

# EVA 2000 Berlin

Elektronische Bildverarbeitung & Kunst, Kultur, Historie

die 7. Berliner Veranstaltung der internationalen EVA-Serie  
**Electronic Imaging & the Visual Arts**

25. - 27. Oktober 2000  
am Berliner Kulturforum

**GFaI** Gesellschaft zur Förderung  
angewandter Informatik e.V.

**VASARI UK**

---

## Tutorial 1

### **3D-Aufnahme und -Modellierung im Kunst- und Kulturbereich**

3D-Objekterfassung: Bewertung von Aufwand und Nutzen,  
Streifenprojektion, Kodiertes Licht, Kalibrierung optischer 3D-Meßtechnik,  
Integration und Fitting von Teil- bzw. Detailaufnahmen,  
Automatisierung der Auswerteprozeduren, 3D-Modellierung,  
Zusammenführung verschiedener 3D-Objekte wie Skulptur und Raum,  
Anwendungsszenarien zur Archivierung sowie  
aus dem Restaurations- und Präsentationsbereich – Animationen

Lothar Paul (GFaI e.V., Berlin), Zoltán Böröcz (Universität Münster)



# EVA 2000 BERLIN

## Tutorial 1

### "3D-Aufnahme und Modellierung im Kunst- und Kulturbereich"

Lothar Paul

Projektgruppenlfr. 3D-Datenverarbeitung

Gesellschaft zur Förderung angewandter Informatik e.V. Berlin (GFai)

Tel.: 030 - 6392 1625

Fax: 030 - 63921602

e-mail: paul@gfai.de

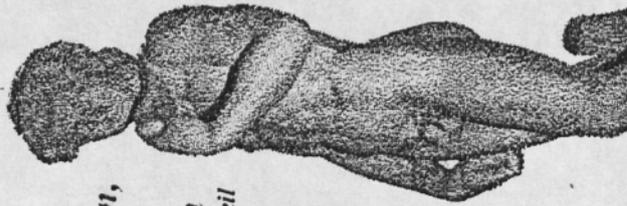
*Messen / Erfassen dreidimensionaler Objekte - Übersicht  
Optische Verfahren der 3D-Erfassung - Klassifizierung / Übersicht*

*Anwendungsfelder für 3D-Vermessung und -Modellierung  
Besonderheiten bildgestützter 3D-Erfassungsverfahren*

*Ausgewählte optische Erfassungsverfahren, Triangulation, codiertes Licht  
Virtuelle 3D-Modellierung, Grundlagen, Beispiele*

*Aspekte zur Darstellung und Darstellung, Visualisierung, Animation*

*Anforderungen / Aufwand für verschiedene Anwendungsgebiete*



**Bilder:**  
**Konturen,**  
**Farben,**  
**Texturen**  
 (ca. 90% Anteil  
 an visuell  
 basierter  
 Kognition)

**Schön..**

*Die Welt  
 ist aber 3D ...*

## Messen und Erfassen dreidimensionaler Objekte:

- - manuelle Messungen, Tabellen, Listen, Zeichnungen
- - Taktile Verfahren : Koordinatenmeßmaschine, "Storchschnabel", umgerüstete NC-Maschinen
- - schichtweise Erfassung mit 2D-Meßtechnik (Bildverarbeitung)- Biologie, Strukturuntersuchungen
- - Raumlagebestimmung bekannter Objekte mit Hilfe der Bildinterpretation
- - Erfassungsverfahren mit auf der Grundlage spezieller physikalischer Gesetze und Aufbauten (Kernspinresonanz, Tomographie)

### ● - Optische Meß- und Erfassungsverfahren

**WOZU .... ?**

#### ..... Anwendungsgebiete :

- wissenschaftliche Arbeit in verschiedensten Bereichen
- Qualitäts- und Prozeßkontrolle
- Robotersteuerungen - Objekt- und Hinderniserkennung
- Konstruktion, Design, Prototyping
- virtual- reality - Anwendungen: Lehrmittel, Simulation, Demonstration ...
- Datenaustausch, Kommunikation ...

#### Grobklassifizierungen:

- Dimensionalität: Punktmeßverfahren - Streifenverfahren - bildgebende Verfahren
- Tiefenerfassungsprinzip: Triangulationsverfahren, Laufzeit- und Phasenmeßverfahren, reglerbasierte Verfahren, Interferenzmeßverfahren ...
- Szenenmodifikation: aktive Verfahren - passive Verfahren
- Sensorik : Zeilenkamera - Matrixkamera - stereoskopische Verfahren
- ...

**REGLER-PRINZIP:** **O**  
- Autofokussierung

## AKTIV:

**LASERLICHT:**

- Punktscannen **T**
- Laser-Lichtschnittverfahren **T**
- "Laser-Radar" **P**

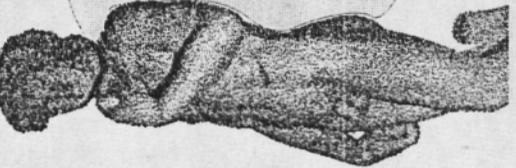
**PASSIVE STEREOANALYSE:** **T**

- Displacement stereo (2, 3 ... Kameras) **R**
- Temporal Stereo (Bildfolgen) **R**

## PASSIV:

**3D-ERFASSUNG MIT CODIERTEM LICHT**

- Binärkodierte Streifenbeleuchtung **T**
- Phasen-Shift-Verfahren **I**
- hybride Lösungen (Binär- und Phasenshift) **I T**
- farbkodierte Streifenbeleuchtung **T**



**T** Basis: Triangulationsverfahren

**P** Basis: Phasen- oder Laufzeitmessung

**I** Interferometrischer Ansatz, Derivate

**R** Referenzproblematik!

**O** Optische Mathematik und Methodik

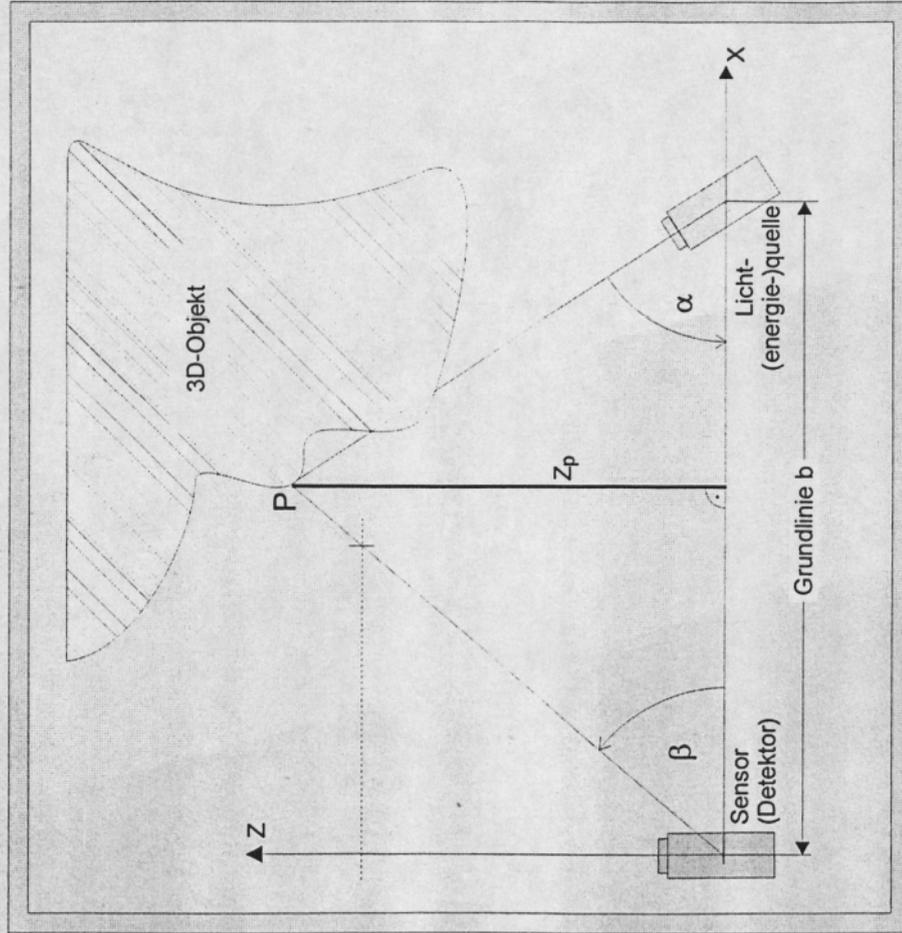
**AKTIVE STEREOMETRIE:**

- mit diskret strukturierter Beleuchtung (Raster) **T R**
- mit stetig strukturierter Beleuchtung **R T**
- mit spektral strukturierter / codierter Beleuchtung **T**

**MOIRÉ / INTERFERENZ - VERFAHREN** **I**

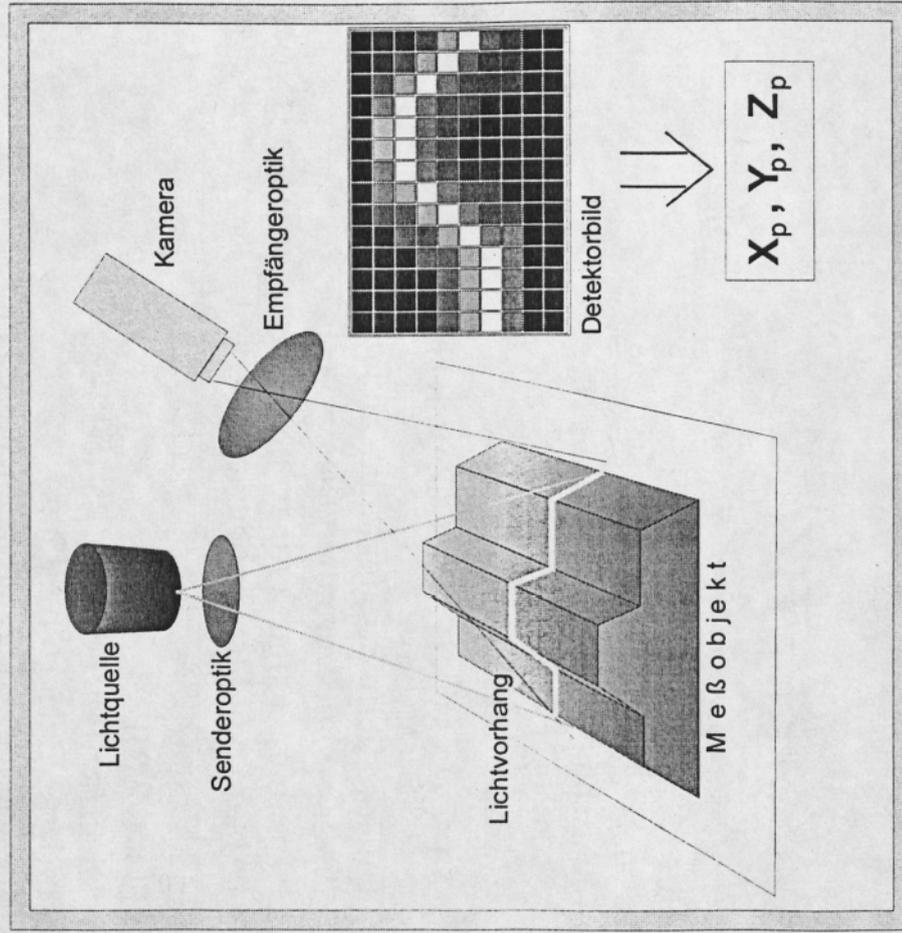
- statische Aufnahme mit strukturiertem Licht,
- "3D-Kamera" mit intensitätsmoduliertem Licht oder Laser-Laufzeitmessung **P**

## Verfahren der optischen 3D-Erfassung



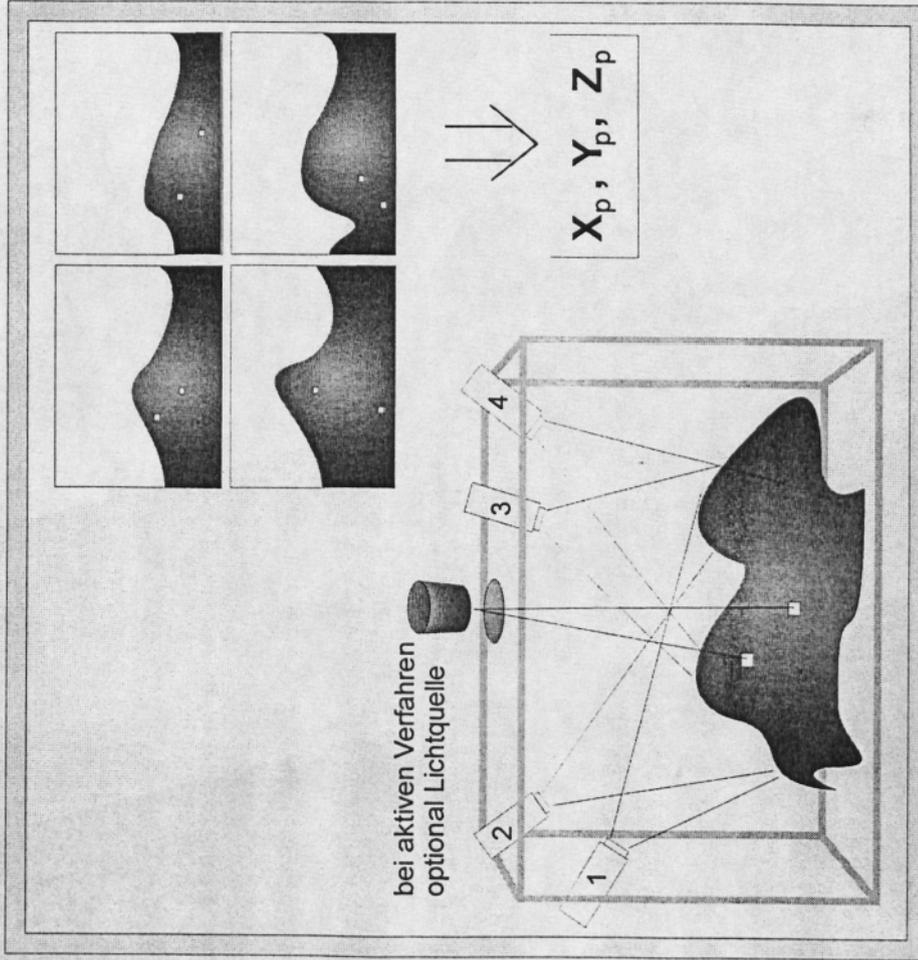
### a) Triangulation : Punktmessung

Beachte: "Hinterschnitte", Abschattierungen } geometrische Komplexität des Objekts  
 diffus, schwarz, spiegelnd: - Reflektanzeigenschaften d. Objekts



### b) Triangulation : Lichtschnittverfahren

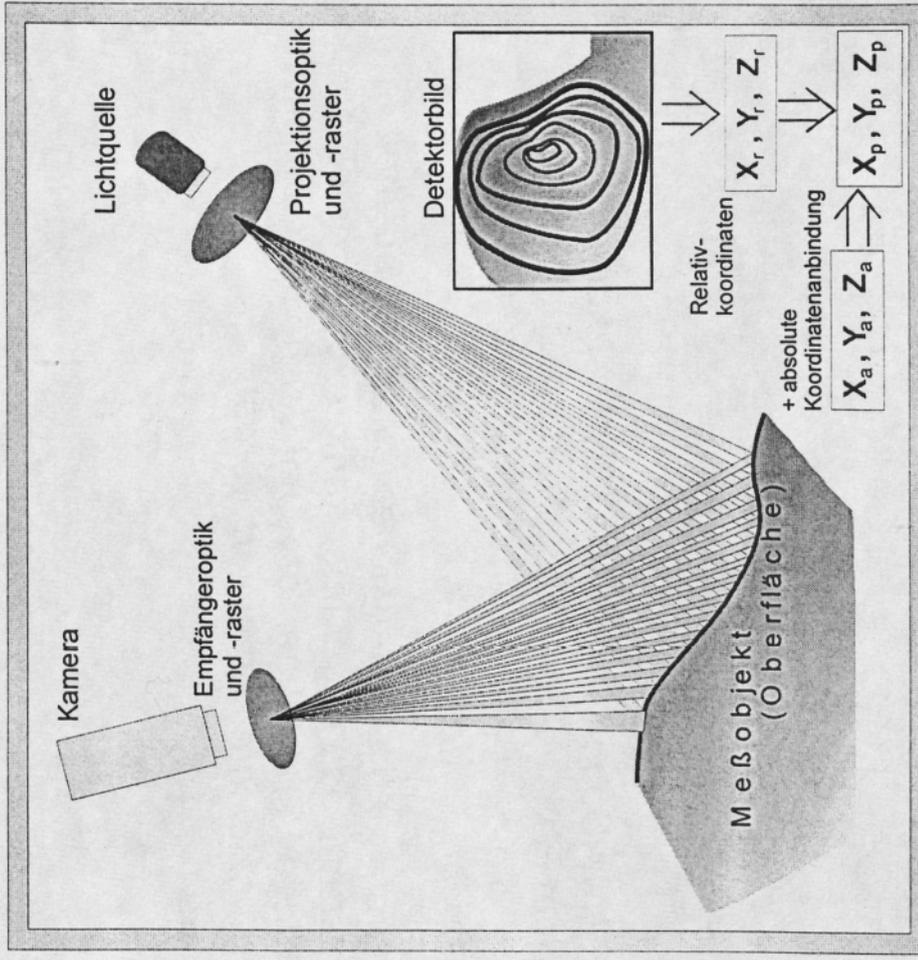
## Verfahren der optischen 3D-Erfassung



c) Photogrammetrie - Stereometrie (aktive und passive Verfahren)

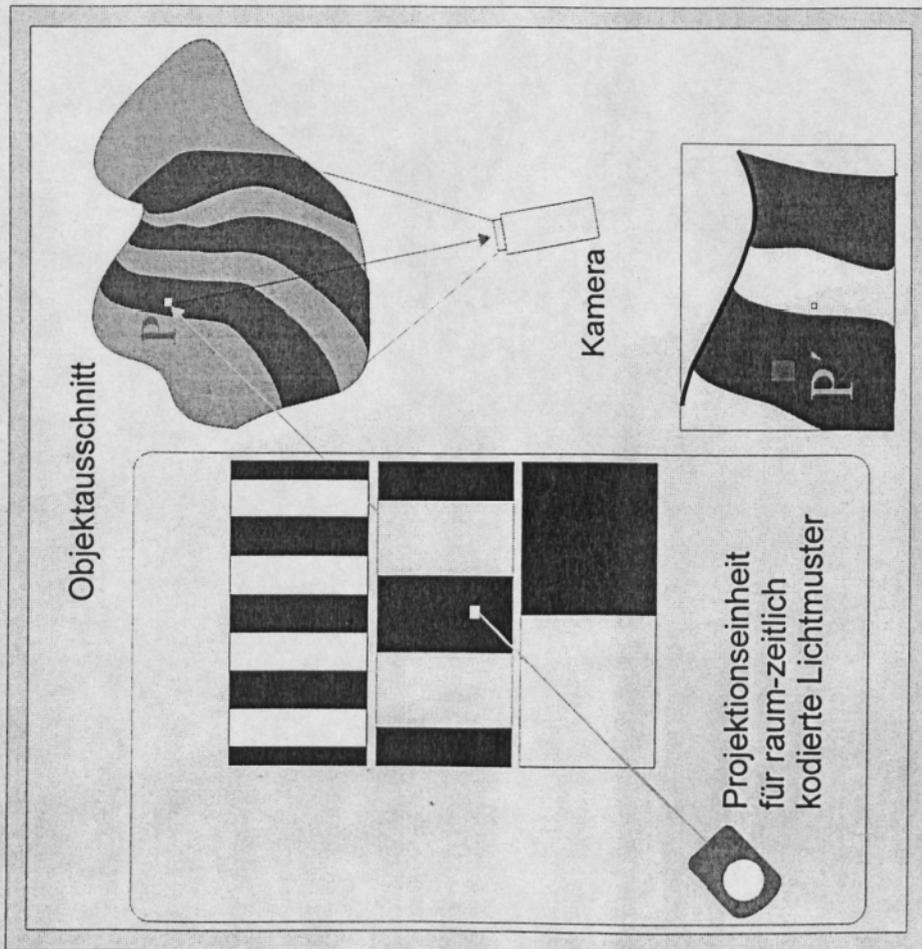
Beachte:

"Hinterschnitte", Abschattierungen } geometrische Komplexität des Objekts  
 diffus, schwarz, spiegelnd: - Reflektanzeigenschaften d. Objekts



d) Moiré - Meßverfahren

## Verfahren der optischen 3D-Erfassung



Das Gray-Code-Verfahren wird meist kombiniert mit dem Phasen-Shift-Verfahren ab einer Streifenbreite, die ca. 6-12 Pixeln der Kameraauflösung entspricht, eingesetzt.

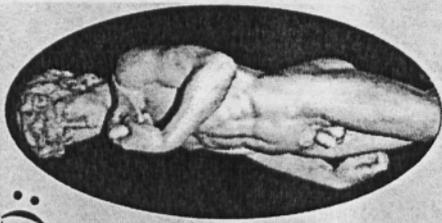
Dadurch kann die Meßsicherheit und Robustheit des Gray-Code gegenüber komplexen Geometrien (Sprünge, Vertiefungen etc.) mit der höchstmöglichen Meßpunktdichte kombiniert werden.

e) Erfassungsverfahren mit kodiertem Licht:  
hier: Prinzip der Gray-Code-Kodierung

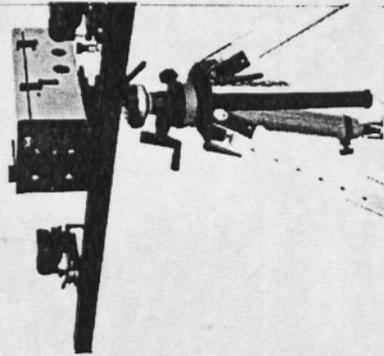
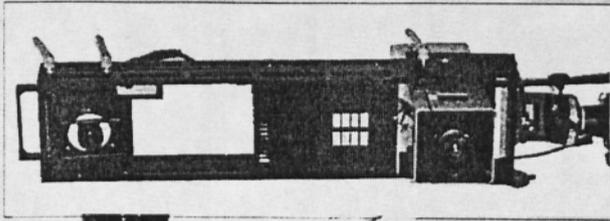
# EVA 2000 BERLIN

Tutorial 1: 3D-Aufnahme und Modellierung

## Gerätelösungen (Beispiele GFaI):

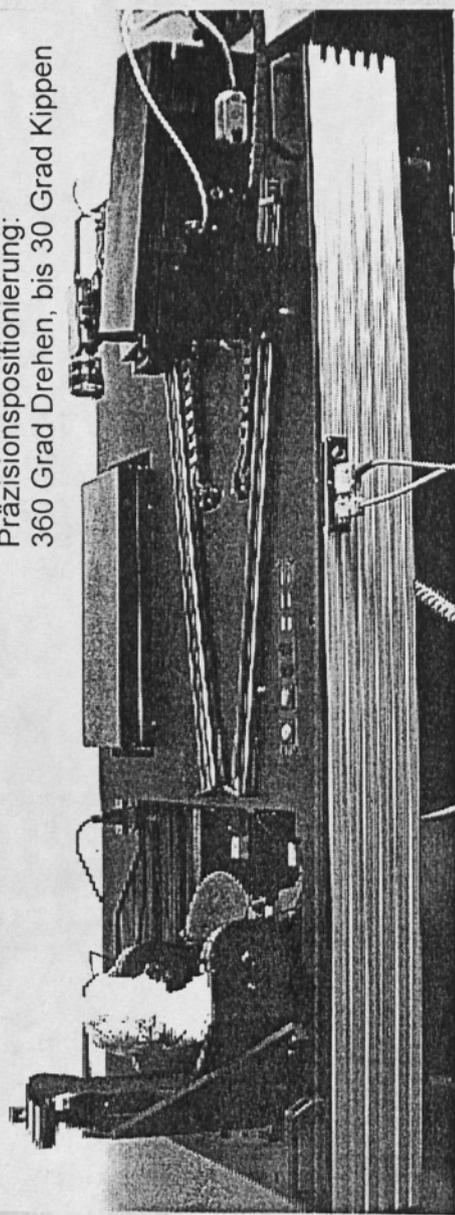


Größenklasse 30 cm .. 200 cm,  
akt. Stereometrie mit  
Graycode + Phasenshift,  
frei positionierbar,  
mobil, freilufttauglich



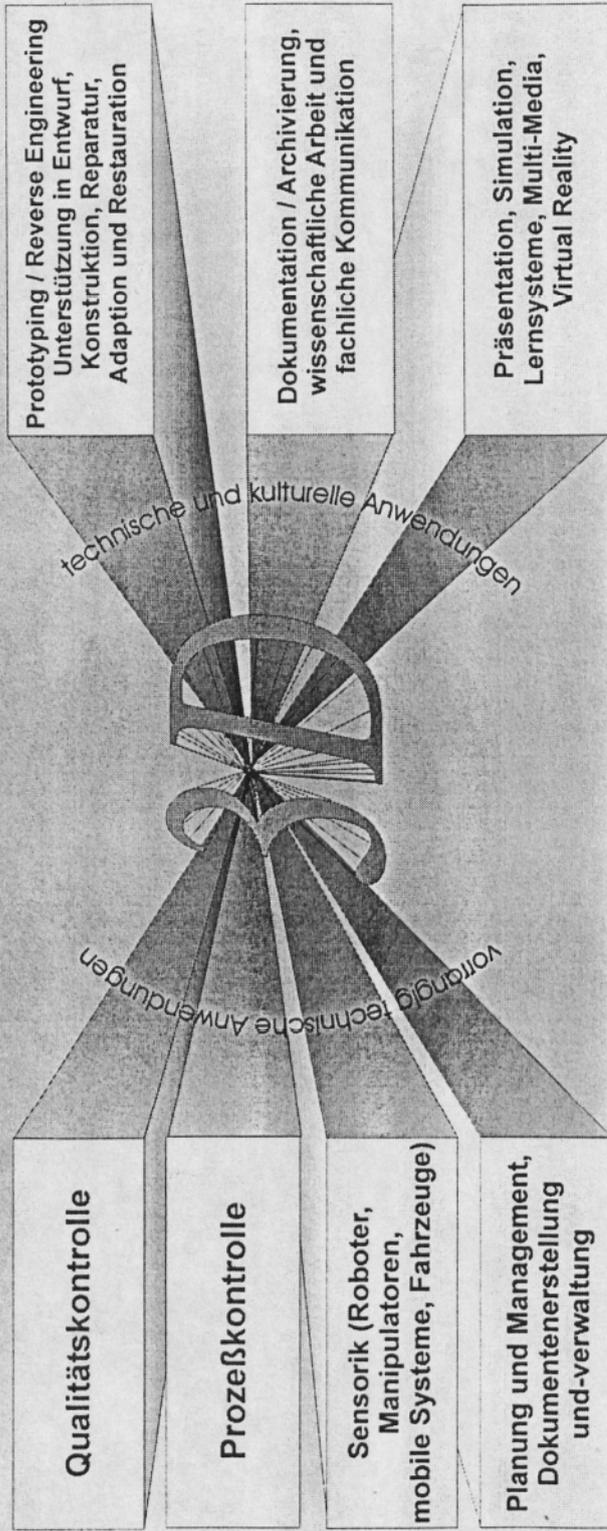
Größenklasse 10 bis 100 mm  
Graycode, Phasenshift  
Präzisionspositionierung  
Drehung: 360 Grad,  
Kippen : ±60 Grad

Größenklasse 3 cm .. 30 cm,  
Graycode + Phasenshift,  
Präzisionspositionierung:  
360 Grad Drehen, bis 30 Grad Kippen

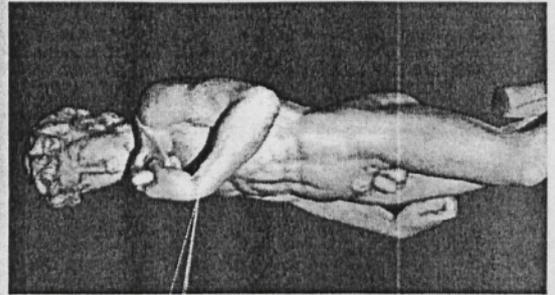


**Anwendungsfelder für 3D-Messung und -Modellierung:**

Tutorial 1: 3D-Aufnahme und Modellierung



**Vom Bild.....**



Bildpunkte, Pixel:

189	226
201	225, 231

**BILD:**  
 (Grauwerte):  $I_{gr} = F(i,j)$   
 (Farben, RGB-Modell):  $\left\{ \begin{array}{l} I_{rot} = F(i,j) \\ I_{blau} = F(i,j) \\ I_{grün} = F(i,j) \end{array} \right\}$

**.....zu "Tiefenbild", Punktwolke, 3D-Modell**



(20344, 1233, 56298)

3D-Datensatz,  
 "Punktwolke":  
 $PW = \mathbf{M} \{ P_{ijk}(x,y,z, \dots) \}$   
 $\begin{matrix} x_s, y_s, z_s, \\ \alpha_s, \beta_s, \gamma_s \end{matrix}$

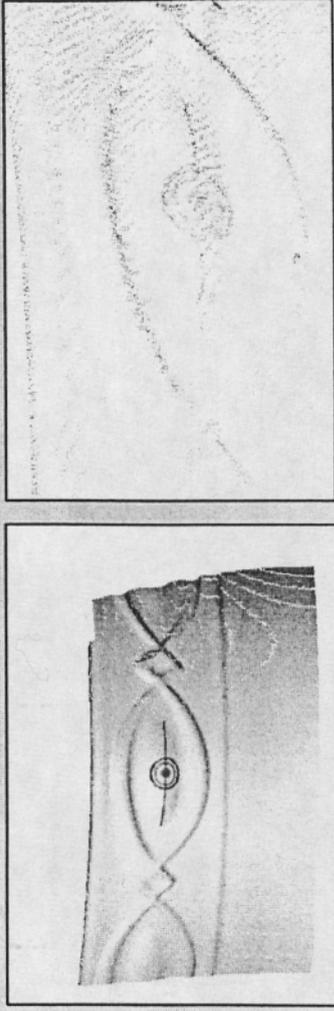
## Besonderheit und Vorteil bildgestützter 3D-Erfassungsverfahren:

direkte Zuordnung von Reflektanzeigenschaften zur 3D-Information

3D-Datensatz, "Punktwolke":

$$PW = M \left\{ \begin{matrix} P(x,y,z, I(i,j)) \\ \alpha \beta \gamma \delta \end{matrix} \right\} \quad \text{-Grauwertbild}$$

$$PW = M \left\{ \begin{matrix} P(x,y,z, Irot(i,j), Iblau(i,j), Igrün(i,j)) \\ \alpha \beta \gamma \delta \end{matrix} \right\} \quad \text{-Farbbild RGB}$$



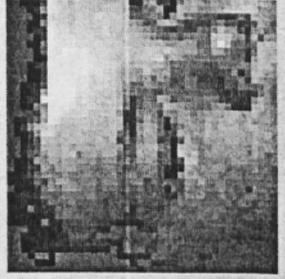
Bildgestützte 3D-Vermessung; neue Anwendungsgebiete durch Kombination mit klassischen Bildverarbeitungsmethoden

Messung und Kontrolle  
räumlicher  
Oberflächeninformation

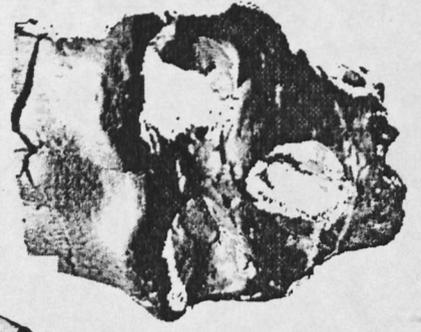
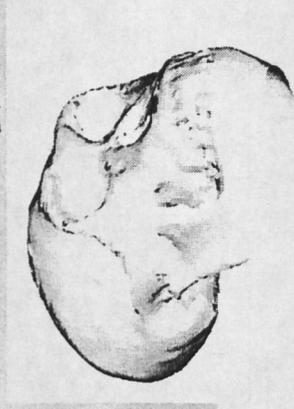
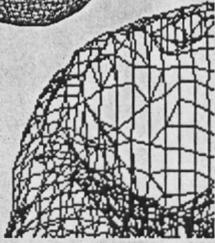
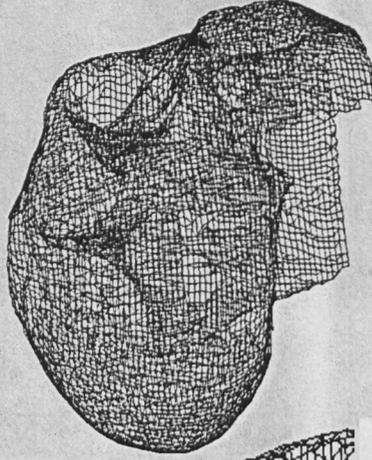
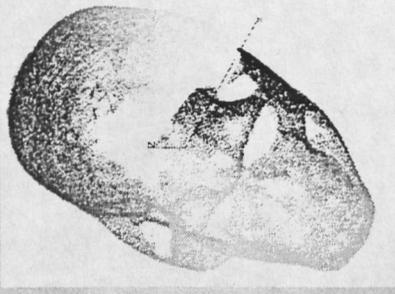
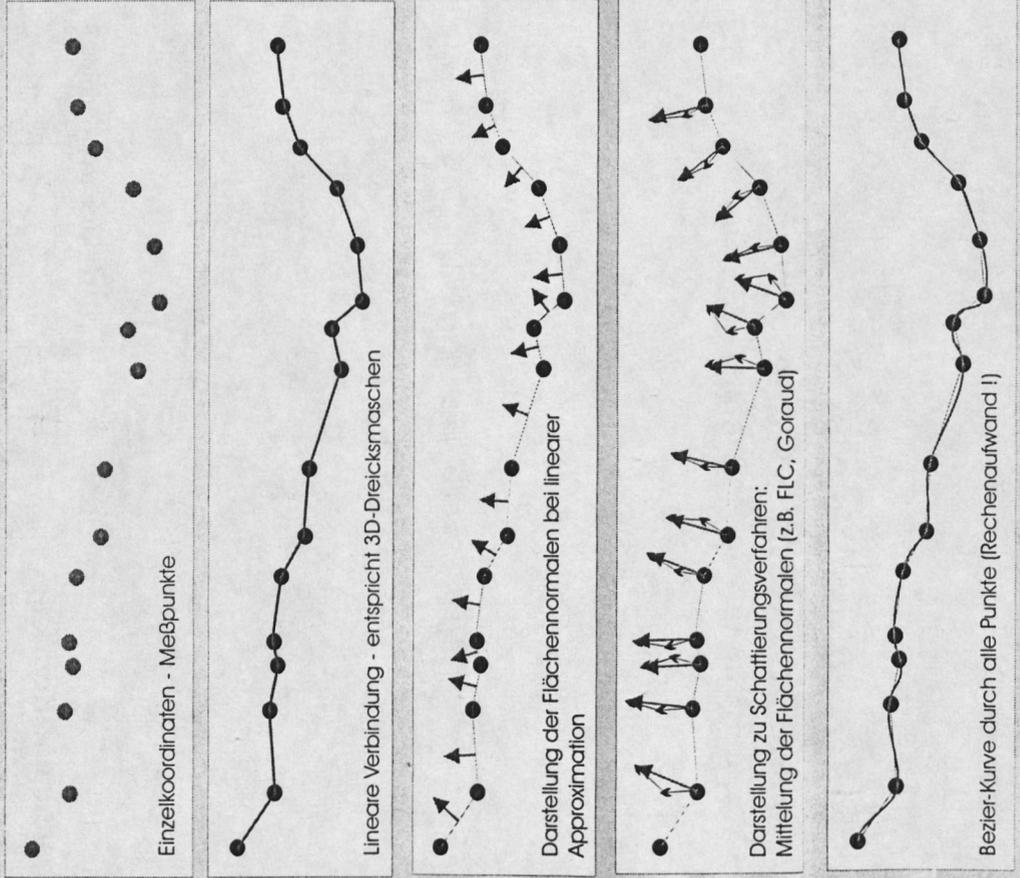
"Entfalten" von Mustern  
und Texturen  
von 3D-Oberflächen

Photorealistische  
Präsentation, 3D-Muster-  
erkennung und -design

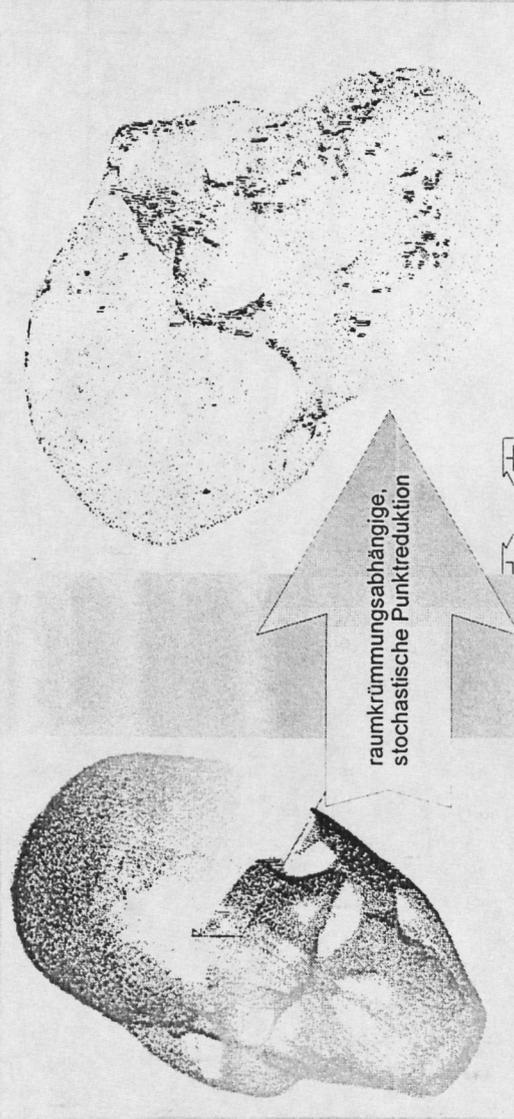
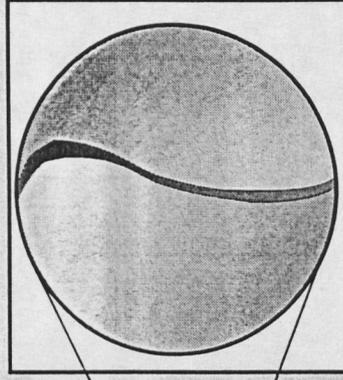
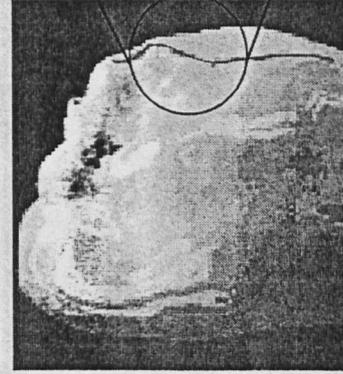
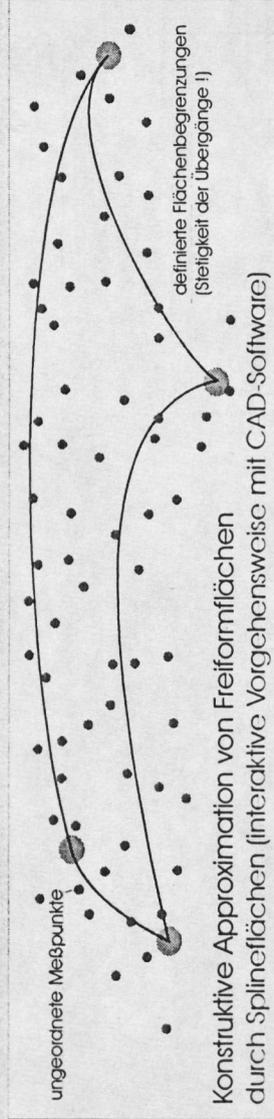
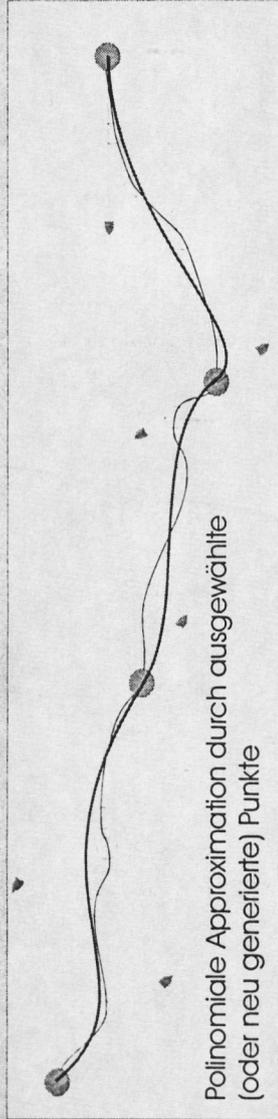
3D-Modellierung,  
3D-Puzzeln: Unterstützung  
durch 2D-Information



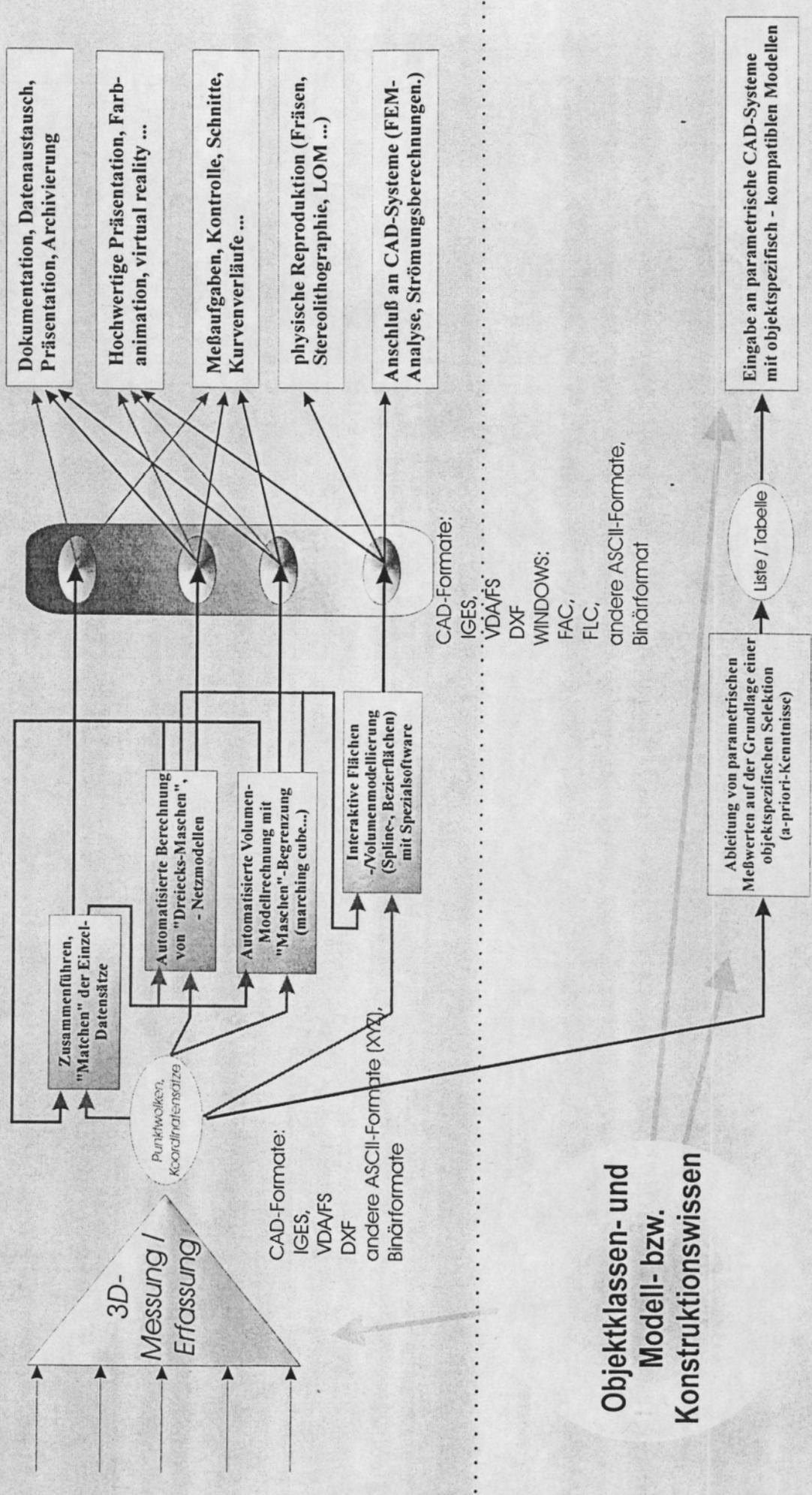
### Modellierung: Grundlagen von der Punktwolke zum 3D-Modell ....



### Modellierung: Grundlagen



## Modellierung: Anforderungen / Aufwand für unterschiedliche Nutzungen / Anwendungen der 3D-Techniken







# Automatisierung der 3D-Oberflächenvermessung mittels optimierter Referenzkörper

Z. Böröcz, C. Thomas, D. Dirksen, G. von Bally <sup>1</sup>  
S. Rieckhoff, F. Fleischer, W. Teegen <sup>2</sup>  
P. Funke, K. Freitag, N. Rummel <sup>3</sup>  
J. Maran, M. Shinoto <sup>4</sup>  
A. Papadimitriou <sup>5</sup>

<sup>1</sup> Universität Münster, Labor für Biophysik, Robert-Koch-Str.45, D-48129 Münster, Tel.: (+49)251/8356888, Fax: (+49)251/8358536, E-mail: biophys@gabor.uni-muenster.de

<sup>2</sup> Universität Leipzig, Historisches Seminar, Ritterstraße 14, D-04109 Leipzig, Tel.: (+49)341/9737050, Fax.: (+49)341/9737059, E-mail: ufg@rz.uni-leipzig.de

<sup>3</sup> Universität Münster, Seminar für Alte Geschichte, Institut für Epigraphik, Domplatz 20-22, D-48129 Münster, Tel.: (+49)251/8324367, Fax: (+49)251/8324363, E-mail: sag@uni-muenster.de

<sup>4</sup> Universität Heidelberg, Institut für Ur- und Frühgeschichte, Marstallhof 4, D-69117 Heidelberg, Tel.: (+49)6221/542541, Fax.: (+49)6221/542526, E-mail: m17@ix.urz.uni-heidelberg.de

<sup>5</sup> Vierte Ephorie des griechischen Antikendienstes (Nafplion)

## Überblick

- Einführung
- Anwendungspotential in der Archäologie und Zahnmedizin
- Experimenteller Aufbau
- Beispiel: Vermessung eines komplexen archäologischen Objektes
- Probleme bei der 3D-Koordinatenerfassung
- Lösungskonzept
  - Referenzkörper
  - Eigenentwicklung: Software OSCAN
- Vermessungsbeispiele
- Zusammenfassung und Ausblick

## **Einführung**

Die hochauflösende 3D-Formenerfassung mittels aktiver photogrammetrischer Verfahren wie der Streifenprojektionstechnik bietet vielfältige Einsatzgebiete. Es lassen sich schnell und berührungslos Oberflächen durch einige  $10^4 - 10^5$  3D-Koordinaten erfassen. Gerade die berührungslose und damit zerstörungsfreie Vermessungsmethode macht dieses Verfahren für die Archäologie interessant.

## **Anwendungspotential in der Archäologie und Zahnmedizin**

### **Anwendungsbereich Archäologie**

Die Dokumentation von Grabungssituationen und Einzelfunden erfolgt heutzutage größtenteils anhand manuell erstellter Zeichnungen, während Inschriften mit einer Papierabdrucktechnik dokumentiert werden. Hier bietet sich ein großes Automatisierungspotential durch optische Digitalisierungstechniken. Die dreidimensionale optische Vermessung ermöglicht darüberhinaus die Erstellung digitaler Kopien archäologischer Objekte, die bereits während der Grabung z.B. über das Internet an das Heimatinstitut zur Auswertung geschickt werden können. Diese lassen sich in einem „virtuellen Magazin“ zusammenstellen, um zum einen in realen Museen die Sammlungen zu ergänzen, bzw. dem Besucher zusätzliches Informationsmaterial zur Verfügung zu stellen, zum anderen aber auch den Aufbau eines vollständig virtuellen Museums zu ermöglichen, das z.B. über das Internet zugänglich ist. Neben der visuellen Präsentation bieten virtuelle Magazine aber auch ergänzende Möglichkeiten für die wissenschaftliche Auswertung. So lassen sich z.B. zu Studien-zwecken digitale Kopien der Objekte herunterladen, an denen qualitative Vermessungen durchgeführt werden können. Digitalisierte Objekte wie Siegel oder Münzen lassen sich rechnergestützt vergleichen, um z.B. belegen zu können, daß derselbe Prägestempel benutzt wurde. Schlecht entzifferbare Schriftzeichen von Inschriftenträgern lassen sich in Hinblick auf bessere Lesbarkeit grafisch hervorheben (Falschfarben-Darstellung) und analysieren.

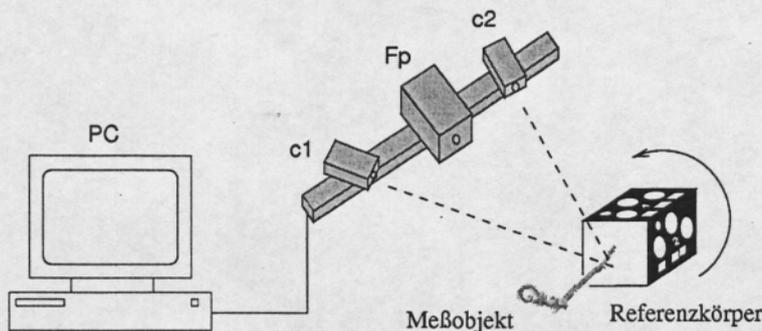
### **Anwendungsbereich Zahnmedizin**

Durch die Digitalisierung zahnmedizinischer Objekte wie Kiefermodelle, Zähne, Brücken etc. werden quantitative Untersuchungen der funktionellen Zusammenhänge des Kauapparates möglich. Eine therapeutische Anwendungsmöglichkeit ist die rechnergestützte Planung prothetischer Versorgungsmaßnahmen inklusive der Anfertigung von Prothesen im Zuge des Rapid Prototyping. Digitalisierte Präparate erlauben darüberhinaus in der Lehre ein wesentlich besseres Verständnis komplexer dreidimensionaler anatomischer Zusammenhänge und dynamischer Abläufe.

### **Experimenteller Aufbau**

Das topometrische Meßsystem zur dreidimensionalen optischen Oberflächenvermessung mittels der Streifenprojektionstechnik ist in der Abb.1 skizziert. Es besteht aus einem Meßkopf mit den optischen Komponenten und einem Steuer- und Auswerterechner. Mittels eines Projektors (Fp) werden mehrere Lichtmuster aus hellen und dunklen Streifen (die ein näherungsweise sinusförmiges Intensitätsprofil aufweisen) auf das Untersuchungsobjekt projiziert. Durch zwei CCD-Kameras (c1, c2) betrachtet, erscheinen

sie entsprechend der Oberflächenstruktur des Objektes verzerrt. Aus diesen Verzerrungen läßt sich - in Verbindung mit Informationen über die Aufnahmegeometrie und das optische System - für jeden Bildpunkt mit photogrammetrischen Verfahren ein 3D- Punkt berechnen. Zusammen ergeben sie eine dichte Punktwolke aus 3D-Koordinaten,



**Abb. 1:** Experimenteller Aufbau für 360 Grad 3D-Messung  
Fp: Streifenprojektor  
c1, c2: CCD-Kameras

ten, aus der im Rechner wieder eine zusammenhängende Oberfläche rekonstruiert werden kann. Zu diesem Zweck werden mit einem Algorithmus schrittweise alle Koordinatenpunkte mit einem Netz aus Dreiecksflächen verbunden (Triangulation). Wird eine vollständige Erfassung der Oberfläche eines Meßobjektes gewünscht, ist es erforderlich, mehrere Einzelmessungen aus unterschiedlichen Perspektiven durchzuführen, die anschließend im Rechner zusammengefügt werden können. Dabei erfolgt die Orientierung z.B. anhand von Referenzmarken, die auf oder neben dem Objekt platziert werden (Vermessungsbeispiel siehe Abb. 2).

### Probleme bei der 3D-Koordinatenerfassung

Bei der vollständigen Vermessung eines Objektes ergeben sich mehrere Probleme: Da die Referenzmarken bei herkömmlichen Verfahren oftmals über dem Objekt verstreut angebracht werden, ist eine zeitaufwendige manuelle Identifikation dieser Referenzmarken erforderlich. Es gibt viele Meßpositionen, in denen die bereits angebrachten Referenzmarken nicht einzusehen sind. Um die einzelnen Messungen eindeutig zusammensetzen zu können, ist es aber notwendig, mindestens drei dieser Referenzmarken im Bildausschnitt zu sehen. Ist dies nicht der Fall, so muß eine andere Meßposition gewählt werden, in der drei bereits bekannte Referenzmarken sichtbar sind. Durch das Hinzufügen weiterer Referenzmarken ist sichergestellt, daß weitere Meßpositionen gewählt werden können, die eine sukzessive Ergänzung der Oberfläche ermöglichen. Dieses Verfahren erfordert allerdings sehr viele Meßpositionen, die im wesentlichen nur dazu dienen, die Koordinaten weiterer Referenzmarken festzulegen, ohne daß in zügigen Schritten die Objektoberfläche erfaßt wird. Eine weitere Schwierigkeit stellt die Befestigung der Referenzmarken am Objekt dar.

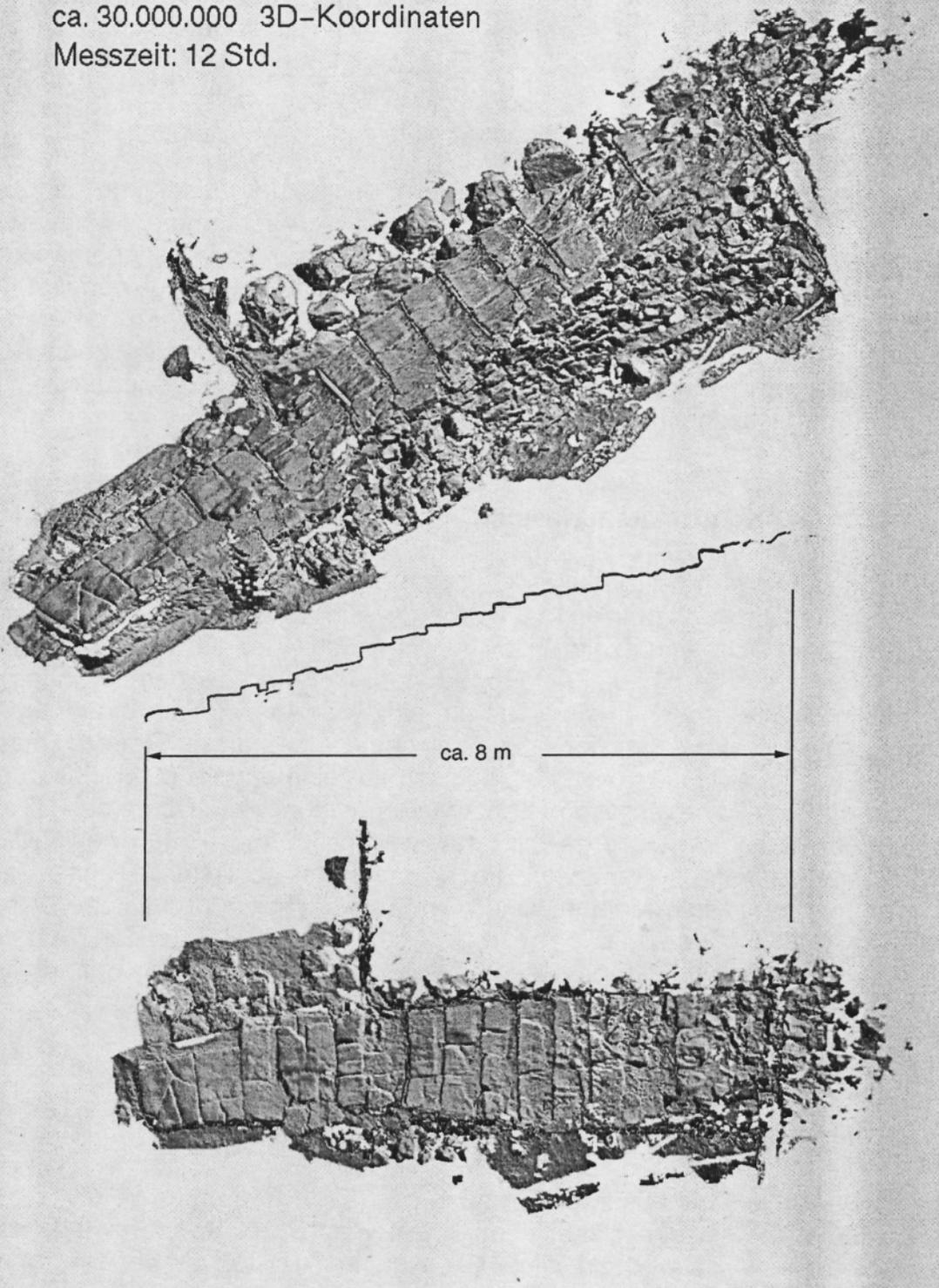
### Lösungskonzept

#### Hardware: Referenzkörper

Das Lösungskonzept besteht aus zwei Komponenten (siehe Abb. 3): Zum einen werden die einzelnen über dem Objekt verstreuten Referenzmarken zusammengefaßt. Sinnvollerweise wird ein Tripel von Referenzpunkten verwendet. Eine Binärcodierung erlaubt die automatische Identifikation des jeweiligen Tripels. Dadurch entsteht ein Referenzfeld. Durch die Integration eines verkleinerten Referenzfeldes lassen sich Detailaufnahmen leicht in den Datensatz integrieren. Die Verwendung von Referenzkör-

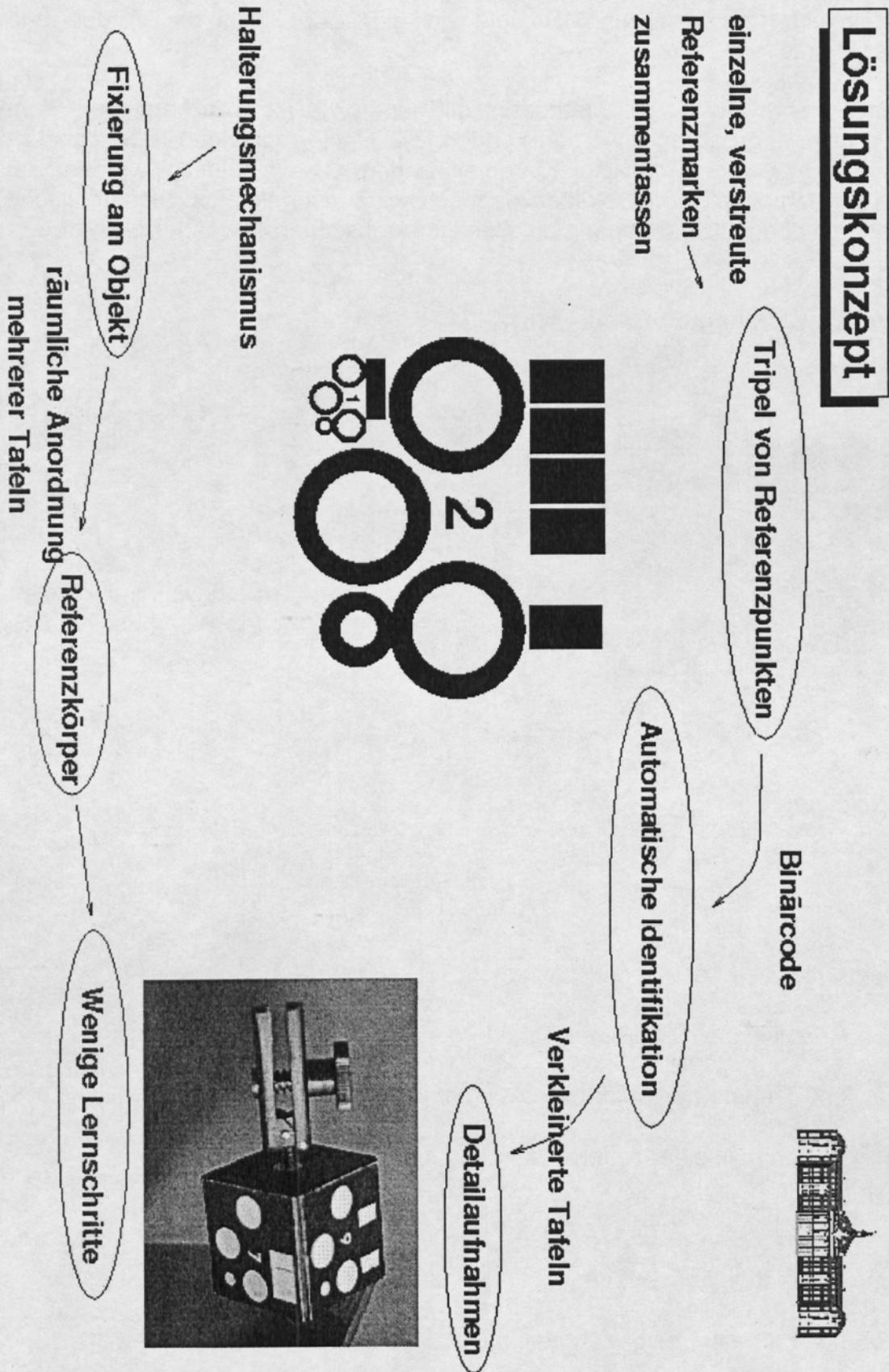
**Abb. 2:** Vermessung eines komplexen archäologischen Objektes  
(Treppe zwischen Ober- und Mittelburg von Tiryns, Griechenland)

Format: 8m x 4m x 2m  
198 Aufnahmen  
ca. 30.000.000 3D-Koordinaten  
Messzeit: 12 Std.



Wir danken Dr. A. Papadimitriou von der vierten Ephorie des griechischen Antikendienstes (Nafplion) für die Möglichkeit, Messungen auf dem Grabungsareal der antiken Burg von Tiryns durchzuführen.

Abb. 3 : Hardware-Lösungskonzepte



pern, bei denen alle Seiten mit einem Referenzfeld versehen werden, stellt bei vielen Problemen eine erhebliche Vereinfachung für den Meßprozeß dar: Da die Referenzkörper zuvor kalibriert werden, also alle Koordinaten aller Referenzfelder und -marken dem System bekannt sind, stehen für die Positionierung des Meßsystem wesentlich größere Variationsmöglichkeiten zur Verfügung. So läßt sich z.B. sehr leicht die Vorder- und Rückseite einer Mauer vermessen.

Die zweite Komponente umfaßt die Methoden, mit denen die Referenzkörper mit dem Meßobjekt in Verbindung gebracht werden können. Bei einigen Objekten (z.B. Zähnen) kann ein Referenzkörper etwa mit einer Klammer an dem Objekt befestigt werden. Bei zerbrechlichen und empfindlichen Objekten dagegen wurden erfolgreich Glasdrehtische eingesetzt, wodurch ebenfalls ein Zugang zu allen Objektansichten gewährleistet wurde.

### Software: Eigenentwicklung OSCAN

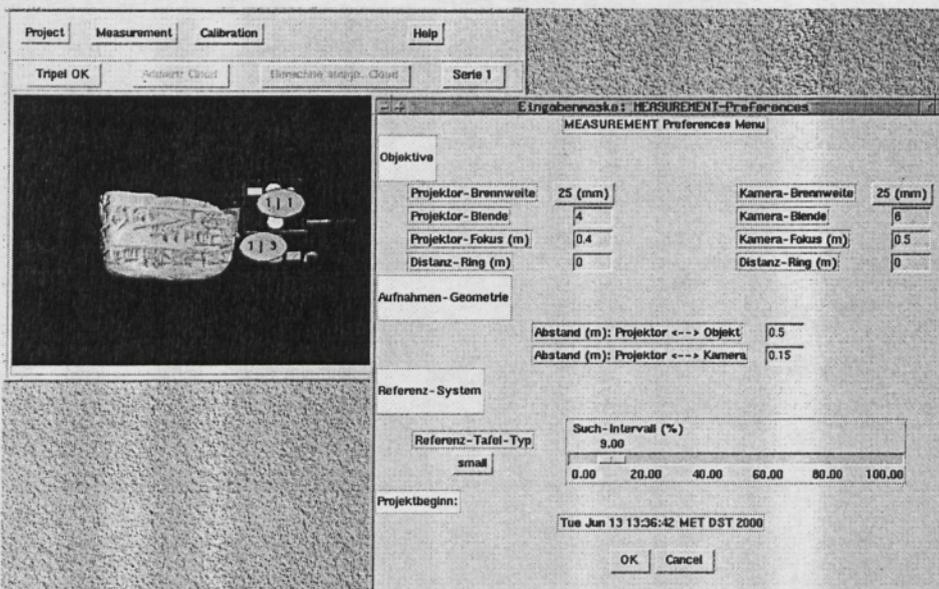
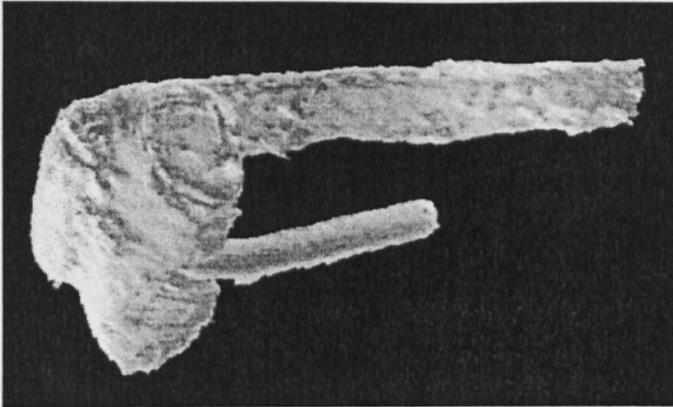


Abb. 4: Screenshot des am Labor für Biophysik entwickelten Programmes OSCAN

Die Software unterstützt verschiedene Funktionen:

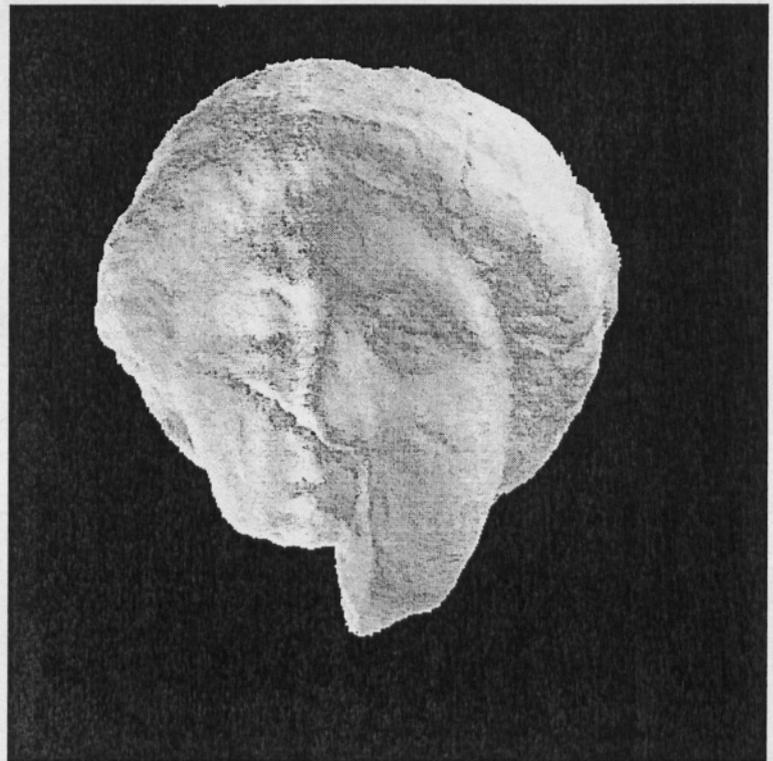
- Automatische Identifikation von Referenzfeldern
  - Automatische Transformation der Messungen in ein globales Koordinatensystem
- Einfache Kalibration beliebiger Referenzkörper
- Integration von Detailaufnahmen
- Löschen von Überschneidungen, um die Datenmenge zu minimieren
- Serienmessungen für sehr ausgedehnte Objekte
- Automatische Verwaltung aller Dateien einer Messung

## Vermessungsbeispiele



**Abb. 5:** Rekonstruierte  
Objektoberfläche einer Fibel

**Abb. 6:** Rekonstruierte  
Objektoberfläche des Kopfes  
einer Terracotta-Figur



## Zusammenfassung und Ausblick

Die phasenmessende Profilometrie eröffnet neue Perspektiven bei der Bearbeitung von archäologischen Fundstücken in Hinblick auf Analyse, Verbreitung und Präsentation der Objekte. Durch gezielte Weiterentwicklung der Automatisierung des Meßvorganges und der Qualität der Oberflächenrekonstruktion soll das System in Zukunft für jeden einfach und zweckmäßig zu bedienen sein. Im Vordergrund steht derzeit die Entwicklung eines Konzeptes, um bereits vorhandene Datenbestände automatisiert integrieren zu können.





