

OPTISCHE 3D-VERMESSUNG MUSEALER OBJEKTE MIT MIKROSKOPISCHEN UND MAKROSKOPISCHEN STREIFENPROJEKTIONSVERFAHREN

Gottfried Frankowski
Geschäftsführer
OMECA Messtechnik GmbH
Potsdamer Straße 18A
14513 Teltow b. Berlin
Telefon: 03328/44 61 30, Telefax: 03328/44 61 31

1 Einleitung

Die schnelle und kostengünstige dreidimensionale Erfassung und Vermessung von Bauteilen und Maschinenkomponenten ist eine grundlegende Voraussetzung, um einen fehlerfreien Produktionsprozeß in der industriellen Fertigung zu gewährleisten. Nachdem viele Jahre fast ausschließlich mechanisch tastende Verfahren für diese Meßaufgabe zum Einsatz kamen, gewinnen bedingt durch Verfügbarkeit moderner optischer und optoelektronischer Verfahren sowie einer kostengünstigen und leistungsfähigen Mikroechentechnik auch die optischen Meßverfahren zunehmend an Bedeutung. Eine Meßmethode, die auf Grund ihrer multivalenten Einsatzmöglichkeit in den letzten Jahren in der industriellen 3d-Meßtechnik eine grundlegende Bedeutung erhalten hat, ist die Streifenprojektionstechnik.

In der Streifenprojektionstechnik werden entweder einzelne parallele Streifenmuster mit konstantem Linienabstand (Einbildverfahren) oder Sequenzen von Streifenmustern mit unterschiedlichem Linienabstand (Gray-Code-Verfahren) auf die Oberfläche des 3d-Meßobjektes projiziert. Das 3d-Profil der Meßobjektoberfläche ergibt sich dann rein qualitativ in Form von Verschneidungsfiguren der projizierten Linien mit dem Meßobjekt. Werden diese Verschneidungsfiguren in geeigneter Weise mit einer CCD-Kamera aufgenommen und einem Auswerterechner zugeführt, so können in wenigen Sekunden aus den aufgenommenen Streifenmustern komplette 3d-Profilverläufe für meßtechnische Zwecke erhalten werden. In Abhängigkeit von der verwendeten Projektions- und Abbildungsoptik können auf diese Weise sowohl mikroskopische Profilverläufe mit einigen hundert Mikrometern Meßlänge als auch makroskopische Profile bis zu einigen Metern leicht und schnell aufgenommen und meßtechnisch verarbeitet werden. Die erreichbare Vertikalauflösung kann überschläglich und in Abhängigkeit vom Oberflächenzustand des Meßobjektes zwischen 1/1000 bis 1/3000 der Meßlänge angesetzt werden. Unter optimalen meßtechnischen Verhältnissen (ibs. ausreichende Lichtintensität, hoher Streifenkontrast) kann die erreichbare Profilhöhenauflösung bis zu 1/5000 der Meßlänge gesteigert werden. Die laterale Auflösung wird im wesentlichen durch die Integration der verwendeten CCD-Kamera bestimmt, wobei sich der Meßpunktabstand aus dem Quotienten von Meßlänge und Kamerapixel ergibt.

Wie unterschiedliche Entwicklungen und auch in eigene Untersuchungen zeigen, ist diese mikroskopischen und makroskopische Streifenprojektionstechnik auch für die Untersuchung musealer Gegenstände eine sehr gut geeignete Methode, da sie schnell und berührungsfrei arbeitet und so zum Teil sehr wertvolle und nicht ersetzbare Kunstgegenstände dreidimensional erfaßt, bewertet und dokumentiert werden können.

Im nachfolgenden soll anhand von einigen Anwendungsbeispielen der Einsatz der mikroskopischen und makroskopischen Streifenprojektionstechniken zur Untersuchung musealer Gegenstände bzw. Aufgabenstellungen gezeigt und näher erläutert werden.

2 Untersuchung von Gemälden mittels Mikrostreifenprojektion

Für die Untersuchung von Gemälden hinsichtlich Zuordnung von Künstlern und Maltechniken bzw. auch Bildfälschungen wurde von Herrn Dr. F. Makes, Restaurator an den königlich schwedischen Museen „Livrustkammaren“ in Stockholm eine Methode entwickelt und in vielen Fällen erfolgreich eingesetzt, um unter Verwendung biochemischer Stoffe auf der Grundlage von Grillenzymen Maltechniken und Bildfälschung von Gemälden Alter Meister zu identifizieren / 1, 2, 3/. Die Methode baut darauf auf, daß in verschiedenen Jahrhunderten durch die Künstler jeweils unterschiedliche Materialien und Farben mit einer spezifischen Zusammensetzung und unterschiedlichen Enzymstrukturen verwendet wurden.

Werden nun den zu identifizierenden Gemälden kleinste Partikelchen entnommen, zwecks Positionierung in eine Plastikfüllung eingebettet und mit den von Dr. Makes entwickelten Grillenzymen behandelt, so zeigen Proben, von Gemälden unterschiedlicher Zeitabschnitte, unterschiedliche Reaktionen auf die Enzymbehandlung. Da es sich bei der

Enzymbehandlung der eingebetteten Farbpartikelchen um einen Ätzabtrag handelt, die einen Abtrag in die Tiefe der Probe bewirkt, ist eine rein mikroskopische Beobachtung und Bewertung nicht ausreichend, um die tatsächliche Wirkung zu erfassen. Soll eine vollständige Bewertung der Enzymreaktion vorgenommen werden, so ist eine mikroskopische 3d-Vermessung der eingebetteten Farbproben erforderlich. Auf Vorschlag und in enger Zusammenarbeit mit Dr. Makes wurde für diese spezifische 3d-Meßaufgabe das mikroskopische Streifenprojektionssystem „MikroPLAN“ angepaßt und nun bereits seit mehreren von Dr. Makes am Livrustkammaren Jahren in Schweden erfolgreich eingesetzt.

Bei dem Meßsystem „MikroPLAN“ handelt es sich um ein konventionelles Auflichtmikroskop mit bis zu 500facher Vergrößerung. Durch eine spezifische Gestaltung des Köhlerschen Beleuchtungsstrahlenganges des Mikroskopes, wie in der nachfolgenden Prinzipskizze gezeigt, ist es möglich mikroskopische Streifen durch das Mikroskopobjektiv hindurch auf die Substratoberfläche zu projizieren / 4 /.

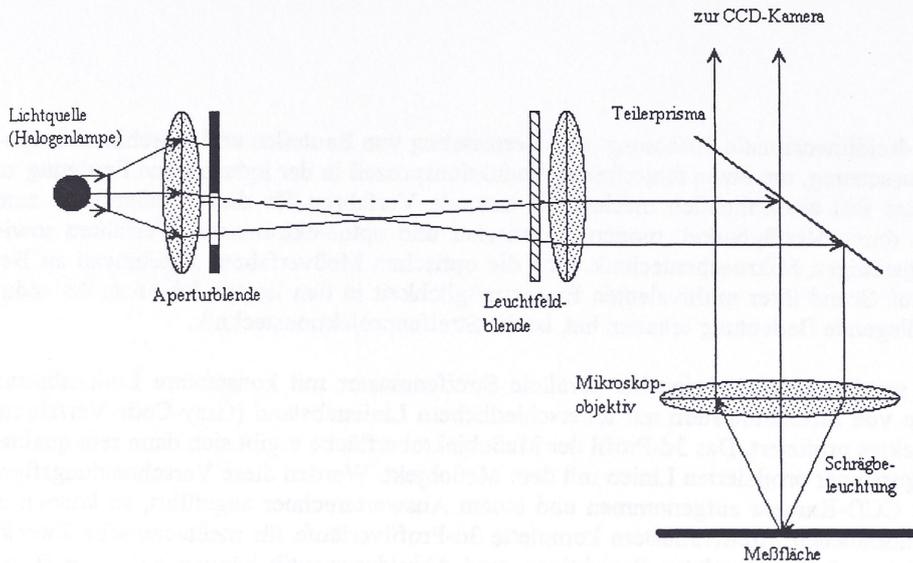


Bild 1 Prinzipskizze des OMECA-Streifenprojektionmikroskops „MikroPLAN“

Auf diese Weise werden parallele Streifen mit einem definierten Linienabstand projiziert. Weißt die zu untersuchende Oberfläche eine 3d-Struktur auf, so führt dies zu einer Auslenkung der Streifen, die im Okular des Mikroskopes oder bei Verwendung einer Aufnahmekamera am Kontrollmonitor sichtbar gemacht und verfolgt werden können. Bild 2 zeigt ein solches Streifenmuster, das durch eine Mikrostruktur im Streifenprojektionmikroskop erhalten wurde.

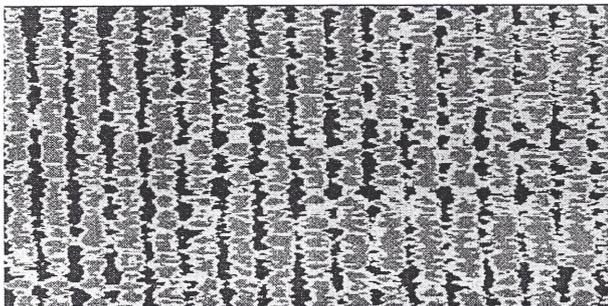


Bild 2 Mikrostreifenverlauf auf einer Gemäldeprobe (Aufgenommen: „MikroPLAN“ [20x0.4])

Die Größe der Auslenkung ist dabei ein qualitatives und quantitatives Maß für die Tiefe bzw. Profilhöhe der 3d-Struktur. Für eine sichere und quantitative Bewertung und Dokumentation wird eine rechnergestützte Auswertung verwendet, mit deren Hilfe aus dem in Bild 2 gezeigten Streifenmuster ein komplettes 3d-Mikroprofil berechnet und am Rechnermonitor dargestellt werden kann.

Werden nun, wie am Livrustkammaren in Stockholm praktiziert, die eingebetteten und mit Enzymen behandelten Gemäldeproben im Streifenprojektionmikroskop untersucht, so je nach Herkunft und Zustand des Gemäldes eine unterschiedliche Abtragsreaktion durch die aufgebrauchten Enzyme zu identifizieren.

Die Bilder 3 und 4 zeigen zwei typische Meßergebnisse einer solchen Untersuchung, die aus einer Untersuchung von Gemälden von „MERIAN“ bzw. „BRAHE“ entstammen. Rein der Vergleich der Proben, die jeweils von einem Bild beider Maler entnommen wurden, zeigen einen deutlichen Unterschied im Schichtaufbau des Gemäldes, wie er durch die Enzymbehandlung sichtbar gemacht werden kann.

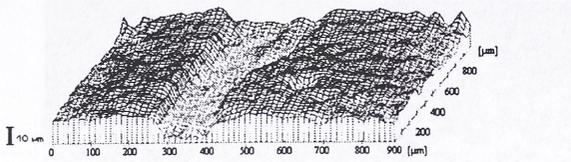


Bild 3a Meßergebnis am Gemälde von „MERIAN“

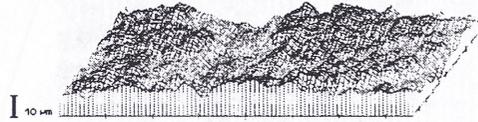


Bild 4a Meßergebnis am Gemälde von „BRAHE“

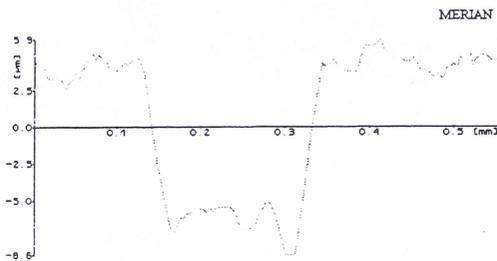


Bild 3b Profilschnitt in der Probenmitte „MERIAN“

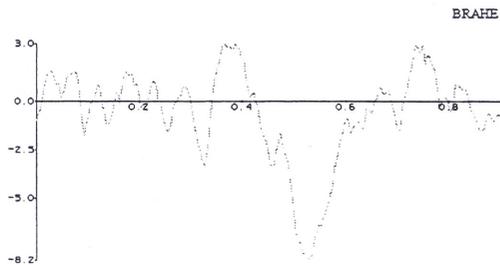


Bild 4b Profilschnitt in der Probenmitte „BRAHE“

Neben der Bewertung des Abtragprofils der enzymbehandelten Farbprobe ist durch das Setzen von Linienschnitten auch eine Konturvermessung und somit Zuordnung der Enzymwirkung auf einzelne Bereiche des Aufbaus der Gemäldefarbschicht gegeben, was neben der Aussage „Kopie oder keine Kopie“ zum Beispiel auch Rückschlüsse über verwendete Maltechniken und Untergroundbehandlung von Gemälden zuläßt.

Die auf der Methode der Enzymbehandlung von Dr. Makes und die Vermessung mit dem mikroskopischen Meßsystem „MikroPLAN“ aufbauenden Bewertung von Gemälden bietet die Möglichkeit, eine direkte Zuordnung von Originalgemälden und Kopien vorzunehmen. Es natürlich auch eine sehr gute Ergänzung zu kunsthistorischen Bewertungen von Gemälden ibs. dann, wenn es sich hierbei um strittige und von verschiedenen Kunsthistorikern unterschiedlichen bzw. nicht eindeutig bewertbaren Gemälden handelt.

3 Untersuchung musealer Leder-, Stoff-, Papier- und Holzobjekte

Eine wesentliche und außerordentlich komplizierte restauratorische Tätigkeit ist die Erhaltung von kunsthistorischen Gegenständen aus Leder, Stoff oder Papier. Es handelt sich hierbei zum Beispiel um historische Waffen, Kleidungsstücke, Bücher und Schriftrollen u.ä.. Der Zustand dieser Gegenstände wird neben der chemischen bzw. biologischen Zusammensetzung natürlich wesentlich durch seine Oberflächenstruktur bzw. das Oberflächenprofil bestimmt. Die schnelle und vor allem berührungslose Erfassung der 3d-Oberflächenstruktur und deren zeitliche Veränderung über einen längeren Zeitraum stellt in zunehmendem Maße eine Aufgabe für die konservatorische Tätigkeit dar. Analog der o.g. mikroskopischen Untersuchung von Partikelchen von Gemälden stellt auch diese Untersuchungsart ein 3d-Meßaufgabe dar. Hinsichtlich der notwendigen Profilhöhenauflösung sind hierbei einige Mikrometer und bei der Profillänge in der Regel einige Millimeter für eine geeignete Bewertung notwendig.

Bereits mehrfach angewendet wurde für diese Meßaufgabe das OMECA-Meßsystem „MikroCAD“, daß mit einer Profillänge von 20 x 15 mm einen genügend großen Objektbereich erfaßt und mit einer Profilhöhenauflösung von 3 ... 5 µm auch eine gute Erkennbarkeit von Detailstrukturen im Höhenbild zuläßt.

Eine erste Anwendung dieses Meßsystems für museale Objekte zeigen die nachfolgenden Bilder 5 und 6, bei dem es sich um die Untersuchung des Profilverlaufes von zwei unterschiedlichen Lederstrukturen handelt, die einen deutlichen Unterschied im Profilverlauf erkennen lassen. Für eine quantitative Bewertung derartiger Strukturen, bietet sich die Berechnung der Flächenrauheiten an, wie sie in der Regel für die Bewertung von Oberflächen in der metallverarbeitenden Industrie verwendet werden.

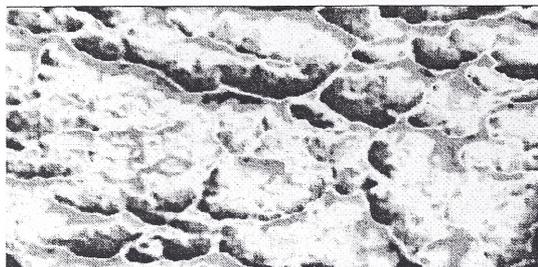


Bild 5 3d-Profil einer groben Lederstruktur (Grauwertcodierung der Profilhöhen)



Bild 6 3d-Profil einer feinen Lederstruktur (Grauwertcodierung der Profilhöhen)

Auf diese Weise ist ein direkter Vergleich unterschiedlicher Oberflächenstrukturen von Lederarten sowie über einen längeren Zeitraum gemessen der Fortgang der Veränderung der Oberflächenstruktur gegeben. Zu ähnlichen Untersuchungsergebnissen, wie an historischen Lederproben „MikroCAD“ auch bei der Untersuchung von Papier-, Stoff- und Holzproben, wie die nachfolgenden Aufnahmen in Bild 7 bis 10 zeigen.

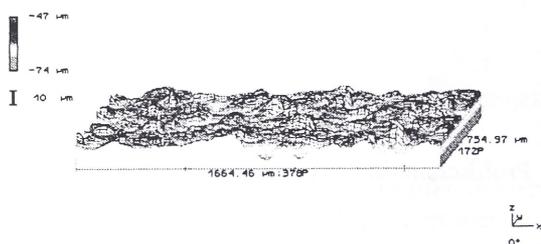


Bild 7 Oberflächenprofil einer stark strukturierten Papierdokumentenoberfläche

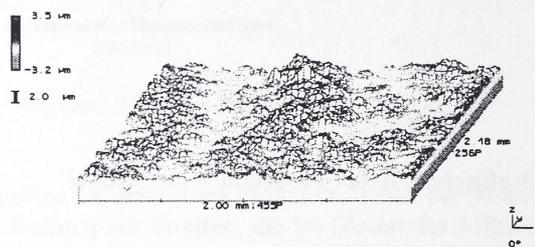


Bild 8 Oberflächenprofil einer wenig strukturierten Papierdokumentenoberfläche

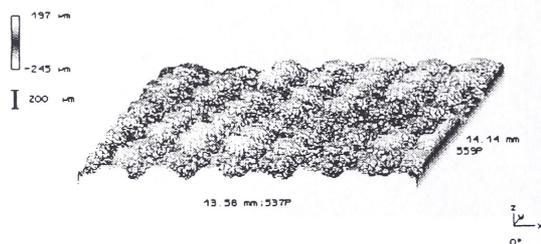


Bild 9 Oberflächenprofil einer musealen Stoffprobe

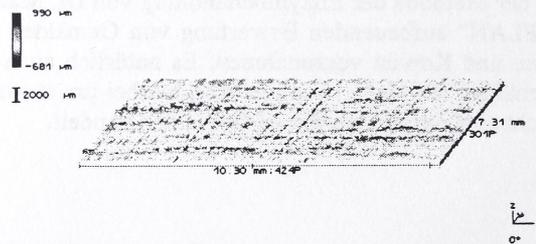


Bild 10 Oberflächenprofil einer musealen Holzprobe

4 Untersuchung historischen Gegenständen mit großen Abmessungen

Vielfach steht in der konservatorischen bzw. restauratorischen Tätigkeit die Aufgabe große Objekte wie Skulpturen, Standbilder, historische Stuckarbeiten oder Fresken oder Sandsteingebäude in aggressiven Medien zu vermessen und/oder zu archivieren. Wie zahlreiche Anwendungsbeispiele, die in den letzten Jahren bearbeitet wurden zeigen, ist die Streifenprojektionstechnik und insbesondere das Gray-Code-Verfahren, eine sehr gut geeignete Methode, um derartige 3d-Vermessungen vorzunehmen. Üblicherweise werden dabei Gray-Code-Verfahren auf der Grundlage von LCD-Projektoren eingesetzt, die Meßflächen zwischen 50 und maximal 100 cm zugänglich machen. Dabei sind die Meßob-

jekte entweder in spezielle Meßlabors zu transportieren oder die Untersuchungen sind bei Dunkelheit oder bei abgedunkelter Umgebung durchzuführen. In vielen Fällen ist es jedoch nicht gewünscht oder nicht möglich, die Meßobjekte abzutransportieren bzw. die spezifischen Umgebungsanforderungen für die Durchführung der Gray-Code-Technik auf der Basis von LCD-Projektoren zu sichern. Wünschenswert wäre es daher, Lichtstärke Projektionsysteme zu Verfügung zu haben, die eine Untersuchung unmittelbar vor Ort ggf. unter Tageslichtbedingungen zu ermöglichen.

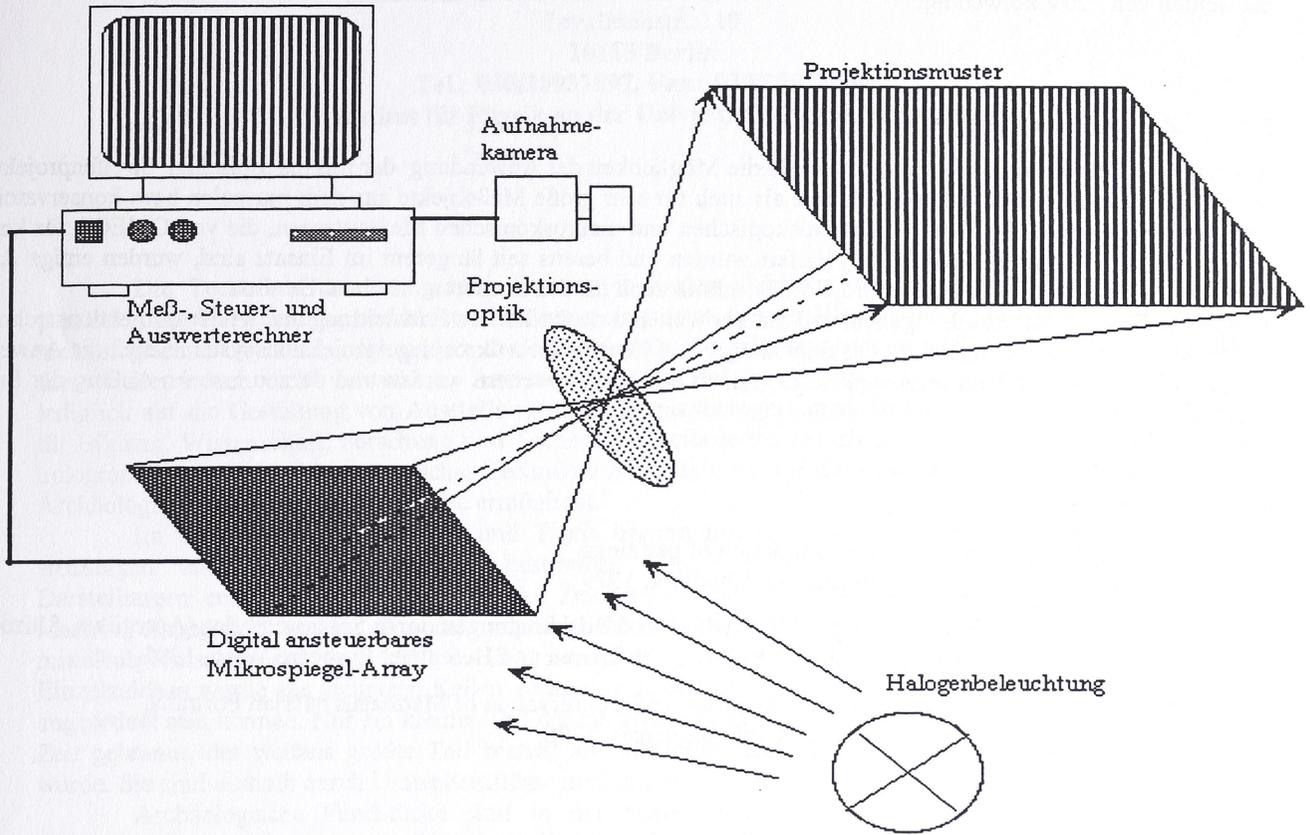


Bild 11 Prinzipskizze eines Beleuchtungssystems auf der Grundlage digitaler Mikrospiegel Arrays

Seit kurzen ist bei der Firma OMECA Messtechnik GmbH gelungen, ein lichtstarkes Projektionssystem auf der Grundlage von Digitalen Mirror Devices (DMD) der Firma Texas Instruments/USA als Gray-Code-Projektionssystem einzusetzen und kommerziell für eigene Untersuchungen oder auch für Servicemessungen anzubieten.

Wie die Prinzipskizze eines solchen Projektionssystems in Bild 11 zeigt, sind hierbei entweder 640 x 480 (VGA) oder 800 x 600 (SVGA) Mikrospiegel auf einer Fläche von 8 mm x 6 mm angeordnet. Es besteht nun die Möglichkeit, diese Mikrospiegel einzeln von einem Rechner anzusteuern und auf diese Weise eines strukturierte Beleuchtung mittels Graustufen zwischen 0 und 255 entweder in Form von als Streifen (Gray-Codes) oder beliebige andere Lichtstrukturen zu beleuchten.

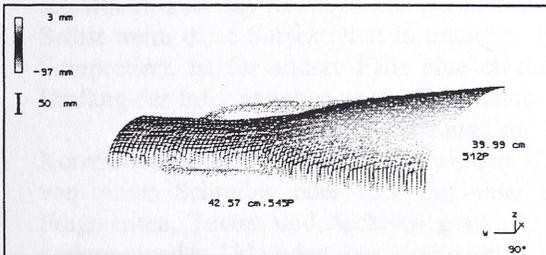


Bild 12a 3d-Profilverlauf auf einer Keramikvase (Aufnahme: OMECA-DLP-Projektor)

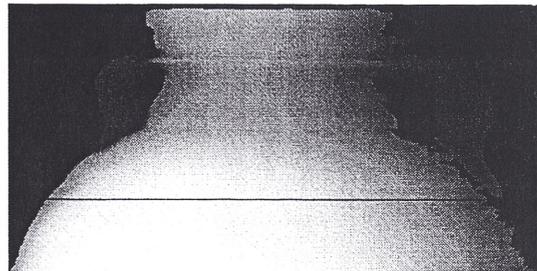


Bild 12b 2d-Profilsschnitt in vertikaler Richtung der Keramikvase (Messung: Radienverlauf)

Auf Grund der Verwendung von Mikrosiegeln ist für die Beleuchtung lediglich eine 270W Halogenlampe ausreichend, um auch große Flächen bis zu mehreren Quadratmetern ggf. in freier Umgebung und bei Tageslichtverhältnissen mit hoher Lichtintensität und hohem Streifenkontrast auszuleuchten.

Die in den Bildern 12a und 12b gezeigte Keramikvase mit einer Abmessung von ca. 100 cm, die bei vollen Tageslichtverhältnissen aufgenommen wurde, zeigt die Anwendungsmöglichkeiten dieses neuartigen Gray-Code-Projektionssystems auch für museale Gegenstände. Für die Aufnahme und 3d- bzw. 2d-Vermessung steht das komplette Meß-, Steuer- und Auswertesoftwarepaket „OMECA-FRINGER“ zur Verfügung, in welches das Projektionssystem eingebunden und sofort betriebsbereit ist. Für den Einsatz in freier Umgebung oder in Museen, wo in der Regel keine aufwendige Meßtechnik installiert werden kann, ist für die Durchführung derartiger Meßaufgaben lediglich ein normaler Stromanschluß von 220V notwendig.

5 Zusammenfassung

Anhand von Demonstrationsbeispielen wurde die Möglichkeit der Anwendung der mikroskopischen Streifenprojektionstechnik sowohl für mikroskopisch kleine als auch für sehr große Meßobjekte aus dem musealen bzw. konservatorischen Bereich gezeigt. An Hand von mikroskopischen und makroskopischen Meßsystemen, die von OMECA für konkrete restauratorischen Anwendungen geliefert wurden und bereits seit längerem im Einsatz sind, wurden einige Anwendungsmöglichkeiten der Streifenprojektionstechnik auch für den konservatorischen Bereich aufgezeigt. Es dabei davon auszugehen, daß mit der weiteren methodischen Entwicklung der Streifenprojektionstechnik und insbesondere die Verfügbarkeit leistungsfähiger und lichtstarker Mikrospiegelprojektionssysteme, sich die Anwendungsmöglichkeiten auch im musealen Bereich noch erheblich erweitern werden und derzeit erst am Anfang der Entwicklungen stehen.

6 Literatur

- / 1 / Makes, F.: Enzymatic consolidation of paintings
Thesis, University of Göteborg, 1979
- / 2 / Makes, F.: Beschädigung von Gemälden und Buchbindungen durch Schimmelpilze (Aspergillus, Rhizopus und Penicillium Stämme), Bakterien und Hefepilze, Eurocare Wien, 1995
- / 3 / Makes, F.: Investigation, Restoration and Conservation of Mattheus Merian Portraits,
Acta Universitatis Gothoburgensis, 1996