

# HandyScan3D, handgeführter 3D Laserscanner zur Erfassung von Objekten

Helmut Hamfeld

*Fa. Tecmath AG; Universität Kaiserslautern, AG Robotik und Prozessrechenstechnik  
hamfeld@hs.tecmath.com*

## Zusammenfassung

*Das Basiskonzept HandyScan3D funktioniert nach dem Prinzip der aktiven Stereoskopie, arbeitet selbstkalibrierend und zeichnet sich damit besonders durch seine einfache Anwendbarkeit und seinen flexiblen Einsatz aus. Neben zwei CCD-Kameras wird lediglich ein handelsüblicher Laserpointer zur Erfassung eines Objektes benötigt. Erweiterungen von HandyScan3D demonstrieren den Einsatz von Gray-Code Projektoren und die Erstellung von Rundumansichten.*

## 1 Einleitung

Für die räumliche Erfassung von Objekten zur dreidimensionalen Rekonstruktion im Computer sind eine Vielzahl von Messprinzipien bekannt. Die meisten Verfahren basieren dabei auf dem Prinzip der optischen Triangulation. Während die passive Stereoskopie noch Gegenstand der Forschung ist, sind andere aktive Triangulationsverfahren bereits im industriellen Einsatz. Zu nennen sind dabei u.a. die Laserpunkttriangulation, das Lichtschnittverfahren und die bekannten Verfahren des Codierten Licht Ansatzes [1],[7]. Im Gegensatz zum momentanen Stand der passiven Stereoskopie zeichnen sich diese Verfahren besonders durch eine robuste Messdatenaufnahme und eine hohe Genauigkeit aus, bei gleichzeitig hoher Datenrate von oft mehreren zehntausend 3D-Punkten pro Sekunde. Voraussetzung zur Berechnung von präzisen Objektkoordinaten ist allerdings die genaue Kenntnis der Sensorgeometrie, die in der Regel durch eine vorab durchgeführte Kalibrierung gewonnen wird. Um eine dauerhafte Genauigkeit des Sensorsystems und der Kalibrierung zu gewährleisten, wird

der Sensor über feste mechanische Verbindungen auf einen beschränkten Messbereich ausgerichtet. So ist ein Sensorsystem zur Vermessung von 20cm großen Objekten im Allgemeinen nicht dazu geeignet, Objekte mit einer Größe von 5 oder 50cm hinreichend zu vermessen.

Aus der passiven Stereoskopie sind andererseits Verfahren bekannt, mit denen eine dreidimensionale Erfassung von Objekten nahezu beliebiger Größe möglich ist. In [3] wird ein Verfahren vorgestellt, bei dem zwei Fotos eines Gesichtes ausreichen, um automatisch die Geometrie des Gesichtes zu rekonstruieren. Das Programm *Facade* [2] ermöglicht die interaktive Rekonstruktion von ganzen Häusern mit ähnlichen Verfahren. Wesentliche Voraussetzung für das Funktionieren dieser Verfahren ist aber das Auffinden von korrespondierenden Punkten in den Bildern des Objektes. Neben den aufwändigen interaktiven Verfahren ist dieses Problem automatisch im Allgemeinen nur dann zu lösen, wenn besondere Anforderungen an die aufgenommene Szene gestellt werden. So sollten die unterschiedlichen Ansichten der Szene einander sehr ähnlich sehen, damit gleiche Objekte gefunden werden können. Ebenso müssen wiedererkennbare Strukturen in der Szene vorkommen. Objekte mit einer homogenen Oberfläche verbieten im Allgemeinen das Auffinden von Korrespondenzen.

Ein relativ neues Forschungsgebiet, die aktive Stereoskopie, versucht die Vorteile beider Messverfahren miteinander zu vereinen, zum einen die Genauigkeit der aktiven optischen Triangulationsverfahren, zum anderen die Flexibilität der passiven Stereoskopie. Das hier vorgestellte Messprinzip *HandyScan3D* vereint beide Verfah-

ren unter einem gemeinsamen Konzept. *HandyScan3D* arbeitet selbstkalibrierend, die Information über die Anordnung der Sensorik wird aus den Sensordaten gewonnen, ein Kalibrierkörper zur Einrichtung des Systems ist nicht mehr notwendig. Das Messverfahren ist genau und robust gegenüber unterschiedlichsten Oberflächenstrukturen.

Das folgende Kapitel beschreibt, den Aufbau von *HandyScan3D* und die einzelnen Schritte, die zur Berechnung der Objektgeometrie durchgeführt werden. Die Kapitel 3 und 4 beschreiben Erweiterungen des Basiskonzeptes zur Dokumentation der praktischen Anwendbarkeit des Messverfahrens. Kapitel 5 schließlich zeigt Ergebnisse, die während der Entwicklung von *HandyScan3D* erzielt wurden.

## 2 HandyScan3D

Die Datenverarbeitung von *HandyScan3D* ähnelt im Aufbau den bekannten Verfahren der passiven Stereoskopie, wenigstens zwei Kameras werden auf ein Objekt ausgerichtet und aus den Bildern der Kameras wird das Objekt rekonstruiert. Das Problem der Korrespondenzpunktsuche wird durch den Einsatz einer aktiven Lichtquelle gelöst. Im einfachsten Fall kann das ein handelsüblicher Laserpointer sein, mit dem das zu erfassende Objekt angestrahlt wird. Der Punkt wird in den Kamerabildern wiedergefunden und ergibt unmittelbar eine Korrespondenz. Ein kontinuierliches Anstrahlen oder Abscannen des Objektes ermöglicht dann die dreidimensionale Rekonstruktion im Computer. Insgesamt sind dabei drei Probleme zu lösen. Die Bildverarbeitung extrahiert den Laserpunkt aus den Kamerabildern und bildet Korrespondenzen. Die Kalibrierung berechnet aus einer Vielzahl von Korrespondenzen die Sensoranordnung, so dass eine Berechnung von Raumkoordinaten aus diesen Korrespondenzen möglich ist. Die Visualisierung fügt die berechneten Raumkoordinaten zu einem Dreiecksnetz zusammen, das auf dem Monitor des Computers visualisiert werden kann.

Besonderes Augenmerk wurde bei der Entwicklung von *HandyScan3D* auf die echtzeitfähige Verarbeitung der Daten gelegt, die Bildverarbeitung, Kalibrierung und die Visualisierung werden transparent bereits während der Datenaufnahme durchgeführt. Der Anwender hat so jederzeit die Kontrolle über den aktuellen Stand der Messung und kann die Abtastung des Objektes seinen jeweiligen Anforderungen anpassen.

## 2.1 Bildverarbeitung

Handelsübliche CCD-Kameras, die nach der EIA-Norm arbeiten, liefern pro Sekunde 30 Bilder. Ein *HandyScan3D*-System erfordert den Einsatz von wenigstens zwei Kameras, so dass die Bildverarbeitung in der Lage sein muss, wenigstens 60 Bilder pro Sekunde auszuwerten. Die Aufgabe besteht darin, in jedem Bild einen Laserpunkt zu finden. Um robust gegenüber Umgebungslicht zu sein, wird mit dem Differenzbildverfahren gearbeitet. Dazu wird zu Beginn einer Messung ein sogenanntes Referenzbild für jede Kamera aufgenommen, in dem der Laser nicht auftauchen darf. Wird ein Bild mit Laserpunkt aufgenommen, so ergibt die Differenz dieses Bildes und des Referenzbildes ein neues Bild, in dem der Laserpunkt als klar erkennbares Signal übrig bleibt.

Der Laser wird manuell über das Objekt bewegt. Die ausreichend schnelle Bildfolge der eingesetzten Kameras ermöglicht daher die Ausnutzung von Lokalität. Der Laser wird in einem Bild am ehesten da zu vermuten sein, wo er auch im vorherigen Bild gefunden wurde. Die zusätzliche Ausdehnung des Laserpunktes über mehrere Pixel erlaubt zudem die Unterabtastung des Bildes. Mit beiden Verfahren ist eine echtzeitfähige Verarbeitung der Bilder möglich, ohne das Daten verlorengehen.

Über alle Pixel eines Bildes, die dem Laserpunkt zugeordnet werden können, wird der Schwerpunkt gebildet, wodurch eine etwa zwanzigfach subpixelgenaue Lokalisation des Laserpunktes möglich ist. Die so gefundenen Laserpunkte zweier zeitgleich aufgenommener Bilder werden zu einer Korrespondenz zusammengefügt.

## 2.2 Stereokalibrierung

Die Bewegung eines Objektes vor einer Kamera kann durch die Epipolargeometrie beschrieben werden [5],[6]. Dabei definiert die Kamera das Referenzkoordinatensystem, in dem die Bewegung statt findet. Die sogenannte Epipolarmatrix  $E$  kann aus der Rotation  $R$  und Translation  $T = (t_x, t_y, t_z)$  der Objektbewegung im Referenzkoordinatensystem berechnet werden:

$$E = R \cdot \begin{bmatrix} 0 & t_x & -t_y \\ -t_x & 0 & t_z \\ t_y & -t_z & 0 \end{bmatrix} \quad (1)$$

Äquivalent zu einer Objektbewegung kann angenommen werden, dass das Objekt still steht und die Kamera bewegt wird, oder ein Objekt von zwei Kameras aus verschiedenen Ansichten aufgenom-

men wird. Die Translation und Rotation der Objektbewegung kann durch einfache Transformation in die äquivalente Lagetransformation der Kameras umgerechnet werden und beschreibt dann analog die Lage der zweiten Kamera im Referenzkoordinatensystem der ersten Kamera.

Die Epipolarmatrix beschreibt zusätzlich die Lage von korrespondierenden Punkten in Bildpaaren. So muss für alle Korrespondenzen ( $P, P'$ ) in homogenen Koordinaten folgende Gleichung erfüllt sein:

$$\begin{bmatrix} P_X \\ P_Y \\ 1 \end{bmatrix}^T \cdot E \cdot \begin{bmatrix} P_X' \\ P_Y' \\ 1 \end{bmatrix} = 0 \quad (2)$$

Geometrisch wird die folgende Beziehung beschrieben:

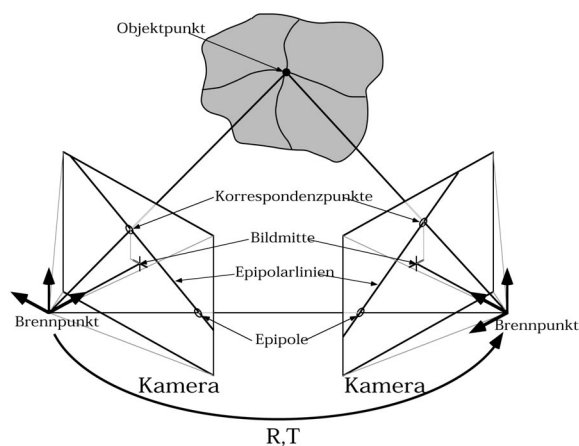


Abbildung 1: Epipolar-Geometrie

Wird das linke Produkt in Gleichung (2) ausmultipliziert, ergibt sich eine Geradengleichung in der Hess'schen Normalenform, die eine Gerade (Epipolarlinie) im zweiten Bild beschreibt, auf der der korrespondierende Punkt liegt. Anschaulich stellt diese Gerade den Schnitt dar, der aus der Bildebene der zweiten Kamera mit der Ebene gebildet wird, die durch die beiden Kamerabrennpunkte und den Objektpunkt definiert ist.

Wenn die Epipolarmatrix nicht bekannt ist, wohl aber eine Menge von Korrespondenzen, dann kann Gleichung (2) als homogenes Gleichungssystem mit neun Unbekannten interpretiert werden. Das Gesamtsystem ist bis auf einen Skalierungsfaktor eindeutig definiert, damit kann ein Parameter des Gleichungssystems frei gewählt werden und ein lineares Gleichungssystem mit acht Unbekannten entsteht. Wenigstens acht Korrespondenzen sind zur Lösung des Gleichungssystems notwendig, sinnvollerweise sollten aber sehr viel mehr Korrespondenzen verwendet werden, damit eine fehler-

minimierende Berechnung der Epipolarmatrix möglich ist. Die Zerlegung der Epipolarmatrix in die Translation und Rotation analog zu Gleichung (1) schließlich ergibt die notwendige Kalibrierinformation, mit der eine dreidimensionale Rekonstruktion von Objektkoordinaten aus zwei korrespondierenden Bildpunkten möglich ist [8]. Innerhalb relativ kurzer Zeit werden von der Bildverarbeitung mehr Korrespondenzen gebildet, als für die Berechnung der Epipolarmatrix sinnvoll sind. Daher wird in regelmäßigen Abständen aus allen vorhandenen Korrespondenzen eine Teilmenge zur Berechnung der Matrix ausgewählt. Diese Teilmenge wird so gewählt, dass eine möglichst gute, flächendeckende Verteilung der Punkte in den Kamerabildern vorliegt. Jede neu berechnete Epipolarmatrix wird bezüglich ihrer Güte bewertet und mit der bisher besten Epipolarmatrix verglichen. Wenn das Ergebnis verbessert werden konnte, gilt die neue Epipolarmatrix als Kalibrierung für das Stereosystem. Mit zunehmender Zahl von Korrespondenzen kann so eine stetige Verbesserung der Kalibrierung erreicht werden.

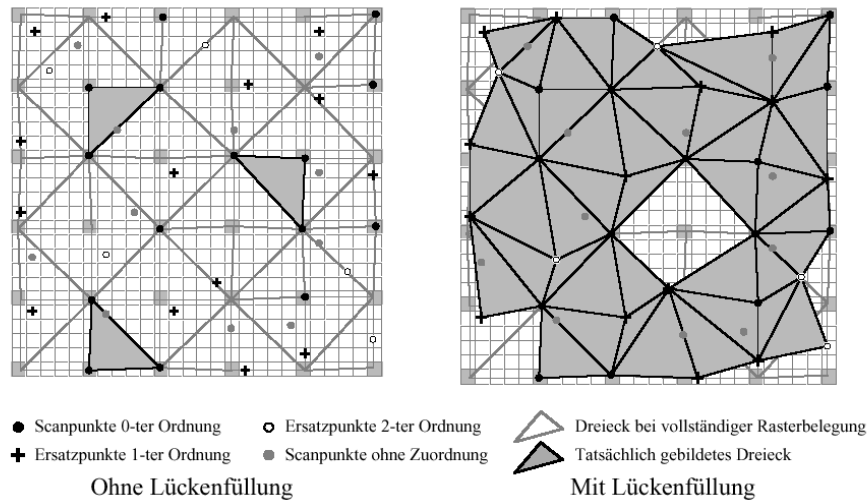
Der Vollständigkeit halber sei noch erwähnt, dass die Berechnung der Epipolar-Geometrie Lochkameramodelle voraussetzt. Die Bildverzeichnung, die üblicherweise von handelsüblichen Kameraobjektiven hervorgerufen wird, wird daher einmalig für jede Kamera durch eine Kalibrierung der internen Kameraparameter bestimmt.

### 2.3 Visualisierung

Die Vermessung eines Objektes mit *HandyScan3D* geschieht interaktiv, der Benutzer hält einen Laserpointer in der Hand, mit der er das Objekt anstrahlt und dreidimensional erfasst. Um den Benutzer optimal zu unterstützen, ist es daher notwendig, die Ergebnisse der dreidimensionalen Rekonstruktion bereits während der Messung zu visualisieren. Die Rekonstruktion und Visualisierung muss also ebenfalls der Echtzeitfähigkeit Rechnung tragen. Zu beachten ist dabei, dass die aufgenommenen Punkte im allgemeinen ungeordnet und willkürlich verteilt sind.

Da die Berechnung eines Dreiecksnetzes zur Visualisierung aus derartigen Daten einer sehr hohen Komplexität unterliegt und im Allgemeinen nicht eindeutig ist, werden zwei Annahmen gemacht:

1. alle rekonstruierten Punkte lassen sich eindeutig auf eine zweidimensionale Ebene projizieren,
2. die laterale Auflösung des Sensorsystems ist begrenzt.



**Abbildung 2:** Rastertriangulation

Die erste Annahme beruht auf der Tatsache, dass rekonstruierte Punkte von beiden Kameras erfasst wurden. Ein Objektpunkt, der bezüglich einer Kamera verdeckt ist, kann nicht rekonstruiert werden. Die Bildebenen beider Kameras sind also zweidimensionale Ebenen, auf die eine Projektion möglich ist. Jedes überlappungsfreie Dreiecksnetz, das in einer solchen Ebene gebildet wird, ist auch in der Rückprojektion im dreidimensionalen Raum überlappungsfrei.

Jeder Laserpunkt überdeckt im Kamerabild idealerweise mehrere Pixel, da nur so über Subpixelberechnungen eine genaue Lokalisation des Laserpunktes im Bild möglich ist. Andererseits können dadurch auch Objektdetails, die im Bild einer Größe von ein bis zwei Pixel entsprechen, über den Laser nicht mehr aufgelöst werden. Eine laterale Auflösung von weniger als einem Pixel ist in keinem Fall möglich. Daher stellt auch die zweite Annahme keine wirkliche Einschränkung dar.

Zur echtzeitfähigen Berechnung des Dreiecksnetzes wird unter Berücksichtigung dieser beiden Annahmen jeder rekonstruierte Punkt in ein zweidimensionales Raster eingetragen. Ein Dreiecksnetz kann dann in einfacher Weise gebildet werden, indem zeilen- und spaltenweise über das Raster gelaufen wird. Wenn ein Rasterelement mit einem Punkt belegt ist, werden in den angrenzenden Rasterelementen nach Nachbarn gesucht. Aus einem Punkt mit wenigstens zwei Nachbarn kann ein Dreieck gebildet werden.

Gerade zu Beginn einer Vermessung werden nur sehr wenig Rasterelemente belegt sein, so dass kaum Nachbarn zur Bildung von Dreiecken gefunden werden. Um dennoch eine Visualisierung zu ermöglichen, wird eine Unterabtastung des Ra-

sters durchgeführt. Zur Bildung von Dreiecken wird nicht mehr jedes Element, sondern nur noch jedes vierte, neunte oder sechzehnte (etc.) Element durchsucht. Dafür werden Nachbarschaften nicht nur über direkt angrenzende Elemente gebildet, sondern auch über Elemente, die zwei bis drei Rasterelemente entfernt liegen. Es kann bei dieser Methode zwar vorkommen, dass nicht alle aufgenommenen Punkte zur Bildung des Dreiecksnetzes beitragen, dafür ist die Wahrscheinlichkeit, dass gerade in einem spärlich besetzten Raster Dreiecke gebildet werden, sehr viel höher. Abbildung 2 zeigt exemplarisch zwei Dreiecksnetze, die in einem spärlich besetzten Raster mit und ohne der beschriebenen erweiterten Suche gebildet werden. Nur jedes fünfundzwanzigste Rasterelement wurde für die Bildung der Dreiecke untersucht. Zur Bildung von Nachbarschaften wurde die Suche von Punkten auf bis zu drei Felder entfernte Elemente ausgedehnt. Mit den 45 eingetragenen Punkten konnten 44 Dreiecke gebildet werden. 11 Punkte wurden dabei nicht berücksichtigt.

Mit zunehmender Dauer der Messung werden aufgenommene 3D-Punkte häufig auf Rasterelemente fallen, die bereits belegt sind. In diesen Fällen wird für die bereits vorhandenen und die neuen Punkte jeweils ein Gütemaß berechnet, die Punkte mit der besseren Güte bleiben erhalten. Wenn beispielsweise aufgrund von Störlicht fehlerhafte Punkte berechnet werden, ist es dem Benutzer möglich, diese Stelle auf dem Objekt erneut zu scannen und die fehlerhaften Punkte durch neue zu ersetzen.

Das gewonnene Scanergebnis kann mit den Kamerabildern beider Kameras texturiert werden, so dass nicht nur die reine Geometrie des Objektes er-

fasst wird, sondern ebenso eine fotorealistische 3D-Darstellung des Objektes im Computer möglich ist.

## 2.4 Linie und Projektor

Eine leicht erkennbare Beschränkung von *HandyScan3D* besteht in der niedrigen Datenrate, mit jedem Bild wird maximal ein Punkt rekonstruiert, maximal 30 Punkte pro Sekunde sind möglich. Daher wurden zwei Erweiterungen entwickelt, mit der deutlich höhere Datenraten möglich sind.

Zur Berechnung der Epipolarmatrix und Kalibrierung von *HandyScan3D* sind Punktkorrespondenzen notwendig, wie sie von einem Laserpointer gebildet werden. Sobald die Kalibrierung aber mit hinreichender Genauigkeit bekannt ist, kann alternativ zum Laserpunkt eine Laserlinie eingesetzt werden. Die Bildverarbeitung muss jetzt jeden Bildpunkt der Laserlinie in einem Kamerabild detektieren und die zugehörigen Epipolarlinien berechnen. Der Schnittpunkt jeder Epipolarlinie mit der Laserlinie im zweiten Bild ergibt den zugehörigen korrespondierenden Bildpunkt. Pro Bild können so mehrere hundert Korrespondenzen gebildet werden. Durch einfaches Schwenken der Laserlinie über das Objekt ist eine schnelle, dichte Rekonstruktion im Rechner innerhalb weniger Sekunden möglich.

Mit einem ABW-Projektor und der Option CROSS können Gray-Code Sequenzen in zwei Orientierungen projiziert werden. Es ist also möglich, nicht nur Linien sondern einzelne Pixel mit einem Gray-Code zu versehen. Durch den zusätzlichen Einsatz des Phasen-Shift Verfahrens kann jedem Pixel im Kamerabild ein eindeutiger Code zugewiesen werden. Über optimierte Hash-Verfahren ist es im Weiteren möglich, das (Sub-)Pixel gleichen Codes im zweiten Bild zu finden. Nach einer Sequenz von 26 Linienbildern stehen dadurch beim Einsatz des Projektors mehrere hunderttausend Korrespondenzen zur Verfügung. Die Bildverarbeitung, Kalibrierung, Rekonstruktion und Visualisierung findet innerhalb weniger Sekunden statt und das Ergebnis kann direkt überprüft werden. Beim Einsatz des Projektors wird im Vergleich zum Laserpunkt und zur Laserlinie die höchste Genauigkeit und Auflösung erreicht [4].

## 3 HandyScanTT

*HandyScan3D* ist ein Basissystem für ein flexibel einsetzbares 3D-Messsystem. Mit einer Vermessung kann aber immer nur eine Ansicht oder ein

Tiefenbild eines Objektes generiert werden. Nicht berücksichtigt wurden bisher Konzepte, aufbauend auf *HandyScan3D*, mit denen eine vollständige Erfassung eines Objektes möglich ist.

*HandyScanTT* sieht zu diesem Zweck den Einsatz eines einfachen Drehtellers vor.

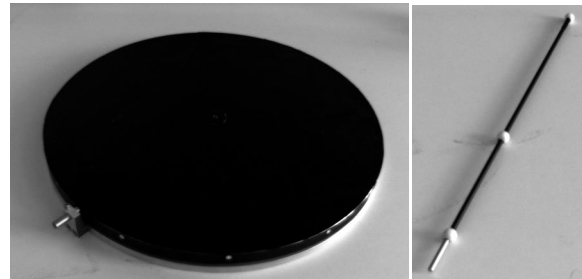


Abbildung 3: Drehteller und Kalibrierstab

Zur Vermessung wird das Objekt auf dem Drehteller platziert und die beiden Kameras werden auf das Objekt ausgerichtet. Nach einer Vermessung mit dem Laser oder dem Projektor wird der Drehteller um einen festen Winkel weitergedreht und eine erneute Vermessung wird durchgeführt. Der Vorgang wird so oft wiederholt, bis von allen Seiten des Objektes ein Tiefenbild vorliegt und das Objekt vollständig rekonstruiert werden kann.

Auch *HandyScanTT* arbeitet im weitesten Sinne selbstkalibrierend. Die einzige Zusatzinformation, die gewonnen werden muss, ist die Lage der Drehachse im Stereokoordinatensystem. Zur Bestimmung dieser Drehachse wird ein Kalibrierstab in eine Arretierung in der Mitte des Drehtellers eingepasst. Der Kalibrierstab ist mit drei Marken versehen, die in den Kamerabildern wiedergefunden werden können und zusätzlich eine Skalierung des Ergebnisses ermöglichen. Notwendigerweise müssen wenigstens zwei Marken im Kamerabild gefunden werden, damit eine Berechnung der Drehachse gelingt. Die dritte Marke erlaubt eine höhere Genauigkeit und zudem die Einrichtung des Sensorsystem auf größere Objekte.

Sobald über den eigentlichen Vermessungsvorgang eine Stereokalibrierung berechnet wurde, kann auch die Lage der Drehachse bestimmt werden. Mit jeder neuen, verbesserten Stereokalibrierung wird auch die Lage der Drehachse korrigiert und damit wird auch *HandyScanTT* mit zunehmender Dauer der Vermessung genauer.

Wenn die Vermessung beendet ist, werden noch zwei Korrekturrechnungen auf den Daten durchgeführt. Dabei wird im Wesentlichen ausgenutzt, dass bei der Vermessung viele Objektbereiche aus mehreren Richtungen aufgenommen werden und so redundante Information gewonnen wird. In den Überlappungsbereichen unterschiedlicher Tiefenbilder werden Fehlervektoren berechnet, mit de-

nen eine Korrektur der 3D-Daten durchgeführt wird, die aus Restfehlern der Stereokalibrierung oder der Drehachsbestimmung herrührt. Die gleiche redundante Information der Überlappungsbereiche wird verwendet, um Helligkeitsunterschiede in den gewonnenen Texturbildern auszugleichen. Kanten in der texturierten Darstellung, die durch eine unterschiedliche Beleuchtung in verschiedenen Ansichten entstehen, werden dadurch unterdrückt.

## 4 HandyScanCLM

Eine weitere, häufig verwendete Methode zur vollständigen Vermessung von Objekten besteht in der Aufbringung von Referenzmarken auf dem Objekt. Die Marken werden photogrammetrisch lokalisiert und dienen zur Registrierung von aufgenommenen Tiefenbildern in einem gemeinsamen Koordinatensystem. Wenn in einem Tiefenbild wenigstens drei Marken wiedergefunden und identifiziert werden können, kann die Lagetransformation berechnet werden, die zur Registrierung der Daten nötig ist. Probleme haben diese Verfahren allerdings vor allem dann, wenn eine Präparation des Objektes mit Marken nicht toleriert wird, wie das beispielsweise bei Denkmälern der Fall sein kann.

*HandyScanCLM* ist eine Erweiterung von *HandyScan3D*, die prinzipiell nach dem gleichen Verfahren arbeitet, aber ohne echte Marken auskommt. Die wesentliche Idee besteht in der Verwendung des ABW-Projektors und der Erweiterung der Projektionssequenz um zwölf zusätzliche Bilder. Diese Bilder projizieren jeweils eine von sechs horizontalen und sechs vertikalen Linien auf das Objekt. Die Schnittpunkte dieser Linien ergeben 36 projizierte Lichtmarken, die sehr einfach im Tiefenbild lokalisiert werden können. Zur globalen Lokalisierung der Marken wird das System um wenigstens zwei sogenannte Ortungskameras erweitert. Auch die Ortungskameras arbeiten nach dem *HandyScan3D* Prinzip, sie dienen aber lediglich dazu, die Lichtmarken aufzunehmen und deren globale Position zu berechnen. Mit jeder Aufnahme eines Tiefenbildes wird für jede der 36 Lichtmarken die lokale Position im Tiefenbild und die globale Position im System der Ortungskameras berechnet. Die Berechnung der Lagetransformation zwischen lokaler und globaler Position entspricht der gesuchten Registrierung des Tiefenbildes.

Für eine weitere Aufnahme werden Projektor und Kameras des 3D-Sensors neu positioniert, die Lage der Ortungskameras bleibt fest. Es wird eine

erneute Liniensequenz zur Aufnahme eines Tiefenbildes und zur Projektion der Lichtmarken durchgeführt und 36 weitere Marken werden generiert, die die Registrierung des neuen Tiefenbildes erlauben. Der Vorgang kann beliebig oft wiederholt werden. Mit jeder neuen Aufnahme kann wiederum die Genauigkeit des Gesamtsystems gesteigert werden, da mit jeder neuen Lichtmarke die Kalibrierung der Ortungskameras verbessert wird. Über zusätzliche Ortungskameras wird der Messraum erweitert, die Genauigkeit der Registrierung erhöht und es werden prinzipiell beliebig komplexe Sensorsysteme möglich, mit denen auch sehr große Objekte erfasst werden können

## 5 Ergebnisse

Im Rahmen des Forschungsprojektes wurden eine Reihe von Vermessungen durchgeführt, die dem Nachweis der Genauigkeit des Sensorsystems gedient haben, und die Leistungsfähigkeit der vorgestellten Konzeption dokumentieren sollen.

### 5.1 Messgenauigkeit

Zur Berechnung der Sensorgenauigkeit wurde mit *HandyScan3D* eine plane Tischplatte vermessen. Durch die gewonnenen Daten wurde eine Ebene approximiert und der Abstand jedes 3D-Punktes zu dieser Ebene wurde in Relation zur vermessenen Fläche gesetzt. Der mittlere Abstand aller Punkte zur Ebene im Verhältnis zum Durchmesser der Fläche ergibt eine Kennzahl als Maß der absoluten Genauigkeit des Sensorsystems.

Beim Einsatz eines Laserpunktes konnte im allgemeinen eine Kennzahl von 1:4000 bis 1:5000 erreicht werden, das heißt der mittlere Messfehler bei einer Flächendiagonalen von 50 Zentimetern beträgt etwa 0,1 Millimeter. Die Genauigkeit beim Einsatz der Laserlinie ist erwartungsgemäß mit Werten von 1:2500 bis 1:3000 etwas geringer, da die subpixelgenaue Detektion der Laserlinie nicht so genau möglich ist, wie beim Laserpunkt. Beim Einsatz des ABW-Projektors werden Werte von 1:6000 erreicht, mit hochwertigen Kameraobjektiven waren auch Werte von 1:10000 möglich, was vor allem darauf zurückzuführen ist, dass das Phasen-Shift Verfahren eine sehr genaue Berechnung der Phasenlage jedes Pixel ermöglicht und nur die Genauigkeit der internen Kameraparameter die Grenze des Systems definiert.

Im Folgenden sollen nun einige Ergebnisse der vorgestellten Systeme dargestellt werden:

## 5.2 HandyScan3D

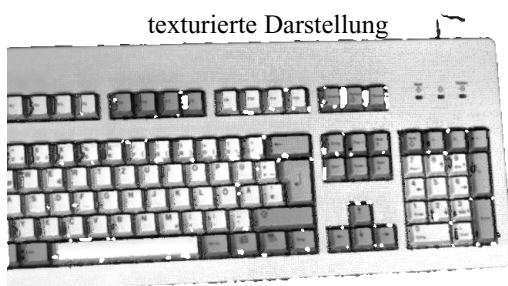
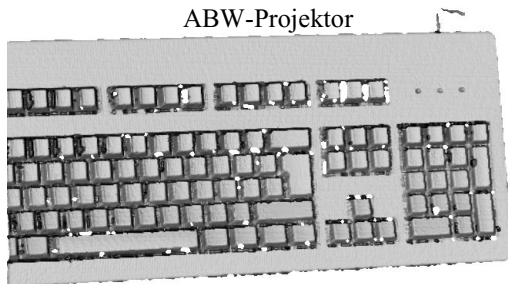
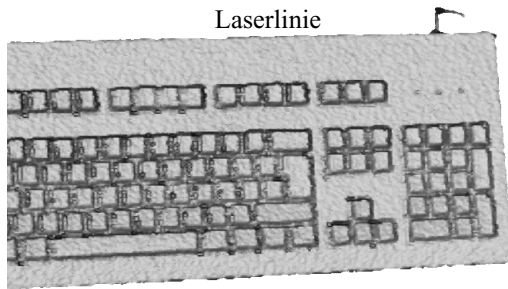


Abbildung 4: Computertastatur

## 5.3 HandyScanTT

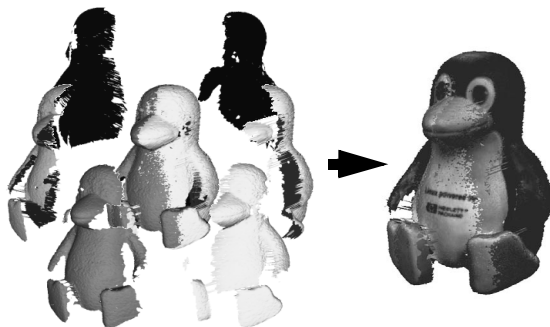


Abbildung 5: Spielzeugpinguin (6 Ansichten)



Abbildung 6: Ananas (12 Ansichten)

## 5.4 HandyScanCLM

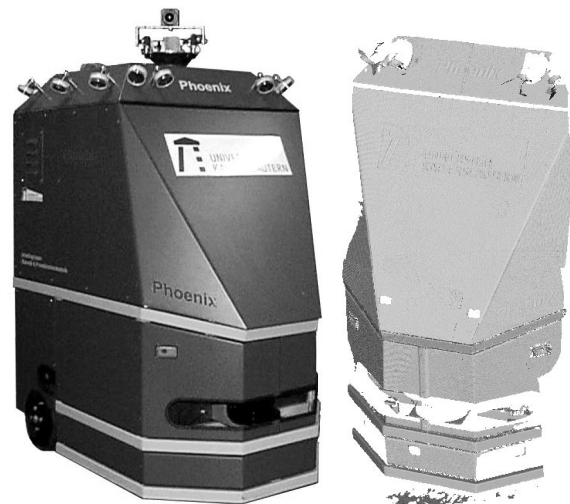


Abbildung 7: Autonomer mobiler Roboter (8 Aufnahmen)

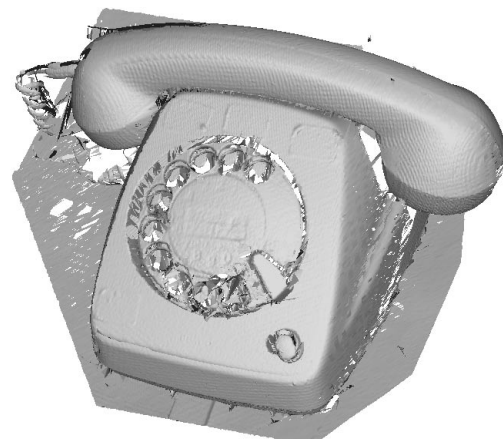


Abbildung 8: Telefon (5 Aufnahmen)

## Literatur

- [1] Bergmann, D.; Galanulis, K.; Winter, D.: *Advanced 3D-Fringe-Projection-Systems*, GOM mbH, Braunschweig, 1997
- [2] Debevec, P.E.; Taylor, C.J.; Malik, J.: *Modeling and Rendering Architecture from Photographs: A hybrid geometry- and image-based approach*, In SIGGRAPH'96, August 1996
- [3] Devernay, F.; Faugeras, O.: *Computing Differential Properties of 3-D Shapes from Stereoscopic Images without 3-D Models*, Unité de recherche INRIA Sophia-Antipolis, Rapport de Recherche n°2304, Juli 1994
- [4] Hamfeld, H.: *Aktive Stereoskopie, neue Verfahren zur dreidimensionalen Vermessung von Objekten*; Im Fachbereich Informatik der Universität Kaiserslautern eingereichte Dissertation, September 2001
- [5] Hartley, R.I., *Estimation of Relative Camera Positions for Uncalibrated Cameras*, In Proc. of ECCV92, pp.579-587, Springer-Verlag, 1992
- [6] Huang, T.S.: *Determining Three-Dimensional Motion and Structure from Two Perspective Views*, Handbook of Pattern Recognition and Image Processing, Academic Press, 1986
- [7] Krattenthaler, W.; Mayer, K.; Duwe, H.: *3d-Surface Measurement with Coded Light Approach*, presented at 17th ÖAGM Workshop and 4th Int. Workshop for Digital Image Processing and Computer Graphics, Graz, Austria, June 1993
- [8] v.Puttkamer, E.; Hamfeld, H.; Dieterich, E.: *3D-Scans von einem handgeführten Laser-Scanner*, tm Technisches Messen, Oldenbourg Verlag, Dezember 2001

## Danksagung

Die hier vorgestellten Arbeiten wurden von der Stiftung Rheinland-Pfalz für Innovation finanziert. Der Autor dankt für die ihm zuteil gewordene Unterstützung.