Zeitschrift: Georges-Bloch-Jahrbuch des Kunstgeschichtlichen Seminars der Universität Zürich

Herausgeber: Kunstgeschichtliches Seminar der Universität Zürich

Band: 3 (1996)

Artikel: Stereolithographie, Computergraphik und Computertomographie

Autor: Fuchs, Walther / Stucki, Heinz

DOI: https://doi.org/10.5169/seals-720112

Nutzungsbedingungen

Die ETH-Bibliothek ist die Anbieterin der digitalisierten Zeitschriften auf E-Periodica. Sie besitzt keine Urheberrechte an den Zeitschriften und ist nicht verantwortlich für deren Inhalte. Die Rechte liegen in der Regel bei den Herausgebern beziehungsweise den externen Rechteinhabern. Das Veröffentlichen von Bildern in Print- und Online-Publikationen sowie auf Social Media-Kanälen oder Webseiten ist nur mit vorheriger Genehmigung der Rechteinhaber erlaubt. Mehr erfahren

Conditions d'utilisation

L'ETH Library est le fournisseur des revues numérisées. Elle ne détient aucun droit d'auteur sur les revues et n'est pas responsable de leur contenu. En règle générale, les droits sont détenus par les éditeurs ou les détenteurs de droits externes. La reproduction d'images dans des publications imprimées ou en ligne ainsi que sur des canaux de médias sociaux ou des sites web n'est autorisée qu'avec l'accord préalable des détenteurs des droits. En savoir plus

Terms of use

The ETH Library is the provider of the digitised journals. It does not own any copyrights to the journals and is not responsible for their content. The rights usually lie with the publishers or the external rights holders. Publishing images in print and online publications, as well as on social media channels or websites, is only permitted with the prior consent of the rights holders. Find out more

Download PDF: 12.07.2025

ETH-Bibliothek Zürich, E-Periodica, https://www.e-periodica.ch

Walther Fuchs und Heinz Stucki

Stereolithographie, Computergraphik und Computertomographie

Elektronische Techniken für ein nondestruktives Kopierverfahren mittelalterlicher Skulpturenfragmente

Ein »Jahrhundertfund« der Mittelalterarchäologie in Bern

Die innovative Idee, elektronische Techniken wie Stereolithographie, Computergraphik und Computertomographie für ein nondestruktives Kopierverfahren von mittelalterlichen Skulpturenfragmenten nutzbar zu machen, ist im Zusammenhang mit einem international diskutierten Fund des Berner Archäologischen Dienstes entwickelt worden.

Im Jahr 1986 förderten archäologische Grabungen in der Nähe des Berner Münsters Skulpturenfragmente aus Sandstein zutage; der Anlass dafür war die Sanierung eines Mauerrisses an der Südwestecke der Münsterplattform gewesen.[1] Die Fundstücke konnten recht bald als Überreste aus dem Berner Bildersturm vom 27. und 28. Januar 1528, der die kostbare spätmittelalterliche Ausstattung des Berner Münsters und von Sakralbauten in der näheren Umgebung[2] in Mitleidenschaft gezogen hatte, identifiziert werden.[3] Die als »Jahrhundertfund« gefeierte Entdeckung bestätigt eindrücklich frühe historische Dokumente zum Berner Bildersturm. Eine wichtige Textquelle findet sich bekanntlich in der Chronik, die Valerius Anshelm im Auftrag des Berner Stadtrats für die Jahre 1474 bis 1536 verfasst hat; dort sind die reformatorischen Ereignisse folgendermassen beschrieben: »[...] uf disen Mentag, was der 27. tag Jenners, nach erwågner und verabscheideter disputaz, mit rat und anwisung viler geschriftgelêrten, ist von råten und burgeren abgemêret und entlich beschlossen, dass in irer stat fůrbashin kein mes nimerme, sunder des wort Gots tågliche predî, der touf und des hern nachtmal ghalten, dass ouch indert 8 tagen alle bilder, taflen und altar uss allen kilchen und kapellen

Diese Arbeit ist Prof. Dr. W. A. Fuchs (†) gewidmet, der an der Konzeption und Realisierung des Projekts massgeblich beteiligt war. Ein besonderer Dank gilt auch Dr. Christoph Zollikofer und Prof. Dr. Peter Stucki vom MultiMedia Labor des Instituts für Informatik der Universität Zürich sowie dem Archäologischen Dienst des Kantons Bern.

1 Vgl. dazu Gutscher, Daniel, *Die Auffindung der Skulpturenfragmente 1986 auf der Berner Münsterplattform*, in: Bern. Die Skulpturenfunde der Münsterplattform. Katalog der figürlichen und architektonischen Plastik, hrsg. von Urs Zumbrunn und Daniel Gutscher (Schriftenreihe der Erziehungsdirektion des Kantons Bern), Bern 1994, pp. 9–24, hier p. 17 (ganze Publikation im folgenden abgekürzt als: Skulpturenfunde 1994). Zur Beurteilung der internationalen Bedeutung des Fundes vgl. *Diskussionen vom 27. August 1988 im Kunstmuseum Bern*, in: Bern. Die Skulpturenfunde der Münsterplattform. Bericht über das Interims-Kolloquium vom 26./27. August 1988 in Bern, hrsg. von Daniel Gutscher und Urs Zumbrunn (Schriftenreihe der Erziehungsdirektion des Kantons Bern), Bern 1989, pp. 79–96 (ganze Publikation im folgenden abgekürzt als: Skulpturenfunde 1989).

2 Vgl. dazu *Die Berner Chronik des Valerius Anshelm*, hrsg. vom Historischen Verein des Kantons Bern, Bd. 5, Bern 1896, p. 244; *Heinrich Bullingers Reformationsgeschichte*, hrsg. von H. H. Vögeli und J. J. Hottinger, unveränderter Nachdruck

Abb. 1: Illustration zum Berner Bildersturm in der Thomann-Abschrift von Heinrich Bullingers Reformationsgeschichte, 1605, kolorierte Federzeichnung, 9,7 x 15,2 cm, Zürich, Zentralbibliothek, Ms. B 316, fol. 321v.

Abb. 2: Skulpturenfragmente der »Berner Madonna« (stehende Muttergottes mit Kind) auf einer Palette im Depot des Archäologischen Dienstes des Kantons Bern, Foto 1993.

hin- und abgetan sôltid werden [...] Und also wurden in disem grûlichen sturm in der lutkilchen 25 altar un das sacramentshus geschlissen, die gôtzen zerschlagen und in's kilchofs schûte vergraben.«[4]

Der Berner Bildersturm ging, verglichen mit demjenigen in Zürich, weniger kontrolliert vonstatten.[5] Die heruntergeschlagenen und teilweise in ikonoklastischer Absicht beschädigten Heiligenfiguren[6] wurden verbrannt[7] (Abb. 1) oder auf die nahegelegene Schutthalde der Münsterplattform gekarrt und die Böschung hinuntergeworfen.[8]

Nachdem 1986 die Ausgrabung der Fundstücke abgeschlossen war, nahmen Spezialisten des Archäologischen Dienstes des Kantons Bern in Zusammenarbeit mit dem Institut für Kunstgeschichte der Universität Bern die Konservierung und wissenschaftliche Auswertung vor.[9] – Im Hinblick auf eine zukünftige museale Fund-Präsentation interessierte ein Verfahren, das es erlaubt, die Zusammengehörigkeit von Fragmenten nicht bloss zweidimensional anschaulich zu machen (Fotomontage), sondern dreidimensional zu überprüfen bzw. zu dokumentieren und zu vermitteln. Der prekäre Erhaltungszustand der Fragmente, namentlich der bemalten Oberflächen,[10] die fragilen Passstellen sowie das Gewicht der Steine machten ein Verlagern und Anpassen problematisch (Abb. 2). Ein Aufeinanderfügen der zum Teil zentnerschweren Bruchstücke zu (stehenden) Gesamtfiguren kam, wenn überhaupt, nur mit weitreichenden Vorbehalten in Frage. Die bis anhin vornehmlich praktizierte Gips- oder Silikonkautschuk-Abformung der Fragmente schied insbesondere wegen der absehbaren Gefährdung der farbigen Oberflächen aus. Kopien nach dem Punktierverfahren oder freie Nachbildungen erschienen höchst aufwendig. Da die Skulpturenfragmente bis jetzt, von wenigen Ausnahmen abgesehen, nur liegend präsentiert werden können, stellte sich die Aufgabe, der Öffentlichkeit das ursprüngliche Aussehen der Figuren anschaulich zu vermitteln.[11] Gesucht war ein Verfahren zur dreidimensionalen Zusammenfügung kopierter Objekte und zur Herstellung möglichst originalgetreuer Rekonstruktionen.

Walther Fuchs und Heinz Stucki

der Ausgabe Frauenfeld 1838, Bd. 1, Zürich 1984, pp. 437–438 und Gutscher 1994 (wie Anm. 1), p. 16.

3 Zum Forschungsstand bezüglich des Berner Bildersturms vgl. Sladeczek, Franz-Josef, *»Die goetze in miner herren chilchen sind gerumpt«. Von der Bilderfrage der Berner Reformation und ihren Folgen für das Münster und sein Hauptportal. Ein Beitrag zur Berner Reformationsgeschichte*, in: Theologische Zeitschrift der Theologischen Fakultät der Universität Basel 44, 1988, Heft 4, pp. 289–311 und Gutscher 1994 (wie Anm. 1).

4 Berner Chronik (wie Anm. 2), pp. 244–245.

5 Vgl. Sladeczek 1988 (wie Anm. 3); Gutscher 1994 (wie Anm. 1), p. 16.

6 Zu den ikonoklastischen Schäden am Berner Skulpturenfund und zu deren Abgrenzung gegenüber Lagerungs- bzw. Bergungsschäden vgl. Zumbrunn, Urs, *Beobachtung und Deutung von Schadens- und Versatzspuren sowie Fragen bezüglich ursprünglicher Standorte der Figuren*, in: Skulpturenfunde 1994 (wie Anm. 1), pp. 49–52, hier pp. 49–50.

7 Vgl. dazu Reformationsgeschichte (wie Anm. 2), p. 438. Dem Text nach zu schliessen, zeigt die in der illustrierten Thomann-Abschrift von 1605 dargestellte Kirche die ehemalige Barfüsserkirche und nicht das Berner Münster.

8 Berner Chronik (wie Anm. 2), p. 245.

9 Vgl. Skulpturenfunde 1989 (wie Anm. 1). Die kunsthistorische Auswertung durch Franz-Josef Sladeczek wird demnächst publiziert.

10 Zur Polychromie vgl. Zumbrunn, Urs, *Bemerkungen zur Farbigkeit der Skulpturen*, in: Skulpturenfunde 1994 (wie Anm. 1), pp. 53–60.

11 Zur Frage der Konservierung und musealen Präsentation vgl. Gutscher 1994 (wie Anm. 1), pp. 23–24. Es ist vorgesehen, den Skulpturenfund im Berner Historischen Museum auszustellen.

7510-321
Skulpturteil

Abb. 3: Digitalisierung des Volumens mit einem Spiral-Computertomographen, Voreinstellung, Foto 1993.

Abb. 4: Kopf der »Berner Madonna«, Ende 15., Anfang 16. Jh., Sandstein, monochrom, Foto 1993.

Das Verfahren der Computertomographie-Stereolithographie

Mithilfe einer Kombination von Computertomographie (CT), Computergraphik und Stereolithographie (SL) konnte ein Verfahren entwickelt werden, das es erlaubt, die Form der Fragmente berührungsfrei zu erfassen, diese virtuell am Bildschirm zu einer stehenden Gesamtfigur zusammenzusetzen und anschliessend in Kunststoff herzustellen. Im Sommer 1991 führte das MultiMedia Labor des Instituts für Informatik an der Universität Zürich (MML) erste Machbarkeitsstudien durch.[12] Am interdisziplinären Projekt beteiligten sich u.a. das Institut für Kunstgeschichte der Universität Bern, der Archäologische Dienst des Kantons Bern, das Departement für Radiologie des Universitätsspitals Zürich, das Forschungszentrum der Ciba-Geigy in Marly sowie verschiedene Konsulenten.[13]

Als Originalfragment wurde ein Madonnenkopf aus Sandstein gewählt (Abb. 4). Er hat etwa die Grösse eines Kinderkopfes und gehört zu einer aus vier Bruchstücken bestehenden monochromen Figur, die vermutlich Ende des 15., Anfang des 16. Jahrhunderts in Bern entstanden ist.[14]

Aus konservatorischen Gründen erfolgte die digitale Erfassung des Volumens in Bern. Dabei kam ein Spiral-Computertomograph zur Anwendung, der das Objekt über eine rotierende Röntgenröhre und einen feststehenden Detektorenkranz in einem spiralförmigen Bewegungsablauf dreidimensional und somit lückenlos erfasst (Abb. 3).[15]

Die Übermittlung der digitalisierten volumetrischen Daten von Bern an das MML in Zürich erfolgte via Datenleitung. Anschliessend wurde dort aus den 250 tomographischen Einzelbildern eine dreidimensionale virtuelle Ansicht rekonstruiert (Abb. 7). Dazu bediente man sich einer Software aus der Medizin, die zur

12 Vgl. Fuchs, Walther, *Das Abbild der Madonna vom Reformationsschutt*, in: Unipress 76, April 1993, pp. 26–29; Fuchs, Walther/Stucki, Heinz, *Perfekte Kopie eines Madonnenkopfs*, in: Der Kleine Bund, Nr. 301, 24. 12. 1993, p. 6 und Steinmann, Bettina/Ronner, Kurt Rolf, *Stereolithographie hilft Kulturgüter retten* (Ciba Streiflichter. Deutschsprachige Informationsblätter der Ciba Geigy AG, Basel 4), Basel 1994, pp. 7–8.

13 Prof. Dr. Ellen J. Beer (Institut für Kunstgeschichte der Universität Bern), Dr. Daniel Gutscher und Urs Zumbrunn (Archäologischer Dienst des Kantons Bern), Prof. Dr. W. A. Fuchs (Departement für Radiologie des Universitätsspitals Zürich), Dr. Max Hunziker (Forschungszentrum der Ciba-Geigy, Marly), Dr. Bruno Mühlethaler (Schweizerisches Institut für Kunstwissenschaft), Dr. Andreas Arnold (Institut für Denkmalpflege an der ETH Zürich), Dr. Niklaus Oswald (Schweizerisches Landesmuseum, Zürich) und Dr. Franz-Josef Sladeczek (Kunsthistoriker, Bern).

14 Vgl. dazu Beer, Ellen J., *Die Skulpturenfunde der Berner Münsterplattform – eine erste kunsthistorische Stellungnahme*, in: Skulpturenfunde 1989 (wie Anm. 1), pp. 57–66, hier pp. 62–63 und Zumbrunn, Urs, *Teil D. Fundkatalog*, in: Skulpturenfunde 1994 (wie Anm. 1), pp. 113–115.

15 Zu den Prinzipien des Computertomographen vgl. als Einführung Laubenberger, Theodor/Laubenberger, Jörg, *Technik der medizinischen Radiologie: Diagnostik, Strahlentherapie, Strahlenschutz für Ärzte, Medizinstudenten und MTRA, mit Anleitung zur Strahlenschutzbelehrung in der Röntgendiagnostik*, 6. Aufl. Köln 1994, pp. 323–352.

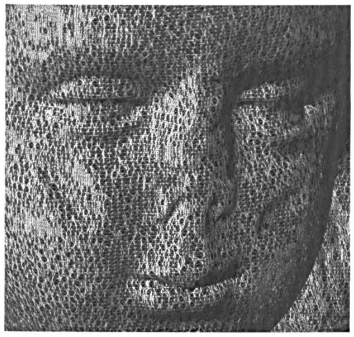


Abb. 5: Dreidimensionale Ansicht des Madonnenkopfs (Schrägdarstellung), Detail, Bildschirm-Ausdruck der Graphik-Workstation 1995.

Abb. 6: »Gitterdrahtmodell«-Darstellung des Madonnenkopfs, Detail, Bildschirm-Ausdruck der Graphik-Workstation 1995.

Abb. 7: Dreidimensionale Ansicht des Madonnenkopfs, Bildschirm-Ausdruck der Graphik-Workstation 1995.

Herstellung von Knochenmodellen für die Operationsplanung am MML entwickelt worden war.[16] Das dreidimensionale Objekt wird dabei auf dem Computerbildschirm in Form eines »Gitterdrahtmodells« dargestellt, das sich aus kleinen Dreiecken zusammensetzt. Sie geben die Oberfläche des Originals mit hoher Präzision (+/- 0,1 mm) wieder. Diese Aufgabe erfüllten beim Madonnenkopf insgesamt rund 450'000 Dreiecke, die ein Datenvolumen von etwa 22,5 Megabyte beanspruchen (Abb. 5, 6).

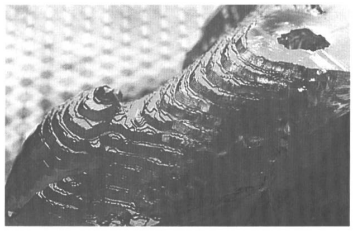
Im Hinblick auf die Technik der Stereolithographie war es notwendig, das »Gitterdrahtmodell« zunächst in zwei Teile zu zerlegen und eine verkleinerte und gröbere Form ins Innere des Kopfes zu setzen, um das Objekt als Hohlkörper herstellen zu können. Anschliessend wurde das Oberflächenmodell mathematisch in 0,25 mm dicke horizontale Einzelschichten zerlegt und deren Daten an die Stereolithographie-Anlage transferiert.

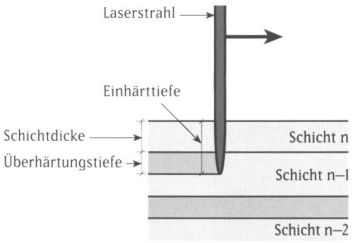
Im Gegensatz zu den heute gebräuchlichen automatischen Computer Numeric Control (CNC) Fertigungsverfahren, bei denen die Form subtraktiv aus einem Materialblock herausgearbeitet wird, baut die Stereolithographie das Modell Schicht um Schicht additiv auf. Die verschiedenen additiven Schichtverfahren werden unter dem Oberbegriff Rapid Prototyping (RP) Verfahren zusammengefasst, da sie bei ihrer Markteinführung Ende der 80er, Anfang der 90er Jahre hauptsächlich der schnellen, kosteneinsparenden Herstellung von industriellen Prototypen dienten.[17] Den Begriff »StereoLithography« führte 1986 C. Hull ein. Er gilt als der eigentliche Erfinder des Verfahrens, das keinerlei Gemeinsamkeit mit dem traditionellen lithographischen Druckverfahren aufweist; gemeint ist vielmehr ein »three-dimensional printing« von am Computer entworfenen 3D-Objekten in Kunststoffmaterialien.[18] Die Stereolithographie verwendet für den Schichtaufbau ein photoreaktives

16 Vgl. Brennan, P./Stucki, Heinz/Ghezal, Abtel Hakim u.a., *Three dimensional printing from Somatom Plus-CT data*, in: Advances in CT II, hrsg. von R. Felix und M. Langer, Berlin 1992, pp. 207–210; Stucki, Heinz/Stucki, Peter/Zollikofer, Christoph, *Das SL-Med Projekt. Statusbericht*, Zürich 1993; Stucki, Peter, *Creating Real Virtuality. Copying Three-Dimensional Objects*, Paris: Institut National en Informatique et en Automatique (INRIA), Paris 1994; Stucki, Heinz/Stucki, Peter/Hodler, Jürg u.a., *Stereolithographie und Medizin. Resultate einer klinischen Studie*, Freiburg i.Br. 1995; Stucki, Heinz/Stucki, Peter/Kacel, G. u.a., *Rapid Prototyping in Trauma Surgery*, Erlangen 1995.

17 Vgl. dazu Jacobs, Paul F., *Rapid Prototyping & Manufacturing Fundamentals of StereoLithography*, Dearborn 1992. Ein zweites Hauptanwendungsgebiet der Stereolithographie ist heute die Medizin. Mit Hilfe von stereolithographischen Modellen können komplizierte chirurgische Eingriffe, insbesondere am Schädel, geplant und simuliert werden.

18 Zur Chronologie des Begriffs »StereoLithography« und zu dessen Erfindung vgl. Jacobs 1992 (wie Anm. 17), pp. 20–22.





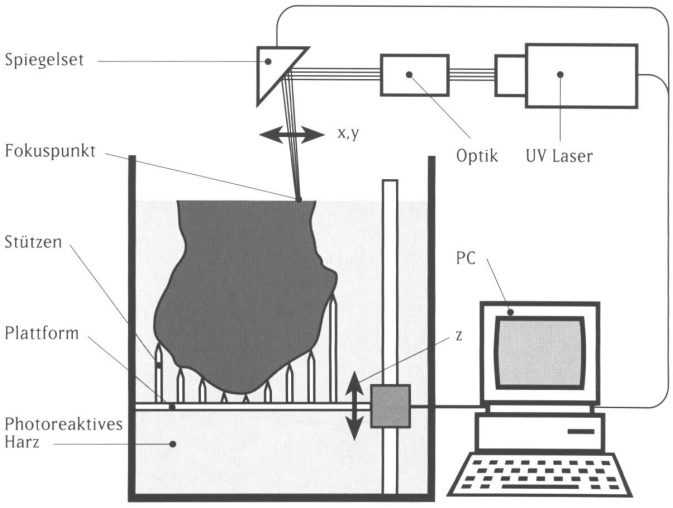


Abb. 8: »Höhenlinien« des Reliefs eines Stereolithographie-Modells, Foto 1995.

Abb. 9: Fixierung einer »Höhenlinie« durch Überhärten, Computergraphik 1995.

Abb. 10: Schematische Darstellung des Stereolithographie-Verfahrens, Computergraphik 1995.

Harz, welches bei Einstrahlung von ultraviolettem (UV) Licht einer bestimmten Wellenlänge polymerisiert, d.h. gehärtet wird. Mit einem genau auf die Harzoberfläche fokussierten UV-Laserstrahl, geführt von einem Set computergesteuerter, beweglicher Spiegel, lassen sich die »Höhenlinien« eines Reliefs aus Harz erzeugen (Abb. 8, 10). Da die Energie des UV-Lichts exponentiell zur Eindringtiefe abnimmt, ist durch die Bewegungsgeschwindigkeit des Lasers die Energiemenge pro Flächeneinheit und damit die Einhärttiefe (Curedepth) genau festgelegt. Die erste Schicht, die in der Regel aus einem groben Raster besteht, wird auf einer in der Höhe (z-Richtung) verstellbaren Plattform gehärtet; sie befindet sich für diese Schicht ganz an der Harzoberfläche. Danach wird die Plattform um eine festgelegte Schichtdicke (Slicethickness) abgesenkt. Diese variiert zwischen 0,07 und 0,7 mm und hängt von der geforderten Genauigkeit und von der Komplexität des Modells ab.

Eine spezielle Software (Bridgeworks) generiert ein das Modell tragendes Raster sowie eventuell notwendige Stützen für überhängende Teile. Die Stützstruktur wird in der Regel mit einer grösseren Schichtstärke gebaut als das Modell selbst. Die Differenz zwischen der durch den Laser bestimmten Einhärttiefe (Curedepth) und der durch Absenken der Plattform bestimmten Schichtdicke (Slicethickness) ergibt die Überhärtungstiefe (Overcure). Sie bestimmt, wie stark eine Schicht n mit der darunterliegenden Schicht n–1 verbunden wird (Abb. 9).

Die Zeit für den Bau einer Schicht hängt stark von Grösse und Komplexität des Modells ab und beläuft sich auf 0,5 bis 2,5 Minuten. Sie ergibt sich aus der Zeit, die der Laser braucht, um die Kontur- und Füllstrukturen (meist in Form eines feinen x/y-Rasters) abzufahren, und aus der sogenannten Levelingzeit, die das Harz benötigt, um die bestehende Schicht zu überdecken. Für das Modell des Madonnenkopfes, das originalgross (21 cm hoch) und mit Schichtdicken von 0,25 mm aufgebaut wurde, betrug die Herstellungsdauer rund 35 Stunden (Abb. 11).

Die automatische Rekonstruktion von digitalisierten Objekten leisteten bis heute vor allem Computer Numeric Control (CNC) Fräsmaschinen; diese sind zwar sehr genau, lassen sich aber aufgrund der Konstruktion des Fräskopfes bei kompliziert geformten Objekten nur beschränkt einsetzen. Die Stereolithographie

Abb. 11: Stereolithographische Kopie des Madonnenkopfs, 1993, Harz, mit Gurtensandstein bespritzt, monochrom, Foto 1995.

bietet demgegenüber mit ihrer additiven Aufbaumethode entschiedene Vorteile. Um diese Vorzüge, zu denen auch kürzere Produktionszeiten zählen, für die computergestützte Rekonstruktion (CAR = Computer Aided Reconstruction) nutzen zu können, bedarf es eines Bildgebungsverfahrens, das Hohlräume und Hinterschneidungen darzustellen erlaubt. – Das Abbilden und Rekonstruieren von Objekten nach Video-Projektionen über Laser- oder mechanische Abtastung bleibt grundsätzlich der Zweidimensionalität verhaftet und erweist sich als dementsprechend begrenzt.[19] Die Computertomographie hingegen vermag Querschnittbilder des Objekts zu erzeugen und ist dadurch insbesondere bei Hinterschneidungen oder komplexen Formen und Hohlräumen wesentlich präziser. CT-Daten sind ausserdem einfacher zu interpretieren und zu verarbeiten, da die Bildpunkte (Pixel) den Dichtewerten des abgebildeten Volumens entsprechen.

Die ersten Anwendungen der neuen Technik haben gezeigt, dass mit dem Verfahren der Computertomographie-Stereolithographie nondestruktive Kopien mobiler Kulturgüter technisch machbar sind. Allerdings bleibt das Format der Objekte durch die 70 cm weite Öffnung des Computertomographen begrenzt. Beim Laserscanning-Stereolithographie-Verfahren stellen Objektgrösse und Mobilität zwar keine Probleme dar, die örtliche Auflösung und somit die Detailgenauigkeit sind jedoch geringer, so dass mit zunehmender Komplexität der zu erfassenden Objekte die Nachteile des Verfahrens überwiegen.[20]

In Zukunft wird es möglich sein, die digitalisierten Daten von Skulptur-Fragmenten am Bildschirm massstabsgerecht verkleinert zu manipulieren, einzelne Stücke zu kombinieren und zu ergänzen.[21] Insbesondere für Studien- und Forschungszwecke, möglicherweise aber auch für Ausstellungen in Museen oder als didaktische Hilfsmittel können beliebig viele originalgetreue Kopien der rekonstruierten Skulpturen hergestellt werden.

19 Vgl. Travis, John, *Laser Replication of Rare Art*, in: Science, Nr. 256, Mai 1992, p. 969.

20 Bis jetzt existiert noch keine vergleichende Studie über beide Verfahren.

21 Vgl. dazu die Rekonstruktionen an hominiden Fossilien von Zollikofer, Christoph u.a., *Neanderthal computer skulls*, in: Nature, Nr. 375, 25. Mai 1995, pp. 283–285, am MultiMedia Labor des Instituts für Informatik der Universität Zürich.

Fotonachweis
1: Zentralbibliothek Zürich; 2, 3, 4: Walther Fuchs, Zürich; 5, 6, 7: Hans Stucki; 8: Uni Press Zürich (W. Hauser, Winterthur); 11: Departement Radiologie USZ.

132