

Einsatz von mobilen Röntgen- untersuchungsmethoden im Museum. Zwei Fallbeispiele.

Bernhard ILLERHAUS*, Aurelia BADDE**, Matthias MICHAELIS*, Ursel BERGER**,
Yener ONEL*, Dietmar MEINEL*, Jürgen GOEBBELS*

*BAM Bundesanstalt für Materialforschung und -prüfung, Richard-Willstätter-Str. 11,
12489 Berlin, email: bernhard.illerhaus@bam.de

**Georg-Kolbe-Museum, Sensburger Allee 25, 14055 Berlin,
email: info@georg-kolbe-museum.de

Kurzfassung. Zwei Bildhauermodelle aus dem Georg-Kolbe-Museum Berlin standen zur Restaurierung an. Das kleinere, „Lucino“ (1920), 41cm, wurde hochauflösend mit CT gemessen, da mittels CT sowohl der Herstellungsprozeß einer Gipsstatue als auch der innere Zustand, wie Ergänzungen, Klebungen und Armierungen, festgestellt werden können. Aus den CT Bildern ergab sich eine für die vorher vermutete Gipszusammensetzung ungewöhnliche innere Struktur. Mit einer Freihand bedienten Röntgenpistole zur Messung der Röntgenfluoreszenz wurde daraufhin die Zusammensetzung des Materials der Statuette als Terracotta bestimmt. Durch den Einsatz von Helium als Spülmittel konnten auch leichte Materialien nachgewiesen und so eine Unterscheidung zwischen Gips und gebranntem Ton durchgeführt werden. Aus den CT Daten wurde eine virtuelle Darstellung der äußeren Geometrie gewonnen. Ein damit versuchsweise erstelltes Replik (Rapid Prototyping, 3D-Drucker, TU-Berlin) entsprach nicht den Anforderungen des Museums zur Erstellung einer Gußform für eine Bronzekleinserie der Statuette.

Die zweite Statue, die „Große Nacht“ (1930) ist mit ihrer Größe von 2,12m und aufgrund des durch korrodierende Metallarmierung verursachten Schadensbildes nicht mehr transportfähig. Eine in-situ Untersuchung mit dem mobilen Tomographen, der in den 1980ern zur Untersuchung von Bäumen gebaut und jetzt mit einem modernen Flachdetektor und einer Röntgenröhre ausgestattet ist, wird vorgestellt. Die Möglichkeiten der in-situ CT für große Skulpturen werden anhand der Ergebnisse diskutiert.

1. Tomographie der „Großen Nacht“

Im ursprünglichen Zustand war der MCT3 mit einer Iridiumquelle und bis zu fünf Einzeldetektoren ausgerüstet. Obwohl diese Messungen recht aufschlußreiche Bilder erbrachten, auch über fortschreitende Holzfäule, wurde der Einsatz aus Gründen des notwendigen Strahlenschutzes für Isotopenquellen in der Öffentlichkeit eingestellt. 2008 konnte die BAM zeigen, daß es unter Beibehaltung der vorhandenen Mechanik möglich ist, den MCT3 an den heute üblichen Stand der Technik anzupassen [1]. Dazu wurde anstelle der Isotopenquelle eine Röntgenröhre montiert und auf der Detektorseite verschiedene Flachdetektoren eingesetzt. Derzeit wird hier ein 40cm mal 40cm großer Flachdetektor (amorphes Silizium) mit 1024 mal 1024 Dioden verwendet. Damit ist nun innerhalb weniger Minuten ein vollständiger Volumenbereich des Objektes meßbar. Verschiedene Bereiche des Objektes



werden gemessen, indem der Tomograph in der Höhe jeweils versetzt wird. Mit diesem Aufbau wurden zunächst Testmessungen im Labor, dann aber auch eine erste Messung vor Ort im Georg-Kolbe-Museum durchgeführt, um zu überprüfen, welche Schwierigkeiten im tatsächlichen mobilen Einsatz auftreten können.

Ein Objekt, welches innerhalb des Drehkranzes steht, wird mit einer Vergrößerung von 1:2 abgebildet. Um bei einer Detektorpixelgröße von 0,4mm eine optimale Bildgebung zu erhalten, sollte der Brennfleck der Röhre einen Durchmesser von nicht größer als 0,2mm aufweisen. Andererseits erlaubt die Detektorgröße somit nur die Abbildung eines 20cm großen Objektes. Der Ring selber hat einen Durchmesser von 80cm, so daß also eigentlich wesentlich größere Objekte gemessen werden könnten. Um dies zu ermöglichen, wird der



Abb. 1: Tomographie an der „Großen Nacht“ im Georg-Kolbe-Museum, Berlin. Die „Große Nacht“ (Gips, 1930) ist mit ihrer Größe von 2,12m und aufgrund des durch korrodierende Metallarmierung verursachten Schadensbildes nur sehr aufwendig transportfähig.

Detektor seitwärts verfahren. Zur Reduktion der Strahlenbelastung in der Umgebung ist es aber sinnvoll, daß die Röntgenröhre nur den Detektor ausleuchtet und keine Primärstrahlung in die Umgebung abgibt. Daher müssen Quelle und Detektor gleichzeitig symmetrisch verschoben werden, wodurch nur eine Verdoppelung des Detektorfeldes erlaubt ist. Ein 40 cm breites, 20 cm hohes Meßfeld ist mit dem jetzigen Detektoraufbau gegeben. Zum Einsatz kam hier eine 160kV Röhre, die einen Brennfleck um 0,1mm (alte Norm) hat. Erste interessante Messungen konnten an Georg Kolbes Gießermodell „Große Nacht“ [2] durchgeführt werden (siehe Abbildung 1). In Abbildung 2 ist ein senkrechter Schnitt im Bereich des Knies gezeigt. Die von der Eisenarmierung ausgehenden Risse sind deutlich sichtbar. Daneben können verschiedene Lagen von Gips unterschieden werden. Obwohl es sich hier um ein vergrößertes Gußmodell handelt, wurde der Gips schichtweise aufmodelliert. Dies ist recht schön in Abbildung 3 zu sehen, einem senkrechten Schnitt durch das andere Bein außerhalb der Mitte. Man erkennt jeweils einen größeren homogenen Bereich in der Mitte, daran angesetzt sind kleinere Bereiche mit stärkeren Dichteunterschieden und mehr Poren.

Die für Georg Kolbes bildhauerischen Werkprozeß übliche Materialzusammenstellung Gips auf meist Stahlgerüst weist die im Alterungsverhalten typischen Zersetzungen und Sprengungen auf. Die Hydrophilie des Gipses unterstützt das Korrosionsverhalten der Metallarmierung. Das relativ weiche und fragile Material gibt der Volumenausdehnung Raum, indem es zerbricht. Besonders der Umstand, daß das generell als minderwertig erachtete Material Gips, als fertiges plastisches Produkt traditionell schon im Bildhauerbetrieb nachlässig behandelt und aufbewahrt wird, unterstützt die genannte Materialzersetzung. Inkorrekte Lagerung, hohe und schwankende Luftfeuchtwerte, sowie häufige Bewe-



Abb. 2: Tomographie der „Großen Nacht“ im Georg-Kolbe-Museum, Berlin. Senkrechter Schnitt zeigt die Reißbildung durch Rostsprengung.

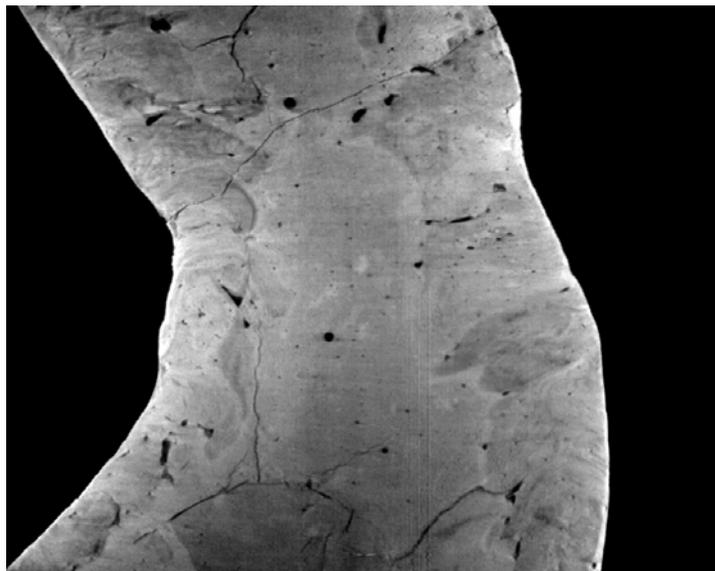


Abb. 3: Tomographie an der „Großen Nacht“ im Georg-Kolbe-Museum, Berlin. Dichteunterschiede im Gips sind durch den Herstellungsprozeß bedingt.

gungen und Transporte potenzieren das Schadensbild. Mittels der präzisen Lokalisierung von Schadenszonen durch die Röntgen-CT ergeben sich praktisch anwendbare Schlußfolgerungen für die Konservierung des Gießermodells der “Großen Nacht”.

2. Mikro-Tomographie des „Lucino“

Als weitere Fallstudie, die den Nutzen der Röntgen-CT an Kunstwerken illustrieren kann, soll hier die Untersuchung eines kleineren Modells Georg Kolbes, „Lucino“ (1920), vorgestellt werden: Die 41cm große Statuette wurde hochauflösend mit einer stationären Röntgen-CT Anlage [3] in der BAM gemessen. Aus den CT Bildern ergab sich eine für die vor-



Abb. 4: Im tomographischen Längsschnitt durch das Modell „Lucino“ ist das Werkmaterial Terracotta anhand der dichteren Einschlüsse und der Schwundrisse identifizierbar. Die Fragestellung, die zunächst den Anlaß zur Röntgen-CT angeregt hatte, war die nach der inneren Lage und nach der Werkinherenz des Metallstabes, der die Statuette mit dem modernen Kunststoffsockel verbindet.

her vermutete Gipszusammensetzung ungewöhnliche innere Struktur. Sowohl die Art der Manufaktur (frei modelliert), wie auch die Materialzusammensetzung (Terracotta) ließen sich anhand der zerstörungsfreien Untersuchung bestimmen. Rißbildungen und Altrestaurierungen konnten erkannt werden, ihre präzise Lokalisierung war unterstützend bei der nachfolgenden sorgfältigen Silikonabformung für die geplante Bronzereproduktion.

Mit dem Vorliegen eines hoch aufgelösten Datensatzes (2914 Ebenen, $(0,15\text{mm})^3$ Voxelgröße) entstand die Idee, die Reproduktion direkt aus der Oberfläche der CT-Daten zu gewinnen. Als Test wurde der Kopf mit dem 3D-Printer *Contex Designmate Cx* im 3D Labor am Institut für Mathematik an der TU Berlin hergestellt. Der Datensatz wurde in der entsprechenden Ansteuerungssoftware automatisch in Schichtdaten zerlegt, die anschließend an den Drucker gesendet wurden. Es stellte sich aber heraus, daß entweder die Struktur des lagenweisen Druckes des Prototypen, die im CT noch sichtbaren Eigenheiten der Oberfläche dominiert, oder die Druckoberfläche als unscharf empfunden wird (vgl. Abbildung 5). Ein Nacharbeiten der Oberfläche ist aus Gründen der Authentizität nicht möglich. Mit der gegebenen CT-Anlage hätte die Statuette außerdem noch mit einer höheren Auflösung von $(0,075\text{mm})^3$ gemessen werden können.



Abb. 5: Ansichten des Kopfes von „Lucino“: Links Originalfigur, Mitte Ansicht des Modells, rechts virtuelles Modell im Computer.

3. Mobile Röntgenfluoreszenz des „Lucino“



Abb. 6: Handgehaltenes Röntgenfluoreszenzgerät XL3t 900 bei der Messung am Fuß des „Lucino“ nach Abnahme des Sockels.

Die Statuette des „Lucino“ entspricht von ihrem Äußeren her trotz der körnigen Oberfläche dem Aussehen einer Gipsplastik. In der Tomographie wurde jedoch eine Textur und innere Struktur vergleichbar mit der von Ton deutlich. Seit 2008 besitzt die BAM Bundesanstalt für Materialforschung und -prüfung ein handgehaltenes RFA-Gerät. Dieses wird im allgemeinen zur in situ Feststellung der Materialzusammensetzung von Metallen oder auch zur Bestimmung des Schwermetallgehalts in gefärbten Kunststoffen verwendet. Leichtere Materialien wie Gips (Schwefel) können im Normalfall nicht nachgewiesen werden, da hier die erzeugte Röntgenfluoreszenzstrahlung

zu niederenergetischer ist, um, wegen der Absorption in Luft, im Detektor nachgewiesen werden zu können. Daher muß dann zwingend der Raum zwischen Objekt und Pistole mit Helium gespült werden (Abb. 6). Zunächst wurden Untersuchungen im Labor durchgeführt, ob sich Gips und Terracotta sicher voneinander unterscheiden lassen. Als entscheidend stellte sich dabei das Vorhandensein des Schwefelpeaks heraus. In Abbildung 7 sind zwei Diagramme von Untersuchungen am Lucino wiedergegeben, wobei die Energie hier auf 5KeV maximal beschränkt ist. An der Oberfläche des Lucino ist der Schwefelpeak deutlich nachweisbar, im inneren nicht. Die Statuette ist außen vollständig mit einem Gipsüberzug versehen. Nur an einer Bruchstelle am Fuß konnte das Innenmaterial Terracotta sicher nachgewiesen werden. Im Vergleich dazu zeigt die Abbildung 8 die Spektren von verschiedenen Tonerden oberhalb von 3KeV. Anhand der nachgewiesenen Metalle ergibt sich kein Kriterium für die Unterscheidung zwischen Gips und Ton, sie bestimmen im Wesentlichen den Farbton. Die Heliumspülung ist daher unbedingt erforderlich.

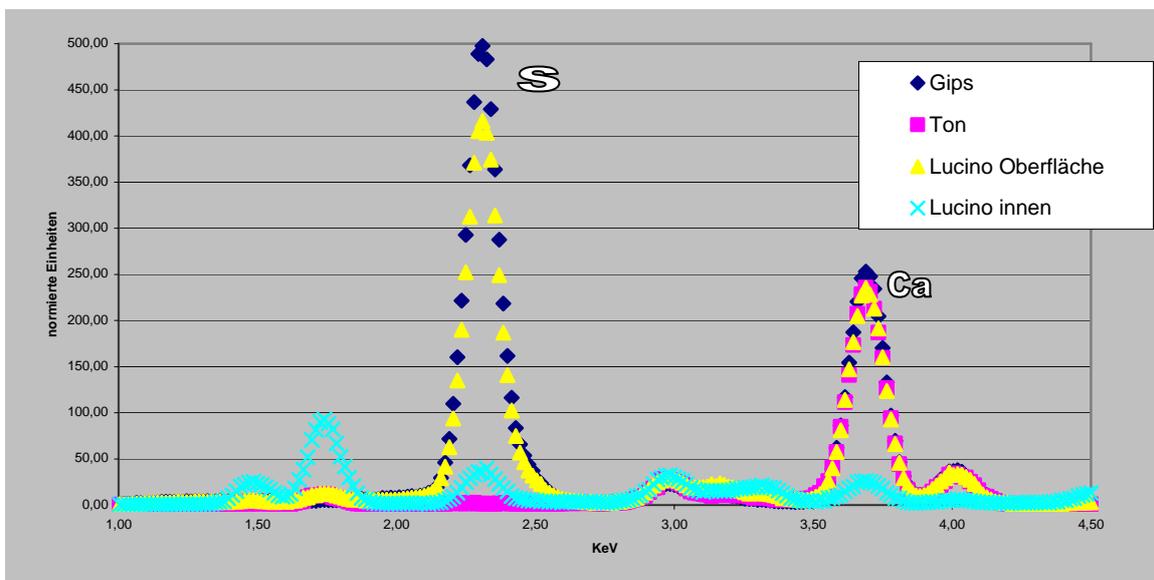


Abb. 7: Messung mit einer Röntgenpistole: Zwei Fluoreszenzspektren des Lucino, Vergleichsspektren für Gips und Ton, unterer Energiebereich.

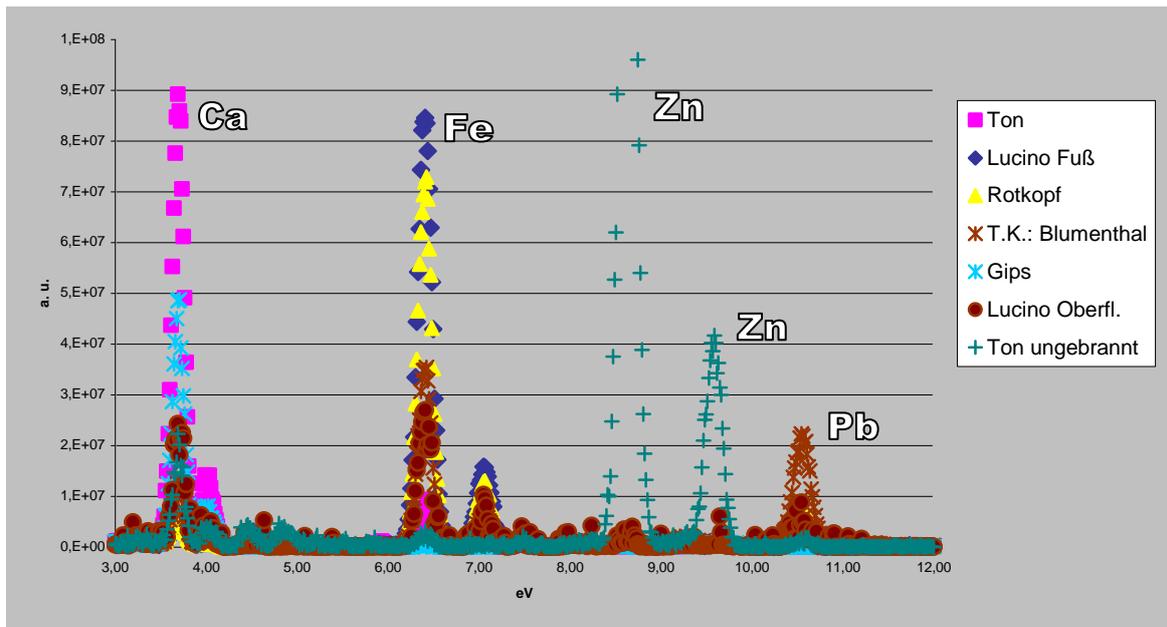


Abb. 8: Messung mit einer Röntgenpistole: Verschiedene Ton- und Terracottaarten, Gips, Energien ab 3KeV.

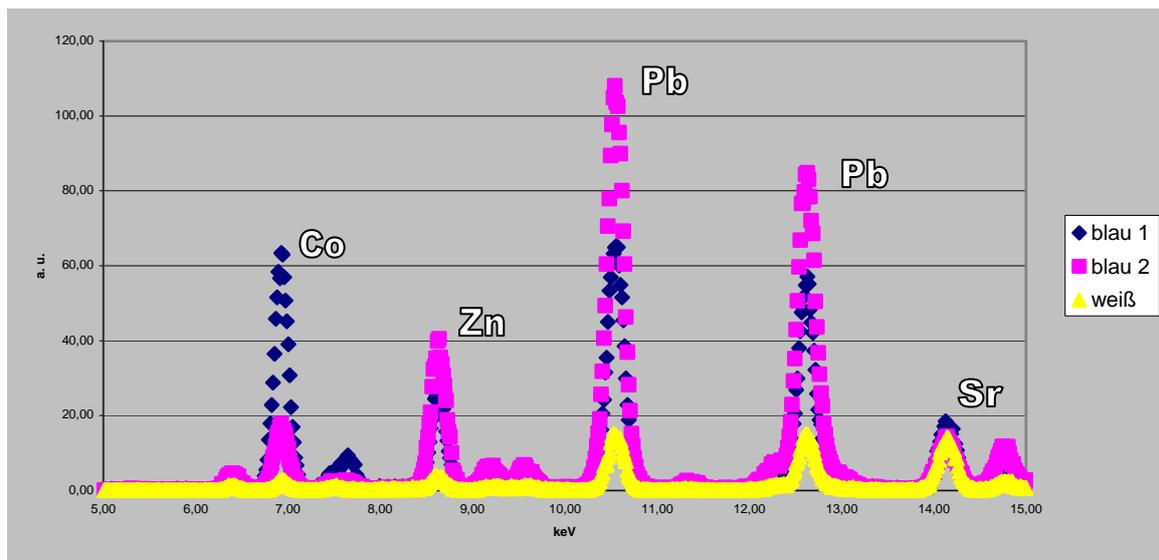


Abb. 9: Messung mit einer Röntgenpistole: Zwei Fluoreszenzspektren an dem Modell der „blauen Säule“. Es sind zwei verschiedene Blautöne zu nachweisbar.

4. Weitere Anwendungsbeispiele der mobilen Röntgenfluoreszenz im Georg-Kolbe-Museum

In der Sammlung des Georg-Kolbe-Museums befindet sich ein Modell für eine „blaue Säule“ (Höhe 23cm). Diese hat zwei deutlich zu unterscheidende Blaubereiche. Die Untersuchung mit der Röntgenpistole (Abb. 9) ergibt zwei leicht verschiedene Spektren, wobei es sich wahrscheinlich einmal um Thénards Blau (CoAl_2O_4 , Kobaltblau) und zum anderen um Coelinblau (Cobald-Zinn-Mischoxyd) handelt, beide auf Bleiweiß als Grundierung aufgetragen, wie an einer freien Stelle nachgewiesen werden konnte.

Weniger schwierig und sehr schnell können dagegen eindeutige Aussagen über metallene Skulpturen getroffen werden. Hierbei muß allerdings berücksichtigt werden, daß die Rönt-

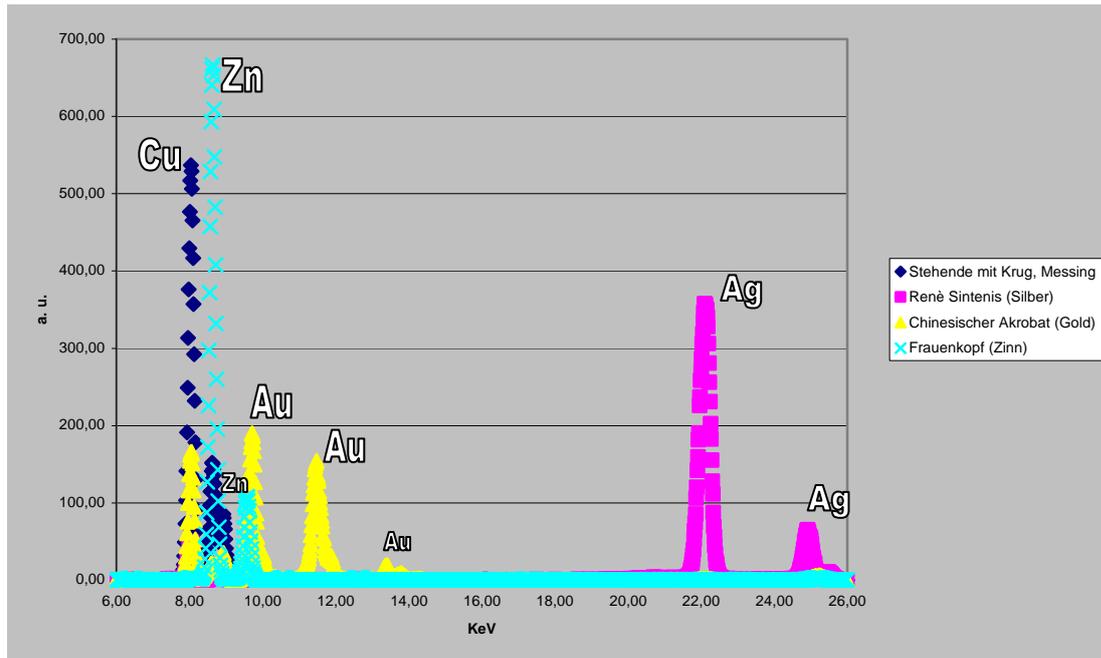


Abb. 10: Verschiedene Metalle mit der Röntgenpistole untersucht, siehe Text.

genpistole je nach Material nur die obersten Schichten identifizieren kann. So wurden unter anderem der „Chinesische Akrobat“ und der Guß eines „Frauenkopfes“ von Georg Kolbe untersucht. Beim „Frauenkopf“ wurde Zink als Gußmaterial nachgewiesen. Sowohl bei dem „Chinesischen Akrobaten“ (vergoldet) als auch beim Selbstbildnis von Renè Sintenis (Silber) wird zwar die Oberfläche eindeutig identifiziert, jedoch kann die Fluoreszenzstrahlung nicht die aufliegende Edelmetallschicht durchdringen, das Trägermaterial kann somit nicht gemessen werden

5. Zusammenfassung

Die Anwendung von mobiler in situ Röntgen-Computertomographie (CT) stellt einen innovativen Forschungsansatz innerhalb der zerstörungsfreien Untersuchungsmethoden an Kunstwerken dar. Der Einsatz von Röntgen-CT ist gleichermaßen aufschlußreich für die Erforschung der Werkgenese wie des Erhaltungszustandes von Plastiken. Die Differenzierung der verschiedenen Werkmaterialien und die sehr präzise Lokalisierung von Schadensbildern ermöglicht z.B. das Erkennen von Werkveränderungen und von restauratorischen Eingriffen. Es ergeben sich praktisch anwendbare Schlußfolgerungen für die Konservierung. Die mobile Röntgenfluoreszenzanalyse mit dem Handspektrometer ermöglicht zerstörungsfrei vor Ort die schnelle und einfache Bestimmung der elementaren Zusammensetzung von Materialien. Ihre Anwendung an Skulpturen bringt Aufschluß beispielsweise über Legierungen und Pigmentzusammensetzungen.

Referenzen

- [1] B. Illerhaus, J Goebbels, Y. Onel, C. Sauerwein, Mobiler 3D Tomograph, DACH-Jahrestagung in St. Gallen, 2008, <http://www.ndt.net/article/dgzfp2008/Inhalt/di2a2.pdf>.
- [2] [2] U. Berger: Georg Kolbe – Leben und Werk. mit dem Katalog der Kolbe-Plastiken im Georg-Kolbe-Museum, 2., durchges. Aufl. Berlin 1994.
- [3] Aurelia Badde, Bernhard Illerhaus, “[3D - \$\mu\$ CT reveals the work processes of cast plaster statues, their internal structures, damages and restorations](#)“, in Optical Methods for Arts and Archäology, ed. By Renzo Salimbeni, Lucca Pezzati, Proceedings of SPIE Vol. 5857 58570U-1/8 (2005). Proceedings of SPIE 5857 (2004).