



## System zur Erzeugung hochauflösender Stereobilder für die Nahbereichs-Objektrekonstruktion

Andreas Gaich <sup>1</sup>, Amer Sehovic <sup>2</sup>, Michael Gruber <sup>3</sup>

<sup>1</sup> *Institut für maschinelles Sehen und Darstellen, Technische Universität Graz. A-8010 Graz, Münzgrabenstraße 11*

<sup>2</sup> *Institut für maschinelles Sehen und Darstellen, Technische Universität Graz. A-8010 Graz, Münzgrabenstraße 11*

<sup>3</sup> *Institut für maschinelles Sehen und Darstellen, Technische Universität Graz. A-8010 Graz, Münzgrabenstraße 11*

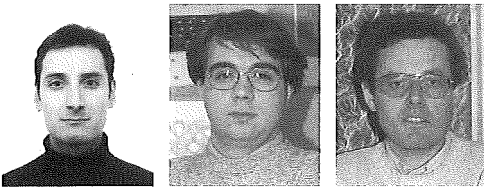
VGI – Österreichische Zeitschrift für Vermessung und Geoinformation **86** (4), S. 194–201

1998

BibT<sub>E</sub>X:

```
@ARTICLE{Gaich_VGI_199827,  
Title = {System zur Erzeugung hochauflösender Stereobilder für die  
Nahbereichs-Objektrekonstruktion},  
Author = {Gaich, Andreas and Sehovic, Amer and Gruber, Michael},  
Journal = {VGI -- Österreichische Zeitschrift für Vermessung und  
Geoinformation},  
Pages = {194--201},  
Number = {4},  
Year = {1998},  
Volume = {86}  
}
```





## System zur Erzeugung hochauflösender Stereobilder für die Nahbereichs-Objektrekonstruktion

Andreas Gaich, Amer Sehovic und Michael Gruber,  
Graz

### Zusammenfassung

Der vorliegende Beitrag beschreibt die Entwicklung eines Systems zur Erfassung von Oberflächendaten bestehender Objekte anhand von digitalen Präzisionsbildern. Die treibende Anwendung für dieses Projekt war die Rekonstruktion von Kühlwasserkernmodellen und Kanalkernen von Verbrennungsmotoren. Das Meßsystem wurde für Objekte bis zu einer räumlichen Dimensionierung von  $500 \times 150 \times 150 \text{ mm}^3$  vorgesehen. Das System besteht aus einem Aufnahmegerät mit einer digitalen Zeilenkamera, einer mit der Kamera mitgeführten Beleuchtungsanlage, einer Kalibriereinrichtung und einem Objektträger sowie Softwarekomponenten zur Steuerung des Aufnahmevorganges, zur Bildverarbeitung und zur Rückführung der Objektoberfläche. Der Rekonstruktionsvorgang basiert auf dem Prinzip der Stereoskopie und greift auf Bilddaten mit einem Format von bis zu  $5000 \times 14000$  Bildelementen zu.

### Abstract

The following contribution describes a system developed for acquiring surface data from existing objects based on high precision digital images. The propelling application for this work was the reconstruction of water cooling jackets and intake ports from combustion engines. The system is capable to take objects up to a size of  $500 \times 150 \times 150 \text{ mm}^3$ . It is composed of an imaging unit with a digital line-sensor camera, a lighting system carried along with the camera, an object fixation device, and software components for imaging control, image processing, and surface reconstruction. The object reconstruction is based on stereoscopy and uses stereo images with a size up to  $5000 \times 14000$  pixel each.

### 1. Einleitung

Die Formrekonstruktion bestehender Objekte ist ein aktuelles Thema in verschiedenen Bereichen der erzeugenden Industrie, der Medizintechnik oder des Reverse Engineering. Die Aufgabenstellung besteht darin, die Oberfläche von Objekten zu erfassen, digital zu modellieren und dem computerunterstützten Entwicklungs- oder Produktionsprozeß zuzuführen. Eine konkrete Anwendung von digitalen Objektmodellen besteht im Motorenbau. Um Optimierungs- und Simulationsaufgaben durchführen zu können, werden unter anderem die Oberflächendaten von Kühlwasserkernen und Kanalkernen benötigt. Diese bestehen vorerst nicht oder nur unzulänglich in digitaler Form, werden jedoch als physikalisches Objekt aus dem Formenbau beige stellt. Die Rekonstruktion und Rückführung der Oberfläche dieser Kernkastenmodelle ist somit ein unumgänglicher Schritt vor der digitalen Weiterverarbeitung.

Vor dem Hintergrund dieser Anwendung wurde in Zusammenarbeit mit dem Grazer Unternehmen AVL List GmbH ein Objektscanner entwickelt, der die Erfassung derartiger Objekte weitgehend automatisch und mit ausreichender Qualität gestattet. Das Meßprinzip des hier vor-

gestellten Systems beruht auf der Auswertung von digitalen Bilddaten. Diese werden mit einer digitalen Zeilenkamera erzeugt und stellen die Quelldaten für die nachfolgenden Schritte der Bildverarbeitung und der Oberflächenrückführung dar. Die Kameraführung des Objektscanners erlaubt eine translatorische Bewegung der Kamera über dem Objekt sowie eine Verschwenkung der Kamera um die Querachse. Durch diese konstruktiven Maßnahmen gelingt es, Bilddaten in einem Format von bis zu  $5000 \times 14000$  Bildelementen für drei Blickrichtungen zu erzeugen und daraus Oberflächendaten einer Objektseite abzuleiten. Durch Rotation des Objektes in der Längsachse wird die gesamte Objektoberfläche in mehreren Schritten erfaßt und rekonstruiert.

Die Qualität der erzeugten Oberflächendaten wurde in mehreren Experimenten nachgewiesen und Lagefehler in einer Größenordnung von  $0,05 \text{ mm}$  bis  $0,1 \text{ mm}$  festgestellt. Bei einer Apertur eines Bildelementes am Objekt in der Größe von  $0,05 \text{ mm}$  entspricht das einer Genauigkeit von 1 bis 2 Bildelementen. Bezogen auf das Meßvolumen mit einer Ausdehnung von  $500 \times 150 \times 150 \text{ mm}^3$  wird demnach eine relative Meßgenauigkeit von 1:5000 bis 1:10000 erreicht.

Diese Ergebnisse werden als vorläufige Gebrauchswerte betrachtet. Weitere Untersuchungen zur Verbesserung der Genauigkeit wurden durchgeführt und lassen eine Steigerung der Meßgenauigkeit um 30–50% erwarten.

Objektscanner und Software wurden am Institut für Maschinelles Sehen und Darstellen der Technischen Universität Graz im Rahmen eines zweijährigen Projektes entwickelt und hergestellt.

## 2. Systemkomponenten:

Das hier vorgestellte System zur Erfassung von Oberflächendaten existierender Objekte besteht im wesentlichen aus dem Objektscanner zur Erzeugung von Präzisionsbildern und mehreren Softwarekomponenten, die jeweils Teilaufgaben im Rekonstruktionsprozeß lösen.

### 2.1. Objektscanner

Der Scanner selbst besteht aus zwei stabilen Stahlrahmen, die übereinander montiert sind. Im oberen Rahmen befinden sich die digitale Zeilenkamera in einer schwenkbaren Halterung, sowie die Vorschubeinrichtung für die translatorische Bewegung. Der untere Rahmen beinhaltet das Meßvolumen mit vier Meßlinealen aus Glas zur Bestimmung der Kamerabewegung, die Objekthalterung mit einer Dreheinrichtung und die mit der Kamera mitgeführte Beleuchtungseinrichtung (siehe Abb. 1). Die Kamera besteht aus einem panchromatischen CCD – Zeilensensor SONY ILX506 mit 5000 Bildelementen a.  $7\ \mu\text{m} \times 7\ \mu\text{m}$  und einem Kleinbild-Zoomobjektiv NIKON Nikkor 35–80 mm. Die Abbildung des Meßvolumens erfolgt unter einem Bildmaßstab zwischen 1:7 und 1:9 wobei Objektaperturen von 0,050 mm bis 0,060 mm entstehen. Die Vorschubeinrichtung führt die Kamera auf einer Länge von 700 mm über das Objekt und gestattet eine minimale Schrittweite von 0,0125 mm. Durch Zusammenfassen von 4 Schritten entsteht ein Zeilenabstand von 0.050 mm bei der Aufnahme und führt zu nahezu quadratischen Aperturen im digitalen Bild. Mit der Schwenkeinrichtung werden Kamerablickrichtungen zwischen  $-15^\circ$  und  $+15^\circ$  erreicht, wobei sich eine Aufnahmekonfiguration mit drei Blickrichtungen von  $-15^\circ$ ,  $0^\circ$  und  $+15^\circ$  (d.h. Vorblick, Nadirblick und Rückblick) als sinnvoll erwiesen hat.

Nachfolgende Aufstellung gibt einen Überblick über die Hauptkomponenten des Objektscanners:

- panchromatische CCD-Zeilenkamera mit 5000 Sensorelementen
- schrittmotorgesteuerter Spindelantrieb zur translatorischen Kamerabewegung
- verschwenkbare Kamerahalterung
- mit der Kamera mitgeführter Beleuchtungswagen
- Objektfixierung mit schrittmotorgesteuerter Rotationsmöglichkeit
- vier Kalibrierlineale mit Paßpunktmuster
- geschweißter, pulverbeschichteter Stahlrahmen zur Gesamtstabilisierung
- Außenverkleidung aus transparentem Kunststoff
- Schrittmotorsteuerung und Kontroll-PC

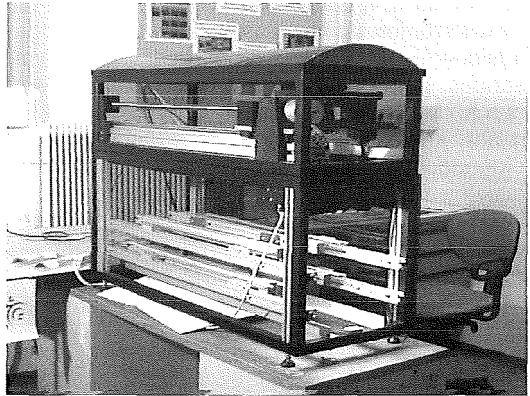


Abb. 1: Prototyp des Objektscanners am Institut für Maschinelles Sehen und Darstellen. Im oberen Bereich ist die Antriebsspindel für die Bewegung der Kamera zu erkennen. Im unteren Teil, dem Aufnahme- bzw. Meßvolumen, sind Kalibrierlineale zur Bestimmung der Kamerabahn angebracht.

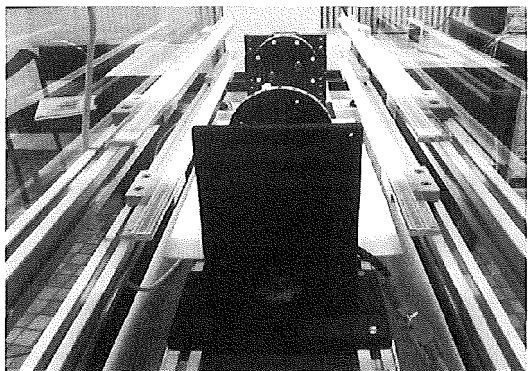


Abb. 2: Blick in das Meßvolumen. An beiden Seiten sind jeweils zwei Kalibrierlineale erkennbar. Nach der Vermessung der darauf abgebildeten Paßpunkte, spannen die Lineale das Meßvolumen auf. Dazwischen befindet sich die Halterung mit der Möglichkeit zur automatischen Meßobjekt-Rotation.

## 2.2. Systemsteuerung

Der Betrieb des Scanners erfolgt über einen Steuerrechner (Pentium 133 Mhz, 1,2 GB HDD) mit einer Bilderfassungskarte zur Übernahme der Bilddaten sowie einer Steuereinheit für die Vorschubeinrichtung und die Objektrotation. Das Ansprechen der Einheit und die Übermittlung von Steuerkommandos für die angeschlossenen Schrittmotoren erfolgt über die serielle Schnittstelle während die Bilddatenübertragung über ein geschirmtes Kabel und eine eigene Einsteckkarte auf den Rechner erfolgt.

Die Betriebssoftware des Systems steuert den gesamten Ablauf der Bilddatenerfassung. Für jede einzelne Aufnahme werden Blickrichtung, Startpunkt und Länge des Vorschubs sowie die Grauwertinformation des digitalen Bildes abgespeichert. Die Ausführung des Kameravorschubs und der Rotation des Objektes wird durch die Ansteuerung von Schrittmotoren erreicht. Zusätzliche Funktionen erlauben die radiometrische Kalibrierung des Sensors durch Erfassung des Dunkelstroms und der Lichtverteilung für den gesamten Bereich der aktiven CCD-Elemente.



Abb. 3: ISEL-Schrittmotorsteuerung für die Bewegung der Kamera und des Meßobjekts (links). Monitor zur Überwachung des Aufnahmevorgangs (rechts).

## 3. Funktionsprinzipien

### 3.1. Orientierung und Auswertung

Die Hauptkomponente der Systemsoftware besteht aus Programmen für die Orientierung der Kamera und die darauf basierende Auswertung der digitalen Bilddaten. Für die Orientierung der Kamera und damit die Bestimmung der Parameter der Kamerabahn während der Aufnahme wurde ein Algorithmus implementiert, der dem Prinzip des Bündelausgleichs folgt. Die eindimensionale Bildzeile bildet dabei mit dem optischen Zentrum eine Ebene, in der die Kollinearität zwischen Objektpunkten, Bildpunkten und dem Projektionszentrum formuliert werden

kann. Durch die bereits erwähnten Meßlineale wird erreicht, daß für jede Bildzeile genügend Objektinformation für eine geometrisch stabile Lösung zur Verfügung steht.

Durch Erzeugen von mindestens zwei Aufnahmen mit jeweils unterschiedlicher Blickrichtung entstehen Streifenbilder mit horizontalen Parallaxen und damit die Grundlage für eine stereoskopische Formerfassung (siehe Abbildung 4).

Die Messungen in den Bildern erfolgen automatisch durch Methoden der digitalen Bildverarbeitung. Diese umfassen die Bestimmung der Markierungen an den vier Kalibrierlinealen (siehe [15]) sowie die Suche nach geeigneten Oberflächenmerkmalen am Objekt (siehe [9]) und die Messung identischer Punkte in den korrespondierenden Aufnahmen durch Bildkorrelation (siehe [1][8]). Die Berechnung von Objektkoordinaten erfolgt durch Bildtriangulation (siehe [11][19]). Durch Mitbestimmung der Rotationsachse der Objekthalterung und des aktuellen Stellwinkels wird erreicht, daß jede Teilauswertung in ein einheitliches Koordinatensystem transformiert werden kann, womit eine umfassende dreidimensionale Punktwolke erreicht wird.

### 3.2. Oberflächenrückführung

Der nunmehr vorliegende dreidimensionale Punkthaufen ist das Ergebnis der Bildauswertung und beschreibt das betroffene Objekt nicht eindeutig. Ein weiterer Verarbeitungsschritt zur Formrekonstruktion, die sog. Rückführung der Oberfläche (siehe [2][4][6][10][13][14][16]), ist notwendig. Für beliebige dreidimensionale Punkthaufen, speziell bei unregelmäßig verteilten Punkten, ist dieses Problem nicht eindeutig lösbar und kann daher mit automatischen Methoden nur unvollständig bearbeitet werden. Durch die Einbeziehung der Aufnahmeconfiguration des Objektscanners in die Oberflächenrückführung wurde erreicht, daß für jede Einzelaufnahme die Vermaschung des Punkthaufens im Bildraum durchgeführt und damit als zweidimensionales Problem behandelt werden kann. Durch diese aufnahmebedingte Segmentierung des Gesamtdatensatzes wurde weiters erreicht, daß eine manuelle Nachbehandlung der automatisch erstellten Vermaschung wesentlich erleichtert wird.

Die Implementierung dieser Verarbeitungsschritte erfolgte in einem weiteren Computerprogramm mit einer graphischen Benutzerschnittstelle für die manuelle Datennachbearbeitung. Die Ausgabe der Oberflächendaten erfolgt in einem graphischen Datenformat (siehe [17]).

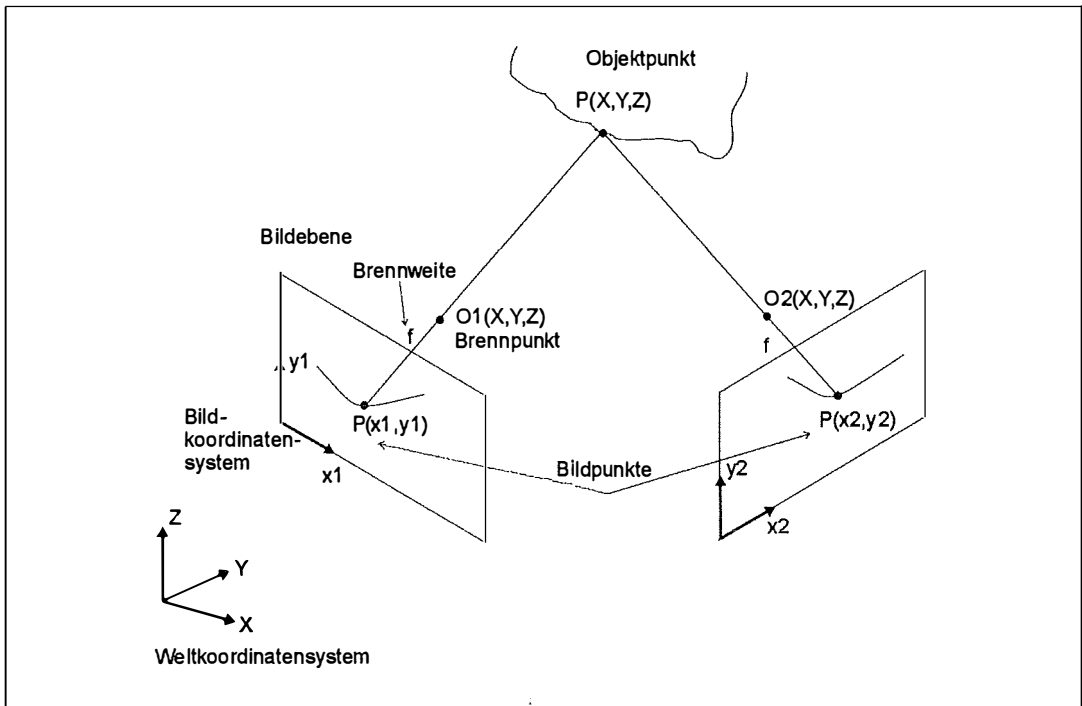


Abb. 4: Prinzip der Formrekonstruktion einer Objektoberfläche durch stereoskopische Bildauswertung. Durch die Bestimmung korrespondierender Bildpunkte und der Kameraorientierungen können die zugehörigen Sehstrahlen rekonstruiert und zum Schnitt gebracht werden.

### 3.3. Erfassung von Präzisionsbildern

Die exakte Modellierung des optischen Aufnahmesystems einer Kamera (siehe Abb. 3) ist die Grundlage der geometrischen Qualität der damit erzeugten Bilddaten. Bei Flächenkameras wird dies durch die Bestimmung der inneren Orientierung und der Objektivverzeichnung erreicht (siehe [3]). Durch mechanische Vorkehrungen am Kameragehäuse wird zusätzlich gewährleistet, daß diese Parameter zumindest für den Gebrauchszeitraum konstant bleiben.

Bei Verwendung eines Zeilensensors entsteht ein Bild erst durch eine relative Lageänderung zwischen Sensor, Objektiv und Objekt, wobei mehrere Varianten möglich sind. In jedem Fall muß eine mechanische Bewegungseinrichtung realisiert werden. Die Bestimmung der Parameter der während des Aufnahmevorganges ausgeführten Bewegung ist für die geometrische Qualität der erzeugten Bilddaten entscheidend.

Für das hier beschriebene Aufnahmesystem wurde eine translatorische Bewegungseinrichtung konstruiert, die Sensor und Objektiv gemeinsam über dem Objekt verschiebt und damit Flächenbilder als Folge von einzelnen Zeilenbildern erzeugt.

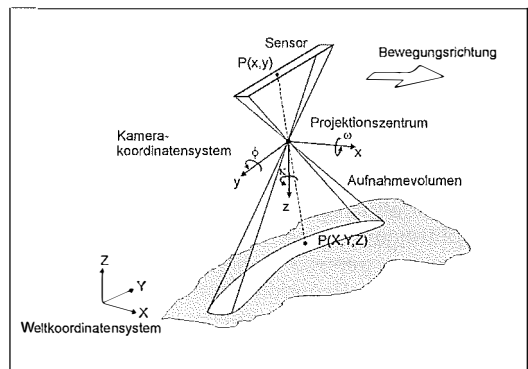


Abb. 5: Prinzip der Bilderfassung mit einem Zeilensensor. Die Winkel im Kamerakoordinatensystem deuten Bewegungsstörungen an.

Bei der Entwicklung des Objektscanners wurde auf eine hohe mechanische Qualität der Kameraführung verzichtet und damit die Herstellung kostengünstig und einfach gestaltet. Um die geometrische Qualität der so erzeugten Bilddaten trotzdem zu garantieren, wurde eine Kalibriereinrichtung vorgesehen, die aus vier Meßlinealen besteht und das Meßvolumen des Scanners umschreibt. Die Meßlineale und deren nach einer Initial-Kalibrierung (siehe [18]) räum-

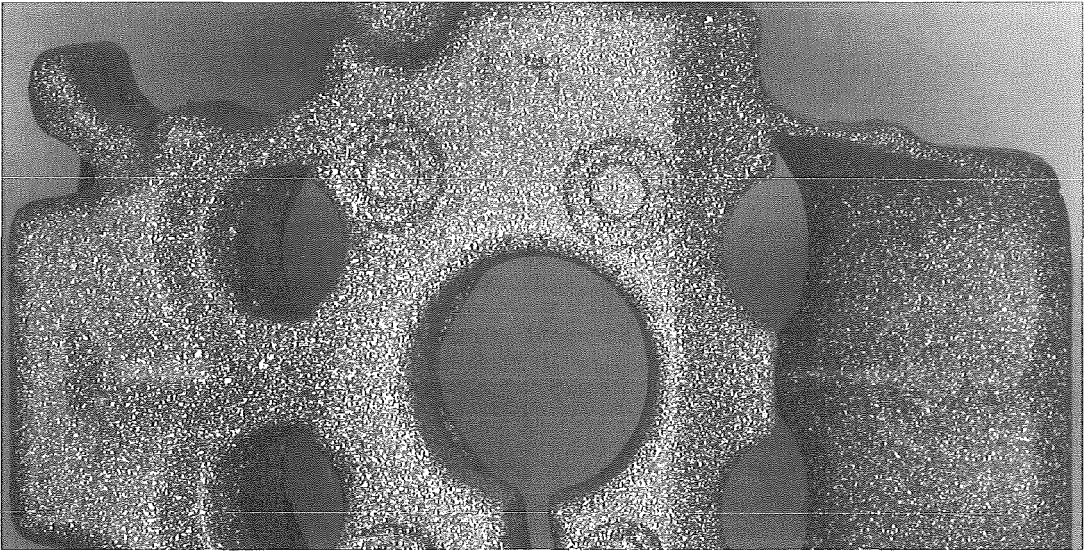


Abb. 6: Bildausschnitt mit dem Meßobjekt. Die geometrische Auflösung am Objekt beträgt 0,050 mm. Die Originalgröße des Ausschnitts beträgt 3000x1600 Pixel. Die Textur erlaubt eine Bestimmung von Oberflächenmerkmalen im Abstand von etwa 0,25 mm.

lich bekannten Markierungen werden bei jeder Aufnahme mit abgebildet und erlauben so die Rekonstruktion der Kamerabahn aus Bildkoordinatenmessungen und den daraus formulierten Kollinearitätsgleichungen. Durch die Anordnung der Meßlineale in zwei Ebenen wird erreicht, daß für jede Bildzeile eine stabile Lösung anhand der vorliegenden Information im Objektraum erzielt wird.

Da diese Messungen nicht in einer einzelnen Bildzeile, sondern immer in einer Gruppe mehrerer benachbarter Zeilen stattfinden, gelingt es nicht unmittelbar für jede Bildzeile unabhängige Beobachtungen zu erstellen. Unter der Annahme eines genügend glatten Bahnverlaufes wurden daher Pseudobeobachtungen eingeführt, die durch lineare Interpolation zwischen den Beobachtungen im Bildraum und zwischen den bekannten Markierungen der Kalibriereinrichtung im Objektraum berechnet werden. Die

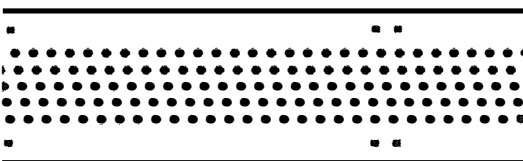


Abb. 7: Ausschnitt einer Scanner-Aufnahme des Kalbrieramusters zur Bestimmung der Kameraposition. Die Mittelpunkte der Meßpunkte können mit 0,1 Pixel lokalisiert werden. Bei der gegebenen Geometrie entspricht dies 0,005 mm.

Rekonstruktion der äußeren Orientierung der Kamera gelingt nun für jede Bildzeile (siehe Abbildung 7, [7]).

Die Bestimmung der Bildkoordinaten der Kalbrierungsmarken hat einen wesentlichen Einfluß auf die Qualität der Bildgeometrie und der davon abgeleiteten Orientierungsdaten. Es wurde daher Wert auf eine möglichst präzise, robuste und von lokalen Störeinflüssen (z.B. Verschmutzung der Markierung) wenig beeinträchtigte Methode gelegt. Für die automatische Erkennung der Markierungen wurde ein Zentrumsalgorithmus mit adaptivem Schwellwert implementiert, der eine Genauigkeit besser als 0,1 Pixel erreicht (siehe [15]). Die Robustheit des Verfahrens wird durch Überbestimmung erreicht, indem jedes Kalbrierlineal fünf Reihen mit Markierungen aufweist. Es kann daher bereits anhand der Bildkoordinatenmessungen eine Qualitätskontrolle durchgeführt bzw. ein eventueller grober Fehler erkannt werden.

Durch die Anordnung der Kalbrierlineale als Umschreibung des Meßvolumens wird in jeder Aufnahme eine optimale Verteilung der Kalbrierungsmarken erreicht. Die Messungen am Objekt liegen stets innerhalb dieser Marken.

### 3.4. Kalibrierung

Die Kalibrierung der Kameraparameter sowie der Objektivverzeichnung wurde aus geeigneten Bilddaten abgeleitet und wird als bekannt vorausgesetzt.

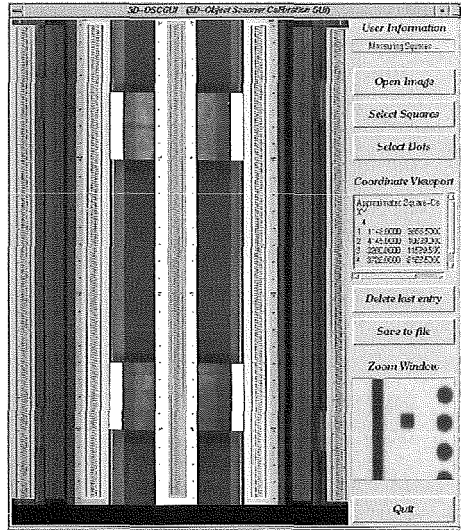
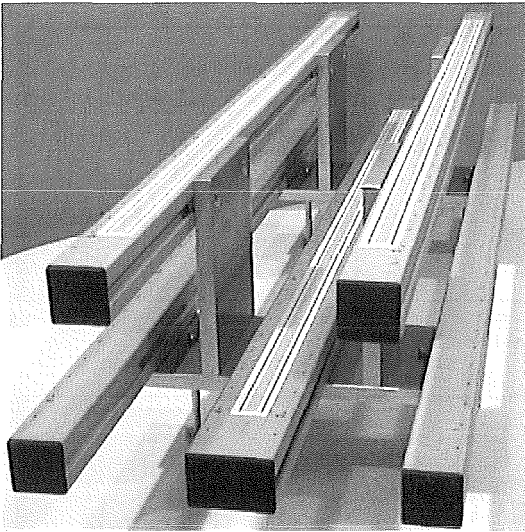


Abb. 8: Kalibrierobjekt zur Initial-Kalibrierung des Objektscanners (links). Die Objektgeometrie wurde zuvor mit einer Koordinatenmeßmaschine (CMM - Zeiss UMES) bestimmt. Benutzerschnittstelle für die Initial-Kalibrierung mit eingblendeter Kalibrieraufnahme (rechts).

Für eine wiederholbare Kalibrierung des Scanners wurde ein geeignetes dreidimensionales Kalibrierobjekt entworfen und vermessen. Durch Aufnahme dieses Objektes mit dem Scanner kann einerseits auf die Parameter der Kamera-bahn geschlossen werden und andererseits die Lage der Kalibrierlineale neu bestimmt werden. Die dazu erstellte Software führt eine Initial-Kalibrierung durch und erlaubt zusätzlich eine Kontrolle der Messungen durch die graphische Benutzerschnittstelle mit Funktionen zur Darstellung der erfaßten Bilddaten und der durchgeführten Messungen.

#### 4. Ergebnisse und Ausblick

Mit verschiedenen Tests bzw. Referenzobjekten wurde die erreichte Genauigkeit des Rekonstruktionsergebnisses geprüft und ist noch immer Gegenstand von Untersuchungen zur eventuellen Verbesserung der Resultate:

- Objekt I: Glasplatte, mit Punktmuster auf wie den Kalibrierlinealen; dabei ist das Auffinden korrespondierender Punkte am besten möglich und daher ist die höchste Genauigkeit zu erwarten
- Objekt II: Glasplatte mit aufgebracht Textur wie beim Meßobjekt - entspricht dem Meßfall; Anmerkung: es kann nur die Differenz der rekonstruierten Punktwolke von einer idealen Ebene untersucht werden, da die absoluten Koordinaten einzelner Merkmalspunkte im Raum nicht bekannt sind, es wurde in die rekonstruierten Oberflächenpunkte eine

Ebene interpoliert und der Normalabstand untersucht

- Objekt III: Kalibrierobjekt als Meßobjekt; die korrespondierenden Punkte werden aufgrund anderer Bildverarbeitungsoperationen als bei Objekt II gefunden

In Abb. 9 ist eine Auswertung für den Verlauf der Lagedifferenz in den drei Raumrichtungen gegeben.

Nachfolgende Tabelle zeigt Ergebnisse für die Lagefehler für drei verschiedene Testobjekte und zwei verschiedene Aufnahmesituationen:

		X [mm]	Y [mm]	Z [mm]	
Objekt I	15°	RMS	0,013	0,020	0,055
		Max.	0,040	0,055	0,235
	30°	RMS	0,009	0,018	0,030
		Max.	0,025	0,053	0,080
Objekt II	15°	RMS			0,052
		Max.			0,200
	30°	RMS			0,026
		Max.			0,130
Objekt III	15°	RMS	0,030	0,027	0,095
		Max.	0,060	0,050	0,270
	30°	RMS	0,029	0,025	0,050
		Max.	0,078	0,045	0,100

Tabelle 1: Lagefehler der rekonstruierten Punkte für drei unterschiedliche Testobjekte. Für Objekt II ist nur der Normalabstand zu einer idealen Ebene bestimmbar. Der Winkel gibt den ungefähren Schnittwinkel zweier Sehstrahlen der Stereobilder wieder. Ein größerer Schnittwinkel erhöht die Genauigkeit, verstärkt aber die projektive Verzerrung zwischen den Stereobildern und vermindert damit die Qualität der automatischen Punkt-Korrespondenzbestimmung.

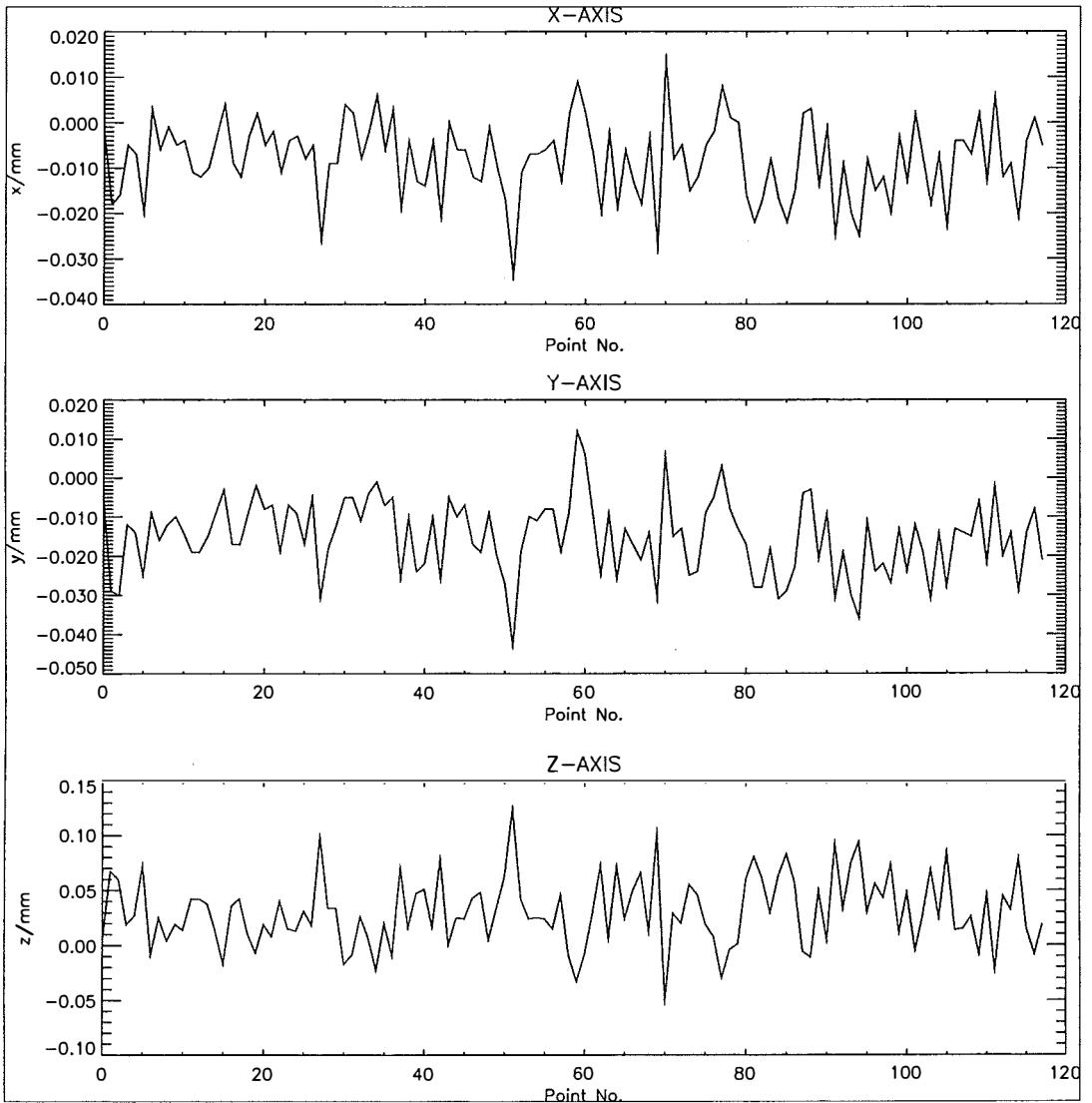


Abb. 9: Verlauf der Lagedifferenz für jede einzelne Raumrichtung – diesen Diagrammen liegt ein Test mit Objekt I zugrunde. Die größte Abweichung von etwa  $\pm 0,1$  mm tritt für die Z-Koordinate auf.

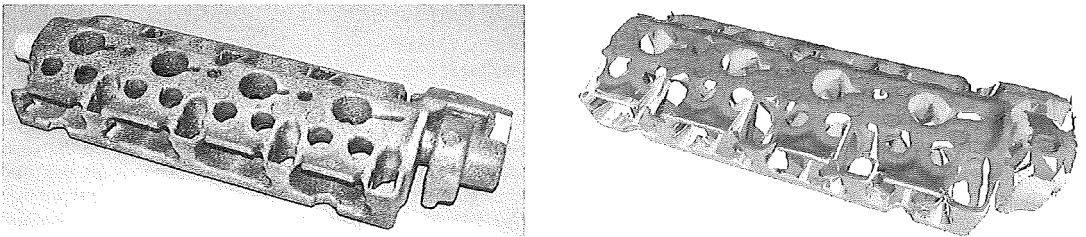


Abb. 10: Foto eines Kühlwasserkerns (links). Das Objekt wurde in einem Vorbereitungsschritt mit Textur versehen. Es wurde dabei mittels Luftpinsel ein feiner heller Sprühnebel auf einer dunklen Grundierung aufgebracht. Die Länge des Objekts beträgt etwa 450 mm. Das Rekonstruktionsergebnis dieses Modells besteht aus ca. 60000 Oberflächenpunkten (rechts).



Der zeitliche Aufwand für die Gesamtvermessung eines komplexen Objekts wie eines Kühlwasserkerns, beträgt bis zu einer Woche, wobei der interaktive Zeitaufwand für den Benutzer etwa zwei Tage beträgt. Für Objekte mit komplexer Topologie ist eine interaktive Nachbearbeitung aufwendig. Es wurde daher im Projekt besonderes Augenmerk auf die Entwicklung eines geeigneten Editierwerkzeuges zur Bearbeitung der Punktwolke und der rekonstruierten Oberflächen gelegt.

Das vorgestellte Meßprinzip ist in einem gewissen Bereich, abhängig von der Qualität der auf das Objekt aufzubringenden Textur, skalierbar, wobei auch der Lagefehler dementsprechend variiert.

Mit dem hier vorgestellten Objektscanner ist ein vom mechanischen Aufbau einfaches und kostengünstiges, aber dennoch präzises Meßwerkzeug gegeben, das durch die offene Konzeption an mehreren Stellen der Verarbeitung Einflußnahme des Anwenders ermöglicht, was unumgänglich für ein flexibles System ist.

Weitere Untersuchungen zur Genauigkeit des Meßsystems wie auch eine Erweiterung in Richtung Farbaufnahmen sind Gegenstand gegenwärtiger bzw. zukünftiger Arbeit.

#### Dank

Das Projekt wurde vom Forschungsförderungs fonds der gewerblichen Wirtschaft und der Fa. AVL GmbH Graz finanziell unterstützt.

#### Literatur

- [1] *H.-P. Beer, T. Vögtle*, Digitale Bildverarbeitung, Wichmann, Karlsruhe, 2. Auflage, 1991.
- [2] *M. Berger*, Oberflächenrückführung aus 3D-Punktdateien, Diplomarbeit, TU-Graz, 1998.
- [3] *H. A. Beyer*, Geometric and Radiometric Analysis of a CCD-Camera Based Photogrammetric Close-Range System, Dissertation, ETH Nr. 9701, 1992.

- [4] *J.-D. Boissonnat*, Geometric Structures for Three-Dimensional Shape Representation, ACM Transactions on Graphics, Vol.3, No. 4, 1984, pp. 266-286.
- [5] *R. Bergevin, D. Laurendeau, D. Poussart*, Registering Range Views of Multipart Objects, Computer Vision and Image Understanding, Vol. 61, No. 1, 1995, pp. 1-16.
- [6] *H. Edelsbrunner, E. Mücke*, Three-dimensional alpha shapes, ACM Transactions on Graphics, Vol. 13, No. 1, 1994, pp. 43-72.
- [7] *A. Gaich, A. Sehic, P. Werth, M. Gruber*, On the positioning of a linear CCD sensor for 3D object reconstruction, Optical 3-D Measurement Techniques IV, Wichman, Heidelberg, 1997, pp. 214-224.
- [8] *R. C. Gonzales, R. E. Woods*, Digital Image Processing, Addison Wesley, reprinted 1993.
- [9] *C. Harris, M. Stephens*, A combined corner and edge detector, Plessey Research Roke Manor, 1988, pp. 147-151.
- [10] *H. Hoppe*, Surface Reconstruction from Unorganized Points, Computer Graphics, Vol. 26, No. 2, 1992, pp. 71-78.
- [11] *K. Kraus*, Photogrammetrie, Band 1, 3: Auflage, Dümmler Verlag, Bonn, 1990.
- [12] *W. E. Lorensen, H. E. Cline*, Marching cubes: a high resolution 3d surface construction algorithm. ACM Computer Graphics, 21: 163-170, 1987.
- [13] *S. Muraki*, Volumetric Shape Description of Range Data using „Blobby Model“, Computer Graphics, Vol. 25, No. 4, 1991, pp. 227-235.
- [14] *G. Turk, M. Levoy*, Zippered Polygon Meshes from Range Images, Computer Graphics Proceedings, 1994, pp. 311-318.
- [15] *J. C. Trinder*, Precision of Digital Target Location, Photogrammetric Engineering and Remote Sensing, Vol. 55, No. 6, 1989, pp. 883-886.
- [16] *P. Uray*, From 3D Point Clouds to Surfaces and Volumes, Dissertation, Oldenbourg 1996.
- [17] *J. Wernecke*, The Inventor Mentor, Release 2, Addison-Wesley, 1993.
- [18] *P. Werth*, Kalibrierung eines 3D-Objektscanners mit elektroofptischem Aufnahmesystem, Diplomarbeit, TU-Graz, 1997.
- [19] *W. Wester-Ebbinghaus*, Bündeltriangulation mit gemeinsamer Ausgleichung photogrammetrischer geodätischer Beobachtungen, Zeitschrift für Vermessungswesen, Nr. 3, 1985, 101-111.

#### Anschrift der Autoren:

Dipl.-Ing. Andreas Gaich, Dipl.-Ing. Amer Sehic, Univ.-Ass.Dipl.-Ing.Dr.techn. Michael Gruber: Institut für Maschinelles Sehen und Darstellen, Technische Universität Graz, Münzgrabenstraße 11, A-8010 Graz. email: {gaich, asehic, gruber}@icg.tu-graz.ac.at