke und Kamera . . . . .	27
3.10	Zielmarkengröße im Bild zweier Modelle in Abhängigkeit zum Abstand . . . . .	28
3.11	Geometrische Konfiguration in der Monte-Carlo-Simulation zum Einfluss der Verteilung . . . . .	30
3.12	Standardabweichung der aus drei bzw. sechs Punkten berechneten Projektions- zentren in Abhängigkeit vom Raumwinkel . . . . .	32
3.13	Vergleich der mittleren Veränderung der Standardabweichung zwischen den Berechnungen mit unterschiedlich vielen Punkten . . . . .	32
3.14	Aufnahmen mit unterschiedlichen Belichtungszeiten und Blitzstärken . . . . .	35
3.15	Aufnahmen mit unterschiedlichen Belichtungszeiten und Blitzstärken und die automatische Punktdetektion mittels <i>Australis</i> . . . . .	36
3.16	Punktdetektion in der Dachkonstruktion der Halle . . . . .	38
3.17	Konvergente Aufnahme der Rumpftrennstelle der Sektion 15 . . . . .	39
3.18	Strahlen von einem Punkt der Sektion 15 zu den Kamerastandorten . . . . .	40
3.19	Geometrie bei der Bestimmung des Ellipsenmittelpunktes mit Hilfe des Stern- Operators . . . . .	41

3.20	Abbildung einer Zielmarke in zueinander gekanteten Aufnahmen . . . . .	43
4.1	Ausschnitt aus dem Messprotokoll des <i>Stringer</i> -Adapters . . . . .	49
4.2	Versuchsaufbau mit dem Werkstück . . . . .	53
4.3	Verschiedene Aufnahmeepochen einer Kamera . . . . .	54
4.4	Variation der Punktmessung in den drei Koordinatenrichtungen abhängig von der Aufnahmeepoche . . . . .	55
4.5	Verteilung der Aufnahmen im <i>Single</i> -Job . . . . .	57
4.6	Konfigurationen für die Untersuchung des Betrachtungswinkels . . . . .	58
4.7	Variation der Punktmessung in den drei Koordinatenrichtungen abhängig von der Betrachtungsrichtung in den Programmen <i>V-STARs</i> und <i>Australis</i> . . . .	59
4.8	Konfigurationen für die Untersuchung des Schnittwinkels . . . . .	60
4.9	Variation der Punktmessung in den drei Koordinatenrichtungen abhängig vom Schnittwinkel . . . . .	61
5.1	2. und 3. Iterationsschritt der iterativen Schnittwinkelbestimmung . . . . .	66
5.2	Kriterien der iterativen Methode für vier unterschiedliche Aufnahmen . . . .	68
5.3	Anwendung beider Methoden für die Schnittwinkel-Kenngröße . . . . .	71
5.4	Vergleich der Kenngrößenberechnung der beiden Methoden . . . . .	71
5.5	Ergebnis der Klassifizierungen und der Schnittwinkel-Kenngröße beim Vorwärtsschnitt im Vergleich zur mittleren Punktunsicherheit am Beispiel der Sektion 15 . . . . .	73
5.6	Normalenrichtungen der Zielmarkenebenen und mittlere Betrachtungsrichtun- gen der Rumpftrennstelle der Sektion 15 . . . . .	75
5.7	Ergebnis der Klassifizierungen und der Kenngröße im Vergleich zur mittleren Punktunsicherheit am Beispiel der Sektion 15 . . . . .	77

# Tabellenverzeichnis

2.1	Eigenschaften der INCA3 Kamera . . . . .	13
3.1	Monte-Carlo-Simulation der Punktunsicherheit eines konstruierten <i>Stringer</i> -Punktes . . . . .	19
3.2	Radien und Rundheiten ausgewählter 3D-Targets . . . . .	21
3.3	Monte-Carlo-Simulation der Berechnung von Kantenpunkten zweier Zielmarken mit unterschiedlichem Kontrast . . . . .	22
3.4	Monte-Carlo-Simulation der Berechnung der äußeren Orientierung aus drei Punkten mit einem Raumwinkel von etwa $14^\circ$ . . . . .	30
3.5	Monte-Carlo-Simulation der Berechnung der äußeren Orientierung aus drei Punkten mit einem Raumwinkel von etwa $45^\circ$ . . . . .	30
3.6	Monte-Carlo-Simulation der Berechnung des Projektionszentrums aus drei Punkten mit einem Raumwinkel von etwa $14^\circ$ . . . . .	31
3.7	Monte-Carlo-Simulation der Berechnung des Projektionszentrums aus drei Punkten mit einem Raumwinkel von etwa $45^\circ$ . . . . .	31
3.8	Untersuchungen zur Aufwärmzeit der <i>INCA3</i> . . . . .	34
3.9	Monte-Carlo-Simulation der Berechnung des Ellipsenmittelpunktes aus zwanzig Randpunkten . . . . .	42
3.10	Ergebnis der Auswertung eines Bildverbandes mit den Programmen <i>V-STARs</i> und <i>Australis</i> . . . . .	45
3.11	Quantifizierbare Einflüsse auf die Zuverlässigkeit und Präzision der photogrammetrischen Messung im Objektraum . . . . .	46
4.1	Ergebnis der Punktbestimmung des gesamten Bündels mit den Programmen <i>V-STARs</i> und <i>Australis</i> und einer eigenen Bündelausgleichung . . . . .	57
4.2	Genauigkeiten der einzelnen Bündel in den Programmen <i>V-STARs</i> und <i>Australis</i> . . . . .	58
5.1	Kriterien für den Schnittwinkel und die Betrachtungsrichtung . . . . .	64
5.2	Kriterien der Kenngröße für den Schnittwinkel bei der iterativen Methode in zwei unterschiedlichen Reihenfolgen . . . . .	67
5.3	Gewichtung des Winkels $\delta_{a_i}$ abhängig von dem Verhältnis der Ellipsenhalbachsen $a$ und $b$ . . . . .	70

# Literaturverzeichnis

- [BROWN 1971] Brown, D. C. (1971). *Close-Range Camera Calibration*. Photogrammetric Engineering, 37(8), 855–866.
- [BROWN 1997] Brown, J. (1997). *V-STARs/S Acceptance Test Results*. Technischer Bericht, Geodetic Systems Inc. (GSI).
- [COLE-GRAHAM 2011] Cole-Graham, T. (2011). *Hubbs Contact Request*. E-Mail vom 17.08.2011, tonya@hubbsmachine.com, Hubbs Machine & Manufacturing, Inc.
- [DIN55350-13 1987] DIN55350-13 (1987). *Begriffe der Qualitätssicherung und Statistik; Begriffe zur Genauigkeit von Ermittlungsverfahren und Ermittlungsergebnissen*.
- [DOLD 1997] Dold, J. (1997). *Ein hybrides photogrammetrisches Industriemesssystem höchster Genauigkeit und seine Überprüfung*. Dissertation, Universität der Bundeswehr München. Veröffentlicht in: Schriftenreihe Studiengang Vermessungswesen, Universität der Bundeswehr München, Heft 54.
- [FRASER 1996] Fraser, C. S. (1996). *Network Design*, Kap. Close Range Photogrammetry and Machine Vision, S. 256–281. Caithness, UK: Whittles Publishing.
- [FRASER 2011] Fraser, C. S. (2011). (Program Science Director, CRC for Spatial Information Professorial Fellow, Dept. of Infrastructure Engineering, University of Melbourne, Victoria 3010 Australia) . Persönliches Gespräch am 14. Juni 2011.
- [FRASER und SHORTIS 1992] Fraser, C. S. und Shortis, M. R. (1992). *Variation of distortion within the photographic field*. Photogrammetric Engineering and Remote Sensing, 58(6), 851–855.
- [GDV-SYSTEMS 2005] GDV-Systems (2005). *V-STARs System Info*. [http://www.gdv-systems.de/pdf/gdv\\_vstars.pdf](http://www.gdv-systems.de/pdf/gdv_vstars.pdf). (zuletzt heruntergeladen am: 18.07.2011).
- [GÜLKER 2004] Gülker, C. (2004). *Untersuchungen zur Kalibrierfähigkeit und Praxistauglichkeit von unterschiedlichen Messmarkentypen in Maßstäben zur Genauigkeitssteigerung bei photogrammetrischen Messungen*. Diplomarbeit, Universität Hannover.
- [GSI 2009a] GSI (2009a). *INCA 3a+ Camera Description*.

- [GSI 2009b] GSI (2009b). *Photogrammetry Basics*. V-STARS Hilfe.
- [HAIG et al. 2006] Haig, C., Heipke, C., und Wiggenhagen, M. (2006). *Lens inclination due to instable fixings detected and verified with VDI/VDE 2634 Part 1*. International Archives of Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences, 36.
- [HASTEDT et al. 2002] Hastedt, H., Luhmann, T., und Tecklenburg, W. (2002). *Image-Variant interior orientation and sensor modelling of high-quality digital cameras*. International Archives of Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences, 34.
- [KAHMEN 2006] Kahmen, H. (2006). *Vermessungskunde*: Walter de Gruyter, 20 Aufl.
- [KESSEL 2001] Kessel, W. (2001). *Der ISO/BIPM-Leitfaden zur Ermittlung der Messunsicherheit*. Technisches Messen, 68(1), 5–13.
- [KLEIN 2007] Klein, B. (2007). *Prozessorientierte Statistische Tolerierung*: expert verlag.
- [KRAUS 2004] Kraus, K. (2004). *Photogrammetrie Band 1: Geometrische Informationen aus Photographien und Laserscanneraufnahmen*: Walter de Gruyter, 7 Aufl.
- [LOHSE 2008] Lohse, V. (2008). *Photogrammetrie A400M*. Präsentation der Airbus Operations GmbH.
- [LUHMANN 2003] Luhmann, T. (2003). *Nahbereichsphotogrammetrie - Grundlagen, Methoden und Anwendungen*: Herbert Wichmann Verlag, 2 Aufl.
- [NEUKAMM et al. 2010] Neukamm, M., Schulze, M., und Staude, A. (2010). *Untersuchung der geometrischen Eigenschaften industrieller CT mit Hilfe eines neuartigen Prüfkörpers und den Methoden der Photogrammetrie*. In: *DGZfP-Jahrestagung 2010*, Nr. Di.2.A.2. Deutsche Gesellschaft für Zerstörungsfreie Prüfung e.V.
- [NIEMEIER 2001] Niemeier, W. (2001). *Ausgleichsrechnung*: Walter de Gruyter.
- [OTEPKA 2004] Otepka, J. O. (2004). *Precision Target Mensuration in Vision Metrology*. Dissertation, Technische Universität Wien.
- [OTEPKA und FRASER 2004] Otepka, J. O. und Fraser, C. S. (2004). *Accuracy Enhancement of Vision Metrology through automatic Target Plane Determination*. Proceedings of the ISPRS Congress 2004, Volume XXXV, Part B, 35, 873–879.
- [OUELLET und HÉBERT 2009] Ouellet, J.-N. und Hébert, P. (2009). *Precise ellipse estimation without contour point extraction*. Machine Vision and Applications, 21, 59–67.
- [RAUTENBERG und WIGGENHAGEN 2002] Rautenberg, U. und Wiggenhagen, M. (2002). *Abnahme und Überwachung photogrammetrischer Messsysteme nach VDI 2634, Blatt 1*. Photogrammetrie, Fernerkundung, Geoinformation (PFG), 2, 117–124.

- [SCHLÖGELHOFER 1989] Schlögelhofer, F. (1989). *Qualitäts- und Wirtschaftlichkeitsmodelle für die Ingenieurphotogrammetrie*. Dissertation, Technische Universität Wien.
- [SETAN und IBRAHIM 2004] Setan, H. und Ibrahim, M. S. (2004). *Close Range Measurement and 3D Modeling*. In: *1st FIG International Symposium on Engineering Surveys for Construction Works and Structural Engineering*, Nottingham, United Kingdom.
- [SIMON 2006] Simon, D. (2006). *Optimal State Estimation: Kalman,  $H_\infty$  and Nonlinear Approaches*: John Wiley & Sons.
- [SUDHOLT 2001] Sudholt, H. (2001). *Integration eines photogrammetrischen Industriemesssystems für die Qualitätskontrolle im Flugzeugbau*. Diplomarbeit, Fachhochschule Oldenburg, Ostfriesland, Wilhelmshaven.
- [WIGGENHAGEN und RAGUSE 2003] Wiggenhagen, M. und Raguse, K. (2003). *Entwicklung von Kenngrößen zur Qualitätsbeurteilung optischer Prozessketten*. *Photogrammetrie, Fernerkundung, Geoinformation (PFG)*, 2, 31–49.

## Danksagung

An dieser Stelle möchte ich den vielen Menschen, die mich bei dem Verfassen dieser Arbeit unterstützt haben danken. Neben meinen Betreuern auf Seiten der Universität, Herrn Manfred Wiggenhagen und Herrn Christian Heipke, die für Fragen jeglicher Art zu jeder Zeit erreichbar waren, möchte ich der Abteilung TBBQ12 der *Airbus Operations GmbH* in Bremen für die freundliche Aufnahme ins Team meinen Dank aussprechen. Insbesondere Herrn Volker Lohse, der mich durch seine ausdauernde Betreuung in die Thematik eingeführt und mit seiner gründlichen Korrektur der Arbeit einen großen Teil zum Gelingen des Projektes beigetragen hat, gebührt mein besonderer Dank. Ferner bedanke ich mich bei Melike und Angelika Wulfgramm für ihre Korrekturen, insbesondere stilistischer und grammatikalischer Natur.

# Anhang A

## Quellen

### **Emailkontakt mit der Firma *Hubbs Machine & Manufacturing, Inc.***

— On Fri, 8/12/11, Martin Reich [martin.reich@airbus.com](mailto:martin.reich@airbus.com) wrote:

From: Martin Reich [martin.reich@airbus.com](mailto:martin.reich@airbus.com) Subject: Hubbs Contact Request To: [tonya@hubbsmachine.com](mailto:tonya@hubbsmachine.com) Date: Friday, August 12, 2011, 4:08 AM From Name: Martin Reich From Email: [martin.reich@airbus.com](mailto:martin.reich@airbus.com) From Phone: Message Subject: tolerances of retro-targets Message:

Hello, we at Airbus use your retro-reflective photogrammetry targets for measuring. At your website there are the tolerances of lengths and diameters but is there a tolerance of the concentricity of the center of the dot and the axis given by the shank? Thank you and best regards, Martin Reich

From: Tonya Cole-Graham [tonya@hubbsmachine.com](mailto:tonya@hubbsmachine.com) Subject: RE: Hubbs Contact Request To: [martin.reich@airbus.com](mailto:martin.reich@airbus.com) Date: Friday, August 12, 2011, 4:08 AM From Name: Tonya Cole-Graham From Email: [tonya@hubbsmachine.com](mailto:tonya@hubbsmachine.com) From Phone: Message Subject: tolerances of retro-targets Message:

Hello Martin,

Thank you for your inquiry. The tolerance of the concentricity of the center of the dot and the axis given by the shank is  $\pm 0.0005$ ".

Thank you, Tonya

# Anhang B

## Daten-CD

Anliegend zur Arbeit befindet sich eine Daten-CD mit einer digitalen Version der Arbeit, den wichtigsten verwendeten Quellcodes der Analysen und einigen Datengrundlagen. Der Ordner *Arbeit* enthält die Masterarbeit in digitaler Form. Für die Arbeit wurde als Basis das Latex-Template von T. Gockel<sup>1</sup> verwendet und erweitert. Die Quellcodes sind *Matlab*-Codes und kommentiert, so dass sich ihr Aufbau und ihr Verwendungszweck erklärt. Alle Codes sind im Ordner *Funktionen* gespeichert. Der Unterordner *Daten* enthält zwei weitere Ordner, in denen sich die Ausgabedateien von ausgewählten Projekten der Softwareprodukte *V-STARs* und *Australis* befinden. Diese Daten werden automatisch von den entsprechenden Funktionen verwendet. Zudem enthält der Ordner eine *\*.mat*-Files mit einigen Ergebnissen:

**2DMJob:** Enthält die Koordinaten des 2D-Knopf-Targets für alle 18 Epochen des *Multi-Jobs*.

**KennGrFWSec15:** Enthält die gefilterten Auswertedaten von *V-STARs*, in denen lediglich die Punktkoordinaten der Adapterpunkte vorhanden sind. Damit lassen sich die Kenngrößen im Vorwärtsschnitt berechnen.

**VergleichSJobV-STARsSuAustralisBetrachtungsrichtung:** Enthält die Koordinaten des interessierenden Punktes der fünf verschiedenen Betrachtungsrichtungsgruppen (oben, halboben, mitte, halbmitte, unten) des durchgeführten *Single-Jobs*, berechnet mit *V-STARs* und *Australis*.

**VergleichSJobV-STARsSuAustralisSchnittwinkel:** Enthält die Koordinaten des interessierenden Punktes des durchgeführten *Single-Jobs*, welche zum einen mit clusterartiger zum anderen mit verteilter Aufnahmekonstellation berechnet sind.

**VerteilungPoints:** Enthält 2d-Koordinaten für den Test der Verteilung der Punkte. Diese Daten werden für die Funktion *TestVerteilung.m* benötigt.

Im Folgenden sind die Funktionen aufgelistet und kurz beschrieben:

---

<sup>1</sup>Form der wissenschaftlichen Ausarbeitung. Springer-Verlag, Heidelberg, 2008. Begleitende Materialien unter <http://www.iaim.ira.uka.de/form-der-wissenschaftlichen-ausarbeitung>.

**angleTF:** Funktion zur Umrechnung von Azimut, Elevation und Roll-Winkel in phi, omega und kappa.

**bundleAdjustAus:** Funktion zur Bündelausgleichung nach der Methode der kleinsten Quadrate von Single-Jobs. Funktion arbeitet mit den Daten der Funktion *readOutAustralis.m*

**KennGrBFW:** Funktion zur Berechnung der Kenngröße für den Betrachtungswinkel im Vorwärtsschnitt.

**KennGrSWBWIiter:** Funktion zur Berechnung der Kenngröße für den Schnittwinkel im Rückwärtsschnitt mit der iterativen Methode. Als Übergabe sind Arrays aus den Funktionen *readOutAustralis.m* oder *readOutStar.m* möglich.

**KennGrSWBWMean:** Funktion zur Berechnung der Kenngröße für den Schnittwinkel im Rückwärtsschnitt mit der allgemeinen Methode. Als Übergabe sind Arrays aus der Funktion *readOutAustralis.m* möglich.

**KennGrSWFWIiter:** Funktion zur Berechnung der Kenngröße für den Schnittwinkel im Vorwärtsschnitt mit der iterativen Methode.

**KLK:** Funktion zur Berechnung der Kollinearitätsgleichungen.

**readOutAustralis:** Funktion zum Auslesen der Ausgabedateien des Programms *Australis*. Die Daten werden in zwei Cell-Arrays gespeichert.

**readOutAustralisPic:** Funktion, welche im Rahmen der Funktion *readOutAustralis.m* aufgerufen wird. Sie dient dem Auslesen der Bildkoordinaten der Punkte aus jedem Bild eines Bündels.

**readOutStar:** Funktion zum Auslesen der Ausgabedateien des Programms *V-STARs*. Die Daten werden in zwei Cell-Arrays gespeichert.

**TestAbbildungsEx:** Skript zur Berechnung der Abbildungsexzentrizität und zur Visualisierung mit Beobachtungsrichtung und Entfernung.

**TestBetrachtungsrichtung:** Skript zur Berechnung des Einflusses der Betrachtungsrichtung bei der Bildmessung.

**TestKontrast:** Skript zur Berechnung des Einflusses des Kontrastes der Abbildung der Zielmarke im Bild.

**TestStringer:** Skript zur Konstruktion und Varianzfortpflanzung eines Stringer-Punktes mit Hilfe der Monte-Carlo-Methode.

**TestVerteilung:** Skript zur Berechnung des Einflusses des Schnittwinkels beim Rückwärtsschnitt.

**EllipseFitByTaubin:** Externe Funktion zum Schätzen der Ellipsenparameter aus einer 2d-Punktmenge. Diese Funktion wurde den Gegebenheiten zum Teil angepasst.

**solveellipse:** Externe Funktion zum lösen der Ellipsenparameter aus der analytischen Form.