

# CAD gestützte 3D Objekterkennung in industrieller Fertigungsumgebung

## zur DGPF - Jahrestagung

ALESSANDRO CEFALU<sup>1</sup> & JAN BÖHM<sup>2</sup>

*Der vorliegende Beitrag beschreibt die am Institut für Photogrammetrie der Universität Stuttgart, im Rahmen des RoboMAP Projektes, durchgeführten Arbeiten zur Bestimmung von Lage und Orientierung eines Zylinderkopfes mit einem monoskopischen Kamerasystem. Hierzu wird ein kommerziell verfügbares, ansichtsbasiertes Verfahren angewandt, bei dem die Objektgeometrie über ein CAD-Modell vorab bekannt ist. Die an einem einfachen Fräskörper durchgeführten Versuche bestätigen das Potential des Ansatzes, heben jedoch deutlich die große Bedeutung einer gut vorbereiteten Aufnahmesituation hervor. Sowohl die Wiederhol-, als auch die Vergleichsgenauigkeit konnten auf ein für die angestrebte Anwendung geeignetes Niveau angehoben werden. Erste Versuche am reellen Zylinderkopf zeigen, dass der Ansatz auch auf komplexe Körper anwendbar ist, wenn adäquate Voraussetzungen geschaffen werden.*

## 1 Einführung

Aufgrund des hohen nationalen und internationalen Konkurrenzdrucks in der industriellen Produktion, sehen sich immer mehr Hersteller gezwungen ihre Produkte individuell nach Kundenwünschen zu konfektionieren. Dies führt entweder zu einer breiten Produktpalette der Hersteller oder zu einer großen Variantenvielfalt einiger Grundprodukte. Um die Produktionsanlagen optimal auszunutzen, müssen daher oft mehrere verschiedene Bauteile auf einer Fertigungsstraße bearbeitet werden. Gleichzeitig können sich vor allem deutsche und europäische Hersteller nur durch die hohe Qualität ihrer Produkte von der internationalen Konkurrenz absetzen. Dies bedingt eine strikte Qualitätskontrolle in der Fertigung. Idealerweise werden 100% aller Produkte und Merkmale geprüft. Je früher die Erkennung von Defekten innerhalb der Produktionskette erfolgt desto geringer ist der Verlust durch unnötigen Einsatz von Ressourcen in nachfolgenden Bearbeitungsstationen.

Diese Gesamtsituation führt zu einem unmittelbaren Bedarf an industriellen Inspektionssystemen, die

- schnell sind, um möglichst viele Merkmale zu prüfen ohne den Produktionsablauf zu verlangsamen;
- flexibel einsetzbar sind, um mehrere Varianten eines Produkts zu testen;
- direkt in der Produktionslinie arbeiten, um Defekte möglichst früh zu erkennen;

---

<sup>1</sup> Alessandro Cefalu, Institut für Photogrammetrie, Universität Stuttgart, Geschwister-Scholl-Straße 24D, 70174 Stuttgart, E-Mail: [alessandro.cefalu@ifp.uni-stuttgart.de](mailto:alessandro.cefalu@ifp.uni-stuttgart.de)

<sup>2</sup> Jan Böhm, Institut für Photogrammetrie, Universität Stuttgart, Geschwister-Scholl-Straße 24D, 70174 Stuttgart, E-Mail: [jan.boehm@ifp.uni-stuttgart.de](mailto:jan.boehm@ifp.uni-stuttgart.de)

- und natürlich präzise sind, um die hohen Qualitätsstandards zu garantieren.

Der flexible Einsatz optischer Sensoren bietet die ideale Lösung dieser Anforderungen der variantenreichen Fertigung. Bereits heute haben sich zahlreiche optische Mess- und Prüfsysteme im industriellen Umfeld etabliert. Die breite Vielfalt optischer Messmethoden bedingt eine ebenso große Vielfalt von Anbietern und Systemen. Stellvertretend seien hier zwei komplementäre Verfahren genannt; dies sind zum einen die Methode der Triangulation und zum anderen die Methode der Interferometrie. Die Streifenprojektionstechnik ist ein wichtiger Vertreter triangulierender Messmethoden und hat sich bereits in vielen industriellen Aufgabenbereichen bewährt. Derartige Systeme sind auch bereits mit Erfolg direkt in Produktionsanlagen integriert und können dort ihre hohe Präzision und Geschwindigkeit unter Beweis stellen (FRANKOWSKI et al., 2001). Wie alle triangulierenden Verfahren eignet sie sich besonders zur Vermessung von Außengeometrien, d.h. möglichst konvexen Formen. Im Gegensatz hierzu können mittels Interferometrie Systeme realisiert werden, die sich ideal für die Vermessung von Innengeometrien, wie zum Beispiel Bohrungen eignen (KNÜTTEL & RAMMRATH, 2007).

In der industriellen Praxis werden solche Sensoren meist stationär betrieben. Das heißt die Sensoren werden fix zu einem bestimmten Prüfling beziehungsweise einem bestimmten Merkmal ausgerichtet. Sollen mehrere Merkmale oder verschiedene Varianten eines Produkts geprüft werden müssen die Sensoren jedoch repositioniert werden. Dies bedingt eine Rekonfiguration des Inspektionssystems und verursacht zusätzliche Kosten beziehungsweise Stillzeiten. Es ist daher erstrebenswert diese Rekonfiguration zu automatisieren. In frühen Ansätzen wurden hierzu spezielle Mess- und Prüfzentren entwickelt, die ausgerüstet mit mehreren Sensoren ein Bauteil prüfen können (BÖHM et al., 2001). Derartige spezielle Automaten lassen jedoch wiederum einiges an Flexibilität vermissen. Neuere Entwicklungen greifen daher auf Industrieroboter als Handling-System für die Sensoren zurück. Für Anwendungen mittlerer Genauigkeit sind solche Systeme bereits im industriellen Einsatz (ROOS, 2003). Für Anwendungen höchster Genauigkeit stellt eine solche Kombination aus Multisensorik und Industrieroboter eine große Herausforderung und eine aktuelle Forschungsaufgabe dar. Das Bundesministerium für Bildung und Forschung fördert daher ein Konsortium aus Industrie und öffentlichen Hochschulen unter dem Namen RoboMAP zur Entwicklung eines Systems nach den oben benannten Prinzipien.

Im folgenden Beitrag soll der erste Schritt in der Ablaufkette eines solchen flexiblen optischen Messsystems unter Einsatz einer Roboter-Aktorik zur Sensorpositionierung beschrieben werden. Dieser initiale Schritt besteht aus der Objekterkennung und der Lageerkennung des Bauteils. Dieser Erkennungsschritt ist essentiell, um im weiteren Verlauf die Sensoren mithilfe der Roboter-Aktorik auf das Bauteil beziehungsweise das Merkmal positionieren zu können. Im angedachten System wird hierzu ein monoskopisches Kamerasystem eingesetzt, welches fest im Raum positioniert ist. Wichtig ist hierbei neben der Robustheit des Verfahrens die Untersuchung der Genauigkeit einer solchen Lagebestimmung. Im Sinne einer Grob-zu-Fein Strategie muss die Genauigkeit eines Sensors mit der Messfeldgröße des nächsten Systems abgestimmt sein. Im

Rahmen des RoboMAP Projektes wird in der Stufe der initialen Objekterkennung eine Genauigkeit der Lagebestimmung von besser als 5mm angestrebt.

## 2 Lösungsansatz

Um die gestellte Aufgabe zu erfüllen, wurde der in der Bildverarbeitungssoftware HALCON angebotene ansichtsbasierte Objekterkennungsansatz nach WIEDEMANN et al. (2008) gewählt, der grob durch zwei Schritte zu beschreiben ist. In einem ersten, einmalig durchzuführenden Schritt, wird ein, als 3D-Konturmodell bezeichnetes Ansichtenmodell erzeugt. Dieses wird dann dem zweiten Schritt, der Objekterkennung, zugeführt.

Für die Generierung des 3D-Konturmodells muss die Geometrie des zu detektierenden Körpers vorab bekannt sein und in Form eines CAD-Modells vorliegen. Das CAD-Modell dient dabei der Erzeugung virtueller, zweidimensionaler Ansichten des Objekts, welche bei dem später angewendeten Suchalgorithmus in dem zu untersuchenden Bild gesucht werden.

Zur Erzeugung dieser künstlichen Konturbilder erfolgt zunächst die Definition eines sphärischen Bereichs um den Ursprung des Objektkoordinatensystems, der für die relative Lage eines Bildsensors bezüglich des Objekts in Frage kommt. Die Parametrisierung dieses Bereichs wird naheliegender Weise in sphärischen Koordinaten durchgeführt, sodass hierfür die Angabe von Wertebereichen für Länge, Breite und Radius, also von sechs Parametern, nötig ist. Zusätzlich muss, über die Angabe zweier weiterer Parameter, ein Wertebereich für die mögliche Rotation der Kamera um ihre optische Achse, welche zum Ursprung des Objektsystems gerichtet ist, angegeben werden. In dem so definierten Raum wird eine automatisch bestimmte Anzahl von Kamerastandorten verteilt und hierarchisch strukturiert. Für jeden dieser Standorte wird eine Projektion des CAD-Modells in die Bildebene der virtuellen Kamera durchgeführt, wobei die Kameraparameter der reell verwendeten Kamera herangezogen werden. Um die Rechenzeit in der späteren Suche zu reduzieren, werden Bildpyramiden, d.h. verschiedene Auflösungsstufen des reellen Bildes, verwendet. Die hierbei auftretenden Effekte werden berücksichtigt, indem auch von den künstlich erzeugten Ansichten Bildpyramiden erzeugt werden.

CAD-Modelle enthalten häufig Kanten, welche in der Realität nicht vorhanden bzw. in einer Bildaufnahme nicht als Kanten erkennbar sind, z.B. bei der Approximation gekrümmter Flächen. Diesem Umstand wird begegnet, indem bei der Erzeugung der Projektionen ein Schwellwert für den minimalen Winkel zwischen zwei Flächen angegeben werden kann. Kanten zwischen Flächen, deren Winkelabstand diesen Wert unterschreitet, werden in der Projektion ausgeblendet und somit auch nicht zur Objekterkennung herangezogen.

Der Suchalgorithmus als solcher kann weitestgehend als eine Erweiterung eines 2D-Matchings verstanden werden. Es wird in der Menge der künstlichen Ansichten im 3D-Konturmodell nach dem besten 2D-Match gesucht, wobei die hierarchische Struktur der Ansichten zur Beschleunigung des Verfahrens beiträgt. Zunächst wird auf der obersten Ebene, in der die Standorte am weitesten voneinander entfernt sind, ein Matching durchgeführt und anhand eines

Qualitätsindikator eine Menge möglicher Kandidaten für eine passende Zuordnung gebildet. Anschließend wird bei allen Kandidaten der Umgebungsbereich stufenweise verdichtet, d.h. mehr künstliche Kamerastandorte aus der Umgebung werden hinzugezogen, wobei bei jedem Schritt eine neue Suche durchgeführt und der Verdichtungsbereich verkleinert wird. Dies wird für alle Kandidaten bis zur niedrigsten Stufe vollzogen.

Nachdem die oben beschriebenen Vorgänge abgeschlossen sind, sind relative Lage und Orientierung zwischen Objekt und Kamera mit einer Genauigkeit bestimmt, die durch die im Algorithmus angewendeten Diskretisierungen, u.a. bei der Bildung des 3D-Konturmodells, eingeschränkt wird. Um die Genauigkeit zu steigern wird das 3D-Modell des Objekts zunächst anhand der bisher bestimmten Näherungslösung in das Bild projiziert. In der Bildumgebung jedes projizierten Kantenpunktes wird nach Kantenpunkten des reell aufgenommenen Objekts gesucht und anschließend, mittels einer Ausgleichung, eine verbesserte relative Lage und Orientierung geschätzt.

### **3 Experimentelle Untersuchung des Ansatzes**

#### **3.1 Versuchsaufbau**

Bei dem verwendeten Versuchskörper handelt es sich um ein einfaches, aus Kunststoff bestehendes, stufenförmiges Fräsobjekt mit zwei durchgängigen Bohrungen, einer Gesamtausdehnung von 80mm x 140mm x 50mm und matter Oberfläche. Der Ursprung des Objektkoordinatensystems wurde in der Mitte der größten, als Auflagefläche dienenden, Fläche gewählt. Die X-Achse wurde parallel zur kürzeren Seite, die Y-Achse parallel zur längeren Seite ausgerichtet. Die Z-Achse ist somit parallel zu den Bohrungsrichtungen (Abb. 1).

Da die Auflagefläche nie sichtbar und das Objekt außerdem sowohl zur XZ-Ebene als auch zur YZ-Ebene spiegelsymmetrisch ist, genügt zur Definition des für die Kamerastandorte möglichen Bereichs eine Viertelkugel. Betrachtet man die XY-Ebene als Äquatorialebene, so ist ein Wertebereich von  $0^\circ$  bis  $90^\circ$  für die Breite ausreichend. Für die Länge muss ein  $180^\circ$  oder  $-180^\circ$  umfassender Bereich gebildet werden, wobei der Winkel, aufgrund der Symmetrieeigenschaften des Körpers, wahlweise an der X- oder der Y-Achse angesetzt werden darf. Für den Radius wurde ein 10cm starker Bereich, von 1,20m bis 1,30m, festgelegt. Für die Rotation der Kamera um ihre optische Achse wurde der gesamte Wertebereich zugelassen. Das so entstandene 3D-Konturmodell hat eine Größe von ca. 167MByte. Da das Verfahren zunächst sehr langsam arbeitete und für den weiter unten beschriebenen Versuchsaufbau ein kleinerer Wertebereich für die Breite ausreichte, wurde der Bereich entsprechend auf  $60^\circ$  bis  $90^\circ$  verkleinert. Dies reduzierte die Größe der Datei auf ca. 83MByte und beschleunigte den Prozess spürbar.

Zur Bildaufnahme wurde eine monochrome uEye UI-2250-M Kamera mit einer Auflösung von 1600 x 1200 Pixeln und einem Pixelabstand von  $4,4\mu\text{m}$ , sowie ein Schneider-Kreuznach Objektiv mit einer Brennweite von 12mm verwendet. Das Kamerasystem wurde vor Beginn der Versuche kalibriert.

Ziel der Versuchsreihen war sowohl Aussagen zur Wiederholgenauigkeit, als auch zur Absolutgenauigkeit des Verfahrens machen zu können. Hierzu wurde das Objekt auf einer motorisierten Linearschiene, die sich mit ca. 1,3m Abstand im Arbeitsfeld der Kamera befand, aufgestellt. Die Schiene wurde so ausgerichtet, dass ihre Bewegungsachse mittig und nahezu horizontal im Bild abgebildet wurde. Von der Anfangsposition aus wurde der Schlitten, der über eine serielle Schnittstelle in 10 $\mu$ m-Schritten steuerbar ist, vier mal um 10cm verfahren. Von allen fünf Standpunkten des Objekts wurden jeweils zehn Bildaufnahmen gemacht. Der Vorgang wurde zweimal wiederholt, wobei das Objekt dabei jeweils um ca. 45° um die vertikale Achse gedreht wurde. So entstand pro Versuchsreihe ein 150 Aufnahmen umfassender Bildersatz. Es wurden Versuchsreihen mit verschiedenen Beleuchtungssituationen und unterschiedlichen Kamerapositionen durchgeführt.

Alle Bilder eines Satzes wurden mittels eines mit HALCON implementierten Programms untersucht, das die Bilder automatisch einliest und den oben beschriebenen Algorithmus anwendet, wobei an dieser Stelle auch mit verschiedenen, den Algorithmus steuernden, Parametern experimentiert wurde. Im Wesentlichen handelt es sich hierbei um die Parameter MinScore und Greediness, denen ein Wertebereich von 0,0 bis 1,0 zugewiesen werden kann. Ersterer steht für die Vollständigkeit der auffindbaren Objektkanten die nötig ist, um das Ergebnis als gültig zu klassifizieren. Hierbei entspricht ein höherer Wert einer vollständigeren Detektion. Diese Einstellungsmöglichkeit ermöglicht es z.B. teilweise verdeckte Objekte zu detektieren. Der Parameter Greediness steuert die Intensität und somit die Zuverlässigkeit der Suche. Ein niedriger Wert entspricht hierbei einer höheren Sicherheit.

Der zu untersuchende Bildbereich wurde eingeschränkt, indem für jede der fünf Schlittenpositionen der Bildausschnitt manuell ausgewählt wurde, der von der Trägerplattform des Schlittens eingenommen wurde. Anhand der ermittelten Werte für Lage und Orientierung wurde das CAD-Modell des Körpers in das Bild projiziert, sodass eine visuelle Vorbewertung möglich war. Außerdem wurden die Ergebnisse, sowie die zur Detektion nötige Zeit, zur späteren Auswertung gespeichert.

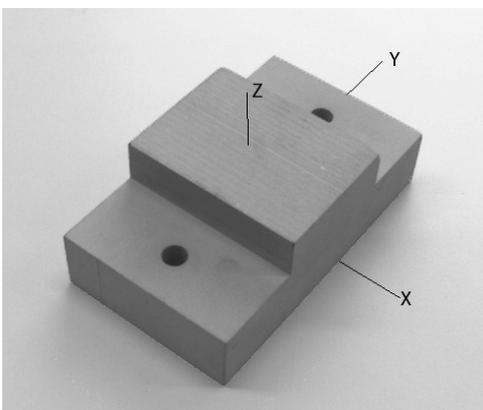


Abb. 1: Versuchskörper mit skizzierten Objektkoordinatensystem



Abb. 2: detektierter Versuchskörper mit eingeblendetem CAD-Modell

### **3.2 Erfahrungen, Probleme und Gegenmaßnahmen**

Für das RoboMAP Projekt sind, neben der geforderten Genauigkeit, zunächst eine 100%ige Detektionsquote und der Ausschluss von groben Fehlern ausschlaggebend. Im Folgenden werden die im Rahmen der Versuche gemachten Beobachtungen und Erfahrungen beschrieben.

Die Anwendung des Algorithmus auf Bilder der ersten Versuchsreihen stellte sich zunächst als nicht zufriedenstellend heraus, da das Objekt häufig nicht (in angemessener Zeit) detektierbar war. Ursächlich hierfür waren unter anderem die in den Bildern schlecht auszumachenden Kanten des Objekts. Um den Bildkontrast in den Bereichen der Objektkanten zu verbessern wurden, wie bereits erwähnt, Versuche mit verschiedenen Beleuchtungssituationen durchgeführt. Eine diffuse Beleuchtung des Objekts, über den gesamten Versuchsaufbau verteilt, stellte sich als geeignet heraus, wenn die Einstellungen der Kamera, wie z.B. die Beleuchtungszeit, adäquat angepasst wurden.

Um den Kantenkontrast im Bereich der Auflagefläche des Objekts weiter zu verbessern, wurden Versuche mit unterschiedlichen Oberflächen der Schlittenplattform unternommen. Die eigentliche Oberfläche besteht aus dunklem, reflektierendem Metall, was einerseits zu niedrigem Kontrast an den Auflagekanten und andererseits zu Lichtreflektionen führt. Sind letztere scharf abgegrenzt werden sie im Bild als Kanten detektiert und können im ungünstigsten Fall, d.h. falls sie als Objektkanten interpretiert werden, zu falschen Ergebnissen führen. Die Annahme ein heller, matter Untergrund würde Abhilfe schaffen, stellte sich nur als teilweise richtig heraus, da dieser zwar den Kantenkontrast verbessert, andererseits wiederum zu deutlicherer Abbildung von Schatten auf der Plattform führt. Diese werden naturgemäß von der Kontur des Körpers gebildet und können so, bei entsprechendem Zusammenspiel von Objektlage und Beleuchtungsrichtung, ebenfalls zu Fehlinterpretationen des Matching-Algorithmus führen. Die Verwendung eines schwarzen, matten Untergrunds verbesserte den Kantenkontrast an den unteren Kanten zwar nicht nennenswert, doch stellte sich dies als die gegenüber Fehlmessungen robusteste Lösung heraus.

Eine weitere Möglichkeit, Probleme mit schlecht sichtbaren Objektkanten im Bild zu verringern, bietet sich durch Heruntersetzen der Parameter MinScore und Greediness. Während verringern des Letzteren zu starker Zunahme der Bearbeitungszeit, aber nur zu geringfügig besseren Ergebnissen führte, erwies sich das Heruntersetzen von MinScore als nützlicher. Die Dauer der Suche verlängerte sich nicht im selben Maße und die Detektionshäufigkeit konnte deutlich gesteigert werden. Diesen Vorteil erkaufte man sich allerdings, wenn die Aufnahmen nicht optimal sind, beispielsweise bei schlechter Objektabbildung und störenden Strukturen im Bild, durch eine höhere Wahrscheinlichkeit von Fehlzugeordnungen. Eine Verbesserung der Bildqualität ist also, auch in Betracht auf die sich verlängernde Bearbeitungszeit, vorzuziehen.

Die ausschlaggebende Maßnahme stellte das Ändern der Kameraposition dar (Abb. 2). Bei den bis dahin vorgenommenen Versuchen war die Kamera in etwa mittig über der Schiene montiert. Dies führte wenn sich das Objekt direkt unter der Kamera befand dazu, dass quasi nur die parallel zur XY-Ebene des Objektkoordinatensystems liegenden Objektflächen abgebildet

wurden und sich so die Kanten der obersten Stufe im Bild kaum vom restlichen Körper abhoben. In dieser Situation fand besonders häufig keine Detektion statt. Auch wirkte der Schatten der obersten Stufe, der auf die darunter liegende Stufe fiel, oft verfälschend auf das Ergebnis. Bei schräger Sicht auf die Schiene bilden sich dagegen immer genügend Flächen des Objekts im Bild ab, sodass eine Detektion bei korrekter Parameterwahl immer möglich war. Auch die Qualität der Ergebnisse verbesserte sich deutlich.

Letztendlich müssen also im Wechselspiel zwischen Geometrie und Oberflächeneigenschaften des Objekts und seiner Umgebung, sowie Beleuchtungssituation, Bildaufnahme und Matching möglichst viele Einflüsse optimiert und, wenn möglich, konstant gehalten werden, um zuverlässig gute Ergebnisse zu erzielen. Hierbei stellten sich äußere Einflüsse als dominierend heraus.

### 3.3 Evaluierung

Die im Folgenden präsentierten Ergebnisse entsprechen der bis dato erfolgreichsten Versuchsanordnung, die alle zuvor beschriebenen Maßnahmen vereinigt und bei der unsere vorrangigen Ziele vollständig erfüllt wurden. Bei der Untersuchung der gespeicherten Ergebnisdateien wurden alle zu einer Position und Objektausrichtung gehörenden Ergebnisse gemittelt und entsprechende Standardabweichungen gebildet, sodass eine Aussage über die Wiederholgenauigkeiten getroffen werden konnte (Abb. 3).

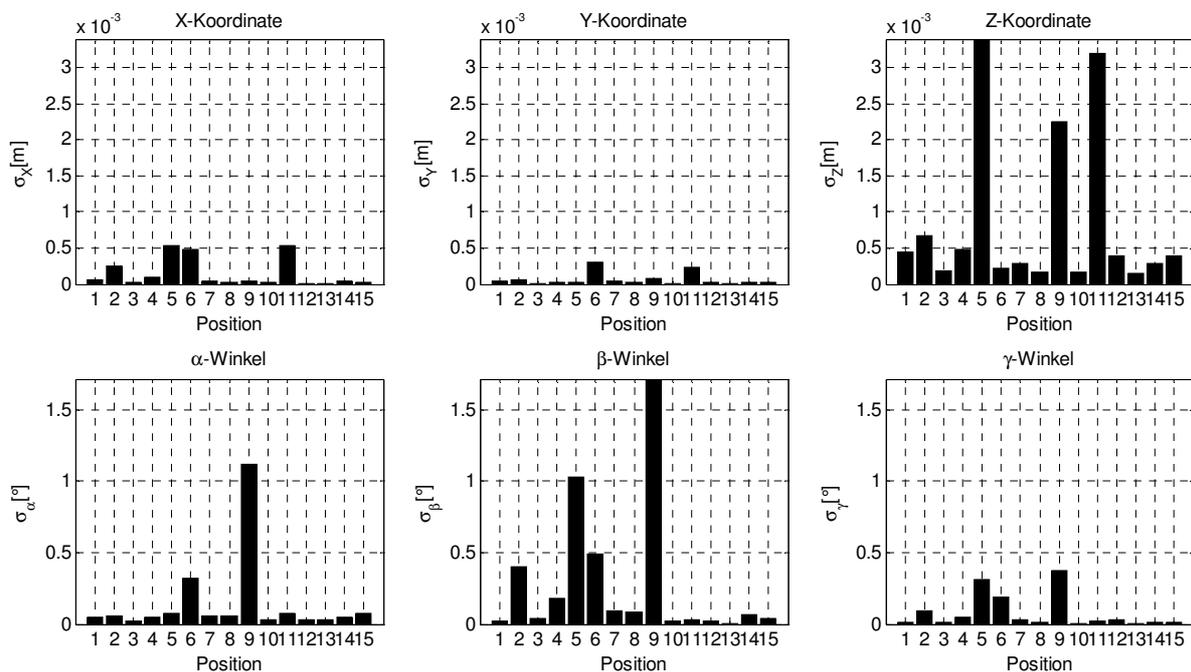


Abb. 3: ermittelte Standardabweichungen für Lage (oben) und Orientierung (unten) mit Rotationsreihenfolge  $\alpha$ ,  $\beta$ ,  $\gamma$  (entspricht Rotation um X-, Y- und Z-Achse)

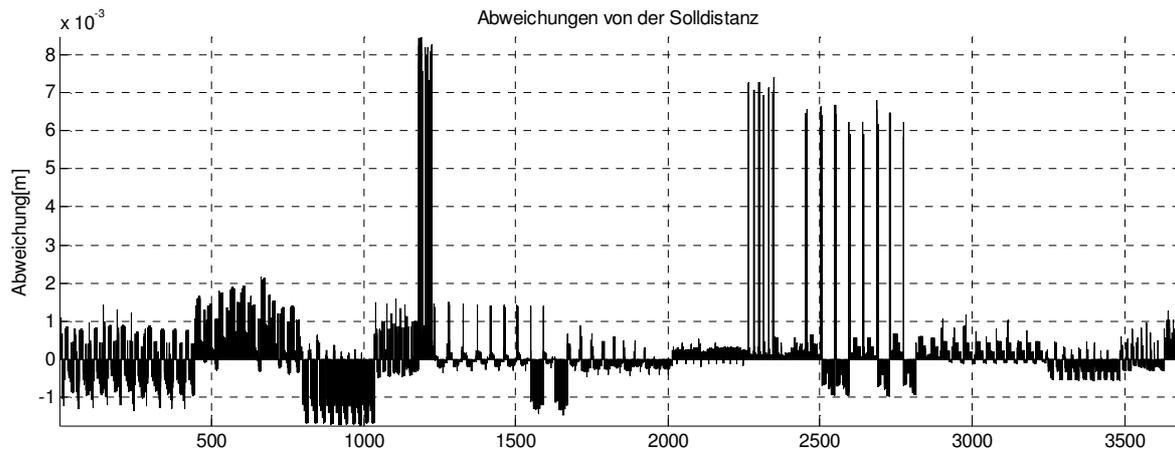


Abb. 4: Darstellung der ermittelten Distanzabweichungen

Diese zeigten sich deutlich abhängig von der Qualität der Bildaufnahmen. Außerdem konnte deutlich erkannt werden, dass Werte, deren Abweichungen sich hauptsächlich parallel zur Bildebene des Kamerasystems auswirken, wesentlich stabiler bestimmbar sind als diejenigen deren Fehler sich eher entlang der optischen Achse der Kamera entfalten.

Die absolute Sollposition des Objektes im Kamerasystem ist in unserem Versuchsaufbau nicht bekannt. Um dennoch eine Aussage über die absolute Genauigkeit des 3D-Matchings treffen zu können, wurde stattdessen die bekannte Lageänderung herangezogen. Alle berechenbaren Distanzwerte der Versuchsreihe wurden ermittelt und mit ihrem Sollwert verglichen. Hierbei mussten drei Gruppen von je 50 Ergebnissen gebildet werden, da das Objekt dazwischen neu positioniert wurde. So ergaben sich dreimal 1225, also insgesamt 3675 Abweichungswerte (Abb. 4).

Betrachtet man die drei Gruppen getrennt werden mittlere Sollabweichungen von 0,08mm, 0,01mm und 0,11mm bei Standardabweichungen von 1,3mm, 0,7mm und 1,0mm erreicht. Im Ganzen liegt der Mittelwert bei 0,07mm bei einer Standardabweichung von 1,0mm. Diese Angaben beziehen sich auf den Ursprung des Objektkoordinatensystems. Da dieser allerdings von Fehlern in der bestimmten Orientierung unberührt bleibt, wurden zusätzlich drei Eckpunkte des Körpers (je Horizontalebene ein äußerer Punkt) auf dieselbe Weise untersucht. Die Standardabweichungen an diesen Punkten sind, wie zu erwarten, etwas schlechter. Bei Betrachtung aller drei Gruppen liegt das Maximum bei einer Standardabweichung von 1,2mm. Bei Trennung nach Gruppen liegt es hingegen bei 1,5mm, wobei dieser für die Ergebnisse der ersten Gruppe erreicht wird. Dies stimmt mit den Resultaten für den Objektursprung überein und kann über die im Schnitt instabilere Bestimmung des Rotationswinkels  $\beta$  (Rotation um Y-Achse), sowie der Position in Richtung der X-Achse in dieser Bildgruppe erklärt werden.

Ein Punkt der derzeit definitiv noch verbesserungsbedürftig ist, ist die für die Detektion nötige Zeit. Bei der hier vorgestellten Testreihe schwankt diese zwischen ca. 1 bis ca. 5 Sekunden und scheint abhängig von der sichtbaren Objektgeometrie. Das Ziel für die initiale Objekterkennung

im RoboMAP-Projekt liegt bei einer Dauer von maximal einer Sekunde, da für den gesamten Messablauf nur etwa 25 Sekunden zur Verfügung stehen. Eine Beschleunigung kann vor allem erreicht werden, wenn der Parameter MinScore hoch gewählt werden kann. Dies bedeutet, dass möglichst viele Kanten des Objekts im Bild auffindbar sein müssen, was wiederum den hohen Stellenwert qualitativ hochwertiger Bildaufnahmen, vor allem durch Erzeugung geeigneter Lichtverhältnisse, unterstreicht.

### 3.4 Weiterführende Versuche

Die Umsetzung des Verfahrens auf einen realen Zylinderkopf stellt sich bis dato insofern als schwierig heraus, als dass zunächst das zugehörige CAD-Modell, besonders aufgrund der vielen Freiformflächen, sehr komplex ist. Dies macht die Verarbeitung der Daten recht mühselig. Sowohl die Erzeugung des 3D-Konturmodells, als auch das Matching würden bei Verwendung der Originaldaten eine extrem lange Bearbeitungszeit beanspruchen. Ein Großteil des Informationsgehalts des Modells liegt im Inneren des Objekts und ist somit für das Matching ohnehin unnötig. Aus diesen Gründen wurde das Modell auf zwei seiner einfachsten, aber dennoch markanten Flächen reduziert. Die beiden Flächen stehen senkrecht aufeinander, sind eben und besitzen eine eindeutige Kontur (Abb. 5).

Zusätzlich erschwert die Oberflächenbeschaffenheit des Körpers die Bildaufnahme. Die hochkomplexe Kontur sowie der Wechsel zwischen matten und reflektierenden Flächen erschweren es sehr, eine adäquate Beleuchtung im gesamten Versuchsraum zu etablieren. Ein Kompromiss zwischen Schattenwürfen und Reflektionen muss an dieser Stelle gefunden werden. Nichtsdestotrotz zeigen die ersten Versuche, dass auch für diesen Körper gute Ergebnisse erzielbar sein werden (Abb. 6). Probleme zeigen sich derzeit nur bei ungenügender Beleuchtung der eindeutigen Merkmale des Objekts, denn die restlichen Merkmale, wie z.B. die Kalotten, sind einander oft sehr ähnlich oder gar von identischer Form. Sie können somit keine eindeutige Lageerkennung garantieren. Es zeigt sich also wieder die große Bedeutung der Aufnahmesituation.

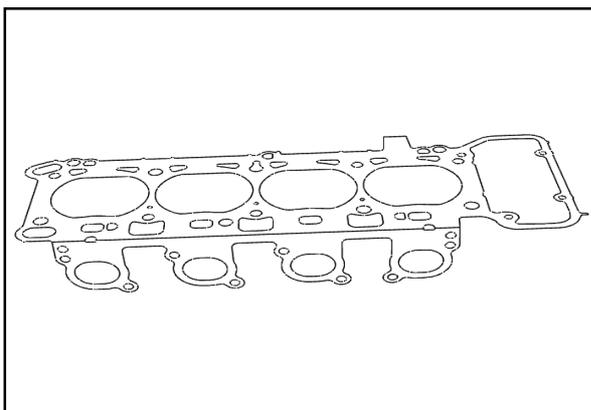


Abb. 5: Darstellung des stark reduzierten CAD-Modells des Zylinderkopfes

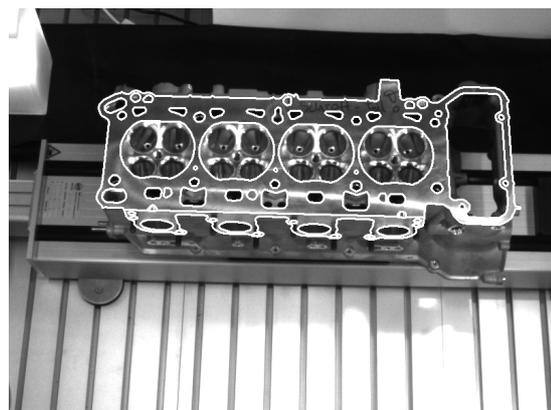


Abb. 6: korrekt detektierter Zylinderkopf mit eingeblendeter Projektion des reduzierten CAD-Modells

## 4 Fazit und Ausblick

Die bisherigen Versuchsreihen zeigen, dass es mit dem gewählten Ansatz durchaus möglich ist die im RoboMAP-Projekt gestellten Ziele zu erreichen. Sowohl Zuverlässigkeit, als auch Genauigkeit sind am Versuchskörper nachgewiesen worden. Auch am reellen Prüfobjekt konnten erste Erfolge verzeichnet werden, sodass mit einem erfolgreichen Abschluss des Teilprojektes gerechnet werden kann. Voraussetzung bleibt das Schaffen einer tauglichen Arbeitsumgebung innerhalb der Robotermesszelle. Dies umfasst auch Maßnahmen zur Selbstkontrolle des Kamerasystems. Hierzu sind derzeit Messmarken innerhalb des Blickfelds der Kamera geplant, deren Pixelkoordinaten auf Veränderung geprüft werden sollen.

**Danksagung** Das diesem Bericht zugrundeliegende Vorhaben wurde mit Mitteln des Bundesministeriums für Bildung und Forschung unter dem Förderkennzeichen 13N9482 gefördert. Die Verantwortung für den Inhalt dieser Veröffentlichung liegt beim Autor.

## 5 Literaturverzeichnis

WIEDEMANN, C., ULRICH, M. & STEGER, C., 2008: Recognition and Tracking of 3D Objects.

Pattern Recognition, Lecture Notes in Computer Science, Volume 5096, Springer Verlag, S. 132-141

FRANKOWSKI, G., CHEN, M. & HUTH, T., 2001: Optical Measurement of the 3D-Coordinates and the Combustion Chamber Volume of Engine Cylinder Heads. Proceedings of „Fringe 2001“, S. 593-598

KNÜTTEL, A. & RAMMRATH, F., 2007: Spectral Coherence Interferometry (SCI) for Fast and Rugged Industrial Applications. Lasers and Electro-Optics and the International Quantum Electronics Conference. CLEOE-IQEC 2007. European Conference on

ROOS, E., 2003: Method and device for calibrating robot measuring stations, manipulators and associated optical measuring devices. United States Patent 6615112

BÖHM, J., GÜHRING, J. & BRENNER, C., 2001: Implementation and Calibration of a Multi Sensor Measuring System. 'Photonics West, Videometrics VII', Vol. 4309, SPIE, San Jose, USA