

Aktive daten- und modellbasierte  
Sensorpositionierung zur 3-D Vermessung

**Dissertation**

zur Erlangung des akademischen Grades

**Doktor-Ingenieur (Dr.-Ing.)**

vorgelegt dem Rat der Fakultät für Mathematik und Informatik

der Friedrich-Schiller-Universität Jena

von Diplom-Informatiker Christoph Munkelt

geboren am 25.03.1977 in Jena

Gutachter

1. Prof. Dr.-Ing. Joachim Denzler, Friedrich-Schiller-Universität Jena
2. Prof. Dr. Wolfgang Osten, Universität Stuttgart

Tag der öffentlichen Verteidigung: 21.10.2011

## Danksagung

Mein besonderer Dank gilt Prof. Dr. Joachim Denzler für die Vergabe des Themas sowie seine Betreuung und fachliche Kritik während meiner Promotion.

Meinem Betreuer Dr. Peter Kühmstedt danke ich für die offene Arbeitsatmosphäre in seinem Team, mannigfaltige Sichtweisen auf das Problem der 3-D Rekonstruktion und immer einem offenen Ohr für fachliche kontroverse Diskussionen.

Des Weiteren danke ich Michael Trummer für alternative Einblicke, seinen Humor und die konstruktive Zusammenarbeit im Bereich der Ansichtenplanung. Von den weiteren Kollegen am Lehrstuhl Digitale Bildverarbeitung der FSU möchte ich besonders Dr. Herbert Süße danken.

Meinen Kollegen in der Abteilung Optische Systeme / Optische Messtechnik des IOF gilt mein spezieller Dank, allen voran Matthias Heinze, Ingo Schmidt, Kathrin Mäusezahl und Dr. Gunther Notni. Ohne ihre Vorarbeiten, ihre technische Unterstützung, Ermunterung und ungezählte Diskussionen wäre diese Arbeit nicht möglich gewesen. Herausragender Dank gebührt Andreas Breitbarth für ausgedehnte Diskussionen und Unterstützung bei der Auswertung einiger Experimente. Eric Otto möchte ich herzlich für die freundliche Unterstützung bei der Erstellung der Abbildungen 5.2, 5.3 und 5.11 sowie der Unterstützung bei Durchführung und Auswertung einiger Experimente danken.

Thomas Fischer danke ich für sein Beispiel, seine Begleitung und die Grundsteinlegung für das notwendige Selbstvertrauen in die Bewältigung einer Promotion.

Für Relativierung und Bestärkung danke ich Beate Schuhmann, welche in manch stürmiger Zeit mein Leuchtturm war.

Meinen Eltern Renate und Günter Munkelt danke ich für ihre fortdauernde Unterstützung und Liebe, welche meine Arbeit erst möglich gemacht hat.

Meiner Frau Eva gebührt unendlicher Dank für ihren Beistand, ihre Geduld, Liebe und Nachsicht und ihr Verständnis. Meiner Tochter Ada danke ich für ihren Sonnenschein, welcher mich immer wieder glücklich macht und mir Kraft gibt. Meinem Sohn Armin danke ich für sein Lachen und seine salomonische Terminfindung.

„There are two ways through life.  
The way of nature and the way of grace.  
You have to choose which one you will follow.“

Terrence Malick: „The Tree of Life“



## Zusammenfassung

Im Bereich der dreidimensionalen Objektrekonstruktion und -inspektion ist die Ansichtenplanung eines der zentralen Probleme. Es erlaubt die Bestimmung geeigneter Sensorparameter, um ein Messobjekt hochgenau und vollständig mit wenigen Ansichten zu erfassen. Während datenbasierte Ansätze ohne Informationen zum Messobjekt die Planung zur Laufzeit der Messung mit den bisher erfassten Objektdaten durchführen, nutzen modellbasierte Ansätze a priori vorhandene Objektinformationen. Dadurch sind sie in der Lage, kürzere Ansichtenpläne zu erstellen, welche zu genaueren und vollständigeren Rekonstruktionen führen.

Traditionelle Verfahren zur Ansichtenplanung streben entweder nach der Maximierung der Vollständigkeit oder der Minimierung der Unsicherheit. Wenn beide Aspekte betrachtet werden, erfolgt die Unsicherheitsminimierung lediglich indirekt durch Mindestqualitätsanforderungen bei der Messdatenakquise. Im Gegensatz dazu erlaubt die in dieser Arbeit vorgestellte modellbasierte Mehrschrittplanung, unter Berücksichtigung des zum größten Eigenwert der geschätzten Messunsicherheit gehörenden Eigenvektors (sog. erweitertes  $E$ -Kriterium), die gemeinsame Optimierung von Vollständigkeit und Genauigkeit. Dazu muss der verwendete Sensor genau modelliert und seine charakteristische Messunsicherheit experimentell bestimmt werden.

Der gezeigte Ansatz ist sowohl in der daten- als auch der modellgetriebenen Ansichtenplanung anwendbar. Es müssen keine Einschränkungen bezüglich Objektgeometrie und -größe sowie der Sensorfreiheitsgrade vorgenommen werden, solange die genutzte Sensortechnologie für die Messaufgabe geeignet ist. Insbesondere erzielt die Planungsmethode auch bei komplexen Messobjekten gute Ergebnisse. Die vorliegende Arbeit setzt den Planungsansatz in einen der Messdatenaufnahme vorangestelltem Berechnungsschritt für einen streifenprojektionsbasierten 3-D-Scanner um, verifiziert die Vorteile durch Experimente und vergleicht die erzielten Ergebnisse mit menschlichen Bedienern und einem aktuellen Ansatz aus der Literatur.

Dazu wird eine umfangreiche Bewertungsmethodik entwickelt. Diese umfasst neben einem komplexen Testobjekt für die Ansichtenplanung auch die detaillierte Bewertung der Messergebnisse hinsichtlich der benötigten Ansichtenanzahl, erzielten Vollständigkeit und Genauigkeit. Die vorgestellten Methoden werden zusätzlich zum Testobjekt auch mit verschiedenen, repräsentativen Messobjekten für die 3-D Rekonstruktion und Inspektion getestet.

## Summary

View planning is a central task in 3D object reconstruction and inspection. It allows for precise and complete object scanning using few views by calculation of appropriate sensor parameters. Since data driven approaches can not use a priori object information, they have to rely on previously gathered measurement data to determine the next best view (NBV). On the contrary, usage of model information enable model based approaches to calculate shorter view plans for more precise and more complete object reconstruction.

Conventional view planning methods either maximize completeness of measurement data or minimize measurement uncertainty. Approaches considering both aspects minimize uncertainty only indirectly by assuming a minimum quality specification during measurement. In contrast, the model based multi view planning method presented in this thesis allows for joint optimization of completeness and accuracy. To this end it utilizes the direction of the largest eigen value of the uncertainty estimation (E-criterion). For that purpose a precise model of the sensor is developed and its characteristic measurement uncertainty has been empirically determined.

The presented approach can be used for model based and data driven view planning. No restrictions regarding object geometry, object size and degrees of freedom of the positioning system apply, as long as the sensor technology is well suited for the present measurement task. The method achieves good results even for complex measurement objects. Planning is performed prior to the actual scanning using a fringe projection based 3D scanner. Experimental results are compared to reconstruction results of human operators and another competing planning approach.

For comparison, an extensive view planning benchmark is developed. It includes a complex view planning test object. Furthermore it allows the detailed evaluation of the resulting 3D reconstruction regarding the number of views required, as well as completeness and accuracy. The presented methods are also tested with several representative measurement objects for 3D object reconstruction and inspection.

# Inhaltsverzeichnis

<b>1</b>	<b>Einleitung</b>	<b>1</b>
1.1	Das Ansichtenplanungsproblem . . . . .	1
1.2	Gewählter Ansatz und eigener Beitrag . . . . .	3
1.3	Gliederung der Arbeit . . . . .	6
<b>2</b>	<b>Mathematische Grundlagen</b>	<b>9</b>
2.1	Geometrische Grundlagen . . . . .	9
2.1.1	Keramamodelle . . . . .	10
2.1.2	Kalibrierung der Kameraparameter . . . . .	12
2.2	Grundbegriffe der Planungstheorie . . . . .	14
2.2.1	Planung als Suchproblem . . . . .	16
2.2.2	Abtastung im Kontext der Planung . . . . .	16
2.3	Numerische Optimierung . . . . .	17
2.3.1	Ganzzahlige lineare Optimierung . . . . .	17
2.3.2	Mengenüberdeckungsproblem . . . . .	17
2.3.3	Problem des Handlungsreisenden . . . . .	19
2.4	Schätzung der Messunsicherheit . . . . .	19
<b>3</b>	<b>Stand der Technik</b>	<b>21</b>
3.1	Datengetriebene Verfahren . . . . .	23
3.1.1	Volumetrische Ansätze . . . . .	23
3.1.2	Oberflächenbasierte Ansätze . . . . .	26
3.1.3	Globale Ansätze . . . . .	27
3.1.4	Andere datengetriebene Ansätze . . . . .	29
3.2	Modellgetriebene Verfahren . . . . .	30
3.2.1	Mengentheoretische Ansätze . . . . .	30
3.2.2	Graphentheoretische Ansätze . . . . .	33
3.2.3	Andere modellgetriebene Ansätze . . . . .	35
3.3	Diskussion des aktuellen Forschungsstandes . . . . .	36
<b>4</b>	<b>Ansichtenplanung für die optische 3-D Vermessung</b>	<b>39</b>
4.1	Definitionen . . . . .	39
4.2	Ansichtenplanung im Kontext der Streifenprojektion . . . . .	42
4.3	Ansichtenplanung als Optimierungsproblem . . . . .	45

4.3.1	Zielkriterien . . . . .	46
4.3.2	Planungsstrategien . . . . .	47
4.4	Bewertung von 3-D Rekonstruktionsergebnissen im Kontext der Ansichtenplanung . . . . .	49
4.4.1	Bewertungskriterien . . . . .	50
4.4.2	Bewertung der Vollständigkeit . . . . .	53
4.4.3	Bewertung der Rekonstruktionsgüte . . . . .	54
<b>5</b>	<b>Modellbasierte Mehransichtenplanung</b>	<b>57</b>
5.1	Vollständigkeitsorientierte Mehransichtenplanung . . . . .	58
5.1.1	Grundansatz nach Scott . . . . .	58
5.1.2	Anpassung an komplexe Messobjekte bei beschränktem C-Space . . . . .	63
5.2	Mehrschrittplanung mit erweitertem <i>E</i> -Kriterium . . . . .	66
5.2.1	Schätzung der Messunsicherheit von 3-D Messsystemen auf Grundlage der Streifenprojektion . . . . .	68
5.2.2	Mehransichtenplanung mit erweitertem <i>E</i> -Kriterium zur Berücksichtigung von Vollständigkeit und Messunsicherheit . . . . .	72
5.3	Experimentelle Ergebnisse . . . . .	76
5.3.1	Versuchsmethodik . . . . .	76
5.3.2	Vergleich verschiedener Sensorpositionierungsmethoden . . . . .	82
<b>6</b>	<b>Kombinierte daten- und modellgetriebene Ansichtenplanung</b>	<b>91</b>
6.1	Hüllkörperbasierte Grobmodellerstellung . . . . .	92
6.2	Online NBV-Planung mittels erweitertem <i>E</i> -Kriterium . . . . .	94
6.3	Experimentelle Ergebnisse . . . . .	97
<b>7</b>	<b>Zusammenfassung und Ausblick</b>	<b>107</b>
	<b>Literaturverzeichnis</b>	<b>111</b>
	<b>Abbildungsverzeichnis</b>	<b>121</b>
	<b>Tabellenverzeichnis</b>	<b>123</b>
	<b>Algorithmenverzeichnis</b>	<b>125</b>
<b>A</b>	<b>Glossar</b>	<b>127</b>
<b>B</b>	<b>Ergebnisse des Leistungsvergleiches</b>	<b>131</b>



# Symbolverzeichnis

$A_o$	Fläche der von einem 3-D Sensor in optimaler Messentfernung $d_o$ mit Antastwinkel $\theta_a = 0^\circ$ erfassbaren Ebene
$c$	Vollständigkeit (engl. <i>Coverage</i> ) der 3-D Rekonstruktion
$d$	Messentfernung
$d_{av}$	Mittlerer Punktabstand benachbarter Punkte
$d_o$	Optimale Messentfernung des Sensors
$d_s$	Obere Grenze für den mittleren Punktabstand
$e_{av}$	Mittlerer 3-D Fehler
$\mathbf{I}$	Einheitsmatrix
$\mathbf{M}$	Messbarkeitsmatrix
$m_{ij}$	Elemente der Messbarkeitsmatrix $\mathbf{M}$
$\mathbf{n}$	Oberflächennormale
$\bar{\mathbf{p}}$	Geschätzter 3-D Punkt auf der (i.A. aus mehreren, teilweise überlappenden Ansichten) rekonstruierten 3-D Oberfläche
$\hat{\mathbf{p}}_n$	Gemessener 3-D Punkt der $n$ -ten Ansicht
$\bar{\mathbf{p}}$	Punkt bzw. Feature im Objektraum
$P$	Gemessener 3-D Punkt einer Ansicht
$\bar{P}$	Geschätzter 3-D Punkt auf der (i.A. aus mehreren, teilweise überlappenden, Ansichten) rekonstruierten 3-D Oberfläche (z.B. Eckpunkt)
$\mathbf{P}$	Projektionsmatrix
$\mathbf{R}$	Rotationsmatrix
$rr_n$	Sensorehstrahl der Kamera $n$
$rr_p$	Beleuchtungsstrahl
$S$	Oberflächenraum (Oberfläche des Messobjektes)
$\mathbf{t}$	Translationsvektor
$V$	Ansichtenraum (zur Festlegung einer Ansicht nutzbare Parameter)
$v$	Anzahl von Ansichten
$\mathbf{v}$	Ansicht (konkrete Sensorkonfiguration)
$\bar{\Sigma}^{(n)}$	Kummulierte Kovarianzmatrix eines Punktes nach $n$ Ansichten
$\bar{\sigma}^{(n)}$	Messunsicherheit der Punktschätzung $\bar{\mathbf{p}}^{(n)}$ nach $n$ Beobachtungen
$\Sigma_c$	Charakteristische Kovarianzmatrix eines 3-D Sensors
$\sigma_s$	Obere Grenze für die zulässige Messunsicherheit
$\sigma_z$	Messunsicherheit (Standardabweichung entlang des Sensorehstrahls)

$\theta$	Rotation eines bistatischen Sensors um die Sensormittelachse
$\theta_a$	Antastwinkel
$\theta_b$	Grenzwinkel (engl. <i>breakdown angle</i> )
$\theta_t$	Triangulationswinkel
$\varphi$	Azimutwinkel sphärischer Koordinaten
$\vartheta$	Polarwinkel sphärischer Koordinaten
$\angle(\mathbf{a}, \mathbf{b})$	Kleinster Winkel zwischen den Vektoren $\mathbf{a}$ und $\mathbf{b}$

# Abkürzungsverzeichnis

<b>BIP</b>	engl. „Binary Integer Programming“, Unterklasse der ILP mit ganzzahligen Binärvariablen
<b>CAD</b>	engl. „Computer Aided Design“, rechnergestützte Konstruktion
<b>C-Space</b>	engl. „Configuration Space“, Konfigurationsraum
<b>CSG</b>	engl. „Constructive Solid Geometry“, konstruktive Festkörpergeometrie
<b>DOF</b>	engl. „Degrees Of Freedom“, Freiheitsgrade
<b>HAT</b>	Hand-Auge-Transformation
<b>ILP</b>	engl. „Integer Linear Programming“, ganzzahligen Optimierung
<b>IOF</b>	Fraunhofer Institut für Angewandte Optik und Feinmechanik
<b>LP</b>	engl. „Linear Programming“, lineare Optimierung
<b>MSC</b>	engl. „Minimum Set Cover“, als Optimierungsproblem gestelltes SCP
<b>NBV</b>	engl. „Next Best View“, datengetriebene Planung der besten nächsten Ansicht
<b>NP</b>	engl. „Nondeterministic Polynomial Time“, Komplexitätsklasse
<b>O. B. d. A.</b>	Ohne Beschränkung der Allgemeinheit
<b>SCP</b>	engl. „Set Cover Problem“, Mengenüberdeckungsproblem
<b>ToF</b>	engl. „Time of Flight“, auf Laufzeitverfahren basierende Systeme
<b>TSP</b>	engl. „Travelling Salesman Problem“, Problem des Handlungsreisenden
<b>VPP</b>	engl. „View Planning Problem“, Ansichtenplanungsproblem
<b>VRML</b>	engl. „Virtual Reality Modeling Language“, Beschreibungssprache für 3-D Szenen



# Kapitel 1

## Einleitung

Die aktive 3-D Rekonstruktion dringt in immer weitere Anwendungsgebiete von Wissenschaft, Industrie und Medizin vor. Zur vollständigen Erfassung der Objektoberfläche von Interesse müssen dazu im Allgemeinen mehrere (Teil-) Ansichten – also mit festen intrinsischen und extrinsischen Parametern durchgeführte 3-D Rekonstruktionen einer Tiefenkamera – des Objektes aus unterschiedlichen Richtungen aufgenommen und zu einem konsistenten Gesamtmodell zusammengefügt werden. Dabei ist die Planung der dazu notwendigen Ansichten und Aufnahmeparameter eine bis heute herausfordernde und nur teilweise automatisierte Aufgabenstellung.

Wichtige Einsatzfelder hochqualitativer 3-D Vermessung mittels mehrerer Ansichten finden sich in der Wissenschaft u.a. bei der Objekterkennung und der Kulturerbe-Dokumentation der Archäologie, in der Industrie u.a. bei der Flächenrückführung unbekannter Objekte zur weiteren Bearbeitung mittels Methoden des CAD<sup>1</sup> und der Überprüfung der Toleranzen eines gefertigten Werkstückes (Inspektion), in der Medizin u.a. bei der Erstellung von Prothesen, Zahnersatz und Epithesen.

Im folgenden Abschnitt wird das Ansichtenplanungsproblem genauer spezifiziert und die im Rahmen dieser Arbeit geltenden Randbedingungen vorgestellt. Im Abschnitt 1.2 wird der gewählte Ansatz zur Planung der Ansichten kurz dargelegt und der Beitrag dieser Arbeit zusammengefasst, während der letzte Abschnitt dieses Kapitels die Gliederung der Arbeit vorstellt.

### 1.1 Das Ansichtenplanungsproblem

Die zunehmende Verfügbarkeit optischer Sensoren zur dreidimensionalen Rekonstruktion kann auf deren niedrigere Anschaffungs- und Bedienkosten sowie ihrer schnellen, dichten und kontaktlosen Abtastung im Vergleich zu (taktilen) Koordinatenmessmaschinen zurückgeführt werden (Scott et al. [74]). Damit steigt auch der Bedarf nach einer (teil-) automatisierten Planung der notwendigen Ansichten, um Produktivität und Qualität der bisher durch qualifiziertes Fachpersonal aufwendig manuell durchgeführten Planung zu erhöhen.

Diese Arbeit beschäftigt sich dabei ausschließlich mit den Aspekten der Ansichtenplanung, welche sich aus der 3-D Rekonstruktion und Inspektion von Objekten ergeben (siehe Abbildung 1.1). Weitere wichtige, hier jedoch nicht betrachtete Anwendungsfelder der Ansichtenplanung sind u.a. die Objektverfolgung, Objekterkennung, Roboternavigation und Umgebungskartographierung.

---

<sup>1</sup>Computer Aided Design – rechnergestützte Konstruktion

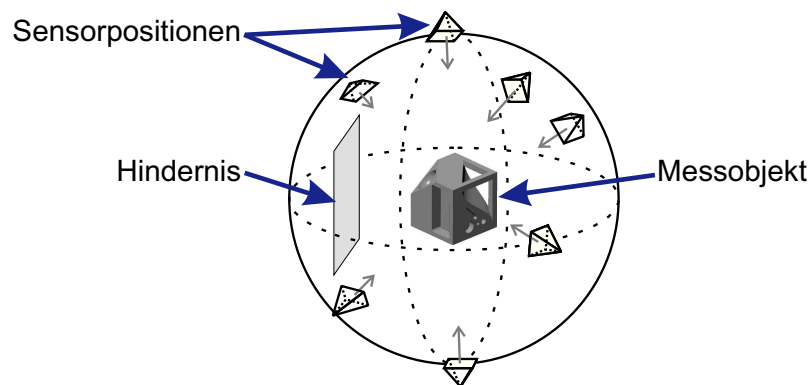


Abbildung 1.1: Mittels Ansichtplanung wird eine Folge von Sensorpositionen berechnet, von denen die spezifikationsgetreue 3-D Rekonstruktion des Messobjektes unter Berücksichtigung des Messaufbaus möglich ist.

Das allgemeine *Ansichtenplanungsproblem* wird in [74, S. 68] wie folgt formuliert:

Finde innerhalb akzeptabler Berechnungszeit einen Ansichtenplan  $N$  angemessener Länge, welcher für einen gegebenen Messaufbau und ein gegebenes Messobjekt die spezifizierten Rekonstruktionsziele erfüllt.

Der Messaufbau beeinflusst dabei hauptsächlich die Sichtbarkeitsanalyse und die Kollisionsvermeidung. Die Spezifikation der Rekonstruktionsziele kann z. B. Vollständigkeit, Messunsicherheit und Messpunktastand umfassen [69]. Wird die vollständige Rekonstruktion des Messobjekts gefordert, so wurde durch Tarbox und Gottschlich [82] gezeigt, dass das Problem der Bestimmung eines kürzesten Ansichtenplanes NP-vollständig ist. Dadurch ist es für die meisten realistischen Rekonstruktions- und Inspektionsaufgaben unmöglich, einen kürzesten Plan zu berechnen [74, S. 68].

Je nachdem, ob vor Beginn der Planung detaillierte Objektinformationen vorhanden sind, unterscheidet man modell- und datengetriebene Ansichtplanung. Bei der *3-D Rekonstruktion* sind im Allgemeinen keine Modellinformationen vorab verfügbar: Die Planung erfolgt *datengetrieben*. Dabei wird während der Messdatenaufnahme (engl. „*online*“) aus dem momentan verfügbaren Objektwissen auf die beste nächste Ansicht geschlossen (engl. „*next best view (NBV) planning*“). Typischerweise werden so nur wenige Objekte einer Art rekonstruiert. Dieses Anwendungsszenario umfasst z. B. die Erstellung von Computermodellen im Bereich der schnellen Prototypenentwicklung oder der Dokumentation von archäologischen Objekten. In Abb. 1.2 ist beispielhaft eine 3-D Rekonstruktion einer Spielzeugplastik ohne vorhandenes Computermodell dargestellt.

Bei der flächenhaften *Inspektion* kann für die Ansichtplanung auf ein CAD-Modell zurückgegriffen werden: Die Planung erfolgt *modellgetrieben*. Dabei können mit Hilfe einer ausreichend detaillierten Version des Objektmodells ein Großteil der notwendigen Ansichten bereits vorab (engl. „*offline*“) genau geplant werden. Diese Art der Planung wird hauptsächlich dann eingesetzt, wenn viele gleichartige Objekte, z. B. im Rahmen einer Qualitätskontrolle, rekonstruiert werden sollen. Abbildung 1.3 stellt die Inspektion eines Integralträgers aus dem Automobilbau exemplarisch dar.

Diese Arbeit konzentriert sich dabei auf hochgenaue optische 3-D Sensoren, welche flächenhafte aktive Beleuchtung zur Bestimmung von Punktkorrespondenzen im Objektraum sowie Triangulation zur 3-D Koordinatenberechnung einsetzen. In diesem Kontext soll „hochgenau“ für eine Messunsicherheit

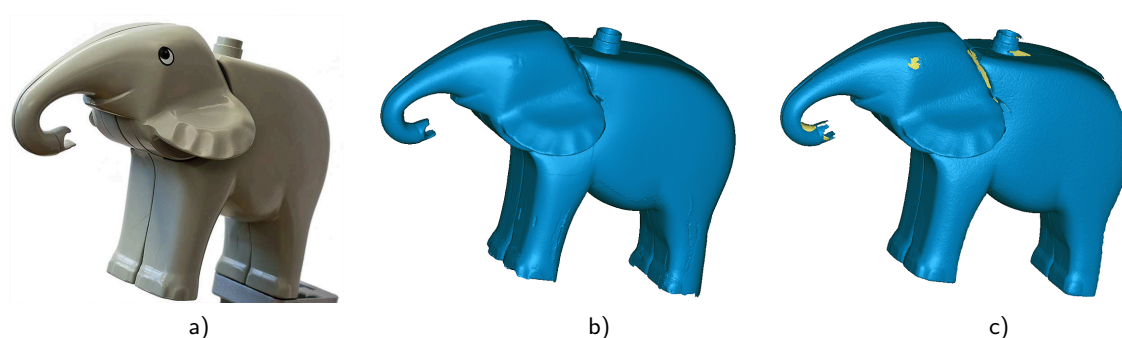


Abbildung 1.2: Anwendung der Ansichtenplanung zur Flächenrückführung unbekannter Objekte (Spielzeugelefant, Lego® Duplo, ca.  $110 \times 40 \times 90 \text{ mm}^3$ ). Dargestellt sind ein Foto der Plastik (a), ein manuell (aus zwei Teilmessungen in unterschiedlicher Objektlage) aus insgesamt zwanzig Ansichten erstelltes 3-D Modell (b) und eine mittels Ansichtenplanung mit acht Ansichten erzielte Rekonstruktion (c).

„im Bereich einiger zehn Mikrometer bei einer Messpunktdichte von vielen Punkten pro Quadratmillimeter stehen“ (Scott [69]). Abbildung 1.4 versucht die daraus resultierenden Größenverhältnisse am Beispiel der Rekonstruktion dreier Unterlegscheiben (Durchmesser der größten: 10 mm, bei einer Dicke von 1 mm) zu verdeutlichen.

Der im Rahmen dieser Arbeit modellierte und zum Einsatz kommende 3-D Sensor arbeitet nach dem Prinzip der phasenkorrelierenden Streifenprojektion [34]. Der Sensor besteht aus einem starr mit zwei Kameras verbundenen digitalen Projektor (siehe auch Abb. 4.2 b). Dabei projiziert der Projektor eine Mustersequenz von Gray-Code- und  $(1 + \cos)$ -Streifen auf das Messobjekt, welche synchron durch die Kameras aufgenommen wird. Der gesamte Sensor kann durch ein Positioniersystem mit sechs Freiheitsgraden flexibel und programmgesteuert um das Messobjekt bewegt werden.

Die Aufgabenstellung dieser Arbeit umfasst die folgenden Aspekte: Automatische Berechnung der notwendigen Ansichten, Berücksichtigung der besonderen Charakteristik der Streifenprojektion, Anwendbarkeit der Methode für komplexe Messobjekte und bei eingeschränktem Sensorbewegungsraum, Nutzung eventuell vorhandenen Modellwissens und Einbeziehung der Messunsicherheit in die Modellbildung.

## 1.2 Gewählter Ansatz und eigener Beitrag

Die aus der Literatur bekannten Lösungsansätze für das Ansichtenplanungsproblem lassen sich, wie bereits erwähnt, in zwei Hauptgruppen unterteilen: Datengetriebene und modellgetriebene Ansätze. Wenige Autoren kombinieren beide Methoden, um zuerst datengetrieben ein Grobmodell des Messobjektes zu erstellen, welches anschließend als Grundlage der modellgetriebenen Planung fungiert. An dieser Stelle erfolgt nur eine sehr kurze Einführung in die bekannten Ansätze – ein detaillierter Überblick über den Stand der Technik wird in Kapitel 3 gegeben.

Die datengetriebenen Ansätze nutzen meist vereinfachende Sensormodellierungen und schließen aus Selbstverdeckungen oder Grenzen des Sensorsehvolumens auf bisher ungesehene Objektbereiche. Andere Ansätze nutzen spezielle Objekteigenschaften (z. B. geschlossenes Objekt oder glatte, geschwungene Objektoberflächen) aus. Zusammenfassend ist das Ziel datengetriebener Ansichtenplanung die Minimierung des bisher ungesehenen Messvolumens.

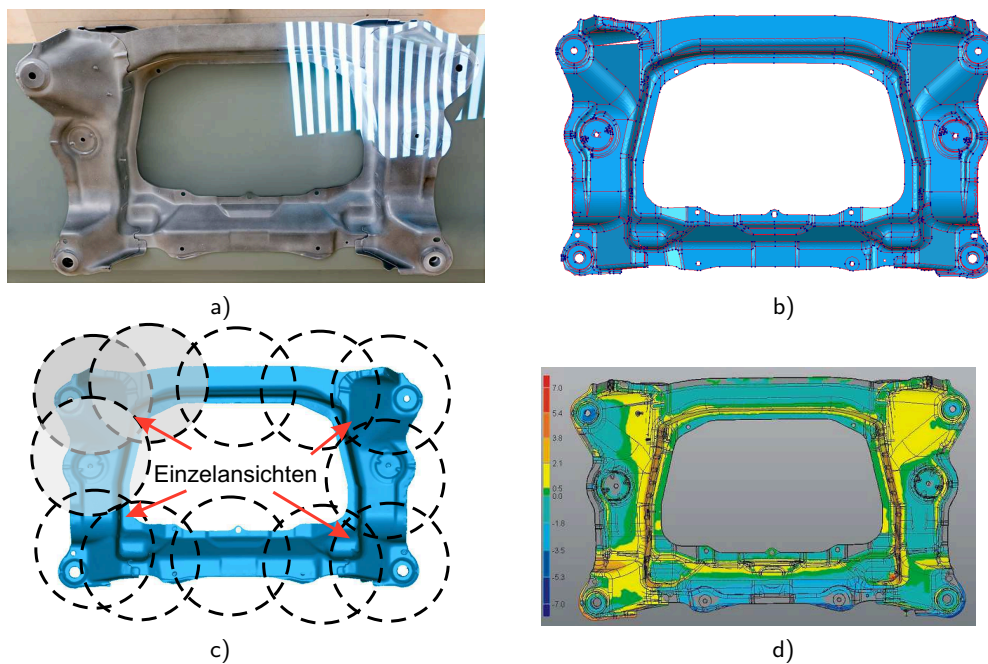


Abbildung 1.3: Flächenhafte 3-D Inspektion eines Integralträgers aus dem Automobilbau (ca.  $940 \times 560 \times 180 \text{ mm}^3$ , Foto a). Weiterhin sind abgebildet (b) das CAD-Modell, (c) eine manuell geplante Ansichtenfolge und (d) das farbkodierte Inspektionsergebnis.

Modellgetriebene Ansätze wiederum nutzen detailliertere Sensormodelle, um zusammen mit dem gegebenen Objektmodell kürzere Ansichtenpläne zu erstellen. Die Mehrzahl der Methoden versucht dabei, die erfasste Objektoberfläche zu maximieren. In der Literatur sind dabei zwei Hauptherangehensweisen vertreten: Zum einen die mengentheoretischen Ansätze, welche das Messobjekt geeignet diskretisieren und die vollständige Erfassung dieser Objektabtastung auf das Mengenüberdeckungsproblem (siehe Abschnitt 2.3.2) abbilden. Zum anderen können aus einem durch Polyeder approximierbaren Objekt direkt die Raumbereiche optimaler Messbarkeit berechnet werden. Diese aus der Inspektion bekannte, aber sehr komplexe Herangehensweise kann bisher aber nur für einfache Messobjekte bzw. für nur wenige zu inspizierende Objektmerkmale eingesetzt werden.

**Gewählter Ansatz** Im Rahmen dieser Arbeit wird der mengentheoretische Ansatz zur Lösung des Ansichtenplanungsproblems eingesetzt. Dabei werden Sensor, Messaufbau und Objekt detailliert modelliert. Um die Eignung der mengentheoretischen Herangehensweise zur maximal vollständigen Rekonstruktion komplexer Objekte in Arbeitsumgebungen mit starker Beschränkung des Sensorbewegungsraumes zu verbessern, wurde eine optimierte Abtastung des Ansichtenraumes entwickelt.

Die meisten Planungsmethoden modellieren die Messunsicherheit nicht direkt, sondern über Mindestanforderungen an die Messbedingungen, zu denen noch eine akzeptable Messunsicherheit erwartet werden kann. Deshalb wurde, um die Minimierung der Messunsicherheit direkt in die Planung integrieren zu können, die Abtastung des Ansichtenraumes um ein eigenvektor- und eigenwert-basiertes Kriterium erweitert (im Folgenden kurz als „erweitertes  $E$ -Kriterium“ bezeichnet). Weiterhin wurde, zusätzlich zur bisher erreichten Vollständigkeit, die erreichte Messunsicherheit in die Bewertung des Planungsfortschrittes einbezogen. Zur die Messunsicherheit reduzierenden Fusion der 3-D Daten und



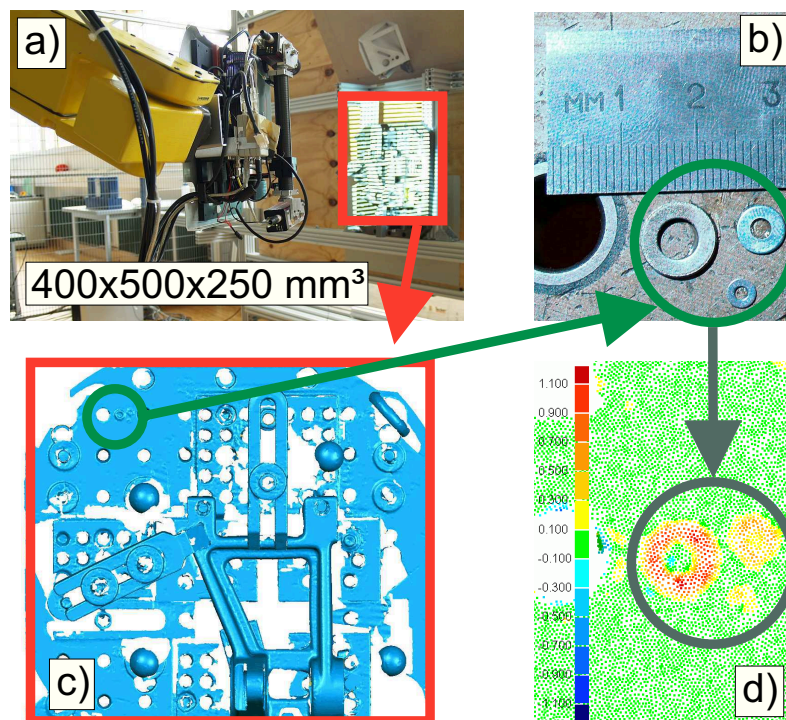


Abbildung 1.4: Aktive 3-D Rekonstruktion mittels Streifenprojektion ist eine hochauflösende Rekonstruktionsmethode: (a) Foto von 3-D Sensor, Messfeld und Messobjekt (ca.  $400 \times 500 \times 250 \text{ mm}^3$ ), (b) Foto dreier Unterlegscheiben zum Größenvergleich, (c) 3-D Rekonstruktion mehrerer Ansichten und (d) Detailausschnitt mit eingblendeten Abtastpunkten und farblicher Höhenkodierung.

der darauf basierenden Oberflächenextraktion wurde auf Standardmethoden zurückgegriffen.

Um auch datengetrieben ohne vorhandenes Objektmodell planen zu können, ohne in einem zwei-stufigen Planungsansatz zwei verschiedene Methoden kombinieren zu müssen, wurde das Verfahren weiterhin durch eine, vom verfügbaren Objektwissen abhängige, Iteration erweitert. Dabei wird, ausgehend von einer das Objekt ungefähr in Größe und Form umhüllenden geometrischen Grundform, dem sog. *Hüllkörper*, mit dem mengentheoretischen Verfahren automatisch zuerst ein Plan zur Erfassung der groben Objektgestalt erstellt.

Nach Erfassung der Objektgrundgestalt können nun datengetrieben und iterativ bestehende Defizite im bisherigen Rekonstruktionsergebnis durch Planen der nächsten besten Ansicht mit erweitertem *E*-Kriterium beseitigt werden. Dazu wird die neue Ansicht in das bisher rekonstruierte Objektmodell integriert und mit diesem aktualisierten Modell die nächste Ansicht bestimmt.

**Eigener Beitrag** Die drei Hauptbeiträge dieser Arbeit lassen sich wie folgt zusammenfassen:

**Direkte Einbeziehung der Messunsicherheit:** Die Berechnung von Ansichtskandidaten kann basierend auf der aktuellen Messunsicherheitsschätzung eines Objektflächenbereiches mit Hilfe des erweiterten *E*-Kriteriums erfolgen. Weiterhin kann der Fokus der Planungsstrategie kontinuierlich zwischen Maximierung der Vollständigkeit und Minimierung der Messunsicherheit geändert werden. Eine Verringerung der Messunsicherheit unter bestimmten Rahmenbedingungen konnte gezeigt werden.

**Kombinierter daten- und modellgetriebener Ansichtenplanungsansatz:** Die modellgetriebene mengentheoretische Planungsmethode wurde so erweitert, dass bei fehlendem Objektmodell iterativ und datengetrieben geplant werden kann. Dazu wird, unter Nutzung eines das Objekt näherungsweise beschreibenden Hüllkörpers, ein Grobmodell rekonstruiert. Mittels wiederholter Scan- / Fusions- /  $E$ -kriteriumsbasierter Planungszyklen werden bestehende Defekte geschlossen. Damit steht eine kombinierte Planungsmethode sowohl zur daten- als auch zur modellgetriebenen Ansichtenplanung zur Verfügung.

**Quantitative Bewertungsmethodik:** Um Planungsergebnisse hinsichtlich Vollständigkeit und Messunsicherheit quantitativ vergleichen zu können, wurde eine allgemein anwendbare Bewertungsmethodik, zusammen mit einem geeigneten komplexen Prüfkörper, definiert. Zahlreiche Experimente demonstrieren die Aussagekraft der Methode für die Bewertung von Planungsergebnissen streifenprojektionsbasierter 3-D Sensoren.

### 1.3 Gliederung der Arbeit

Im Folgenden soll die Gliederung der Arbeit kurz vorgestellt werden. In Kapitel 2 wird in die mathematischen Grundlagen zur Lösung des Ansichtenplanungsproblems eingeführt. Dazu gehören geometrische Grundlagen zur 3-D Rekonstruktion, Kamerakalibrierung und Ansichtenregistrierung sowie einige Grundbegriffe aus der Planungstheorie, der numerischen Optimierung und der Schätzung der Messunsicherheit im Kontext der Photogrammetrie.

Anschließend wird in Kapitel 3 ein Überblick über den aktuellen Stand der Technik gegeben. Die Ansätze zur Lösung des Ansichtenplanungsproblems lassen sich dabei grob in daten- und modellgetriebene Verfahren unterteilen, welche in den jeweiligen Abschnitten des Kapitels getrennt vorgestellt und bewertet werden. Abschließend wird der aktuelle Forschungsstand im Ganzen diskutiert und bestehende Defizite identifiziert.

Die spezifischen Grundlagen für die Ansichtenplanung und die Bewertung von Rekonstruktionsergebnissen im Kontext der optischen 3-D Vermessung mittels Streifenprojektion werden in Kapitel 4 vorgestellt. Dabei werden die Einflüsse auf die Messunsicherheit identifiziert sowie Zielkriterien und Planungsstrategien für die Formulierung als Optimierungsproblem vorgestellt. Weiterhin werden Anforderungen an die Bewertung von Rekonstruktionsergebnissen definiert und Herausforderungen für Ansichtenplanungsalgorithmen vorgestellt. Darauf aufbauend wird eine quantitative Bewertungsmethodik formuliert und ein geeigneter Testkörper vorgeschlagen.

Kapitel 5 schließlich stellt den Hauptbeitrag dieser Arbeit vor: Die Einbeziehung der Messunsicherheit in die mengentheoretische Ansichtenplanung mittels des erweiterten  $E$ -Kriteriums. Außerdem wird eine Erweiterung zur Verbesserung der Planungsleistung für das in der industriellen Messpraxis typische Szenario der Rekonstruktion komplexer Messobjekte bei beschränktem Sensorbewegungsraum vorgestellt. Umfangreiche experimentelle Ergebnisse an mehreren Messobjekten, welche den Vergleich zu einem der leistungsfähigsten modellgetriebenen Planungsansätze beinhalten, belegen die Effektivität des entwickelten erweiterten Planungsansatzes.

Eine Möglichkeit der Integration datengetriebener Planung in die in Kapitel 5 vorgestellte Ansichtenplanungsmethode wird in Kapitel 6 präsentiert. Dabei werden zuerst verschiedene Verfahren zur Erstellung eines Grobmodells erläutert und anschließend das Vorgehen zur iterativen, datenge-

triebenen Ansichtenplanung mittels des erweiterten  $E$ -Kriteriums diskutiert. Auch dieses Kapitel wird durch umfangreiche Experimente abgeschlossen, welche die erzielbaren Rekonstruktionsergebnisse ohne vorhandene Modellinformationen bewerten.

Eine Zusammenfassung dieser Arbeit wird in Kapitel 7 gegeben. Darin werden Stärken und Schwächen der präsentierten Methoden diskutiert und ein Ausblick auf mögliche Weiterentwicklungen und Anwendungen im breiteren Kontext gegeben.



# Kapitel 2

## Mathematische Grundlagen

In diesem Kapitel werden die mathematischen Grundlagen zur Lösung des Ansichtenplanungsproblems vorgestellt. Die spezifischen Bedingungen, welche sich aus dem Kontext der optischen 3-D Vermessung ableiten, werden in Kapitel 4 erläutert.

### 2.1 Geometrische Grundlagen

Um eine kompakte Matrixdarstellung von Koordinatentransformationen zu erlauben, werden in der projektiven Geometrie *homogene Koordinaten* eingesetzt. Diese sind invariant gegenüber Skalierungen (weitere Details siehe [27, S. 26 ff.]). Dabei werden Punkte in projektiven Räumen  $\mathbb{P}^n$  durch  $(n + 1)$ -dimensionale Vektoren beschrieben. So kann z. B. jeder Punkt  $\tilde{u} \in \mathbb{R}^2$  in homogene Koordinaten  $u \in \mathbb{P}^2$  durch Ergänzung einer 1 in der dritten Vektorkomponente überführt werden:

$$\tilde{u} = (x, y)^T \rightarrow u = (x, y, 1)^T. \quad (2.1)$$

Im Rahmen dieser Arbeit wird auf die Kennzeichnung von Koordinaten aus euklidischen Räumen durch eine Tilde verzichtet, wenn die Herkunft aus dem jeweiligen Kontext klar hervorgeht.

Verschiedene lineare Transformationen nehmen eine zentrale Rolle in der Computergrafik ein. Besondere Bedeutung kommen den *euklidischen Transformationen* und der *Ähnlichkeitsabbildung* zu. Die komplette Hierarchie linearer Transformationen ist z. B. in [27, S. 37 ff.] zu finden.

Euklidische Transformationen im  $n$ -dimensionalen Raum bestehen aus einer Rotation  $\mathbf{R}$  und einer Translation  $\mathbf{t}$ . Diese Transformationen erhalten Winkel und Entfernungen. Unter Nutzung der Matrixschreibweise der linearen Algebra können euklidische Transformationen  $\mathbf{T}$  in der folgenden Form geschrieben werden:

$$\mathbf{T} = \begin{pmatrix} \mathbf{R} & \mathbf{t} \\ \mathbf{0}^T & 1 \end{pmatrix}. \quad (2.2)$$

Dabei ist  $\mathbf{R}$  eine  $n \times n$  Rotationsmatrix (eine orthogonale Matrix mit  $\mathbf{R}^T \mathbf{R} = \mathbf{R} \mathbf{R}^T = \mathbf{I}$  und Determinante +1),  $\mathbf{t}$  ein  $n$ -dimensionaler Translationsvektor und  $\mathbf{0}$  ein  $n$ -dimensionaler Nullvektor. Eine Rotation des  $n$ -dimensionalen projektiven Raumes hat  $\frac{n(n-1)}{2}$  Freiheitsgrade (engl. „degrees of freedom“, DOF), während eine Translation  $n$  DOF besitzt.

Eine Ähnlichkeitsabbildung besteht aus einer euklidischen Transformation und einer isotropen

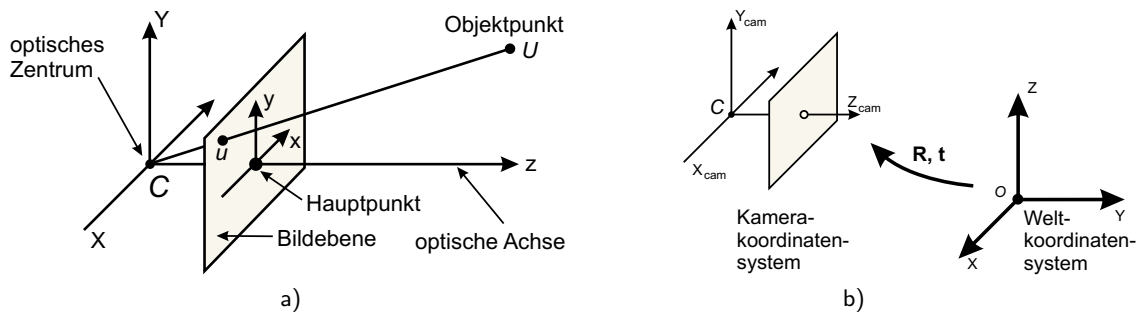


Abbildung 2.1: a) Geometrie der Lochkamera. b) Euklidische Transformation zwischen Welt- und Kamerakoordinatensystem (Abbildungen nach [27]).

Skalierung  $s$ , welche den Raum in jeder Dimension gleich skaliert. Ähnlichkeitsabbildungen erhalten die „Form“, da sich zwar Längen ändern, Winkel und Längenverhältnisse aber erhalten bleiben. Sie können in Matrixschreibweise wie folgt geschrieben werden:

$$\mathbf{T} = \begin{pmatrix} s\mathbf{R} & \mathbf{t} \\ \mathbf{0}^T & 1 \end{pmatrix}. \quad (2.3)$$

Eine Ähnlichkeitsabbildung fügt der zugrundeliegenden euklidischen Transformation einen weiteren Freiheitsgrad hinzu.

In den kommenden zwei Unterabschnitten werden hierauf aufbauend Grundlagen zum eingesetzten Kameramodell und dem verwendeten Kalibrieransatz erläutert.

### 2.1.1 Kameramodelle

Transformationen zur Abbildung von 3-D Objektpunkten auf 2-D Bildkoordinaten werden *Kameramodelle* genannt [27]. An dieser Stelle wird nur auf das im Rahmen dieser Arbeit eingesetzte Modell der Lochkamera und seiner Verallgemeinerung zum zentralperspektivischen Kameramodell eingegangen.

Im Lochkameramodell wird ein 3-D Punkt  $U = (X, Y, Z, 1)^T$  dergestalt auf einen Punkt  $u = (x, y, 1)^T$  der Bildebene abgebildet, dass  $U$ , das optische Zentrum<sup>1</sup>  $C = (X_0, Y_0, Z_0)^T$  und  $u$  kollinear sind (siehe Abb. 2.1 a). Alle Strahlen verlaufen durch das optische Zentrum. Der Strahl vom optischen Zentrum im rechten Winkel zur Bildebene wird *optische Achse* und der Durchstoßungspunkt der optischen Achse mit der Bildebene wird *Hauptpunkt H* genannt. Der Abstand von der optischen Achse zur Bildebene wird als *Brennweite*<sup>2</sup>  $f$  bezeichnet. Damit kann in Matrixschreibweise die Projektion wie folgt geschrieben werden:

$$u = \mathbf{P}U = \begin{pmatrix} f & 0 \\ & f & 0 \\ & & 1 & 0 \end{pmatrix} U. \quad (2.4)$$

Dabei wird  $\mathbf{P}$  als homogene Kamera-Projektionsmatrix oder *Kameramatrix* bezeichnet.

Das Lochkameramodell ist ein idealisiertes Kameramodell. Es kann aber zum zentralperspektivischen Kameramodell verallgemeinert werden. So wird im Allgemeinen der Ursprung des Kamerakoordina-

<sup>1</sup>Das optische Zentrum wird auch Kamerazentrum oder Projektionszentrum genannt.

<sup>2</sup>Die Brennweite wird auch als Kammerkonstante bezeichnet, bestehende Abweichungen werden im Rahmen dieser Arbeit aufgrund der Verwendung von Objektiven mit fester Entfernungseinstellung vernachlässigt.

tensystems nicht mit dem Hauptpunkt zusammenfallen, welches durch einen entsprechenden Offset  $H = (h_x, h_y)^T$  wie folgt mittels homogener Koordinaten ausgedrückt werden kann:

$$u = \mathbf{K} [\mathbf{I} | \mathbf{0}] U = \begin{pmatrix} f & h_x & 0 \\ & f & h_y & 0 \\ & & & 1 & 0 \end{pmatrix} U, \quad (2.5)$$

mit  $\mathbf{K}$  der sog. *Kalibriermatrix*,  $\mathbf{I}$  der  $3 \times 3$  Einheitsmatrix und  $\mathbf{0}$  dem Nullvektor. Dieser soll explizit die Position des optischen Zentrums im Ursprung des Kamerakoordinatensystems verdeutlichen.

Im vollständig verallgemeinerten Fall [27] wird die Kalibriermatrix aus Gl. (2.5) so erweitert, dass nicht-quadratische Kamerapixel durch entsprechend skalierte Brennweiten  $f_x, f_y$  und ein nicht orthogonales Bildkoordinatensystem über einen Parameter  $s$  (Versatz, engl. „skew factor“) zugelassen werden können<sup>3</sup>. Damit ergibt sich die allgemeine Kalibriermatrix wie folgt:

$$\mathbf{K} = \begin{pmatrix} f_x & s & h_x \\ & f_y & h_y \\ & & & 1 \end{pmatrix}. \quad (2.6)$$

Die Parameter dieser Matrix werden als *intrinsische Parameter* der Kamera bezeichnet.

Da die Kamera jedoch typischerweise in ein Weltkoordinatensystem eingebettet werden soll, wird Gl. (2.5) ergänzt um die entsprechende euklidische Transformation ( $\mathbf{R} | \mathbf{t}$ ) zur Abbildung des Welt- in das Kamerakoordinatensystem (siehe Abb. 2.1 b) :

$$u = \mathbf{K} (\mathbf{R} | \mathbf{t}) U. \quad (2.7)$$

Die zur Beschreibung der euklidischen Transformation ( $\mathbf{R} | \mathbf{t}$ ) benötigten Parameter, welche Position und Orientierung der Kamera beschreiben, werden *extrinsische Parameter* genannt.

Im allgemeinen Fall hat die Kameramatrix  $\mathbf{P}$ , in Zusammenfassung der Gleichungen (2.5), (2.6) und (2.7) somit die folgende Gestalt:

$$\mathbf{P} = \mathbf{K} (\mathbf{R} | \mathbf{t}) = \begin{pmatrix} f_x & s & h_x \\ & f_y & h_y \\ & & & 1 \end{pmatrix} \begin{pmatrix} \mathbf{R} & t_x \\ & t_y \\ & & t_z \end{pmatrix}. \quad (2.8)$$

Die allgemeine Kameramatrix  $\mathbf{P}$  ist eine  $3 \times 4$  Matrix und besitzt 11 Freiheitsgrade: Sechs für die extrinsischen und fünf für die intrinsischen Parameter. Die Skalierung ist unbestimmt.

In der Photogrammetrie wird der gleiche Sachverhalt durch den *allgemeinen räumlichen Vorwärtsschnitt* [44, S. 283 ff.] beschrieben. Dabei wird die Abbildung eines Bildpunktes in den Objektraum (ohne die Verwendung homogener Koordinaten) beschrieben durch:

$$U = C + m\mathbf{R}u, \quad (2.9)$$

mit dem Skalier- oder Maßstabsfaktor  $m$ . Durch Invertierung von Gl. (2.9), Erweiterung um den Bildhauptpunkt  $H$  und Einführung von Verzeichnungskorrekturtermen  $\Delta u = (\Delta x, \Delta y)^T$  für die

<sup>3</sup>Im Allgemeinen werden jedoch quadratische Pixel und ein orthogonales Bildkoordinatensystem angenommen.

Bildkoordinaten folgt [44, S. 204 ff.]:

$$u - H - \Delta u = \frac{1}{m} \mathbf{R}^{-1} (U - C) \quad (2.10)$$

oder auch:

$$\begin{pmatrix} x - h_x - \Delta x \\ y - h_y - \Delta y \\ z \end{pmatrix} = \frac{1}{m} \begin{pmatrix} r_{11} & r_{21} & r_{31} \\ r_{12} & r_{22} & r_{32} \\ r_{13} & r_{23} & r_{33} \end{pmatrix} \begin{pmatrix} X - X_0 \\ Y - Y_0 \\ Z - Z_0 \end{pmatrix}. \quad (2.11)$$

Der unbekannte Skalierfaktor  $m$  wird durch Division der ersten und der zweiten Gleichung durch die jeweils dritte eliminiert und es folgen die sog. *Kollinearitätsgleichungen*, welche auch als Grundgleichungen der Photogrammetrie bezeichnet werden [44, S. 204 ff.]:

$$\begin{aligned} x &= h_x + z \frac{r_{11}(X - X_0) + r_{21}(Y - Y_0) + r_{31}(Z - Z_0)}{r_{13}(X - X_0) + r_{23}(Y - Y_0) + r_{33}(Z - Z_0)} + \Delta x \\ y &= h_y + z \frac{r_{12}(X - X_0) + r_{22}(Y - Y_0) + r_{32}(Z - Z_0)}{r_{13}(X - X_0) + r_{23}(Y - Y_0) + r_{33}(Z - Z_0)} + \Delta y. \end{aligned} \quad (2.12)$$

Pro Beobachtung eines Objektpunktes erhält man somit zwei Gleichungen. Zur Berechnung seiner 3-D Koordinaten sind also mindestens zwei Beobachtungen notwendig. Die Kollinearitätsgleichungen spielen eine entscheidende Rolle sowohl bei der Bündelblockausgleichung (s.u.) als auch für die überbestimmte Ausgleichung nach vermittelnden Beobachtungen.

### 2.1.2 Kalibrierung der Kameraparameter

Zur Berechnung der 3-D Koordinaten mittels der Kollinearitätsgleichungen müssen die intrinsischen und extrinsischen Kameraparameter bekannt sein. Während die intrinsischen Parameter vorab kalibriert werden können, müssen die extrinsischen Parameter während der Messung bestimmt werden, da im Allgemeinen kein hochgenaues Sensorpositioniersystem verwendet wird. Eine Möglichkeit zur Kalibrierung ist die Verwendung eines bekannten Kalibrierobjektes. Soll jedoch neben dem Messobjekt kein weiteres Objekt im Messvolumen platziert und vermessen werden, bietet sich die sog. *Selbstkalibrierung* an.

Unter Selbstkalibrierung versteht man die Bestimmung der intrinsischen und extrinsischen Kameraparameter ohne bekannte Referenzobjekte. Voraussetzung dafür ist im Allgemeinen, dass die Objektszene starr<sup>4</sup> ist und mehrere Aufnahmen der Szene mit verschiedenen Kameraposen mit teilweiser Überlappung existieren. Dadurch ist die Bestimmung korrespondierender Punkte in mehreren Ansichten möglich. Weiterhin kann die Selbstkalibrierung auch direkt im Messprozess geschehen, so dass Kalibrierprozeduren vor der Messung entfallen können.

Im Rahmen dieser Arbeit kommt dazu die Technik der sog. „virtuellen Passmarken“ zum Einsatz [67, 33]. Dabei werden eine oder mehrere – in Bezug auf das Messobjekt statische – Kamera(s), sog. „Verknüpfungskamera(s)“, verwendet (siehe Abb. 2.2 a). Eine solche Kamera ist so konfiguriert, dass sie einen Überblick über das Messobjekt aufnehmen kann. In jeder neuen Ansicht können so für alle Objektpunkte im Bild der Verknüpfungskamera, welche auch vom Sensorkopf vermessen wurden, eindeutig korrespondierende Punkte (sog. *Passmarken*) im Bild der Kamera(s) des Sensorkopfes bestimmt werden (Lösung des Korrespondenzproblems). Überlappen sich die Aufnahmen von verschiedenen Positionen

<sup>4</sup>Die beobachteten Objekte verändern nicht ihre Form.



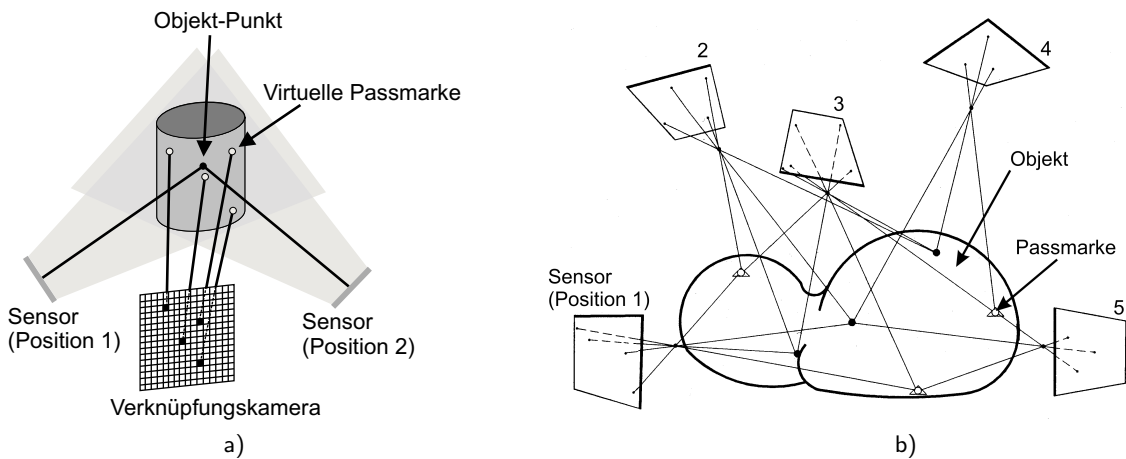


Abbildung 2.2: a) Mehrbildmessung mit der Methode der virtuellen Passmarken [35]. b) Bündelblockausgleichung im Nahbereich (Netzwerk der Strahlenbündel von fünf verschiedenen Sensorpositionen, Abb. aus [37, S. 281]).

des Sensorkopfes teilweise<sup>5</sup>, so liegen für die entsprechenden Passmarken mehrere Beobachtungen vor und es kann ein sog. Bildverband erstellt werden. Dieser erlaubt die Selbstkalibrierung und damit Transformation aller Ansichten in ein gemeinsames Weltkoordinatensystem.

Zur Selbstkalibrierung kann die Technik der *Bündelblockausgleichung* (engl. „bundle adjustment“) genutzt werden [37, 84, 44]. Dabei werden gleichzeitig 3-D Koordinaten und Kamera-Parameter bestimmt. Die Grundlage dafür bilden die sog. Kollinearitätsgleichungen (siehe Gl. (2.12)), welche beschreiben, dass ein beobachteter 3-D-Objektpunkt  $P_j$ , das optische Zentrum der Kamera  $i$  (gegeben durch die zugehörige Projektionsmatrix  $\mathbf{P}^i$ ) und der zugehörige Bildpunkt  $x_j^i$  auf einer gemeinsamen Gerade liegen müssen (siehe Abb. 2.2 b). Sind mehrere Beobachtungen eines Punktes vorhanden und diese mit Rauschen behaftet, so wird die Abbildungsgleichung  $\mathbf{P}^i P_j = x_j^i$  nicht exakt erfüllt werden. Unter der Annahme gaussverteilter Rauschens kann eine maximal wahrscheinliche Näherungslösung  $\bar{x}_j^i = \bar{\mathbf{P}}^i \bar{P}_j$  bestimmt werden. Gesucht sind somit „ausgeglichene“ Kamerakonfigurationen  $\bar{\mathbf{P}}^i$  und 3-D-Punkte  $\bar{P}_j$ , so dass der Rückprojektionsfehler  $d_r$  (in der Bildebene) minimal wird [27]:

$$\min_{\bar{\mathbf{P}}^i, \bar{P}_j} \sum_{i,j} d_r (\bar{\mathbf{P}}^i \bar{P}_j, x_j^i)^2. \quad (2.13)$$

Durch die aus der Verwendung hunderter virtueller Passmarken resultierende hohe Überbestimmtheit des zugrunde liegenden Gleichungssystems kann die Kalibrierung mit hoher Genauigkeit durchgeführt werden [84].

Entscheidend für eine erfolgreiche Bündelblockausgleichung ist eine gute Startlösung. In dieser Arbeit kann diese jedoch als vorhanden angenommen werden, da sowohl die intrinsischen Parameter des Sensors vorab kalibriert wurden und somit als bekannt gelten als auch die extrinsischen Parameter durch die Ansichtenplanung vorgegeben werden. Die Vorabkalibrierung inklusive Verzeichnungskorrektur sowie die eigentliche Bündelblockausgleichung erfolgt durch das kommerzielle Programm „Bingo“ [22].

Durch die Bündelblockausgleichung mehrerer Ansichten eines geeigneten Bildverbandes erhält man

<sup>5</sup>In der Nahbereichsphotogrammetrie werden typischerweise zwischen 20% und 30% Ansichtenüberlappung pro Bildpaar gefordert.

Kamerakalibrierung und 3-D Koordinaten *bis auf die Skalierung*. Diese kann jedoch sehr präzise über die sog. Stereobedingung, also die vorab bestimmte Basislänge eines aus zwei Kameras bestehenden Sensors, festgelegt werden. Unter Vorgabe einer guten Startlösung sowohl der intrinsischen als auch der extrinsischen Parameter im Weltkoordinatensystem erhält man metrisch skalierte 3-D Rekonstruktionen bekannter Orientierung.

## 2.2 Grundbegriffe der Planungstheorie

Die Planung von Ansichten zur 3-D Rekonstruktion ist ein abstraktes Planungsproblem, welches Elemente der Bewegungsplanung und der künstlichen Intelligenz beinhaltet. Deshalb sollen einige relevante Grundbegriffe aus der Planungstheorie hier kurz vorgestellt werden. Detaillierte Ausführungen sind z. B. bei S. M. LaValle [38] zu finden. Er definiert einen Plan wie folgt [38, S. 19]:

**Plan** Die konkrete Strategie und das Verhalten eines Entscheiders wird durch einen *Plan* bestimmt. Im einfachsten Fall gibt dieser eine Reihenfolge von Aktionen an, welche bewirken, dass ein Zielzustand unter Berücksichtigung des Zielkriteriums erreicht wird. Wenn zukünftige Zustände nicht vorhersagbar sind, können Aktionen als Funktion bestimmter Zustände formuliert werden (sog. Feedback-Pläne). Wenn der Zustand nicht messbar ist, müssen Aktionen aus dem bisher verfügbaren Wissen (engl. „information state“) abgeleitet werden.

Jedes Planungsproblem ist aus den folgenden Grundbestandteilen aufgebaut [38, S. 17 ff.]:

**Zustand** Der *Zustandsraum* beschreibt alle möglichen Konstellationen, welche eintreten könnten. Ein *Zustand* könnte z. B. Lage und Orientierung eines Sensors und das bisherige Wissen über das Messobjekt umfassen. Sowohl diskrete als auch kontinuierliche Zustandsräume sind möglich. In den meisten Fällen ist die Größe des Zustandsraumes viel zu groß, um diesen explizit darstellen zu können.

**Zeit** Alle Planungsprobleme beinhalten eine Abfolge von Entscheidungen, welche in einem bestimmten Zeitablauf angewendet werden müssen. Die Zeit kann dabei explizit (z. B. Automobilnavigation) oder implizit modelliert werden. In letzterem Fall spielt die konkrete Zeit keine Rolle, lediglich die korrekte Reihenfolge ist wichtig. Die Zeit selbst wiederum kann als kontinuierlich oder diskret angenommen werden.

**Aktionen** Ein Plan beschreibt *Aktionen*, welche den Zustand ändern. Dabei muss durch die Problembeschreibung festgelegt sein, wie sich ein Zustand ändert, wenn eine Aktion ausgeführt wird. Dies kann im Fall diskreter Zeit durch eine Zustandsübergangsfunktion oder, im Fall kontinuierlicher Zeit, als Differentialgleichung ausgedrückt werden. Für viele Probleme der Bewegungsplanung kann ein expliziter Bezug auf die Zeit durch direkte Angabe eines Pfades vermieden werden.

**Start- und Zielzustände** Ein Planungsproblem beinhaltet typischerweise einen Startzustand. Ausgehend von diesem soll eine Reihe von Aktionen gefunden werden, sodass ein spezifizierter Zielzustand erreicht wird.

**Zielkriterium** Dieses drückt das Ergebnis eines Planes hinsichtlich des Zielzustandes und der ausgeführten Aktionen aus. Zwei verschiedene Anliegen können dabei bei der Planung im Vordergrund stehen:

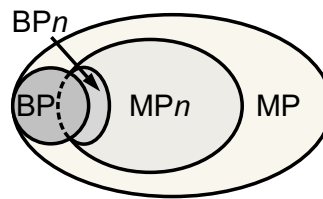


Abbildung 2.3: Beziehungen der verschiedenen Klassen machbarer Pläne (mit und ohne fester Länge) zueinander.

**Machbarkeit** Finde einen Plan, welcher den Zielzustand erreicht, unabhängig von seiner Effizienz.

**Optimalität** Finde einen machbaren Plan, welche den Zielzustand erreicht und die Leistung bezüglich einer Zielfunktion optimiert.

Während der Fokus der Mehrheit der Literatur über Robotik und Regelungstechnik auf der Optimalität liegt, ist es in vielen Anwendungsgebieten bereits schwierig, die richtige Zielfunktion zu formulieren [38, S. 18]. Wenn trotz passender Zielfunktion kein praktisch realisierbarer Algorithmus zur Berechnung optimaler Pläne zur Verfügung steht, sind für viele Probleme hinreichend gute Näherungslösungen bekannt.

Ein Plan kann auf verschiedene Art genutzt werden [38, S. 21 ff.]: Er kann *ausgeführt* werden. Dabei kann der Plan entweder von der dafür vorgesehenen Maschine ausgeführt werden, ohne angepasst werden zu können. Alternativ kann der Planer Teil der programmierbaren Maschine sein und so den Plan basierend auf dem aktuellen Wissen erzeugen und fortlaufend aktualisieren.

Ein Plan kann jedoch auch *verfeinert* werden. Dabei akzeptiert ein Planer einen Plan als Eingabe und erzeugt einen modifizierten (und verbesserten) Plan als Ausgabe. Die Verfeinerung kann iterativ erfolgen und z. B. für allgemeinere Problemfälle gelten oder effizienter auszuführen sein.

Alternativ kann ein Plan auch Teil einer *Hierarchie von Plänen* sein. Dabei werden Teilziele durch eigene Pläne erreicht, so dass der übergeordnete Plan aus einer Hierarchie von Plänen und Strategien zur Verwirklichung eines umfassenderen Ziels besteht.

**Planungsklassen** Ein „machbarer Plan“ (**MP**) stellt die allgemeinste Planungsklasse dar. Sowohl die Anzahl der Aktionen als auch der Wert der Zielfunktion sind unspezifiziert. Lediglich die Termination im Zielzustand ist gefordert. Die nächste Klasse umfasst alle „machbaren Pläne der Länge  $n$ “ (**MP $n$** ). Hierbei ist die Zahl der erlaubten Aktionen auf den geforderten Wert zu beschränken. „Der beste Plan der Länge  $n$ “ (**BP $n$** ) wiederum fragt nach dem Plan, welcher gleichzeitig den optimalen Wert der Zielfunktion erreicht. Der „beste Plan“ (engl. „optimal plan of unspecified length“, **BP**) ist eine Verallgemeinerung des **BP $n$** . Zusätzlich kann dieser zur Realisierung des optimalen Wertes der Zielfunktion auch beliebig lange Aktionsfolgen beinhalten. Damit muss er für ein beliebiges, aber festes  $n$  nicht zur Klasse **BP $n$**  gehören (siehe Abb. 2.3). Formell kann dies wie folgt ausgedrückt werden:

$$\begin{aligned} \mathbf{BP}n &\subseteq \mathbf{MP}n \subseteq \mathbf{MP} \\ \mathbf{BP} &\subseteq (\mathbf{MP} \setminus \mathbf{MP}n) \cup \mathbf{BP}n. \end{aligned} \tag{2.14}$$

Allen Planklassen gemein ist, dass zusätzlich zur Zielfunktion weitere sog. Nebenbedingungen gelten können.

### 2.2.1 Planung als Suchproblem

Wenn der Zustandsraum eines Planungsproblems endlich (bzw. abzählbar unendlich) ist, so spricht man von *diskreter Planung*. Viele kontinuierliche Planungsprobleme lassen sich zudem durch eine geeignete Abtastung auf diskrete Planungsprobleme abbilden (siehe Abschnitt 2.2.2). Um das entsprechende Planungsproblem mit Suchmethoden lösen zu können, muss es in der folgenden Form formuliert werden können [38, S. 27 ff.]: Der (nichtleere) Zustandsraum ist endlich (bzw. abzählbar unendlich), für jeden Zustand daraus existiert ein endlicher Handlungsraum möglicher Aktionen, eine Zustandsübergangsfunktion, welche jeden Zustand – basierend auf der gewählten Aktion – in einen Folgezustand überführt, einen ausgezeichneten Start-, und eine Menge von Zielzuständen. Dann kann ein korrespondierender Zustandsübergangsgraph konstruiert werden.

Die grundlegende Frage ist, ob überhaupt eine Lösung für das Planungsproblem  $PP$  existiert:  $PP \in \mathbf{MP}$ ? Damit in endlicher Zeit festgestellt werden kann, ob eine Lösung existiert, muss der zur Anwendung kommende Suchalgorithmus *systematisch* sein: Wenn der Suchgraph endlich ist, muss ein entsprechender Algorithmus im ungünstigsten Fall alle Knoten besuchen und weiterhin vermerken, welche Knoten schon besucht worden sind, um Kreise im Graphen vermeiden zu können. Eine Reihe von Suchalgorithmen kann problemspezifisch zur Anwendung kommen: Breitensuche, Tiefensuche, Dijkstra-Algorithmus, Rückwärtssuche, Bidirektionale Suche und andere [38, S. 35 ff.].

Bei der Suche nach besten Plänen können Methoden aus der dynamischen Programmierung zum Einsatz kommen. Dabei wird die Beobachtung genutzt, dass optimale Pläne aus optimalen Teilplänen aufgebaut sind. Somit können iterativ die Kosten bzw. der Wert der Zielfunktion für machbare Teilpläne (vor-) berechnet werden, welche zum Zielzustand führen. Das entsprechende Verfahren wird „value iteration“ genannt [38, S. 45 ff.].

Tarbox und Gottschlich [82] verweisen jedoch darauf, dass das Ansichtenplanungsproblem auf das NP-vollständige Mengenüberdeckungsproblem (siehe Abschnitt 2.3.2) zurückgeführt werden kann. Damit gilt, dass die exakte Berechnung eines Planes aus der Klasse der  $\mathbf{BP}$  schon für kleine Problemgrößen zu praktisch nicht vertretbarer Laufzeit führt. Als Kompromiss bleiben Näherungslösungen, welche verwertbare Lösungen in polynomieller Laufzeit berechnen können (siehe Abschnitt 2.3.1).

### 2.2.2 Abtastung im Kontext der Planung

Eine Herangehensweise, um ein Planungsproblem über einem *kontinuierlichen Zustandsraum* mit vielen Freiheitsgraden praktisch lösen zu können, ist die geeignete Abtastung des Zustandsraumes. Dabei muss, in Erweiterung der Anforderung der *systematischen* Suche bei einem diskreten Planungsproblem, der eingesetzte Algorithmus *vollständig* sein, um in endlicher Zeit eine Aussage darüber treffen zu können, ob eine Lösung existiert [38, S. 185 ff.].

Abtastungsbasierte Planungsverfahren können nur der schwächeren Forderung nach *Auflösungsvollständigkeit* (engl. „resolution complete“: bei deterministischen Ansätzen, die mit zunehmender Iterationstiefe beliebig nahe an jede Konfiguration des Zustandsraumes kommen) oder *probabilistischer Vollständigkeit* (engl. „probabilistically complete“: bei zufälliger Abtastung, bei der mit zunehmender Stichprobenanzahl die Wahrscheinlichkeit eine existierende Lösung zu finden gegen eins konvergiert) genügen. Ein solcher vollständiger Planungsalgorithmus produziert eine *dichte* Folge von Abtastpunkten.

Ein effizienter, vollständiger und auf regelmäßiger Abtastung basierender Planungsalgorithmus sollte folgende zwei Eigenschaften besitzen: Eine kleine *Dispersion* und eine niedrige *Diskrepanz*. Beide können

im Rahmen dieser Arbeit nur kurz vorgestellt werden, ihre genaue Definition ist z. B. nachzulesen in [38, S. 201 ff.]. Weist die einem Planungsalgorithmus zugrundeliegende Abtastsequenz eine kleine *Dispersion* auf, so ist der größte kürzeste Abstand einer beliebigen Konfiguration aus dem kontinuierlichem Zustandsraum zu einem Abtastpunkt möglichst klein. Dies bedeutet, dass es keine größeren Lücken in der Abtastung geben darf.

Eine zweite wichtige Eigenschaft ist eine niedrige *Diskrepanz*. Diese lässt auf eine hohe Gleichverteilung der Abtastpunkte schließen. Gute Abtastsequenzen im obigen Sinn haben mit hoher Wahrscheinlichkeit eine niedrigere Dispersion und Diskrepanz als eine Zufallsfolge.

## 2.3 Numerische Optimierung

Zur Lösung einiger Teilprobleme in der Ansichtenplanung werden numerische Optimierungsverfahren eingesetzt. Für die konkreten Probleme der maximalen Vollständigkeit bei minimaler Ansichtenanzahl (siehe Abschnitt 2.3.2) und der Minimierung der Sensorpositionierkosten (siehe Abschnitt 2.3.3) dürfen einige Variablen nur ganzzahlige Werte annehmen. Die zur Lösung dieser Art Probleme geeignete Methodik ist die der ganzzahligen linearen Optimierung, welche im Folgenden vorgestellt wird.

### 2.3.1 Ganzzahlige lineare Optimierung

Die lineare Optimierung, oft auch als (engl.) „Linear Programming“ (LP) bezeichnet, befasst sich mit der Optimierung linearer Zielfunktionen. Die zugrundeliegende Menge ist durch lineare (Un-) Gleichungen eingeschränkt. Bei der ganzzahligen Optimierung, oft auch als (engl.) „Integer Linear Programming“ (ILP) bezeichnet, sind zumindest einige Variablen auf ganzzahlige Werte beschränkt. Die Menge der zulässigen Lösungen ist somit diskret. Die Ganzzahligkeitsanforderung bei ILP führt zur Zugehörigkeit zur Komplexitätsklasse der NP-schweren Probleme.

Eine bedeutende Unterklasse der ILP ist jene, bei der die ganzzahligen Variablen Binärvariablen sein müssen (engl. „Binary Integer Programming“, BIP). Durch diese Einschränkung lassen sich Entscheidungsprobleme modellieren. Die Entscheidungsversion von BIP gehört der Klasse der NP-vollständigen Probleme an [31].

Da die zugrunde liegende Komplexität die exakte Lösung solcher Probleme schon für moderate Problemgrößen unmöglich machen kann, sind für viele spezielle Optimierungsprobleme Näherungsmethoden entwickelt worden. Diese finden zulässige Lösungen typischerweise in relativ kurzer Zeit. Oft kann ein Approximationsfaktor  $\rho$  angegeben werden. Dieser besagt, dass die Güte einer gefundenen Näherungslösung nicht schlechter sein kann als  $\rho$  mal die Güte der optimalen Lösung.

### 2.3.2 Mengenüberdeckungsproblem

Auf das Mengenüberdeckungsproblem (engl. „Set Cover Problem“, SCP) können viele Probleme der Ressourcenallokation abgebildet werden. Das zugehörige Entscheidungsproblem verallgemeinert das NP-vollständige Knotenüberdeckungsproblem (engl. „Vertex Cover Problem“) und ist deshalb wie dieses ebenfalls NP-schwer (Cormen et al. [18, S. 1033 ff.]). Anwendung findet die Formulierung als Optimierungsproblem bei der Planung einer minimalen Anzahl von Ansichten, welche ein zu vermessendes Objekt vollständig rekonstruieren können (siehe Abschnitt 5.1).

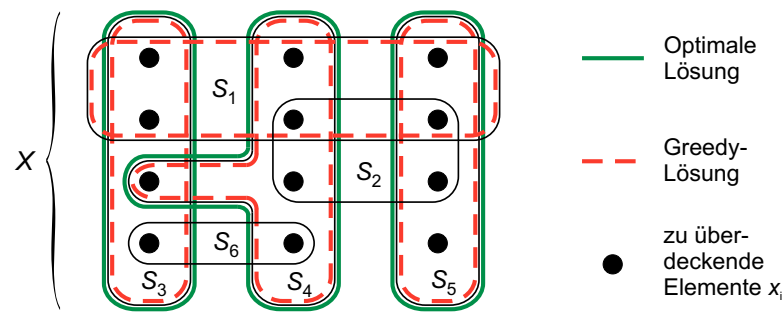


Abbildung 2.4: Beispiel für ein Mengenüberdeckungsproblem. Die optimale Mengenüberdeckung  $C = \{S_3, S_4, S_5\}$  kann vom Greedy-Algorithmus nicht gefunden werden, da er als erstes  $S_1$  wählt (Abb. in Anlehnung an [18, S. 1034]).

Cormen definiert das SCP wie folgt: Eine Instanz  $(X, \mathcal{F})$  des Mengenüberdeckungsproblems besteht aus einer endlichen Menge  $X = \{x_1, \dots, x_n\}$  und einem Mengensystem  $\mathcal{F} = \{S_1, \dots, S_m\}$  über  $X$ , so dass jedes Element aus  $X$  zu mindestens einer Teilmenge aus  $\mathcal{F}$  gehört:

$$X = \bigcup_{S \in \mathcal{F}} S.$$

Eine Teilmenge  $S \in \mathcal{F}$  überdeckt dabei die in ihr enthaltenen Elemente (siehe Abb. 2.4). Als Optimierungsproblem (engl. „Minimum Set Cover“ (MSC)) formuliert wird die *kleinste Teilmenge*  $\mathcal{C} \subseteq \mathcal{F}$  gesucht, deren Elemente  $X$  komplett überdecken:

$$X = \bigcup_{S \in \mathcal{C}} S. \quad (2.15)$$

Die Größe von  $\mathcal{F}$  ist dabei als die Menge der enthaltenen Teilmengen definiert.

Wie R. Karp 1972 zeigen konnte [31], gehört MSC zur Klasse der NP-vollständigen Probleme. Dies impliziert, dass die Lösung des Problems mit jedem heute bekannten Algorithmus schon für kleine Problemgrößen aufgrund der praktisch benötigten Zeit nicht berechenbar ist. Jedoch existieren Approximationsalgorithmen, welche Approximationsfaktoren besitzen, die logarithmisch mit  $|X|$  wachsen. Dies bedeutet, dass mit anwachsender Problemgröße die Größe der Näherungslösung gegenüber der optimalen Lösung (vergleichsweise langsam) zunehmen kann.

In Abb. 2.4 ist eine Instanz des SCP dargestellt, bei der  $X$  aus den 12 schwarzen Punkten besteht und  $\mathcal{F} = \{S_1, \dots, S_6\}$  ist. Die kleinste Mengenüberdeckung besteht aus  $\mathcal{C} = \{S_3, S_4, S_5\}$ . Ein Greedy-Algorithmus, welcher in jedem Schritt diejenige Menge  $S \in \mathcal{F}$  wählt, welche die größte Teilmenge der verbleibenden Grundgesamtheit überdeckt, hat polynomielle Laufzeit und einen  $(\ln |X| + 1)$ -Approximationsfaktor [18, S. 1033 ff.]. Asymptotisch ist dies der beste mögliche Approximationsfaktor [77]. In Abb. 2.4 ist die mit diesem Algorithmus berechnete suboptimale Lösung  $\{S_1, S_4, S_5, S_6\}$  dargestellt.

Das MSC lässt sich auch mittels ganzzahliger linearer Optimierung lösen. Dabei ist die Anzahl  $Z$  der Teilmengen zu minimieren, um  $X$  vollständig zu überdecken:

$$Z = \min \sum_{i=1}^m u_i, \quad (2.16)$$

mit den Nebenbedingungen:

$$\sum_{i:x \in S_i} u_i \geq 1 \quad \forall x \in X \quad (2.17)$$

$$u_i \in \{0, 1\} \quad \forall i \in \{1, \dots, m\}. \quad (2.18)$$

Der Lösungsvektor  $u$  ist dabei binär (siehe Gl. (2.18)) und selektiert die zur Überdeckung von  $X$  benötigten Teilmengen  $S_i$ . Dabei garantiert Gleichung (2.17), dass jedes Element  $x \in X$  mindestens einmal durch eine ausgewählte Teilmenge überdeckt wird. Asymptotisch wird der gleiche Approximationsfaktor wie beim Greedy-Algorithmus erreicht.

### 2.3.3 Problem des Handlungsreisenden

Das Problem des Handlungsreisenden (engl. „Travelling Salesman Problem“, TSP) spielt in der Logistikplanung und vielen weiteren praktischen Fragestellungen eine Rolle. Dabei muss ein Verkäufer  $n$  Städte besuchen, jede Stadt nur einmal besuchen und die Route mit den geringsten Kosten (z. B. Reisezeit, Entfernung o.ä.) wählen. In dieser allgemeinen Formulierung ist das TSP NP-vollständig [18, S. 1012 ff.]. In der Ansichtenplanung kann TSP zur Minimierung der Sensorpositionierkosten eingesetzt werden (siehe Abschnitt 23).

Oft kann das allgemeine TSP jedoch weiter eingeschränkt werden, so dass Näherungslösungen in polynomieller Laufzeit berechenbar sind. So schränkt z. B. das metrische TSP das Allgemeine derart ein, dass Hin- und Rückreise auf einer Strecke die gleichen Kosten haben und die Kosten eine Metrik definieren. Das metrische TSP kann in polynomieller Laufzeit z. B. durch den Algorithmus von Christofides [15] mit einem Approximationsfaktor von 1,5 gelöst werden.

## 2.4 Schätzung der Messunsicherheit

Mindestens zwei Beobachtungen eines Objektpunktes sind zu seiner 3-D Koordinatenberechnung notwendig (siehe Abschnitt 2.1.1). Ab zwei Beobachtungen eines Objektpunktes ist das zur Berechnung seiner 3-D Koordinaten aufgestellte Gleichungssystem (siehe Kollinearitätsgleichungen, Gl. (2.12)) überbestimmt. Somit kann eine ausgeglichene Punktschätzung  $\bar{P}$  berechnet werden. In der Ansichtenplanung kann das Wissen über die Auswirkung der Beobachtungsgeometrie auf die Messunsicherheit zur besseren Sensorpositionierung genutzt werden (siehe Abschnitt 5.2.2).

Durch Spektralzerlegung<sup>6</sup> der zur jeweiligen Punktschätzung gehörigen Kovarianzmatrix  $\Sigma$  können die Eigenwerte  $\lambda$  und Eigenvektoren  $\xi$  bestimmt werden:

$$\Sigma = (\xi_1 \xi_2 \xi_3) \begin{pmatrix} \lambda_1 & & \\ & \lambda_2 & \\ & & \lambda_3 \end{pmatrix} \begin{pmatrix} \xi_1^T \\ \xi_2^T \\ \xi_3^T \end{pmatrix}. \quad (2.19)$$

Damit lässt sich für  $\bar{P}$  ein Fehler- bzw. Konfidenzellipsoid (siehe Abb. 2.5 a) berechnen, in dessen Volumen der „wahre“ Punkt mit der Sicherheitswahrscheinlichkeit  $1 - \alpha$  liegt. Dabei geben die Eigenvektoren die

<sup>6</sup>Berechnung der nicht trivialen Eigenwerte  $\lambda$  und Eigenvektoren  $\xi$  einer Matrix  $A$ , so dass  $A\xi = \lambda\xi$ .

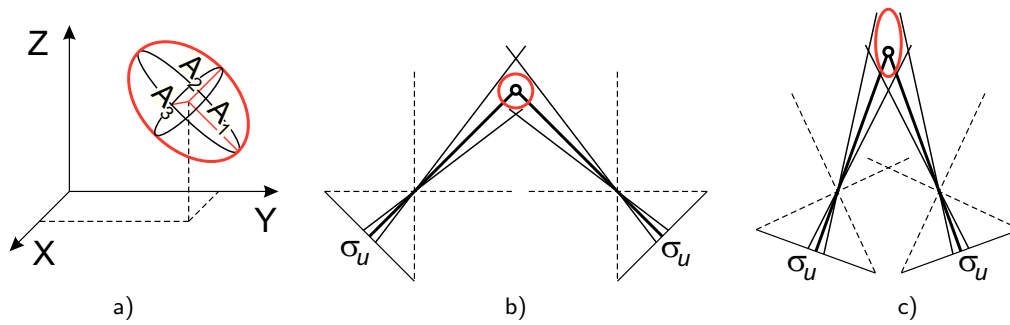


Abbildung 2.5: Messunsicherheitsschätzung beim allgemeinen räumlichen Vorwärtsschnitt. a) Konfidenzellipsoid einer Punktmessung. b) Optimale Schnittgeometrie mit geringer Messunsicherheit. c) Schleifende Schnittgeometrie (Abbildungen nach [44, S. 283 ff.]).

Richtung der Halbachsen des Ellipsoides an, die Eigenwerte ihre Länge [44, S. 284]:

$$A_i = \sqrt{\lambda_i \chi_{3,1-\alpha}^2}, \quad (2.20)$$

mit  $\chi_{3,1-\alpha}^2$  dem entsprechenden Quantil der  $\chi^2$ -Verteilung.

Wenn die Unsicherheit der Bildpunktbestimmung in allen Beobachtungen als gleich genau und normalverteilt mit Standardabweichung  $\sigma_u$  angenommen wird, so stellen die Abbildungen 2.5 b) und c) die aus verschiedenen Schnittgeometrien resultierende Form des Fehlerellipsoides dar [44, S. 284]. Erfolgt eine Beobachtung orthogonal zur Richtung der größten Messunsicherheit der anderen, so resultiert daraus eine geringe Messunsicherheit mit näherungsweise kugelförmigen Fehlerellipsoiden (Abb. b). Auf einen kleinen Winkel zwischen den Beobachtungen (sog. schleifender Schnitt homologer Raumstrahlen) deutet ein gestrecktes Fehlerellipsoid hin (Abb. c).



# Kapitel 3

## Stand der Technik

Nach dem allgemeinen Überblick über das Ansichtenplanungsproblem in der Einleitung soll in diesem Kapitel eine detaillierte Bewertung des aktuellen Standes der Technik bezüglich der Ansichtenplanung vorgenommen werden. Dabei liegt der Schwerpunkt, wie auch der gesamten Arbeit, auf der aktiven Rekonstruktion und Inspektion mittels aktiver Beleuchtung. Ansichtenplanung als Teilproblem anderer Aufgaben, wie z. B. Objekterkennung [21], Erkundung und Kartenerstellung [42] oder Überwachung [5], soll in diesem Rahmen nicht betrachtet werden.

Die Unterteilung der Ansätze folgt in Anlehnung an den Literaturüberblick zur Ansichtenplanung von Scott et al. [74]. Weitere relevante Überblicksartikel finden sich bei Tarabanis et al. [80], Hall-Holt [26] und Chen [14, Kapitel 3, S. 39–66]. Ein aktueller Überblick zur Inspektion ausgewählter charakteristischer Merkmale – im Kontrast zum in dieser Arbeit unter Inspektion verstandenen Vergleich der gesamten Oberfläche zur Vorgabe – findet sich bei Zhao et al. [101]. Eine zusätzliche Einteilung findet sich u.a. bei Chen et al. [13] sowie Yang und Ciarallo [99]. Bei sog. „*Generate and Test*“-Ansätzen wird der Ansichtenraum z. B. durch eine View Sphere (s.u.) diskretisiert, alle entsprechenden Ansichtenkandidaten werden evaluiert und der beste Kandidat als NBV gewählt. In *Synthese*-Ansätzen werden die Sensornebenbedingungen als analytische Funktionen modelliert und die Ansichtenplanung wird als Bedingungserfüllungsproblem (engl. „constraint satisfaction problem“) aufgefasst. *Expertensystem*-Ansätze wiederum planen Ansichten basierend auf Regeln und Informationen, welche vorher von Nutzern definiert wurden.

Hall-Holt [26] wiederum wies darauf hin, dass die Anforderungen an Planungsmethoden, abhängig vom aktuellen Wissen über das Messobjekt, unterschiedlich sind: Während zu *Planungsbeginn* ein grober Überblick über das Objekt erstellt werden soll, liegt die Priorität im *mittleren Planungsverlauf* auf der vollständigen Erfassung des Objekts (z. B. Erfassung großer, bisher nicht vermessener Bereiche), um dann bei der Planfinalisierung kleinere Messdefekte (z. B. Oberflächenbereiche mit erhöhter Messunsicherheit oder fehlenden Messdaten) zu beheben. Viele datengetriebene Ansätze befassen sich nur mit dem Planungsbeginn bzw. treffen solche Objektannahmen (z. B. konvexe Körper mit glatter Objekt Oberfläche), dass die mittlere Planungsphase unnötig ist. Aktuelle Methoden (z. B. [41, 69, 91]) nutzen deshalb mehrstufige Ansätze zur Rekonstruktion unbekannter Objekte.

Die Mehrzahl der hier vorgestellten Methoden plant für Systeme, welche Tiefenkameras mit aktiver Beleuchtung einsetzen. Diese bestehen im Allgemeinen aus einem Sender (z. B. Musterprojektion) und mindestens einem Empfänger (z. B. Kamera). Bei dem meist angewendeten Triangulationsprinzip

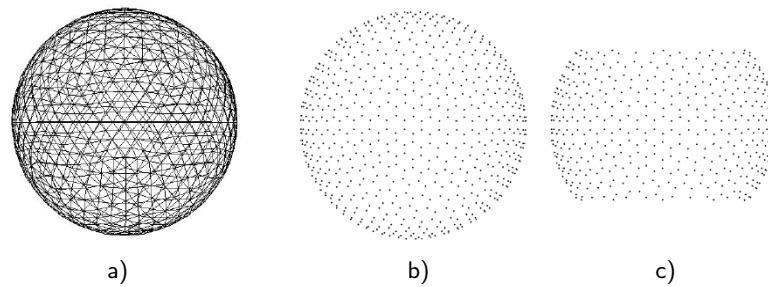


Abbildung 3.1: Diskretisierung einer View Sphere (Abb. aus [47], Seite 4). a) Die durch regelmäßige Teilung eines Ikosaeders erhaltene geodätische Kugel. b) Die resultierenden Positionen der Ansichtskandidaten. c) Zulässige Positionen bei Berücksichtigung des C-Space des Sensor-Positioniersystems.

müssen Sender und Empfänger räumlich getrennt sein, man spricht dann von einem *bistatischen Sensor*. Beispiele für solche Sensoren sind Lichtschnittsensoren, bei denen die Verformung einer Laserlinie durch das Messobjekt beobachtet wird, und Streifenprojektionssysteme, welche ein flächiges Muster beobachten. Oft wird jedoch vereinfachend ein *monostatischer Sensor* betrachtet, welcher nur die Kamera modelliert. Solche Ansätze ignorieren Sichtbarkeits-effekte infolge der Basislänge zwischen Sender und Empfänger und scheitern an komplexeren Messobjekten, welche tiefe Konkavitäten oder Selbstverdeckungen beinhalten.

Erste Ansichtenplanungssysteme betrachteten nur die Blickrichtung des Sensors. Zusammen mit der Annahme, dass sich das Messobjekt vollständig im Sensorsehvolumen befindet, also sowohl im Bildfeld als auch im Tiefenschärfebereich des Sensors, leiteten sie das Sensorpositioniermodell der *View Sphere* ab. Dadurch lässt sich der potentiell hochdimensionale Parameterraum der Ansichtskandidaten, auch Ansichtenraum  $V$  genannt, auf zwei Parameter reduzieren: Die sphärischen Koordinaten Azimutwinkel  $\varphi$  und Polarwinkel  $\vartheta$ . Dabei ist der Sensor implizit auf den Schwerpunkt des Messobjektes im Zentrum der View Sphere ausgerichtet, während der Radius auf den optimalen Sensorabstand manuell festgelegt wurde. Fast immer wird außerdem statt der kontinuierlichen View Sphere eine geodätische Kugel mit fester Dreiecksanzahl genutzt, um nur eine endliche Kandidatenanzahl betrachten zu müssen (siehe Abb. 3.1 a & b).

Der Bewegungsraum realer Sensorpositioniersysteme ist beschränkt – nicht alle Positionen sind erreichbar. Dies ist aus Restriktionen bezüglich der verfügbaren Freiheitsgrade, zusätzlichen Nebenbedingungen des Positioniersystems (z. B. Teil eines Starrkörpersystems zu sein) und zu vermeidenden Regionen (z. B. Hindernissen) ableitbar. Die Menge möglicher Konfigurationen<sup>1</sup> des Sensorsystems wird als *Configuration Space* (C-Space, Konfigurationsraum) bezeichnet [43]. Viele Ansichtenplanungssysteme betrachten den C-Space nicht. Entweder simulieren sie einen Sensor mit unbeschränktem C-Space oder sie schränken den Ansichtenraum von Beginn an stark ein (z. B. durch eine Untermenge der View Sphere, siehe Abb. 3.1 c).

Scott et al. [74] formulierten sechzehn allgemeine Anforderungen und zu berücksichtigende Einschränkungen für Ansichtenplanungsansätze. So soll die zu *erzielende Messqualität* für das Messobjekt spezifiziert werden, der jeweilige Planungsalgorithmus für verschiedene Sensoren und Messobjekte *generalisierbar* sein und über die Sensorpose hinausgehende, konfigurierbare Sensorparameter durch *generalisierte Ansichten* unterstützt werden. Weiterhin ist die volle Nutzung der *6-D-Freiheitsgrade*

<sup>1</sup>Als Konfiguration versteht man die Position aller zu Sensor und Positioniersystem gehörender Teile.

des Positioniersystems bei gleichzeitiger *Berücksichtigung des C-Space* erstrebenswert. Die *Leistungsfähigkeit des Positioniersystems* bezüglich Posenunsicherheit und Fahrzeit sowie die *Robustheit* bezüglich Sensor- und Positioniersystemfehlern ist ebenfalls in der Planung zu berücksichtigen. Andere Anforderungen betreffen die Einbeziehung des *Abschattungseffektes* bei (*bistatischen*) Sensoren mit mehreren beteiligten Komponenten, des *Sensorsehvolumens* und der darin zu erwartenden *Sensormescharakteristik* in die Modellierung. Auch soll ein automatischer Planungsabbruch bei Erreichen der Messziele oder Unerreichbarkeit (*Selbstterminierung*) und eine hinreichende *Ansichtenüberlappung* für die Registrierung sichergestellt werden. Während eine vergleichbare *Leistung* zu menschlichen Experten sicher nur für die modellbasierte Planung gefordert werden kann, muss auch bei *beschränktem Objektwissen* (z. B. nur Objektgröße und Centroid gegeben) eine zufriedenstellende Leistung erwartbar sein. Schlussendlich sollten alle für den Sensor sinnvollen *Objektopografien* und *Objektmaterialien* unterstützt werden.

Im Anschluss wird im Abschnitt 3.1 der Stand der Technik für die datengetriebenen Ansätze vorgestellt, bevor im Abschnitt 3.2 relevante modellgetriebenen Verfahren präsentiert werden und abschließend im Abschnitt 3.3 der aktuelle Forschungsstand zusammengefasst und diskutiert wird.

## 3.1 Datengetriebene Verfahren

Datengetriebene Ansichtenplanung kann nur auf sehr beschränkte Objektinformation zurückgreifen. Neben dem Objektzentrum ist zu Beginn der Planung oft nur eine, aus günstiger oder zufälliger Position aufgenommene Ansicht verfügbar. Die Aufgabe besteht nun darin, automatisch inkrementell mit möglichst wenigen Aufnahmen eine vollständige und / oder genaue Rekonstruktion des noch weitgehend unbekanntes Körpers zu erstellen. Der typische Rekonstruktionsablauf bei datengetriebenen Verfahren besteht aus der Initialisierung (u.a. erste Ansicht) sowie aus Planung des NBV, 3-D-Scan und Berechnung, Registrierung und Fusion der Einzelansicht und Wiederholung des Vorganges, bis die Abbruchbedingung erfüllt ist. Da keine vollständige Objektinformation vorhanden ist, kann die Anzahl notwendiger Ansichten nicht so effektiv reduziert werden wie mit modellgetriebener Ansichtenplanung.

Erschwerend kommt hinzu, dass die partiellen Objektrekonstruktionen, welche infolge der geplanten Ansichten entstehen, mit den bisher der Planung zugrundeliegenden Daten fusioniert werden müssen. Nur so können neue Erkenntnisse über den Messfortschritt in die Planung einbezogen werden. Dazu müssen aber zusätzlich zur Planung auch zwei weitere Teilprobleme gelöst werden: Registrierung der 3-D-Daten und Fusion mit den bisherigen Daten. Unsicherheiten bei beiden Schritten führen zu fehlerhaften Modellen und dies zur weiter reduzierten Effektivität der Planung. Zur Rekonstruktion unbekannter Objekte werden datengetriebene Verfahren nach wie vor eingesetzt, zunehmend auch als erster, der modellgetriebenen Planung vorausgehender Schritt (siehe Abschnitt 3.2).

### 3.1.1 Volumetrische Ansätze

Volumetrische Ansätze repräsentieren den Hauptteil der datengetriebenen Planungsmethoden in der Literatur. Sie modellieren das momentane Wissen über das Messvolumen in räumlichen Datenstrukturen, wie z. B. mittels  $\text{Voxel}^2$ -Gitter oder einem  $\text{Octree}^3$ . Als nächste Ansicht wird diejenige gewählt, welche

<sup>2</sup>Kunstwort aus „volumetric“ und „pixel“. Bezeichnet einen Datenpunkt im Raum.

<sup>3</sup>Von lat. „octo“ und engl. „tree“. Hierarchische Untergliederung eines Volumens mittels eines gewurzelten Baumes.

die größte Reduzierung der Unsicherheit im Messvolumen verspricht.

Eine der ersten Arbeiten überhaupt, die sich mit Ansichtenplanung befasst, ist laut Scott et al. [74] die Arbeit von Connolly [17], welche auch den Begriff des „next-best-view“ einführt. Darin werden die Voxel des Octrees gemäß des aktuellen Messfortschritts als *leer*, *belegt* oder *nicht gesehen* klassifiziert. Der erste vorgestellte Planungsalgorithmus wählt die Ansicht – unter Berücksichtigung möglicher Selbstverdeckungen – auf der View Sphere aus, welche die größte Fläche<sup>4</sup> bisher *nicht gesehener* Voxel abbildet. Der zweite Algorithmus ermittelt die mittlere Normale der *Grenzflächen* zwischen bisher *nicht gesehener* und bereits gesehener, aber als *leer* klassifiziertem Volumen. Dabei wird keine Selbstverdeckung berücksichtigt, was zu einer starken Reduzierung der Berechnungskomplexität führt. Obwohl sich das Messobjekt vollständig im Messvolumen befinden muss, der Sensor als Punkt modelliert wird und keine Nebenbedingungen modelliert werden, finden sich viele der Konzepte in späteren Arbeiten zur volumetrischen Ansichtenplanung wieder.

Banta et. al. [9, 7, 8] untersuchen, wie verschiedene Ansichtenplanungsmethoden automatisch kombiniert werden können, um die wechselnden Anforderungen der verschiedenen Planungsphasen (vgl. Kapitel 3 auf Seite 21) zu berücksichtigen. So werden z. B. zu Beginn mit der Ausrichtung des Sensors in Richtung der Region mit der größten Anzahl *nicht gesehener* Voxel gute Ergebnisse erzielt. Im weiteren Planungsverlauf werden die verbleibenden *nicht gesehener* Voxel zusammengefasst und der Sensor auf die jeweils größte Gruppe ausgerichtet. Verschiedene heuristische Terminierungskriterien werden untersucht. In den vollständig simulationsbasierten Experimenten wird für verschiedene Testobjekte (siehe Abb. 3.2 a) der Planungsverlauf anhand der jeweiligen Ansichten demonstriert. Quantitative Aussagen jenseits abstrakter Voxelzahlen werden nicht getroffen. Auch hier sind Sensorpositionen auf die View Sphere beschränkt, es werden keine Einschränkungen bzgl. des möglichen Sensorbewegungsraumes gemacht und nur ein Sensor betrachtet.

Reed et al. [62, 63] nutzen konstruktive Festkörpergeometrie (engl. „Constructive Solid Geometry, CSG), um aus den einzelnen Ansichten durch Extrusion der gemessenen Oberflächen das freie und verdeckte Volumen zu erhalten. Anschließend berechnen sie durch Mengenoperation darüber das Volumenmodell des aktuellen Messfortschritts im Messvolumen. Über weitere volumetrische Mengenoperationen können Sichtbarkeit und Erreichbarkeit durch den Sensor für ausgewählte sog. Ziele berechnet werden. Die Ziele repräsentieren die größten sog. Grenzflächen (s.o.). Mittels Histogrammberechnung können die kontinuierlich im Raum berechenbaren Sichtbarkeiten der einzelnen Ziele effizient kombiniert werden. Als nächste Ansicht wird dann die Position im für den Sensor erreichbaren Volumen gewählt, welche die höchste akkumulierte Sichtbarkeit besitzt.

Vorteilen der CSG-Methode wie hohe Robustheit bei komplexen Geometrien und beherrschbarer Komplexität stehen Probleme durch Stereosichtbarkeit gegenüber. Für ein Modell aus drei sich teilweise selbst verdeckenden Spielzeuggebäuden werden im Experimententeil vier (ungeplante) Startansichten aufgenommen. Mit dem daraus resultierenden initialen Modell werden weitere acht Ansichten geplant, bis die noch verdeckte Fläche annehmbar klein ist. Es werden u.a. die jeweilige Größe der rekonstruierten Modelloberfläche und der verbliebenen Grenzflächen im Planungsverlauf angegeben. Ein quantitativer Vergleich mit dem Ground-Truth-Modell wird allerdings nicht durchgeführt. Die zur Planung einer Ansicht benötigte Zeit beträgt das 20-fache der reinen Datenaufnahme einer Ansicht.

Das Problem inkonsistenter Klassifizierung von Voxeln im Verlauf der Integration aufeinanderfolgender Ansichten in ein gemeinsames Weltmodell behandeln Korn et al. [36]. Zur Lösung des Problems greifen

---

<sup>4</sup>Auf der Bildebene.

sie auf Fuzzy-Logik zur Klassifizierung eines Voxels als *belegt* oder *leer* zurück. Die Ergebnisse zeigen für drei sich überlappend positionierte Gussteile Fotos der Ansichten und die Belegung der Voxel im Messvolumen im Planungsverlauf. Die Daten wurden mittels einer auf einer View Sphere positionierbaren Kamera und eines aus drei möglichen Richtungen projizierbaren Streifenmusters berechnet.

Massios und Fischer [47] erweiterten die datengetriebenen Planungsansätze, indem sie die Zielfunktion der Bewertung einer konkreten Ansicht als Linearkombination der Fläche der in dieser Ansicht sichtbaren Grenzfläche und einem Qualitätskriterium formulieren. Dieses wird als Summe der Skalarprodukte – jeweils zwischen dem betreffenden Oberflächennormalenvektor und dem Sehstrahl des als Punkt modellierten Sensors – aller sichtbaren und als *belegt* klassifizierten Voxel definiert. Dadurch wird angestrebt, Objektbereiche, welche bisher nur unter einem großen Antastwinkel erfasst wurden, in der nächsten Ansicht mit möglichst kleinem Antastwinkel erneut zu scannen. Der Ergebnisteil behandelt die Rekonstruktion eines achtseitigen, auf einer Ebene liegenden Polyeders durch fünf Ansichten eines Lichtschnittsensors. Dabei werden nur Ansichten in  $10^\circ$  Schritten auf einer Kreisbahn (auf der View Sphere) um das Objekt berücksichtigt. Infolgedessen benötigt die Planung einer Ansicht nur  $\frac{1}{5}$  der Zeit einer Objektabtastung. Während Diagramme den Verlauf der Zielfunktion im Planungsverlauf anschaulich demonstrieren, werden keine quantitativen Aussagen zur erreichten Vollständigkeit und Messunsicherheit gemacht.

Low und Lastra [42] beschreiben in ihrer Arbeit, wie durch die Ausnutzung des räumlichen Zusammenhangs sowohl zwischen Ansichtenkandidaten als auch zwischen Oberflächenelementen die Berechnung des NBV um mehr als den Faktor zehn beschleunigt werden kann. Dazu nutzen sie einen hierarchischen Octree-Ansatz, mit dessen Hilfe Ansichten benachbarter Kandidaten und benachbarter Oberflächenelemente gruppiert ausgewertet werden. Nur wenn dabei Nebenbedingungen nur teilweise erfüllt sind, wird die Gruppierung rekursiv verfeinert und die resultierenden Ansichten neu ausgewertet. Als Nebenbedingungen werden der zulässige Bewegungsbereich des Sensors, das Sensorsehfeld, die Abtastdichte und eine Registrierungsnebenbedingung berücksichtigt. Die Autoren zeigen simulierte und reale Ergebnisse für die Erkundung von Innenräumen in Form von Bildern der rekonstruierten Räume. Dabei werden nur die drei Positionsparameter des Sensors (horizontales Sehfeld  $360^\circ$ , vertikales Sehfeld eingeschränkt) berücksichtigt. Die Möglichkeit der Beschleunigung der Berechnung des NBV durch den hierarchischen Ansatz auch für bistatische Sensoren wird aufgrund der komplexeren Geometrie der resultierenden individuellen Sensorsehfelder von den Autoren offen gelassen.

Mehdi-Souzani et al. [49] folgen einem zweistufigen Ansatz: Zuerst digitalisieren sie das Objekt manuell so, dass näherungsweise die komplette Oberfläche erfasst wird. In einem zweiten Schritt überführen sie dieses Grobmodell in eine Voxeldarstellung und unterziehen es einer Qualitätsanalyse. Dabei werden einerseits Voxel identifiziert, bei denen aufgrund eines großen Antastwinkels mit einer zu hohen Unsicherheit zu rechnen ist. Andererseits werden auch Voxel markiert, die auf Messfehler, Löcher oder charakteristische Linien schließen lassen. Der Planungsansatz erzeugt dann für den modellierten Lichtschnittsensor Abtastpfade für alle identifizierten Problemstellen, welche diese unter optimalen Bedingungen<sup>5</sup> neu vermisst. Als Ergebnis wird die „vollständige“ Vermessung der Oberseite einer Gesichtsmaske durch eine manuelle und zwei weitere geplante Ansichten dargestellt. Die Ansichtenanzahl wurde mittels einer nicht erwähnten Methode von acht Ansichten (je einer pro gefundener Problemstelle) auf zwei reduziert. Die Autoren machen keine quantitativen Angaben zur Vollständigkeit oder erzielten Messunsicherheit.

<sup>5</sup>Betrachtete Nebenbedingungen: Zulässige Sensorposition, optimaler Messabstand, minimal möglicher Antastwinkel.

Pengpeng Wang und Gupta [92] betrachten die Ansichtenplanung unter dem Gesichtspunkt der Erkundung eines unbekanntes Messvolumens. Die Aufgabe besteht also darin, ein gegebenes Ziel kollisionsfrei zu erreichen. Dazu modellieren sie das durch den bisherigen Messfortschritt erhaltene Wissen in einem Octree mit der Klassifizierung in *leere* und *belegte* Voxel. Aus Gründen der Reduktion der Berechnungskomplexität wird nur für eine zufällige Auswahl möglicher Sensorkonfigurationen das für das modellierte Sensorsehfeld erwartete neu vermessbare Volumen berechnet. Als NBV wird dann die Position mit dem größten erwarteten Volumen gewählt, also jene, welche die Entropie des sog. C-Space maximal reduziert. Simulierte Ergebnisse für verschiedene 2-D Umgebungen und reale Ergebnisse für einen 3-D Scanner am Manipulator eines 6-DOF Roboters werden angegeben. Für die Simulationen geben die Autoren prozentuale Vollständigkeits des Modells im Planungsverlauf an. Die Anzahl von Voxeln mit bekannter Klassifizierung ist im 3-D Fall jedoch ohne weitere Angaben schwer zu interpretieren.

### 3.1.2 Oberflächenbasierte Ansätze

Oberflächenbasierte Planungsmethoden bestimmen den NBV aus Hinweisen, welche sie aus der bisher bekannten Objektoberfläche ableiten. Darunter fallen z. B. Grenzflächenmethoden und Konturverfolgungsansätze. Maver und Bajcsy [48] formulierten einen  $2^{1/2}$ -D Ansatz für einen bistatischen Sensor, bei dem in einem zweistufigen Prozess zuerst Grenzflächen Ziele für den NBV sind, welche durch die Beobachtung entstanden sind. Diese Strategie setzt entsprechende „Schatten-“ bzw. Sprungkanten<sup>6</sup> auf einer Objektgrundfläche voraus. Zuerst werden die Grenzflächen, welche durch die Beobachtung entstanden sind, durch geplante Rotationen der Kamera auf einem Kreis auf der View Sphere eliminiert. Anschließend dient die Neuausrichtung der Laserlinienprojektionseinheit und Wiederholung des ersten Schrittes der Entfernung evtl. verbleibender Grenzflächen der Beleuchtung. Die Anzahl der sichtbaren Pixel auf den Grenzflächen wird in einem Histogramm akkumuliert, welches die möglichen Blickrichtungen der Kamera repräsentiert. Als nächste Ansicht wird dann die Maximalposition im Histogramm gewählt. Bei der Bestimmung der Sichtbarkeit werden dabei nicht echte 3-D Messwerte, sondern abhängig von der Schattenlänge bestimmte Objekthöhen verwendet. Im Ergebnisteil wird die Methode an zwei Szenen demonstriert, für welche die Tiefenkarten und Histogramme der einzelnen Ansichten dargestellt werden. Die Autoren präsentieren keine darüber hinausgehenden quantitativen Resultate. Der Beitrag der Arbeit liegt in der frühen Modellierung eines bistatischen Sensors.

Li et al. [39], [14, S.177–205] beschreiben einen Ansatz zur Modellvorhersage zur Ansichtenplanung bei Objekten mit kontinuierlichen Oberflächen von geringer Komplexität. Basierend auf der lokalen Objektkrümmung wird die Oberfläche in den bisher nicht vermessenen Bereich extrapoliert. Als NBV wird die Ansicht gewählt, welche die größte Fläche der vorhergesagten Oberfläche (unter Berücksichtigung des Sensorsehvolumens) erfasst. Sensorpositionen werden mit einem 6-DOF Roboterarm realisiert. Als Beispiel werden eine Tasse (4 Ansichten), eine Spielzeugente (6 Ansichten) und ein Männerkopffmodell (5 Ansichten) vollständig vermessen.

Long, He und Li [40, 28] bestimmen in ihrer Arbeit die linke und rechte „limit visual surface“. Dabei extrapolieren sie sensor- und objektentfernungsabhängig die Silhouette des bisher gemessenen Objektes in bisher unbekanntes Messvolumen. Die größte derart konstruierte „limit visual surface“ wird dann als Ziel des NBV ausgewählt. Dadurch verfolgt der Planer implizit die Kontur des Körpers. Es können nur Ansichten für einen Körper im Messvolumen geplant werden, der dazu noch keine Löcher aufweisen

<sup>6</sup>Kanten, welche allein durch das Messobjekt infolge Schattenwurf der Beleuchtung bzw. durch entsprechende Beobachtung auf z. B. einer Grundfläche entstanden sind.

darf. In den in [40] gezeigten Experimenten werden zwei kleine Statuen durch jeweils vier Ansichten rekonstruiert. Der Lichtschnittsensor kann dabei mittels eines Drehtellers und xy-Verschiebetisches (insgesamt drei Parameter) positioniert werden. Angaben zur erfassten Oberfläche werden nicht gemacht, jedoch wird der mittlere Fehler der Messpunkte zur der mit ihrer Hilfe rekonstruierten Oberfläche angegeben. Dadurch wird aber lediglich der Grad der Glättung durch den nicht näher spezifizierten Oberflächenrekonstruktionsprozess bewertet.

Peng Wang et al. [91] verfolgen ebenfalls einen mehrstufigen Planungsansatz. Nach vier generischen Ansichten des Objektes im Abstand von  $90^\circ$  unter Nutzung eines Drehtellers wird aus den bisher aufgenommenen 3-D-Daten die konvexe Hülle des zu vermessenden Objektes erzeugt. Für den genutzten Lichtschnittsensor werden daraufhin Scanpfade für den Drehteller und einen xy-Verschiebetisch (insgesamt 3 Parameter) generiert. Das Objekt wird dabei dergestalt in Segmente unterteilt, dass sich diese von jeweils einer Sensorposition unter Beachtung des zulässigen Messabstandsintervalls und Antastwinkels erfassen lassen. Im dritten Schritt werden Bereiche, in denen das Messobjekt deutlich von seiner konvexen Hülle abweicht erneut gescannt und mit den 3-D-Daten aus Schritt zwei vereinigt. Zur Illustration dient die Vermessung einer Tasse, obwohl die Tasseninnenseite mit dem Ansatz nicht modelliert werden kann. Verständlicherweise werden keine Angaben zur Vollständigkeit gemacht, auch die Ansichtenanzahl wird nicht berichtet. Wieder wird der mittlere Fehler der Messpunkte zu der mit ihrer Hilfe rekonstruierten Oberfläche angegeben (s.o.).

Sitnik et al. [76] präsentieren einen zweistufigen Ansatz: Zuerst erzeugen sie datengetrieben ein möglichst vollständiges Objektmodell, dessen bestehende Defekte sie mit zusätzlichen Ansichten in der zweiten Phase zu beheben versuchen. In der ersten Phase teilen sie jede Einzelne Ansicht in neun gleiche Teilflächen, an die sie jeweils eine Ebene anpassen. Für die vier mittleren Randbereiche erstellen sie Ansichtskandidaten in Richtung der jeweiligen Ebenennormale. Ansichtskandidaten werden im Anschluss gelöscht, wenn sie eine Reihe von Kriterien nicht erfüllen, z. B. bei großflächiger Überlappung mit einer vorherigen Ansicht. Die Ansichten der berechneten Kandidaten werden anschließend mit dem Sensor ausgeführt. Die erste Phase terminiert, wenn keine aktiven Kandidaten mehr vorhanden sind.

Die zweite Phase bestimmt Ansichten, welche detektierte Scandefekte, wie z. B. Löcher in der rekonstruierten Oberfläche, beheben sollen. Dabei werden überlappende Ansichten zusammengefasst. Im Experimentalteil werden Bilder einer in vier Stunden durch 27 Ansichten rekonstruierten „Kybele“-Statue unbekannter Größe gezeigt. Ein vergleichbares manuelles Rekonstruktionsergebnis wurde in ca. 42 h erzielt. Die Genauigkeit des Sensorsystems wird mittels Kugelabstands- und Kugelradiusmessungen belegt. Während die Arbeit in geringem Maße auf die Planung an sich eingeht, wird der Lösung des Registrierproblems und der Einbeziehung der Kinematikberechnungen viel Aufmerksamkeit gewidmet.

### 3.1.3 Globale Ansätze

Werden statt lokaler Eigenschaften der Objektgeometrie zur Bestimmung des NBV Hinweise aus dem gesamten Messvolumen genutzt, so kann man diese Planungsmethoden als globale Ansichtenplanungsmethoden bezeichnen [74].

In der auf seiner Dissertation [57] aufbauenden Arbeit [58] stellt Pito als Methode zur effizienteren Lösung des Ansichtenplanungsproblems den sog. „Positional Space“ (PS) vor. Dieser umgibt das Messobjekt und befindet sich zwischen Sensor und Objekt, kann also auch als *Zwischenraum*-Repräsentation bezeichnet werden. In diesem Raum wird in einer vierdimensionalen Datenstruktur die – mit Antastwinkel

und Fläche gewichtete – Sichtbarkeit des Messobjekts gespeichert. Als Parameter werden die 2-D Position im PS sowie die Richtung des Sensorsehstrahls (zwei Winkel in sphärischen Koordinaten) vom PS auf die korrespondierende Objektoberfläche genutzt. Grenzflächen werden dabei von Pito nur als kleine Vierecke modelliert und nicht wie bisher üblich als Fläche bis zum Rand des Messvolumens. Als nächste Ansicht wird diejenige gewählt, welche die höchste gewichtete Sichtbarkeit aller bisher gemessenen Flächen und Grenzflächen erzielt und dabei eine gewisse Mindestüberlappung mit bisherigen Ansichten erreicht.

Durch den PS-Ansatz, welcher ebenfalls seine Hinweise auf den NBV aus Grenzflächen ableitet, kann Pito den Berechnungsaufwand minimieren. Dies geschieht jedoch durch eine verlustbehaftete Komprimierung durch den Zwischenraum. Genaue Angaben zum Einfluss der Diskretisierung durch den Zwischenraum auf Berechnungskomplexität und Genauigkeit der Ansichtenplanung werden nicht gemacht. Die präsentierten Experimente mit realen Scanergebnissen zeigen u.a. den Planungsverlauf bei der Erfassung der Außenseite einer Tasse (siehe Abb. 3.2 d) durch acht Ansichten und das Modell eines Gargoyles (siehe Abb. 3.2 e), welcher in drei verschiedenen, manuell registrierten Positionen durch insgesamt 31 Ansichten vollständig erfasst wurde. Quantitative Angaben zur erzielten Rekonstruktionsgenauigkeit und Vollständigkeit werden nicht gemacht.

Eine weitere globale Methode basiert auf dem Ansatz der Massenvektor-Kette (Mass Vector Chain, MVC) von Yuan [100]. Dabei kommt zur Anwendung, dass die einzelnen Elemente der Oberfläche eines Objektes nur dann eine geschlossene Objektoberfläche bilden, wenn die korrespondierenden Massenvektoren eine geschlossene Kette bilden. Dabei ist eine MVC eine Folge gewichteter Vektoren, wobei jeder davon einem Oberflächenelement zugeordnet ist. Als Massenvektor wird dabei die Normale jedes Elements, gewichtet gemäß seines Flächeninhaltes (bei Betrachtung aus der mittleren Beobachtungsrichtung), bezeichnet. Als Blickrichtung für konvexe Objekte kann dann der negierte mittlere Massenvektor genutzt werden.

Während Yuan nur die generelle Eignung der MVC-Methode zur Ansichtenplanung auf synthetischen Geometriedaten demonstriert, nutzen Lorient et al. [41] den Ansatz zum simulationsbasierten Test der Methode mittels eines simulierten 5-DOF Scanners und verschiedener Messobjekte. Da MVC nur einen Rückschluss auf die Blickrichtung zulässt, richten die Autoren den Sensor auf den Schwerpunkt des bisher erfassten Objektes. In einer ersten Phase ermitteln sie mittels der MVC-Methode ein Grobmodell des Messobjekts, dessen „Löcher“ sie in einer zweiten Phase suchen und durch aufeinanderfolgende Ansichten für jedes einzelne Loch schließen. Sie präsentieren verschiedene simulierte Ansichten der rekonstruierten Objekte und die Ergebnisse der Simulation bezüglich benötigter Ansichtenanzahl, Punktabstand und Vollständigkeit. Während die Methode für einfache konvexe Objekte gut funktioniert, sind bei konvexen Objekten mit Selbstverdeckungen viele Ansichten in der zweiten Phase notwendig. Für konkave Objekte wie einer Tasse wird keine zufriedenstellende Vollständigkeit erreicht.

Rozenwald et al. [66] implementieren die Methode auf Lorient et al. [41] aufbauend für einen realen Sensor, welcher mittels eines 6-DOF Positioniersystems bewegt werden kann und einen Objektdrehtisch nutzt. Allerdings schränken sie die Parameterzahl durch Nutzung des View Sphere Positioniermodells (mit festen und bekannten Werten für Zentrum und Radius) von sieben auf zwei ein. Als Testobjekte kommen andere Objekte zur Anwendung als in den dieser Arbeit zugrundeliegenden Simulationen von Lorient et al., was die Vergleichbarkeit verhindert. Nach durchschnittlich 18 Ansichten sind die vier, vollständig im Sensorsehvolumen abbildbaren Statuen vollständig erfasst. Die Autoren räumen ein, dass die hohe Ansichtenanzahl der inkrementellen, nicht globalen Ansichtenplanung geschuldet ist.



### 3.1.4 Andere datengetriebene Ansätze

Chen et al. [14, S. 147–175] beschreiben einen entropiebasierten Ansatz zur Ansichtenplanung. Dazu unterteilen sie das bisher gemessene Objekt in eine Folge paralleler 2-D Kurven. Diese Scheiben werden durch geschlossene B-Spline Kurven approximiert. Mittels eines verbesserten Bayes'schen Informationskriteriums wird die Komplexität des Kurvenmodells bestimmt. Die als Entropie gemessene Unsicherheit des Modells bildet die Grundlage des erwarteten Informationsgewinnes der nächsten Messung. Der Informationsgewinn aller Kurvenmodelle wird dann für alle Ansichtenkandidaten evaluiert und diejenige Ansicht mit dem höchsten Gewinn<sup>7</sup> als der NBV ausgewählt. Die Methode ist nicht zur Digitalisierung von Polyedern, sondern zur Rekonstruktion von Freiformflächen geeignet, was anhand der realen Erfassung einer Büste durch einen Streifenprojektionssensor demonstriert wird. Der Sensor wird dabei auf einer View Sphere bewegt und erfasst die Büste vollständig nach einer zufälligen Ansicht und drei weiteren geplanten. Der Planungsverlauf wird anhand der sukzessiven Approximation einer B-Spline Kurve und des Informationsgewinnes in Abhängigkeit von den sphärischen Sensorkoordinaten dargestellt. Als Messunsicherheit wird der mittlere quadratische Abstand der Messpunkte zum Kurvenmodell angegeben. Aussagen zur Berechnungskomplexität der Methode werden nicht getroffen. Quantitative Analysen zu Vollständigkeit und Rekonstruktionsfehler im Vergleich zu Ground-Truth-Daten werden nicht gezeigt.

Auch Wenhardt et al. [98] nutzen einen entropiebasierten Ansatz zur Bestimmung der nächsten Ansicht. Jedoch kommt eine Rekonstruktionsmethode ohne aktive Beleuchtung zum Einsatz, welche die 3-D Rekonstruktion mittels Punktverfolgung und der Anwendung des Kalman-Filters erreicht. Die Autoren konzentrieren sich ganz auf die Verringerung der Messunsicherheit, die Vollständigkeit des Messobjektes wird nicht modelliert. Dazu minimieren sie die mittlere erwartete Entropie aller rekonstruierten Punkte des Messobjektes. Dieses Problem führen sie auf die Minimierung der Determinante der Kovarianzmatrix aller 3-D-Punktschätzungen zurück (D-Optimalität). Als Nebenbedingungen berücksichtigen die Autoren den Sensorbewegungsraum und das Sensorsefeld, nicht jedoch Selbstverdeckungen und Antastwinkel. Über erschöpfende Suche wird diejenige Ansicht auf der View Sphere gewählt, welche die minimale Entropie erwarten lässt. Dann wird der Sensor zur nächsten Ansicht bewegt, währenddessen kontinuierlich Aufnahmen vom Objekt gemacht werden (u.a. zur Punktverfolgung). Im Experimententeil werden zwei planare Objekte durch einen Sensorpfad mit jeweils fünf Wendepunkten rekonstruiert. Der mittlere quadratische Fehler (der Punktreakonstruktionen zur Ebene) der geplanten Sequenz wird mit dem Fehler bei gleichförmig und zufällig verteilten Wendepunkten verglichen. In einer späteren Arbeit [97] untersuchen sie weiterhin die Eignung von E-Optimalität und T-Optimalität<sup>8</sup> zur Ansichtenplanung.

Trummer et al. [86] entwickeln den auf der E-Optimalität basierenden Ansatz weiter. Um die erschöpfende Suche zu vermeiden, nutzen sie den Fakt, dass Ansichten orthogonal zur Richtung der größten Messunsicherheit eines Punktes diese minimiert. Dazu betrachten sie den größten Eigenwert – z. B. des bisher am schlechtesten gemessenen Punktes – und bestimmen den NBV orthogonal zum zugehörigen Eigenvektor. Anhand der Rekonstruktion einer Dinosaurier-Figur durch einen mit fünf Freiheitsgraden positionierten Sensor zeigen die Autoren, dass geringere Rekonstruktionsfehler zu einem Ground-Truth-Modell im Vergleich zur zufälligen Sensorpositionierung erreicht werden. Bereits nach weniger als 30 Ansichten wird ein niedrigerer Fehler realisiert, der im Verlauf der nächsten 470 Ansichten geringfügig weiter reduziert wird. Die Methode hat eine niedrige Berechnungskomplexität und kann

<sup>7</sup>Ohne Berücksichtigung von Selbstverdeckungen.

<sup>8</sup>Basierend auf den Eigenwerten bzw. der Spur (engl. Trace) der Kovarianzmatrix.

zur Laufzeit der Rekonstruktion ausgeführt werden. Die Modellvollständigkeit und Selbstverdeckungen werden nicht modelliert.

## 3.2 Modellgetriebene Verfahren

Modellgetriebene Ansichtenplanung kann auf bereits vorhandene Objektinformationen (das Objektmodell) zurückgreifen. Das Modell liegt dazu vor Beginn der Messung in der Messaufgabe angepasster Auflösung vor. Es wird typischerweise aus einem CAD-Modell, einer Messung mittels einer anderen Sensortechnologie (z. B. mittels Time-of-Flight (TOF) -Kamera [55]) oder einer Erkundungsmessung des Messobjektes [69] erzeugt. In der leistungsorientierten 3-D Rekonstruktion [70] wird das Objektmodell mit weiteren Anforderungen, wie z. B. Messqualität, Abtastdichte usw. angereichert, um eine von der Modellspezifikation getriebene Ansichtenplanung zu ermöglichen. Der typische Rekonstruktionsablauf besteht aus der Modellerstellung, welche Sensor-, Positioniersystem- und Modellinformationen festlegt, sowie aus der Planung der Ansichten bis zur Erfüllung der Abbruchbedingung und anschließender Ausführung des Ansichtenplanes mit abschließender Registrierung und Fusion.

### 3.2.1 Mengentheoretische Ansätze

Der zentrale Grundgedanke der mengentheoretischen Ansätze besteht in der Abbildung des Ansichtenplanungsproblems (View Planning Problem, VPP) auf das (minimale) Mengenüberdeckungsproblem (Minimum Set Cover, MSC). Dabei wird nach der (kleinsten) Menge von Ansichten gefragt, um das Messobjekt vollständig zu rekonstruieren. Das Modell wird dazu durch eine Menge von Oberflächenelementen  $S$  (z. B. Punkte, Dreiecke usw.) approximiert. Dadurch ist es möglich, eine Sichtbarkeitsmatrix zu berechnen, in der jedem Oberflächenelement  $s \in S$  die jeweilige Sichtbarkeit vom Ansichtenkandidaten  $v$  zugeordnet ist. Somit ist die vollständige Objektvermessung durch jede Untermenge von Ansichten  $V_j \subseteq V$  möglich, von denen jedes Oberflächenelement  $s \in S$  des Objektes mindestens einmal sichtbar ist. Solche Mengen lassen sich einfach mittels Operationen über binären Matrizen bestimmen. Eine genauere Definition des mengentheoretischen Ansatzes wird in Abschnitt 5.1.1 gegeben. Die Sichtbarkeitsmatrix kann zur Messbarkeitsmatrix erweitert werden, welche die Messbarkeit – also die Erfüllung aller Anforderungen gemäß Modellspezifikation – für jedes Oberflächenelement abbildet.

In Tarbox' und Gottschlichs grundlegendem Artikel [82] wird die Abbildung des VPP auf das MSC das erste Mal beschrieben. Die Autoren nutzen ein Octree-kodiertes, Voxel-basiertes Raumzustandsmodell zur punktwisen Beschreibung des zu vermessenden Objektes. Darauf aufbauend werden Sichtbarkeitsmatrizen für Kamera und Beleuchtung berechnet (sog. bistatische Sichtbarkeit). Dabei sind streifende Beleuchtung und Beobachtung durch Schwellwerte berücksichtigt, nicht jedoch Sensorrauschen oder ähnliche Einflüsse. Die Ansichtenkandidaten werden noch als auf einer Kugel (zentriert um das Messobjekt) mit festem Radius liegend modelliert (sog. View Sphere). Weiterhin wird das Messobjekt als sich vollständig im Sensesehvolumen befindend angenommen. Tarbox et al. untersuchen drei Planungsalgorithmen, zwei davon mit unwiderruflicher Auswahl der Ansichten. Der dritte lässt durch Zufallssuche und simuliertem Ausglühen („randomized search with simulated annealing“) auch das Widerrufen einer einmal getroffenen Auswahl eines Ansichtenkandidaten zur Minimierung der Länge des erzeugten Ansichtenplanes zu. Zur Behandlung kleiner Positionierfehler wurden anfällige Kandidaten entfernt. Die Komplexität der Berechnung der Sichtbarkeitsmatrix ist jedoch noch vergleichsweise hoch,

da alle Ansichtenkandidaten und Oberflächenelemente berücksichtigt wurden.

In einer Reihe von Veröffentlichungen [70, 72, 73, 71, 68, 74, 69] greifen Scott et al. diesen Ansatz auf und entwickeln ihn in zweierlei Hinsicht weiter. Der Hauptbeitrag besteht in der effizienten Abtastung des Ansichtenraumes durch Kandidaten in der durch Sensor- und Objektmodell definierten optimalen Zone [70, 68]. Der zweite wesentliche Beitrag besteht in der Formulierung der sog. „spezifikationsgetriebenen“ bzw. „leistungsorientierten“ Ansichtenplanung: Die explizite Modellierung von Sensor, Messumgebung und Mindestanforderungen an das Messergebnis pro Oberflächenelement. Erst damit kann bei der von Scott betrachteten Fragestellung nach der kleinsten Menge an Ansichten zur vollständigen Vermessung unter Einhaltung der Mindestanforderungen, hinreichende Übereinstimmung von Planung *und* tatsächlichem Rekonstruktionsergebnis gewährleistet werden. Weiterhin untersucht Scott die Auswirkungen der Posen-Unsicherheit [68] und ihre Kompensation u.a. durch Einschränkung des Sensorsehfeldes während der Berechnung der Sichtbarkeitsmatrix [69]. Durch die Kompensation kann eine geringe Posen-Unsicherheit bei einfachen Objekten – ohne Vergrößerung der notwendigen Ansichtenmenge – fast vollständig ausgeglichen werden. Jedoch gibt Scott zu bedenken, dass „Ansichtenpläne für komplexe Messobjekte [...] aufgrund der [zu ihrer vollständigen Erfassung] höheren Redundanz weniger anfällig für Posen-Fehler“ sind [69].

Durch Einbeziehung der vorab kalibrierten Messunsicherheit in Sensorsehstrahlrichtung wird die Sichtbarkeits- zur Messbarkeitsmatrix erweitert. Jedoch bleibt diese binär – ein Oberflächenelement wird also bei Überschreiten der Mindestmessenanforderungen lediglich als „korrekt gemessen“ eingestuft. Durch hohe Mindestmessenanforderungen kann zwar indirekt die Messunsicherheit minimiert werden, jedoch ist keine direkte Modellierung und Minimierung möglich. Die präsentierten Ergebnisse basieren auf einer vollständigen Simulationsumgebung für Scanner, Positioniersystem und Messobjekt und untersuchen vorrangig die erzielbare Vollständigkeit an diversen Konkavitäten, einer Kugel, einer archäologischen Gesichtsmaske (Tsimshian-Steinmaske) und dem Stanford-Bunny [88] (siehe auch Abb. 3.2 b). Die Verifikation erzeugter Ansichtenpläne mittels Messdaten, welche von einem realem Sensor und Positioniersystem stammen, wird nicht erbracht.

Anstelle dessen wird die Verifikation innerhalb der Simulationsumgebung durchgeführt. Dadurch kann für die verschiedenen Planungsansätze die Qualität und Effizienz der erzeugten Pläne einfach ermittelt werden. Auf diese Weise untersuchen Scott et al. den Einfluss der Auflösung des Grobmodells im Vergleich zur spezifizierten Auflösung der Objektrekonstruktion. Dabei kommen sie zu dem Ergebnis, dass für Objektregionen hoher Komplexität höher aufgelöste Grobmodelle notwendig sind, um kurze und zutreffende Ansichtenpläne erzeugen zu können [72]. Weiterhin analysiert Scott die Verteilung des Grades der Oberflächensichtbarkeit der verschiedenen Objektmodelle. Einfache Modelle sind durch eine höhere Häufigkeit von Oberflächenelementen mit hohem Sichtbarkeitsgrad gekennzeichnet. Steht die komplette Erfassung des Modells im Mittelpunkt, so kann das Rekonstruktionsergebnis durch Fokussierung auf schwierig zu messende Oberflächenelemente nicht signifikant verbessert werden.

Im direkten Vergleich zu Tarbox' Grundansatz ermöglicht die bessere Ausnutzung von Sensorblickfeld und knappere Erfüllung der Mindestmessenanforderungen durch die wesentlich genauere Modellierung von Sensor und Messumgebung kürzere Ansichtenpläne. Durch bessere Abtastung von Oberflächen- und Ansichtenraum durch Scott's 3M Algorithmus kann dieses Ergebnis auch mit stark reduziertem Berechnungsaufwand erreicht werden [69]. Scott spezifiziert die Berechnungskomplexität für eine gegebene Abtastung des Oberflächenraumes  $S$  mit  $\mathcal{O}(|S|^3)$ . Für die Planung der sieben Ansichten der Steinmaske werden ca. vier Minuten, für die 18 Ansichten des Stanford Bunnies ca. 28 min angegeben

(2,6 GHz Pentium 4 PC).

Martins et al. [46] nutzen ein voxelbasiertes Grobmodell des zu rekonstruierenden Objektes. Der Fokus ihrer Arbeit liegt auf der direkten Einbeziehung der Pfad- in die Ansichtenplanung. Dies wird notwendig, da das Verfahren für Laserlinien-Scanner konzipiert ist, deren Laserlinie über das Messobjekt bewegt werden muss. Dazu wird in einer ersten Phase mittels Greedy-basierter Lösung des MSC-Problems eine Untermenge aus 120 möglichen Ansichtenkandidaten auf einer Halbkugel um das Objekt bestimmt, welche die maximale Vollständigkeit der Rekonstruktion gewährleistet. Dabei werden bei der Berechnung der Messbarkeitsmatrix Oberflächenelemente als nicht messbar klassifiziert, welche einen sehr konservativ gewählten Grenzwinkel des Beobachtungswinkelkriteriums von  $50^\circ$  überschreiten. Dies soll eine hohe Rekonstruktionsqualität gewährleisten, ohne diese jedoch direkt zu modellieren. Neben der potentiell akquirierten Fläche kann – durch Wichtung während der Berechnung der Zielfunktion zur Auswahl der nächsten besten Ansicht – die notwendige Pfadlänge des Laserlinien-Scanners zur Erfassung aller potentiell messbaren Oberflächenelemente berücksichtigt werden. Martins et al. zeigen, dass durch entsprechende Wichtung die Pfadlänge, und dadurch die Datenerfassungszeit, bei gleicher Anzahl notwendiger Ansichten und vergleichbarer Vollständigkeit verringert werden kann.

In der zweiten Phase werden die Pfade aller gewählten Ansichten berechnet. Dabei wird der Kontur des Objektes gefolgt, während gleichzeitig auf Kollisionen zwischen Messobjekt und dem durch Kugeln approximierten Sensormodell geprüft wird. Da pro Ansicht durch einen langen Scanpfad beliebig große Objektflächen erfasst werden können, kann die angegebene Ansichtenplanlänge schwer interpretiert werden. In der dritten Phase wird die erzeugte Sensorbahn abgefahren und dabei die 3-D Daten erfasst. Die Berechnungskomplexität oder Berechnungszeit wird nicht angegeben. Belege für eine verbesserte Rekonstruktionsqualität durch den konservativ gewählten Grenzwinkel werden nicht erbracht. Für zwei Testobjekte, die Halbschalen-Form eines Haartrockners und eine Teekanne (siehe Abb. 3.2 c), werden die vom Planungssystem für die ersten neun Ansichten erwarteten Vollständigkeitsangaben angegeben.

Ein im weiteren Sinn mengentheoretischer Ansatz ist das Verfahren von Trucco et al. [85]. Darin wird ein System zur Inspektionsplanung ausgewählter Objektdetails beschrieben. Dazu berechnen die Autoren in einem Synthese-Ansatz offline für jedes Detail seine Sichtbarkeitsregion auf einer das Objekt umgebenden, durch Dreiecke approximierten View Sphere. Diese Region wird als objekt- und sensorspezifisches sog. Sichtbarkeitsskript gespeichert. Weitere Details zur Sichtbarkeitstheorie, speziell zu lokaler, globaler und effektiver Sichtbarkeit, finden sich bei Bernhard und Véron [10].

Als Gütemaß betrachten sie die durch Flächenanpassung experimentell bestimmte Messunsicherheit in Abhängigkeit vom Antastwinkel. Überlappende Sichtbarkeitsregionen verschiedener Details werden zusammengefasst. Damit ergibt sich eine zum MSC-Problem analoge Situation von Objektdetails auf der einen, und potentiellen Ansichtenkandidaten auf der anderen Seite. Ein bezüglich des vom Sensor zurückzulegenden Weges optimaler Ansichtenplan wird dann mittels eines Algorithmus zur Lösung des Problems des Handlungsreisenden (über die lokalen Maxima der Sichtbarkeitsregionen) gesucht. Das Inspektionssystem ist modular in der Weise, dass die vorberechneten Sichtbarkeitsskripte für verschiedene Inspektionsaufgaben am selben Objekt wiederverwendet und kombiniert werden können. Die Planungsmethode wird experimentell an der Vermessung zweier Ebenen mittels einer Ansicht demonstriert.

Pengpeng Wang et al. beschäftigen sich in ihrer Arbeit mit der Einbeziehung der Sensorpositionierkosten in das Ansichtenplanungsproblem, welches dadurch zum NP-schweren (engl.) „Traveling View Planning Problem“ (TVPP) wird. In [94] zeigen sie, wie die Positionierkosten in die Lösung des

MSC-Problems mittels linearer Optimierung einbezogen werden können. Ein optimaler Sensorpfad durch alle Ansichten der Lösung des TVPP kann dann durch Lösung eines entsprechenden Steinerbaumproblems berechnet werden. Kurz darauf kommen die Autoren dann zur Erkenntnis, dass eine einfacher zu berechnende zweistufige Lösung existiert, welche asymptotisch zur bestmöglichen Näherungslösung des TVPP kommt [93]. Diese weicht höchstens um einen Faktor von  $\mathcal{O}(\log m)$  vom Optimalwert ab (mit  $m$  der Anzahl der zu vermessenden Oberflächenelemente). Dabei wird näherungsweise zuerst das klassische VPP mittels MSC gelöst und anschließend näherungsweise der kürzeste Sensorpfad mittels Christofides' Algorithmus [15] bestimmt.

In einer umfassenden, simulationsbasierten Arbeit untersuchen Malik et al. [45] für den 3M Ansatz von Scott den Einfluss verschiedener Parameter auf die erzielbare Vollständigkeit der Objektrekonstruktion. So untersuchen sie z. B. die Auswirkung der im Allgemeinen üblichen Reduktion der Modellkomplexität. Dabei zeigt sich, dass trotz der Auflösungsreduktion auf 0.1 % bis 2 % der Ausgangsauflösung eine sehr gute Vollständigkeit erreicht werden kann. Die Nutzung von Objektmodellen höherer Auflösung führt nach Überschreitung einer objektabhängigen Minimalauflösung nur zur unwesentlichen Steigerung der Vollständigkeit, jedoch zu einer signifikanten Erhöhung der Anzahl notwendiger Ansichten.

Weiterhin stellen Malik et al. fest, dass es bei variierendem Messabstand zum Objekt, aber gleichbleibender Basislänge zwischen den Sensoren bzw. Beleuchtung und Sensor, abhängig von der Tiefe evtl. vorhandener Konkavitäten einen optimalen Messabstand gibt. Mit diesem kann die maximale Vollständigkeit bei minimaler Anzahl notwendiger Ansichten erzielt werden. Auf die daraus resultierende unterschiedliche Punktdichte wird nicht eingegangen.

In einer weiteren Simulation zeigen sie, welchen entscheidenden Einfluss die Positionierung des Messobjektes (innerhalb des vom verwendeten Positioniersystemes bestimmten C-Space) auf die erzielbare Vollständigkeit hat. So können bei der untersuchten Maske in optimaler Messposition 97.8 % der Oberfläche mit elf Ansichten rekonstruiert werden, während an einer nicht optimalen Position trotz 20 Ansichten lediglich eine Vollständigkeit von 92.2 % erreicht werden konnte.

### 3.2.2 Graphentheoretische Ansätze

Die Sichtbarkeit der einzelnen Oberflächenelemente eines Objektes lässt sich auch als Graph beschreiben. Eine Möglichkeit dabei ist die Nutzung sogenannter (engl.) „Aspect Graphs“ [12]. Dabei werden Ansichten, von denen die gleichen Oberflächenelemente sichtbar sind, zu einem sog. Aspekt zusammengefasst. Benachbarte Aspekte sind durch Kanten verbunden. Auf Aspect Graphs basierende Algorithmen werden im Bereich der Ansichtenplanung vor allem bei der Inspektion und der Objekterkennung eingesetzt.

Obwohl Aspect Graphs eine elegante Formulierung des Ansichtenplanungsproblems erlauben, werden sie in diesem Kontext selten genutzt. Trucco et al. führen dies zum einen auf die hohe Berechnungskomplexität bei der Graphenerstellung, zum anderen auf die dominierende Rolle der Objektkanten bei der Anwendung der Aspect Graphs zurück, wohingegen bei der Rekonstruktion Objektflächen im Vordergrund stehen [85]. Auch Scott et al. sieht nur eine begrenzte Anwendbarkeit, da für komplexere Objekte als einfache Polyeder der Suchraum exponentiell mit der Modellkomplexität wächst. Zusätzlich sind weitere Nebenbedingungen über die reine Sichtbarkeit hinaus schwierig mittels Aspect Graphs zu modellieren [74].

Die Knoten im Ansatz von Roberts und Marshall [65] repräsentieren Oberflächenelemente des zu vermessenden Objekts, die genau dann miteinander verbunden sind, wenn eine Ansicht existiert, von

der sie gemeinsam unter Beachtung aller Nebenbedingungen messbar sind. Mittels der Kantenlänge kann dabei eine Kostenfunktion abgebildet werden. Die vorgestellte Methode approximiert den besten Ansichtenplan durch sukzessive Suche nach der größten Menge von Oberflächenelementen, welche gleichzeitig sichtbar sind und weitere Nebenbedingungen erfüllen. Diese Menge wird gespeichert, aus dem aktuellen Graphen entfernt und entspricht näherungsweise der maximalen Clique. Bei konstanten Kantenlängen entspricht der hier entwickelte Ansatz damit der näherungsweise Lösung des MSC-Problems von [82, 69].

Für jede gefundene Menge gleichzeitig sichtbarer Oberflächenelemente wird anschließend eine Ansicht auf der View Sphere bestimmt, deren Blickrichtung den kleinsten Winkel zu allen Normalen aufweist. Die Autoren demonstrieren die Leistungsfähigkeit des Ansatzes anhand von Fotos aus der Sensorblickrichtung auf einen sich vollständig im Sensorsehvolumen befindlichen, symmetrischen und auf einem Drehteller liegenden T-förmigen Polyeder. Es werden keine quantitativen Angaben oder Aussagen zur Laufzeit getroffen.

Auch Yang und Ciarallo [99] wandeln den Aspect Graph-Ansatz aus Gründen der Berechnungskomplexität ab. Sie konzentrieren sich bei ihrer Methode auf die Inspektion von Liniensegmenten, bei der eine hohe Längenmessgenauigkeit im Vordergrund steht. Dazu konstruieren sie nicht den kompletten Aspect Graph des Objektes, sondern den sogenannten (engl.) „Entity-based Aspect Graph“ (EAG), welcher nur die Sichtbarkeit der zu betrachtenden Liniensegmente beschreibt. Anschließend lösen sie das Ansichtenproblem mittels genetischer Algorithmen, bei denen jede Sensorposition durch ein Chromosom mit sechs Genen (drei Parameter für die Position, drei für die Orientierung) repräsentiert wird. Dabei werden auf eine Startpopulation von Chromosomen iterativ Reproduktionszyklen, bestehend aus Rekombination und Mutation angewendet, bis sich die Population stabilisiert.

Die dabei zur Selektion angewendete Fitness-Funktion jedes Chromosoms beschreibt die Summe der Wahrscheinlichkeiten, mit der die Länge der von der jeweiligen Sensorposition messbaren Liniensegmente eine Mindestgenauigkeit erfüllen. Diese wird in Abhängigkeit von Quantisierungs- und Positionierfehlern für den gegebenen Sensor berechnet. Erfüllt eine Sensorposition die modellierten Nebenbedingungen (Auflösung, Fokus, Sehfeld, Sichtbarkeit) nicht, wird das zugehörige Chromosom aus dem Genpool entfernt.

Die dargestellten Ergebnisse wurden mittels Simulationen an zwei Polyedern mit Konkavitäten ohne Einschränkungen des Bewegungsbereiches des Positioniersystems erzielt. Sie beschreiben die Effekte der Rekombinations- und Mutationsrate bzw. der Startpopulationsgröße auf die Laufzeit und die zu erwartende Wahrscheinlichkeit, die Mindestmessenforderung zu mindestens 98 % zu erfüllen. Weiterhin wird gezeigt, dass Ansichten, die eine geringere Anzahl von Liniensegmenten gleichzeitig erfassen, auch mit höherer Wahrscheinlichkeit eine ausreichende Genauigkeit erzielen.

Rivera-Rios et al. [64] entwickeln den EAG-Ansatz für Stereokamera-Systeme weiter. Zur Berechnung der Sensorposen nutzen sie jedoch nichtlineare Optimierung. Dabei wird die Summe der mittleren quadratischen Längenmessfehler sichtbarer Liniensegmente für jede Ansicht minimiert. Für beide Kameras gelten hier die o.g. Nebenbedingungen. Die Ansicht ist gültig, wenn die Mindestmessenforderungen auch für jedes einzelne Liniensegment gelten.

Im Experimententeil verifizieren sie zuerst das Fehlermodell mittels Längenmessung einer Objektkante. In einem weiteren Experiment bewerten die Autoren Posen zur gemeinsamen Vermessung zweier Kanten (unter Erfüllung der Mindestgenauigkeitsanforderung) eines Polyeders.

### 3.2.3 Andere modellgetriebene Ansätze

Einige relevante modellgetriebene Ansätze lassen sich nicht eindeutig den beiden vorhergenannten Kategorien zuordnen. Diese werden hier überblicksartig in chronologischer Reihenfolge aufgeführt.

Tarabanis et al. [81] stellen ein System für die industrielle Bildverarbeitung vor, welches einen Synthese-Ansatz verfolgt. Dabei werden für ausgewählte charakteristische Merkmale (z. B. Objektpunkte, -kanten oder -flächen) Regionen innerhalb eines acht-dimensionalen<sup>9</sup> Parameterraumes berechnet, von welchen deren Messbarkeit sichergestellt werden kann. Dies ist die erste Verwendung generalisierter Ansichtenkandidaten im Kontext der Ansichtenplanung. In den Experimenten werden zwei der acht Parameter –  $f$  und  $a$  – jedoch a priori manuell festgelegt.

Zur Bestimmung der Messbarkeit werden für die zu rekonstruierenden Objektdetails zuerst Regionen berechnet, von denen diese sichtbar sind. Tarabanis et al. stellen dazu zwei Methoden vor [79]. Die erste Methode ermittelt die Grenzflächen der Raumbereiche mit freier Sichtbarkeit, die zweite berechnet mittels konstruktiver Festkörpergeometrie (Constructive Solid Geometry, CSG) diejenigen Raumbereiche, welche durch Objektoberflächen verdeckt werden. Darauf aufbauend wird die Messbarkeit durch Nebenbedingungen zum Punktabstand, Tiefenschärfebereich und Sensorsehvolumen sichergestellt. Als Maß der Optimalität wählen Tarabanis et al. die Robustheit und somit Positionen, von denen die Nebenbedingungen mit größerer Toleranz – also komfortabler – erfüllt werden können. Damit können die besten Ansichten für die gewählten Objektdetails mittels nichtlinearer Optimierung berechnet werden. Abschließend erfolgt eine Abbildung der so ermittelten generalisierten Ansichten auf durch das Sensorsystem realisierbare Ansichten (z. B. Bewegungsbereich des Roboters, diskrete Sensorbrennweiten u.ä.).

Zur Verifikation der berechneten Ansichten werden die simulierten Ansichten den realen Kameraaufnahmen gegenübergestellt und die Auflösungsnebenbedingung durch Messungen auf Pixelbasis kontrolliert. Obwohl diese Arbeit damit nicht auf die 3-D Rekonstruktion fokussiert ist, so wird auf diese Arbeit oft wegen ihrer frühen Einbeziehung eines erweiterten Parameterraumes mittels generalisierter Ansichten Bezug genommen.

In ihren Arbeiten zur Offline-Ansichtenplanung, speziell für Lichtschnittsensoren mit (auf die Objektgröße bezogen) kleinem Sensorsehbereich streben Prieto et al. [60, 59] explizit die Reduzierung der Messunsicherheit als Ziel der Ansichtenplanung an. Ihr Ansatz ist für beliebige Objekte geeignet. Unter Nutzung des als nicht-uniforme rationale B-Splines (NURBS) gegebenen Objektmodells werden eine Reihe von 2D Ansichten erstellt. Daraus werden durch systematische Abtastung eine Menge von optimalen Ansichten berechnet, welche die einzelnen Objektflächen vollständig abdecken. Die Optimalität bezieht sich dabei auf den kleinstmöglichen Abstand (innerhalb eines gegebenen Arbeitsbereichs) des Sensors von der Objektoberfläche sowie auf den kleinstmöglichen Winkel zwischen Sensorsehstrahl und Oberflächennormale.

Eine Reduzierung der Ansichtenanzahl wird durch eine Heuristik angestrebt, welche Ansichten mit geringem Flächengewinn verwirft. Durch Parameteränderungen<sup>10</sup> benachbarter Ansichten auf Kosten der Genauigkeit wird die fehlende Vollständigkeit kompensiert. Aufgrund des verwendeten Lichtschnittsensor-Messprinzips liegt der Fokus der Arbeit weniger auf der Minimierung der Ansichtenzahl, sondern auf der kompletten und genauen Erfassung der einzelnen Objektoberflächen. Dabei wird in Kauf

<sup>9</sup>Position  $x, y, z$  und Orientierung des Sensors (in sphärischen Koordinaten  $\varphi, \vartheta$ ). Weiterhin werden Bildschnittweite  $d$ , Brennweite  $f$  und Eintrittspupillendurchmesser  $a$  der verwendeten Optik modelliert.

<sup>10</sup>Vor allem durch eine geringfügige Erhöhung des Messabstandes wird die Fläche einer einzelnen Ansicht vergrößert.

genommen, dass mögliche Synergieeffekte, z. B. durch die zeitgleiche Erfassung geeigneter benachbarter Objektoberflächen, nicht genutzt werden. Anstelle der Ansichtenzahlminimierung nutzen die Autoren Pfadplanung, um die Rekonstruktionszeit zu reduzieren.

Als Hilfsmittel zur Prüfung der Sichtbarkeit und Kollisionsfreiheit erzeugen Prieto et al. ein Voxelmodell der Oberfläche des Messobjektes. Die Sichtbarkeit wird dabei mittels Strahlverfolgung, die Kollisionsfreiheit durch Testen des Sensorpfades gegenüber dem Objektmodell sichergestellt.

Die Sensorcharakterisierung wurde experimentell durchgeführt. Mittels kontrollierter Veränderung des Beobachtungs- / Beleuchtungswinkels und des Messabstands ermittelten die Autoren Funktionsparameter zur Berechnung der Kovarianzmatrizen in Abhängigkeit von Winkel und Abstand. Aus den Experimenten wird ein unabhängiger Einfluss der beiden Kriterien auf die Messunsicherheit abgeleitet, welches die Linearkombination der einzelnen Kovarianzmatrizen zu einer resultierenden erlaubt. Der Zusammenhang zwischen zunehmendem Antastwinkel und Messentfernung auf der einen, und zunehmender Messunsicherheit auf der anderen Seite wird deutlich gezeigt. Aus diesen Experimenten werden letztendlich aber nur (relativ strenge) Schwellwerte für den maximal zulässigen Winkel und der minimalen bzw. maximalen Sensorentfernung abgeleitet.

Experimentelle Daten werden für einen Laser-Lichtschnittsensor vorgestellt. Im Vergleich zu einem Standarddigitalisierungsverfahren<sup>11</sup> verbessert das vorgestellte Planungsverfahren den mittleren Abstand der Messpunkte zum CAD-Modell. Objektabhängig fallen diese zwischen 13 % für komplexe und 35 % für einfache Objekte aus. Die Autoren geben jedoch weder Vergleichswerte zur erzielten Vollständigkeit noch zur Anzahl benötigter Ansichten an. Der Fokus der Arbeit liegt indes deutlich auf der Verbesserung der Genauigkeit und nicht auf der Minimierung der benötigten Ansichten [59]. Durch die starke Einbeziehung der Pfadplanung für die Lichtschnittsensor-basierte 3-D-Erfassung in den Planungsansatz ist die allgemeine Anwendbarkeit für flächenhaft antastende 3-D-Sensoren gering.

### 3.3 Diskussion des aktuellen Forschungsstandes

Nachdem in den vorangegangenen Abschnitten der aktuelle Stand der Technik vorgestellt wurde, soll hier zusammenfassend auf einige offene Punkte eingegangen werden. Dabei wird, wo es zutreffend ist, auf Scotts sechzehn *Anforderungen an Ansichtenplanungsmethoden* ([74], siehe auch Abschnitt 3) verwiesen.

Das wohl auffälligste Defizit in der Ansichtenplanungsliteratur ist das Fehlen sowohl einer quantitativen Vergleichsmetrik als auch, dadurch bedingt, eines Vergleichs der verschiedenen Planungsmethoden untereinander und mit manuellen Planungsergebnissen (dies entspricht der Planungsanforderung der mit menschlichen Experten vergleichbaren *Leistung*). Ausnahmen bilden hier die Arbeiten von Li und He et al. [39, 28] und Scott [69], die ihren Ansatz mit einem anderen vergleichen. Während die Gegenüberstellung mittels verschiedener Planungsansätze erhaltener Messergebnisse unterschiedlicher Testkörper, gemessen von verschiedenen Sensoren naturgemäß schwierig ist, gibt es doch bisher auch kaum Bemühen, zumindest über Abbildungen der rekonstruierten Körper hinausgehende quantitative Kennzahlen für den Rekonstruktionsfortschritt anzugeben. Einzelne Arbeiten geben zumindest den mittleren Fehler zu Ground-Truth-Daten [59] oder die tatsächlich erzielte Vollständigkeit [69] an. Um eine grundsätzliche Vergleichbarkeit zu gewährleisten, sollte zusätzlich zur meist angegebenen Ansichtenanzahl immer die erfasste Oberfläche im Verhältnis zur maximal erfassbaren Objektoberfläche (in Abhängigkeit

<sup>11</sup>Vier Ansichten auf einer View Sphere im Abstand von 90° geographischer Länge in 45° geographischer Höhe.



von C-Space und Sensorcharakteristik), der mittlere Fehler zu einem Ground-Truth-Modell und der mittlere Messpunktstand auf der Objektoberfläche angegeben werden. Siehe dazu auch Munkelt et al. [54] und Abschnitt 4.4.

Viele der vorgestellten Methoden werden darüber hinaus ausschließlich mit simulationsbasierten Experimenten verifiziert, u.a. [82, 7, 68, 45, 69]. Der Vergleich verschiedener Algorithmen oder Parametrisierungen über Simulationen ermöglicht Einblicke in die Leistungsfähigkeit der betrachteten Ansätze ohne hardwarespezifische Einschränkungen. Zum Beispiel hat ein limitierter C-Space einen großen Einfluss auf die realisierbaren Messergebnisse und die Eignung einer Planungsmethode für spezielle Objektklassen. Nur wenn die Modellierung von Sensor, Positioniersystem und Modell hinreichend genau ist, lassen sich zufriedenstellende Messergebnisse – mit hoher Übereinstimmung zur Vorhersage durch das Planungssystem – erzielen. Dies berührt die Planungsanforderungen nach Berücksichtigung des C-Space und der *Leistungsfähigkeit des Positioniersystems*. Die experimentelle Evaluierung mit realen Sensormessdaten sollte deshalb ebenfalls Teil jeder Veröffentlichung sein.

Zur Evaluation der Planungsmethoden kommen eine Vielzahl unterschiedlicher Testobjekte zum Einsatz (siehe auch Abb. 3.2). Dies allein erschwert schon die Vergleichbarkeit der Ansätze. Einige der Planungsalgorithmen setzen des Weiteren spezielle Objektklassen voraus. Dazu zählen z. B. sich vollständig im Sensorsehvolumen befindliche Objekte niedriger Komplexität (also schwach strukturierte „glatte“ Oberflächen ohne größere Konkavitäten), u.a. bei [39, 28] und [14, Kapitel 8 und 9, S.119–205], oder Polyeder [65]. Dies berührt die Planungsanforderungen nach vollständiger Unterstützung möglicher *Objektopografien*. Ist aber die Objektkomplexität zu gering, so ist der Vorteil durch Ansichtenplanung, gemessen am zeitlichen Aufwand der Planung, für viele Objekte fraglich, wenn geringfügig längere, objektklassenspezifisch sinnvoll parametrisierte, reguläre Ansichtenpläne<sup>12</sup> vergleichbare Rekonstruktionsergebnisse liefern.

In Verletzung der Planungsanforderungen nach Unterstützung *generalisierter Ansichten* und Nutzung von *6-D-Freiheitsgraden* des Positioniersystems reduzieren viele Planungsansätze die Anzahl freier Parameter. Dies dient vor allem der Minimierung des Berechnungsaufwandes. Beispiele dafür sind Objektdrehteller, u.a. bei [48, 47, 58, 40, 28], und der verbreitete Einsatz der View Sphere zur Sensorpositionierung, u.a. bei [82, 7, 65, 46, 98, 66]). Zusätzlich diskretisieren viele dieser Ansätze den resultierenden Ansichtenraum. Durch diese Einschränkung bei den freien Parametern werden vor allem räumlich kompakte Objekte unterstützt.

Während einige Ansätze den verwendeten Sensor detailliert modellieren (u.a. [59, 69]), vereinfachen viele diesen unnötig. Ein triangulationsbasiertes Sensorsystem mit aktiver Beleuchtung ist inhärent *bistatisch*, genauso haben die meisten Sensoren ein beschränktes *Sensorsehvolumen* mit definierter *Sensormesscharakteristik*. Nur bei Beachtung dieser Nebenbedingungen können verlässliche Aussagen über zu erwartende Messergebnisse durch das Planungssystem gemacht werden.

Die meisten Ansätze betrachten ein Oberflächenelement als messbar, wenn der Antastwinkel seiner Messung kleiner als ein vorher definierter Schwellwert ist. Diese Antastwinkelnebenbedingung ersetzt bei diesen Ansätzen die explizite Betrachtung der Messunsicherheit, die Minimierung des Antastwinkels ersetzt die Minimierung der Messunsicherheit.

In der Ansichtenplanung werden generell kooperative Objektoberflächen vorausgesetzt, also solche, bei denen das projizierte Muster durch den Sensor angemessen registriert werden kann. Dies trifft z. B.

<sup>12</sup>Ein regulärer Ansichtenplan ist platziert den Sensor in regelmäßigen Abständen, z. B. auf einer Kreisbahn um das Objekt.

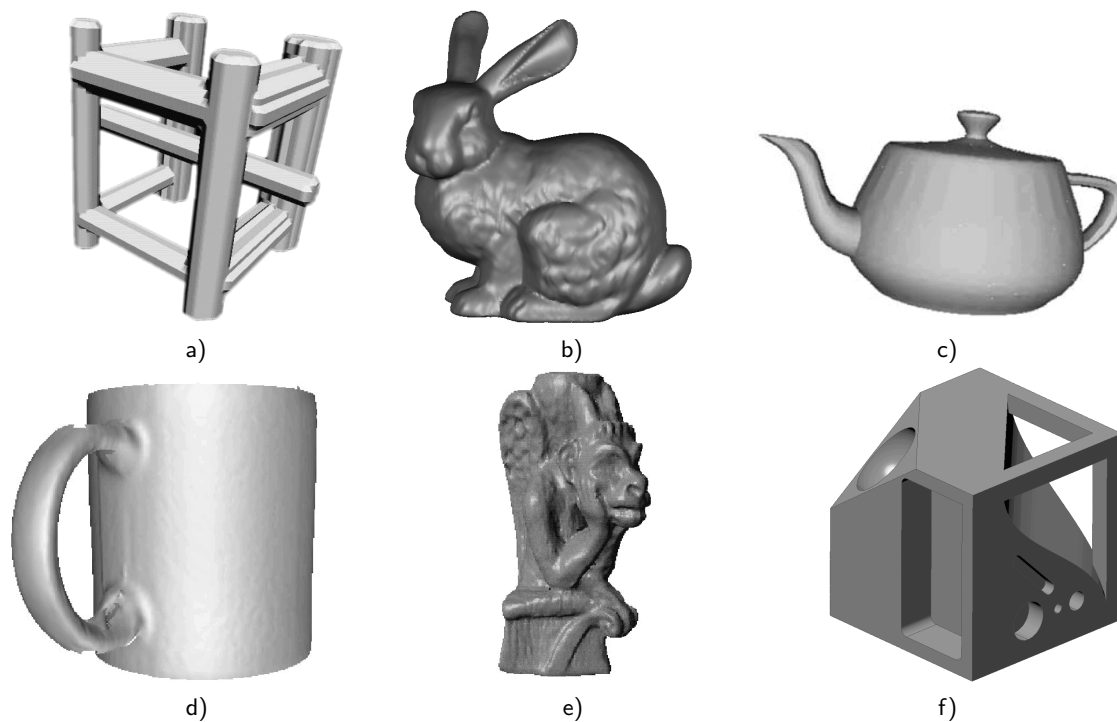


Abbildung 3.2: Typische Beispiele für in der Ansichtenplanung genutzter Testobjekte: a) Rohrmodell [9], b) Stanford Bunny [88], c) Teekanne [46], d) Tasse [58], e) Statue (Gargoyle) [58], f) NBV Testobjekt [54].

für (teilweise) spiegelnde Oberflächen oder solche mit starker Volumenstreuung nicht zu. In der Praxis werden solche Objekte möglichst durch geeignete Vorbereitungsmaßnahmen (wie z. B. Einsprühen mit weißer Farbe) messbar gemacht. Auch die ausreichende Überlappung der Ansichten zur Sicherstellung einer erfolgreichen Registrierung der Einzelansichten ist in der Praxis durch die sich bei der vollständigen Erfassung komplexer Messobjekte ergebenden hohen Redundanz zwischen den Aufnahmen kein separates Planungsziel mehr.

Mit der Weiterentwicklung der Sensor- und Rechnertechnologie muss sich die Ansichtenplanung auch gegenüber dem erschöpfenden, schnellen Scannen durch Echtzeit-3-D-Scanner (z. B. Weise [95]) abgrenzen. Diese integrieren einen 3-D-Datenstrom in Videofrequenz ( $\geq 30$  Hz) in ein 3-D-Modell des Objektes. Nur in Anwendungsbereichen, in denen besondere Anforderungen, wie z. B. hohe Sensorauflösung und niedrige Messunsicherheit, gelten, wird die Ansichtenplanung ihren Berechnungsaufwand auch in Zukunft rechtfertigen können.

## Kapitel 4

# Ansichtenplanung für die optische 3-D Vermessung

Dieses Kapitel konkretisiert das Ansichtenplanungsproblem im Kontext der optischen 3-D Vermessung mittels Streifenprojektion. Dazu werden in Abschnitt 4.1 die allgemeinen Grundlagen definiert, um dann im Abschnitt 4.2 die spezifischen Besonderheiten der Streifenprojektion erläutern zu können. Abschnitt 4.3 untersucht, wie sich die Ansichtenplanung als Optimierungsproblem formulieren lässt. Das Kapitel wird durch Abschnitt 4.4 abgeschlossen mit Betrachtungen zur quantitativen Bewertung von Rekonstruktionsergebnissen der Ansichtenplanung nebst einem Vorschlag zur vergleichenden Leistungsbewertung.

### 4.1 Definitionen

Als *Ansicht* wird im Folgenden die mit festen intrinsischen und extrinsischen Parametern durchgeführte 3-D Rekonstruktion einer Tiefenkamera, also eines Entfernungen messenden und flächenhaft antastenden Sensors, bezeichnet. In der Streifenprojektion entspricht eine Ansicht einer geordneten 3-D Punktwolke im Raster einer Kamera, welche in einer konkreten Sensorkonfiguration aufgenommen wurde. Eine Ansicht bildet typischerweise nur einen Teilbereich des Messobjektes ab (siehe Abb. 4.3 a). Zum anderen wird als Ansicht  $v$  eine Sensorkonfiguration bezeichnet.

Wie in Kapitel 3 beschrieben, reduzieren viele Planungsansätze den Ansichtenraum  $V$ . Das am häufigsten eingesetzte Positioniermodell ist das der View Sphere. Zusätzlich zur Einschränkung auf Sensorpositionen auf einer Kugel mit festem Radius um das Objekt (Blickrichtung auf das Zentrum) werden mögliche Positionen oft auch auf *diskrete* Positionen auf der Kugeloberfläche limitiert. Im Gegensatz dazu stehen Ansätze, welche einen *kontinuierlichen* Ansichtenraum unterstützen. Werden neben Position und Orientierung des Sensors noch weitere planbaren Parameter unterstützt, so spricht man von *generalisierten Ansichten*. Mögliche zusätzliche Parameter sind z. B. Belichtungszeit, Brennweite oder Fokus.

Sind vor Messbeginn Form und Lage des zu vermessenden Objektes bekannt, so können modellbasierte Planungsverfahren (siehe Abschnitt 3.2) eingesetzt werden, um das Messobjekt mit einer speziell angepassten Folge von Ansichten zu rekonstruieren. Ist die Form des Objektes jedoch unbekannt, können

datengetriebene Verfahren 3.1 eingesetzt werden, um sukzessive das bisher unbekannte Messvolumen zu erkunden und sich darin befindende Oberflächen zu rekonstruieren.

Eine wichtige Frage für Ansichtenplanungsansätze ist die nach der *Terminierungsbedingung*: Wann ist die Messaufgabe erfüllt? Objektiv am einfachsten ist es, die Planung nach einer vorgegebenen Ansichtenanzahl bzw. nach Erreichen definierter Kosten abzubrechen. Diese können eine Auswahl aus der Planungszeit, der Sensorpositionierzeit und den Weiterverarbeitungskosten beinhalten. Damit kann das beste Rekonstruktionsergebnis für die spezifizierten Kosten erreicht werden. Unklar bleibt jedoch, welche Rekonstruktionsqualität erreicht wurde.

Hier setzen Ansätze an, die während der Planung die erzielte Vollständigkeit bzw. den mittleren Rekonstruktionsfehler modellieren. Diese leistungsorientierte Planung ist, verbunden mit einem genauen Sensor- und Positioniersystemmodell, in der Lage, nach Erreichen vorgegebener Abbruchkriterien für diese Werte, die Planung selbständig abzuschließen. Eine mögliche Variante ist, die Planung ebenfalls zu beenden, wenn die prognostizierte Verbesserung im aktuellen Planungsschritt kleiner als ein bestimmter Schwellwert ist.

Eine letzte Gruppe von Terminierungsbedingungen analysiert das rekonstruierte 3-D Modell. Ist dieses z. B. geschlossen bzw. sinkt die flächengewichtete Artefaktanzahl unter einen bestimmten Wert, so kann auf eine vollständige 3-D Rekonstruktion geschlossen werden.

Eng mit der Terminierungsbedingung verknüpft ist die Definition des *Planungszieles*. Dieses kann auch, abhängig von der Planungsphase, unterschiedlich sein (siehe Kapitel 3). In dieser Arbeit wird die Planung von Ansichten zur hochgenauen 3-D Rekonstruktion (engl. „high fidelity 3-D object reconstruction“, siehe [69]) untersucht. Dies bedeutet eine Rekonstruktionsgenauigkeit im Mikrometerbereich mit vielen 3-D Messpunkten pro Quadratmillimeter<sup>1</sup>. Deshalb soll im Mittelpunkt dieser Arbeit die 3-D Rekonstruktion eines a priori hinreichend bekannten Objektes stehen, welches mit der kleinstmöglichen, nach oben beschränkten Anzahl von Ansichten so vollständig wie möglich unter Berücksichtigung einer maximal zulässigen Messunsicherheit erfasst werden soll. In Abschnitt 4.3.2 wird auf die Implikation dieses Planungszieles näher eingegangen.

Vereinfachend betrachtet lässt sich bei der 3-D Rekonstruktion mit aktiver Beleuchtung jeder erfolgreich gemessene 3-D Punkt auf mindestens zwei, bei der phasenkorrelierenden Streifenprojektion auf drei sich in ihm treffende Strahlen zurückführen: Die Sensorsehstrahlen  $rr_1, rr_2$  der beteiligten Kameras  $K_1, K_2$  und der (hier nicht weiter betrachtete) Beleuchtungsstrahl  $rr_p$  des Projektors  $P$  (siehe Abb. 4.1). Der Triangulationswinkel  $\theta_t$  wird als konstant angenommen und ergibt sich bei Stereokamerasystemen aus der sensorspezifischen *Basislänge* zwischen den beiden Kameras und der Messentfernung. Er hat entscheidenden Einfluss auf die Messunsicherheit der 3-D Messung [32]. Um auch kleine Konkavitäten (z. B. Bohrungen) mit einem Verhältnis von Breite zu Tiefe von 1:1 und tiefer vermessen zu können, wird  $\theta_t$  typischerweise  $\leq 20^\circ$  gewählt. Der *Antastwinkel*  $\theta_a$  gibt den größten Winkel zwischen der Oberflächennormale  $\mathbf{n}$  und den Sensorsehstrahlen  $rr_1, rr_2$  an:

$$\theta_a = \max(\angle(rr_1, \mathbf{n}), \angle(rr_2, \mathbf{n})). \quad (4.1)$$

Mit ansteigendem  $\theta_a$  steigt auch die Messunsicherheit [59] (siehe dazu auch die Experimente in Abschnitt 4.2). Wird  $\theta_a$  größer als der sensorspezifische Grenzwinkel  $\theta_b < 90^\circ$ , steigt die resultierende

<sup>1</sup>Aus Scott et al [69]: engl. „... scanning precision of a few tens of microns at a density of many samples per square millimeter.“.

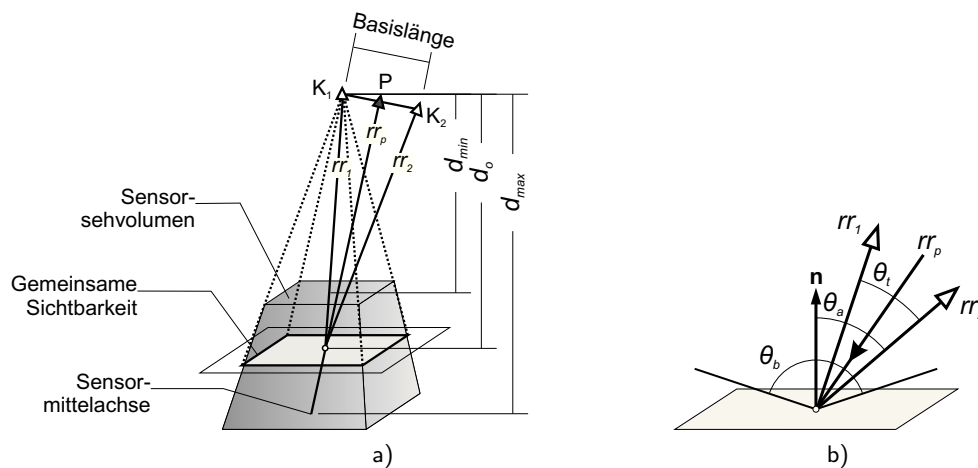


Abbildung 4.1: Phasenkorrelierende Streifenprojektion: a) Sensorkopfgeometrie (aus Gründen der Übersichtlichkeit ist nur das Sensesehvolumen der Kamera  $K_1$  skizziert); b) Sensesehstrahlen, Antastwinkel und weitere relevante Winkel (in Anlehnung an [58]).

Messunsicherheit stark an. Deshalb werden 3-D Messpunkte mit  $\theta_a > \theta_b$  typischerweise als unakzeptabel verworfen. Gebräuchliche Grenzwinkel sind  $60^\circ \leq \theta_b \leq 70^\circ$  [59, 69].

Eine weitere Eigenschaft optischer 3-D Rekonstruktion sind die beschränkten Tiefenschärfebereiche von Beleuchtung und / oder Kameras. Bedingt durch die Konfiguration der jeweiligen Optiken ergibt sich für den Messabstand ein zulässiger Bereich  $d_{min} \leq d_o \leq d_{max}$  um die optimale Messentfernung  $d_o$ . Distanzen außerhalb des zulässigen Bereiches führen zu einem starken Anstieg der Messunsicherheit und werden typischerweise als unakzeptabel verworfen [59].

Der Raumbereich, in dem ein Sensor gültige 3-D Messungen durchführen kann, wird als *Sensesehvolumen* (engl. „view frustum“) bezeichnet (siehe Abb. 4.1 a). Es wird typischerweise als ein an der optischen Achse des Sensors ausgerichteter Pyramidenstumpf modelliert. Bei bistatischen Sensoren können nur Oberflächen rekonstruiert werden, welche sich im vereinigten Volumen *beider* Sensoren befinden. Die *Sensormittelachse* gibt die Blickrichtung des Sensors an. Bei bistatischen Sensoren verläuft sie idealerweise orthogonal zur Basislänge durch den Schnittpunkt der optischen Achsen des 3-D Sensors.

Der Sensorkopf wird typischerweise vorab kalibriert. Dadurch sind die intrinsischen Parameter der Kameras sowie ihre relative Lage zueinander bekannt. Beim sog. „Eye-in-hand“ Ansatz, bei dem der Sensorkopf (das „Auge“) durch ein Positioniersystem (die „Hand“) bewegt wird, kann die Startlösung der extrinsischen Parameter der Kameras für die Bündelblockausgleichung z. B. durch die *Hand-Auge-Transformation* (HAT) [87, 75] bestimmt werden. Die HAT beschreibt dabei die starre Transformation zwischen der Lage und Orientierung der Roboterhand und des Sensorkopfes, der fest an der Hand montiert ist. Zuvor muss durch eine Kalibrierung mit mehreren Ansichten die Beziehung zwischen den Kamera-Koordinatensystemen  $S_C$  und dem Endeffektor-Koordinatensystem  $S_T$  relativ zum Roboterkoordinatensystem  $S_B$  bestimmt werden (siehe Abb. 4.2 a).

Die Anwendung der HAT erlaubt die Überführung der 3-D Daten mehrerer Ansichten in ein gemeinsames Koordinatensystem mit bekannter Orientierung. Umgekehrt können aus berechneten Kameraorientierungen die zugehörigen Parameter des Endeffektors berechnet werden. Der Koordinatenursprung des Weltkoordinatensystems wird in dieser Arbeit in die Basis des zur Positionierung des Sensors genutzten Positioniersystems (z. B. in den Fuß des Roboterarms) gelegt.

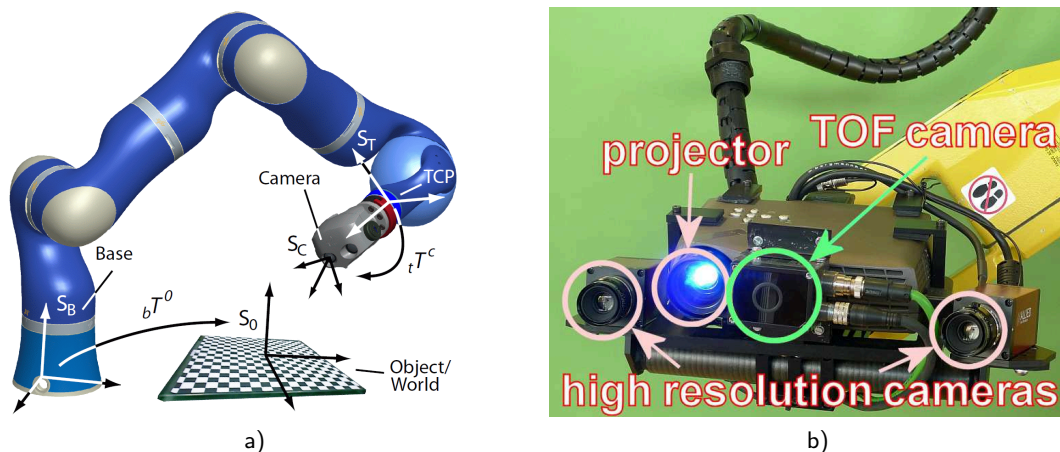


Abbildung 4.2: a) Hand-Auge-Transformation (Abb. aus [78], Seite 4647). b) Sensorkopf des verwendeten „kolibri ROBOT“ für die phasenkorrelierende Streifenprojektion (zwei Kameras, Projektor, montiert auf 6-DOF Roboterarm). Die zusätzliche TOF-Kamera (grün markiert) kann optional zur Grobmodellerstellung eingesetzt werden.

## 4.2 Ansichtenplanung im Kontext der Streifenprojektion

Diese Arbeit konzentriert sich auf die Planung von Ansichten für 3-D Sensoren mit aktiver Beleuchtung. Die im Detail zum Einsatz kommende Methode ist die phasenkorrelierende Streifenprojektion [34]. Der Sensor, welcher als Sensorkopf bezeichnet wird, besteht aus drei starr miteinander verbundenen Einheiten: Einem digitalen Projektor  $P$  und zwei digitalen Kameras  $K_1, K_2$  (siehe Abb. 4.1 a) und Abb. 4.2 b). Projektor und Kameras sind so konfiguriert, dass man in optimaler Messentfernung  $d_o$  die größtmögliche Vereinigungsmenge von beleuchtetem und beobachteten Feldern erhält.

Der Projektor projiziert dabei eine Mustersequenz bestehend z. B. aus einer Folge von Gray-Code- und  $(1 + \cos)$ -Streifen [32]. Das durch das Messobjekt verformte Streifenmuster wird durch beide Kameras beobachtet. Mittels Methoden aus der Interferometrie [19] werden für jeden Kamerabildpunkt, welcher einen durch den Projektor beleuchteten Objektpunkt beobachtet hat, Phasenwerte berechnet. Gleiche Objektpunkte weisen dabei in beiden Kamerabildern einer Ansicht die gleiche Phase auf. Dadurch reduziert sich das Korrespondenzproblem auf das Suchen des Bildpunktes mit gleicher Phase. Bei durch Bündelblockausgleichung (siehe Abschnitt 2.1.2) bekannten intrinsischen und extrinsischen Parametern der Kamera kann anschließend die 3-D Koordinate des Objektpunktes durch Triangulation bestimmt werden [27].

Um eine *Objektoberfläche* mittels Streifenprojektion rekonstruieren zu können, müssen einige Grundvoraussetzungen erfüllt sein. So wird eine ideal diffus reflektierende Objektoberfläche (sog. Lambert-Fläche) eines lichtundurchlässigen Körpers angenommen. Mit steigendem Reflexionsgrad des Materials sinkt zum einen die Phasenmodulation, zum anderen kommt es vermehrt zu Spiegelungen an Objektflächen mit entsprechender Ausrichtung zu Projektor und Kamera. Die Phasenmodulation (engl. „fringe visibility“, K. Creath [19]) gibt dabei die Amplitude des rekonstruierten  $(1 + \cos)$ -Streifen-Signals an. Unterschreitet die Modulation einen bestimmten, vom Rauschen der Kameras abhängigen Schwellwert, so steigt das Phasenrauschen [19] und damit die Unsicherheit in der 3-D Berechnung stark an.

Bei Spiegelungen wird der Dynamikbereich der Kamera überschritten und es können keine 3-D

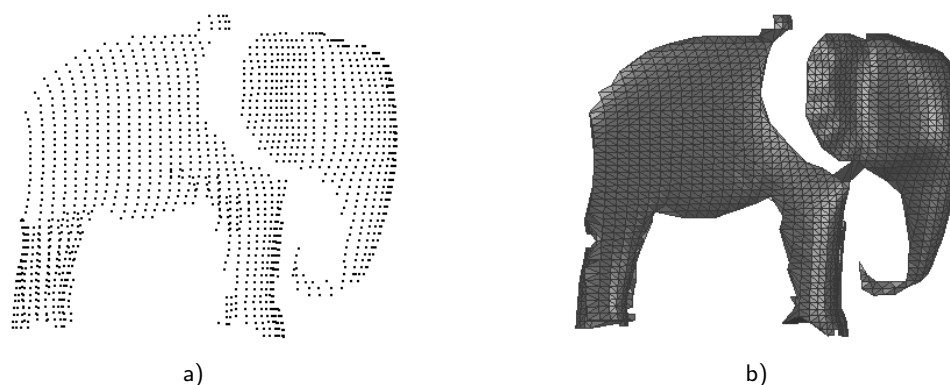


Abbildung 4.3: Streifenprojektion ist ein flächenhaft antastendes Messverfahren. a) ausgedünnte Punktwolke einer einzelnen Ansicht, b) nachbarschaftsbasierte Oberflächenextraktion.

Daten an den entsprechenden Bildpunkten rekonstruiert werden. Ist der Körper lichtdurchlässig, so sinkt auch hierdurch die Modulation und es kommt durch Volumenstreuung unterhalb der Objektoberfläche zu systematischen Fehlern bei der Phasenberechnung und damit ebenfalls bei der 3-D Berechnung.

Eine weitere Grundannahme betrifft die notwendige *gemeinsame Sichtbarkeit* der vom Projektor beleuchteten und zu rekonstruierenden Oberfläche durch beide Kameras (siehe Abb. 4.1 a). Ist der Projektor z. B. durch ein Detail des Messobjektes verdeckt, kann keine Phase berechnet und damit keine Punktkorrespondenz bestimmt werden. Ist eine der Kameras verdeckt, können für die entsprechenden Bildpunkte keine Phase und damit ebenfalls keine korrespondierenden Bildpunkte in der zweiten Kamera bestimmt werden.

Solange sich Projektor und Kameras, wie in typischen Sensorkopfgeometrien üblich, näherungsweise auf einer Linie befinden (siehe Abb. 4.2), ist es für die Ansichtenplanung ausreichend, nur die beiden äußeren Elemente als *bistatischen Sensor* zu betrachten. In dieser Arbeit wird der Projektor somit nicht modelliert, sondern ausschließlich die ihn auf jeder Seite umschließenden Kameras.

Im Unterschied zur 3-D Rekonstruktion ohne aktive Beleuchtung oder mittels Lichtschnittsensoren ist die Streifenprojektion ein *flächenhaft antastendes Messverfahren*. Dies bedeutet im Allgemeinen, dass mit einer Ansicht ein dichtes Gitter von Millionen von 3-D Messpunkten mit expliziter Nachbarschaftsbeziehung erfasst wird. Die durch das Pixelraster der Kameras bedingte Gitterstruktur der Messpunkte ermöglicht wiederum die triviale Oberflächenextraktion, indem benachbarte Punkte durch Dreiecke verbunden werden (siehe Abb. 4.3). Speziell bedeutet dies aber auch, dass der Durchmesser eines in den Objektraum projizierten Sensorpixels mehr als eine Größenordnung größer sein kann als die Messunsicherheit entlang der Sensormittelachse. Dies wiederum führt zu einem Sensitivitätsvektor (die Richtung der maximalen Empfindlichkeit des Messsystems) des Sensors, welcher im Allgemeinen in Oberflächennormalenrichtung zeigt.

**Einflüsse auf die Messunsicherheit** Die Messunsicherheit von triangulationsbasierten 3-D Sensoren mit aktiver Beleuchtung hängt von einer Reihe von Faktoren ab. Ein Großteil davon wird üblicherweise systemspezifisch festgelegt und während einer Messung nicht wesentlich verändert, z. B. die Art der aktiven Beleuchtung, die 3-D Rekonstruktionsmethode, die Pixelanzahl und Bittiefe der Kameras und des Projektors, der Triangulationswinkel und die Anzahl der Aufnahmen pro Ansicht. Einige Faktoren können jedoch durch die Ansichtenplanung gezielt beeinflusst werden, z. B. Belichtungszeit, Brennweite, Fokus,

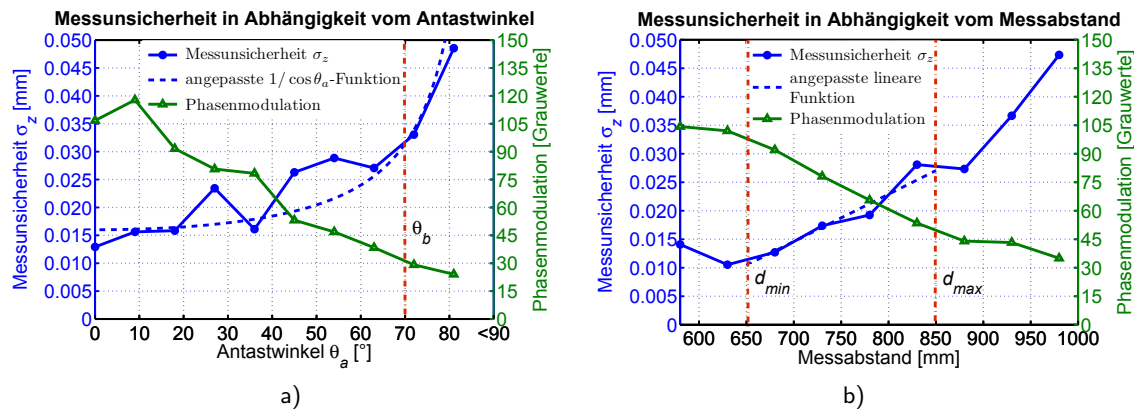


Abbildung 4.4: Einflüsse auf die Messunsicherheit  $\sigma_z$  in der Streifenprojektion: a) Unsicherheit und Phasenmodulation in Abhängigkeit vom Antastwinkel (feste Messentfernung  $d = 750$  mm) b) Unsicherheit und Phasenmodulation in Abhängigkeit der Messentfernung (fester Antastwinkel  $\theta_a = 0^\circ$ ).

Messabstand und Antastwinkel. Während der Antastwinkel in vielen Arbeiten (u.a. [81, 47, 58, 59, 69]) betrachtet wird und der Messabstand in einigen [81, 59, 69], so werden nur von Tarabanis et al. [81] zusätzlich Brennweite und Fokus im Rahmen der Messunsicherheitsbetrachtung der 3-D Rekonstruktion modelliert.

Im Rahmen dieser Arbeit wurde die in der Literatur – oft im Kontext von Laser-Lichtschnittsensoren – angegebene Abhängigkeit der Messunsicherheit vom Antastwinkel und Messabstand überprüft. Dabei wurde die von Prieto [59], Mehdi-Souzani [49] und Scott [69] beschriebene Messmethode angewandt. Diese rekonstruiert einen konkreten Objektpunkt auf einer Ebene durch wiederholte 3-D Messungen unter vergleichbaren Messbedingungen. Nach Abschluss solch einer Serie wird der Antastwinkel bzw. der Messabstand variiert und eine neue Messreihe gestartet. Abschließend wird durch die Berechnung der Kovarianzmatrix und deren Eigenwertzerlegung die Standardabweichung der 3-D Messwerte bestimmt. Wie in der Literatur berichtet, ist die Messunsicherheit durch die Standardabweichung entlang des Sensorsehstrahls  $\sigma_z$  dominiert. In dieser Arbeit werden beide Begriffe deshalb synonym verwendet. Weitere Details sind in Abschnitt 5.2.1 dargestellt.

Zuerst wurde bei gleichbleibender Messentfernung von  $d_o = 750$  mm der Antastwinkel  $\theta_a$  variiert. Wie in Abbildung 4.4 a) deutlich zu sehen ist, steigt mit zunehmendem Antastwinkel die Messunsicherheit  $\sigma_z$  an, während gleichzeitig die Phasenmodulation linear sinkt. Überschreitet der Antastwinkel  $\theta_a$  den Grenzwinkel von  $\theta_b = 70^\circ$ , so steigt die Messunsicherheit deutlich an (z. B.  $\theta_a = 63^\circ \rightarrow$  Faktor  $\approx 2,1$  im Vergleich zu  $\theta_a = 82^\circ \rightarrow$  Faktor  $\approx 3,7$ ). Der Zusammenhang zwischen  $\theta_a$  und  $\sigma_z$  kann dabei, wie auch z. B. in [58, 69] angegeben, durch folgenden Zusammenhang approximiert werden:

$$\sigma_z(\theta_a) \sim \frac{\sigma_0}{\cos\theta_a}, \quad (4.2)$$

wobei  $\sigma_0$  die Messunsicherheit in Sensorstandardlage<sup>2</sup> wiedergibt. Zusammen mit dem Antastwinkel  $\theta_a$  steigt außerdem der mittlere Punktabstand  $d_{av}$ .

In Abb. 4.4 b) ist die Auswirkung der Variation der Messentfernung  $d$  bei gleichbleibendem Antastwinkel von  $0^\circ$  auf die Messunsicherheit und die Phasenmodulation dargestellt. Im spezifizierten Tiefenschärfebereich des Sensorkopfes von  $d_o \pm 100$  mm steigt  $\sigma_z$  nahezu linear mit der Entfernung

<sup>2</sup>Als Sensorstandardlage wird die Sensorposition mit Antastwinkel  $\theta_a = 0^\circ$  in optimaler Messentfernung  $d_o$  bezeichnet.



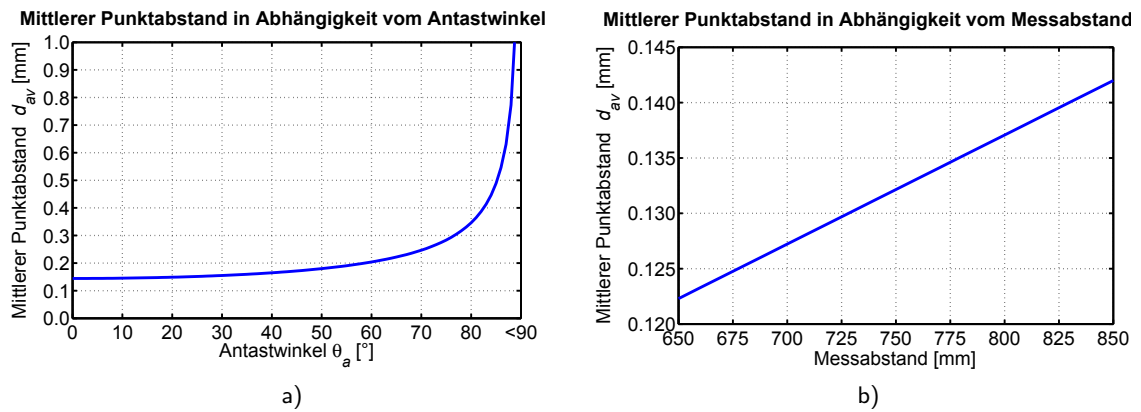


Abbildung 4.5: Simulation der Veränderung des mittleren Punktabstandes  $d_{av}$  in Abhängigkeit von: a) Antastwinkel (feste Messentfernung  $d = 750$  mm) und b) Messentfernung (fester Antastwinkel  $\theta_a = 0^\circ$ ).

an (Faktor  $\approx 1,4$  bei  $d_{max}$  gegenüber  $d_o$ ), während die Phasenmodulation linear sinkt. Dabei ist das weitere Sinken der Messunsicherheit für Messentfernungen  $d_{min} \leq d < d_o$  auf den größer werdenden resultierenden Triangulationswinkel zurückzuführen. Für Entfernungen  $d \leq d_{min}$  steigt die Messunsicherheit aufgrund der zunehmenden Unschärfe allerdings wieder an. Damit kann innerhalb von  $d_{min} = 650 \leq d_o \leq d_{max} = 850$  mm der Zusammenhang zwischen der Messentfernung  $d$  und  $\sigma_z$  wie folgt approximiert werden:

$$\sigma_z(d) \sim (1 + k(d - d_o)) \sigma_0, \quad (4.3)$$

mit  $k \ll 1$  einem sensorspezifisch zu bestimmendem Faktor.

In Kombination der Gleichungen (4.2) und (4.3) ergibt sich die kombinierte Messunsicherheit:

$$\sigma_z(\theta_a, d) \sim \frac{(1 + k(d - d_o)) \sigma_0}{\cos \theta_a}. \quad (4.4)$$

Für farblich homogene Objekte mit ideal diffus reflektierender Oberfläche (Lambert-Fläche) kann eine globale Belichtungszeit experimentell ermittelt werden. Diese führt für jede zulässige Kombination von Antastwinkel und Messentfernung zu einer zulässigen Phasenmodulation und damit zu einer erfolgreichen 3-D-Rekonstruktion.

Die Veränderung des mittleren Punktabstandes  $d_{av}$  in Abhängigkeit vom Antastwinkel und der Messentfernung wurde für den verwendeten Sensorkopf simuliert. Abbildung 4.5 a) zeigt deutlich, dass bei Vergrößerung des Antastwinkels der mittlere Punktabstand bis zum Grenzwinkel moderat (Faktor  $\approx 1,7$  gegenüber  $\theta_a = 0^\circ$ ), jedoch nach Überschreitung des Grenzwinkels sehr stark ansteigt (Faktor  $\approx 4,2$  bei  $\theta_a = 87^\circ$ ). Dies führt zu einer signifikanten Reduktion der lateralen Auflösung im Objektraum. Die Veränderung des Messabstandes führt dahingegen nur zu einer moderaten linearen Änderung von  $d_{av}$  (Faktor  $\approx 1,1$  für einen um 100 mm erhöhten Messabstand, siehe Abb. 4.5 b).

### 4.3 Ansichtenplanung als Optimierungsproblem

Um die Leistung von Ansichtenplanungsalgorithmen abstrakt vergleichen zu können, schlägt Scott [68] folgende allgemeine Leistungsmaße vor:

**Qualität des Ansichtenplans:** Diese kann als Verhältnis der (spezifikationstreu) gemessenen zur als messbar vorhergesagten Oberfläche angegeben werden. Die Ansichtenplanqualität ist somit ein Maß für Genauigkeit und Robustheit des Planungsansatzes.

**Effizienz des Ansichtenplans:** Darunter kann die Anzahl der Ansichten des erzeugten Plans im Verhältnis zur Anzahl des bisher besten gefundenen Plan für die gleiche Aufgabenstellung verstanden werden. Dies ist somit ein Maß für die Effizienz und die Vollständigkeit der Diskretisierungsschemata des Ansichten- und Oberflächenraumes.

**Berechnungseffizienz:** Diese kann in Form der Berechnungskomplexität und Laufzeit der Planung auf einer bestimmten Plattform angegeben werden.

Während eine hohe Ansichtenplanqualität ein wichtiges Kriterium für einen Ansichtenplanungsalgorithmus darstellt, bewertet sie weniger den zugrundeliegenden Algorithmus als eher die Genauigkeit der Sensor-, Positioniersystem- und Objekt-Modellierung. Die Ansichtenplanungseffizienz braucht quantifizierbare Zielkriterien zur Sicherstellung einer vergleichbaren Aufgabenstellung. Eine akzeptable Berechnungseffizienz ist notwendige Bedingung für den praktischen Einsatz eines Ansichtenplanungssatzes.

### 4.3.1 Zielkriterien

Ansichtenpläne werden hinsichtlich aufgabenspezifischer Zielkriterien optimiert. Low und Lastra [42] spezifizieren als Anforderungen an die Rekonstruktionsqualität die *Vollständigkeit* und die Oberflächenabstastqualität (engl. „surface sampling quality“). Letztere wird von den Autoren in Form des *Punktabstandes* quantifiziert.

Mehdi-Souzani et al. [49] ziehen als weitere Kriterien zur Bewertung der Qualität der Oberflächenabstastung die *Längenmessgenauigkeit* und die *Messunsicherheit* hinzu. Die Längenmessgenauigkeit ist, wie von den Autoren angemerkt, eine sensorspezifische Größe<sup>3</sup> und kann nicht gezielt durch die Ansichtenplanung beeinflusst werden. Sie wird deshalb im weiteren Verlauf auch nicht betrachtet. Aus diesen drei Anforderungen an die Rekonstruktionsqualität lassen sich die Zielkriterien der *maximalen Vollständigkeit* bei *Einhaltung der Mindestabstastqualität* ableiten.

Bei der Optimierung nach obigen Kriterien müssen einige Aufnahme-Nebenbedingungen eingehalten werden. Low und Lastra [42] unterteilen diese in drei Typen:

**Positionierungs-Nebenbedingungen:** Geplante Sensorpositionen müssen im C-Space des Sensorpositioniersystems liegen. Dies sichert einerseits die Erreichbarkeit, andererseits die Kollisionsfreiheit einer konkreten Sensorposition. Von der expliziten Betrachtung der inversen Kinematik [92] bis zur a priori Festlegung zulässiger Posen (z. B. auf einer Kreisbahn: [47, 58] u.a.) werden viele, unterschiedlich detaillierte Ansätze gewählt. In dieser Arbeit wird der C-Space durch eine Liste zulässiger Raumbereiche, modelliert als Voxel, für die Roboterhand repräsentiert. Durch eine Funktion `IsPositionFeasible(v)` kann somit überprüft werden, ob eine Sensorposition  $\mathbf{v}$  im C-Space liegt.

**Messbarkeits-Nebenbedingungen:** Ob von einer Ansicht aus ein Objektpunkt gemessen werden kann, hängt von einer Reihe von Nebenbedingungen ab. Je nach Detailgrad der Sensormodellierung

<sup>3</sup>Sie ist u.a. abhängig vom Kalibrierzustand des Sensors, äußeren (z. B. thermischen) Rahmenbedingungen und der Registriermethodik.

wird in der Literatur eine unterschiedlich umfangreiche Auswahl der folgenden, mit ansteigendem Aufwand überprüfbareren Einschränkungen betrachtet [59, 64, 49, 69]:

1. Streifende Beobachtung: Der Antastwinkel  $\theta_a$ , unter dem der Punkt beobachtet wird, muss kleiner als der zulässige Grenzwinkel  $\theta_b$  sein. Bei bistatischen Sensoren kann  $\theta_a$  nach Gl. (4.1) berechnet werden.
2. Sensorsehfeld: Der zu messende Punkt muss sich im Sensorsehvolumen befinden, also sowohl auf die Bildebene abgebildet werden als auch sich im zulässigen Schärfentiefebereich befinden. Bei bistatischen Sensoren muss dies für beide Kameras zutreffen.
3. Sichtbarkeit: Der Punkt darf nicht durch das Objekt verdeckt werden. Bei bistatischen Sensoren gehört dazu die Überprüfung der Stereosichtbarkeit.

Im Rahmen dieser Arbeit werden alle Messbarkeitsnebenbedingungen geprüft. Der maximale Punktabstand wird indirekt über den zulässigen Messabstand und Antastwinkel beschränkt.

**Registrierungs-Nebenbedingungen:** Um die verschiedenen Ansichten in ein gemeinsames Weltkoordinatensystem überführen zu können, müssen diese registriert bzw. kalibriert werden. Dazu müssen sich benachbarte Ansichten zu einem bestimmten Anteil überlappen. Da sich jedoch bei der hochgenauen 3-D Rekonstruktion komplexer Objekte die notwendigen Ansichten zur vollständigen Rekonstruktion typischerweise stark überlappen<sup>4</sup>, wird diese Nebenbedingung in dieser Arbeit nicht explizit geprüft. Die dafür notwendige Erweiterung für mengentheoretische Ansichtenplanungsansätze kann bei Bedarf jedoch unkompliziert implementiert werden [73].

Das Optimierungsproblem der Ansichtenplanung besteht nun typischerweise darin, die benötigten Kosten zur Erreichung dieser Zielkriterien unter Einhaltung der Aufnahme-Nebenbedingungen zu minimieren. Zu den *direkten Kosten* gehören die dazu notwendige Anzahl von Ansichten, welche direkt mit der benötigten Datenaufnahmezeit korreliert. Weiterhin gehört die Zeit zur Rekonfiguration der Ansicht, also Sensor-Repositionierung und etwaige weitere Sensorparameteränderungen, zu den direkten Kosten. Zu den *indirekten Kosten* gehört der Aufwand zur Weiterverarbeitung der aufgenommenen Daten, z. B. in Form von Speicherplatz und Rechenzeit. Keine der im Kapitel 3 referenzierten Methoden betrachtet die indirekten Kosten und nur wenige (z. B. [94, 93]) die Kosten zur Ansichten-Rekonfiguration. Auch in dieser Arbeit wird als Kostenfunktion lediglich die Ansichtenanzahl  $v$  betrachtet.

### 4.3.2 Planungsstrategien

Nachdem im vorangegangenen Abschnitt häufig genutzte Zielkriterien und Nebenbedingungen für die Ansichtenplanung vorgestellt wurden, sollen hier daraus resultierende Planungsstrategien abgeleitet werden. Einige der Zielkriterien sind gegenläufig: So kann z. B. die gleiche Vollständigkeit bei verringerter Ansichtenanzahl erzielt werden, indem die Messentfernung vergrößert wird. Neben der sich dadurch pro Ansicht vergrößernden rekonstruierbaren Objektfläche vergrößert sich jedoch auch der mittlere Punktabstand und die Messunsicherheit (siehe Abschnitt 4.2). Deshalb sollen zuerst einige praktische Fragestellungen als Fallstudien vorgestellt werden.

<sup>4</sup>Die mittlere Anzahl von Beobachtungen eines Punktes  $\bar{P}$  ist z. B. beim NBV Testobjekt ab sechs Ansichten größer als zwei.

**Erstellung eines vollständigen Objektmodells** Ein unbekanntes Objekt soll vollständig vermessen werden. Dazu ist vor der eigentlichen Ansichtenplanung ein Grobmodell des Objektes zu erstellen. Ist das Objekt durch Einschränkungen im C-Space nicht in einer Lage komplett zu erfassen, ist das Objekt geeignet manuell zu segmentieren und je ein Modell für die Objektsegmente zu erstellen [69]. Anschließend sind die Anforderungen hinsichtlich der angestrebten Mindestanforderungen an Messunsicherheit und Punktabstand zu spezifizieren und die Ansichtenplanung durchzuführen. Nach Abschluss der Rekonstruktion sind die Objektsegmente geeignet zu einem kompletten Objektmodell zu vereinigen.

Diese Fragestellung beschränkt nicht direkt die Anzahl zulässiger Ansichten. Die erreichbare Vollständigkeit ist u. U. kleiner als 100 %, da das Grobmodell nur eine zweifache Approximation des Messobjektes darstellt: Einerseits ist es ein auflösungsreduziertes Modell des Objektes, andererseits ist der Grobscan selbst u. U. unvollständig. Defizite in der erzeugten Rekonstruktion, wie Objektbereiche mit fehlenden 3-D Messdaten oder zu großer Messunsicherheit, sind deshalb zu identifizieren und durch geeignete weitere Ansichten zu beheben [49, 69].

**Erstellung eines Inspektionsplanes** Ein Objekt, dessen Form und Lage im Messraum bekannt ist, soll auf Einhaltung seiner Spezifikation geprüft werden. Dazu sind in seinem Objektmodell die relevanten Bereiche zu kennzeichnen und mit der aus der Spezifikation resultierenden Mindestanforderungen an Messunsicherheit und Punktabstand zu versehen. Andere Objektbereiche brauchen nicht erfasst werden und werden entsprechend als nicht notwendigerweise zu rekonstruieren gekennzeichnet.

Zur Beantwortung dieser Fragestellung ist es ausreichend, die relevanten Bereiche zu rekonstruieren. Daher leitet sich die Anzahl zulässiger Ansichten aus der Form und Anzahl dieser Bereiche ab.

**Oberflächeninspektion** Auch hier sind Form und Lage des Messobjektes bekannt. Typischerweise soll jedoch die gesamte Messobjektoberfläche auf Maßhaltigkeit geprüft werden. Dabei ist es nicht notwendig, wirklich 100 % der Oberfläche zu erfassen, da sich kleinere Objektstrukturen beim 3-D-Vergleich abhängig von den Toleranzvorgaben im Kontext ihrer Umgebung prüfen lassen. Dadurch soll die Ansichtenanzahl minimiert werden. Zudem ist oft die Maximalanzahl zulässiger Ansichten vorgegeben.

Diese Problemstellung fragt also nach der maximalen Vollständigkeit innerhalb einer vorgegebenen Obergrenze für die zulässigen Ansichten. Zusätzlich soll der (Flächen-) Zugewinn von Ansicht zu Ansicht über einem bestimmten Schwellwert liegen, um weitere Ansichten zu rechtfertigen. Unbedingt zu rekonstruierende Objektbereiche sind entsprechend zu gewichten.

**Allgemeine Planungsstrategie** Aus diesen drei verschiedenen Fragestellungen wird ersichtlich, dass es *den* besten Ansichtenplan nicht gibt. Deshalb wird in diesem Abschnitt eine Planungsstrategie definiert, die es durch geeignete Parametrisierung erlaubt, alle drei obigen Problemstellungen zu lösen (siehe Algorithmus 4.1).

Dazu wird eine Modellspezifikation  $M_{spec}$  mit der Oberflächenbeschreibung des zu vermessenden Objektes eingeführt. Zusätzlich enthält diese für jeden Oberflächenbereich die angestrebte Messunsicherheit, die Zugehörigkeit zu etwaigen Objektsegmenten und optional eine Gewichtung. Somit kann aufgabenbezogen über die Einbeziehung bestimmter Objektbereiche nebst der notwendigen Genauigkeit entschieden werden. Die Sensorspezifikation, welche sich gewöhnlich selten ändert und deshalb nicht als objektspezifisch veränderlich betrachtet wird, umfasst die Modellierung des Sensors (u.a. optimale

**Algorithmus 4.1:** Definition der Planungsstrategie

---

**Daten:** Modellspezifikation: (segmentiertes) Objektmodell  $M_{spec}$   
 - flächenbezogene Messunsicherheit  
 - *optional*: flächenbezogene Gewichtung  
 Sensorspezifikation (Sensor- und Positioniersystem)  
*optional*: max. Anz. Ansichten  $v_{max}$ , min. Zugewinn  $g_{min}$   
 Bewertungsfunktion  $f_e()$

**Ergebnis:** Bewertetes Objektmodell  $M_{est}$   
 Ansichtenplan (nach Zugewinn sortierte Folge von Ansichten)

```

1 begin
2    $ViewSet \leftarrow PlanViews(M_{spec}, f_e(), v_{max})$ 
3    $Eval \leftarrow EvaluateViews(M_{spec}, ViewSet, f_e())$ 
4    $[ViewSeq, M_{est}] \leftarrow SortViews(M_{spec}, ViewSet, Eval, v_{max}, g_{min})$ 

```

---

Messentfernung, intrinsische Parameter, HAT) und des Positioniersystems (u.a. C-Space). Wenn es erforderlich ist, können die Vorgabewerte sowohl der maximal zulässigen Ansichtenanzahl  $v_{max} = \infty$  als auch des minimal zu realisierenden Zugewinns  $g_{min} = 0$  angepasst werden. Die Bewertungsfunktion  $f_e()$  schließlich schätzt ab, wie gut die Modellspezifikation durch die gewählten Ansichten erfüllt wird. Im einfachsten Fall ordnet sie jedem als erfolgreich messbar eingeschätzten Oberflächenbereich eine Eins und jedem nicht messbaren eine Null zu (weitere Details und Möglichkeiten siehe Kapitel 5.2.2).

Damit ist die Planungsstrategie festgelegt und die Planung kann in Algorithmus 4.1, Zeile 2 für das Objektmodell  $M_{spec}$  und die Zielfunktion  $f_e()$  unter Beachtung von  $v_{max}$  durchgeführt werden. Die im Ergebnis erhaltenen Ansichten  $ViewSet$  werden in Zeile 3 bewertet. Damit ist sowohl der mittlere als auch der oberflächenbereichs-spezifische Zugewinn jeder gewählten Ansicht bekannt. Mit dieser Bewertung  $ViewEval$  kann in Zeile 4 eine Auswahl und Sortierung dergestalt vorgenommen werden, dass die besten Ansichten bis zur Erreichung von  $v_{max}$  bzw. Unterschreitung von  $g_{min}$  in den Ansichtenplan  $ViewSeq$  aufgenommen werden. Weiterhin wird die prognostizierte Modellspezifikation  $M_{est}$  berechnet, welche die nach Durchführung des Planes „ $ViewSeq$ “ erreichte prognostizierte Bewertung für jeden Oberflächenbereich gemäß  $f_e()$  angibt.

## 4.4 Bewertung von 3-D Rekonstruktionsergebnissen im Kontext der Ansichtenplanung

Wie Scott et al. [74] feststellen, fehlen standardisierte Leistungsvergleiche in der Ansichtenplanung. Damit fallen quantitative Vergleiche zwischen verschiedenen Methoden schwer. Deshalb liegt ein Schwerpunkt dieser Arbeit auf der Definition und Anwendung einer geeigneten Bewertungsmethode. Vorarbeiten dazu wurden in [54] veröffentlicht. Ein Überblick über den vorgeschlagenen Ablauf zeigt Abb. 4.6.

Ein zentraler Grundsatz der Bewertung von 3-D Rekonstruktionsergebnissen muss sein, diese nicht nur simulationsbasiert, sondern ebenfalls auf der Grundlage realer Messdaten durchzuführen. Andernfalls werden Abweichungen in der Sensor- und Positioniersystem-Modellbildung und Einflüsse des Messobjektmaterials nicht erfasst. Auch ist nur mit der Verifikation anhand realer Messdaten die erzielte Messplanqualität zu belegen.

Die im Folgenden vorgestellten Bewertungskriterien, -methoden und -körper sind sensorunabhängig. Jedoch ist die direkte Vergleichbarkeit nur unter ähnlichen Randbedingungen gewährleistet. Während

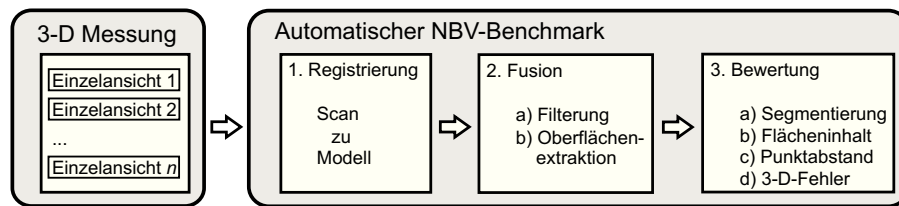


Abbildung 4.6: Überblick über die quantitative Bewertung von 3-D Rekonstruktionsergebnissen.

offensichtlich ist, dass erzielbarer mittlerer Punktabstand und Messunsicherheit sensorsystemabhängig sind, diese also nur im Kontext des nativen Punktabstandes und nativer Messunsicherheit vergleichbar sind, so ist der Einfluss weiterer Parameter weniger offensichtlich. Malik et al. zeigen in [45], wie z. B. allein die Messobjektposition im Messvolumen die erreichbare Vollständigkeit und notwendige Ansichtenanzahl bestimmt. Wichtig ist deshalb auch der Vergleich der Bewertung zu mittels herkömmlicher Ansichtenplanung (z. B. regelmäßige Abtastung, manuelle Planung) erzielten Rekonstruktionsergebnissen.

#### 4.4.1 Bewertungskriterien

Zur Bewertung einer Objektrekonstruktion müssen verschiedene Kriterien berücksichtigt werden. Zu den Kosten der Rekonstruktion zählt zweifelsfrei die *Ansichtenanzahl*  $v$  (Zahl der benötigten Ansichten). Eng damit verbunden ist die notwendige Aufnahmezeit, welche die Zeit zur vollständigen Datenaufnahme einer Ansicht beschreibt, sowie die Sensorpositionierzeit, welche die Zeit zur Realisation der nächsten Sensorkonfiguration widerspiegelt. Sensorsystemabhängig können die beiden Zeiten vernachlässigbar oder signifikant sein.

Bisher unberücksichtigt sind bisher die zur Weiterverarbeitung der aufgenommenen Daten benötigten Kosten (Speicherplatz, Rechenzeit) und die zur Ansichtenplanung benötigte Zeit. Diese sog. indirekten Kosten können aber dazu führen, dass die Zeit bis zum erfolgreichen Export der rekonstruierten Objektoberfläche einer geplanten, kürzeren Ansichtensequenz – trotz zusätzlich notwendiger Zeit zur Planung der Ansichten – kürzer ist als die einer längeren regelmäßigen Ansichtensequenz. Für Sensoren, die eine Bilderfolge aufnehmen (z. B. Rekonstruktion ohne aktive Beleuchtung, Lichtschnittsensoren), kann es sogar schwer sein, überhaupt eine vergleichbare Ansichtenanzahl zu definieren. Im weiteren Verlauf dieser Arbeit betrachten wir ausschließlich die Ansichtenanzahl  $v$ .

Um bewerten zu können, welchen Anteil der vom verwendeten Sensor messbaren Oberfläche ein Ansichtenplan erfasst hat, wird im Folgenden die *Vollständigkeit* (engl. „Coverage“)  $c$  betrachtet. Dabei werden Oberflächenbereiche, die sensorspezifische Schwellwerte (z. B. Antastwinkel  $\theta_a$  größer als zulässiger Grenzwinkel  $\theta_b$ ) verletzen, nicht als gemessen betrachtet. Der *mittlere Punktabstand* benachbarter Punkte  $d_{av}$  charakterisiert in Verbindung mit dem nativen Punktabstand<sup>5</sup> des Sensors die erzielte laterale Auflösung der Messung. Weitere Details sind im Abschnitt 4.4.2 zu finden.

Schließlich sind die Auswirkungen der Ansichtenplanung auf die Qualität der 3-D Rekonstruktion zu untersuchen. Dazu wird der *mittlere 3-D Fehler*  $e_{av}$  berechnet, welcher die durchschnittliche Abweichung der Messpunkte vom Ground-Truth-Modell beschreibt. Die genaue Vorgehensweise ist im Abschnitt 4.4.3 zu finden.

<sup>5</sup>Als nativer Punktabstand wird der erzielbare mittlere Punktabstand des Sensors auf einer Ebene in optimaler Messentfernung  $d_o$  bei einem Antastwinkel  $\theta_a$  von  $0^\circ$  bezeichnet.

**Herausforderungen für die Ansichtenplanung** Neben der Definition von Kriterien für eine quantitative Bewertung muss auch das Messobjekt in die Überlegungen für einen Leistungsvergleich in der Ansichtenplanung einbezogen werden. Viele bisher genutzte Messobjekte sind zu einfach strukturiert (siehe Abb. 3.2) und bieten dadurch keine geeignete Differenzierungsgrundlage gegenüber z. B. regulären Ansichtenplänen mit regelmäßig verteilten Sensorpositionen. Deshalb sollte ein geeignetes Testobjekt folgende Herausforderungen für die Ansichtenplanung und 3-D Rekonstruktion bieten:

- a) **Komplexität** Die Topographie der Objektoberfläche sollte eine hinreichende Komplexität aufweisen. Für planare oder konvexe Körper sind oft hinreichend dichte, reguläre Ansichtenpläne vorzuziehen.
- b) **Asymmetrie** Das Testobjekt sollte ausreichend asymmetrisch gestaltet sein. Ansichtenpläne für (rotations-) symmetrische Körper sind typischerweise regulär und damit ungeeignet für einen quantitativen Vergleich. Zur 3-D Rekonstruktion sind anstatt geplanter Ansichten oft hinreichend dichte, reguläre Ansichtenpläne vorzuziehen.
- c) **Selbstverdeckung** Eine besondere Herausforderung für Sensoren mit aktiver Beleuchtung sind Selbstverdeckungen des Messobjektes. Diese z. B. bei der Qualitätskontrolle durchaus typische Aufgabenstellung führt zu Schattenwurf und eingeschränkter gemeinsamer Sichtbarkeit einer Oberfläche von Beleuchtung und Beobachtung (siehe Abschnitt 4.2). Ein Testobjekt sollte deshalb genügend Selbstverdeckung verursachende Objektdetails besitzen.
- d) **Oberflächencharakteristik** Die Eignung eines Ansichtenplanungsansatzes sollte nicht von einer Objektklasse abhängig sein. Deshalb sind sowohl gekrümmte Oberflächen als auch scharfe Kanten zu betrachten.
- e) **Konkavitäten** Eine weitere Herausforderung für bistatische Sensoren ist die Messbarkeit von Konkavitäten mit einem bestimmten Verhältnis von Breite zu Tiefe. Übersteigt die Tiefe einen von der Basislänge abhängigen sensorspezifischen Wert (typischerweise 2:1), sind mehrere Ansichten zur vollständigen Vermessung notwendig, da die Konkavität nur noch aus einem sehr eingeschränkten Winkelspektrum vermessen werden kann [72]. Die Erfassung nicht rotationssymmetrischer Konkavitäten ist zusätzlich von einer geeigneten Rotation des Sensors um die Sensormittelachse abhängig.
- f) **Längenmessung** Zur Überprüfung der korrekten Skalierung der Messdaten sollten einfache Möglichkeiten zur Messungen verschiedener Strecken und Radien vorhanden sein.

**Vorschlag für einen Testkörper zur Ansichtenplanung** Ein Vorschlag für einen entsprechenden Testkörper (im Folgenden als „NBV Testobjekt“ bezeichnet) wurde in [54] gemacht. Eine leicht modifizierte Form der dort vorgeschlagenen einfachen Grundkonfiguration wird im Rahmen dieser Arbeit zur quantitativen Bewertung der Ansichtenplanung eingesetzt (siehe Abb. 4.7). Das NBV Testobjekt besteht aus den folgenden Objektdetails:

1. „Tasche“ (engl. „notch“): Eine größere Konkavität, deren Seitenflächen nur von geeigneten Ansichten erfasst werden können (Herausforderung c,d,e,f).
2. „Negative Halbkugel“ (engl. „negative half sphere“): Eine halbe Hohlkugel, welche sowohl eine gekrümmte Oberfläche als auch Abschattungen aufweist. Über die Anpassung einer Kugel kann der gemessene mit dem Ground-Truth-Radius verglichen werden (Herausforderung b,c,d,f).

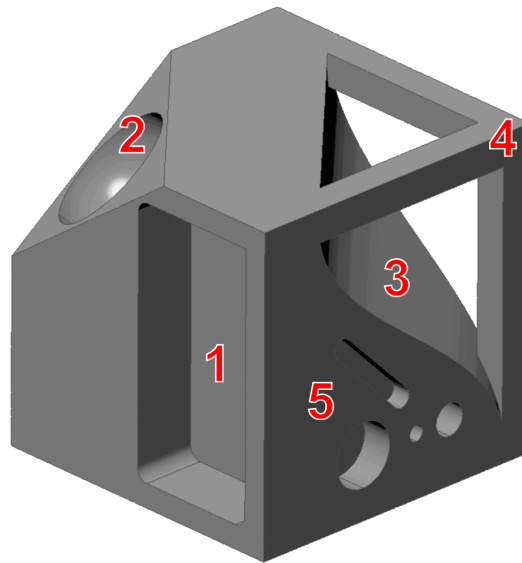


Abbildung 4.7: Vorschlag für ein NBV Testobjekt von Munkelt et al. [54].

3. „Sinusfläche“ (engl. „sinusoidal face“): Stellt die prägnante Asymmetrie des Testobjektes sicher. Weiterhin ist die gekrümmte Oberfläche wegen der Verdeckung durch das Dreibein nur schwierig zu rekonstruieren (Herausforderung b,c,d).
4. „Dreibein“ (engl. „tripod“): Dieses Detail verdeckt entscheidend die Sinusfläche. Weiterhin kann es zu Streckenmessungen von den Seitenflächen und der Tasche genutzt werden (Herausforderung b,c,d,f).
5. „Bohrungen“ (engl. „drill holes“): Die Bohrungen weisen Breiten- zu Tiefen-Verhältnisse von 2:1, 1:1 und 1:2 auf und sind somit zunehmend schwerer zu rekonstruieren. Zur effektiven Vermessung des Langloches ist darüber hinaus eine angepasste Ausrichtung bistatischer Sensoren erforderlich (Herausforderung e).

Diese Herausforderungen decken nicht alle denkbaren Messobjekte ab, spiegeln aber eine realistische Teilmenge typischer Messaufgaben wider. Vereint im NBV Testobjekt stellen sie eine komplexe Herausforderung (a) für jeden Planungsansatz dar.

**Vergleich zu alternativen Planungsverfahren** Um die weiter oben diskutierte Problematik der nur eingeschränkt über Messsystemgrenzen hinaus vergleichbaren Ergebnisse der erzielten 3-D Rekonstruktionen abzumildern, sollten auf Ansichtenplanung basierenden Rekonstruktionsergebnissen immer Bewertungen von alternativen Planungsverfahren gegenübergestellt werden.

So muss ein Planungsverfahren immer besser sein als eine *zufällige Ansichtenauswahl*. Hierbei sind allerdings einige Randbedingungen einzuhalten. So ist der Ansichtenraum, aus dem zufällig Ansichten bestimmt werden, objektabhängig sinnvoll einzuschränken: Objektlage und -größe sowie eine angepasste Messentfernung sind zu beachten. Im Rahmen dieser Einschränkungen sollen jedoch die verfügbaren Freiheitsgrade der Ansichten ausgenutzt werden. Es sind eine Vielzahl zufälliger Ansichtenpläne fester Länge zu erstellen und simulationsbasiert zu bewerten. Zur Verifikation an realen Messdaten ist es



ausreichend, denjenigen der zufällig erzeugten Ansichtenpläne auszuwählen und auszuführen, welcher dem Median in der gewählten Vergleichskategorie (z. B. Vollständigkeit) entspricht.

Weiterhin soll ein Planungsverfahren möglichst besser sein als die oft eingesetzten *regelmäßigen Standardansichtenpläne*. Diese zeichnen sich durch eine gleichmäßige Abtastung des Ansichtenraums aus. Messobjektangepasst kommen dabei typischerweise planare Gitter, Kreisbahnen, Gitter auf der View Sphere oder Spiralen auf der View Sphere (sog. Loxodrome, siehe [6]) zum Einsatz. Hierbei ist zu beachten, dass die Reihenfolge der Ansichten so gewählt wird, dass z. B. in der ersten Hälfte eine grobe Abtastung des vollständigen Ansichtenraumes sichergestellt und diese in der zweiten Hälfte durch dazwischen liegende Ansichten weiter verfeinert wird. Dies stellt die Vergleichbarkeit im Planungsverlauf sicher.

Wünschenswert wäre es, wenn die durch ein Planungsverfahren erzeugte Ansichtenfolge bessere Rekonstruktionsergebnisse liefert als die mittels einer von *menschlichen Experten* geplanten Ansichtenfolge. Dieses Planungsverfahren ist allerdings durch die (nicht quantifizierbare) Erfahrung und den investierten Zeitaufwand des Experten sehr subjektiv.

#### 4.4.2 Bewertung der Vollständigkeit

In vielen Anwendungsgebieten der 3-D Rekonstruktion ist es entscheidend, einen bestimmten Teil der Oberfläche des Messobjektes vollständig zu rekonstruieren. Während bei der 3-D Modellerstellung im Bereich des Rapid Prototyping nahezu 100 % Vollständigkeit notwendig sind, um ein exaktes Ebenbild des Messobjektes erzeugen zu können, sind z. B. bei der Inspektion oft nur einzelne Objektbereiche vollständig zu erfassen. Die erzielte Vollständigkeit einer 3-D Rekonstruktion muss also immer relativ zur Aufgabenstellung berechnet werden.

Weiterhin ist bei der Bewertung der Vollständigkeit der C-Space des verwendeten Messsystems zu berücksichtigen. Mittels vollständiger Simulation von Sensor, Messobjekt und Positioniersystem ist es möglich, die maximal erreichbare Vollständigkeit  $c_{max}$  bei gegebenem C-Space zu berechnen. So simulieren z. B. Malik et al. [45] ausführlich den Einfluss verschiedener Systemparameter, wie z. B. Sensorentfernung und Messobjektposition im Messvolumen, auf die erreichbare Vollständigkeit. Die Vollständigkeit  $c$  wird daher im Folgenden immer als Verhältnis der gemessenen Vollständigkeit  $c_m$  zu  $c_{max}$  angegeben:

$$c = \frac{c_m}{c_{max}}. \quad (4.5)$$

Bei flächenhaft antastenden Messverfahren kann vereinfachend auf die approximierten Oberflächeninhalte des gemessenen ( $A_m$ ) und des maximal erfassbaren ( $A_{max}$ ) Dreiecksnetzes<sup>6</sup> zurückgegriffen werden:

$$c = \frac{A_m}{A_{max}}, \quad (4.6)$$

anderenfalls kann die in [54] beschriebene Berechnungsvorschrift angewandt werden.

Der mittlere Punktabstand  $d_{av}$  ermöglicht die Bewertung der realisierten lateralen Auflösung. In der punktbasierten 3-D Rekonstruktion kann er als mittlerer Abstand zum nächstgelegenen Nachbarpunkt berechnet werden. Wurde z. B. ein Dreiecksnetz als Objektfläche extrahiert, so kann  $d_{av}$  auch über

<sup>6</sup>Der approximierte Oberflächeninhalt kann integrierend über die Summe aller entsprechender Dreiecksflächeninhalte berechnet werden.

den Flächeninhalt approximiert werden:

$$d_{av} \approx \sqrt{\frac{A_m}{|S|}}, \quad (4.7)$$

mit  $|S|$  der Punktzahl im Ansichtenraum (z. B. der Anzahl der Dreieckseckpunkte der erfassten Oberfläche). Mittlere Punktabstände, welche den sensorspezifischen nativen Punktabstand wesentlich unterschreiten, erhöhen die laterale Auflösung im Allgemeinen nicht weiter, sondern zeigen eine hohe Redundanz der Daten auf der Objektoberfläche an. Mittels geeigneter Fusionsverfahren (siehe im Abschnitt 4.4.3 auf der nächsten Seite) kann die Redundanz zur Verringerung der Messunsicherheit genutzt werden, ohne die daraus resultierende unnötig hohe Punktzahl weiterverarbeiten zu müssen.

### 4.4.3 Bewertung der Rekonstruktionsgüte

Zur Bewertung der Rekonstruktionsgüte optischer 3-D Sensoren gibt es je nach Aufgabenstellung unterschiedliche Herangehensweisen. Aus Methoden zur Evaluation von taktilen Koordinatenmessmaschinen weiterentwickelt sind Ansätze, welche einzelne Maße (Punktkoordinaten, Radien, Strecken) mit denen eines Referenzkörpers vergleichen (z. B. Iuliano et al. [30]). Dafür werden allerdings nicht einzelne Messpunkte, sondern angepasste Regelgeometrien herangezogen. Vezzetti [90] versucht über die Befragung von Inspektions-Experten relevante Kriterien zum Sensorvergleich abzuleiten. Er schlägt die Auswertung von Kugelabständen samt der auf den Kugeln erzielten Punktabstände mittels eines aus drei Kugeln aufgebauten Testkörpers vor. Der Verband Deutscher Ingenieure wiederum hat in seiner Richtlinie VDI/VDE 2634 Blatt 3 [89] anhand der Messung eines verschiedentlich im Messvolumen positionierten Kugelstabes und Parallelendmaßes die Sensorcharakterisierung über Antastabweichung (Form und Maß), Kugelabstandsabweichung und Längenmessabweichung festgelegt.

Im Rahmen der Ansichtenplanung soll die Bewertung der Güte der Rekonstruktion eines Messobjektes jedoch Aussagen darüber ermöglichen, wie groß die Messunsicherheit der erfassten Oberfläche ist. Regionen ohne Messdaten, in denen die Messunsicherheit naturgemäß hoch ist, sollen nicht in die Bewertung einfließen. In der Planungsliteratur werden mehrere Bewertungsmethoden verwendet. Long et al. [40] und Wang et al. [91] nutzen den mittleren Abstand der Messpunkte zur Oberflächenrekonstruktion, wodurch aber hauptsächlich der Grad der Glättung durch einen nicht näher spezifizierten Oberflächenrekonstruktionsprozess bewertet wird. He et al. [28] berechnet die Volumendifferenz zwischen Modell und Rekonstruktion, was aber nur bei 100 % Vollständigkeit bewertbare Aussagen zulässt. Weiterhin wird durch einen Volumenvergleich vorrangig die Güte der Skalierung der 3-D Daten betrachtet und nur in geringem Maße die Unsicherheit der Rekonstruktion.

Einige Ansätze [59, 54, 86] verwenden den mittleren Abstand der rekonstruierten Punkte zu Ground-Truth-Daten (im Folgenden als 3-D Fehler bezeichnet). Diese auch in dieser Arbeit gewählte Herangehensweise bewertet direkt die Messunsicherheit und damit die erzielte Rekonstruktionsgüte. Um korrekte Ergebnisse zu erhalten, sind eine Reihe von Grundvoraussetzungen einzuhalten:

**Registrierung der Daten** Unter Registrierung versteht man die Ausrichtung der (partiellen) Rekonstruktion, sodass diese mit dem Objektmodell / den Ground-Truth-Daten übereinstimmt. Dies kann auch als Feinausrichtung des Weltkoordinatensystems der 3-D Messung mit dem Modellkoordinatensystem verstanden werden. Die Registrierung ist notwendig, da die Unsicherheit der HAT (siehe Abschnitt

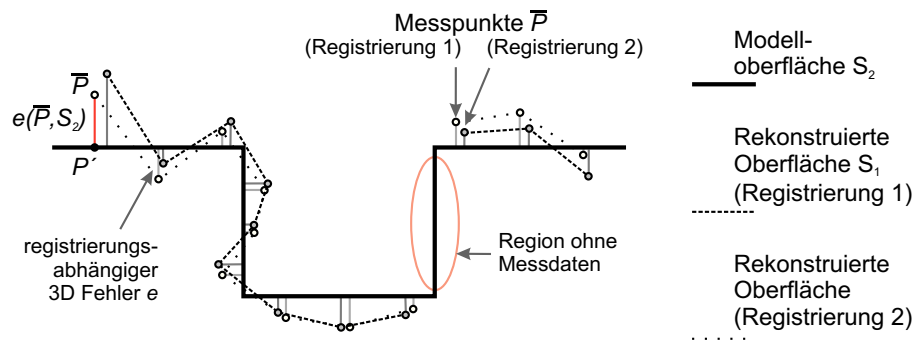


Abbildung 4.8: 3-D Fehlerberechnung registrierter Messdaten. Pro Messpunkt wird der Abstand zur nächstgelegenen Modelloberfläche berechnet. Dargestellt sind zwei leicht unterschiedliche Registrierungen der gleichen Messdaten.

4.1) mehr als eine Größenordnung über der erwarteten Messunsicherheit in der Streifenprojektion liegt. Typischerweise werden bei der Registrierung lediglich Position und Orientierung, nicht aber die Skalierung der Messdaten angepasst, da diese über die bekannte Basislänge des Sensorkopfes sehr genau bestimmt werden kann.

Sind keine speziellen Objektdetails für eine automatische Ausrichtung vorhanden, kann zur Registrierung eine Variante des „Iterative Closest Point“-Algorithmus (ICP) genutzt werden [11]. Dieser minimiert iterativ den mittleren quadratischen Fehler zweier 3-D Modelle, indem für eine repräsentative Auswahl von Punkten beider Modelle Position und Orientierung einander angeglichen werden. Dieses Vorgehen führt nur dann zu einer zufriedenstellenden Lösung, wenn beide Objekte geeignete Oberflächentopographien<sup>7</sup> aufweisen. Fehler in der Registrierung haben entscheidenden Einfluss auf den 3-D Fehler (siehe Abb. 4.8). Deshalb ist darauf zu achten, dass sich der mittlere 3-D Fehler der Registrierung in der gleichen Größenordnung befindet wie die erwartete mittlere Messunsicherheit. In dieser Arbeit wird das kommerzielle Programm „Geomagic® Studio®“ [4] zur automatischen Feinregistrierung des rekonstruierten Objektes auf das Ground-Truth-Modell genutzt.

**Messverfahrensspezifische Vorverarbeitung** Im Allgemeinen werden mehrere Ansichten des gleichen Messobjektes zu einer gemeinsamen 3-D Rekonstruktion fusioniert. Dabei kommen messverfahrensspezifische Verfahren zum Einsatz. Wenn Nachbarschaftsbeziehungen zwischen den 3-D Messpunkten vorliegen, werden häufig volumetrische Fusionsmethoden basierend auf [20] eingesetzt. Für ungeordnete dichte Punktmengen ist z. B. die „Alpha Shape“-Methode von Edelsbrunner und Mücke [23] geeignet.

Bei flächenhaft antastenden Verfahren wie der Streifenprojektion können sehr geringe Messpunktabstände realisiert werden. Fehluordnungen bei der Oberflächenrekonstruktion durch Dreiecksvermaschung benachbarter Punkte treten dadurch im Allgemeinen nur sehr selten (z. B. in Randbereichen und an Sprungstellen) auf. Die bei der vollständigen Rekonstruktion komplexer Objekte kaum vermeidbare Überlappung von Ansichten kann weiterhin zur Reduktion der Messunsicherheit bei der Oberflächenextraktion durch Kleinste-Quadrate-Approximation genutzt werden [20]. Vom Anwender eines 3-D Sensors erwartet – und im physikalischen Sinn der nativen lateralen Auflösung des Sensors im Objektraum sinnvoll – ist die Ausgabe der 3-D Objektrekonstruktion solcher Scanner als fusionierte Dreiecksfläche mit einem Eckpunktabstand, welcher die native laterale Auflösung nicht wesentlich unterschreitet. Deshalb

<sup>7</sup>Die Oberfläche muss ausreichend strukturiert sein und darf keine Symmetrien aufweisen. Die Registrierung z. B. zweier Kugeloberflächen ist nicht eindeutig.

werden die Dreieckspunkte in Überlappungsbereichen im Allgemeinen durch regelmäßige Abtastung der Ausgleichsfläche im nativen Punktabstand erzeugt.

Für beide Aufgaben kommt im Rahmen dieser Arbeit „Geomagic® Studio®“ zum Einsatz. Dabei werden folgende Arbeitsschritte automatisch durchgeführt: „Ordered point import“ zum Laden der Ansichten unter Erhaltung der Nachbarschaftsbeziehung, „Fill small holes“ zum Füllen kleinster Scandefekte (Lochumfang < 36 Pixel) und „Merge Scans“ zur Oberflächenextraktion durch Kleinste-Quadrate-Approximation (keine lokale Glättung, keine zusätzliche globale Registrierung, automatische globale Messunsicherheitsreduktion).

**Berechnung des 3-D Fehlers** Zur Berechnung des 3-D Fehlers werden die Messpunkte  $P$  (bzw. die Eckpunkte der Dreiecke der Oberflächenrekonstruktion  $\bar{P}$ ) betrachtet (siehe Abb. 4.8). In Oberflächenbereichen ohne Überlappung mehrerer Ansichten entsprechen die Dreieckseckpunkte den 3-D Messpunkten. Als 3-D Fehler  $e$  wird der Abstand eines Punktes  $\bar{P}$  zum nächstgelegenen Punkt  $P'$  auf der Modelloberfläche  $S_2$  bezeichnet:

$$e(\bar{P}, S_2) = \min_{P' \in S_2} d(\bar{P}, P'), \quad (4.8)$$

mit  $d()$  der euklidischen Distanz zwischen zwei Punkten im  $\mathbb{R}^3$ . Für gleichmäßig abgetastete Abstände  $e$  berechnet sich der mittlere 3-D Fehler  $e_{av}$  der (gemessenen) Oberfläche  $S_1$  zur Modelloberfläche  $S_2$  nach [16] als Oberflächenintegral über den Fehler  $e$  geteilt durch den Flächeninhalt von  $S_1$ :

$$e_{av}(S_1, S_2) = \frac{1}{|S_1|} \int_{\bar{P} \in S_1} e(\bar{P}, S_2) d\bar{P}. \quad (4.9)$$

Das frei und im Quellcode verfügbare Programm „Metro“ [2] von Cignoni et al. [16] hat sich als akademischer Standard zur Bewertung des Unterschiedes zweier Dreiecksnetz-Repräsentationen eines Objektes etabliert. Dazu berechnet es verschiedene Punkt-zu-Oberfläche-Distanzen. Eine der durch Programmparameter<sup>8</sup> wählbaren Distanzen entspricht dem mittleren 3-D Fehler der Dreieckseckpunkte<sup>9</sup> eines Netzes („Modelloberfläche“) zur Oberfläche des zweiten Netzes („Scan“). Dabei nutzt Metro Algorithmen, welche diese Berechnung effizient auch für große Punktmengen durchführen können. Somit kann der mittlere 3-D Fehler – in nicht reduzierter Auflösung – über alle Punkte berechnet werden. Weiterhin berechnet Metro die Standardabweichung und das Histogramm der 3-D Fehler.

<sup>8</sup>Programmaufruf: metro <objektmodell> <rekonstruktion> -e -f -L -O -h

<sup>9</sup>Die Dreiecksflächen an sich werden in dieser Parametrisierung *nicht* betrachtet.

## Kapitel 5

# Modellbasierte Mehransichtenplanung

Zur deutlichen Abgrenzung gegenüber der Berechnung der jeweils nächsten besten Ansicht (NBV), welche im Allgemeinen zu längeren Ansichtenplänen führt, ist dieses Kapitel mit „Mehransichtenplanung“ überschrieben. Es wird den gewählten Ansatz zur modellbasierten Ansichtenplanung unter Einbeziehung der Messunsicherheit detailliert vorstellen. Dazu wird in Abschnitt 5.1 das grundlegende, auf der Maximierung der Vollständigkeit basierende, mengentheoretische Ansichtenplanungsverfahren und seine Erweiterung zur Vermessung komplexer Objekte bei beschränktem C-Space eingeführt. Abschnitt 5.2 präsentiert die notwendigen Erweiterungen zur Einbeziehung der Messunsicherheit in den grundlegenden mengentheoretischen Ansatz. Das Kapitel wird durch einen umfangreichen Experimentaltel in Abschnitt 5.3 abgeschlossen.

Da zur modellbasierten Mehransichtenplanung bereits ein Modell des zu erfassenden Messobjektes vorhanden sein muss, wird dieses Verfahren im Allgemeinen in der mittleren und der End-Phase der Ansichtenplanung eingesetzt. Liegen keine ausreichenden Modellinformationen vor, kann der kombinierte daten- und modellgetriebene Ansatz aus Kapitel 6 eingesetzt werden.

Die Anforderungen für „ausreichende Modellinformation“ werden in der Literatur verschieden definiert. Dabei wird vor allem auf die Reduktion der Modellauflösung eingegangen, welche für eine Lösung des Ansichtenplanungsproblems in akzeptabler Zeit erforderlich ist. Tarbox und Gottschlich [82] gehen von einer Obergrenze von maximal 2500 Abtastpunkten auf der Modelloberfläche aus. Malik et al. [45] führen umfangreiche Experimente zu dieser Frage durch. Abhängig von der Objektkomplexität erzielen sie innerhalb ihrer Simulationsumgebung die besten Ergebnisse für auf 0,1 % bis 2 % der CAD-Modellauflösung (bezogen auf die Dreiecksanzahl) reduzierte Modelle. Scott [69] spezifiziert für Objekte niedriger Komplexität als untere Grenze der Modellauflösung eine Abtastdichte von  $25/A_o$ , wobei  $A_o$  die vom jeweiligen Sensor in optimaler Messentfernung mit Antastwinkel  $\theta_a = 0^\circ$  erfassbare Fläche ist. Damit kommen Time-of-Flight 3-D Sensoren zur Grobmodellerstellung für einfachere Objekte in Frage [55].

In [72] analysieren Scott et al. detailliert den Einfluss der Modellauflösung auf Effizienz und Qualität der erzeugten Ansichtenpläne (siehe Abschnitt 4.3). Sie kommen zu dem Schluss, dass kurze Pläne hoher Qualität für Modelle mit minimal  $1/32$  (ca. 3 %) der Auflösung des zugehörigen Feinmodells erzeugt

werden können. Dabei bleibt unklar, ob das Feinmodell die 3-D Rekonstruktion des Messobjektes in voller Sensorauflösung beschreibt oder ob damit ein die Geometrie des Messobjektes mit akzeptablem Fehler beschreibendes Modell (z. B. CAD-Modell) gemeint ist.

Die Nutzung vorhandener Objektinformationen ermöglicht die näherungsweise Berechnung einer, hinsichtlich der Länge der erzeugten Folge von Ansichten, optimalen Lösung (siehe Abschnitt 2.3.2). Dabei führen mäßige Fehler im Objektmodell, welche z. B. durch objektabhängig angemessene Modellreduktion (s. o.) entstehen können, nur zu geringfügig verlängerten Ansichtenplänen [72].

## 5.1 Vollständigkeitsorientierte Mehransichtenplanung

Allen mengentheoretischen modellgetriebenen Ansichtenplanungsansätzen liegt die Abbildung des Ansichtenplanungsproblems auf das Mengenüberdeckungsproblem zugrunde (siehe Abschnitte 2.3.2 und 3.2.1).

Einen Überblick über den mengentheoretischen Ansichtenplanungsansatz bietet Abb. 5.1. Dieser gliedert sich grob in vier Teilaufgaben: I. die Spezifikation der Rekonstruktionsaufgabe vor Beginn der Planung, II. die Planung der Ansichten basierend auf dem Detailgrad des genutzten Objektmodells, III. die Ausführung und IV. die Finalisierung des erzeugten Ansichtenplanes.

### 5.1.1 Grundansatz nach Scott

In diesem Abschnitt wird die in dieser Arbeit gewählte Implementierung des mengentheoretischen Planungsgrundansatzes, welche sich eng an dem von W. R. Scott vorgestellten sog. „3M-Algorithmus“ [69] orientiert, kurz vorgestellt. Siehe dazu auch den Pfad a) in Abb. 5.1.

**I. Aufgaben- und Systemspezifikation** Vor Beginn der Planung muss in Schritt I. die Definition der zu lösenden Planungsaufgabe im Rahmen eines konkreten Messsystems erfolgen. Neben dem Objektmodell gehören dazu die Rekonstruktionsziele, die Planungsstrategie und der vorhandene Messaufbau. Das Messobjekt wird durch eine Dreiecksvermaschung  $S$  der zu rekonstruierenden Objekt Oberfläche approximiert. Dieses Modell kann in unterschiedlicher Detaillierung vorliegen: Vom genauen CAD-Modell, über ein z. B. mittels ToF-3-D-Sensors gewonnenes Grobmodell bis hin zum lediglich Objektgröße und -lage annähernden Hüllkörper. Mit zunehmendem Detailgrad steigt auch die sinnvoll zu realisierende Planungstiefe, da bei gesicherteren Objektinformationen auch für längere Ansichtenpläne eine hohe Qualität des Planes (siehe Abschnitt 4.3) erzielt werden kann.

Der Messaufbau muss aufgrund zweier Einflüsse auf die Ansichtenplanung betrachtet werden. Einerseits ist typischerweise die Sichtbarkeit durch ihn beeinträchtigt (Halterungen, Grundplatten etc.). Das Objektmodell muss deshalb durch entsprechende, allerdings nicht bei den Rekonstruktionszielen zu berücksichtigende, Teilmodelle erweitert werden. Andererseits sind mögliche Hindernisse im Rahmen der Kollisionsprüfung der Filterung des C-Space in Schritt II. zu beachten.

Die Rekonstruktionsziele  $(d_s, \sigma_s)$  können für das gesamte Modell oder pro Modelldreieck spezifiziert werden. Darunter zählen der maximal zulässige mittlere Messpunkt Abstand  $d_s$  und die maximal erlaubte Messunsicherheit  $\sigma_s$ . Von 100 % abweichende Anforderungen an die minimal zu erzielende Vollständigkeit werden im Kontext der Planungsstrategie behandelt.

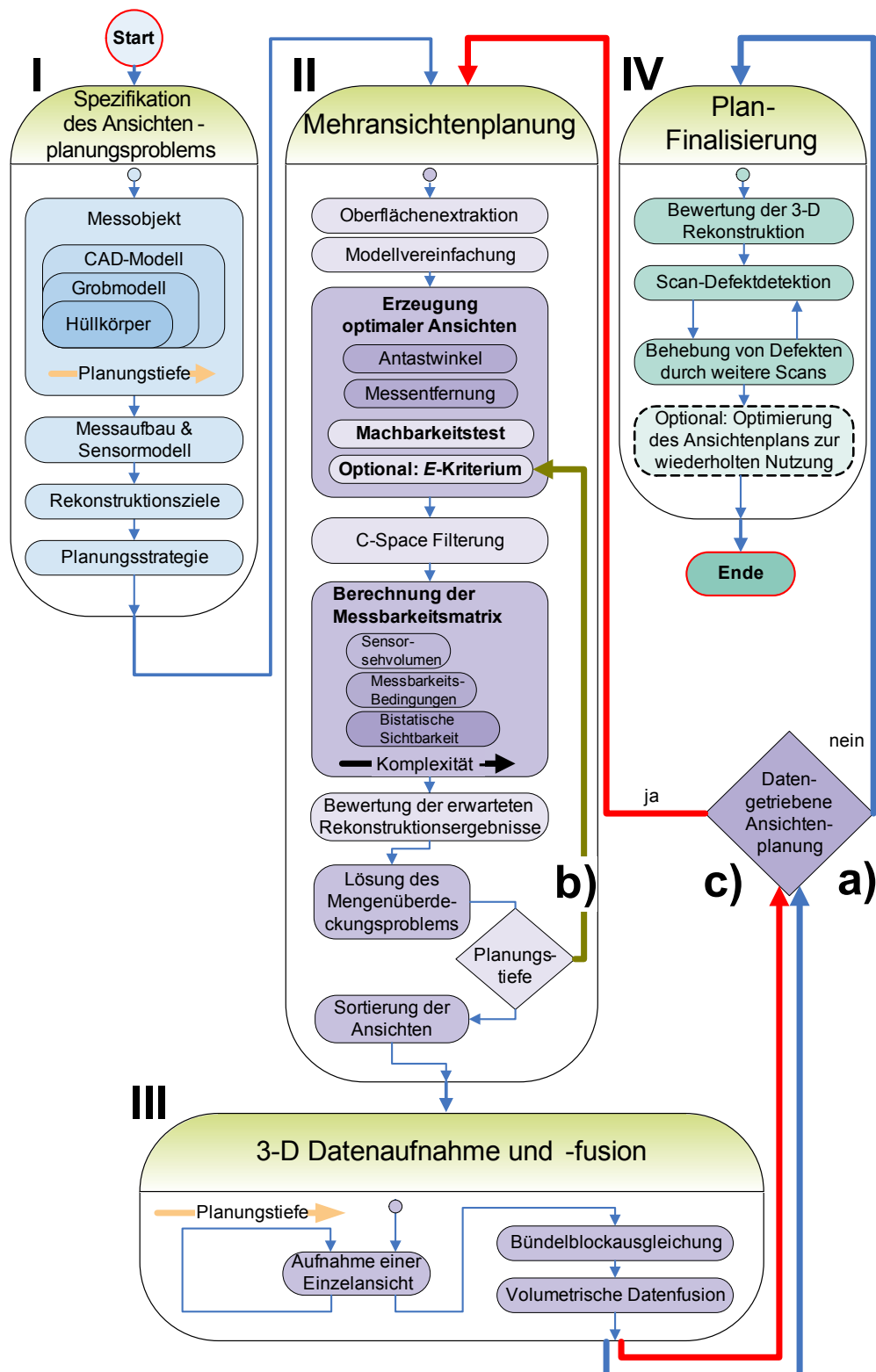


Abbildung 5.1: Überblick über den mengentheoretischen Ansichtenplanungsansatz dieser Arbeit: a) Planungsmethode nach Scott [69] b) Planung mit erweitertem  $E$ -Kriterium (siehe Abschnitt 5.2) c) Kombinierte daten- und modellgetriebene Ansichtenplanungsmethode (siehe Kapitel 6)

Scott betrachtet in seiner Arbeit [69] zu spezifizierende sog. Leistungsmaße, welche die Eigenschaften und Erfordernisse an die Rekonstruktion beschreiben. Die Anforderungen an diese in Abschnitt 4.3 vorgestellten Maße beschreiben jedoch indirekt die der Messung zugrunde zu legende Planungsstrategie. Mögliche Strategien wurden in Unterabschnitt 4.3.2 erläutert.

Auf die zur Sensormodellierung notwendigen Parameter soll hier näher eingegangen werden. Zur Überprüfung der Sichtbarkeit eines Oberflächenelementes  $s_i \in S$  muss u.a. berechnet werden, ob sich dieses innerhalb des Sensorsehvolumens (siehe Abschnitt 4.1) beider Sensoren befindet. Dazu werden die intrinsischen Parameter zusammen mit der Sensorauflösung und -pixelgröße und der Hand-Auge-Transformationen der zwei Kameras des Sensorkopfes, sowie die Messentfernungen  $d_{\min}$  bzw.  $d_{\max}$  benötigt. Die optimale Messentfernung  $d_o$  wird zur Diskretisierung des Ansichtenraumes  $V$  benötigt (s.u.). Im weiteren Sinne gehören zur Sensormodellierung auch die Mindestmessenforderungen, welche den Grenzwinkel  $\theta_b$  und die minimal und maximal zulässige Messentfernung  $d_{\min}$  bzw.  $d_{\max}$  umfassen.

Die Spezifikation des Positioniersystems ist zur Berechnung der Positioniersystemparameter aus gegebener Lage und Orientierung der Roboterhand im Weltkoordinatensystem notwendig. Weiterhin wird eine Methode `IsPositionFeasible` zur Verifikation gültiger Sensorkonfigurationen benötigt.

**II. Mehransichtenplanung** Zur näherungsweise Berechnung kürzester Ansichtenpläne durch Lösung des Mengenüberdeckungsproblems müssen sowohl das Objektmodell als auch der Ansichtenraum geeignet diskretisiert werden. Der Vereinfachung des Modells auf die gewählte Auflösung mittels Standardmethoden (implementiert z. B. in kommerzieller Software „Geomagic® Studio®“ [4], allgemeiner Überblick von Heckbert und Garland [29]) geht optional eine geeignete Oberflächenextraktion (z. B. nach Curless und Levoy [20] oder Edelsbrunner und Mücke [23] – ebenfalls implementiert in [4]) voraus, falls das Modell nicht bereits als Dreiecksvermaschung vorliegt, sondern aus Messdaten z. B. einer vorangegangenen Grobmessung erzeugt werden muss.

Anstatt auf einer View Sphere gleichmäßig verteilte Sensorpositionen zur Diskretisierung des Ansichtenraumes zu nutzen, setzt Scotts 3M-Algorithmus auf die objektabhängige Erzeugung optimaler Ansichten. Für jedes Modelldreieck  $s_i$  wird dabei ein Ansichtenkandidat  $\mathbf{v}_j$  erzeugt. Für bistatische Sensoren wird dafür im Folgenden ein „virtueller Sensor“ eingeführt, welcher der kompakten Beschreibung der resultierenden gemeinsamen Sichtbarkeit dient. Dieser besitzt vergleichbare intrinsische Parameter<sup>1</sup> und ist in der Mitte zwischen beiden Kameras postiert. Weiterhin entspricht dessen optische Achse der mittleren Richtung der optischen Achsen beider Kameras. Die Position des (virtuellen) Sensors des Ansichtenkandidaten  $\mathbf{v}_j$  wird dabei auf der Dreiecksnormale<sup>2</sup>  $\mathbf{n}_j$  mit Abstand  $d_o$  festgelegt. Dadurch entsteht eine vom Detailgrad des Modells abhängige Abtastung von  $V$  im Bereich der sog. *optimalen Messzone* (siehe Abb. 5.2 a). Die Blickrichtung (bzw. die Sensormittelachse) wird auf  $-\mathbf{n}_j$  gesetzt.

Abhängig von der Basislänge eines bistatischen Sensors ist die gemeinsame Sichtbarkeit (siehe Abschnitt 4.2) bestimmter Objektdetails nur durch eine spezifische Rotation  $\theta$  um die Sensormittelachse zu gewährleisten (siehe Abb. 5.2 c: Eine Kamera ist beim Ansichtenkandidat mit  $\theta = 90^\circ$  verdeckt). Deshalb werden, analog zu Scotts entkoppeltem 3M-Algorithmus,  $r = 4$  Ansichtenkandidaten an der gleichen Position der Roboterhand, aber mit Rotationswinkel  $\theta = 0^\circ, \dots, 180^\circ/r$  erzeugt.

<sup>1</sup>O. B. d. A. wird im Rahmen dieser Arbeit von einem Streifenprojektionssensor mit zwei gleichen Kameras mit vergleichbaren intrinsischen Parametern ausgegangen. Andere Konfigurationen erfordern eine entsprechende Anpassung der Ansichtenkandidatenerzeugung.

<sup>2</sup>Die Modelloberfläche wird dergestalt orientiert vorausgesetzt, dass die Dreiecksnormalen in Richtung der Objektaußenseite zeigen.



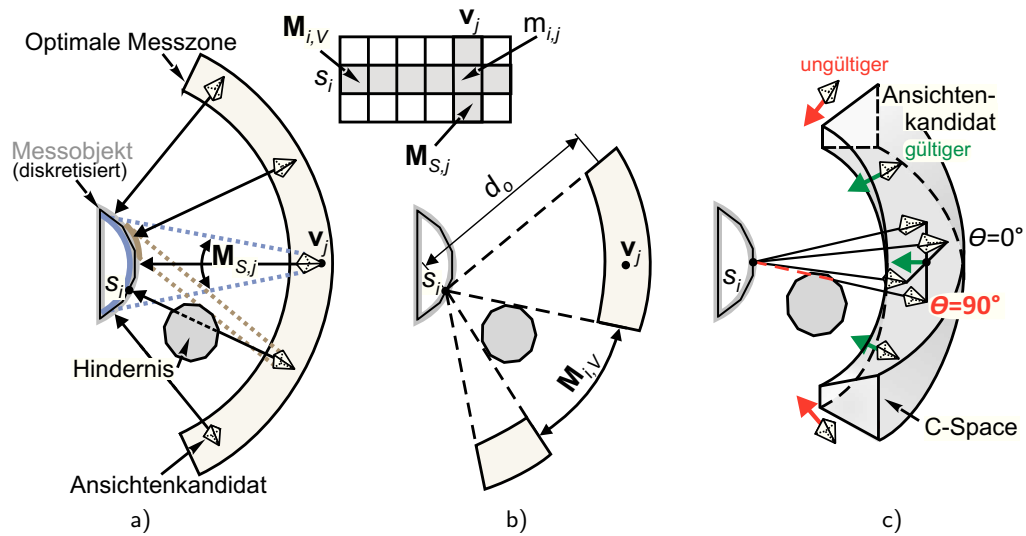


Abbildung 5.2: Berechnung der Messbarkeitsmatrix: a) Spalten  $M_{S,j}$  repräsentieren den von Sensorkonfiguration  $v_j$  erfassbaren Oberflächenbereich, während b) Zeilen  $M_{i,V}$  die Messbarkeit eines Oberflächenelements  $s_i$  widerspiegeln, und c) den Einfluss von Sensordrehung und C-Space auf die Messbarkeit demonstriert.

Um mögliche Einschränkungen im C-Space zu berücksichtigen sowie um Kollisionen zu vermeiden, können die erzeugten Ansichtskandidaten anschließend gefiltert werden. Dazu werden Kandidaten  $v_j$ , welche die Prüfung mittels der Methode `IsPositionFeasible(v_j)` nicht bestehen, aus der Liste möglicher Ansichten entfernt (siehe Abb. 5.2 c).

Die Zeitkomplexität der folgenden Berechnung der Messbarkeitsmatrix  $M = m_{ij}$  hat Scott mit  $\mathcal{O}(|S|^2 |V|)$  abgeschätzt [69]. Damit verursacht diese Berechnung den Hauptteil der zur Ansichtenplanung benötigten Rechenzeit. Die Elemente  $m_{ij}$  der Messbarkeitsmatrix schätzen ab, ob ein Dreieck<sup>3</sup>  $s_i \in S$  des Modells von einem Ansichtskandidaten  $v_j \in V$  messbar ist, also alle Messbarkeitsnebenbedingungen (siehe Abschnitt 4.3.1) eingehalten werden. Dabei spannen die Zeilen von  $M$  den diskretisierten Oberflächenraum  $S$  und die Spalten der Matrix den diskretisierten Ansichtenraum  $V$  auf (siehe Abbildungen 5.2 a und b). Sowohl eine binäre als auch kontinuierliche Kodierung der Messbarkeit ist möglich, wobei gemäß Scott die binäre Formulierung aufgrund ihrer Kompaktheit und etablierten Optimierungsmethoden vorzuziehen ist.

Zur Überprüfung der Messbarkeitsnebenbedingungen werden folgende Tests, ausgeführt in der Reihenfolge ansteigenden Berechnungsaufwandes, für jedes Modelldreieck durchgeführt:

1. *Lage im Sensorsehvolumen:* Damit ein Dreieck  $s_i$  überhaupt durch den Sensorkandidaten  $v_j$  beobachtet werden kann, muss es sich innerhalb der Sensorsehvolumina (siehe Abschnitt 4.1) beider Kameras befinden.
2. *Einhaltung der Rekonstruktionsziele:* Die erwartete Messunsicherheit  $\sigma_z$  und der mittlere Messpunktabstand  $d_{av}$  müssen die durch die Rekonstruktionsziele vorgegeben Mindestanforderungen ( $\sigma_s, d_s$ ) überschreiten.

<sup>3</sup>Scott betrachtet einen Eckpunkt pro Modelldreieck. Entsprechende Operationen beziehen sich im Grundansatz also immer auf einen Eckpunkt, auch wenn von Dreieck gesprochen wird.

3. *Sichtbarkeitstest*: Das Modelldreieck  $s_i$  ist nur dann messbar, wenn die Bedingung der gemeinsamen Sichtbarkeit durch beide Kameras eines bistatischen Sensors erfüllt ist. Dafür ist für beide Kameras zu prüfen, ob für einen gegebenen Ansichtenkandidaten  $\mathbf{v}_j$  das jeweilig Dreieck  $s_i$  durch kein anderes Dreieck  $s \in S$  des Modells oder des Messaufbaus verdeckt wird (siehe Abb. 5.2 b und c).

Die Eleganz im mengentheoretischen Ansichtenplanungsansatz liegt nun darin, dass die Matrix  $\mathbf{M}$  alle notwendigen Informationen zur Lösung des Ansichtenplanungsproblems beinhaltet. So ist z. B. ein Modelldreieck  $s_i$  durch keinen der betrachteten Kandidaten messbar, wenn seine *relative Sichtbarkeit*  $\mathcal{V}_{IS}(s_i)$  gleich Null ist:

$$\mathcal{V}_{IS}(s_i) = \frac{1}{|V|} \sum_{j=1}^{|V|} m_{ij}. \quad (5.1)$$

Dies ist gleichbedeutend zu einer Zeile  $\mathbf{M}_{i,V}$ , welche dem Nullvektor entspricht.

Die *relative Vollständigkeit*  $\mathcal{C}_{OV}(\mathbf{v}_j)$  gibt den Teil der Modelloberfläche an, welcher von Kandidat  $\mathbf{v}_j$  messbar ist:

$$\mathcal{C}_{OV}(\mathbf{v}_j) = \frac{1}{|S|} \sum_{i=1}^{|S|} m_{ij}. \quad (5.2)$$

Über eine logische Oder-Verknüpfung der Spalten  $\mathbf{M}_{S,j}, \dots, \mathbf{M}_{S,l}$  einer Menge von Ansichten  $\mathbf{v}_j, \dots, \mathbf{v}_l$  kann deren *gemeinsame Vollständigkeit* bestimmt werden. Die maximal erzielbare gemeinsame Vollständigkeit aller Ansichten wird mit  $c_{\max}$  bezeichnet.

Zur Lösung des Ansichtenplanungsproblems muss im Anschluss ausschließlich eine kleinste Menge von Ansichten bestimmt werden, deren gemeinsame Vollständigkeit  $c_{\max}$  ergibt. Mit anderen Worten: Es wird die kleinste Teilmenge an Spalten gesucht, um die Zeilen von  $\mathbf{M}$  vollständig zu überdecken. In dieser Formulierung ist es „sofort ersichtlich, dass das Ansichtenplanungsproblem isomorph zum Mengenüberdeckungsproblem (SCP) ist“ [69] (siehe auch Abschnitt 2.3.2). Weiterhin weist Scott daraufhin, dass sowohl Registrierungsnebenbedingungen als auch Sensorpositionierkosten durch geeignete Erweiterungen des SCP einbezogen werden können.

Mit der Bestimmung der Reihenfolge der Ansichten endet die Planungsphase. Abhängig von der zugrundeliegenden Planungsstrategie können verschiedene Sortierkriterien zur Anwendung kommen. Scott führt als Beispiel die Sortierung nach Sensorpositionierkosten auf, welche auf Grundlage des euklidischen Abstandes zwischen den Sensorpositionen abgeschätzt werden. Dieses Problem kann auf die Lösung des Problems des Handlungsreisenden abgebildet werden (siehe Abschnitt 2.3.3).

**III. 3-D Datenaufnahme und -Fusion** Anschließend kann der berechnete Ansichtenplan ausgeführt werden. Dazu kommt eine auf den verwendeten Sensor angepasste Variante des grundlegenden Rekonstruktionszyklus, bestehend aus Datenaufnahme / Registrierung / Integration, zum Einsatz. Im Falle der Streifenprojektion werden alle geplanten  $n$  Ansichten aufgenommen und darauffolgend mittels Bündelblockausgleichung (siehe Abschnitt 2.1.2) in ein gemeinsames Weltkoordinatensystem transformiert. Abschließend werden die Einzelansichten zu einem gemeinsamen Objektmodell mittels der volumetrischen Datenfusion (siehe „Messverfahrensspezifische Vorverarbeitung“ im Abschnitt 4.4.3) vereinigt.

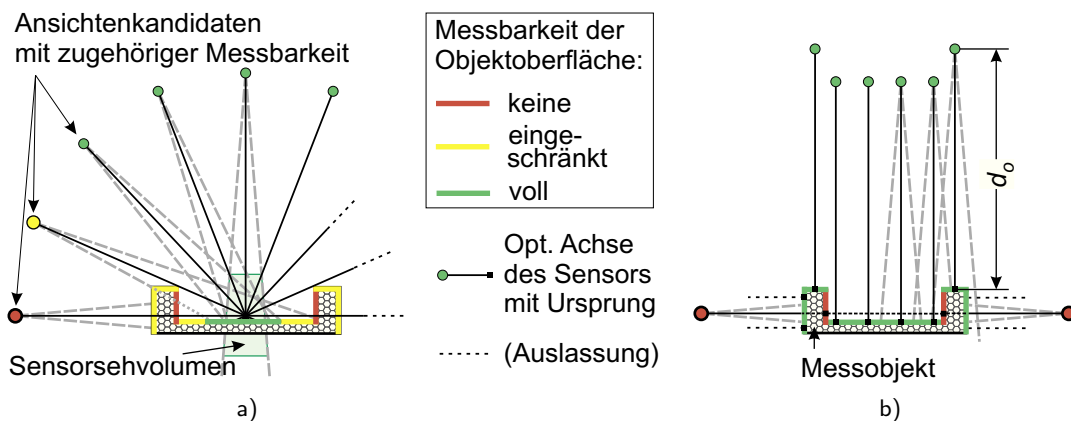


Abbildung 5.3: Erzeugung von Ansichtskandidaten in der modellgetriebenen Ansichtenplanung – unvollständige Objekterfassung (rote Flächen) aufgrund unangepasster Kandidaten: a) Sensorpositionen auf der View Sphere bei ausgedehntem Objekt [82], b) Sensorpositionen in der optimalen Messzone [69].

**IV. Planfinalisierung** In der letzten Phase kann der erzeugte Plan weiter optimiert werden. Dazu kann das in der III. Phase erzeugte Objektmodell anhand der gewählten Ansichten bewertet (oder auch „verifiziert“) werden. Dazu wird wieder die Messbarkeitsmatrix berechnet und darauf basierend etwaige Defekte, wie z. B. Bereiche hoher Messunsicherheit oder hohen mittleren Punktabstandes, detektiert. Diese können durch geeignete zusätzliche Ansichten behoben werden.

Speziell für Inspektionsaufgaben kann es wichtig sein, die Ansichtenfolge für häufige, wiederholte Ausführungen zu verbessern. Über die in Phase II. erwähnte Sortierung hinaus geht Tarbox' und Gottschlichs [82] Methode des simulierten Ausglühens (engl. „simulated annealing“). Dabei werden Ansichten mit geringer relativer Vollständigkeit eliminiert, indem andere Ansichten durch geringfügige Änderungen deren Anteil an der gemeinsamen Vollständigkeit zusätzlich übernehmen. Dieser Aspekt wird jedoch in dieser Arbeit nicht näher untersucht. Weitere Möglichkeiten der Planfinalisierung werden in Abschnitt 23 erläutert.

### 5.1.2 Anpassung an komplexe Messobjekte bei beschränktem C-Space

Sowohl Tarbox' und Gottschlichs [82] Ansichtenplanungsansatz als auch Scotts darauf basierende Erweiterung zum 3M-Algorithmus erzeugen für viele Messaufgaben gut geeignete Ansichtenpläne. Bedingt durch die Art der Erzeugung der Ansichtskandidaten (View Sphere bzw. optimale Messzone) werden aufgrund von (*Selbst-*)Verdeckungen schwer erfassbare Objektflächen, z. B. Seitenbereiche von Konkavitäten, nicht zielgerichtet beobachtet. Bei View Sphere-basierter Kandidatenerzeugung ist die problemlose Erfassung solcher Flächen nur dann gewährleistet, wenn das Objekt vollständig in das Sensorsehvolumen eingebettet werden kann. Ist dies aufgrund der Größe des Objektes nicht möglich, können außenzentrisch gelegene, zur Objektmitte orientierte Flächen nicht rekonstruiert werden (rote Flächen in Abb. 5.3 a). Des Weiteren können bei eingeschränktem Tiefenschärfebereich einige Flächen nicht spezifikationsstreu erfasst werden, da die Messentfernung außerhalb des zulässigen Bereiches liegt (gelbe Flächen in Abb. 5.3 a).

Im Gegensatz zu View Sphere-Ansätzen werden bei der Ansichtskandidatenerzeugung nach der Methode der optimalen Messzone auch für die Seitenflächen großer Objekte Kandidaten erzeugt, welche

**Algorithmus 5.1:** Angepasste Erzeugung der Ansichtenkandidaten.

---

```

Daten: Modellspezifikation: Objektmodell  $M_{\text{spec}}$ 
          Sensorspezifikation (Sensor- und Positioniersystem)
          Loxodrome in geeigneter Parametrisierung
Ergebnis: Menge von Ansichtenkandidaten  $V_{\text{can}}$ 

1 begin
2   for  $s_i \in M_{\text{spec}}$  do // Für alle Modelldreiecke
3      $k \leftarrow 0$ 
4     Erzeuge optimalen Ansichtenkandidaten  $v_i$ 
5     // Test auf Sichtbarkeit und Erreichbarkeit
6     while not ( $s_i$  ist von  $v_j$  sichtbar and IsPositionFeasible( $v_j$ )) do
7        $k \leftarrow k + 1$ 
8       Berechne alternativen Kandidaten  $v_{v_j}^k$  auf Loxodrome für  $v_i$ 
9       if  $\theta_o^k \geq \theta_b$  then // Winkel zur Normale zu groß // Abbruch
10         $k \leftarrow -1$ ; break
11     if  $k = -1$  then continue; // nächstes Modelldreieck
12     else if  $k > 0$  then  $v_j \leftarrow v_{v_j}^k$  // Merke alternativen Kandidaten
13     for  $\theta_r \in \theta$  do // Für alle  $r$  Rotationen  $\theta_r$ 
14       Füge Rotationen um Sensormittelachse  $v_{v_j}^{\theta_r}$  in  $V_{\text{can}}$  ein

```

---

die jeweilige Fläche innerhalb des Sensorsehvolumens rekonstruieren (siehe Abb. 5.3 b). Allerdings werden auch hier außerszentrisch gelegene, zur Objektmitte orientierte Flächen nicht zielgerichtet beobachtet, da die korrespondierenden Ansichten die jeweiligen Objektbereiche aufgrund von Verdeckungen durch das Messobjekt nicht rekonstruieren können (rote Flächen in Abb. 5.3 b). Bei weniger komplexen Objekten können einige dieser Bereiche durch andere Ansichten erfasst werden, welche die Problemflächen zufällig im Sensorsehvolumen abbilden. Die Wahrscheinlichkeit dafür nimmt jedoch mit kleiner werdendem Bereich gemeinsamer Sichtbarkeit  $A_o$  ab.

Ein weiterer Schwachpunkt beider Methoden zur Kandidatenerzeugung offenbart sich in Verbindung mit der – der Berechnung der Kandidaten nachfolgenden – Berücksichtigung des *C-Space* durch Filterung unzulässiger Sensorpositionen. Objektbereiche, welche nur durch optimale Ansichtenkandidaten erfasst werden können, die jedoch außerhalb des C-Space liegen, werden nicht rekonstruiert. Dies erkannte auch Scott, der anmerkte, dass „ausufernde Einschränkungen des Bewegungsraumes die Vorteile der vorgeschlagenen Ansichtenkandidatenerzeugung [durch die Methode der optimalen Messzone] zunichtemachen“ [69, S. 54]. Deutliche Einschränkungen im C-Space sind bei größeren Messobjekten aber oft unvermeidbar.

**Angepasste Erzeugung der Ansichtenkandidaten** Einer angepassten Erzeugung der Ansichtenkandidaten zugrunde liegt die Beobachtung, dass alternative, nicht notwendigerweise optimale, Kandidaten existieren, welche die jeweiligen Flächen trotz Selbstverdeckung oder Einschränkungen im C-Space erfassen könnten. Die Berechnung der besten Ansicht, welche die Fläche gerade noch erfassen könnte, scheidet jedoch aus zwei Gründen aus: Zum einen ist eine analytische Lösung, z. B. durch Aspektgraphen für komplexe Modelle zu aufwendig (siehe Abschnitt 3.2.2). Andererseits wären solche Kandidaten besonders anfällig selbst für geringe Posenunsicherheit: Kleine Abweichungen zwischen geplanter und tatsächlicher Sensorposition (z. B. aufgrund von Restfehlern bei der Hand-Auge-Transformation) könnten wieder zur Verdeckung oder Positionen außerhalb des C-Space führen.

Eine dem Problem angepasste Lösung stellt Algorithmus 5.1 dar. Dieser kann alternative Ansichten-

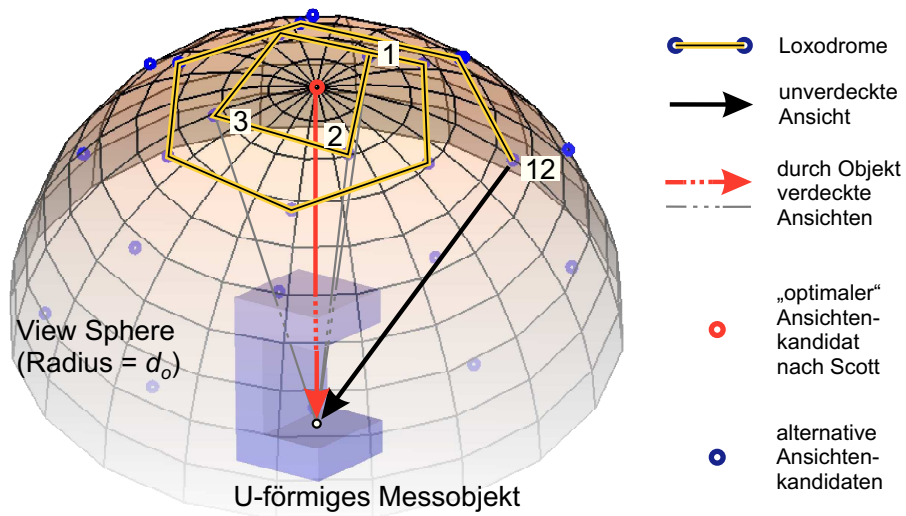


Abbildung 5.4: Erzeugung alternativer Ansichtenkandidaten: Wird ein ungeeigneter Kandidat in der optimalen Messzone [69] erkannt, werden Positionen auf einer Loxodrome (beispielhaft: Kandidaten 1,2,3) erzeugt, bis ein erster gültiger Kandidat (12) gefunden oder der Grenzwinkel  $\theta_b$  erreicht ist.

kandidaten durch eine systematische Abtastung (siehe Abschnitt 2.2.2) einer View Sphere mit Radius  $d_o$ , deren Mittelpunkt sich auf der jeweiligen Objektfläche (z. B. dem Schwerpunkt des korrespondierenden Dreiecks  $s_i$ ) befindet, erzeugen. Dazu werden, ausgehend vom Pol der oberen Halbkugel, welcher durch den Schnittpunkt mit der Oberflächennormale  $\mathbf{n}$  – und damit gleichzeitig Durchstoßungspunkt der Sensormittelachse des optimalen Ansichtenkandidaten  $\mathbf{v}_j$  im Sinne Scotts (Alg. 5.1, Zeile 4) – definiert ist, Sensorpositionen entlang einer Kursgleichen (gr. Loxodrome) bestimmt (siehe Abb. 5.4 und Alg. 5.1, Zeile 7). Eine Loxodrome auf der Einheitskugel lässt sich gemäß J. Alexander [6] wie folgt berechnen:

$$\begin{pmatrix} x \\ y \\ z \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} \cos \lambda \operatorname{sech}(m\lambda) \\ \sin \lambda \operatorname{sech}(m\lambda) \\ \tanh(m\lambda) \end{pmatrix}, \quad (5.3)$$

mit  $m = 0,75$ . Eine geeignete Abtastung mit  $n = 20$  alternativen Kandidaten erhält man z. B. für:

$$\lambda_k = \frac{\pi}{16}(153 - 7k), \quad k = 1, \dots, n. \quad (5.4)$$

Die zum Zentrum der View Sphere orientierte Blickrichtung  $\mathbf{o}^k$  jeder der Kandidaten  $\mathbf{v}_{\mathbf{v}_j}^k$ ,  $k = 1, \dots, n$  dieser Folge  $n$  alternativer Ansichtenkandidaten weist einen, im Vergleich zum vorhergehenden Kandidaten streng monoton größer werdenden Winkel  $\theta_o^k = \angle(\mathbf{n}, \mathbf{o}^k)$  zum optimalen Ansichtenkandidaten  $\mathbf{o}$  auf. Ist die Beobachtung des Dreiecks  $s_i$  durch  $\mathbf{v}_{\mathbf{v}_j}^k$  aufgrund von Verdeckungen oder Einschränkungen im C-Space nicht möglich (Alg. 5.1, Zeile 5), wird der nächste Kandidat  $k + 1$  berechnet, solange  $\theta_o^k < \theta_b$  ist. Durch eine geeignete Ähnlichkeitsabbildung werden die mittels Gleichungen (5.3) und (5.4) berechneten alternativen Positionen auf der Einheitskugel so ins Weltkoordinatensystem abgebildet, dass der neue Mittelpunkt mit  $s_i$  und der neue Radius mit  $d_o$  übereinstimmt, sowie der obere Pol mit dem zugrundeliegenden  $\mathbf{v}_j$  zusammenfällt.

Die Parameter in Gl. (5.4) wurden empirisch ermittelt. Die so berechneten Positionen weisen eine

niedrige Dispersion und Diskrepanz (siehe Abschnitt 2.2.2) auf. Der kleinste Fehler beträgt dabei  $\theta_o^{k=1} \approx 10,8^\circ$  und der größte  $\theta_o^{k=20} \approx 67,8^\circ$ . Der Median des Winkelabstandes eines beliebigen Punktes auf der oberen Einheitskugelhälfte zu einem alternativen Ansichtenkandidaten der obigen Folge beträgt  $13,9^\circ$ . Diese angepasste Erzeugung der Ansichtenkandidaten führt zu signifikanten Verbesserungen bei der erzielbaren Vollständigkeit (siehe Munkelt et al. [50] und Abschnitt 5.3.2).

**Beschleunigung der Berechnung der Messbarkeitsmatrix** Die Berechnung der Messbarkeitsmatrix ist bei der mengentheoretischen Ansichtenplanung einer der aufwendigsten Schritte, dessen Laufzeit infolge der zugrundeliegenden Komplexität  $\mathcal{O}(|S|^2|V|)$  (s.o.) stark vom Detailgrad des eingesetzten Objektmodells abhängt. Um jedoch auch Details komplexer Objekte sicher erfassen zu können, ist ein erhöhter Detailgrad sinnvoll [45]. Die Berechnung der Messbarkeitsmatrix wurde deshalb durch zwei Schritte beschleunigt:

**Redundanzerkennung:** Während ein hoher Detailgrad des Objektmodells erwünscht ist, um Ansichtenpläne hoher Qualität erzeugen zu können, ist die Erzeugung eines Ansichtenkandidaten pro Modelldreieck für Bereiche niedriger Oberflächenkomplexität nicht notwendig. Scott versucht das Problem mittels des „entkoppelten Algorithmus“ (engl. „decoupled algorithm“, siehe [69]) zur Kandidatenerzeugung zu lösen, indem dieser der Ansichtenerzeugung ein nochmals vereinfachtes Objektmodell zugrunde legt. Dadurch werden aber auch für komplexe Bereiche nur wenige und auf einem zweifach vereinfachten Modell basierende Kandidaten erzeugt.

In dieser Arbeit werden die Ansichtenkandidaten basierend auf der vollen Auflösung des hinreichend vereinfachten Objektmodells erzeugt (s.o.). Weist ein Ansichtenkandidat jedoch eine hohe Übereinstimmung zu einem bereits berechneten auf, wird er verworfen. Dazu werden sowohl der euklidische Abstand der Schnittpunkte der Sensormittelachsen mit den jeweiligen Modelldreiecken als auch der euklidische Abstand der Positionen der jeweiligen virtuellen Sensoren mit empirisch festgelegten Schwellwerten verglichen. In Experimenten konnte so, bei gleicher Länge des erzeugten Ansichtenplanes und vergleichbarer Ansichtenplanqualität, die Anzahl zu prüfender Ansichtenkandidaten um bis zu 30 % reduziert werden, was wiederum einer Beschleunigung der Berechnung der Messbarkeitsmatrix um bis zu 30 % im Vergleich zum Ausgangszustand entspricht.

**Tiefenpuffer bei Rotationen um die Sensormittelachse:** Bei der Berücksichtigung von Rotationen  $\theta$  des virtuellen Sensors um seine Sensormittelachse werden im Rahmen des Sichtbarkeitstests eines Dreiecks  $s_i$  die Entfernungen von den Kameras zu allen anderen Modelldreiecken nur einmal berechnet. Bei darauffolgenden Rotationen des gleichen virtuellen Sensors können so eine modellabhängige Anzahl von Dreiecken ohne weitere Berechnungen als nicht verdeckend zurückgewiesen werden, deren Abstand entscheidend zu groß ist. Die Berechnung der Messbarkeitsmatrix konnte so – beim Modell des NBV Testobjektes und Berücksichtigung von vier Rotationen um die Sensormittelachse – um ca. 30 % im Vergleich zum Ausgangszustand beschleunigt werden.

## 5.2 Mehrschrittplanung mit erweitertem $E$ -Kriterium

In diesem Abschnitt wird der gewählte Ansatz zur Einbeziehung der Messunsicherheit in den Ansichtenplanungsprozess vorgestellt. Soll neben der Minimierung der notwendigen Anzahl von Ansichten, bei

gleichzeitiger Maximierung der Vollständigkeit, auch die Einhaltung einer bestimmten Messunsicherheit durch die Ansichtenplanung erreicht werden, so kann dies auf zweierlei Art geschehen:

1. *Messaufgabenspezifische Schwellwerte*: Die angestrebte Messunsicherheit wird indirekt durch Schwellwerte bezüglich der relevanten Sensorparameter, wie z. B. zulässiger Grenzwinkel und Tiefenschärfebereich, gesteuert. Um eine niedrige Messunsicherheit zu erreichen, müssen jedoch die Schwellwerte unter Umständen so strikt gesetzt werden, dass die notwendige Ansichtenanzahl steigt oder die Vollständigkeit sinkt. Diesen Ansatz verfolgt die Mehrzahl der Ansichtenplanungsmethoden.
2. *Direkte Modellierung der Messunsicherheit*: Diese hat bei der Vermessung komplexer Objekte zwei entscheidende Vorteile. Zum einen kann die bei der Vermessung komplexer Objekte mittels flächenhaft antastender 3-D Sensoren kaum zu vermeidende Beobachtung von Oberflächenabschnitten aus verschiedenen Ansichten gezielt dazu genutzt werden, die geforderte Messunsicherheit durch geeignete Fusion auch von – für sich alleine betrachtet – unzureichenden Einzelansichten zu erzielen. Damit erhöht sich die Wahrscheinlichkeit, eine niedrige Messunsicherheit ohne signifikante Verlängerung des Ansichtenplanes oder Sinken der Vollständigkeit zu erzielen. Zum anderen können quantitative Abschätzungen zu der erzielbaren Messunsicherheit konkreter Objektbereiche getroffen werden.

Um die Vorteile der zweiten Herangehensweise zu prüfen, wurde deshalb der mengentheoretische Ansichtenplanungsansatz durch direkte Einbeziehung der Messunsicherheit erweitert.

Die gewählte Herangehensweise versucht dabei, den Informationsgehalt der bisherigen 3-D Rekonstruktion durch Minimierung der Unsicherheit zu erhöhen. Zur Schätzung der Messunsicherheit wird seit Langem die Spektralzerlegung der zur jeweiligen Punktschätzung  $\bar{P}$  gehörigen Kovarianzmatrix  $C$  in der Photogrammetrie genutzt (siehe Abschnitt 2.4). Darauf aufbauend kann die Unsicherheit mittels eines Fehlerellipsoids visualisiert werden. Ein klassisches Maß aus der Statistik für die Optimierung der „Größe“ einer quadratischen, positiv semidefiniten Informationsmatrix ist das Kriterium des kleinsten Eigenwertes (sog. E-Kriterium). Die Optimierung nach dem E-Kriterium entspricht dabei der Minimierung des größten Eigenwertes der Kovarianzmatrix  $C$  (F. Pukelsheim [61, 6. Kapitel]). In der datengetriebenen Ansichtenplanung wurde dieses Kriterium von Wenhardt et al. [98] genutzt.

Zur Minimierung der Messunsicherheit wird in der Nahbereichsphotogrammetrie auch die Richtung des zum größten Eigenwert gehörenden Eigenvektors, im Folgenden als Hauptfehlerachse bezeichnet, betrachtet. Zwei Punktmessungen, bei denen die Hauptfehlerachsen orthogonal zueinander orientiert sind, führen zur Minimierung der Messunsicherheit (Luhmann et al. [44, S. 283 ff.]; „Minimierung der Fehlerfortpflanzung – Die 90° Regel“, in P. Kühmstedt [32, S. 29 ff.]). Ein entsprechender datengetriebener Ansichtenplanungsansatz, unter Nutzung dieses sog. „erweiterten E-Kriteriums“, wurde unlängst von Trummer, Munkelt und Denzler [86] veröffentlicht.

Im weiteren Verlauf dieses Abschnittes wird in Abschnitt 5.2.1 das entwickelte Modell zur Schätzung der Messunsicherheit einer aus mehreren Ansichten beobachteten Oberfläche basierend auf einer zugrunde liegenden Sensorkalibrierung vorgestellt. Abschnitt 5.2.2 gibt die auf dem erweiterten E-Kriterium aufbauende Methode zur modellgetriebenen Ansichtenplanung wieder. Zur besseren Unterscheidbarkeit wird das dafür angepasste Kriterium im weiteren Verlauf – im Gegensatz zu dem des datengetriebenen Ansatzes – kursiv als „E-Kriterium“ bezeichnet.

### 5.2.1 Schätzung der Messunsicherheit von 3-D Messsystemen auf Grundlage der Streifenprojektion

Während in auf Punktkorrespondenzfindung beruhenden 3-D Rekonstruktionsansätzen für jeden berechneten 3-D Punkt die Bestimmung der zugehörige Kovarianzmatrix Teil des Messverfahrens ist, können korrespondierende Punkte in anderen Ansichten bei auf Streifenprojektion basierenden Rekonstruktionsmethoden nicht für alle Punkte bestimmt werden. Dies ist bei Nutzung der Methode der virtuellen Passmarken zur Registrierung mehrerer Ansichten nur für jene Punkte möglich, welche zusätzlich auch von objektfesten Verknüpfungskameras beobachtet wurden (siehe Abschnitt 4.2).

Um jedoch eine gemeinsame Methode sowohl zur Vorhersage als auch zur Bestimmung der Messunsicherheit aus bereits aufgenommenen Ansichten verwenden zu können, wurde im Rahmen dieser Arbeit ein Modell zur Schätzung der Messunsicherheit, basierend auf anderen Messgrößen als den 3-D Daten korrespondierender Punkte, entwickelt. Wie gezeigt werden konnte, haben vor allem der Abtastwinkel  $\theta_a$  und die Messentfernung  $d$  entscheidenden Einfluss auf die Unsicherheit (siehe Abschnitt 4.2). Weiterhin wird die Messunsicherheit triangulationsbasierter 3-D Sensoren mit kleinem Triangulationswinkel  $\theta_t \ll 90^\circ$ , wie in der Literatur beschrieben und durch eigene Experimente bestätigt, durch die Messunsicherheit in Sehstrahlrichtung dominiert.

Das hier vorgestellte Modell zur Vorhersage der Messunsicherheit versucht deshalb – mittels einer vorab kalibrierten, charakteristischen Messfehlerverteilung – durch geeignete Operationen dessen Hauptfehlerachse in Sehstrahlrichtung auszurichten, die absolute Größe der Messunsicherheit entsprechend  $\theta_a$  und  $d$  zu skalieren und die Auswirkungen mehrerer Einzelmessungen auf die resultierende Messunsicherheit abzuschätzen.

**Kalibrierung der charakteristischen Messfehlerverteilung** Die Kalibrierung ermittelt die für den einzusetzenden 3-D Sensor typische Messunsicherheit. Als Ergebnis erhält man eine als charakteristische Kovarianzmatrix bezeichnete Matrix  $\Sigma_c$ , welche die Matrix aller paarweisen Kovarianzen der Komponenten der 3-D Schätzung des virtuellen Sensors repräsentiert. Zur Bestimmung von  $\Sigma_c$  wird der Sensor in optimaler Messentfernung  $d_o$  mit Antastwinkel  $\theta_a = 0^\circ$  vor einer Ebene platziert. Um  $\Sigma_c$  allgemeingültig ermitteln zu können, müssen alle weiteren Systemparameter mit der späteren Messsituation übereinstimmen. Dies umfasst neben Sensoreinstellungen wie der Brennweite auch Parameter des Messsystems im weiteren Sinne (z. B. evtl. Vorverarbeitungen, Parametrisierung der Rekonstruktionsalgorithmen u.ä.) und die Objektoberflächeneigenschaften. Im Allgemeinen ergeben sich daraus keine starken Einschränkungen der Anwendbarkeit, da mittels Anpassung der Belichtungszeit die Auswirkungen unterschiedlicher mittlerer Objekthelligkeit ausgeglichen werden können und des Weiteren von Lambert-Flächen ausgegangen wird (siehe Abschnitt 4.2).

Zur Kalibrierung werden, ohne Bewegung des Sensors oder anderer Veränderungen,  $n$  3-D Rekonstruktionen  $\hat{\mathbf{p}}_1, \dots, \hat{\mathbf{p}}_n$  des gleichen Punktes  $\hat{\mathbf{p}}$  auf der Objektoberfläche durchgeführt (siehe Abbildung 5.5 a). Nun wird die Kovarianzmatrix  $\Sigma$  dieser Messungen bestimmt:

$$\Sigma = \text{cov}(\hat{\mathbf{p}}_1 \dots \hat{\mathbf{p}}_n). \quad (5.5)$$

Die charakteristische Kovarianzmatrix  $\Sigma_c$  wird nun wie folgt definiert:

$$\Sigma_c = \mathbf{R}_c^T \Sigma \mathbf{R}_c, \quad (5.6)$$



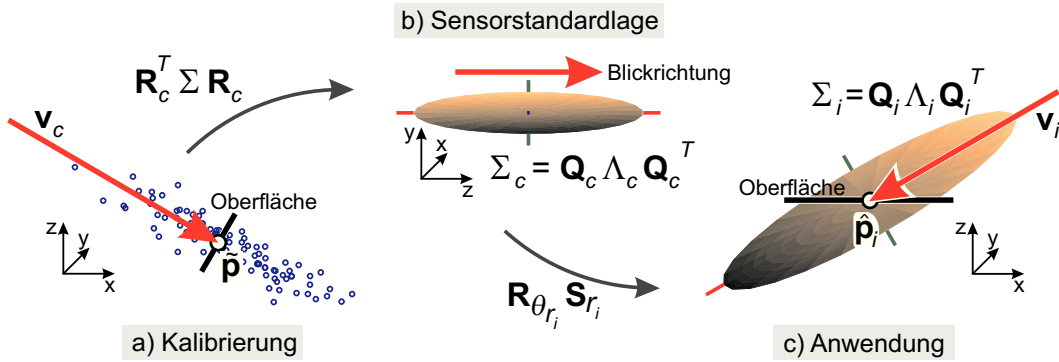


Abbildung 5.5: Modell zur Vorhersage der Messunsicherheit: a) Kalibrierung durch Aufnahme einer charakteristischen Messpunktverteilung bei Messung von  $\hat{\mathbf{p}}$  mit Parametern ( $d = d_o, \theta_a = 0^\circ$ ), b) Berechnung der charakteristischen Kovarianzmatrix  $\Sigma_c$  im Sensorkoordinatensystem, c) Vorhersage der zu erwartenden Kovarianzmatrix  $\Sigma_i$  bei Beobachtung  $\hat{\mathbf{p}}_i$  von Ansicht  $\mathbf{v}_i$ .

mit  $\mathbf{R}_c$  der Orientierung des virtuellen Sensors während der Kalibrierung. Durch  $\Sigma_c$  wird die Varianz einer 3-D Messung dieses Sensors im Sensorkoordinatensystem beschrieben. Der Blickrichtung entspricht dabei die Sensormittelachse.

Die Spektralzerlegung von  $\Sigma_c$  liefert nun die zugehörigen Eigenwerte  $\lambda_c^{(1)} \geq \lambda_c^{(2)} \geq \lambda_c^{(3)}$  und Eigenvektoren  $\xi_c^{(1)}$ ,  $\xi_c^{(2)}$  und  $\xi_c^{(3)}$ , so dass gilt:

$$\Sigma_c = \mathbf{Q}_c \Lambda_c \mathbf{Q}_c^T, \quad (5.7)$$

mit  $\mathbf{Q}_c$  einer orthogonalen Matrix, deren paarweise orthonormale Spaltenvektoren die Eigenvektoren  $\xi_c$  sind und der Diagonalmatrix  $\Lambda_c$  der Eigenwerte  $\lambda_c$ . Abbildung 5.5 b) zeigt den zugehörigen Fehlerellipsoiden der charakteristischen Kovarianzmatrix  $\Sigma_c$ .

**Vorhersage der Messunsicherheit** Zur Anwendung kommt  $\Sigma_c$  zur Vorhersage der resultierenden Messunsicherheit  $\bar{\sigma}_s^n$  bei der Messung eines Punktes  $\bar{\mathbf{p}}$  auf einer Objektoberfläche  $s$  mit Normale  $\mathbf{n}$  durch  $n$  Beobachtungen  $\hat{\mathbf{p}}_1, \dots, \hat{\mathbf{p}}_n$ . Im Folgenden wird auf die Indizierung durch die jeweilige Beobachtung  $\hat{\mathbf{p}}_i$  der Lesbarkeit wegen verzichtet.

#### 1. Ausrichtung der Hauptfehlerachse

Zuerst wird die Hauptfehlerachse des  $\Sigma_c$  repräsentierenden Fehlerellipsoiden gemäß der Sehstrahlrichtung  $\mathbf{r}_i = (u, v, w)^T$  der Beobachtung  $\hat{\mathbf{p}}_i$  ausgerichtet. Dazu wird dessen, durch  $\mathbf{Q}_c = (\xi_c^{(1)}, \xi_c^{(2)}, \xi_c^{(3)})$  repräsentiertes Koordinatensystem, entsprechend rotiert. Weiterhin muss die jeweilige Rotation  $\mathbf{R}_{\theta_{\mathbf{r}_i}}$  um die Sensormittelachse berücksichtigt werden:

$$\mathbf{Q}_i = (\xi_i^{(1)}, \xi_i^{(2)}, \xi_i^{(3)}) = \mathbf{R}_{\theta_{\mathbf{r}_i}} \mathbf{S}_{\mathbf{r}_i} \mathbf{Q}_c, \quad (5.8)$$

mit  $\mathbf{S}_{\mathbf{r}_i}$  der Rotation des Sensorkoordinatensystem in das Weltkoordinatensystem entsprechend der Blickrichtung  $\mathbf{r}_i$ :

$$\mathbf{S}_{\mathbf{r}_i} = (\mathbf{u} \times \mathbf{r}_i, \mathbf{u}, -\mathbf{r}_i), \quad (5.9)$$

wobei  $\mathbf{u}$  ein zu  $\mathbf{r}_i$  orthogonaler Vektor ist mit  $\mathbf{u} = \mathbf{u}' / \|\mathbf{u}'\|$  und  $\mathbf{u}' = (u, -u^2/v, 0)^T$ . Damit

sind die Achsen des Fehlerellipsoiden (in Standardlage) im Weltkoordinatensystem gemäß der Blickrichtung  $\mathbf{r}_i$  der Ansicht  $\mathbf{v}_i$  ausgerichtet.

## 2. Skalierung der Messunsicherheit

Nun wird die Diagonalmatrix der Eigenwerte  $\Lambda_c$  gemäß den in Abschnitt 4.2 ermittelten Einflüssen auf die Messunsicherheit skaliert. Dazu werden Messentfernung  $d$  und Antastwinkel  $\theta_a$  der Beobachtung  $\hat{\mathbf{p}}_i$  bestimmt und die korrespondierende Diagonalmatrix  $\Lambda_i$  nach Gl. (4.4) wie folgt berechnet:

$$\Lambda_i = \left( \frac{d}{\cos \theta_a} \right)^2 \Lambda_c. \quad (5.10)$$

Die resultierende Unsicherheit  $\sigma_i^{(1)}$  der Beobachtung  $\hat{\mathbf{p}}_i$  lässt sich dann abschätzen durch die Quadratwurzel des größten Eigenwertes  $\lambda_i^{(1)}$ , welcher die Varianz der Messung entlang der Hauptfehlerachse repräsentiert:

$$\sigma_i^{(1)} \approx \sqrt{\lambda_i^{(1)}}. \quad (5.11)$$

Die Abschätzung folgt aus dem dominierenden Einfluss der Messunsicherheit in Sensorsehstrahlrichtung.

## 3. Schätzung der Unsicherheit mehrerer Ansichten

Da Kovarianzmatrizen symmetrisch und positiv semidefinit sind, ist

$$\Sigma_i = \mathbf{Q}_i \Lambda_i \mathbf{Q}_i^T \quad (5.12)$$

eine Diagonalisierung von  $\Sigma_i$ . Somit kann unter Verwendung von Gleichungen (5.8) und (5.10) die Kovarianzmatrix  $\Sigma_i$  der Beobachtung  $\hat{\mathbf{p}}_i$  abgeschätzt werden.

Unter der Annahme, dass die einzelnen Beobachtungen  $\hat{\mathbf{p}}_i$  statistisch unabhängig sind sowie der Translation der  $\hat{\mathbf{p}}_i$  auf  $\bar{\mathbf{p}}^{(n)}$ , kann die kumulierte Kovarianzmatrix  $\bar{\Sigma}^{(n)}$  der kombinierten Punktschätzung  $\bar{\mathbf{p}}^{(n)}$  in Anlehnung an den zentralen Grenzwertsatz [96] über das arithmetische Mittel der Kovarianzmatrizen  $\Sigma_i$  der  $n$  Beobachtungen  $\hat{\mathbf{p}}_i$  gemäß Gl. (5.12) wie folgt berechnet werden:

$$\bar{\Sigma}^{(n)} = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n \Sigma_i. \quad (5.13)$$

Die resultierende Unsicherheit  $\bar{\sigma}^{(n)}$  der Punktschätzung  $\bar{\mathbf{p}}^{(n)}$  wird entsprechend Gl. (5.11) aus dem größten Eigenwert der kumulierten Kovarianzmatrix  $\bar{\Sigma}^{(n)}$  wie folgt berechnet:

$$\bar{\sigma}^{(n)} \approx \sqrt{\bar{\lambda}_n^{(1)}}. \quad (5.14)$$

Abbildung 5.6 zeigt einige Simulationsbeispiele der Kombination zweier Ansichten unter Verwendung der charakteristischen Kovarianzmatrix  $\Sigma_c$ . Diese wurde am in dieser Arbeit zum Einsatz kommenden 3-D Sensor „kolibri ROBOT“ ermittelt ( $\sqrt{\lambda_c^{(1)}} = 12,9 \mu\text{m}$ ,  $d_o = 750 \text{ mm}$ ).

In der linken Abbildung ist der Antastwinkel der Ansicht  $\mathbf{v}_1$  bei der Beobachtung  $\hat{\mathbf{p}}_1$  sehr groß ( $\theta_a = 70^\circ$ ). Eine zweite Beobachtung  $\hat{\mathbf{p}}_2$  aus Ansicht  $\mathbf{v}_2$  rekonstruiert nun den gleichen Objektpunkt unter einem Antastwinkel von  $\theta_a = 20^\circ$ . Der resultierende sog. Schnittwinkel, also der Winkel zwischen den korrespondierenden Sehstrahlen, beträgt  $90^\circ$  (der entsprechende Parametersatz ist in der Bildunterschrift

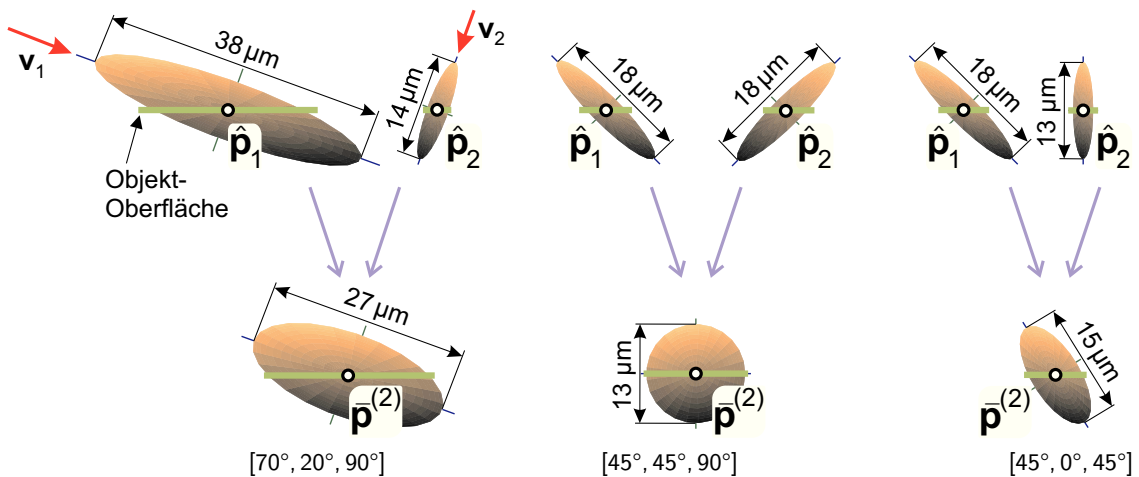


Abbildung 5.6: Messung von  $\bar{p}$  durch die Beobachtungen  $\hat{p}_1$  und  $\hat{p}_2$  bei gleichbleibendem Messabstand  $d$ . Darstellung der vorhergesagten Messunsicherheiten von  $\hat{p}_1$ ,  $\hat{p}_2$  und der resultierenden Punktschätzung  $\bar{p}^{(2)}$  durch Fehlerellipsoiden bei verschiedenen Ansichtengeometrien  $[\theta_a(\hat{p}_1), \theta_a(\hat{p}_2), \text{Schnittwinkel}]$  (Hauptfehlerachsenlängen entsprechend Kalibrierung des 3-D Sensors „kolibri ROBOT“).

mit  $[70^\circ, 20^\circ, 90^\circ]$  bezeichnet). Dieser im Sinne des E-Kriteriums optimale Schnittwinkel führt zur Reduktion der resultierenden Messunsicherheit von  $\sigma_1^{(1)} = 38 \mu\text{m}$  auf  $\bar{\sigma}^{(2)} = 27 \mu\text{m}$ .

Die Situation verkehrt sich in ihr Gegenteil, wenn zur „Verringerung“ der Messunsicherheit der Messung  $\hat{p}_2$  die E-optimale Beobachtung von Ansicht  $v_1$  durchgeführt werden würde: Die resultierende Messunsicherheit würde sich von  $\sigma_1^{(1)} = 14 \mu\text{m}$  auf  $\bar{\sigma}^{(2)} = 27 \mu\text{m}$  erhöhen. Dieser Fall kann jedoch einfach durch den Vergleich der bisher erreichten Messunsicherheit  $\bar{\sigma}^{(i)}$  mit der erwarteten neuen  $\bar{\sigma}^{(i+1)}$  vermieden werden: Ist mit keiner signifikanten Verbesserung zu rechnen, wird ein entsprechender Ansichtenkandidat verworfen. Die Ursache für diese Einschränkung der Anwendbarkeit des E-Kriteriums für die Ansichtenplanung liegt in dem starken Einfluss des Antastwinkels auf die Messunsicherheit (siehe Abschnitt 4.2).

In der Abbildung 5.6 mit den Parametern  $[45^\circ, 45^\circ, 90^\circ]$  ist der Fall dargestellt, wie durch eine E-optimale Ansicht die Länge der Hauptfehlerachse von  $\sigma_1^{(1)} = 18 \mu\text{m}$  auf  $\bar{\sigma}^{(2)} = 13 \mu\text{m}$  reduziert werden kann. Des Weiteren konnte die ausgeprägte Richtungsabhängigkeit der Messunsicherheit minimiert werden: Erster und zweiter Eigenwert von  $\bar{\Sigma}^{(2)}$  sind gleich. Im Umkehrschluss bedeutet dies, dass mit Angleichung von  $\bar{\lambda}_n^{(1)}$  an  $\bar{\lambda}_n^{(2)}$  die Aussagekraft des E-Kriteriums schwindet.

Abbildung 5.6 mit den Parametern  $[45^\circ, 0^\circ, 45^\circ]$  zeigt eine Ansicht mit  $\theta_a = 0^\circ$ , welche konventionellen Planungsansätzen aus der Literatur folgt. Diese kann die Messunsicherheit entlang der Hauptfehlerachse im Vergleich zur vorherigen Abbildung nicht noch stärker reduzieren ( $\bar{\sigma}^{(2)} = 15 \mu\text{m}$ ), obwohl sie die minimal möglich Unsicherheit einer Einzelmessung von  $\sigma_2^{(1)} = 13 \mu\text{m}$  realisiert. Dadurch wird deutlich, dass der Einfluss E-optimaler Ansichten zur Reduzierung der Messunsicherheit begrenzt ist.

## 5.2.2 Mehransichtenplanung mit erweitertem $E$ -Kriterium zur Berücksichtigung von Vollständigkeit und Messunsicherheit

Nachdem im vorherigen Unterabschnitt das Modell zur Abschätzung und Vorhersage der Messunsicherheit in der Streifenprojektion vorgestellt wurde, soll in diesem Abschnitt seine Anwendung zur modellgetriebenen Planung von Ansichten präsentiert werden. Dazu muss zuerst eine Methode zur Erzeugung  $E$ -optimaler Ansichtskandidaten entwickelt werden. Damit können nach jeder geplanten Ansicht, basierend auf der aktuellen Unsicherheitsschätzung des Modells, aktualisierte und dem Messfortschritt angepasste Kandidaten erzeugt werden (siehe auch Abb. 5.1, Pfad b). Anschließend wird darauf aufbauend der Algorithmus zur Mehransichtenplanung unter Berücksichtigung von Vollständigkeit und Rekonstruktionsgüte vorgestellt.

**Erzeugung optimaler Ansichtskandidaten mittels erweitertem  $E$ -Kriterium** Die Schar der Sehstrahlen  $\mathbf{o}_E''$  optimaler Ansichten zur Reduktion der Messunsicherheit der aktuellen Punktschätzung  $\bar{\mathbf{p}}$  in der Echtzeit-NBV-Planung mit erweitertem  $E$ -Kriterium nach Trummer et al. [86] verlaufen durch  $\bar{\mathbf{p}}$  und liegen auf einer Ebene  $\pi_{\bar{\mathbf{p}}}$  durch  $\bar{\mathbf{p}}$ . Die Normale von  $\pi_{\bar{\mathbf{p}}}$  entspricht dabei dem Eigenvektor  $\mathbf{v}_1 = \bar{\boldsymbol{\xi}}^{(1)}$  des größten Eigenwertes  $\bar{\lambda}^{(1)}$  der aktuellen Kovarianzschätzung von  $\bar{\mathbf{p}}$  (siehe Abbildung 5.7 a).

Wie am Beispiel von Abb. 5.6 [70°, 20°, 90°] diskutiert wurde, muss in der modellgetriebenen Mehrschrittplanung (für 3-D Sensoren auf Basis der Streifenprojektion) der Antastwinkel berücksichtigt werden. Die optimale Blickrichtung  $\mathbf{o}_E \in \mathbf{o}_E''$  aus  $\pi_{\bar{\mathbf{p}}}$  ist diejenige, welche den kleinsten Winkel zur Oberflächennormale  $\mathbf{n}$  von  $s$  (der Oberfläche auf der  $\bar{\mathbf{p}}$  liegt) aufweist. Dadurch ist sichergestellt, dass  $\bar{\mathbf{p}}$  nicht durch  $s$  verdeckt wird. Zur Berechnung von  $\mathbf{o}_E$  wird der Lotfußpunkt  $\mathbf{X}_{\bar{\mathbf{p}}}$  von  $\mathbf{n}$  auf  $\pi_{\bar{\mathbf{p}}}$  berechnet:

$$\mathbf{o}_E = \frac{\mathbf{o}'_E}{\|\mathbf{o}'_E\|}, \quad \text{wobei } \mathbf{o}'_E = \mathbf{X}_{\bar{\mathbf{p}}} - \bar{\mathbf{p}} \quad (5.15)$$

$$= \left( \bar{\mathbf{p}} + \mathbf{n} - \frac{\mathbf{n}^T \mathbf{v}_1}{\mathbf{v}_1^T \mathbf{v}_1} \mathbf{v}_1 \right) - \bar{\mathbf{p}}$$

$$= \mathbf{n} - \frac{\mathbf{n}^T \mathbf{v}_1}{\mathbf{v}_1^T \mathbf{v}_1} \mathbf{v}_1.$$

Am Beispiel von Abb. 5.6 [45°, 45°, 90°] wurde weiterhin die geringe Aussagekraft des  $E$ -Kriteriums zur Erzeugung optimaler Ansichten im Falle geringer Richtungsabhängigkeit der Messunsicherheit demonstriert. Um diesem Umstand Rechnung zu tragen, wird bei der Berechnung der optimalen Blickrichtung  $\mathbf{o}$  des erweiterten  $E$ -Kriteriums auch die Normale  $\mathbf{n}$  der zu vermessenden Objektoberfläche berücksichtigt (siehe Abb. 5.7 b).

Dazu wird die  $E$ -optimale Blickrichtung  $\mathbf{o}_E$  gemäß dem Verhältnis  $w_{ne}$  der zweitgrößten zur größten Länge der Fehlerachse gewichtet:

$$\mathbf{o} = -(w_{ne} \mathbf{n} + (1 - w_{ne}) \mathbf{o}_E), \quad (5.16)$$

mit  $w_{ne} = \sqrt{\bar{\lambda}^{(2)} / \bar{\lambda}^{(1)}}$ . Bei starker Richtungsabhängigkeit der Messunsicherheit hat  $\mathbf{o}_E$  somit einen größeren Einfluss auf die resultierende Messunsicherheit.

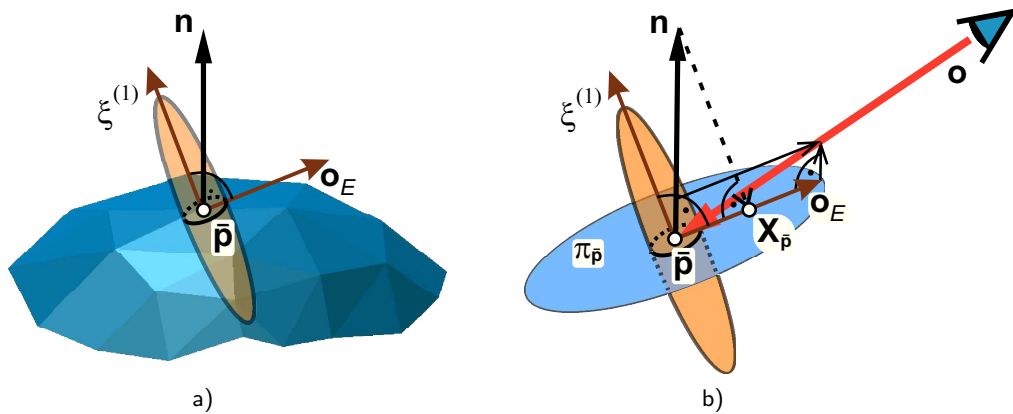


Abbildung 5.7: Berechnung der die Messunsicherheit minimierenden neuen Blickrichtung  $\mathbf{o}$ , basierend auf dem erweiterten  $E$ -Kriterium: a) Geschätzter 3-D Punkt  $\bar{\mathbf{p}}$  auf der Objektfläche zusammen mit Normalen  $\mathbf{n}$  und Hauptfehlerichtung  $\xi^{(1)}$ ; b) Je ausgeprägter die Richtungsabhängigkeit der geschätzten Messunsicherheit ist, desto geringer wird die Oberflächennormale  $\mathbf{n}$  gewichtet.

**Gemeinsame Bewertung von Vollständigkeit und Messunsicherheit** Vollständigkeitsorientierte mengentheoretische Planungsansätze favorisieren aufgrund der konzeptionellen Einfachheit die binäre Modellierung der Messbarkeit eines Oberflächenelementes: Nur wenn alle Bedingungen erfüllt sind, wird das Element als messbar eingestuft. Im kommenden Unterabschnitt wird deshalb gezeigt, wie die binäre Messbarkeitsmatrix um eine Möglichkeit zur Einbeziehung der Messunsicherheit ergänzt werden kann.

Dazu wird für alle Punktschätzungen  $\bar{\mathbf{p}}$  der zu erwartende Standardfehler für alle Ansichtenkandidaten berechnet. Dieser ist abhängig von den bisher geplanten Ansichten und dem aktuell zu prüfenden Kandidaten. Deshalb wird für jedes Oberflächenelement  $s \in S$  die Schätzung der Kovarianzmatrix  $\bar{\Sigma}_{s_i}^{(v)}$  aller bisherigen Beobachtungen  $v$  gespeichert. Weiterhin wird zusätzlich zur (binären) Messbarkeitsmatrix  $\mathbf{M}$  eine Bewertungsmatrix  $\mathbf{EV}$  berechnet, deren Elemente  $ev_{ij} \in (0, 1]$  die Bewertung der Messunsicherheit des Oberflächenelementes  $s_i$  durch Ansichtenkandidaten  $\mathbf{v}_j$  beschreiben.

Zur Bewertung der prognostizierten Messunsicherheit wird der resultierende Standardfehler  $\hat{\sigma}$  eines Dreiecks  $s$  aus der Unsicherheit  $\bar{\sigma}^{(n)}$  der Punktschätzung  $\bar{\mathbf{p}}^{(n)}$  nach  $n$  Beobachtungen gemäß Gl. (5.14) berechnet:

$$\hat{\sigma} = \frac{\bar{\sigma}^{(n)}}{\sqrt{n}}. \quad (5.17)$$

Der Standardfehler  $\hat{\sigma}$  wird durch eine logistische Funktion<sup>4</sup>  $f_e(\hat{\sigma})$  bewertet (siehe Abb. 5.8), welche durch den Nutzer entsprechend der verfolgten Planungsstrategie (siehe Abschnitt 4.3.2) zu parametrisieren ist. Über eine niedrigere anzustrebende Messunsicherheit kann die Strategie kontinuierlich von sichtbarkeitsorientiert (Kurve b) zu messunsicherheitsorientiert (Kurve a) angepasst werden. Funktionsverläufe mit flacherem Anstieg führen – auf Kosten einer höheren Messunsicherheit der jeweiligen Einzelansichten – schnell zu einer vergleichsweise hohen Vollständigkeit. Dies hat jedoch aufgrund der wiederholten Beobachtung von Objektpunkten eine höhere Redundanz der Messung zur Folge.

Die entscheidenden Einflussfaktoren zur Parametrisierung der Bewertungsfunktion sind dabei die

<sup>4</sup>Eine logistische Funktion ist ein Spezialfall einer Sigmoidfunktion der Form:

$$\text{sig}(t) = \frac{1}{1 + \exp(-t)}$$

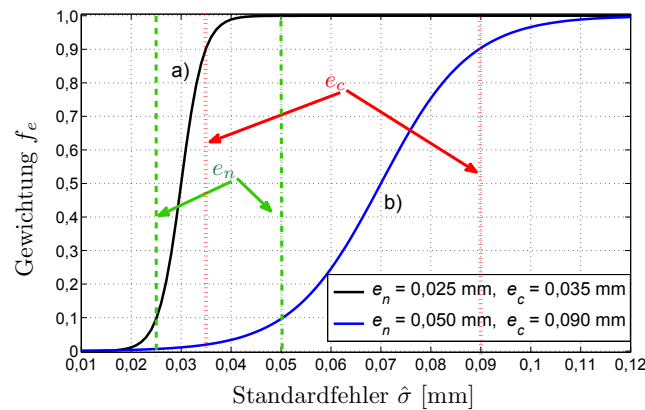


Abbildung 5.8: Bewertungsfunktion  $f_e$  des geschätzten Standardfehlers  $\hat{\sigma}$  der 3-D Rekonstruktion  $\bar{p}$ . Je größer  $\hat{\sigma}$  ist, desto höher ist der zu erwartende Gewinn durch eine weitere Beobachtung. Kurve a) stellt eine genauigkeitsorientierte, Kurve b) eine vollständigkeitsorientierte Parametrisierung von  $f_e$  dar.

Schwellwerte  $e_n$ , welche die anzustrebende Messunsicherheit beschreiben („Nominalwert“), und  $e_c$ , welche die maximal zulässige Messunsicherheit („kritische Messunsicherheit“) kennzeichnen. Dabei wird  $e_n$  auf den Funktionswert 0,1 („kaum Verbesserungen bezüglich der Messaufgabe notwendig“) und  $e_c$  auf 0,9 („Messunsicherheit gemäß Messaufgabe unzureichend“) abgebildet.

Die Parameter der logistischen Funktion können über ihre Umkehrfunktion wie folgt berechnet werden:

$$\begin{aligned} scale &= \frac{range}{e_k - e_n}, \quad \text{mit } range = -\ln\left(\frac{1}{0,9} - 1\right) + \ln\left(\frac{1}{0,1} - 1\right), \\ center &= e_n + (e_k - e_n)/2. \end{aligned}$$

Die Bewertungsfunktion selbst wird dann wie folgt definiert:

$$f_e(\hat{\sigma}) = \frac{1}{1 + \exp(-scale \cdot (\hat{\sigma} - center))}. \quad (5.18)$$

In Abbildung 5.9 ist exemplarisch die Visualisierung der Bewertung im Planungsverlauf am Beispiel des NBV Testobjektes dargestellt. Dabei symbolisiert eine weiße Färbung eines Modeldreiecks dessen Einhaltung der anzustrebenden Messunsicherheit, wohingegen schwarz das Überschreiten der maximal zulässigen Messunsicherheit anzeigt.

**Mehransichtenplanung mit erweitertem E-Kriterium** Algorithmus 5.2 stellt den Ablauf der Ansichtplanung mit erweitertem E-Kriterium dar. Als Eingabedaten wird das der Planung zugrunde liegende Objekt  $\mathbf{M}_{\text{spec}}$  erwartet, welches eine Diskretisierung des Modells  $S$  in Form einer dreiecksbasierten Oberflächenbeschreibung darstellt. Dieses kann im Rahmen der weiteren Modellspezifikation pro Dreieck auch die bisher bekannte Kovarianzmatrix sowie mögliche Gewichtungen, zu erreichende Unsicherheit usw. beinhalten. Weiterhin wird auf eine Funktion  $f_e$  zur Bewertung des geschätzten Standardfehlers (siehe vorheriger Unterabschnitt) und eine überprüfbare Abbruchbedingung (siehe Abschnitt 4.3.2) zugegriffen. Als Ergebnis wird die Menge der  $v$  Ansichten  $\mathbf{V}_{\text{plan}}$  berechnet, die das Messobjekt gemäß der Planungsstrategie und der Modellspezifikation rekonstruiert. Des Weiteren wird die Matrix der Kovarianzmatrizen  $\Sigma_{s_i}^{(v)}$  für alle Oberflächenelemente  $s_i$  berechnet, die eine Bewertung

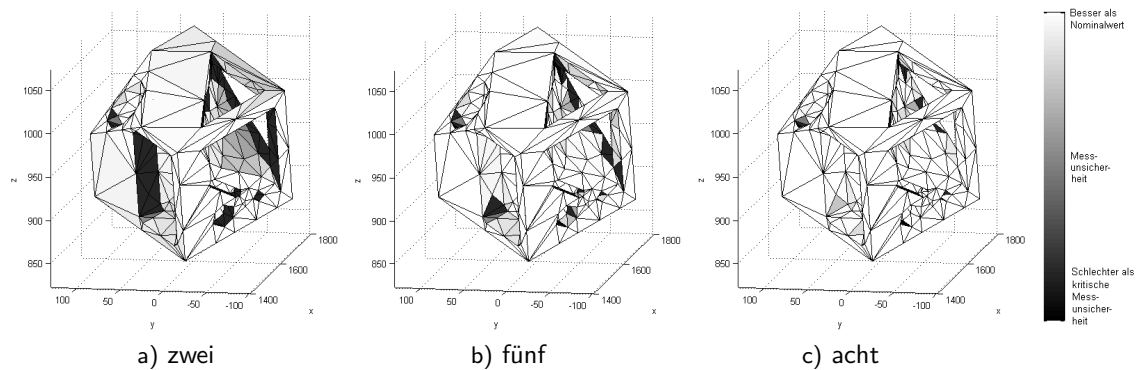


Abbildung 5.9: Visualisierung der Bewertung der aktuellen Unsicherheitsschätzung nach Gleichung (5.18) im Planungsverlauf am Beispiel des NBV Testobjekts nach a) zwei, b) fünf und c) acht Ansichten (Versuchsreihe „volle Sensorauflösung / 0% Kompensation“ – Methode ‘ $\text{ecrit}_{\text{acc}}$ ’ (siehe Abschnitt 5.3.2), genauigkeitsorientierte Parametrisierung nach Abb. 5.8 a).

der erreichten 3-D Rekonstruktion ermöglicht.

Zu Beginn werden die akkumulierten Kovarianzmatrizen  $\bar{\Sigma}_{s_i}$  aller Dreiecke  $s_i$  initialisiert und der Zähler  $v$  der aktuell geplanten Ansicht gesetzt. Solange die Prüfung der gewählten Abbruchbedingung in Zeile 4 weitere Ansichten zulässt, wird der nachfolgende Zyklus aus Ansichtenkandidatenerstellung<sup>5</sup> (Zeilen 5 ff.), Berechnung der Messbarkeitsmatrix (Zeile 12), Prognostizierung des Gewinns bezüglich der Bewertung des Standardfehlers (Zeilen 13 ff.), Bestimmung der nächsten Ansicht (Zeile 22) und Aktualisierung der Kovarianzschätzung (Zeilen 23 ff.) wiederholt.

Im Folgenden soll die Bewertung der Ansichtenkandidaten (Zeilen 13 ff.) näher erläutert werden. Nur wenn ein Dreieck  $s_i$  vom Ansichtenkandidaten  $\mathbf{v}_j$  aufgrund des entsprechenden Eintrages  $m_{ij} \in \mathbf{M}$  als messbar gilt, werden die weiteren Schritte durchgeführt, ansonsten wird die korrespondierende Bewertung  $ev_{ij}$  auf 1 („nicht messbar“) gesetzt. Für messbare  $s_i$  wird die Kovarianzmatrix  $\Sigma_n$  der aktuellen Ansicht nach Gl. (5.12) berechnet. Dabei zählt  $n$  die Anzahl der Ansichten, von denen das Dreieck  $s_i$  bisher schon beobachtbar war. Anschließend kann die kumulierte Kovarianzmatrix  $\bar{\Sigma}^{(n)}$  und der zugehörige Standardfehler  $\hat{\sigma}_{s_i}^n$  berechnet werden. Dieser beschreibt den zu erwartenden Standardfehler, falls die Ansicht  $\mathbf{v}_j$  als nächste Ansicht ausgewählt werden würde. Die Bewertung wird in den Elementen  $ev_{ij}$  der Bewertungsmatrix  $\mathbf{EV}$  gespeichert.

Als nächste Ansicht wird diejenige Ansicht  $\mathbf{v}_{\text{next}}$  gewählt, welche über alle Modelldreiecke die Bewertung der Messunsicherheit minimiert (Zeile 22). Dies entspricht dem größtmöglichen Informationsgewinn gemäß der gewählten Planungsstrategie. Abschließend wird die Schätzung der akkumulierten Kovarianzmatrix  $\bar{\Sigma}_{s_i}$  aller Dreiecke gemäß  $\mathbf{v}_{\text{next}}$  aktualisiert.

Die Analyse der Rechenzeit von Alg. 5.2 zeigt, dass die Berechnung der Messbarkeitsmatrix in Zeile 12 weiterhin die Laufzeit dominiert. Durch die iterative Neuberechnung  $E$ -optimaler Ansichtenkandidaten in Zeilen 5 ff. muss die Messbarkeitsmatrix jedoch bei jeder weiteren Ansicht neu berechnet werden. Da für Oberflächenbereiche, deren prognostizierte Messunsicherheit die Spezifikation erfüllt, keine weiteren Ansichtenkandidaten erzeugt werden (Zeile 6), beträgt die zu erwartende Laufzeit von Alg. 5.2 typischerweise deutlich weniger als das  $v$ -fache des in Abschnitt 5.1.2 vorgestellten angepassten Planungsalgorithmus (mit  $v$  der Anzahl geplanter Ansichten).

<sup>5</sup>Ist noch keine Kovarianzschätzung vorhanden, wird die Ansicht in Normalenrichtung erstellt ( $w_{\text{ne}} = 1$  in Gl. (5.16)).

**Algorithmus 5.2:** Mehrschrittplanung mit erweitertem  $E$ -Kriterium.

---

```

Daten: Objektmodell  $M_{\text{spec}}$  (Diskretisierung von  $S$  mit Spezifikation)
          Bewertungsfunktion  $f_e$  nach Gl. (5.18)
          Abbruchbedingung
Ergebnis: Menge der Ansichten  $V_{\text{plan}}$ 
            Matrix der Kovarianzen  $\Sigma_{s_i}^{(v)}$ 
1 begin
2   Initialisierung des Modells // evtl. bekannte Kovarianzen
3    $v \leftarrow 1$  // aktuelle Zahl von Beobachtungen
4   while Abbruchbedingung nicht erreicht do // Test auf Terminierung
5     for  $s_i \in M_{\text{spec}}$  do // Ansichtenkandidatenerstellung für  $s_i$  ...
6       if  $f_e(\hat{\sigma}_{s_i}^n) > f_e(e_n)$  then // ... solange Spezifikation nicht erfüllt
7         Berechnung optimaler Ansichtenkandidaten  $V_{\text{can}}$ , Berücksichtigung von:
8         ... Blickrichtung nach Gleichung (5.16)
9         ... Entfernung  $d_o$ 
10        ... Drehung  $\theta$ 
11        ... Verdeckung und C-Space nach Alg. 5.1
12
13      Berechnung der Messbarkeitsmatrix  $M$ 
14      // Bewertung der Ansichtenkandidaten
15      for  $s_i \in M_{\text{spec}}$  do
16        for  $v_j \in V_{\text{can}}$  do
17          if Dreieck  $s_i$  ist messbar von Kandidat  $v_j$  then
18            Berechnung der Kovarianzmatrix  $\Sigma_n$  von  $s_i$  // Gl. (5.12)
19            //  $n$  Beobachtungen (aktuelle und  $n-1$  bisherige)
20            Berechnung der kumul. Kovarianzmatrix  $\bar{\Sigma}^{(n)}$  // Gl. (5.13)
21            Berechnung des Standardfehlers  $\hat{\sigma}_{s_i}^n$  von Dreieck  $s_i$ ,
22            ... gesehen von  $n$  Ansichten, nach Gleichung (5.17)
23             $ev_{ij} \leftarrow f_e(\hat{\sigma}_{s_i}^n)$  // Bewertung nach Gl. (5.18)
24          else  $ev_{ij} \leftarrow 1$  //  $s_i$  von  $v_j$  nicht messbar
25
26      // Bestimmung der nächsten Ansicht
27       $v_{\text{next}} \leftarrow v_m$ , mit  $m = \text{argmin}_{j \in V} \sum_{i \in S} ev_{ij}$  // Beste Bewertung
28
29      // Aktualisierung der Kovarianzschätzung für  $v_{\text{next}}$ 
30      for  $s_i \in M_{\text{spec}} : ev_{im} < 1$  do // alle messbaren Dreiecke
31        Aktualisiere  $\bar{\Sigma}_{s_i}^{(v)}$  gemäß Gl. (5.13)
32
33      Füge Ansicht  $v_{\text{next}}$  in Menge der Ansichten  $V_{\text{plan}}$  ein
34       $v \leftarrow v + 1$  // Nächste Ansicht

```

---

## 5.3 Experimentelle Ergebnisse

In diesem Abschnitt sollen Ergebnisse des vorgestellten Ansichtenplanungsansatzes mit erweitertem  $E$ -Kriterium bei der modellgetriebenen Planung vorgestellt und mit verschiedenen anderen Sensorpositionierungsansätzen verglichen werden. Dazu werden im folgenden Unterabschnitt zuerst Versuchsmethodik und Versuchsbedingungen vorgestellt, bevor in Unterabschnitt 5.3.2 die verschiedenen Sensorpositionierungsmethoden quantitativ verglichen werden.

### 5.3.1 Versuchsmethodik

Wie bereits in Abschnitt 3.3 thematisiert wurde, sollte jeder Planungsansatz experimentell, quantitativ und unter realistischen Rahmenbedingungen evaluiert werden. Zum tieferen Verständnis der vorgestellten Experimente werden im Folgenden das Sensor- und Positioniersystem charakterisiert und im Anschluss die Versuchsmethodik vorgestellt.



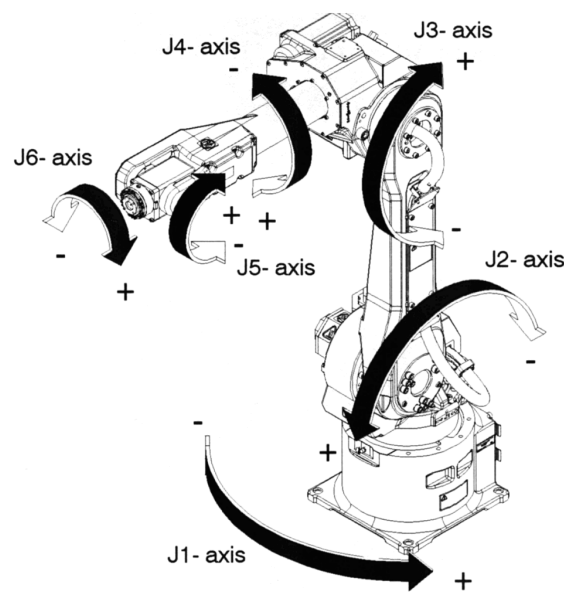


Abbildung 5.10: Achsen des zum Einsatz kommenden Fanuc „M-16iB 20“ 6-DOF Industrie-Roboters (Abbildung aus [24], Seite 61).

Diagonaler Bildwinkel:	26,3°	Optische Basislänge:	266 mm
Optimale Messentfernung:	750 mm	Mittlerer Punktabstand:	150 $\mu$ m
Min. Messentfernung:	650 mm	Max. Messentfernung:	850 mm
Brennweite (Kameras):	17,5 mm	Max. Bildpunktanzahl:	2448 $\times$ 2048
Messunsicherheit ( $d_o, 0^\circ$ ):	$\leq 20 \mu$ m	Sensorsehfeld $A_o$ :	330 $\times$ 280 mm <sup>2</sup>

Tabelle 5.1: Die Spezifikation der in dieser Arbeit verwendeten Konfiguration des Sensorkopfes des 3-D Sensors „kolibri ROBOT“.

**Charakterisierung des Sensor- und Positioniersystems** In der Planung modelliert und in den Versuchen zur Messdatenaufnahme eingesetzt wird der 3-D Sensor „kolibri ROBOT“ vom Fraunhofer IOF Jena [25]. Dieser ist ein auf aktiver Beleuchtung (Streifenprojektion) basierender 3-D Sensor (siehe Abschnitt 4.2), welcher mittels eines 6-DOF Industrieroboters (Konfiguration siehe Abb. 5.10) rechnergesteuert positioniert werden kann. Die technischen Daten des Sensorkopfes sind in Tab. 5.1 zusammengefasst.

Da die Merkmale des verwendeten Positioniersystems entscheidenden Einfluss auf die erzielbaren Planungsergebnisse haben (siehe Malik et al. [45]), wird die im Rahmen dieser Arbeit genutzte Konfiguration hier genauer vorgestellt (siehe auch Tab. 5.2). Die Ansteuerung des Roboters erfolgt über ein unidirektionales Protokoll über die serielle Schnittstelle mittels eines 6-D Vektors  $(x_c, y_c, z_c, \varphi, \vartheta, \theta)^T$ , als Positioniermodell kommt eine View Sphere zum Einsatz. Dabei wird die Position der Roboterhand auf einer (gedachten) Kugel mit festem Radius  $d$  und Mittelpunkt  $(x_c, y_c, z_c)^T$  durch die sphärischen Koordinaten  $(\varphi, \vartheta)$  und die Drehung  $\theta$  um die Sensormittelachse beschrieben. Die grundsätzliche Anordnung von Roboter und Messvolumen ist in Abb. 5.11 a) dargestellt.

Zur Verhinderung von Kollisionen des Sensorkopfes mit Messobjekt oder Messaufbau wurde ein Volumen definiert, welches zulässige Positionen der Roboterhand beschreibt. Dieses ist in Form einer Liste von Raumelementen gegeben, deren Vereinigung den C-Space des Positioniersystems darstellt (siehe Abb. 5.2).

Bezeichnung:	Fanuc M-16iB 20	Max. Armlänge:	ca. 1600 mm
Freiheitsgrade:	6 DOF	Größe Roboterzelle:	ca. 5000 × 4000 mm <sup>2</sup>
Ansteuerung:	seriell über PC	Max. Messfeldgröße:	ca. 2000 × 1500 mm <sup>2</sup>
Ansteuermodell:	View Sphere	Koordinatensystem:	Weltkoordinaten

Tabelle 5.2: Die Spezifikation der in dieser Arbeit verwendeten Konfiguration des Positioniersystems des 3-D Sensors „kolibri ROBOT“.

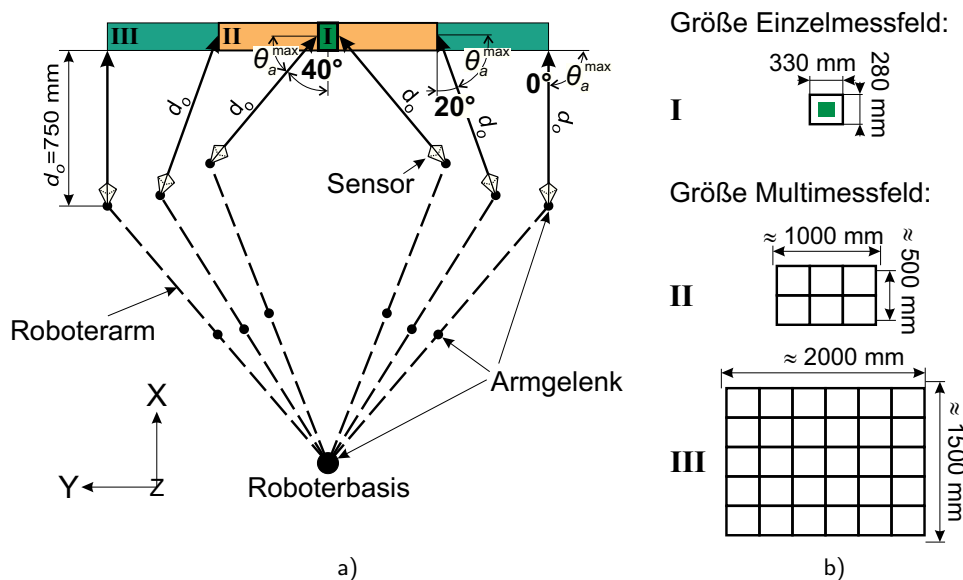


Abbildung 5.11: Verwendete Konfiguration des zum Einsatz kommenden 3-D Sensors „kolibri ROBOT“ (vgl. auch Abb. 1.4 a): a) Position des Messvolumens relativ zum Roboter (Draufsicht) und Zusammenhang zwischen gegebener Armlänge des Roboters und maximalem Antastwinkel bei der Vermessung verschiedener, unterschiedlich großer Quader (b). Siehe dazu auch Abb. 5.12.

Aus der gegebenen Einschränkung des Bewegungsraumes resultieren starke Auswirkungen auf die realisierbaren Kombinationen von Messobjektgröße und maximal möglichem Antastwinkel. Als solcher wird der größte minimal erreichbare Antastwinkel  $\theta_a^{\max}$  bei der Beobachtung eines Punktes auf den Seitenflächen eines relativ zum Roboter zentrierten Quaders bezeichnet, welcher mit dem Positioniersystem realisiert werden kann. Abbildung 5.11 b) zeigt drei Beispiele.

Die Roboterhand wird in Abhängigkeit von  $(\varphi, \vartheta)$  auf der Oberfläche einer Kugel positioniert, deren Zentrum auf der anvisierten Objektfläche liegt. Mit zunehmender Entfernung des Kugelmittelpunktes von der Roboterbasis können immer geringere  $\theta_a^{\max}$  realisiert werden, da die maximale Armlänge des Roboters fest ist. Weitere Einschränkungen ergeben sich praktisch durch zu vermeidenden Kontakt zwischen Bauteilen des Sensor Kopfes und den Elementen des Roboterarmes. Der in Abb. 5.12 dargestellte Höhenlinien-Graph visualisiert diesen Zusammenhang bei konservativ gewählten Grenzwerten für die genutzte Konfiguration von Messvolumen und Positioniersystem.

Bei der Bestimmung der Hand-Auge-Transformation wurde ein mittlerer Fehler der Sensorposition von  $0,96 \text{ mm}$  (bei einer Standardabweichung von  $0,45 \text{ mm}$ ) ermittelt. Dabei betrug der mittlere Fehler in der Orientierung des Sensors  $0,07^\circ$  (bei einer Standardabweichung von  $0,03^\circ$ ). Damit ist die Sensorposenunsicherheit des verwendeten Messsystems als vergleichsweise niedrig einzustufen.

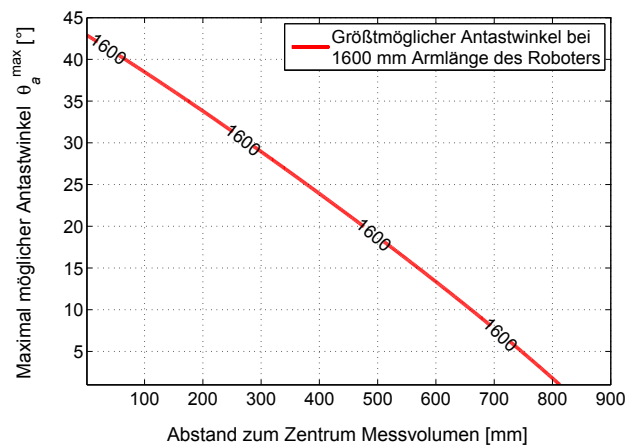


Abbildung 5.12: Simulation der Abhängigkeit des maximal möglichen Antastwinkels  $\theta_a^{\max}$  vom Abstand (auf der yz-Ebene des Messobjektes) des zu messenden Punktes  $\bar{p}$  zum Zentrum (Konfiguration des „kolibri ROBOT“ siehe Abb. 5.11). Mit zunehmendem Abstand verringert sich der maximal mögliche Antastwinkel.

**Allgemeine Versuchsmethodik** Als nächstes wird die allen Versuchen zugrunde liegende Methodik beschrieben. Das zu nutzende Modell des zu vermessenden Objektes wird als Dreiecksmodell im WRL-Dateiformat erwartet, welches ein textbasiertes Format zur Szenenbeschreibung nach dem VRML-Standard (engl. „Virtual Reality Modeling Language“, siehe [1]) ist. Dieses Format ist weitverbreitet und kann von vielen Programmen gelesen, bearbeitet und geschrieben werden. Des Weiteren wird vorausgesetzt, dass das Modell im Weltkoordinatensystem vorliegt.

Die Auflösung des Modells sollte, der Komplexität des Messobjektes angemessen, mit geeigneten Programmen reduziert worden sein. Bei den Experimenten dieser Arbeit wurde dazu „Geomagic® Studio®“ [4] verwendet. Dabei werden folgende Arbeitsschritte durchgeführt: Mittels „Polygons“  $\triangleright$  „Decimate“ wird die Dreiecksanzahl reduziert. Unter „Target Triangle Count“ wird die gewünschte Zieldreiecksanzahl angegeben und mittels aktivierter, mittlerer „Mesh Priority“ eine Dreiecksverteilung niedriger Dispersion und Diskrepanz erzeugt. So entspricht z. B. die verwendete Zieldreiecksanzahl von 434 Dreiecken beim Modell des NBV Testobjektes ca. 0,5% der Dreiecksanzahl dessen CAD-Modells nach der Umwandlung in ein dreiecksbasiertes Polygonmodell.

Die Ansichtenplanung erfolgt gemäß Abschnitt 5.1 und Abschnitt 5.2 durch eigens entwickelte MATLAB®-Programme [83]. Die Berechnung erfolgt auf einem Rechner mit Vierkern-Prozessor (Intel® Core™ 2 Quad, 2,4 GHz), vier GB Arbeitsspeicher und 32 Bit Microsoft® Windows® Betriebssystem. Dabei wird, basierend auf der gewählten Planungsstrategie (siehe Abschnitt 4.3.2), eine sortierte Folge von Ansichten sowie ein bewertetes Objektmodell erstellt. Erstere wird zur Ausführung der Objektmessung benötigt, letzteres kann zur weiteren Analyse der zu erwartenden Messdaten genutzt werden. Dazu wird nach jeder Ansicht für das gesamte Objektmodell u.a. die prognostizierte Vollständigkeit und die Messunsicherheit bestimmt. Die parameterfreie Verteilungsschätzung des resultierenden 3-D Fehlers wird durch stochastische Simulation aus den Standardfehlern  $\hat{\sigma}$  aller Modelldreiecke gemäß Gl. (5.17), gewichtet nach deren Flächeninhalt, berechnet.

Zur Beschleunigung der Ansichtenplanung muss vor allem die Dauer zur Berechnung der Messbarkeitsmatrix, welche im Rahmen dieser Arbeit in MATLAB® nur sequentiell implementiert wurde,

verkürzt werden. Dem kommt zugute, dass dabei die Berechnung der Messbarkeit der Objektoberfläche eines Ansichtenkandidaten unabhängig von der anderer Kandidaten ist. Dadurch kann diese Berechnung einfach parallelisiert werden. In Kombination mit der Implementierung in C/C++ wird von einer realistischen Beschleunigung dieses Kernalgorithmus um mindestens das Zehnfache auf gängigen Rechnern mit acht Recheneinheiten ausgegangen.

Der berechnete Ansichtenplan wird dann auf dem Steuerrechner des 3-D Sensors „kolibri ROBOT“ ausgeführt. Dieser ist ein Rechner mit Vierkern-Prozessor (Intel® Xeon™ X5450, 3 GHz), acht GB Arbeitsspeicher und 64 Bit Microsoft® Windows® Betriebssystem. Die Sensoransteuerungssoftware (Musterprojektion, Kameraansteuerung, Robotersteuerung, 3-D Berechnung mittels Streifenprojektion, Selbstkalibrierung etc.) ist ein vom Fraunhofer IOF entwickeltes und im Rahmen dieser Arbeit zur Verfügung gestelltes 32 Bit Programm. Aufgrund dieser Architektur sind bei voller Sensorauflösung im aktuellen Systemzustand nur maximal sechzehn Ansichten<sup>6</sup> durch einen Plan berechenbar.

Nach der Berechnung der 3-D Koordinaten der einzelnen Ansichten werden diese mittels „Geomagic® Studio“ fusioniert (siehe Abschnitt 4.4.3). Im Falle des NBV Testobjektes erfolgt anschließend die halbautomatische quantitative Auswertung in Anlehnung an die von Munkelt et al. in [54] vorgestellten Bewertungsmethode. Infolgedessen werden makrogesteuert die Messdaten registriert, die einzelnen Objektdetails segmentiert, die Oberflächen extrahiert und anschließend die Flächenberechnung und 3-D Fehlerberechnung mittels Metro [2] durchgeführt (siehe dazu Abschnitt 4.4.3). Dabei werden jeweils die ersten  $n$  Ansichten berücksichtigt.

**Verwendete Versuchsobjekte** Zur vergleichenden Bewertung der verschiedenen Ansichtenplanungsmethoden wurden im Rahmen dieser Arbeit drei Messobjekte vermessen. Jedes dieser Objekte verkörpert verschiedene Herausforderungen für die Ansichtenplanung (siehe Abschnitt 4.4.1) und steht beispielhaft für eine der in Abschnitt 4.3.2 vorgestellten Anwendungsszenarien.

**NBV Testobjekt:** Dieses in Abschnitt 4.4.1 vorgestellte Messobjekt (siehe Abb. 4.7) ist speziell zur vergleichenden Bewertung verschiedener Ansichtenplanungsansätze entworfen worden. Als solches weist es alle dort aufgeführten Herausforderungen für die Ansichtenplanung auf. Das Objekt selbst wurde aus einem Aluminiumwürfel von  $160 \times 160 \times 160 \text{ mm}^3$  in der feinmechanischen Werkstatt des Fraunhofer IOF gefertigt. Die spezifizierte Fertigungstoleranz liegt bei weniger als  $0,05 \text{ mm}$ . Die Oberfläche wurde zur besseren Messbarkeit gesandelt, d.h. mit einem sehr feinen Sandkorn aufgeraut. Dadurch ist der Grad der direkten Reflexion stark reduziert und die Oberfläche aus einem breiten Winkelspektrum gut messbar. Das zur Ansichtenplanung genutzte Modell ist in Abb. 5.13 a) dargestellt.

Das NBV Testobjekt ist relativ zum Roboter so platziert (siehe auch Pos. I. in Abb. 5.11), dass prinzipiell nur die in Abb. 4.7 dargestellten Objektseiten und Objektdetails erfassbar sind. Die beiden abgewandten Seiten können aufgrund des genutzten C-Space nicht vom Sensor vermessen werden. Die Standfläche des Testobjektes ist explizit nicht Teil des in [54] vorgeschlagenen Leistungsvergleiches. Deshalb wird die erzielte Vollständigkeit relativ zur *relevanten Oberfläche* angegeben.

Das Testobjekt kann aufgrund seiner geringen Abmessungen leicht vollständig im Sensorsehfeld platziert werden. Deshalb fallen kleinere Abweichungen zwischen geplanter und erreichter Sensor-

<sup>6</sup>Dies entspricht einer maximalen Messpunktzahl von  $2448 \times 2048 \text{ Pixel} \times 16 \text{ Ansichten} \approx \text{ca. } 80 \text{ Mill. Punkten}$ .

pose kaum ins Gewicht, da zu erfassende Objektbereiche trotzdem im Sensorsehfeld liegen. Darum wurden in einer ersten Versuchsreihe die Ansichten ohne Kompensation der Posenunsicherheit geplant. Diese Versuchsreihe wird im Folgenden mit „volle Sensorauflösung / 0 % Kompensation“ bezeichnet. Der nutzbare horizontale Bildwinkel beträgt dabei ca.  $26,3^\circ$ .

Die Posenunsicherheit beschreibt die möglichen Abweichungen zwischen geplanter und tatsächlich durch das Sensorpositioniersystem realisierter Sensorposition und -lage. Zu deren Kompensation schlägt W. R. Scott [69] u. a. vor, dass das der Planung zugrundeliegende Sensorsehfeld gegenüber dem tatsächlich zum Einsatz kommenden Sensorsehfeld reduziert wird. Dies führt dazu, dass sich bei kleineren Abweichungen der realisierten Sensorpose trotzdem die intendierten Oberflächenbereiche innerhalb des Sensorsehfeldes befinden und somit rekonstruiert werden können.

Um die Wirksamkeit der Kompensation zu überprüfen, wurde in einer zweiten Versuchsreihe die Sensorauflösung drastisch reduziert. Aufgrund des sich dadurch ergebenden horizontalen Bildwinkels von nunmehr  $13,9^\circ$  kann das Testobjekt nicht mehr vollständig im Sensorsehfeld platziert werden. In Anlehnung an Scott ist die Fläche  $A_o$  des tatsächlichen Sensorsehfeldes ca. 33 % größer als jene, welche in der Ansichtenplanung verwendet wird. Diese Versuchsreihe wird im Folgenden mit „reduzierte Sensorauflösung / 33 % Kompensation“ bezeichnet.

**Integralträger** Dieses große Tiefzieh- / Füge­teil aus dem Automobilbereich (siehe Abb. 1.3) dient als Beispiel für lateral ausgedehnte Messobjekte niedrigerer Oberflächenkomplexität. Seine Abmessungen von ca.  $940 \times 560 \times 180 \text{ mm}^3$  erfordern zur vollständigen Erfassung der Vorderseite – unter Berücksichtigung ausreichender Überlappung benachbarter Ansichten zur Registrierung – rechnerisch mindestens acht Ansichten. Seine Platzierung im Messvolumen erfolgte an Pos. II. in Abb. 5.11. Zur Datenaufnahme wurde die volle Sensorauflösung genutzt. Aufgrund dessen wird zur Kompensation der Posenunsicherheit die in der Simulation genutzte Sensorsehfläche lediglich um 10 % reduziert (10 % Kompensation, s. o.). Die erzielte Vollständigkeit wird relativ zur gesamten Oberfläche der Objektvorderseite angegeben.

Im Gegensatz zum NBV Testobjekt, für welches sowohl ein genaues Modell als auch ein präziser Referenzkörper vorhanden sind, illustriert die Rekonstruktion des Integralträgers das Anwendungsszenario der Oberflächeninspektion. Hierbei sollen größere Abweichungen, z. B. infolge Objektverzerrungen, detektiert werden. Auch der zur Verfügung stehende Integralträger weist Verformungen  $\geq 1 \text{ mm}$  auf. Dadurch tritt die mess- und planungstechnisch zu verantwortende Messunsicherheit aufgrund der Aufgabenstellung in den Hintergrund.

Das zur Ansichtenplanung genutzte Modell ist in Abb. 5.13 b) dargestellt. Nicht immer sind jedoch geeignete CAD-Modelle verfügbar. Deshalb wurde in dieser Versuchsreihe auch untersucht, welche Ergebnisse im Vergleich zur modellbasierten Ansichtenplanung mittels der datengetriebenen Ansichtenplanung erzielt werden können. Diese wurde dazu lediglich mit einem Grobscan einer ToF-Kamera initialisiert. Die Ergebnisse der Versuchsreihe werden, zusammen mit der zum Einsatz kommenden kombinierten daten- und modellgetriebenen Planungsmethode, in Kapitel 6 vorgestellt.

**Spielzeugelefant** Abschließend soll mit der Vermessung eines Spielzeugelefanten (siehe Abb. 1.2) das Anwendungsszenario der 3-D Rekonstruktion ohne zur Verfügung stehendes CAD-Modell

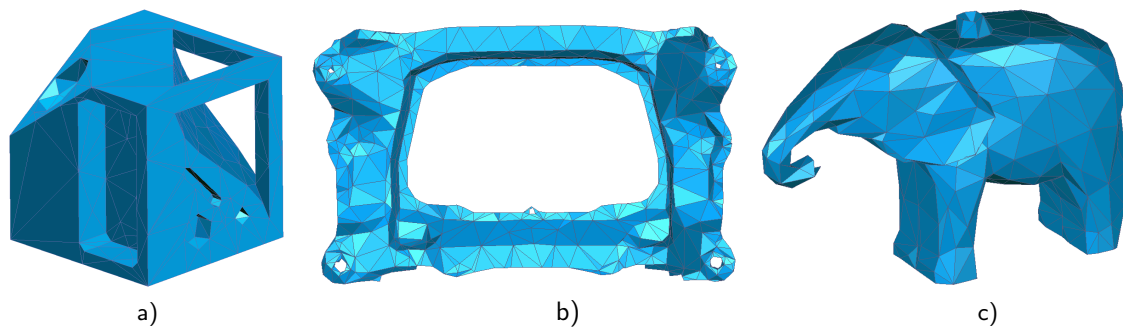


Abbildung 5.13: Der Ansichtenplanung zugrunde liegende Objektmodelle: a) NBV Testobjekt (434 Dreiecke), b) Integralträger (793 Dreiecke), c) Spielzeugelefant (668 Dreiecke).

untersucht werden. Diese Fragestellung ist z. B. bei der Flächenrückführung (engl. „reverse engineering“) von Objekten, deren Konstruktionsunterlagen nicht mehr vorhanden sind, relevant. Als Planungsgrundlage fungiert deshalb ein 3-D Modell, welches aus dem fusionierten Rekonstruktionsergebnis mehrerer manuell geplanter Ansichtenfolgen erstellt wurde. Jede einzelne erfasste den Elefanten in unterschiedlicher Objektlage. Verbliebene kleinere unvollständig rekonstruierte Objektbereiche wurden mittels „Geomagic® Studio®“ passend interpoliert (siehe Abb. 5.13 c). Die erzielte Vollständigkeit wird relativ zu diesem erzeugten Objektmodell angegeben.

Im Messvolumen des 3-D Sensors wurde der Spielzeugelefant mit den Abmessungen von ca.  $110 \times 40 \times 90 \text{ mm}^3$  an Pos. I. in Abb. 5.11 platziert. Um einen noch größeren maximalen Antastwinkel  $\theta_a^{\max}$  zu ermöglichen, wurde sein Abstand zur Roboterbasis in X-Richtung jedoch geringfügig reduziert. Auch hier kamen 10 % Kompensation der Posenunsicherheit zum Einsatz (s. o.).

Im Vergleich zu den Rekonstruktionsergebnissen, welche mit Hilfe dieses manuell erstellten Objektmodelles erzielbar sind, werden im Rahmen dieser Versuchsreihe in Kapitel 6 auch Ergebnisse vorgestellt, welche datengetrieben mittels eines Hüllkörpers realisiert wurden.

### 5.3.2 Vergleich verschiedener Sensorpositionierungsmethoden

Wie schon in Abschnitt 3.3 gefordert, sollten die mittels einer Ansichtenplanungsmethode erzielten 3-D Rekonstruktionsergebnisse immer mit denen anderer Planungsmethoden unter den gleichen Rahmenbedingungen verglichen werden. Zu unterschiedlich sind die eingesetzten Sensoren, Positionierungsmethoden und Objekte, um ohne einen solchen Vergleich aussagekräftige Rückschlüsse über die Leistungsfähigkeit von Ansichtenplanungsmethoden ziehen zu können.

Im Rahmen dieser Arbeit wurden deshalb eine Vielzahl verschiedener Sensorpositioniermethoden untersucht, die im Folgenden kurz vorgestellt werden sollen:

**‘baseline’** Als Grundlage des Vergleichs dient der in Abschnitt 5.1.1 vorgestellte 3M Algorithmus von Scott [69]. Beim NBV Testobjekt und Spielzeugelefant wurde das Mengenüberdeckungsproblem mittels ganzzahliger (binärer) linearer Optimierung (Methode `bintprog` der Optimization Toolbox™ von MATLAB®, siehe auch Abschnitte 2.3.1 und 2.3.2) gelöst. Aufgrund der Problemgröße konnte das Mengenüberdeckungsproblem für den Integralträger nur mit dem Greedy-Algorithmus (siehe Abschnitt 2.3.2) gelöst werden. Die Planung terminierte, nachdem alle als

messbar eingestuften Oberflächenelemente des Objektes erfasst waren. Abschließend wurden die Ansichten ihres Beitrages zur Objektvollständigkeit nach sortiert.

**'adaptive'** Diese Methode implementiert die in Abschnitt 5.1.2 vorgestellte angepasste Ansichtenplanung für komplexe Messobjekte bei beschränktem C-Space. Die Lösung des MSC für die einzelnen Messobjekte, die Sortierung der Ansichten sowie die Terminierung der Planung erfolgte analog zu 'baseline'.

**'ecrit<sub>cov</sub>'** Dieser Algorithmus plant die Ansichten gemäß Abschnitt 5.2 unter Nutzung des erweiterten  $E$ -Kriteriums. Dabei kommt eine vollständigkeitsorientierte (engl. „coverage“) Parametrisierung der Bewertungsfunktion  $f_e$  ( $e_n = 50 \mu\text{m}$ ,  $e_c = 90 \mu\text{m}$ , siehe Abb. 5.8 b) zum Einsatz. Die Lösung des MSC erfolgt stets mittels des Greedy-Algorithmus. Die Ansichtenplanung terminiert, wenn die mittlere Gewichtung (über alle Modelldreiecke) des Standardfehlers  $f_e(\hat{\sigma})$  nach Gl. (5.18) den Schwellwert 0,05 unterschreitet. Dieser empirisch ermittelte Schwellwert bricht die Planung ab, wenn der noch zu erwartende Zugewinn relativ zur anzustrebenden mittleren Messunsicherheit  $e_n$  keine weitere Ansicht rechtfertigt.

**'ecrit<sub>acc</sub>'** Diese Planungsreihe entspricht einer genauigkeitsorientierten (engl. „accuracy“) Parametrisierung der Bewertungsfunktion  $f_e$  ( $e_n = 25 \mu\text{m}$ ,  $e_c = 35 \mu\text{m}$ , siehe Abb. 5.8 a) bei der Planung mit erweitertem  $E$ -Kriterium nach Abschnitt 5.2. Ansonsten gelten die gleichen Rahmenbedingungen wie bei 'ecrit<sub>cov</sub>'.

**'regular'** Die so bezeichnete Sensorpositionierungsmethode realisiert eine regelmäßige Abtastung des C-Space mit niedriger Dispersion und Diskrepanz (siehe Abschnitt 2.2.2) mit vorgegebener Ansichtenplanlänge. Diese Strategie, oft auch als Standardmessverfahren benannt, spiegelt den üblichen Messansatz in der Praxis wider. Dort sind, abhängig von der Komplexität des Messobjektes, verschieden dichte, regelmäßig verteilte Sensorpositionen fest vorkonfiguriert. Im Rahmen der Versuchsreihe „reduzierte Sensorauflösung / 33% Kompensation“ wurden Positionen auf der View Sphere (ohne Berücksichtigung der Rotation  $\theta$  um die Sensormittelachse) auf einer Loxodrome [6] erzeugt. Diese wurde so parametrisiert, dass sie vom äußeren Rand des C-Space zu dessen Zentrum verläuft, also die möglichen Extremwerte bezüglich  $(\varphi, \vartheta)$  zu Beginn des Ansichtenplanes eingenommen werden.

**'expert'** Diese sind manuell durch einen menschlichen Bediener mit tiefgreifender Messerfahrung erstellte Ansichtenpläne. Als Rahmenbedingung sollte die bestmögliche Vollständigkeit bei jeder Ansichtenanzahl erreicht werden. Weiterhin galt es, die jeweils erfassten Flächen mit möglich kleinem Antastwinkel und unter Einhaltung der spezifizierten minimalen und maximalen Messentfernung zu erfassen. Spätestens nach 2 h wurde dieser stets iterativ stattfindende manuelle Optimierungsprozess beendet und der bis dahin erstellte Ansichtenplan ausgeführt. Zu beobachten war, dass die Rotation  $\theta$  um die Sensormittelachse kaum genutzt wurde.

**'random'** Zusätzlich kam beim NBV Testobjekt eine zufällige Abtastung des C-Space mit vorgegebener Ansichtenplanlänge zum Einsatz. Beim Integralträger wurde von zufälliger Positionierung abgesehen, da der große C-Space, verbunden mit dem großen Leerraum im Objektzentrum, absehbar sehr unzureichende 3-D Rekonstruktionen ermöglicht. Beim Spielzeugelefanten konnten in mehreren Testläufen die schwierigeren Objektdetails, wie z. B. die Bereiche zwischen Kopf und Ohren,

	Ansichten- plan- qualität	realisierte Voll- ständigkeit [%] nach $n$ Ansichten		Median 3-D Fehler [ $\mu\text{m}$ ] nach $n$ Ansichten		Ansichten- Anzahl total	mittlerer Punkt- abstand [ $\mu\text{m}$ ]	mittlere Redun- danz
		8	total	8	total			
baseline	0,96	81,0	82,0	19	19	16 / 18	160	4,5
adaptive	0,97	<b>85,5</b>	<b>87,1</b>	18	<b>15</b>	14	157	4,2
ecrit <sub>cov</sub>	0,97	84,3	84,3	21	21	<b>8</b>	167	2,8
ecrit <sub>acc</sub>	<b>0,98</b>	84,3	84,3	<b>16</b>	16	<b>8</b>	154	2,9
expert	—	80,4	84,3	18	18	16	149	—

Tabelle 5.3: Auswahl der Ergebnisse des Leistungsvergleiches für die Versuchsreihe „volle Sensorauflösung / 0 % Kompensation“ des NBV Testobjektes. Die vollständigen Ergebnisse sind in Tab. B.1 im Anhang zu finden.

nicht erfasst werden. Damit scheidet diese Positioniermethode für das angedachte Szenario der Flächenrückführung von vornherein aus.

Bei der zufälligen Sensorposenbestimmung wurde das View Sphere Positioniermodell angewandt. Deren Radius wurde auf die optimale Messentfernung  $d_o$  gesetzt. Der Mittelpunkt  $(x, y, z)$  wurde gleichverteilt innerhalb eines per Hauptkomponentenanalyse an das Messobjekt angepassten Quaders bestimmt. Die Orientierung  $(\varphi, \vartheta, \theta)$  des Sensors wurde auf der Kugeloberfläche gleichverteilt so bestimmt, dass die gewählte resultierende Sensorposition innerhalb des C-Space lag.

Beim NBV Testobjekt wurden dann per Simulation 1000 Ansichtenpläne erstellt. Davon wurde derjenige ausgeführt, welcher dem Median der Vollständigkeit entsprach.

Im weiteren Verlauf wird die Methode ‘adaptive’ stets kurz als ‘adaptive’ bezeichnet. Gleiches gilt für die übrigen Methoden.

Sowohl bei ‘adaptive’, ‘ecrit<sub>cov</sub>’, ‘ecrit<sub>acc</sub>’, als auch ‘baseline’ wurden pro optimalem Ansichtenkandidaten vier Rotationen  $\theta$  um die Sensormittelachse in 45° Schritten berücksichtigt. Weitere Sensorpositioniermethoden werden im nachfolgenden Kapitel zum kombinierten daten- und modellgetriebenen Ansichtenplanungsansatz in Abschnitt 6.3 vorgestellt. Im Folgenden werden die einzelnen Ergebnisse diskutiert.

**Versuchsreihe „volle Sensorauflösung / 0 % Kompensation“** Eine Auswahl der Ergebnisse ist in Tab. 5.3 zu finden. Die gesamten Ergebnisse sind im Anhang in Tab. B.1 dargestellt. Alle Pläne erzielen einen vergleichbaren mittleren Punktabstand von  $< 160 \mu\text{m}$ . Wie bereits ausgeführt, konnten in voller Sensorauflösung aufgrund von Beschränkungen der Messsystemsoftware nicht mehr als 16 Ansichten innerhalb eines Ansichtenplanes verarbeitet werden. Deshalb wurden lediglich die ersten 16 der im Rahmen von ‘baseline’ geplanten 18 Ansichten ausgewertet. Weiterhin unterscheidet sich die Kalibrierung der charakteristischen Kovarianzmatrix  $\Sigma_c$  für die Methoden ‘ecrit<sub>cov</sub>’ und ‘ecrit<sub>acc</sub>’ (siehe Abschnitt 5.2.1) aufgrund eines notwendig gewordenen Lampentausches des zur Streifenprojektion genutzten Projektors geringfügig von den übrigen  $E$ -kriteriums-basierten Versuchen.

Die Ansichtenplanqualität nach Scott [69] (siehe auch Abschnitt 4.3) wird im Rahmen dieser Arbeit dahingehend präzisiert, dass sie das Verhältnis des tatsächlich (spezifikationsstreu) gemessenen Oberflächeninhaltes zum als messbar Vorhergesagten angibt. Alle Planungsmethoden realisieren trotz 0 % Kompensation der Posenunsicherheit eine hohe Ansichtenplanqualität (siehe Rekonstruktion der Bohrungen in Abb. 5.14). Dies lässt den Rückschluss zu, dass Messsituationen, in welchen das Objekt



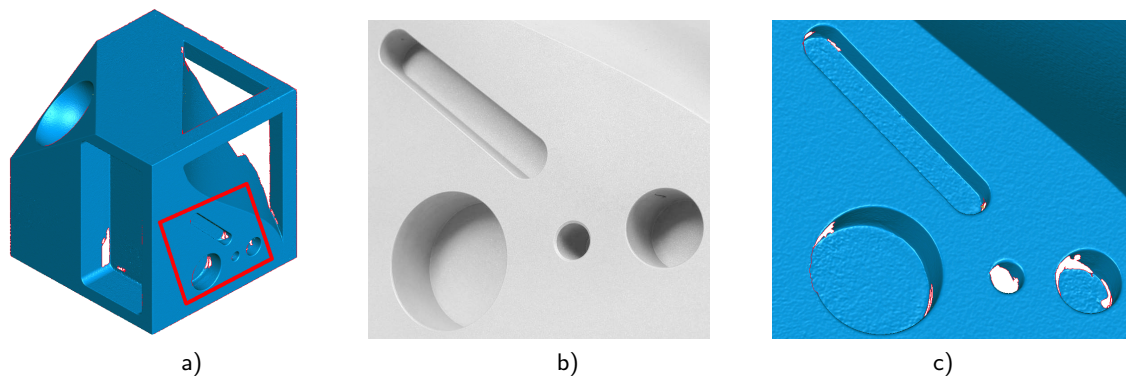


Abbildung 5.14: Photo und 3-D Rekonstruktion des NBV Testobjektes durch 'adaptive' nach 14 Ansichten : a) Frontalansicht bei ca. 87% Vollständigkeit, b) Detailaufnahme der Bohrungen (vergleiche Testkörperdetail fünf in Abschnitt 4.4.1) und c) entsprechende 3-D Rekonstruktion.

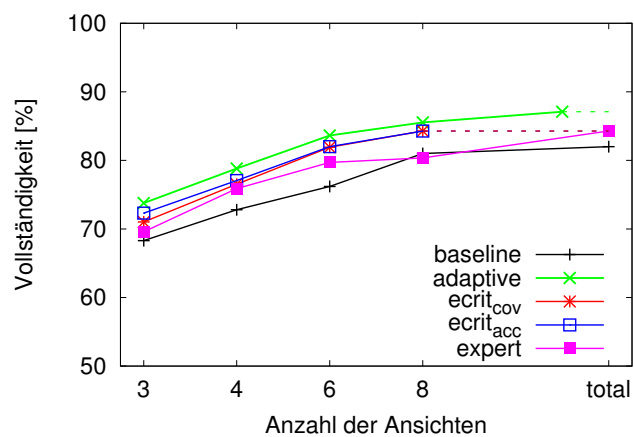


Abbildung 5.15: Vergleich der durch verschiedene Planungsmethoden erzielten Vollständigkeitsraten bei der Vermessung des NBV Testobjektes in Abhängigkeit von der Ansichtenanzahl. [Messparameter: Nutzung der vollen Sensorauflösung (horizontaler Bildwinkel  $26,3^\circ$ ), keine Kompensation des Posenfehlers]

vollständig im Sensorsehfeld abgebildet werden kann und die mittlere Redundanz (s. u.) aufgrund der Objektkomplexität deutlich größer ist, unempfindlich gegen geringe Posenunsicherheit sind. Von allen Planungsmethoden weist 'ecrit<sub>acc</sub>' die höchste Ansichtenplanqualität auf.

Die Anzahl geplanter Ansichten unterscheidet sich zwischen den verschiedenen Methoden stark. Damit einhergehend variiert die mittlere Redundanz, d. h. die Anzahl von Ansichten, welche ein Modelldreieck im Verlauf der Planung erfolgreich messen können. Je geringer die Anzahl notwendiger Ansichten ist, desto geringer sind auch Zeit und weitere Aufwände zur Erfassung und Weiterverarbeitung der 3-D Daten. Beide auf dem erweiterten E-Kriterium basierende Methoden erzeugen die kürzesten Pläne mit jeweils acht Ansichten. Dies beruht auf ihrem Terminierungskriterium (s. o.).

Die Anzahl geplanter Ansichten kann jedoch nur im Zusammenhang mit der realisierten Vollständigkeit interpretiert werden (siehe Abb. 5.15). Dabei erreichen 'ecrit<sub>cov</sub>' und 'ecrit<sub>acc</sub>' nach acht Ansichten geringfügig schlechtere Vollständigkeitsraten als 'adaptive'. Trotzdem ist ihre erzielte Vollständigkeit nach acht Ansichten höher als die mittels 'baseline' und 'expert' erzielten. Diese realisieren auch nach jeweils

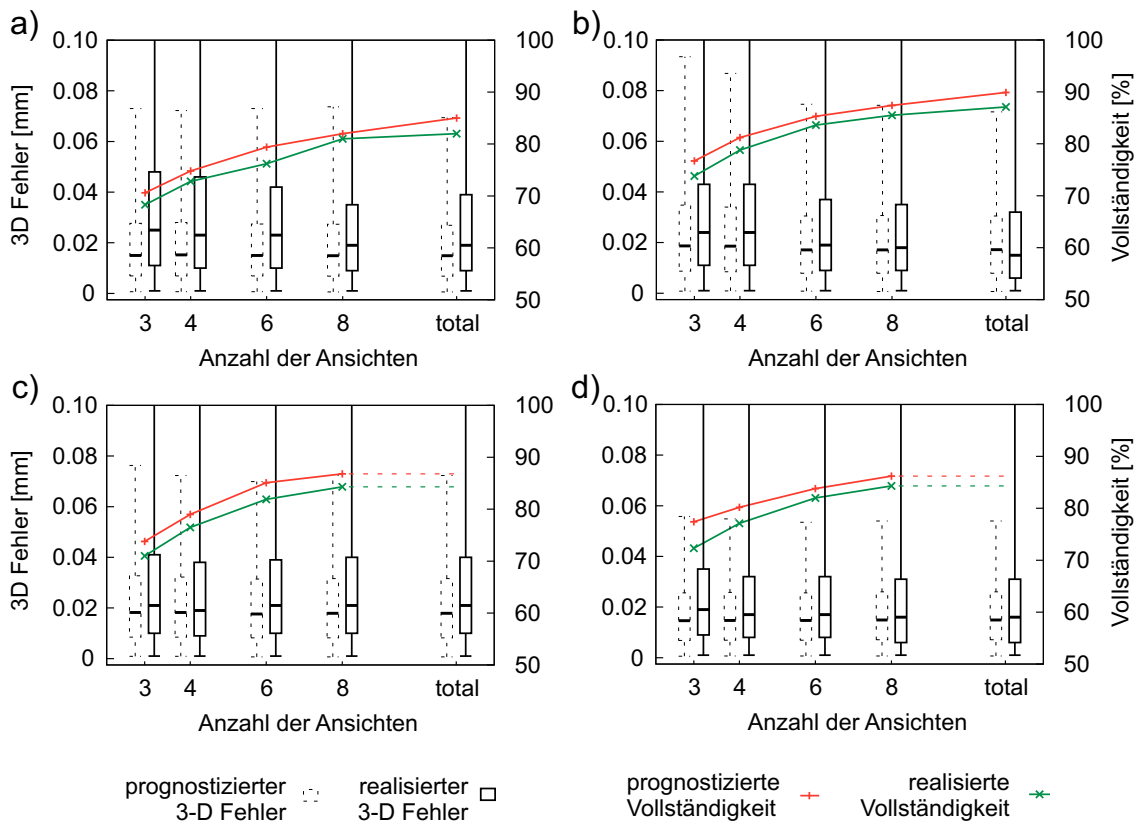


Abbildung 5.16: Vergleich der vorhergesagten und tatsächlich realisierten Vollständigkeits- und Verteilungen des 3-D Fehlers der verschiedenen Planungsmethoden für das gesamte NBV Testobjekt im Planungsverlauf: a) baseline, b) adaptive, c)  $ecrit_{cov}$ , d)  $ecrit_{acc}$ . [Messparameter: Nutzung der vollen Sensorauflösung (diagonaler Bildwinkel  $26,3^\circ$ ), keine Kompensation des Posenfehlers]

16 Ansichten keine höheren Vollständigkeitsgrade. Über alle Ansichten erzielt 'adaptive' stets die beste Vollständigkeit. Interessant ist weiterhin, dass die im Rahmen dieser Arbeit entwickelten Planungsmethoden im Vergleich zu 'expert' die gleiche oder bessere Vollständigkeit erreichen.

In Abb. 5.16 werden für die verschiedenen Planungsmethoden die jeweils prognostizierten und realisierten Verteilungen des 3-D Fehlers und Vollständigkeitsgrade für das gesamte NBV Testobjekt im Planungsverlauf verglichen. Dabei wird der 3-D Fehler mittels Boxplots, also der Darstellung robuster Streuungsmaße in Form von Median, den Quartilen und den Extremwerten veranschaulicht. Während prognostizierte und realisierte Vollständigkeit relativ gut übereinstimmen, trifft dies für die prognostizierte und realisierte Verteilung der 3-D Fehler weniger zu. Insbesondere die oberen Extremwerte sind u. a. infolge zweier kleinerer Fertigungsdefekte am NBV Testobjekt, welche „notch“ und „tripod“ betreffen, wenig aussagekräftig. Dadurch kommt es bei der Fehlerberechnung gegen das (defektfreie) CAD-Modell für die entsprechenden Bereiche zu atypisch hohen 3-D Fehlern, auf deren Darstellung deshalb in verschiedenen Graphen teilweise verzichtet wird.

Im Planungsverlauf ist aus den Boxplots der beiden Methoden ohne explizite Modellierung der Messunsicherheit zu erkennen, dass bei 'baseline' der Median des prognostizierten 3-D Fehlers konstant bei ca.  $15 \mu\text{m}$  verbleibt, während sich dieser bei 'adaptive' von ca.  $19 \mu\text{m}$  auf ca.  $17 \mu\text{m}$  – bei stets höherer Vollständigkeit – verbessert. Weiterhin ist die Diskrepanz zwischen vorhergesagtem und realisiertem

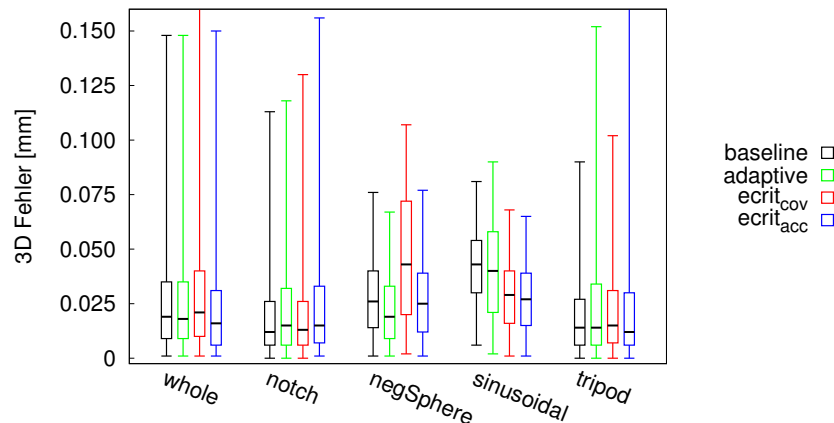


Abbildung 5.17: Vergleich des realisierten 3-D Fehlers der verschiedenen Planungsmethoden an den einzelnen Objektdetails des NBV Testobjektes nach acht Ansichten. [Messparameter: Nutzung der vollen Sensorauflösung (diagonaler Bildwinkel 26,3°), keine Kompensation des Posenfehlers]

Median des 3-D Fehlers gerade zu Planungsbeginn relativ groß.

Im Gegensatz dazu sind diese Unterschiede bei den Methoden mit expliziter Modellierung der Messunsicherheit 'ecrit<sub>cov</sub>' und 'ecrit<sub>acc</sub>' geringer. Aufgrund der vollständigkeitsorientierten Parametrisierung von 'ecrit<sub>cov</sub>' erreicht diese Methode die schlechtesten 3-D Fehlerwerte. Diese liegen jedoch innerhalb der geforderten Spezifikation. Trotzdem kann 'ecrit<sub>cov</sub>' keine bessere Vollständigkeit im Vergleich zu 'ecrit<sub>acc</sub>' erzielen. Dies ist u. a. dadurch zu erklären, dass die *mittlere* Bewertung der Messunsicherheit des Modells durch die *E*-kriteriums-basierte Ansichtenplanung minimiert wird. Da das NBV Testobjekt jedoch vollständig im Sensorsehheld platzierbar ist, werden zwangsläufig auch nicht intendierte Objektbereiche aus möglicherweise ungeeigneten Sensorposen erfasst. Diese Vermutung wurde durch die Versuchsreihe „reduzierte Sensorauflösung / 33 % Kompensation“ bestätigt.

Mit 16  $\mu\text{m}$  kann 'ecrit<sub>acc</sub>' den besten Median der 3-D Fehler über das gesamte NBV Testobjekt nach acht Ansichten erreichen (Abb. 5.9 visualisiert den Planungsverlauf). Damit ist der 3-D Fehler von 75 % der erfassten Oberfläche  $\leq 31 \mu\text{m}$  und damit innerhalb des spezifizierten Grenzwertes  $e_c = 35 \mu\text{m}$ ! Im Vergleich zum Median des 3-D Fehlers von 'baseline' mit 19  $\mu\text{m}$  wird dies trotz höherer Vollständigkeit erzielt. Nur 'adaptive' erreicht – bei 2,8 % höherer Vollständigkeit und weiteren sechs Ansichten – einen noch niedrigeren Median des 3-D Fehlers von 15  $\mu\text{m}$ .

Abbildung 5.17 zeigt den realisierten 3-D Fehler aller Objektdetails des NBV Testobjektes nach acht Ansichten. Größtenteils sind die Mediane der 3-D Fehler  $< 30 \mu\text{m}$  und liegen nah beieinander. Deutlich sichtbar ist anhand der erhöhten Mediane der 3-D Fehler, dass sowohl die negative Halbkugel als auch die Sinusfläche alle Planungsmethoden vor Herausforderungen stellen. Trotzdem schneidet 'ecrit<sub>acc</sub>' im Vergleich zu 'baseline' mit 25  $\mu\text{m}$  zu 26  $\mu\text{m}$  (negative Halbkugel) bzw. 27  $\mu\text{m}$  zu 43  $\mu\text{m}$  (Sinusfläche) – bei gleichzeitig besserer Vollständigkeit – besser ab. Weiterhin sind die erhöhten Fehlerwerte bei 97,5 % aufgrund der Fertigungsfehler bei den Objektdetails „notch“ und „tripod“ zu erkennen, welche wiederum zu entsprechend erhöhten Fehlerwerten beim Gesamtobjekt beitragen. Die anderen Streuungsmaße bleiben jedoch davon unbeeinflusst. Außer bei „notch“ realisiert 'ecrit<sub>acc</sub>' im Vergleich zu 'ecrit<sub>cov</sub>' erwartungsgemäß einen geringeren Median des 3-D Fehlers.

Abbildung 5.18 stellt beispielhaft die Vollständigkeit und die Verteilung der 3-D Fehler der Sinusfläche

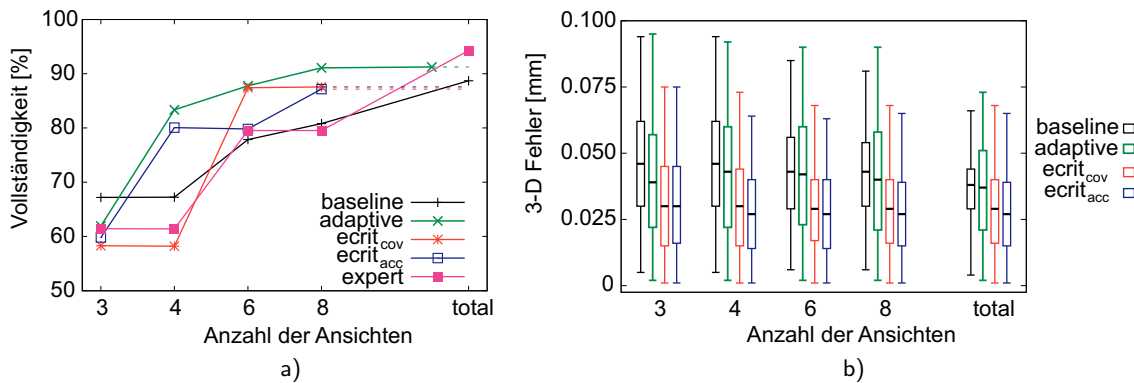


Abbildung 5.18: Vergleich der realisierten Vollständigkeit und des 3-D Fehlers im Planungsverlauf für das Detail der Sinusfläche des NBV Testobjektes. [Messparameter: Nutzung der vollen Sensorauflösung (diagonaler Bildwinkel 26,3°), keine Kompensation des Posenfehlers]

	Ansichten- planung <sup>a)</sup> [h:m]	3-D Messung <sup>b)</sup> [h:m]	Oberflächen- extraktion <sup>b)</sup> [h:m]	Gesamt- zeit [h:m]	3-D Rekonstruktion (Geomagic® *.wrp Datei)	
					Mio. Dreiecke	Größe [MB]
baseline	<b>0:09</b>	0:18	0:15	<b>0:42</b>	7,1	207
adaptive	0:23	0:15	0:18	0:56	7,9	230
ecrit <sub>acc</sub>	1:42	<b>0:08</b>	<b>0:08</b>	1:58	7,9	231

Tabelle 5.4: Vergleich der Zeiten für Ansichtenplanung, 3-D Messung und Oberflächenextraktion, sowie resultierende Dreiecksanzahl und Dateigröße beim NBV Testobjekt. Verwendete Rechensysteme: a) Intel® Core™ 2 Quad, 2,4 GHz; b) Intel® Xeon™ X5450, 3 GHz. [Messparameter: Nutzung der vollen Sensorauflösung (diagonaler Bildwinkel 26,3°), keine Kompensation des Posenfehlers]

des NBV Testobjektes im Verlauf der Ansichtenplanung dar. Alle Planungsmethoden haben nach sechs Ansichten mehr als 75 % der Sinusfläche erfasst. 'expert' gelingt es erst in der zweiten Hälfte seiner sechzehn Ansichten, eine höhere Vollständigkeit als die anderen Planungsmethoden zu erreichen. Bei der Interpretation der Verteilung der 3-D Fehler dieses anspruchsvollen Objektdetails sind die Vorteile der Einbeziehung der Messunsicherheit in die Planung deutlich sichtbar. Beide  $E$ -kriteriums-basierten Planungsmethoden können den Median ihrer 3-D Fehler über den Planungsverlauf auf klar niedrigerem Niveau halten als 'baseline' und 'adaptive'. Dies gelingt ihnen trotz hoher Vollständigkeit und geringerer Anzahl geplanter Ansichten.

Tabelle 5.4 erlaubt einen Vergleich ausgewählter<sup>7</sup> Ansichtenplanungsmethoden bezüglich der zur Rekonstruktion des NBV Testobjektes benötigten Zeit und der Komplexität des rekonstruierten 3-D Modells. Die Zeit zur Berechnung der Messbarkeitsmatrix bestimmt in der mengentheoretischen Ansichtenplanung im Wesentlichen die Gesamtlaufzeit. Da 'baseline' weniger – mit Bezug auf den C-Space – gültige Ansichtenkandidaten erstellt, benötigt die Berechnung des Ansichtenplanes die geringste Zeit. Die kurze Planungszeit wird aber durch eine niedrigere erzielte Vollständigkeit sowie längere Zeiten bei der eigentlichen 3-D Messung und der Erstellung des Oberflächenmodells relativiert. Werden z. B. im Rahmen der Qualitätskontrolle mehrere Objekte gleichen Modells rekonstruiert, sinkt die Bedeutung der benötigten Zeit zur Planung der Ansichten im Vergleich zur Zeit, welche zur Messung des Objektes benötigt wird, drastisch.

<sup>7</sup>Die Methode 'ecrit<sub>cov</sub>' ist mit 'ecrit<sub>acc</sub>' vergleichbar. 'expert' benötigte weniger als 2 h zur Ansichtenplanung, die weiteren Zeiten sind mit 'baseline' vergleichbar.

	Ansichten- plan- qualität	realisierte Voll- ständigkeit [%] nach $n$ Ansichten		Median 3-D Fehler [ $\mu\text{m}$ ] nach $n$ Ansichten		Ansichten- Anzahl total	mittlerer Punkt- abstand [ $\mu\text{m}$ ]	mittlere Redun- danz
		8	total	8	total			
baseline	1,20	66,1	72,9	20	18	17	161	2,4
adaptive	0,97	<b>81,6</b>	<b>85,9</b>	21	17	20	162	2,4
ecrit <sub>cov</sub>	0,98	80,0	82,9	18	17	<b>12</b>	164	2,7
ecrit <sub>acc</sub>	0,98	78,3	84,2	18	16	21	159	1,9
random	1,30	55,9	77,1	19	16	25	163	2,4
regular	—	76,9	80,1	<b>16</b>	16	25	159	—
expert	—	78,7	83,2	<b>16</b>	<b>15</b>	16	162	—

Tabelle 5.5: Auswahl der Ergebnisse des Leistungsvergleiches für die Versuchsreihe „reduzierte Sensorauflösung / 33 % Kompensation“ des NBV Testobjektes. Die vollständigen Ergebnisse sind in den Tabellen B.2 und B.3 im Anhang zu finden.

**Versuchsreihe „reduzierte Sensorauflösung / 33 % Kompensation“** Durch die Verringerung der genutzten Sensorauflösung – und damit des Bildwinkels – ist es nicht mehr möglich, das gesamte NBV Testobjekt im Sensorsehfeld abzubilden. So kann simuliert werden, wie sich die verschiedenen Planungsmethoden bei voller Auflösung, aber ausgedehntem Messobjekt, verhalten würden, da ein großer, dem NBV Testobjekt entsprechender, ausreichend genau gefertigter Testkörper nicht zur Verfügung stand. Des Weiteren wurde untersucht, welchen Einfluss die von Scott vorgeschlagene Kompensation der Sensorposenunsicherheit um 33 % im Vergleich zur unkompensierten hat.

Tabelle 5.5 zeigt eine Auswahl der Ergebnisse. Auch hier sind die gesamten Ergebnisse im Anhang in den Tabellen B.2 und B.3 dargestellt. Im Vergleich zu Tab. 5.3 fällt sofort auf, dass die Ansichtenplanqualität Werte größer eins annimmt. Dies folgt aus der präzisierten Definition, nachdem diese das Verhältnis des tatsächlich (spezifikationstreu) gemessenen Oberflächeninhaltes zum als messbar Vorhergesagten angibt. Da in dieser Versuchsreihe jedoch mit einer Redundanz von 33 % gearbeitet wird, kann die Ansichtenplanqualität also den Maximalwert  $100\% / (100\% - 33\%) = 1,5$  annehmen. Werte größer 1 deuten in diesem Kontext jedoch nicht auf eine höhere Qualität der Planung, sondern auf „unbeabsichtigt“ und zufällig gemessene<sup>8</sup> Oberflächenbereiche hin.

Die Ansichtenplanqualitäten der Methoden mit angepasster Erzeugung der Ansichtenkandidaten nach Abschnitt 5.1.2 bleiben im Wesentlichen unverändert zur Versuchsreihe „volle Sensorauflösung / 0 % Kompensation“. Daraus kann der Schluss gezogen werden, dass die gegebene Sensorposenunsicherheit nicht ein Niveau erreicht, bei dem sie starken Einfluss auf die Planungsergebnisse hat. Es ist jedoch zu erwarten, dass mit steigender Komplexität und kleineren zu vermessenden Objektstrukturen die Bedeutung der Kompensation der Sensorposenunsicherheit zunimmt.

Als zweites fällt die deutlich gesunkene mittlere Redundanz der erzeugten Ansichtenpläne auf. Dies folgt direkt aus dem verringerten Sensorsehfeld. Gleichzeitig können ‘adaptive’, ‘ecrit<sub>cov</sub>’ und ‘ecrit<sub>acc</sub>’ jedoch nach acht Ansichten ungefähr 80 % und damit fast so viel Vollständigkeit wie mit voller Sensorauflösung erreichen.

Abbildung 5.19 zeigt den Verlauf der realisierten Vollständigkeit im Planungsverlauf. Deutlich ist das schlechte Abschneiden von ‘random’ und ‘baseline’ zu erkennen. Kann ‘baseline’ zur Vermessung spezieller Objektbereiche notwendige Ansichten aufgrund von starken Einschränkungen im C-Space

<sup>8</sup>Aufgrund dessen wurde bei allen Versuchen mit Redundanz auf die Markierung der besten Ansichtenplanqualität verzichtet.

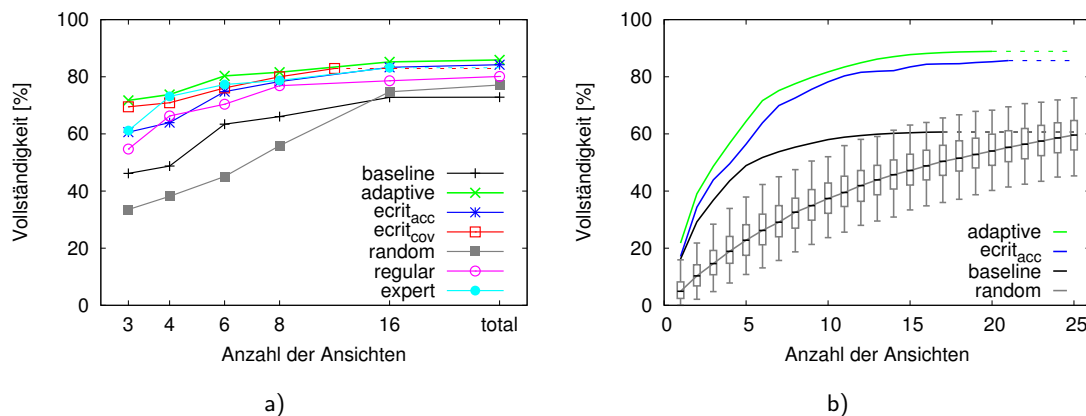


Abbildung 5.19: Gegenüberstellung von a) realisierter und b) vorhergesagter Vollständigkeit bei der Vermessung des NBV Testobjektes in Abhängigkeit von der Ansichtenanzahl. In der Vorhersage wurde die Vollständigkeit von 1000 Wiederholungen der zufälligen Sensorpositionierung zu einem Boxplot zusammengefasst. [Messparameter: Nutzung der reduzierten Sensorauflösung (horizontaler Bildwinkel 13,9°), 33 % Kompensation des Posenfehlers]

nicht nutzen – und misst es diese Objektbereiche aufgrund eines nicht vollständig im Sensorsehfeld platzierbaren Messobjektes nicht zufällig durch eine andere Ansicht – so kann es sogar von zufälliger und regelmäßiger Sensorpositionierung übertroffen werden.

Andererseits zeigen 'adaptive', 'ecrit<sub>cov</sub>' und 'ecrit<sub>acc</sub>', dass sie in einer solch anspruchsvollen Situation mit dem menschlichen Experten mithalten können. Die Methode 'adaptive' erzielt über alle Ansichten stets die höchste Vollständigkeit. Diesmal sind die Auswirkungen der unterschiedlichen Parametrisierungen der beiden *E*-kriteriums-basierten Planungsmethoden sichtbar: 'ecrit<sub>cov</sub>' erreicht bis zur Terminierung nach zwölf Ansichten eine höhere Vollständigkeit als 'ecrit<sub>acc</sub>'. Diese erreicht mit 21 Ansichten jedoch einen niedrigeren Median 3-D Fehler als die Methoden 'baseline', 'adaptive' und 'ecrit<sub>cov</sub>'. Bei ähnlicher Vollständigkeit wird ein besserer Median 3-D Fehler nur durch 'expert' erreicht.

In Abb. 5.19 ist der Verlauf der prognostizierten Verteilung der Vollständigkeit für 1000 zufällig bestimmte Ansichtenfolgen mit 25 Ansichten im Vergleich zu 'baseline', 'adaptive' und 'ecrit<sub>acc</sub>' dargestellt. Der Boxplot zeugt deutlich, dass in schwierigen Messsituationen eine zufällige Sensorplatzierung keine Alternative zur Ansichtenplanung darstellt.

**Zusammenfassung der Versuche** Bei vorhandener Modellinformation ist der Vorteil der vorgestellten Ansichtenplanungsmethoden sowohl gegenüber dem Stand der Technik als auch gegenüber alternativen Sensorpositionierungsmethoden gezeigt worden. Abhängig von den Rekonstruktionszielen und der Messsituation kann eine Methode bzw. Parametrisierung gewählt werden, mit der die in den Abschnitten 5.1.2 und 5.2.2 vorgestellten Methoden bessere Ergebnisse erzielen.

Dabei werden mittels 'ecrit<sub>cov</sub>' kurze Pläne bei hoher Vollständigkeit realisiert, wohingegen eine geringe Messunsicherheit bei hoher Vollständigkeit mittels 'ecrit<sub>acc</sub>' erreicht werden kann. Eine vergleichsweise geringe Berechnungsdauer bei maximaler Vollständigkeit schließlich ist mittels 'adaptive' erzielbar. Im folgenden Abschnitt wird untersucht, wie der mengentheoretische Planungsansatz auch ohne CAD-Modellinformation eingesetzt werden kann.

## Kapitel 6

# Kombinierte daten- und modellgetriebene Ansichtenplanung

Ist ein verwendbares Objektmodell vorhanden, so können mit den Methoden aus Kapitel 5 effizient Ansichtenpläne berechnet werden. Oft sind jedoch aus den unterschiedlichsten Gründen keine geeigneten Modelle verfügbar: Es existiert kein CAD-Modell oder nur Zeichnungen oder das CAD-Modell kann nicht geeignet aufbereitet und in eine dreiecksbasierte Form überführt werden. In diesem Fall müssen aus dem bisher rekonstruierten Objektwissen Rückschlüsse auf unbekannte Objektbereiche gezogen werden. Eine Vielzahl entsprechender sog. datengetriebener Verfahren wurden in Abschnitt 3.1 vorgestellt.

Wie von O. Hall-Holt [26] schon frühzeitig erkannt, bietet jedoch die Kombination daten- und modellgetriebener Verfahren in den verschiedenen Phasen der Ansichtenplanung (siehe Kapitel 3) entscheidende Vorteile. Ohne den Anspruch höchster Messgüte kann so in einer Startphase mit möglichst wenigen Ansichten ein Grobmodell erstellt werden, dessen unvollständig oder schlecht erfasste Bereiche systematisch und mit dem Ziel geringer Messunsicherheit in einer mittleren Phase rekonstruiert werden. Je nach Messaufgabe kann eine Endphase sinnvoll sein, in welcher verbleibende Defizite durch gezielte Ansichten behoben werden und optional der Messplan zur wiederholten Nutzung optimiert werden kann. Dieser Mehrphasenansatz ist in jüngerer Zeit wieder verstärkt aufgegriffen worden, so u. a. von Loriot et al. [41], Scott [69] und Peng Wang et al. [91].

Dieses Kapitel stellt einen kombinierten daten- und modellgetriebenen Planungsansatz vor. Er unterscheidet sich von den oben genannten Ansätzen in zweierlei Hinsicht. Erstens ist für die meisten Objekte ohne CAD-Modell trotzdem entscheidendes Vorwissen vorhanden: Größe, Lage und ungefähre Form. Dieses Wissen kann dem Planungssystem durch einen sog. Hüllkörper zur Verfügung gestellt werden. Wie die Experimente in Kapitel 5 zeigen, können geeignete, regelmäßig abtastende Ansichtenpläne – dort als 'regular' bezeichnet – in kurzer Zeit eine hohe Objektvollständigkeit erreichen. Eine solche regelmäßige Abtastung eines Hüllkörpers stellt somit einen geeigneten Startpunkt für die Erstellung eines Grobmodells des Messobjektes dar.

Zweitens verbindet dieser kombinierte Ansatz nicht verschiedene Methoden, sondern bleibt konsequent innerhalb der mengentheoretischen Ansichtenplanung (siehe Abb. 5.1 c). Dabei wird der Hüllkörper in einer ersten Phase durch die Methoden in Abschnitt 5.1.2 mit ausreichender Vollständigkeit erfasst, was der o. g. geeigneten regelmäßigen Abtastung entspricht. Dies ermöglicht insbesondere Abschät-

zungen zur minimal erwartbaren Rekonstruktionsrate und die Möglichkeit der Weiternutzung der zur Erstellung des Grobmodells genutzten partiellen Objektansichten. Zum Einsatz kommt dabei die in Abschnitt 5.2.2 vorgestellte Planung mit erweitertem  $E$ -Kriterium, welche automatisch anhand der Bewertung der Messunsicherheit schon ausreichend erfasste Objektbereiche als solche zu klassifizieren vermag.

Im weiteren Verlauf dieses Kapitels wird im folgenden Abschnitt dargestellt, wie ein Grobmodell des unbekanntes Messobjektes erstellt werden kann. Anschließend wird in Abschnitt 6.2 gezeigt, wie durch eine Folge von Planungs-, Rekonstruktions- und Bewertungsschritten iterativ das erzeugte Grobmodell zur finalen Objektrekonstruktion vervollständigt werden kann. Abschließend werden in Abschnitt 6.3 Ergebnisse der Rekonstruktion des NBV Testobjektes, des Integralträgers und des Spielzeugelefanten präsentiert.

## 6.1 Hüllkörperbasierte Grobmodellerstellung

Das Ziel der Startphase des kombinierten Ansichtenplanungsansatzes ist es, ohne Objektwissen ein möglichst vollständiges Modell des zu rekonstruierenden Körpers zu erzeugen. Wird dazu z. B. ein datengetriebenes volumetrisches Planungsverfahren (siehe auch Abschnitt 3.1.1) eingesetzt, kommt dabei zur Maximierung der Vollständigkeit implizit eine globale Greedy-Strategie zur Minimierung ungesehenen Volumens zur Anwendung. Auch die Lösung des Ansichtenplanungsproblems über die Beobachtung von Grenzflächen führt indirekt zu obiger Strategie.

Um diese Herangehensweise *innerhalb* des mengentheoretischen Planungsansatzes (siehe Algorithmus 6.1) zu realisieren, muss das Problem geeignet transformiert werden. Dazu wird nicht das ungesehene Volumen, sondern die ungesehene Oberfläche eines das Messobjekt umschließenden Körpers minimiert. Da aber die in dieser Arbeit betrachtete 3-D Rekonstruktionsmethode der Streifenprojektion ebenfalls nur zur Erfassung der Objektoberfläche in der Lage ist, entspricht diese Herangehensweise im Rahmen der Grobmodellerstellung näherungsweise der Maximierung der Objektoberfläche.

Ähnlich der notwendigen Spezifikation von Messvolumen und Objektzentrum in der datengetriebenen Ansichtenplanung wird für den kombinierten Ansatz ein sog. Hüllkörper definiert. Dieser ist eine dem Messobjekt ungefähr in Größe und Form entsprechende geometrische Grundform. Abhängig von der Modellgeometrie können dazu z. B. Kugeln, Quader oder Zylinder genutzt werden. Wichtig ist nur, dass Größe, Lage und Orientierung im Weltkoordinatensystem mit dem des Messobjektes näherungsweise übereinstimmen<sup>1</sup> (siehe Abb. 6.1 a und Abb. 6.2 b). Zur Erzeugung eines geeigneten Hüllkörpers wird die Dreiecksanzahl der entsprechenden geometrischen Grundform mittels Dezimierung oder regelmäßiger Verfeinerung (engl. „regular refinement“) an die gewünschte Dreiecksanzahl angepasst. Da die Hand-Auge-Transformation als gegeben vorausgesetzt wird, kann diese Randbedingung einfach eingehalten werden.

Einen Spezialfall eines Hüllkörpers stellt bei der Halbraumerfassung von Messobjekten die Nutzung von Time-of-Flight (ToF) 3-D Rekonstruktionsdaten dar. Spezielle Tiefenkameras sind dabei in der Lage, in Echtzeit ein niedrig aufgelöstes 3-D Modell der Messszene – mit im Vergleich zur Streifenprojektion hoher Messunsicherheit – zu erstellen. Um die Einsatzmöglichkeiten im Rahmen der Ansichtenplanung zu untersuchen, wurde eine solche  $64 \times 48$  Pixel messende Kamera in den Sensorkopf integriert (siehe Abb. 4.2 b, PMD [vision]<sup>®</sup> O3 von PMD Technologies [3]). Die direkte Nutzung der damit rekonstruierten

<sup>1</sup>Insbesondere muss das Objekt nicht notwendigerweise komplett vom Hüllkörper umschlossen werden.



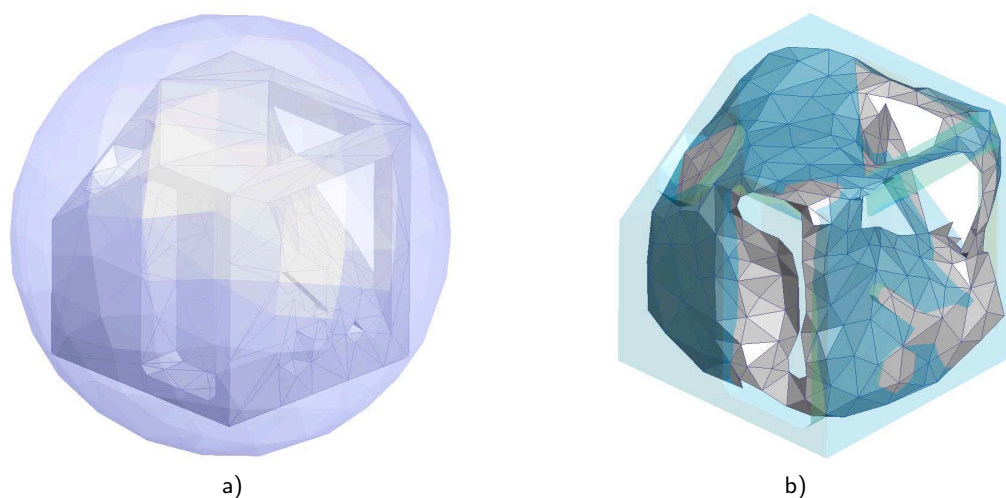


Abbildung 6.1: Zur Grobmodellerstellung genutzte Hüllkörper: a) Kugel mit Radius 140 mm anstelle des NBV Testobjekts ('NBV<sub>hull</sub>', 380 Dreiecke), b) ToF-Scan (grau) des NBV Testobjekts ('NBV<sub>ToF</sub>', 399 Dreiecke) – zur besseren Erkennbarkeit ist das CAD-Modell transparent überlagert.

3-D Daten gestaltet sich aufgrund einer Vielzahl von Herausforderungen bisher schwierig (Munkelt et al. [55]).

Aufgrund der monostatischen 3-D Rekonstruktion kann ein einzelner ToF-Scan jedoch einen Großteil der aus einem Halbraum messbaren Objektoberfläche erfassen. Aus solch einem Scan kann innerhalb weniger Sekunden ein für die mengentheoretische Ansichtenplanung geeignetes Modell für die Grobmodellerstellung erzeugt werden. Dazu muss lediglich der Objekthintergrund z. B. entfernungsabhängig detektiert und entfernt werden und das resultierende 3-D Modell durch Verringerung der Dreiecksanzahl den Zielvorgaben entsprechend der Modellkomplexität angepasst werden. Das so entstandene Modell ist im Allgemeinen noch kein geeignetes Grobmodell, sondern ein Hüllkörper (siehe Abb. 6.1 b und Abb. 6.2 a), da von der Aufnahmesensorposition nicht erfassbare Messobjektbereiche nicht enthalten sind und die Messunsicherheit in den ToF 3-D Daten noch immer vergleichsweise hoch ist (Munkelt et al. [55]).

Im Rahmen dieser Arbeit wird mittels der in Abschnitt 5.1.2 vorgestellten Methode zuerst ein Ansichtenplan zur Grobmodellerstellung erzeugt (Alg. 6.1, Zeile 2). Dabei wird die Planungstiefe (Maximalanzahl  $v_{\max}$  zu planender Ansichten) der ersten Iteration der Mehransichtenplanung gemäß Pfad c) von Abb. 5.1 so gewählt, dass die prognostizierte Vollständigkeit der Hüllkörpervermessung 80 % übersteigt. Im Falle der Verwendung von ToF 3-D Daten sollte sogar eine Vollständigkeit von 95 % überschritten werden, da diese – trotz ihrer niedrigen Auflösung und hohen Messunsicherheit im Vergleich zu generischen Hüllkörpern – das Messobjekt wesentlich detaillierter approximieren. Beide Grenzwerte wurden empirisch ermittelt.

Der zur Grobmodellerzeugung basierend auf einem Hüllkörper berechnete Ansichtenplan tastet den Ansichtenraum regelmäßig ab. Er berücksichtigt aufgrund der mengentheoretischen Planungsmethode dabei automatisch sowohl die ungefähren Objektdimensionen als auch die konkrete Sensorkonfiguration inklusive des C-Space. Insofern ist dieser Ansichtenplan im Falle des NBV Testobjektes mit dem entsprechendem 'regulär'-Plan vergleichbar.

Nach Ausführung des Planes zur Grobmodellerstellung werden die  $v_{\max}$  Ansichten sensorspezifisch

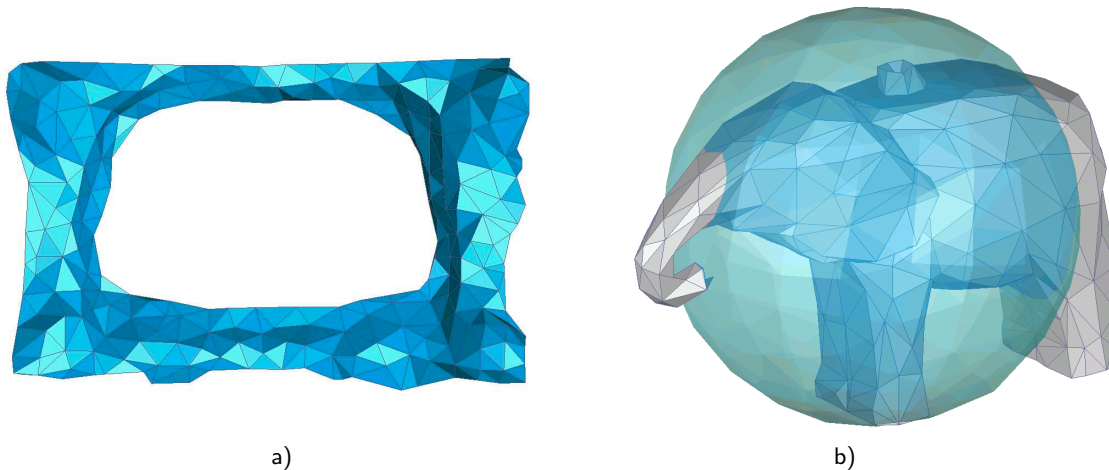


Abbildung 6.2: Zur Grobmodellerstellung genutzte Hüllkörper: a) ToF-Scan des Integralträgers ('NBV<sub>ToF</sub>', 396 Dreiecke, vgl. auch Abb. 5.13 b), b) Kugel (transparent) mit Radius 56 mm anstelle des Spielzeugelafanten ('NBV<sub>hull</sub>', 380 Dreiecke).

nachbearbeitet und fusioniert (Zeilen 5 ff.). Im Falle des „kolibri ROBOT“ wird die gleiche Fusion wie in Abschnitt 4.4.3 beschrieben durchgeführt. Da jedoch lediglich ein Grobmodell erstellt werden soll, ist aus Geschwindigkeitsgründen die Berechnung eines Bruchteils der 3-D Punkte – z. B. durch regelmäßige Abtastung durch ein  $5 \times 5$  Gitter nur jeder fünfundzwanzigste – ausreichend. Des Weiteren kann der zulässige Grenzwinkel  $\theta_b$  auf  $85^\circ$  angehoben werden, um die Objektivollständigkeit auf Kosten der Messunsicherheit zu maximieren. Außerdem können „Löcher“ in der Rekonstruktion der Objektoberfläche, deren Umfang eine objektabhängige Obergrenze nicht überschreitet, automatisch gefüllt werden. Abschließend wird das Messobjekt z. B. entfernungsabhängig vom Hintergrund befreit und die Dreiecksanzahl des resultierenden Messobjektes auf den gewünschten Wert reduziert. Diese Arbeitsschritte können automatisch über eine angepasste Parametrisierung der Messsoftware und z. B. Makrosteuerung von „Geomagic® Studio®“ [4] erreicht werden.

## 6.2 Online NBV-Planung mittels erweitertem $E$ -Kriterium

Die durch Pfad c) in der Übersicht zum Planungsansatz in Abb. 5.1 symbolisch dargestellte Methode wird in diesem Abschnitt erläutert und durch Algorithmus 6.1 zusammengefasst. Das generelle Vorgehen folgt dabei dem in der NBV Planung gebräuchlichen Zyklus aus Planung, Datenaufnahme, Registrierung und Datenfusion [74].

Im Unterschied zur modellgetriebenen Planung wird als Eingabe kein Objektmodell, sondern lediglich der gemäß vorherigem Abschnitt erzeugte Hüllkörper  $M_{hull}$  erwartet. Nachdem das Objekt mit dem auf dem Hüllkörper basierenden Ansichtenplan erfasst wurde, wird das daraus resultierende Grobmodell des Objektes in der zentralen Iteration des Algorithmus (Zeile 4-21) weiter vervollständigt.

Dazu wird nach der Erstellung des jeweils aktuellen Objektmodells in Zeilen 5 ff. auf dessen Grundlage die nächste Ansicht<sup>2</sup>  $V_{NBV}$  mittels der in Abschnitt 5.2.2 (Alg. 5.2) vorgestellten Methode geplant (Zeilen 11 ff.). Anschließend werden in den Zeilen 14 f. die resultierenden Kovarianzmatrizen

<sup>2</sup>Objektabhängig können auch mehrere Ansichten in einer Iteration geplant werden.

---

**Algorithmus 6.1:** Kombinierte daten- und modellgetriebene Ansichtenplanung mit erweitertem E-Kriterium basierend auf einem Hüllkörper des Messobjekts.

---

**Daten:** Hüllkörper  $M_{\text{hull}}$  (grobe Objektform oder z. B. ToF-Scan)  
 Bewertungsfunktion  $f_e$  nach Gl. (5.18)  
 Abbruchbedingungen für erste und zweite Phase

**Ergebnis:** Menge der Ansichten  $V_{\text{plan}}$   
 erstelltes Objektmodell  $M_{\text{NBV}}$   
 Matrix der Kovarianzen  $\Sigma_{s_i}^{(v)}$   
 3-D Rekonstruktion des Objektes

```

1 begin
2   // erste Phase: Erstellung eines initialen Objektmodells
3    $V_{\text{plan}} \leftarrow$  Ansichtenplanung nach Abschnitt 5.1.2 // basierend auf Hüllkörper
4   Ausführung von  $V_{\text{plan}}$  unter Berücksichtigung der Abbruchbedingung
5   repeat // zweite Phase: Modellvervollständigung
6     // iterative Grobmodellerstellung
7     Erstelle aus bisherigen Ansichten aktuelles Objektmodell  $M_{\text{NBV}}$  unter Berücksichtigung von:
8     ... Anhebung des Grenzwinkels  $\theta_b$  auf z. B. 85°
9     ... Reduktion der Punktzahl, z. B. auf 4%
10    ... Füllen kleinerer Löcher
11    ... Objekthintergrundunterdrückung
12    ... Modelldreiecksreduktion auf Dreiecksanzahl von  $M_{\text{hull}}$ 
13     $V_{\text{NBV}} \leftarrow$  Planung der nächsten Ansicht(en)
14    ... mit erweitertem E-Kriterium nach Abschnitt 5.2.2, Alg. 5.2
15    ... auf Grundlage von  $M_{\text{NBV}}$ 
16    Bewerte resultierende  $\Sigma_{s_i}^{(v)}$  gemäß  $f_e$ 
17    Berechne mittlere Messunsicherheit, Zugewinn, Vollständigkeit
18    if not Abbruchbedingung erreicht then
19       $V_{\text{plan}} \leftarrow V_{\text{plan}} + V_{\text{NBV}}$  // Hinzufügen von  $V_{\text{NBV}}$  zum Gesamtmessplan
20      Ausführung von  $V_{\text{NBV}}$ 
21      Selbstkalibrierung unter Nutzung aller bisheriger Ansichten
22      Berechnung der 3-D Koordinaten der Ansichten  $V_{\text{NBV}}$ 
23    until Abbruchbedingung erreicht
24  Erstelle aus allen Ansichten finale 3-D Rekonstruktion des Objektes
25  ... mit normalen Parametern und normaler Auflösung

```

---

der jeweiligen Modelldreiecke  $s_i$  mit der Bewertungsfunktion  $f_e$  bewertet und die der Überprüfung der Abbruchbedingung zugrunde liegenden Planungskenngrößen Messunsicherheit, Zugewinn und Vollständigkeit berechnet.

Falls in den Zeilen 16 ff. die Überprüfung der Abbruchbedingung weitere Ansichten zulässt, wird die nächste Ansicht  $V_{\text{NBV}}$  dem zu berechnenden Ansichtenplan  $V_{\text{plan}}$  hinzugefügt. Nach der Aufnahme der geplanten Ansicht (Ausführung von  $V_{\text{NBV}}$ ) wird diese mittels Selbstkalibrierung (siehe Abschnitt 2.1.2) mit den bisherigen Ansichten des Objektes registriert. Abschließend werden die entsprechenden 3-D Koordinaten berechnet, bevor ein neuer Planungszyklus beginnen kann.

Ist die Abbruchbedingung jedoch erreicht, wird in den Zeilen 22 f. aus den gespeicherten 3-D Daten ein finales 3-D Modell des Objektes erzeugt. Dieses wird durch die im Unterabschnitt „Messverfahrensspezifische Vorverarbeitung“ in Abschnitt 4.4.3 vorgestellte Fusion der einzelnen Ansichten in voller Sensorauflösung und mittels normaler Parameter erstellt.

Die Effektivität der vorgeschlagenen Methode zur Erfassung unbekannter Objekte beruht im Wesentlichen auf drei Aspekten: Einem möglichst vollständigen Grobmodell, der Nutzung unsicherer Oberflächeninformationen und der Modellierung der Messunsicherheit:

**Vollständigkeit des Grobmodells:** Die in Abschnitt 6.1 beschriebene Herangehensweise erlaubt die

einfache Nutzung der auch bei unbekanntem Messobjekten<sup>3</sup> typischerweise a priori vorhandenen Informationen. Bereiche des Messobjektes, welche nicht im erstellten Grobmodell erfasst sind, können nur mit geringer Wahrscheinlichkeit durch die weiteren Planungsschritte detektiert und im Folgenden betrachtet werden.

**Nutzung unsicherer Oberflächeninformationen:** Dass über das Grobmodell hinausgehende Oberflächenbereiche rekonstruiert werden können, ist u. a. auf die Methode zur Erstellung des zur Planung genutzten aktuellen Objektmodells  $M_{NBV}$  zurückzuführen. Speziell durch die Einbeziehung unsicher gemessener Objektbereiche (durch die Anhebung des Grenzwinkels  $\theta_b$ ) und das automatische Füllen kleinerer Löcher kann die mengentheoretische Planungsmethode auf *zusätzliche Hinweise* aufgrund lediglich schlecht oder gar nicht erfasster – aber plausibler – Objektbereiche zurückgreifen. Dies kann analog zum in der datengetriebenen Ansichtenplanung prominent vertretenen Ansatz der Erfassung von Grenzflächen (siehe Abschnitt 3.2.1, z. B. Maver und Bajcsy [48]) aufgefasst werden.

**Modellierung der Messunsicherheit:** Aufgrund der Verwendung der Planung unter Nutzung des erweiterten  $E$ -Kriteriums werden gezielt Ansichten zur besseren Rekonstruktion von Objektbereichen hoher Messunsicherheit berechnet. Dies trifft ebenfalls auf jene Teile des Modells zu, bei denen nur Hinweise auf reale Objektflächen (s. o.) existieren.

**Planfinalisierung** Liegen spezielle Anforderungen an die Objektrekonstruktion vor, können weitere Arbeitsschritte folgen. Mehrere Arbeiten (u. a. Mehdi-Souzani et al. [49], Scott [69] und Rozenwald et al. [66]) schlagen eine Detektion von Scandefekten (speziell von mittelgroßen „Löchern“ in der rekonstruierten Objektfläche) vor. Diese können – Defekt für Defekt – durch weitere Ansichten behoben werden.

Im Allgemeinen ist dieses Vorgehen bei den in dieser Arbeit vorgestellten Methoden nicht notwendig: Einerseits sollten bei geringer Posenunsicherheit alle erreichbaren Objektbereiche durch die geplanten Ansichten erfasst werden, andererseits können bei Bedarf Scandefekte infolge hoher Messunsicherheit durch die Einbeziehung derselben in den Planungsprozess vermieden werden. Lediglich beim Objekt „Integralträger“ treten aufgrund der geringeren Redundanz und des teilweisen – im Planungsansatz nicht modellierten – Messdatenausfalles aufgrund von Reflexionen signifikante Defekte auf.

Soll ein mit dem kombinierten daten- und modellgetriebenen Planungsansatz erstellter Ansichtenplan ein weiteres Mal eingesetzt werden, so bietet sich die Optimierung des Planes an. Dies resultiert zum einen daraus, dass die einzelnen Ansichten unabhängig voneinander geplant wurden. Zum anderen werden die Ansichten mit Hilfe eines partiellen Objektmodells berechnet, welches immer nur das Modellwissen zum jeweiligen Zeitpunkt berücksichtigt.

Im einfachsten Falle kann deshalb die Ansichtenplanung mit einer der in den Abschnitten 5.1.2 und 5.2.2 vorgestellten Methoden auf Grundlage des erstellten Objektmodells  $M_{NBV}$  wiederholt werden. Mit geringerem Rechenaufwand kommt demgegenüber die Sortierung der Ansichten aus. Je nach Sensorsystem kann z. B. durch die Sortierung nach den geschätzten Sensorbewegungskosten (Pengpeng Wang et al. [94, 93]) die Aufnahmedauer reduziert werden. Ist die Anzahl der zulässigen Ansichten vorgegeben, kann z. B. die triviale Sortierung nach dem Zugewinn bezüglich der Vollständigkeit diese maximieren. Abschließend sei auf die von Prieto et al. [60] vorgeschlagene Methode verwiesen, Ansichten

<sup>3</sup>„Unbekannt“ hier im Sinne von „ohne vorhandenes oder nutzbares CAD-Modell“.

mit geringem Zugewinn an Vollständigkeit durch geringfügig modifizierte Nachbaransichten zu ersetzen, um die Anzahl benötigter Ansichten zu reduzieren.

### 6.3 Experimentelle Ergebnisse

In diesem Abschnitt sollen zum einen die Ergebnisse der kombinierten Ansichtenplanung am Beispiel des NBV Testobjektes denen der rein modellgetriebenen gegenübergestellt werden. Zum anderen sollen am Beispiel des Integralträgers und des Spielzeugelefanten – typischen Vertretern von Inspektions- und Rekonstruktionsaufgaben – die Leistung der Planungsmethoden aus den Kapiteln 5 und 6 mit denen aus der Literatur und menschlichen Bedienern verglichen werden.

Zu den bereits in Abschnitt 5.3.2 vorgestellten Methoden 'baseline' und 'expert' kommen die beiden folgenden hinzu:

**'NBV<sub>hull</sub>'** Diesen Planungsreihen liegt als Hüllkörper eine – lediglich in Durchmesser und Position – an das Messobjekt angepasste Kugel zugrunde (380 Dreiecke, siehe Abb. 6.1 a). Darauf basierend wird mit der Methode aus Abschnitt 5.1.2 ein nach dem Beitrag zur Objektvollständigkeit sortierter Ansichtenplan zur Erstellung des Grobmodells erzeugt. Von diesem werden die ersten  $v$  Ansichten ausgewählt, die zur prognostizierten Erfassung von mindestens 80 % der als messbar klassifizierten Hüllkörperoberfläche führen. Basierend auf dem Rekonstruktionsergebnis dieses Planes wird ein Objektmodell erzeugt. Als Terminierungskriterium der darauf aufbauenden datengetriebenen zweiten Phase des kombinierten Ansatzes wurde das Erreichen einer manuell spezifizierten Ansichtenanzahl gewählt. Dabei kam die genauigkeitsorientierte Parametrisierung (siehe Methode 'ecrit<sub>acc</sub>') der Methode nach Abschnitt 5.2.2 zum Einsatz.

**'NBV<sub>ToF</sub>'** Im Gegensatz zur vorangegangenen Planungsreihe wird in dieser der Ansichtenplan zur Grobmodellerstellung basierend auf einer einzelnen ToF-Messung des Messobjekts erstellt (399 Dreiecke, siehe Abb. 6.1 b). Von diesem Plan werden die ersten  $v$  Ansichten ausgewählt, die zur prognostizierten Erfassung von mindestens 95 % der als messbar klassifizierten Oberfläche des Hüllkörpers führen. Das weitere Vorgehen erfolgt analog zu 'NBV<sub>hull</sub>'.

**Versuchsreihe „reduzierte Sensorauflösung / 33 % Kompensation“** Tabelle 6.1 stellt eine Auswahl der Ergebnisse für 'NBV<sub>hull</sub>' und 'NBV<sub>ToF</sub>' im Vergleich zu den schon in Abschnitt 5.3.2 vorgestellten Resultaten der modellgetriebenen Ansichtenplanung dar. Wie bereits in Abschnitt 5.3.2 wurde durch die Verringerung der Sensorauflösung die Messsituation bei Vorhandensein eines ausgedehnten Messobjekts untersucht.

Bei der Versuchsreihe 'NBV<sub>hull</sub>' kam dabei eine angepasste Kugel (Radius 140 mm, 380 Dreiecke) zur Anwendung. Nach acht Ansichten wurde mit 82,7 % Vollständigkeit der Schwellwert von 80 % prognostizierter Vollständigkeit der Erfassung des Hüllkörpers überschritten. Die Ausführung dieses Teilplanes zur Erstellung eines Grobmodells realisierte am NBV Testobjekt eine Vollständigkeit von 75 %. Damit wurde – ohne Nutzung eines konkreten Objektmodells – das Ergebnis von 'baseline' nach acht Ansichten (66 %) deutlich übertroffen.

Die Planung zur Grobmodellerstellung auf Basis der ToF-Messung benötigte lediglich sechs Ansichten, um den Schwellwert von 95 % prognostizierter Objektvollständigkeit (bezogen auf den Hüllkörper) mit 97,4 % zu überschreiten. Die tatsächlich realisierte Vollständigkeit des Grobmodells lag bei 77,5 %. Im

	Ansichten- plan- qualität	realisierte Voll- ständigkeit [%]		Median 3-D Fehler [ $\mu\text{m}$ ]		Ansichten- Anzahl total	mittlerer Punkt- abstand [ $\mu\text{m}$ ]	mittlere Redun- danz
		nach $n$ Ansichten 8	total	nach $n$ Ansichten 8	total			
baseline	1,20	66,1	72,9	20	18	17	161	2,4
ecrit <sub>acc</sub>	0,98	78,3	84,2	<b>18</b>	<b>16</b>	21	159	1,9
NBV <sub>hull</sub>	1,06	75,0	81,8	21	20	<b>16</b>	171	3,0
NBV <sub>ToF</sub>	0,96	<b>79,2</b>	<b>84,4</b>	<b>18</b>	17	<b>16</b>	166	2,6

Tabelle 6.1: Auswahl der Ergebnisse des Leistungsvergleiches für die Versuchsreihe „reduzierte Sensorauflösung / 33 % Kompensation“ des NBV Testobjekts. Die vollständigen Ergebnisse sind in den Tabellen B.2 und B.3 im Anhang zu finden. Bei ‘NBV<sub>hull</sub>’ wurden die ersten acht, bei ‘NBV<sub>ToF</sub>’ die ersten sechs Ansichten lediglich basierend auf dem Hüllkörper geplant.

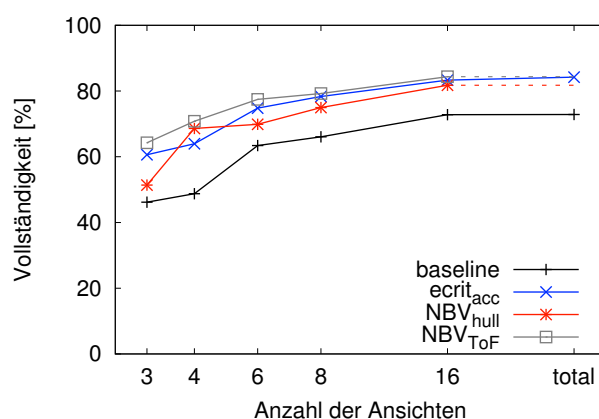


Abbildung 6.3: Vergleich der realisierten Vollständigkeits für die Versuchsreihe „reduzierte Sensorauflösung / 33 % Kompensation“ des NBV Testobjekts.

Vergleich zu ‘NBV<sub>hull</sub>’ ist erkennbar, dass selbst die Nutzung sehr rudimentärer Objektinformationen<sup>4</sup> entscheidende Vorteile bezüglich des Rekonstruktionsergebnisses ermöglicht.

In beiden Fällen wurde ein Grobmodell mit ca. 400 Dreiecken erstellt. Anschließend wurden weitere Ansichten im NBV-Zyklus (s. o.) jeweils einzeln geplant, aufgenommen und fusioniert, bis die maximale Ansichtenanzahl von 16 erreicht wurde. Beide Methoden übertreffen dabei die von ‘baseline’ erzielte Vollständigkeit deutlich (siehe Abb. 6.3).

Nach lediglich 16 Ansichten kann ‘NBV<sub>ToF</sub>’ eine zu ‘ecrit<sub>acc</sub>’ mit 21 Ansichten vergleichbare Vollständigkeit erreichen. Dies hat jedoch einen geringfügig höheren Median 3-D Fehler zur Folge. Andererseits erreicht die auf minimaler Objektinformation beruhende Planung ‘NBV<sub>hull</sub>’ erwartungsgemäß den nominell höchsten Median 3-D Fehler aller untersuchter Methoden. Dabei gilt es jedoch zum einen zu berücksichtigen, dass der realisierte Fehler von 20  $\mu\text{m}$  die angestrebte Messunsicherheit von 25  $\mu\text{m}$  der zur Anwendung kommenden genauigkeitsorientierten Parametrisierung der Methode nach Abschnitt 5.2.2 unterbietet, die Messspezifikation also eingehalten wird. Zum anderen wird dieses Rekonstruktionsergebnis ohne konkretes Objektmodell bei vergleichsweise hoher Vollständigkeit trotz geringer Ansichtenanzahl erzielt.

<sup>4</sup>Visuelle Gegenüberstellung des Objektmodells aus CAD-Daten (siehe Abb. 5.13 a) und des Hüllkörpers aus ToF-Daten (siehe Abb. 6.1 b).

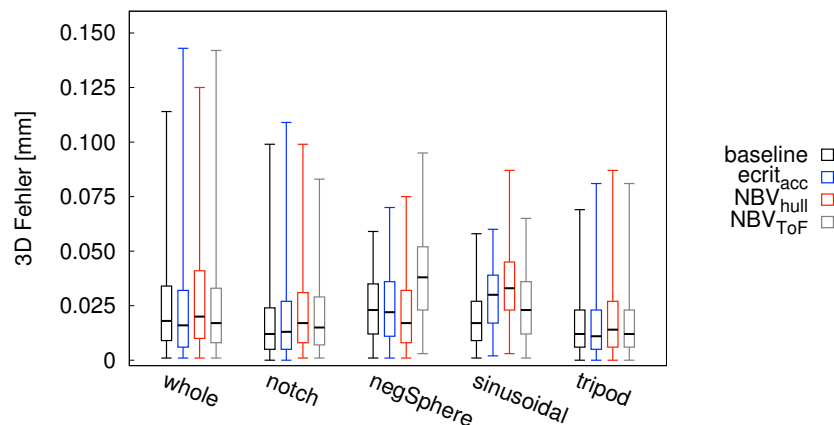


Abbildung 6.4: Vergleich des realisierten 3-D Fehlers ausgewählter modellgetriebener mit denen der kombinierten daten- und modellgetriebenen Planungsmethoden. Dargestellt ist der 3-D Fehler der einzelnen Objektdetails des NBV Testobjekte nach der jeweiligen maximalen Ansichtenanzahl. [Versuchsreihe „reduzierte Sensorauflösung / 33 % Kompensation“]

An der guten Ansichtenplanqualität von ‘NBV<sub>ToF</sub>’ von 0,96 sieht man, dass im vorliegenden Fall des NBV Testobjekts die vorgeschlagene Nutzung eines einzelnen ToF-Scans – trotz hoher Objektkomplexität – zu hoher Übereinstimmung von vorhergesagtem und realisiertem Rekonstruktionsergebnis führt. Bei ‘NBV<sub>hull</sub>’ deuten sowohl die Ansichtenplanqualität als auch die hohe mittlere Redundanz auf Unstimmigkeiten zwischen Objektmodell und -rekonstruktion hin. Dabei führt im Planungsverlauf hinzugewonnenes Wissen über das Messobjekt zum wiederholten Erfassen bereits gemessener Objektflächen, um erkannte Defekte zu beseitigen.

Abbildung 6.4 zeigt den Boxplot der 3-D Fehlerverteilung der verschiedenen Methoden nach ihrer jeweiligen maximalen Ansichtenanzahl. Dabei fallen zwei Besonderheiten besonders ins Auge: Bei ‘NBV<sub>hull</sub>’ ist zusätzlich zum schon erwähnten erhöhten Median 3-D Fehler der Interquartilabstand – die Spanne der 3-D Fehler – beim Gesamtobjekt vergleichsweise groß. Dies kann mit den erst vergleichsweise spät vorliegenden konkreten Modellinformationen erklärt werden.

Weiterhin ist bei ‘NBV<sub>ToF</sub>’ beim Objektdetail der negativen Halbkugel deutlich der Einfluss *irreführender* Modellinformation zu erkennen. Im ToF-Scan ist dieses Detail fehlerhaft als Ebene rekonstruiert. Die daraufhin zur Erstellung des Grobmodells geplanten Ansichten erfassen die negative Halbkugel fast in ihrer finalen Vollständigkeit. Da sie jedoch von einer Ebene ausgehen, wird die tatsächlich vorhandene Konkavität unter einem vergleichsweise schlechten Antastwinkel rekonstruiert. Da der Flächeninhalt der betroffenen Oberfläche in Relation zum Gesamtobjekt jedoch verhältnismäßig klein ist, kommt es im Planungsverlauf erst spät zu gezielt die Messunsicherheit reduzierenden Ansichten. Diese können den Median 3-D Fehler lediglich von 43  $\mu\text{m}$  auf 38  $\mu\text{m}$  senken.

In Zusammenfassung der Versuche der kombinierten daten- und modellgetriebenen Ansichtenplanung am NBV Testobjekt kann festgehalten werden, dass trotz komplexen Messobjektes und beschränktem C-Space eine gute 3-D Rekonstruktionsleistung erzielt werden kann. Dabei muss indes mit erhöhten 3-D Fehlern gerechnet werden, die jedoch – bezogen auf das Gesamtobjekt – unterhalb der angestrebten Fehlerschwelle liegen.

Beide vorgestellten Methoden übertreffen ‘baseline’ im gesamten Planungsverlauf klar in der erzielten

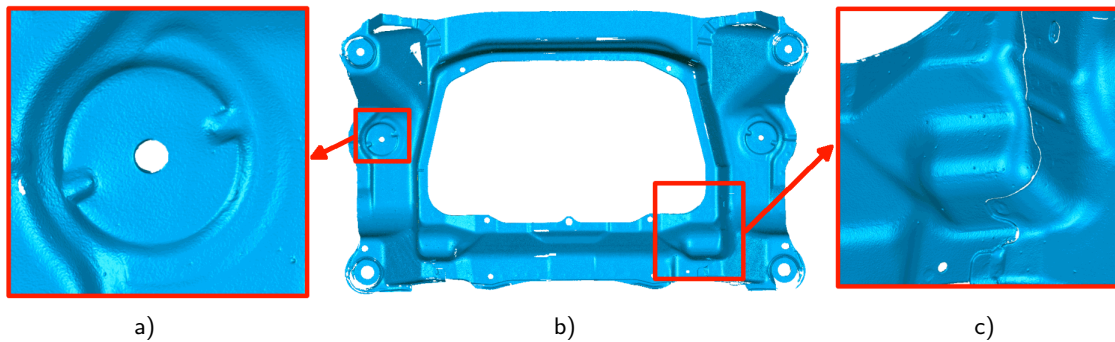


Abbildung 6.5: 3-D Rekonstruktion des Integralträgers durch die kombinierte daten- und modellgetriebene Ansichtenplanung nach 14 Ansichten ('NBV<sub>ToF</sub>', ca. 91 % Vollständigkeit): a) und c) Detailansichten, b) Frontalansicht des Integralträgers.

	Ansichten- planqualität	realisierte Vollständigkeit [%] nach $n$ Ansichten				mittlerer Punktabstand [ $\mu\text{m}$ ]	mittlere Redun- danz
		8	10	12	14		
baseline	0,97	85,7	89,0	90,4	91,0	175	1,7
adaptive	0,98	<b>86,5</b>	<b>90,0</b>	<b>91,1</b>	<b>92,0</b>	176	1,7
NBV <sub>ToF</sub>	1,02	84,4	86,7	88,6	91,1	176	1,5
expert	—	80,4	87,2	90,7	91,0	177	—

Tabelle 6.2: Ergebnisse des Leistungsvergleiches für die Versuchsreihe Integralträger. Bei 'NBV<sub>ToF</sub>' wurden die ersten acht Ansichten aufgrund des ToF-Scans geplant, die weiteren datengetrieben. [Messparameter: 10 % Kompensation des Posenfehlers, maximal 14 Ansichten]

Vollständigkeit, obwohl sie zu Beginn lediglich über einen Hüllkörper anstelle eines Objektmodells verfügen und insgesamt weniger Ansichten benötigen. Des Weiteren kann auch die oft zum Einsatz kommende Rekonstruktion auf Grundlage einer regelmäßigen Abtastung des Ansichtenraumes übertroffen werden, welche ebenfalls kein Objektwissen voraussetzt.

**Versuchsreihe „Integralträger“** Die 3-D Rekonstruktion dieses Objektes soll die Eignung der in Kapitel 5 und 6 vorgestellten Planungsmethoden zur automatischen Vermessung von – im Vergleich zum Sensorsefeld – großen Objekten demonstrieren. Nachdem dazu am NBV Testobjekt neben der erzielbaren Vollständigkeit der 3-D Fehler untersucht wurde, soll hier stattdessen näher auf die direkten und indirekten Kosten für Planung und Rekonstruktion eingegangen werden.

Die Planung zur Erfassung der Objektvorderseite wurde dabei mit 10 % Kompensation des Posenfehlers durchgeführt. Nach jeweils 14 Ansichten wurde die Planung beendet. Keine der Methoden erzielte beim Übergang von der 13. zur 14. Ansicht einen prognostizierten Zugewinn von mehr als 0,5 % Vollständigkeit. Tabelle 6.2 und Abbildung 6.6 fassen die Ergebnisse der 3-D Rekonstruktion zusammen.

Die Vermessung des Integralträgers stellt die verschiedenen Planungsmethoden vor keine großen Herausforderungen, da kaum Selbstverdeckungen auftreten. Weiterhin ist die zu erfassende Objektfläche hauptsächlich in Richtung des Objektmittelpunkts geneigt. Dadurch kommt es, trotz des durch Einschränkungen im C-Space verursachten geringen maximalen Antastwinkels (siehe Abschnitt 5.3.1), nicht zu größeren, prinzipiell nicht erfassbaren Objektbereichen. Infolgedessen liegt bei allen drei Planungsmethoden die Ansichtenplanqualität nahe 1. Aufgrund der starken Vereinfachung des zur Planung



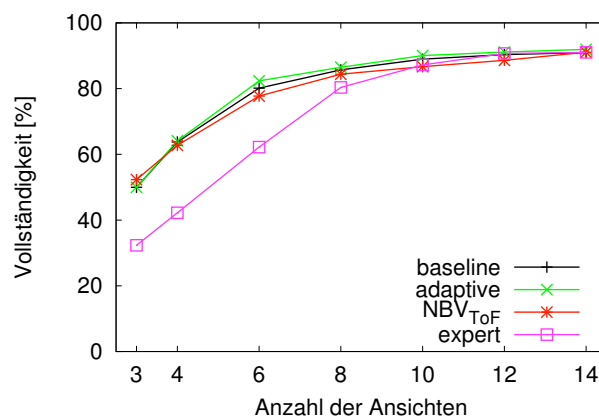


Abbildung 6.6: Vergleich der realisierten Vollständigkeits bei der 3-D Rekonstruktion des Integralträgers. [Messparameter: 10 % Kompensation des Posenfehlers]

genutzten Objektmodells auf ca. 400 bzw. ca 800 Dreiecke kommt es jedoch zu Differenzen zwischen den Oberflächeninhalten des Planungs- und CAD-Modells im einstelligen Prozentbereich.

Des Weiteren weicht die Objektoberfläche des Integralträgers von der bei der Streifenprojektion vorausgesetzten Lambert-Fläche ab: Die dunkle Oberfläche weist einen signifikanten Anteil gerichteter Reflexion auf. Kommt es in einer Ansicht infolge dessen an Objektbereichen zur Überschreitung des Dynamikumfangs mindestens einer der Kameras des Sensorkopfes, so können die betroffenen Areale in dieser Ansicht nicht rekonstruiert werden. Da die Reflexion nicht Teil des Planungsmodells ist und auch manuell nur schwer vermieden werden kann, konnte mit den vorgegebenen 14 Ansichten nicht die gesamte Objektoberfläche rekonstruiert werden. Aufgrund der vergleichsweise niedrigen mittleren Redundanz ist die Wahrscheinlichkeit der Erfassung der entsprechenden Objektbereiche durch alternative Ansichten relativ gering.

Erwartungsgemäß liegt die von den unterschiedlichen Methoden realisierte Vollständigkeit nach 14 Ansichten dicht beisammen. Der Zuwachs an Vollständigkeit flacht jedoch nach zehn Ansichten stark ab. Deshalb entspricht bei gleicher zu erreichender Vollständigkeit der Vorsprung von 'adaptive' gegenüber 'baseline' nominell einem um zwei Ansichten kürzeren Plan.

Mittels der kombinierten daten- und modellgetriebenen Ansichtenplanung 'NBV<sub>ToF</sub>' auf Grundlage eines aus einem ToF-Scan erzeugten Hüllkörpers (siehe Abb. 6.2 a) lassen sich nach 14 Ansichten mit 'baseline' und 'expert' vergleichbare Rekonstruktionsergebnisse erzielen. Dies ist insofern bemerkenswert, als dass aufgrund der niedrigen Auflösung des ToF-Sensors kaum Details des Objektes abgebildet werden.

Am Verlauf der Vollständigkeit von 'expert' im Planungsverlauf kann abgelesen werden, dass dem Menschen die vollständige Erfassung großer, unregelmäßiger Objekt ebenfalls gelingt. Aufgrund des dazu notwendigen, systematischen Vorgehens ist die resultierende Reihenfolge der Ansichten jedoch nicht optimal bezüglich der Vollständigkeit der ersten zehn Ansichten.

Tabelle 6.3 veranschaulicht sehr gut die typischen Rahmenbedingungen bei der 3-D Rekonstruktion größerer Messobjekte für die hochauflösende Inspektion. In der nativen Sensorauflösung wird die Oberfläche mit ca. 180  $\mu\text{m}$  mittlerem Punktabstand abgetastet. Die resultierende 3-D Rekonstruktion des Integralträgers kommt so auf ca. 30 Millionen Dreiecke und eine Dateigröße von mehr als 850 MB.

	Ansichten- planung [h:m]	3-D Messung <sup>b)</sup> [h:m]	Oberflächen- extraktion <sup>b)</sup> [h:m]	Gesamt- zeit [h:m]	3-D Rekonstruktion (Geomagic® *.wrp Datei)	
					Mio. Dreiecke	Größe [MB]
baseline	0:25 <sup>a)</sup>	0:16	0:42	1:23	29,0	849
adaptive	0:53 <sup>a)</sup>	0:17	0:44	1:54	29,1	850
NBV <sub>ToF</sub>	0:38 <sup>a)b)</sup>	0:30	0:54	2:02	30,9	903

Tabelle 6.3: Vergleich der Zeiten für Ansichtenplanung, 3-D Messung und Oberflächenextraktion, sowie resultierende Dreiecksanzahl und Dateigröße beim Integralträger. Verwendete Rechensysteme: a) Intel® Core™ 2 Quad, 2,4 GHz; b) Intel® Xeon™ X5450, 3 GHz.

Allein der Arbeitsschritt der Oberflächenextraktion, welcher aus den Punktdaten des 3-D Sensors die typischerweise zur Weiterverarbeitung vorausgesetzte dreiecksbasierte Oberfläche erzeugt, benötigt das 1,8- bis 2,6-fache der zur 3-D Messung erforderlichen Zeit.

Die Ansichtenplanung an sich beansprucht weniger als 50% der Gesamtzeit. Da auch bei diesem Messobjekt durch 'baseline' weniger tatsächlich durch den Sensor erreichbare Ansichtenkandidaten erzeugt werden, benötigt diese Methode mit 25 Minuten auch die kürzeste Planungszeit. Wie weiter oben bereits argumentiert wurde, ist der Preis dafür eine um ca. zwei Ansichten unvollständigere Rekonstruktion. Die Methoden 'adaptive' und 'NBV<sub>ToF</sub>' folgen beide mit ca. 30 Minuten Abstand bezogen auf die notwendige Zeit für Planung und Messung. Während bei 'adaptive' der Planungsanteil überwiegt und die Messdauer vergleichbar zu 'baseline' ist, fordert die iterative Planungsweise bei 'NBV<sub>ToF</sub>' mit dem dazu notwendigen Zyklus aus Planung / Datenaufnahme / Registrierung und Planungsmodellerstellung ihren Tribut bei der zur 3-D Messung notwendigen Zeit<sup>5</sup>.

In Zusammenfassung der Versuchsreihe „Integralträger“ kann festgehalten werden, dass alle drei untersuchten Planungsmethoden an großen Objekten niedrigerer Oberflächenkomplexität vergleichbare Ergebnisse zu erfahrenen menschlichen Bedienern erzielen. Das mit Bezug auf die Vollständigkeit beste Resultat erzielt auch hier die in Abschnitt 5.1.2 vorgestellte Methode 'adaptive'.

Die in der gegenwärtigen, nicht optimierten Implementierung zur Planung benötigte Zeit beansprucht im ungünstigsten Fall weniger als 50% der gesamten zur Rekonstruktion benötigten Zeit. Wie in Abschnitt 5.3.1 schon aufgeführt, kann diese Zeit durch Implementierung in C/C++ und Parallelisierung weiter drastisch verkürzt werden. Damit würde die Ansichtenplanung im Verhältnis zu den direkten und indirekten Kosten nur noch eine untergeordnete Rolle spielen.

Die mittels der in Abschnitt 6.2 vorgestellten kombinierten daten- und modellgetriebenen Planungsmethode erzielbare Vollständigkeit ist vergleichbar zu 'baseline' gemäß Scotts Ansatz [69]. Im Gegensatz zu diesem wird jedoch auf kein detailliertes Objektmodell, sondern auf einen Hüllkörper mit lediglich 400 Dreiecken aus einem einzelnen  $64 \times 48$  Pixel ToF-Scan zurückgegriffen.

**Versuchsreihe „Spielzeugelefant“** Anhand dieses Messobjektes soll die Anwendbarkeit der verschiedenen Planungsmethoden zur Rundumvermessung von Objekten untersucht werden, von denen kein 3-D Modell vorliegt. Zu Referenzzwecken wurde dazu für die modellbasierten Verfahren manuell aufwendig ein vollständiges Modell mit 668 Dreiecken erzeugt (siehe Abb. 5.13 c und Absatz „Verwendete Versuchsobjekte“ in Abschnitt 5.3.1). Im Gegensatz dazu kam bei der Methode 'NBV<sub>hull</sub>' wiederum als Hüllkörper lediglich eine grob an Objektlage und -größe angepasste Kugel zur Anwendung (siehe Abb. 6.2 b).

<sup>5</sup>Dabei wurden bei der hüllkörperbasierten Methode die Zeiten zur Planung und Planungsmodellerstellung mit zur Ansichtenplanung gezählt, während Datenaufnahme und Registrierung der 3-D Messung zugerechnet wurden.

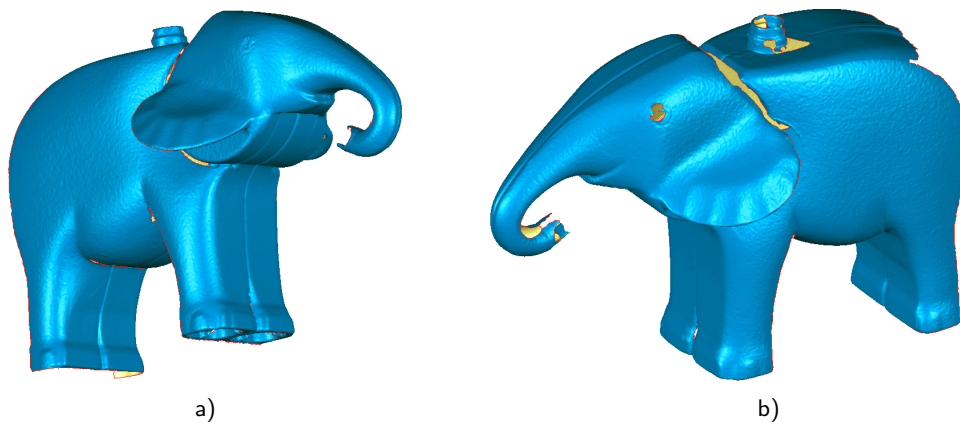


Abbildung 6.7: 3-D Rekonstruktion des Spielzeugelefanten (siehe auch Abb. 1.2) durch die kombinierte daten- und modellgetriebene Ansichtenplanung nach acht Ansichten ('NBV<sub>hull</sub>', ca. 76 % Vollständigkeit): a) Ansicht von links vorn unten, b) Ansicht von rechts vorn oben. Verbliebene Löcher in der Objektoberfläche wurden rot umrandet.

	Ansichten- planqualität	realisierte Vollständigkeit [%] nach $n$ Ansichten			Ansichten- Anzahl total	mittlerer Punktabstand [ $\mu\text{m}$ ]	mittlere Redun- danz
		4	8	total			
baseline	0,97	71,0	76,3	77,9	12	167	3,6
adaptive	0,97	<b>73,9</b>	<b>78,2</b>	<b>79,4</b>	12	166	3,5
NBV <sub>hull</sub>	1,02	71,2	76,2	76,2	<b>8</b>	167	2,6
expert	—	72,1	76,2	76,2	<b>8</b>	166	—

Tabelle 6.4: Ergebnisse des Leistungsvergleiches für die Versuchsreihe Spielzeugelefant. Bei 'NBV<sub>hull</sub>' wurden die ersten drei Ansichten aufgrund des Hüllkörpers geplant, die weiteren datengetrieben. [Messparameter: 10 % Kompensation des Posenfehlers, maximal zwölf Ansichten]

Tabelle 6.4 und Abb. 6.8 geben die Ergebnisse wieder. Anders als beim NBV Testobjekt und beim Integralträger bezieht sich hier die erzielte Vollständigkeit nicht auf die bei gegebenem C-Space erfassbare, sondern auf die *gesamte* Objektoberfläche. Bestimmte Bereiche, wie z. B. an den Rückseiten der Vorderbeine sowie am Hinterteil des Elefanten, können aufgrund der Einschränkungen im C-Space nicht erfasst werden. Trotzdem kann die Rekonstruktion von mehr als  $3/4$  der gesamten Oberfläche als Beispiel zur Rundumvermessung dienen.

Maximal zwölf Ansichten mit 10 % Kompensation des Posenfehlers wurden geplant. Sowohl 'baseline' als auch 'adaptive' erzielten dabei von der elften zur zwölften Ansicht weniger als 0,5 % Zugewinn bezüglich der prognostizierten Vollständigkeit. Nach acht Ansichten und keinen verbleibenden offensichtlichen „Löchern“ in der Rekonstruktion, welche durch weitere Aufnahmen gezielt zu schließen wären, hatte der menschliche Bediener in 'expert' sein vorgegebenes 2 h Limit erreicht. Der prognostizierte Zuwachs an Vollständigkeit bei 'NBV<sub>hull</sub>' konnte ebenfalls nach acht Ansichten keine Fortsetzung des Rekonstruktionszyklus rechtfertigen.

Die Kurve der realisierten Vollständigkeit der verschiedenen Methoden flacht auch bei diesem Objekt im Laufe des Planungsverlaufes stark ab. Die Vollständigkeit, welche 'adaptive' mit acht Ansichten erreicht, kann im Falle von 'baseline' auch durch weitere vier Ansichten nicht ganz erreicht werden. Daran ist erkennbar, dass die Vorteile der in Abschnitt 5.1.2 vorgestellten Anpassungen an komplexe Messobjekte bei beschränktem C-Space auch bei nicht synthetischen Messobjekten zum Tragen kommen.

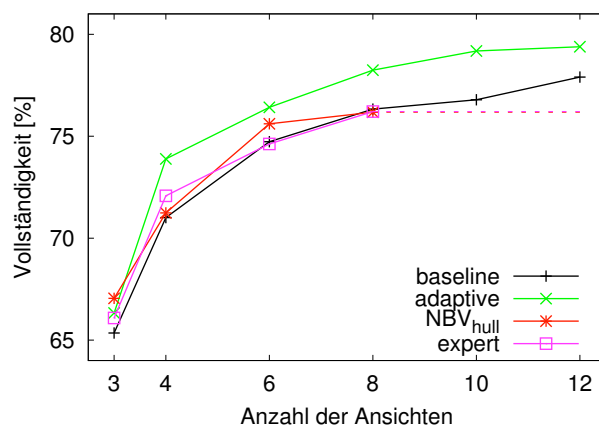


Abbildung 6.8: Vergleich der realisierten Vollständigkeits bei der 3-D Rekonstruktion des Spielzeugelefanten. [Messparameter: 10 % Kompensation des Posenfehlers]

Die vergleichsweise hohe mittlere Redundanz deutet eine höhere Komplexität des Elefanten an. Die Rekonstruktion verdeckter und schwer zugänglicher Bereiche erfordert eine wiederholte Erfassung bereits vermessener Objektregionen. Die hohe Übereinstimmung von vorhergesagter und tatsächlich rekonstruierter Oberfläche, welche auch bei diesem Objekt auf ein der Messaufgabe angemessen genaues Sensormodell schließen lässt, kann anhand der Ansichtenplanqualität nahe 1 gezeigt werden.

Zur Grobmodellerstellung wurden bei 'NBV<sub>hull</sub>' lediglich drei Ansichten benötigt, deren prognostizierte Vollständigkeit in Summe bei ca. 86 % der Oberfläche der als Hüllkörper verwendeten Kugel lag (siehe Abb. 6.9 a). Diese drei Ansichten allein realisierten schon ca. 67 % der Vollständigkeit des Spielzeugelefanten (Abb. 6.9 b). Die weiteren fünf iterativ geplanten Ansichten erzielen nach insgesamt acht Ansichten eine sowohl zu 'baseline' als auch zu 'expert' vergleichbare Vollständigkeit. Abbildungen 6.9 c und d illustrieren sowohl die Vervollständigung des Modells, erkennbar z. B. im Rückenbereich des Elefanten, als auch die zunehmene Erreichung der geforderten Messunsicherheit, erkennbar an der Weißfärbung großer Oberflächenbereiche. Um datengetrieben weitere Ansichten effektiv planen zu können, müssen weiterführende Ansätze aus dem Absatz „Planfinalisierung“ des Abschnittes 23 eingesetzt werden.

Aus der Perspektive der eigentlichen Aufgabenstellung – der Rekonstruktion eines *unbekannten* Objektes – betrachtet, erzielt 'NBV<sub>hull</sub>' jedoch ein sehr gutes Ergebnis. Beide besseren Methoden ('baseline' und 'adaptive') basieren auf einem im Vorfeld aufwendig manuell erstellten Objektmodell. Dieses stünde aber per Definition bei einem unbekanntem Objekt vorab nicht zur Verfügung. Somit sind die beiden modellbasierten Ergebnisse nach zwölf Ansichten als Vergleichswerte zu interpretieren, welchen Zusatznutzen detaillierte Modellinformation in den Planungsprozess einbringen kann.

Tabelle 6.5 illustriert die Rahmenbedingungen des 3-D Rekonstruktionsprozesses. Die vollständigste Objektrekonstruktion benötigt lediglich ca. 1,7 Millionen Dreiecke bei einer Dateigröße von 48 MB. Aufgrund der kleinen Objektmaße hat die Oberflächenextraktion, die beim Integralträger einen Hauptanteil der Gesamtzeit beansprucht, nur einen geringen Beitrag an der gesamten Rekonstruktionszeit. Bezogen auf die Gesamtzeit ist auch hier 'baseline' die schnellste Methode, erreicht allerdings mit zwölf Ansichten eine geringere Vollständigkeit als 'adaptive' mit acht.

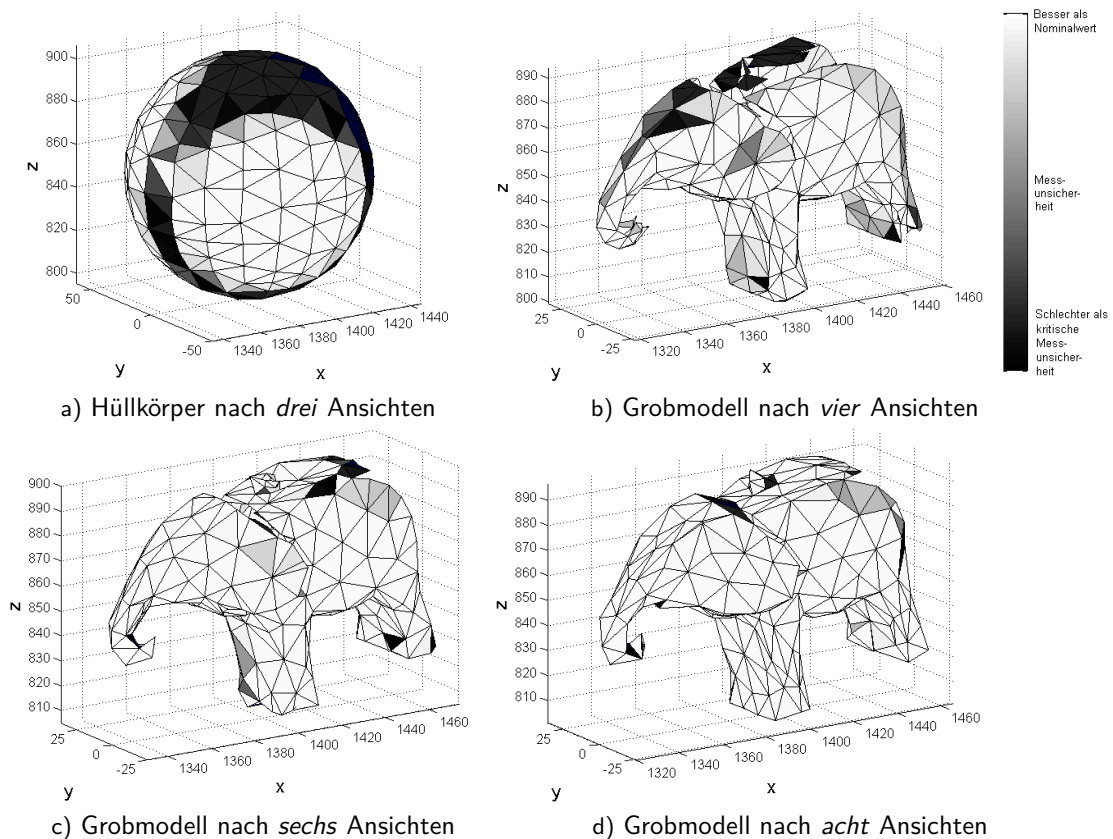


Abbildung 6.9: Bewertung der Unsicherheitsschätzung im Planungsverlauf für 'NBV<sub>hull</sub>' anhand des aktuellen Objektmodells des Spielzeugelefanten: Abb. a) zeigt die Bewertung des Hüllkörpers nach drei Ansichten und Abb. b) das aus diesen Ansichten erzeugte, iterativ vervollständigte Grobmodell (ca. 450 Dreiecke) mit der prognostizierten Bewertung der geplanten vierten, c) sechsten und d) achten Ansicht.

Aufgrund der höheren Dreiecksanzahl des für die beiden modellbasierten Methoden genutzten Modells sind die zur Planung benötigten Zeiten im Vergleich zum NBV Testobjekt (siehe Tab. 5.4) länger. Hier wird der starke Einfluss der Zeitkomplexität von  $\mathcal{O}(|S|^2|V|)$  bei der Berechnung der Messbarkeitsmatrix deutlich (siehe Abschnitt 5.1.1).

Da bei 'NBV<sub>hull</sub>' nur ca. 450 Dreiecke als aktuelles Objektmodell genutzt und lediglich acht Ansichten bestimmt werden, benötigt diese Methode weniger Zeit zur Planung sowie zur 3-D Messung im Vergleich zu 'adaptive'.

Interessant ist der Vergleich der Planungszeit von 'baseline' zu Scotts Angabe in [69] zum bekannten „Stanford-Bunny“ Testobjekt [88]. Dieses ist von der Komplexität ungefähr mit dem Spielzeugelefanten vergleichbar. Auch nutzt Scott eine ähnliche Dreiecksanzahl von ca. 700. Dort wird zur Planung mittels eines Intel® Pentium® 4 mit 2,6 GHz eine Zeit von ca. 28 min benötigt. Da in beiden Implementationen die Lösung des Ansichtenplanungsproblems in weiten Teilen sequentiell erfolgt, können beide Umsetzungen als in ihrer Laufzeit vergleichbar betrachtet werden.

**Zusammenfassung der Versuche zur kombinierten daten- und modellgetriebenen Ansichtenplanung** In diesem Kapitel konnte anhand dreier, für verschiedene Anwendungsszenarien typische Messobjekte die Eignung der vorgestellten kombinierten Planungsmethode zur 3-D Rekonstruktion

	Ansichten- planung [h:m]	3-D Messung <sup>b)</sup> [h:m]	Oberflächen- extraktion <sup>b)</sup> [h:m]	Gesamt- zeit [h:m]	3-D Rekonstruktion (Geomagic® *.wrp Datei)	
					Mio. Dreiecke	Größe [MB]
baseline	<b>0:23<sup>a)</sup></b>	0:12	0:02	<b>0:37</b>	1,6	47
adaptive	1:20 <sup>a)</sup>	0:12	0:02	1:34	1,7	48
NBV <sub>hull</sub>	1:05 <sup>a)b)</sup>	<b>0:11</b>	0:02	1:18	1,5	44

Tabelle 6.5: Vergleich der Zeiten für Ansichtenplanung, 3-D Messung und Oberflächenextraktion, sowie resultierende Dreiecksanzahl und Dateigröße beim Spielzeugelefanten. Verwendete Rechensysteme: a) Intel® Core™ 2 Quad, 2,4 GHz; b) Intel® Xeon™ X5450, 3 GHz.

unbekannter Objekte gezeigt werden. Hierfür wurde eine Strategie aus der datengetriebenen volumetrischen Ansichtenplanung – die Minimierung unbekanntes Messvolumens durch weitere Ansichten im Planungsverlauf – geeignet auf den mengentheoretischen Planungsansatz übertragen. Ein sog. Hüllkörper repräsentiert dazu die Oberfläche des zu erfassenden Messvolumens.

Durch geeignete manuelle Wahl einer passenden Hüllkörpergeometrie – exemplarisch wurde der Einsatz an das Messobjekt angepasster Kugeln untersucht – konnten Rekonstruktionsergebnisse erzielt werden, die vergleichbar zur manuellen Rekonstruktion waren. In einigen Fällen konnten auch einzelne modellgetriebene Verfahren erreicht oder übertroffen werden.

Auch weitergehende Objektinformationen, wie die einer einzelnen, niedrig aufgelösten ToF-Messung vergleichsweise hoher Messunsicherheit, konnten erfolgreich als Hüllkörper genutzt werden. Diese Art der Hüllkörpererstellung eignet sich besonders für Objekte, welche ausschließlich aus einem Halbraum erfasst werden müssen.

Dieser Arbeit vorausgehende Untersuchungen zur Nutzung von Grobmodellen [51] und ToF 3-D Daten [55] zur datengetriebenen Ansichtenplanung erzielten weniger überzeugende Ergebnisse als die hier vorgestellten. Als Hauptursache dafür kann der Grundansatz identifiziert werden, die vorhandenen groben Modelldaten iterativ mit den jeweils aktuell aufgenommenen Messdaten zu überschreiben.

Weiterhin kam es bei der Anwendung der volumetrischen datengetriebenen Planung [53] aufgrund unvollständiger Sensormodelle, hoher Messunsicherheit bei den ToF-Messungen und der gegebenen Sensorposenunsicherheit zu Fusionsfehlern und zu unvollständiger Nutzung der vorhandenen Grobmodellinformationen. Im Vergleich dazu nutzt der in diesem Absatz vorgestellte Ansatz zuerst alle verfügbare Information des Hüllkörpers. Des Weiteren wird die Fusion nach jeder neu akquirierten Ansicht nicht lediglich für die letzte, sondern für alle bisherigen Ansichten durchgeführt, was zu wesentlich konsistenteren aktuellen Modellinformationen führt.

# Kapitel 7

## Zusammenfassung und Ausblick

In dieser Arbeit wurden Methoden zur Planung von Ansichten zur Rekonstruktion von 3-D Objekten vorgestellt. Das Problem der Bestimmung geeigneter Sensorparameter, um ein Objekt hochgenau und vollständig mit wenigen Ansichten zu vermessen, wird dabei Ansichtenplanungsproblem genannt. Dessen Lösung ist wichtiger Kernbestandteil in der dreidimensionalen Objektrekonstruktion und -inspektion.

Dabei kann in daten- und modellbasierte Ansichtenplanung unterschieden werden. Datenbasierte Ansätze können dazu auf keine oder nur sehr begrenzte Objektinformationen zurückgreifen. Deshalb müssen sie zur Laufzeit der 3-D Messung ein Objektmodell erstellen, um noch fehlende oder mit hoher Unsicherheit gemessene Objektbereiche zu identifizieren und im Anschluss zu erfassen.

Im Gegensatz dazu können modellbasierte Methoden zur Planung der Ansichten auf ein detailliertes Modell des zu erfassenden Objektes zurückgreifen. Die Nutzung dieses Vorwissens versetzt sie oftmals in die Lage, eine geringere Ansichtenanzahl, eine höhere Vollständigkeit und / oder eine geringere Messunsicherheit als mittels datengetriebener Verfahren zu erreichen. Nicht immer steht jedoch ein geeignetes Objektmodell zur Verfügung.

Der zur Ansichtenplanung notwendige Rechenaufwand rechtfertigt deren Einsatz einerseits in Anwendungsfällen, bei denen ein berechneter Messplan wiederholt ausgeführt wird. Dies ist z. B. in der Qualitätskontrolle, bei der viele gleichartige Objekte erfasst und überprüft werden, der Fall. Andererseits erfüllen mit vergleichbarem Zeitaufwand durch menschliche Bediener oder durch Standardverfahren (z. B. gleichmäßige Abtastung) erstellte Ansichtenpläne bei der hochgenauen Vermessung komplexer Objekte bei beschränktem Konfigurationsraum oft nicht die gestellten Anforderungen an Vollständigkeit und Messunsicherheit.

### Zusammenfassung

Im Folgenden sollen die wichtigsten Beiträge dieser Arbeit kurz zusammengefasst werden. In Kapitel 3 wurde der aktuelle Stand der Technik sowohl für die daten- als auch die modellgetriebenen Verfahren präsentiert. Dabei wurden zwei Hauptdefizite identifiziert: Eine fehlende quantitative Vergleichsmethodik und die fehlende direkte Einbeziehung der Messunsicherheit in den Planungsprozess.

In Anbetracht des ersten Defizits wurde in Abschnitt 4.4 eine *Methodik zur aussagekräftigen Charakterisierung von 3-D Rekonstruktionsergebnissen* im Kontext der Ansichtenplanung entwickelt. Durch Angabe der benötigten Ansichtenanzahl sowie der realisierten Vollständigkeit, des Median

3-D Fehlers und des Punktabstandes können die Ergebnisse verschiedener Planungsverfahren bei der Rekonstruktion des gleichen Objektes und Verwendung des gleichen 3-D Sensors objektiv verglichen werden. Zwischen verschiedenen 3-D Sensoren mit unterschiedlichen Parametern kann zumindest ein erster Vergleich durchgeführt werden.

Zur realitätsnahen Bewertung der verschiedenen Planungsmethoden wurde ein komplexer, aus mehreren herausfordernden Einzeldetails bestehender *Prüfkörper für die Ansichtenplanung* entwickelt („NBV Testobjekt“). Im Gegensatz zu verschiedenen in der Literatur zum Einsatz kommenden Testobjekten ermöglicht er die Untersuchung vieler für Inspektion und 3-D Rekonstruktion relevanter Aspekte, wie Selbstverdeckungen, Konkavitäten und verschiedene Oberflächencharakteristiken innerhalb eines Messobjekts.

Die Ansichtenplanung selbst basiert auf dem modellgetriebenen, mengentheoretischen Planungsansatz von Scott [69]. Dessen Eignung zur *Vermessung komplexer Messobjekte* durch bistatische Streifenprojektionssensoren *bei eingeschränktem Konfigurationsraum* wurde verbessert, indem optimale, jedoch unrealisierbare Ansichtenkandidaten durch realisierbare Alternativen ersetzt werden (Abschnitt 5.1.2). Überprüft werden dazu die Verletzung der Messbarkeit des Zielobjektelements z. B. durch Verdeckung sowie die Inklusion des Kandidaten im spezifizierten Konfigurationsraum. Die durchgeführten Experimente zeigen, dass dadurch sowohl im Vergleich zu [69] als auch zu regelmäßiger, manueller und zufälliger Positionierung eine höhere Vollständigkeit erzielt wird bzw. weniger Ansichten benötigt werden.

Zur direkten Einbeziehung der Messunsicherheit in den Planungsprozess wurden die während der Messung veränderlichen und für die 3-D Rekonstruktion mittels Streifenprojektion maßgeblich relevanten Parameter (Antastwinkel, Messabstand, Modulation) in Abschnitt 4.2 untersucht. Darauf aufbauend wurde ein *Modell zur Schätzung der zu erwartenden Messunsicherheit* entwickelt (Abschnitt 5.2.1).

Dieses ermöglicht die *Berechnung von Ansichtenkandidaten zur Minimierung der aktuellen Unsicherheitsschätzung*. Dazu wird das sog. erweiterte *E*-Kriterium angewandt, welches Betrag und Richtung des größten Eigenwertes der Kovarianzschätzung eines Oberflächenelementes analysiert.

Ein entsprechender iterativer Planungsansatz wird in Abschnitt 5.2.2 definiert. Durch Spezifikation der zu erreichenden Vollständigkeit und mittleren Messunsicherheit kann er anforderungsorientiert Pläne mit minimaler Ansichtenanzahl bei Einhaltung der Spezifikation erstellen. Im Rahmen des entwickelten Leistungsvergleiches am Beispiel des NBV Testobjekts konnten niedrigere Median 3-D Fehler bei gleichzeitig höherer Vollständigkeit und niedrigerer Ansichtenanzahl im Vergleich zu [69] erreicht werden.

In Kapitel 6 wurde ein *kombinierter daten- und modellgetriebener Ansichtenplanungsansatz* formuliert. Er beruht auf dem gleichen mengentheoretischen Grundansatz, nutzt jedoch in Ermangelung eines detaillierten Objektmodells ein Objektplatzhalter: Den sog. *Hüllkörper*. Ausschließlich auf dem Hüllkörper basierend wird in der ersten Phase nun effizient ein Grobmodell des Messobjektes erstellt. Dieses wird in der folgenden Phase iterativ mit dem Planungsansatz basierend auf dem erweiterten *E*-Kriterium vervollständigt und verbessert. Bei allen untersuchten Objekten konnte mit dem kombinierten Ansatz eine zur modellgetriebenen Planung vergleichbare Vollständigkeit erzielt werden.

Wie in der Diskussion des aktuellen Standes der Technik in Abschnitt 3.3 gefordert, wurden in einem umfangreichen Experimententeil die im Rahmen dieser Arbeit entwickelten Planungsansätze detailliert quantitativ anhand der vorgeschlagenen Bewertungsmethodik analysiert. Dabei wurden neben dem NBV Testobjekt noch zwei für Inspektion und 3-D Objektrekonstruktion typische Körper untersucht: „Integralträger“ und „Spielzeugelefant“. Insgesamt wurden mehr als sieben Ansichtenplanungsmethoden,



---

inklusive dem Stand der Technik bei der mengentheoretischen Ansichtenplanung [69] und Planung durch menschliche Bediener miteinander verglichen.

## Ausblick

Abschließend sollen einige Felder möglicher Weiterentwicklungen der gezeigten Planungsansätze angesprochen werden. Um eine grundsätzliche Erweiterung des Konfigurationsraumes zu erreichen, kann eine Möglichkeit zur Rotation des Messobjektes („Drehtisch“) in das Messsystem integriert werden. Während die Einbindung in das Planungssystem keine Probleme erwarten lässt, muss zur Registrierung der Ansichten eine mechanische oder algorithmische Lösung entwickelt werden. Der mechanische Ansatz über eine weitere, hochgradig stabil mit dem Drehtisch verbundene Verknüpfungskamera ermöglicht weiterhin die Nutzung der Selbstkalibrierung unter Nutzung der Technik der „virtuellen Passmarken“ (siehe Abschnitt 2.1.2). Der algorithmische Ansatz würde einen die Messung abschließenden globalen Registrierschritt der konventionell fusionierten Teilansichten der verschiedenen Drehtischpositionen erfordern.

Bei Experimenten mit Objekten, deren Oberfläche die Annahme einer Lambert-Fläche massiv verletzte, konnte beobachtet werden, wie es an einigen Bereichen zu Messausfällen infolge von Übersteuerung in den Sensoren kommt. Durch Integration eines einfachen Reflexionsmodells (z. B. Phong Reflexionsmodell [56]) und der Einbeziehung des Streifenprojektors in die Planung („tristatisches Sensormodell“) können derartige Ausfälle vermieden werden.

Vor dem industriellen Einsatz der beschriebenen Verfahren sollten die jeweiligen Algorithmen in eine optimierte Implementierung überführt werden (z. B. C/C++). Im Verbund mit der Parallelisierung der Berechnung der Messbarkeitsmatrix kann so eine Beschleunigung um den Faktor zehn auf aktuellen Rechnern mit acht logischen Kernen erwartet werden.

Mit der immer stärkeren Verfügbarkeit handgeführter 3-D Sensoren (z. B. Munkelt et al. [52]) ergibt sich als besondere Herausforderung die Planung der vollständigen Vermessung unbekannter Objekte. Gelingt es, die Ansichtenplanung für diesen speziellen Einsatzzweck schnell und robust genug zu gestalten, so könnten in Verbindung mit einer geeigneten Selbstlokalisierung, Benutzerführung und Registrierung auch größere und komplexere Objekte effizient vermessen werden. Damit stünde einer breiteren Anwendung dieser Technik in Archäologie und Medizin nichts mehr entgegen.



# Literaturverzeichnis

- [1] International Organization for Standardization (ISO): *ISO/IEC 14772-1:1997 "The Virtual Reality Modeling Language (VRML)"*. <http://www.web3d.org/x3d/specifications/vrml/ISO-IEC-14772-VRML97/>, 1997
- [2] *Metro*. <http://vcg.sourceforge.net/index.php/Metro>, Mai 2007. – Version 4.07
- [3] *PMD [vision]<sup>®</sup> O3*. [http://www.pmdtec.com/fileadmin/pmdtec/downloads/documentation/datasheet\\_o3\\_v0100.pdf](http://www.pmdtec.com/fileadmin/pmdtec/downloads/documentation/datasheet_o3_v0100.pdf), 2008. – PMD Technologies
- [4] *Geomagic Studio*. <http://www.geomagic.com/studio/>, 2010. – Version 12
- [5] ABIDI, B. R. ; ARAGAM, N. R. ; YAO, Y. ; ABIDI, M. A.: Survey and analysis of multimodal sensor planning and integration for wide area surveillance. In: *ACM Comput. Surv.* 41 (2008), Nr. 1, S. 1–36. – DOI 10.1145/1456650.1456657
- [6] ALEXANDER, J.: Loxodromes: A Rhumb Way to Go. In: *Mathematics Magazine* 77 (2004), Dezember, Nr. 5, 349–356. <http://www.cwru.edu/artsci/math/alexander/mathmag349-356.pdf>
- [7] BANTA, J. E. ; ABIDI, M. A.: Autonomous placement of a range sensor for acquisition of optimal 3-D models. In: *22nd IEEE International Conference on Industrial Electronics, Control, and Instrumentation* Bd. 3, 1996, S. 1583–1588
- [8] BANTA, J. E. ; WONG, L. M. ; DUMONT, C. ; ABIDI, M. A.: A Next-Best-View System for Autonomous 3-D Object Reconstruction. In: *IEEE Trans. Systems, Man and Cybernetics* 30 (2000), September, Nr. 5, S. 589–597
- [9] BANTA, J. E. ; ZHIEN, Yu ; WANG, X. Z. ; ZHANG, G. ; SMITH, M. T. ; ABIDI, M. A.: A "Best-Next-View" algorithm for three-dimensional scene reconstruction using range images. In: CASASANT, D. P. (Hrsg.): *Intelligent Robots and Computer Vision XIV: Algorithms, Techniques, Active Vision, and Materials Handling* Bd. 2588, SPIE, Oktober 1995, S. 418–429
- [10] BERNHARD, A. ; VÉRON, M.: Visibility Theory Applied to Automatic Control of 3D Complex Parts Using Plane Laser Sensors. In: *CIRP Annals - Manufacturing Technology* 49 (2000), Nr. 1, S. 113 – 118
- [11] BESL, P. J. ; MCKAY, N. D.: A Method for Registration of 3-D Shapes. In: *IEEE Trans. Pattern Anal. Mach. Intell.* 14 (1992), Nr. 2, S. 239–256. – DOI <http://dx.doi.org/10.1109/34.121791>

- [12] BOWYER, K. W. ; DYER, C. R.: Aspect Graphs: An Introduction and Survey of Recent Results. In: *International Journal of Imaging Systems and Technology* 2 (1990), Nr. 4, S. 315–328. – DOI 10.1002/ima.1850020407
- [13] CHEN, F. ; BROWN, G. M. ; SONG, M.: Overview of three-dimensional shape measurement using optical methods. In: *Opt. Eng.* 39 (2000), Januar, Nr. 1, S. 10–22
- [14] CHEN, S. Y. ; LI, Y. F. ; ZHANG, J. W. ; WANG, W. L.: *Active Sensor Planning for Multiview Vision Tasks*. Springer-Verlag, 2008
- [15] CHRISTOFIDES, N.: Worst-case analysis of a new heuristic for the travelling salesman problem / Carnegie Mellon University. 1976 (338). – Forschungsbericht
- [16] CIGNONI, P. ; ROCCHINI, C. ; SCOPIGNO, R.: Metro: measuring error on simplified surfaces. In: *Computer Graphics Forum* 17 (1998), Juni, Nr. 2, S. 167–174
- [17] CONNOLLY, C.: The determination of next best views. In: *Robotics and Automation. Proceedings. 1985 IEEE International Conference on* Bd. 2, 1985, S. 432 – 435
- [18] CORMEN, T. H. ; LEISERSON, C. E. ; RIVEST, R. L. ; STEIN, C.: *Introduction to Algorithms*. Second Edition. 2001
- [19] *Kapitel* Temporal Phase Measurement Methods. In: CREATH, K.: *Interferogram Analysis – Digital Fringe Pattern Measurement Techniques*. Institute of Physics Publishing, 1993, S. 94–140
- [20] CURLESS, B. ; LEVOY, M.: A Volumetric Method for Building Complex Models from Range Images. In: *Proceedings of SIGGRAPH '96*, ACM Press, 1996, S. 303–312
- [21] DENZLER, J. ; BROWN, C. M.: Information theoretic sensor data selection for active object recognition and state estimation. In: *Pattern Analysis and Machine Intelligence, IEEE Transactions on* 24 (2002), Februar, Nr. 2, S. 145–157. – DOI 10.1109/34.982896
- [22] E. KRUCK, Geoinformatics & Photogrammetric Engineering: *Bingo – Bündelausgleichung für Ingenieurobjekte*. <http://www.gip-aalen.de>, 2009. – Version 5.5
- [23] EDELSBRUNNER, H. ; MUCKE, E. P.: Three-dimensional alpha shapes. In: *ACM Trans. Graphics* 13 (1994), Nr. 1, S. 43–72
- [24] FANUC ROBOTICS: *Fanuc Roboter M-16iB/20 Mechanische Einheit – Wartungshandbuch*. 2004
- [25] FRAUNHOFER IOF JENA: *kolibri ROBOT – Robotergeführtes optisches 3D-Messsystem*. [http://www.iof.fraunhofer.de/departments/optical-systems/\\_media/KOLIBRI\\_ROBOT\\_05\\_2007\\_D.pdf](http://www.iof.fraunhofer.de/departments/optical-systems/_media/KOLIBRI_ROBOT_05_2007_D.pdf), 2007
- [26] HALL-HOLT, O.: *Scrutinizing Real-World Geometry: the Next Best View*. <http://www-graphics.stanford.edu/~olaf/nbv.html>. Version: 1996
- [27] HARTLEY, R. ; ZISSERMAN, A.: *Multiple View Geometry in Computer Vision*. Second Edition. Cambridge University Press, 2003

- [28] HE, B. W. ; LONG, Z. X. ; LI, Y. F.: The research of an automatic object reconstruction method based on limit visible region of the laser-scanning vision system. In: *Robotics and Computer-Integrated Manufacturing* (2010). – DOI 10.1016/j.rcim.2010.03.011. – ISSN 0736–5845
- [29] HECKBERT, P. S. ; GARLAND, M.: Survey of Polygonal Surface Simplification Algorithms / Carnegie Mellon University. 1995. – Forschungsbericht
- [30] IULIANO, L. ; MINETOLA, P. ; SALMI, A.: Proposal of an innovative benchmark for comparison of the performance of contactless digitizers. In: *Measurement Science and Technology* 21 (2010), August, S. 105102/1–105102/13. – DOI 10.1088/0957–0233/21/10/105102
- [31] KARP, R.: Reducibility Among Combinatorial Problems. In: MILLER, R. (Hrsg.) ; THATCHER, J. (Hrsg.): *Complexity of Computer Computations*. Plenum Press, 1972, S. 85–103
- [32] KÜHMSTEDT, P.: *Untersuchungen zur Messunsicherheit bei 3D-Formmessverfahren mit strukturierter Beleuchtung*, Ernst-Moritz-Arndt-Universität Greifswald, Diss., April 2003
- [33] KÜHMSTEDT, P. ; HEINZE, M. ; HIMMELREICH, M. ; BRÄUER-BURCHARDT, C. ; BRAKHAGE, P. ; NOTNI, G.: Optical 3D sensor for large objects in industrial application. In: OSTEN, W. (Hrsg.) ; GORECKI, C. (Hrsg.) ; NOVAK, E. L. (Hrsg.): *Optical Measurement Systems for Industrial Inspection IV* Bd. 5856, SPIE, 2005, S. 118–127
- [34] KÜHMSTEDT, P. ; MUNKELT, C. ; HEINZE, M. ; BRÄUER-BURCHARDT, C. ; NOTNI, G.: 3D shape measurement with phase correlation based fringe projection. In: OSTEN, W. (Hrsg.) ; GORECKI, C. (Hrsg.) ; NOVAK, E. L. (Hrsg.): *Optical Measurement Systems for Industrial Inspection V* Bd. 6616, SPIE, Juni 2007, S. 66160B
- [35] *Kapitel* Optische 3-D-Messtechnik: Mehrbild 3-D-Messsysteme. In: KÜHMSTEDT, P. ; NOTNI, G.: *Handbuch zur Industriellen Bildverarbeitung*. Fraunhofer Allianz Vision, 2008, S. 240–259
- [36] KORN, B. ; KREBS, B. ; WAHL, F. M.: Sensor Based View Planning Using Vague Scene Representation. In: *Mustererkennung 1997, 19. DAGM-Symposium, 1997*, S. 175–182
- [37] KRAUS, K.: *Photogrammetrie*. Bd. 1 und 2. 5. Auflage. Dümmler Verlag, 1994
- [38] LAVALLE, S. M.: *Planning Algorithms*. Cambridge, U.K. : Cambridge University Press, 2006. – Also available at <http://planning.cs.uiuc.edu/>
- [39] LI, Y. F. ; HE, B. ; CHEN, S. ; BAO, P.: A view planning method incorporating self-termination for automated surface measurement. In: *Measurement Science and Technology* 16 (2005), S. 1865–1877
- [40] LONG, Z. X. ; HE, B. W. ; LI, Y. F.: A Novel View Planning Method for Automatic Reconstruction of Unknown 3-D Objects Based on the Limit Visual Surface. In: *Proc. Fifth Int. Conf. Image and Graphics ICIG '09, 2009*, S. 301–306
- [41] LORIOT, B. ; SEULIN, R. ; GORRIA, P.: Non-Model Based Method for an Automation of 3D Acquisition and Post-Processing. In: *Electronics Letters on Computer Vision and Analysis* 7 (2008), Dezember, Nr. 3, 67–82. <http://elcvia.cvc.uab.es/index.php/elcvia/article/view/192>

- [42] LOW, K.-L. ; LASTRA, A.: An Adaptive Hierarchical Next-Best-View Algorithm for 3D Reconstruction of Indoor Scenes. In: *14th Pacific Conference on Computer Graphics and Applications*, 2006
- [43] LOZANO-PEREZ, T.: Automatic Planning of Manipulator Transfer Movements. In: *IEEE Transactions on Systems, Man, and Cybernetics* 11 (1981), Oktober, Nr. 10, S. 681–698. – DOI 10.1109/TSMC.1981.4308589
- [44] LUHMANN, T. ; ROBSON, S. ; KYLE, S. ; HARLEY, I.: *Close Range Photogrammetry*. Whittles Publishing, 2006
- [45] MALIK, A. ; LORIOT, B. ; BOKHABRINE, Y. ; GORRIA, P. ; SEULIN, R.: A simulation of automatic 3D acquisition and post-processing pipeline. In: NIEL, Kurt S. (Hrsg.) ; FOFI, David (Hrsg.): *Proceedings of SPIE, Image Processing: Machine Vision Applications II* Bd. 7251, 2009, 72510P
- [46] MARTINS, F. A. R. ; GARCÍA-BERMEJO, J. G. ; CASANOVA, E. Z. ; GONZÁLEZ, J. R. P.: Automated 3D surface scanning based on CAD model. In: *Mechatronics* 15 (2005), Nr. 7, S. 837–857. – DOI 10.1016/j.mechatronics.2005.01.004
- [47] MASSIOS, N. A. ; FISHER, R. B.: A Best Next View selection algorithm incorporating a quality criterion. In: *9th BMVC*, 1998, S. 780–789
- [48] MAVER, J. ; BAJCSY, R.: Occlusions as a guide for planning the next view. In: *Pattern Analysis and Machine Intelligence, IEEE Transactions on* 15 (1993), Mai, Nr. 5, S. 417–433. – DOI 10.1109/34.211463
- [49] MEHDI-SOUZANI, C. ; THIEBAUT, F. ; LARTIGUE, C.: Scan Planning Strategy for a General Digitized Surface. In: *Journal of Computing and Information Science in Engineering* 6 (2006), Dezember, Nr. 4, S. 331–339
- [50] MUNKELT, C. ; BREITBARTH, A. ; NOTNI, G. ; DENZLER, J.: Multi-View Planning for Simultaneous Coverage and Accuracy Optimisation. In: LABROSSE, F. (Hrsg.) ; ZWIGGELAAR, R. (Hrsg.) ; LIU, Y. (Hrsg.) ; TIDDEMAN, B. (Hrsg.): *Proceedings of the British Machine Vision Conference*, BMVA Press, 2010, S. 118.1–118.11
- [51] MUNKELT, C. ; KÜHMSTEDT, P. ; DENZLER, J.: Incorporation of a-priori information in planning the next best view. In: KOBBELT, L. (Hrsg.) ; KUHLEN, T. (Hrsg.) ; AACH, T. (Hrsg.) ; WESTERMANN, R. (Hrsg.): *Vision, Modeling, and Visualization 2006*, Aka GmbH, Berlin, November 2006, S. 261–268
- [52] MUNKELT, C. ; SCHMIDT, I. ; BRÄUER-BURCHARDT, C. ; KÜHMSTEDT, P. ; NOTNI, G.: Cordless portable multi-view fringe projection system for 3D reconstruction. In: *Computer Vision and Pattern Recognition, IEEE Computer Society Conference on* (2007), S. 1–2. – DOI 10.1109/CVPR.2007.383475
- [53] MUNKELT, C. ; TRUMMER, M. ; DENZLER, J. ; NOTNI, G.: Volumetric View Planning for 3D Reconstruction using combined Quality Criteria. In: GRÜN, A. (Hrsg.) ; KAHMEN, H. (Hrsg.) ;

- ISPRS (Veranst.): *9th Conference on Optical 3-D Measurement Techniques (Optical 3D)*. Wien, Juli 2009
- [54] MUNKELT, C. ; TRUMMER, M. ; DENZLER, J. ; WENHARDT, S.: Benchmarking 3D Reconstructions from Next Best View Planning. In: *Proceedings of IAPR Conference on Machine Vision Applications*, 2007, S. 552–555
- [55] MUNKELT, C. ; TRUMMER, M. ; KÜHMSTEDT, P. ; NOTNI, G. ; DENZLER, J.: View Planning for 3D Reconstruction Using Time-of-Flight Camera Data. In: *Proceedings of 31st DAGM Symposium (LNCS 5748)*, Springer-Verlag, September 2009, S. 352–361
- [56] PHONG, Bui T.: Illumination for computer generated pictures. In: *Commun. ACM* 18 (1975), Juni, Nr. 6, S. 311–317. – DOI 10.1145/360825.360839
- [57] PITO, R.: *Automated Surface Acquisition Using Range Cameras*, University of Pennsylvania, Diss., 1997
- [58] PITO, R.: A Solution to the Next Best View Problem for Automated Surface Acquisition. In: *IEEE Transactions on Pattern Analysis and Machine Intelligence* 21 (1999), Oktober, Nr. 10, S. 1016–1030
- [59] PRIETO, F. ; LEPAGE, R. ; BOULANGER, P. ; REDARCE, T.: A CAD-based 3D data acquisition strategy for inspection. In: *Machine Vision and Applications* 15 (2003), November, S. 76–91. – DOI 10.1007/s00138–003–0131–4
- [60] PRIETO, F. ; REDARCE, H.T. ; LEPAGE, R. ; BOULANGER, Pierre: Range Image Accuracy Improvement by Acquisition Planning. In: *Proceedings of Vision Interface '99*, 1999, S. 156–163
- [61] PUKELSHEIM, F.: *Optimal Design of Experiments*. New York : John Wiley & Sons Inc., 1993
- [62] REED, M. K. ; ALLEN, P. K. ; STAMOS, I.: Automated model acquisition from range images with view planning. In: *Proc. IEEE Computer Society Conf Computer Vision and Pattern Recognition*, 1997, S. 72–77
- [63] REED, M.K. ; ALLEN, P.K.: Constraint-based sensor planning for scene modeling. In: *Pattern Analysis and Machine Intelligence, IEEE Transactions on* 22 (2000), Dezember, Nr. 12, S. 1460–1467. – DOI 10.1109/34.895979
- [64] RIVERA-RIOS, A. H. ; SHIH, F.-L. ; MAREFAT, M.: Stereo Camera Pose Determination with Error Reduction and Tolerance Satisfaction for Dimensional Measurements. In: *Proceedings of the 2005 IEEE International Conference on Robotics and Automation*. Barcelona, Spain, April 2005
- [65] ROBERTS, D. R. ; MARSHALL, A. D.: Viewpoint Selection for Complete Surface Coverage of Three Dimensional Objects. In: *British Machine Vision Conference*. Department of Computer Science, Cardiff University, PO Box 916, Cardiff. CF2 3XF, U.K., 1998, S. 740–750
- [66] ROZENWALD, G. F. ; SEULIN, R. ; FOUGEROLLE, Y.: Fully automatic 3D digitization of unknown objects. In: *In proceedings of Electronic Imaging Machine Vision Application* Bd. 7538, 2010, S. 753807–1–753807–9

- [67] SCHREIBER, W. ; NOTNI, G.: Theory and arrangements of self-calibrating whole-body three-dimensional measurement systems using fringe projection technique. In: *Optical Engineering* 39 (2000), Nr. 1, S. 159–169. – DOI 10.1117/1.602347
- [68] SCOTT, W. R.: *Performance-oriented view planning for automated object reconstruction*, University of Ottawa, Diss., Januar 2002
- [69] SCOTT, W. R.: Model-based view planning. In: *Machine Vision and Applications* 20 (2009), Januar, Nr. 1, S. 47–69. – DOI 10.1007/s00138–007–0110–2
- [70] SCOTT, W. R. ; ROTH, G. ; RIVEST, J.-F.: Performance-Oriented View Planning for Model Acquisition. In: *The International Symposium on Robotics (ISR 2000)*, 2000 ( NRC 45872), S. 212–219
- [71] SCOTT, W. R. ; ROTH, G. ; RIVEST, J.-F.: View Planning as a Set Covering Problem / Institute for Information Technology. 2001 (NRC-44892). – Forschungsbericht
- [72] SCOTT, W. R. ; ROTH, G. ; RIVEST, J.-F.: View Planning for Multi-Stage Object Reconstruction. In: *Proceedings of the VI 2001 Vision Interface Annual Conference*, 2001, S. 64–71
- [73] SCOTT, W. R. ; ROTH, G. ; RIVEST, J.-F.: View planning with a registration constraint. In: *Proc. Third Int 3-D Digital Imaging and Modeling Conf*, 2001, S. 127–134
- [74] SCOTT, W. R. ; ROTH, G. ; RIVEST, J.-F.: View Planning for Automated Three-Dimensional Object Reconstruction and Inspection. In: *ACM Computing Surveys* 35 (2003), März, Nr. 1, S. 64–96
- [75] SHIU, Y. C. ; AHMAD, S.: Calibration of wrist-mounted robotic sensors by solving homogeneous transform equations of the form  $AX=XB$ . In: *IEEE Transactions on Robotics and Automation* 5 (1989), Nr. 1, S. 16–29. – DOI 10.1109/70.88014
- [76] SITNIK, R. ; KARASZEWSKI, M. ; USKI, W. Z. ; RUTKIEWICZ, J.: Automation of 3D scan data capturing and processing. In: BASKURT, A. M. (Hrsg.): *Three-Dimensional Image Processing (3DIP) and Applications* Bd. 7526, SPIE, 2010, S. 75260Y
- [77] SLAVÍK, P.: A tight analysis of the greedy algorithm for set cover. In: *Journal of Algorithms* 25 (1997), November, Nr. 2, S. 237–254
- [78] STROBL, K. H. ; HIRZINGER, G.: Optimal Hand-Eye Calibration. In: *Proc. IEEE/RSJ Int Intelligent Robots and Systems Conf*, 2006, S. 4647–4653
- [79] TARABANIS, K. ; TSAI, R. Y.: Computing viewpoints that satisfy optical constraints. In: RIG (Hrsg.): *Proc. CVPR '91: The Comput. Soc. Conf on Comput. Vision and Patt. Recognition*, 1991
- [80] TARABANIS, K. A. ; ALLEN, P. K. ; TSAI, R. Y.: A survey of sensor planning in computer vision. In: *IEEE Transactions on Robotics and Automation* 11 (1995), Februar, Nr. 1, S. 86–104. – DOI 10.1109/70.345940



- [81] TARABANIS, K. A. ; TSAI, R. Y. ; ALLEN, P. K.: The MVP sensor planning system for robotic vision tasks. In: *IEEE Transactions on Robotics and Automation* 11 (1995), Februar, Nr. 1, S. 72–85. – DOI 10.1109/70.345939
- [82] TARBOX, G. H. ; GOTTSCHLICH, S. N.: Planning for complete sensor coverage in inspection. In: *Comput. Vis. Image Underst.* 61 (1995), Nr. 1, S. 84–111. – DOI 10.1006/cviu.1995.1007. – ISSN 1077–3142
- [83] THE MATHWORKS: *MATLAB*. <http://www.mathworks.com/>, 2010. – R2010a
- [84] TRIGGS, B. ; McLAUCHLAN, P. F. ; HARTLEY, R. I. ; FITZGIBBON, A. W.: Bundle Adjustment - A Modern Synthesis. In: *ICCV '99: Proceedings of the International Workshop on Vision Algorithms*, Springer-Verlag, 2000, S. 298–372
- [85] TRUCCO, E. ; UMASUTHAN, M. ; WALLACE, A. M. ; ROBERTO, V.: Model-based planning of optimal sensor placements for inspection. In: *IEEE Transactions on Robotics and Automation* 13 (1997), Nr. 2, S. 182–194. – DOI 10.1109/70.563641
- [86] TRUMMER, M. ; MUNKELT, C. ; DENZLER, J.: Online Next-Best-View Planning for Accuracy Optimization Using an Extended E-Criterion. In: *Proceedings of the 20th International Conference on Pattern Recognition*, 2010
- [87] TSAI, R. Y. ; LENZ, R. K.: Real time versatile robotics hand/eye calibration using 3D machine vision. In: *Proc. Conf. IEEE Int Robotics and Automation*, 1988, S. 554–561
- [88] TURK, G.: *Stanford Bunny*. <http://www.cc.gatech.edu/people/home/turk/bunny/bunny.html>. Version: 1994
- [89] VEREIN DEUTSCHER INGENIEURE: VDI/VDE 2634 Blatt 3: Optische 3-D-Messsysteme: Bildgebende Systeme mit flächenhafter Antastung in mehreren Einzelansichten. In: *VDI-Gesellschaft Mess- und Automatisierungstechnik, Fachausschuss Optische 3-D-Messtechnik* (2008), Dezember
- [90] VEZZETTI, E.: Computer aided inspection: design of customer-oriented benchmark for noncontact 3D scanner evaluation. In: *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology* 41 (2009), Nr. 11, S. 1140–1151. – DOI 10.1007/s00170-008-1562-x
- [91] WANG, Peng ; ZHANG, Z. ; SUN, C.: Framework for adaptive three-dimensional acquisition using structured light vision system. In: *Journal of Vacuum Science Technology B: Microelectronics and Nanometer Structures* 27 (2009), Mai, Nr. 3, S. 1418 –1421. – DOI 10.1116/1.3049530
- [92] WANG, Pengpeng ; GUPTA, K.: View planning for exploration via maximal C-space entropy reduction for robot mounted range sensors. In: *Advanced Robotics* 21 (2007), Nr. 7, S. 771–792
- [93] WANG, Pengpeng ; KRISHNAMURTI, R. ; GUPTA, K.: Metric View Planning Problem with Traveling Cost and Visibility Range. In: *Robotics and Automation, 2007 IEEE International Conference on*, 2007, S. 1292 –1297

- [94] WANG, Pengpeng ; KRISHNAMURTI, R. ; GUPTA, K.: View Planning Problem with Combined View and Traveling Cost. In: *Robotics and Automation, 2007 IEEE International Conference on, 2007*, S. 711–716
- [95] WEISE, T.: *Real-time 3D Scanning*, ETH Zürich, Diss., Oktober 2009
- [96] WEISSTEIN, Eric W.: *Central Limit Theorem*. <http://mathworld.wolfram.com/CentralLimitTheorem.html>, (08.12.2010). – MathWorld – A Wolfram Web Resource
- [97] WENHARDT, S. ; DEUTSCH, B. ; ANGELOPOULOU, E. ; NIEMANN, H.: Active Visual Object Reconstruction using D-, E-, and T-Optimal Next Best Views. In: *Computer Vision and Pattern Recognition, 2007. CVPR '07. IEEE Conference on, 2007*, S. 1–7
- [98] WENHARDT, S. ; DEUTSCH, B. ; HORNEGGER, J. ; NIEMANN, H. ; DENZLER, J.: An Information Theoretic Approach for Next Best View Planning in 3-D Reconstruction. In: *Pattern Recognition, 2006. ICPR 2006. 18th International Conference 1 (2006)*, S. 103–106. – DOI 10.1109/ICPR.2006.253. – ISSN 1051–4651
- [99] YANG, C. C. ; CIARALLO, F. W.: Optimized Sensor Placement for Active Visual Inspection. In: *Journal of Robotic Systems 18 (2001)*, Nr. 1, S. 1–15
- [100] YUAN, X.: A mechanism of automatic 3D object modeling. In: *Pattern Analysis and Machine Intelligence, IEEE Transactions on 17 (1995)*, März, Nr. 3, S. 307–311. – DOI 10.1109/34.368196
- [101] ZHAO, F. ; XU, X. ; XIE, S.Q.: Computer-Aided Inspection Planning – The state of the art. In: *Computers in Industry 60 (2009)*, September, Nr. 7, S. 453–466. – DOI 10.1016/j.compind.2009.02.002. – ISSN 70166–3615

# Abbildungsverzeichnis

1.1	Mittels Ansichtenplanung wird eine Folge von Sensorpositionen zur spezifikationsgetreue 3-D Rekonstruktion des Messobjektes berechnet. . . . .	2
1.2	Anwendung der Ansichtenplanung zur Flächenrückführung unbekannter Objekte am Beispiel eines Spielzeugelefanten (Foto, 3-D Rekonstruktion) . . . . .	3
1.3	Flächenhafte 3-D Inspektion eines Integralträgers aus dem Automobilbau (Foto, CAD-Modell, Ansichtenfolge, Inspektionsergebnis) . . . . .	4
1.4	Hochauflösende 3-D Rekonstruktion mittels aktiver Rekonstruktion mittels Streifenprojektion (Foto Messzene, Foto Detail, 3-D Rekonstruktion und Detailausschnitt) . . . . .	5
2.1	Geometrie der Lochkamera und euklidische Transformation zwischen Welt- und Kamerakoordinatensystem . . . . .	10
2.2	Mehrbildmessung mit der Methode der virtuellen Passmarken und Bündelblockausgleichung im Nahbereich . . . . .	13
2.3	Beziehungen der verschiedenen Klassen machbarer Pläne (mit und ohne fester Länge) zueinander. . . . .	15
2.4	Beispiel für ein Mengenüberdeckungsproblem (optimale vs. Greedy-Lösung) . . . . .	18
2.5	Messunsicherheitsschätzung beim allgemeinen räumlichen Vorwärtsschnitt (Punktmessung, optimale und schleifende Schnittgeometrie) . . . . .	20
3.1	Diskretisierung einer View Sphere . . . . .	22
3.2	Typische Beispiele für in der Ansichtenplanung genutzter Testobjekte (Rohrmodell, Stanford Bunny, Teekanne, Tasse, Statue und NBV Testobjekt) . . . . .	38
4.1	Sensorkopfgeometrie und Sensorsehstrahlen in der phasenkorrelierende Streifenprojektion	41
4.2	Hand-Auge-Transformation und Sensorkopf des „kolibri ROBOT“ für die phasenkorrelierende Streifenprojektion . . . . .	42
4.3	Streifenprojektion als flächenhaft antastendes Messverfahren (ausgedünnte Punktwolke einer einzelnen Ansicht, nachbarschaftsbasierte Oberflächenextraktion) . . . . .	43
4.4	Einflüsse auf die Messunsicherheit in der Streifenprojektion (Antastwinkel, Messentfernung)	44
4.5	Simulation der Veränderung des mittleren Punktabstandes in Abhängigkeit von Antastwinkel und Messentfernung . . . . .	45
4.6	Überblick über die quantitative Bewertung von 3-D Rekonstruktionsergebnissen. . . . .	50
4.7	Vorschlag für ein NBV Testobjekt von Munkelt et al. [54]. . . . .	52
4.8	3-D Fehlerberechnung registrierter Messdaten . . . . .	55

5.1	Überblick über den mengentheoretischen Ansichtenplanungsansatz . . . . .	59
5.2	Berechnung der Messbarkeitsmatrix . . . . .	61
5.3	Erzeugung von Ansichtenkandidaten in der modellgetriebenen Ansichtenplanung – unvollständige Objekterfassung (rote Flächen) aufgrund unangepasster Kandidaten . . . . .	63
5.4	Erzeugung alternativer Ansichtenkandidaten . . . . .	65
5.5	Modell zur Vorhersage der Messunsicherheit . . . . .	69
5.6	Messung von $\bar{\mathbf{p}}$ durch die Beobachtungen $\hat{\mathbf{p}}_1$ und $\hat{\mathbf{p}}_2$ und Darstellung der resultierenden Punktschätzung $\bar{\mathbf{p}}^{(2)}$ . . . . .	71
5.7	Berechnung der die Messunsicherheit minimierenden neuen Blickrichtung $\mathbf{o}$ , basierend auf dem erweiterten $E$ -Kriterium . . . . .	73
5.8	Bewertungsfunktion $f_e$ des geschätzten Standardfehlers $\hat{\sigma}$ der 3-D Rekonstruktion $\bar{\mathbf{p}}$ . . . . .	74
5.9	Visualisierung der Bewertung der aktuellen Unsicherheitsschätzung im Planungsverlauf am Beispiel des NBV Testobjekts . . . . .	75
5.10	Achsen des zum Einsatz kommenden Fanuc „M-16iB 20“ 6-DOF Industrie-Roboters . . . . .	77
5.11	Verwendete Konfiguration des zum Einsatz kommenden 3-D Sensors „kolibri ROBOT“ . . . . .	78
5.12	Simulation der Abhängigkeit des maximal möglichen Antastwinkels $\theta_a^{\max}$ vom Abstand (auf der yz-Ebene des Messobjektes) des zu messenden Punktes $\bar{\mathbf{p}}$ zum Zentrum . . . . .	79
5.13	Der Ansichtenplanung zugrunde liegende Objektmodelle . . . . .	82
5.14	Photo und 3-D Rekonstruktion des NBV Testobjektes durch ‘adaptive’ nach 14 Ansichten . . . . .	85
5.15	Vergleich der durch verschiedene Planungsmethoden erzielten Vollständigkeits bei der Vermessung des NBV Testobjektes [„volle Sensorauflösung / 0 % Kompensation“] . . . . .	85
5.16	Vergleich der vorhergesagten und tatsächlich realisierten Vollständigkeits und Verteilungen des 3-D Fehler der verschiedenen Planungsmethoden für das gesamte NBV Testobjekt [„volle Sensorauflösung / 0 % Kompensation“] . . . . .	86
5.17	Vergleich des realisierten 3-D Fehlers der verschiedenen Planungsmethoden an den einzelnen Objektdetails des NBV Testobjektes nach acht Ansichten [„volle Sensorauflösung / 0 % Kompensation“] . . . . .	87
5.18	Vergleich der realisierten Vollständigkeit und des 3-D Fehlers im Planungsverlauf für das Detail der Sinusfläche des NBV Testobjektes [„volle Sensorauflösung / 0 % Kompensation“] . . . . .	88
5.19	Vergleich der durch verschiedene Planungsmethoden erzielten und vorhergesagten Vollständigkeits bei der Vermessung des NBV Testobjektes [„reduzierte Sensorauflösung / 33 % Kompensation“] . . . . .	90
6.1	Zur Grobmodellerstellung genutzte Hüllkörper für das NBV Testobjekt . . . . .	93
6.2	Zur Grobmodellerstellung genutzte Hüllkörper für Integralträger und Spielzeugelefant . . . . .	94
6.3	Vergleich der realisierten Vollständigkeits für die Versuchsreihe „reduzierte Sensorauflösung / 33 % Kompensation“ des NBV Testobjekts . . . . .	98
6.4	Vergleich des realisierten 3-D Fehlers ausgewählter modellgetriebener mit denen der kombinierten daten- und modellgetriebenen Planungsmethodens . . . . .	99
6.5	3-D Rekonstruktion des Integralträgers durch die kombinierte daten- und modellgetriebene Ansichtenplanung . . . . .	100
6.6	Vergleich der realisierten Vollständigkeits bei der 3-D Rekonstruktion des Integralträgers. [Messparameter: 10 % Kompensation des Posenfehlers] . . . . .	101

---

6.7	3-D Rekonstruktion des Spielzeugelefanten durch die kombinierte daten- und modellgetriebene Ansichtenplanung . . . . .	103
6.8	Vergleich der realisierten Vollständigkeits bei der 3-D Rekonstruktion des Spielzeugelefanten. [Messparameter: 10 % Kompensation des Posenfehlers] . . . . .	104
6.9	Bewertung der Unsicherheitsschätzung im Planungsverlauf für 'NBV <sub>hull</sub> ' anhand des aktuellen Objektmodells des Spielzeugelefanten . . . . .	105



# Tabellenverzeichnis

5.1	Die Spezifikation der in dieser Arbeit verwendeten Konfiguration des Sensorkopfes des 3-D Sensors „kolibri ROBOT“ . . . . .	77
5.2	Die Spezifikation der in dieser Arbeit verwendeten Konfiguration des Positioniersystems des 3-D Sensors „kolibri ROBOT“ . . . . .	78
5.3	Auswahl der Ergebnisse des Leistungsvergleiches für die Versuchsreihe „volle Sensorauflösung / 0 % Kompensation“ des NBV Testobjektes . . . . .	84
5.4	Vergleich der Zeiten für Ansichtenplanung, 3-D Messung und Oberflächenextraktion, sowie resultierende Dreiecksanzahl und Dateigröße beim NBV Testobjekt [„volle Sensorauflösung / 0 % Kompensation“] . . . . .	88
5.5	Auswahl der Ergebnisse des Leistungsvergleiches für die Versuchsreihe „reduzierte Sensorauflösung / 33 % Kompensation“ des NBV Testobjektes . . . . .	89
6.1	Auswahl der Ergebnisse des Leistungsvergleiches für die Versuchsreihe „reduzierte Sensorauflösung / 33 % Kompensation“ des NBV Testobjektes . . . . .	98
6.2	Ergebnisse des Leistungsvergleiches für die Versuchsreihe Integralträger . . . . .	100
6.3	Vergleich der Zeiten für Ansichtenplanung, 3-D Messung und Oberflächenextraktion, sowie resultierende Dreiecksanzahl und Dateigröße beim Integralträger . . . . .	102
6.4	Ergebnisse des Leistungsvergleiches für die Versuchsreihe Spielzeugelefant . . . . .	103
6.5	Vergleich der Zeiten für Ansichtenplanung, 3-D Messung und Oberflächenextraktion, sowie resultierende Dreiecksanzahl und Dateigröße beim Spielzeugelefanten . . . . .	106
B.1	Vollständige Ergebnisse des Leistungsvergleiches für die Versuchsreihe „volle Sensorauflösung / 0 % Kompensation“ des NBV Testobjektes. . . . .	132
B.2	Vollständige Ergebnisse des Leistungsvergleiches für die Versuchsreihe „reduzierte Sensorauflösung / 33 % Kompensation“ des NBV Testobjektes (Teil 1). . . . .	133
B.3	Vollständige Ergebnisse des Leistungsvergleiches für die Versuchsreihe „reduzierte Sensorauflösung / 33 % Kompensation“ des NBV Testobjektes (Teil 2). . . . .	134





# Algorithmenverzeichnis

4.1	Definition der Planungsstrategie . . . . .	49
5.1	Angepasste Erzeugung der Ansichtenkandidaten. . . . .	64
5.2	Mehrschrittplanung mit erweitertem <i>E</i> -Kriterium. . . . .	76
6.1	Kombinierte daten- und modellgetriebene Ansichtenplanung mit erweitertem <i>E</i> -Kriterium basierend auf einem Hüllkörper des Messobjekts. . . . .	95



# Anhang A

## Glossar

**3-D Fehler** Abstand eines 3-D Punktes zur nächstgelegenen Modelloberfläche.

**Ansicht** Eine mit festen intrinsischen und extrinsischen Parametern durchgeführte 3-D Rekonstruktion einer Tiefenkamera.

**Antastwinkel** Größter Winkel  $\theta_a$  zwischen Oberflächennormale  $\mathbf{n}$  und den Sensor- und Beleuchtungssehstrahlen.

**Basislänge** engl. „base line“, Abstand zwischen den beiden an der Triangulation beteiligten Komponenten, z. B. zwischen zwei Kamerazentren.

**Beobachtungswinkelkriterium** engl. „glancing angle constraint“, siehe Antastwinkel.

**Bildwinkel** (diagonaler, horizontaler, vertikaler) Öffnungswinkel einer Optik.

**Bistatischer Sensor** Sender / Empfänger an räumlich getrennten Positionen (vergleiche monostatischer Sensor).

**Boxplot** Darstellung verschiedener robuster Streuungsmaße. Neben dem Median und den beiden Quartilen werden in dieser Arbeit die Extremwerte mittels des 2,5% und des 97,5% Quantils veranschaulicht.

**C-Space** siehe Konfigurationsraum.

**Freiformfläche** Oberflächenbeschreibung durch Splines (z. B. durch (rationale) B-Spline-Kurven).

**Greedy-Algorithmen** Klasse von Algorithmen, welche den Folgezustand mit dem größten Gewinn wählen.

**Grenzfläche** engl. „Occlusion surface“ / „occlusion edge“, Bereich zwischen unterschiedlich klassifizierten Raumbereichen.

**Grenzwinkel** Maximal zugelassener Winkel  $\theta_b$  (engl. „cut off angle“ oder „breakdown angle“) zwischen Sensorsehstrahl und Oberflächennormale  $\mathbf{n}$  des betrachteten Oberflächenelementes. Typische Werte liegen zwischen  $60^\circ$  und  $75^\circ$ .

**Ground-Truth** Als bekannt vorausgesetztes und mit hoher Genauigkeit bestimmtes Vergleichsmaß.

- Hüllkörper** Eine ein Messobjekt ungefähr in Größe und Form entsprechende (nicht notwendigerweise umhüllende) geometrische Grundform, wie z. B. Kugel oder Quader.
- Interquartilabstand** Streuungsmaß. Differenz zwischen dem oberen Quartil (0,75 Quantil) und dem unteren Quartil (0,25 Quantil), welches daher 50 % der Verteilung beinhaltet.
- Konfigurationsraum** engl. „configuration space“, Raum aller möglichen Konfigurationen eines Systems.
- Loxodrome** (gr.) Kursgleiche, geometrisch als Kurve konstanten Kurses auf Rotationskörpern definiert. Schneidet auf einer Kugeloberfläche die Meridiane immer unter dem gleichen Winkel [6].
- Messbarkeitsmatrix** siehe Sichtbarkeitsmatrix. Über die reine Sichtbarkeit hinaus wird auch die Einhaltung verschiedener Messbarkeitsnebenbedingungen überprüft.
- Monostatischer Sensor** Sender / Empfänger an gleicher Position (vergleiche bistatischer Sensor).
- NBV Testobjekt** Vorschlag für ein Messobjekt zum objektiven Vergleich verschiedener Ansichtenplanungsverfahren, basierend auf [54].
- NP** (nichtdeterministisch polynomielle Zeit) Ein Entscheidungsproblem liegt in NP, wenn es von einer nichtdeterministischen Turingmaschine in Polynomialzeit entschieden werden kann.
- NP-Vollständigkeit** (nichtdeterministisch polynomielle Vollständigkeit) Ein Problem liegt in NP und ist NP-schwer. Bisher konnten keine Algorithmen gefunden werden, welche die entsprechenden Entscheidungsprobleme in polynomieller Zeit lösen.
- NP-schwer** Das Problem kann auf ein Problem bekannter NP-Schwere (z. B. das Erfüllbarkeitsproblem der Aussagenlogik „SAT“) reduziert werden.
- Phasenmodulation** Amplitude des rekonstruierten  $(1 + \cos)$ -Streifen-Signals (engl. „fringe visibility“).
- Posenunsicherheit** Mögliche Abweichungen zwischen geplanter und tatsächlich durch das Positioniersystem realisierter Sensorposition und -lage.
- Registrierung** Anpassung von Lage und Position (seltener: Größe) zweier Repräsentationen eines Objektes zueinander.
- Roboterhand** Alternative Bezeichnung für den Endeffektor (letztes Glied der kinematischen Kette) des Positioniersystems.
- Sensorkopf** Starr miteinander verbundene Streifenprojektionseinheit aus Beleuchtung (typischerweise digitaler Projektor) und zwei Kameras. Kann vorab kalibriert werden.
- Sensormittelachse** Blickrichtung eines Sensors (engl. „sensor boresight“). Bei bistatischen Sensoren Ausrichtung der optischen Achse des virtuellen Sensors.
- Sensorsehfeld** engl. „field of view“, vom Sensor erfassbarer Bereiche (ohne minimale / maximale Entfernung).
- Sensorsehvolumen** engl. „view frustum“, vom Sensor erfassbares Volumen (unter Berücksichtigung der minimalen und maximalen Messentfernung).

**Sichtbarkeitsmatrix** Binäre Matrix, in der für jedes Oberflächenelement festgehalten wird, ob es von einer bestimmten Sensorposition aus sichtbar ist (siehe auch Messbarkeitsmatrix).

**Time-of-Flight-Kamera** (ToF-Kamera) Eine typischerweise monostatische Tiefenkamera, welche die Tiefenmessinformation aus der Laufzeit eines ausgesandten Signals bestimmt.

**Überlappungsbedingung** Um die Registrierung der Einzelansichten zu ermöglichen, muss jede Ansicht einen Mindestbereich der Objektoberfläche abdecken, der auch von anderen Ansichten erfasst wurde.

**View Sphere** Grundlegendes Sensorpositioniermodell, welches die sechs räumlichen Freiheitsgrade stark reduziert auf die zwei sphärischen Koordinaten einer Kugel mit festem Radius. Typischerweise wird das Messobjekt als sich im Zentrum der umgebenden View Sphere befinden angenommen.

**Virtueller Sensor** Zur kompakten Beschreibung der gemeinsamen Sichtbarkeit bistatischer Sensoren angenommener Sensor mit gleichen intrinsischen Parametern, welcher in der Mitte zwischen beiden Sensoren positioniert ist und dessen optische Achse der mittleren Richtung der optischen Achsen beider Sensoren entspricht.



## **Anhang B**

# **Ergebnisse des Leistungsvergleiches**

	Objekt detail	Planungsmethode	3-D Fehler [ $\mu\text{m}$ ] nach $n$ Ansichten (Quartile)						Vollständigkeit [%] nach $n$ Ansichten					# Ansichten total
			8			total			3	4	6	8	total	
			25 %	50 %	75 %	25 %	50 %	75 %						
<b>(prognostiziert)</b>	Gesamtobjekt	baseline	6,8	14,9	27,3	6,8	14,9	26,9	70,6	74,8	79,4	82,0	85,0	16
	[„whole“]	adaptive	7,9	17,1	30,7	7,9	17,2	30,5	76,7	81,2	85,3	87,4	89,9	14
		ecrit <sub>cov</sub>	8,2	17,9	31,6	8,2	17,9	31,6	73,8	79,0	85,1	86,8	86,8	8
		ecrit <sub>acc</sub>	7,1	14,9	26,0	7,1	14,9	26,0	77,4	80,2	83,8	86,2	86,2	8
		expert	–	–	–	–	–	–	–	–	–	–	–	16
<b>(realisiert)</b>	Gesamtobjekt [„whole“]	baseline	9,0	19,0	35,0	9,0	19,0	39,0	68,3	72,8	76,2	81,0	82,0	16
		adaptive	9,0	18,0	35,0	6,0	15,0	32,0	73,8	78,8	83,6	85,5	87,1	14
		ecrit <sub>cov</sub>	10,0	21,0	40,0	10,0	21,0	40,0	71,0	76,5	81,9	84,3	84,3	8
		ecrit <sub>acc</sub>	6,0	16,0	31,0	6,0	16,0	31,0	72,3	77,1	82,0	84,3	84,3	8
		expert	9,0	18,0	35,0	8,0	18,0	33,0	69,6	75,9	79,7	80,4	84,3	16
	Tasche [„notch“]	baseline	6,0	12,0	26,0	4,0	10,0	22,0	55,3	70,6	72,4	76,8	78,2	16
		adaptive	6,0	15,0	32,0	5,0	11,0	29,0	63,6	63,6	76,8	76,8	83,0	14
		ecrit <sub>cov</sub>	6,0	13,0	26,0	6,0	13,0	26,0	60,4	71,7	71,8	77,1	77,1	8
		ecrit <sub>acc</sub>	7,0	15,0	33,0	7,0	15,0	33,0	61,8	61,8	78,1	81,0	81,0	8
		expert	5,0	11,0	25,0	3,0	7,0	18,0	38,6	68,0	69,6	71,5	74,9	16
	Negative Halbkugel [„negShpere“]	baseline	14,0	26,0	40,0	17,0	29,0	41,0	32,3	32,4	36,4	59,5	64,4	16
		adaptive	9,0	19,0	33,0	10,0	20,0	32,0	64,2	63,9	78,0	77,9	83,4	14
		ecrit <sub>cov</sub>	20,0	43,0	72,0	20,0	43,0	72,0	66,8	68,5	67,4	66,5	66,5	8
		ecrit <sub>acc</sub>	12,0	25,0	39,0	12,0	25,0	39,0	59,3	59,4	75,2	76,3	76,3	8
		expert	27,0	43,0	61,0	22,0	37,0	56,0	47,4	47,2	50,5	50,6	54,5	16
	Sinusfläche [„sinusoidal“]	baseline	30,0	43,0	54,0	29,0	38,0	44,0	67,2	67,2	77,9	80,8	88,7	16
		adaptive	21,0	40,0	58,0	21,0	37,0	51,0	61,9	83,4	87,8	91,1	91,2	14
		ecrit <sub>cov</sub>	16,0	29,0	40,0	16,0	29,0	40,0	58,3	58,2	87,4	87,6	87,6	8
		ecrit <sub>acc</sub>	15,0	27,0	39,0	15,0	27,0	39,0	59,8	80,1	79,8	87,2	87,2	8
		expert	13,0	24,0	35,0	17,0	27,0	33,0	61,4	61,4	79,5	79,5	94,3	16
Dreibein [„tripod“]	baseline	6,0	14,0	27,0	6,0	12,0	24,0	50,0	59,8	63,6	64,5	64,5	16	
	adaptive	6,0	14,0	34,0	5,0	12,0	35,0	69,7	71,1	72,5	76,9	77,2	14	
	ecrit <sub>cov</sub>	7,0	15,0	31,0	7,0	15,0	31,0	57,4	71,9	72,2	78,0	78,0	8	
	ecrit <sub>acc</sub>	6,0	12,0	30,0	6,0	12,0	30,0	64,9	66,4	70,5	71,5	71,5	8	
	expert	6,0	15,0	28,0	5,0	12,0	64,0	69,7	70,6	72,9	73,3	74,8	16	

Tabelle B.1: Vollständige Ergebnisse des Leistungsvergleiches für die Versuchsreihe „volle Sensorauflösung / 0% Kompensation“ des NBV Testobjektes.



	Objekt detail	Planungsmethode	3-D Fehler [ $\mu\text{m}$ ] nach $n$ Ansichten (Quartile)						Vollständigkeit [%] nach $n$ Ansichten						# Ansichten total					
			8			total			3		4		6			8		16		total
			25 %	50 %	75 %	25 %	50 %	75 %												
<b>(prognos- tiziert)</b>	Gesamt- objekt [„whole“]	baseline	5,9	12,8	23,4	6,1	13,1	23,8	36,8	43,6	51,7	55,4	60,6	60,7	17					
		adaptive	7,8	16,7	30,3	8,0	17,3	30,6	48,7	56,8	71,7	77,6	88,2	88,9	20					
		ecrit <sub>cov</sub>	8,3	18,1	32,6	8,1	17,4	31,0	52,2	62,5	72,3	79,4		84,6	12					
		ecrit <sub>acc</sub>	6,4	13,7	24,1	6,7	14,5	25,5	43,9	49,5	63,9	72,6	84,4	85,7	21					
		expert	–	–	–	–	–	–	–	–	–	–	–	–	–	16				
		NBV <sub>hull</sub>	6,7	14,3	25,6	8,4	18,4	32,6	65,0	82,6	100,1	115,0	77,0	77,0	16					
		NBV <sub>ToF</sub>	6,9	14,9	27,1	7,8	16,2	28,6	48,7	56,8	71,7	77,6	88,2	88,2	16					
		random	6,9	14,7	26,7	8,0	17,4	31,6	14,3	16,8	24,1	33,6	49,7	59,4	25					
		regular	–	–	–	–	–	–	–	–	–	–	–	–	–	25				
<b>(reali- siert)</b>	Gesamt- objekt [„whole“]	baseline	10,0	20,0	39,0	9,0	18,0	34,0	46,2	48,8	63,4	66,1	72,8	72,9	17					
		adaptive	10,0	21,0	39,0	8,0	17,0	33,0	71,7	73,8	80,3	81,6	85,2	85,9	20					
		ecrit <sub>cov</sub>	8,0	18,0	34,0	8,0	17,0	33,0	69,5	70,9	76,1	80,0	0,0	82,9	12					
		ecrit <sub>acc</sub>	8,0	18,0	33,0	6,0	16,0	32,0	60,6	64,0	74,8	78,3	83,3	84,2	21					
		expert	6,0	16,0	32,0	6,0	15,0	30,0	61,2	73,1	77,3	78,7	83,2	83,2	16					
		NBV <sub>hull</sub>	10,0	21,0	42,0	10,0	20,0	41,0	51,4	68,6	69,9	75,0	81,8	81,8	16					
		NBV <sub>ToF</sub>	9,0	18,0	35,0	8,0	17,0	33,0	64,3	70,8	77,5	79,2	84,4	84,4	16					
		random	9,0	19,0	39,0	6,0	16,0	36,0	33,5	38,1	45,1	55,9	74,7	77,1	25					
		regular	8,0	16,0	28,0	6,0	16,0	31,0	54,7	66,3	70,4	76,9	78,6	80,1	25					
	Tasche [„notch“]	baseline	7,0	15,0	26,0	5,0	12,0	24,0	36,3	39,8	52,9	62,8	71,1	71,1	17					
		adaptive	7,0	17,0	33,0	6,0	13,0	25,0	71,5	71,7	74,2	78,5	79,3	79,3	20					
		ecrit <sub>cov</sub>	7,0	17,0	35,0	7,0	16,0	34,0	55,4	55,3	63,8	76,4	0,0	76,6	12					
		ecrit <sub>acc</sub>	7,0	16,0	31,0	5,0	13,0	27,0	36,7	42,8	65,3	73,7	74,0	77,2	21					
		expert	4,0	9,0	19,0	4,0	9,0	18,0	21,0	58,0	57,9	59,2	72,4	72,4	16					
		NBV <sub>hull</sub>	11,0	24,0	42,0	8,0	17,0	31,0	57,3	57,3	57,2	57,1	80,0	80,0	16					
random	NBV <sub>ToF</sub>	9,0	20,0	36,0	7,0	15,0	29,0	51,1	51,0	61,6	61,5	74,3	74,3	16						
	random	5,0	11,0	24,0	4,0	9,0	20,0	47,2	49,8	49,8	66,5	69,1	76,9	25						
	regular	5,0	12,0	22,0	4,0	7,0	15,0	30,3	44,2	56,8	57,2	57,8	62,4	25						

Tabelle B.2: Vollständige Ergebnisse des Leistungsvergleiches für die Versuchsreihe „reduzierte Sensorauflösung / 33 % Kompensation“ des NBV Testobjektes (Teil 1).

Objekt detail	Planungs- methode	3-D Fehler [µm] nach <i>n</i> Ansichten (Quartile)						Vollständigkeit [%] nach <i>n</i> Ansichten						# An- sichten total												
		8			total			3			4				6			8			16			total		
		25 %	50 %	75 %	25 %	50 %	75 %	3	4	6	8	16	total		3	4	6	8	16	total	3	4	6	8	16	total
<b>(reali- siert)</b>  Negative Halbkugel [„negShpere“]	baseline	13,0	26,0	42,0	12,0	23,0	35,0	23,7	25,0	43,9	44,0	65,8	66,4	17												
	adaptive	12,0	25,0	42,0	12,0	24,0	37,0	64,4	64,5	69,3	69,5	76,6	81,2	20												
	ecrit <sub>cov</sub>	11,0	23,0	40,0	10,0	21,0	35,0	41,3	41,5	41,6	51,1	0,0	74,3	12												
	ecrit <sub>acc</sub>	11,0	22,0	37,0	11,0	22,0	36,0	62,5	68,2	68,3	69,9	69,8	71,8	21												
	expert	7,0	16,0	28,0	8,0	17,0	27,0	52,6	52,8	55,8	55,8	61,2	61,2	16												
	NBV <sub>hull</sub>	15,0	33,0	56,0	8,0	17,0	32,0	11,8	11,9	11,9	51,7	74,2	74,2	16												
	NBV <sub>ToF</sub>	25,0	43,0	62,0	23,0	38,0	52,0	72,6	72,9	74,7	74,7	74,2	74,2	16												
	random	–	–	–	14,0	28,0	45,0	–	–	–	–	22,4	33,8	25												
	regular	9,0	20,0	33,0	8,0	17,0	27,0	0,4	52,6	55,1	57,8	58,6	61,9	25												
	Sinusfläche [„sinusoidal“]	baseline	7,0	15,0	23,0	9,0	17,0	27,0	70,0	70,1	70,0	70,0	71,9	71,9	17											
		adaptive	16,0	29,0	42,0	15,0	28,0	40,0	51,7	59,3	85,7	85,8	91,3	91,2	20											
		ecrit <sub>cov</sub>	12,0	22,0	34,0	14,0	24,0	33,0	60,0	64,9	83,6	83,6	0,0	86,4	12											
		ecrit <sub>acc</sub>	10,0	19,0	30,0	17,0	30,0	39,0	48,9	48,9	67,7	67,6	90,1	90,4	21											
		expert	14,0	25,0	37,0	14,0	25,0	35,0	76,5	76,5	93,1	94,7	95,9	95,9	16											
NBV <sub>hull</sub>		10,0	21,0	38,0	23,0	33,0	45,0	59,0	80,4	80,3	80,3	83,7	83,7	16												
NBV <sub>ToF</sub>		13,0	24,0	38,0	12,0	23,0	36,0	30,7	61,3	79,0	89,3	89,4	89,4	16												
random		31,0	47,0	61,0	19,0	37,0	54,0	–	–	36,0	36,0	75,7	65,5	25												
regular	12,0	21,0	31,0	14,0	23,0	32,0	69,9	69,9	70,0	90,2	93,0	94,9	25													
Dreibein [„tripod“]	baseline	6,0	13,0	24,0	6,0	12,0	23,0	16,6	16,6	21,9	21,9	34,2	34,2	17												
	adaptive	8,0	18,0	36,0	6,0	12,0	27,0	67,1	68,0	68,3	68,8	75,8	76,0	20												
	ecrit <sub>cov</sub>	6,0	13,0	27,0	6,0	12,0	25,0	58,5	62,5	62,5	67,7	0,0	71,1	12												
	ecrit <sub>acc</sub>	6,0	14,0	27,0	5,0	11,0	23,0	34,8	42,3	57,8	69,1	73,1	73,4	21												
	expert	7,0	17,0	103,0	6,0	14,0	97,0	67,5	67,5	70,1	71,7	74,6	74,6	16												
	NBV <sub>hull</sub>	6,0	15,0	30,0	6,0	14,0	27,0	28,6	47,2	50,8	58,9	59,2	59,2	16												
	NBV <sub>ToF</sub>	6,0	15,0	27,0	6,0	12,0	23,0	56,8	58,9	60,0	60,1	76,3	76,3	16												
	random	8,0	18,0	40,0	5,0	12,0	26,0	–	36,6	37,0	40,4	70,9	72,7	25												
regular	6,0	12,0	24,0	4,0	10,0	22,0	56,1	63,6	66,6	70,9	73,5	73,2	25													

Tabelle B.3: Vollständige Ergebnisse des Leistungsvergleiches für die Versuchsreihe „reduzierte Sensorauflösung / 33 % Kompensation“ des NBV Testobjektes (Teil 2).

## Eigene Publikationen

MUNKELT, C. ; KÜHMSTEDT, P. ; HEINZE, M. ; SÜSSE, H. ; NOTNI, G.: How to detect object-caused illumination effects in 3D fringe projection. In: Osten, W. (Hrsg.) ; Gorecki, C. (Hrsg.) ; Novak, E. (Hrsg.) ; SPIE (Veranst.): *Optical Measurement Systems for Industrial Inspection IV* Bd. 5856 SPIE, 2005, S. 632–639

MUNKELT, C. ; KÜHMSTEDT, P. ; DENZLER, J.: Incorporation of a-priori Information in Planning the Next Best View. In: Kobbelt, L. (Hrsg.) ; Kuhlen, T. (Hrsg.) ; Aach, T. (Hrsg.) ; Westermann, R. (Hrsg.): *Vision, Modeling, and Visualization 2006*, Aka GmbH, Berlin, November 2006, S. 261–268

MUNKELT, C. ; SCHMIDT, I. ; BRÄUER-BURCHARDT, C. ; KÜHMSTEDT, P. ; NOTNI, G.: Cordless portable multi-view fringe projection system for 3D reconstruction. In: *Computer Vision and Pattern Recognition, IEEE Computer Society Conference on* (2007), S. 1–2. – DOI 10.1109/CVPR.2007.383475

MUNKELT, C. ; TRUMMER, M. ; DENZLER, J. ; WENHARDT, S.: Benchmarking 3D Reconstructions from Next Best View Planning. In: *Proceedings of IAPR Conference on Machine Vision Applications*, 2007, S. 552–555

KÜHMSTEDT, P. ; MUNKELT, C. ; HEINZE, M. ; BRÄUER-BURCHARDT, C. ; NOTNI, G.: 3D shape measurement with phase correlation based fringe projection. In: Osten, W. (Hrsg.) ; C.Gorecki (Hrsg.) ; Novak, E. L. (Hrsg.): *Optical Measurement Systems for Industrial Inspection V* Bd. 6616, SPIE, 2007, S. 66160B

BRÄUER-BURCHARDT, C. ; MUNKELT, C. ; HEINZE, M. ; KÜHMSTEDT, P. ; NOTNI, G.: Phase Unwrapping in Fringe Projektion Systems Using Epipolar Geometry. In: *Advanced Concepts for Intelligent Vision Systems* Bd. Volume 5259/2008, Springer Berlin / Heidelberg, 2008, S. 422–432

MUNKELT, C. ; TRUMMER, M. ; DENZLER, J. ; NOTNI, G.: Volumetric View Planning for 3D Reconstruction using combined quality criteria. In: *Conference on Optical 3-D Measurement Techniques*, 2009, S. 275–284

MUNKELT, C. ; TRUMMER, M. ; KÜHMSTEDT, P. ; NOTNI, G. ; DENZLER, J.: View Planning for 3D Reconstruction using Time-of-Flight Camera Data. In: *31st DAGM Symposium*, 2009, S. 352–361

TRUMMER, M. ; MUNKELT, C. ; DENZLER, J.: Combined GKLT Feature Tracking and Reconstruction for Next Best View Planning. In: Denzler, J. (Hrsg.) ; Notni, G. (Hrsg.) ; Suesse, H. (Hrsg.): *31st DAGM Symposium* Bd. 5748, Springer, 2009, S. 161–170

TRUMMER, M. ; MUNKELT, C. ; DENZLER, J.: Extending GKLT Tracking – Feature Tracking for Controlled Environments with Integrated Uncertainty Estimation. In: Salberg, A.-B. (Hrsg.) ; Hardeberg, J.Y. (Hrsg.) ; Jenssen, R. (Hrsg.): *Proceedings of 16th IAPR Scandinavian Conference on Image Analysis* Bd. 5575, Springer-Verlag, 2009 (LNCS), S. 460–469

TRUMMER, M. ; MUNKELT, C. ; DENZLER, J.: Online Next- Best- View Planning for Accuracy Optimization Using an Extended E- Criterion. In: *Proceedings of IAPR 20th International Conference on Pattern Recognition (ICPR)*, IEEE Computer Society, 2010, S. 1642–1645

BRÄUER-BURCHARDT, C. ; MUNKELT, C. ; HEINZE, M. ; KÜHMSTEDT, P. ; NOTNI, G.: Fringe Code Reduction for 3D Measurement Systems using Epipolar Geometry. In: *Proc. of Photogrammetric Computer Vision and Image Analysis (PCV2010)*, 2010 (ISPRS Comm. III Symposium), S. 192–197

MUNKELT, C. ; BREITBARTH, A. ; NOTNI, G. ; DENZLER, J.: Multi-View Planning for Simultaneous Coverage and Accuracy Optimisation. In: LABROSSE, F. (Hrsg.) ; ZWIGGELAAR, R. (Hrsg.) ; LIU, Y. (Hrsg.) ; TIDDEMAN, B. (Hrsg.): *Proceedings of the British Machine Vision Conference*, BMVA Press, 2010, S. 118.1–118.11

Patent:

MUNKELT, C. ; SCHMIDT, I. ; KÜHMSTEDT, P. ; NOTNI, G.: Vorrichtung und Verfahren zum berührungslosen Erfassen räumlicher Koordinaten einer Oberfläche. Patentanmeldung DE 102007022361, 04.05.2007

## Lebenslauf

Name: Christoph Munkelt  
Geboren: 25.03.1977 in Jena  
Familienstand: Verheiratet, zwei Kinder

### *Ausbildung / Beruflicher Werdegang*

2005 – 2011 Bearbeitung der vorliegenden Doktorarbeit unter der Leitung von Prof. Dr. Joachim Denzler am Lehrstuhl Digitale Bildverarbeitung der Friedrich-Schiller-Universität Jena.

2004 – 2011 Wissenschaftlicher Mitarbeiter am Fraunhofer-Institut für Angewandte Optik und Feinmechanik IOF, Jena.

1996 – 2004 Studium der Informatik an der Friedrich-Schiller-Universität Jena. Diplomarbeit über „Analyse und Optimierung eines optisch-phasogrammetrischen 3D-Meßsystems“ unter der Leitung von Dr. H. Süße.

1999 – 2000 Auslandspraktikum an der Hong Kong Polytechnic University

1995 – 1996 Grundwehrdienst

1991 – 1995 Carl-Zeiss-Gymnasium, Jena; Abitur.

1983 – 1991 Polytechnische Oberschule Bertolt Brecht, Jena.

Jena, den 27.05.2011



## Ehrenwörtliche Erklärung

Hiermit erkläre ich,

- dass mir die Promotionsordnung der Fakultät bekannt ist,
- dass ich die Dissertation selbst angefertigt habe, keine Textabschnitte oder Ergebnisse eines Dritten oder eigenen Prüfungsarbeiten ohne Kennzeichnung übernommen und alle von mir benutzten Hilfsmittel, persönliche Mitteilungen und Quellen in meiner Arbeit angegeben habe,
- dass ich die Hilfe eines Promotionsberaters nicht in Anspruch genommen habe und daß Dritte weder unmittelbar noch mittelbar geldwerte Leistungen von mir für Arbeiten erhalten haben, die im Zusammenhang mit dem Inhalt der vorgelegten Dissertation stehen,
- dass ich die Dissertation noch nicht als Prüfungsarbeit für eine staatliche oder andere wissenschaftliche Prüfung eingereicht habe.

Bei der Auswahl und Auswertung des Materials sowie bei der Herstellung des Manuskripts haben mich folgende Personen unterstützt:

**Andreas Breitbarth, Eric Otto**

.....

.....

Ich habe die gleiche, eine in wesentlichen Teilen ähnliche bzw. eine andere Abhandlung\* bereits bei einer anderen Hochschule als Dissertation eingereicht: ~~Ja~~ / Nein\*.

(\* Zutreffendes unterstreichen)

Wenn Ja, Name der Hochschule: .....

Ergebnis: .....

Jena, den 27.05. 2011

Unterschrift