

Das zweite Gesicht der Nofretete

Bernhard Illerhaus, Andreas Staude, Dietmar Meinel,
BAM Bundesanstalt für Materialforschung und -prüfung

Einführung

Seit mehr als 30 Jahren wird die Computertomographie (CT) sowohl in der Medizin als auch für industrielle Zwecke und zur Untersuchung von Kulturgütern eingesetzt [1]. Der aktuelle Trend geht dahin, die CT als Messverfahren zuzulassen [2]. Dafür werden als Zwischenschritte Bildkorrekturen und Bildverarbeitung benötigt [3], [4]. Ob aber die entstandene Abbildung der Realität entspricht, muss unabhängig überprüft werden, da Fehler durch den Rekonstruktionsalgorithmus und durch Rekonstruktionsartefakte das Bild verändern und durchgeführte Bildverarbeitungsoperationen das Bild verfälschen können. Ein Beispiel für eine solche schwerwiegende Fehlinterpretation sind Berichte über ein „zweites Gesicht der Nofretete“, wie sie in der Tagespresse verbreitet wurden [5].

Die BAM Bundesanstalt für Materialforschung und -prüfung beteiligt sich an der Weiterentwicklung der CT seit den frühen 1980er Jahren [6], [7]. Die verschiedenen Anlagen erlauben dabei Untersuchungen an Objekten von 1 mm Größe mit einer Ortsauflösung von 0,5 µm bis zu Objekten von 1 m Durchmesser und 2 m Höhe, mit einer Durchstrahlbarkeit von 40 cm Eisen. Das Spektrum der untersuchten Materialien reicht von Staub bis Uran. Von Beginn an hat es immer wieder Zusammenarbeiten mit Museen gegeben, die sich für beide Seiten als fruchtbar erwiesen, da oftmals die Untersuchung der musealen Objekte ohne eine Weiterentwicklung in der Technik der CT nicht möglich gewesen wäre. Die BAM ist darüber hinaus in vielen Projekten tätig, die die Weiterverbreitung und bessere Nutzbarkeit und die Standardisierung der CT zum Ziel haben. Es ist daher unbedingt im Interesse der BAM, auf eine korrekte Interpretation der CT-Bilder zu dringen.

Die Büste der Nofretete ist mit mehr als 600 000 Besuchern eines der bekanntesten Kulturobjekte in Berlin. Zudem hat der Fund der Nofretete vor hundert Jahren eine lange Geschichte der Diskussionen unter Wissenschaftlern, Politikern und der Öffentlichkeit provoziert. Vieles dazu wurde von dem Ägyptologen Rolf Krauss zusammengetragen [8]. Trotzdem bleiben noch viele Fragen offen.

Eine erste CT-Untersuchung wurde 1992 [9], eine zweite 2006 [10] durchgeführt. Durch beide Analysen sollte die Herstellungstechnik und der Schadenszustand geklärt werden.

Der Auftrag, diese beiden Datensätze zu vergleichen, führte dazu, dass die auf Film gespeicherten Ergebnisse von 1992 (im Besitz des Ägyptischen Museums Berlin¹) an der BAM mit einem Röntgenfilm-Laserscanner Array 2905HD [13] wieder digitalisiert wurden. Der 2006er Datensatz wurde vom Imaging Science Institute² für das Rathgen-Forschungslabor (RF)³ rekonstruiert. Diese Institutionen sowie die Staatlichen Museen Preußischer Kulturbesitz (SMPK)⁴ stimmten der vergleichenden Analyse der Daten durch die BAM zu.

Methode

Wir haben den CT-Datensatz der Büste der Nofretete von 1992, gemessen mit einem Siemens Somatom Plus [9], verglichen mit dem Datensatz von 2006, der mit einem Siemens Somatom Sensation 64 [10] gemessen wurde. Da die Originaldaten von 1992 nicht verfügbar waren, wurden die Ausdrucke (auf Röntgenfilm) digitalisiert. Die hier gezeigte Bildverarbeitung wurde mit dem Programm VGStudio MAX2.0 von VolumeGraphics GmbH [12] durchgeführt. Zum Vergleich wurde ein Betonbohrkern mit µCT tomographiert, an dem die Auswirkung der Parameterwahl bei der Entstehung der virtuellen Oberflächen besser gezeigt werden kann.

Ein dreidimensionaler Datensatz erlaubt die Herstellung virtueller Oberflächen (am Computer) für verschiedene Materialien. Dies ist eine bekannte Technik, die in der Medizin z. B. zur Herstellung exakt passender Knochenersatzstücke verwendet wird. Etwas schwieriger ist dies in der industriellen CT, da hier die Materialien vielfältiger und oft auch vor der Messung nicht bekannt sind und so die notwendigen Korrekturen nicht immer exakt bestimmt werden können. Es ist eine anspruchsvolle Aufgabe, die Oberfläche aus einer CT so genau zu bestimmen, dass sie den Anforderungen der Längenmesstechnik genügt [11].

Ergebnisse

Wie ist die „wahre“ Oberfläche in einem CT-Schnitt bestimmt?

Auch wenn man mit bestmöglicher Auflösung ein Tomogramm gemessen hat, stellt die Oberfläche keine scharfe Kante – mit einem Sprung der Dichte von Null auf 100% Material – dar. Durch die Messung mit einem Detektorelement einer bestimmten Breite wird immer eine Verschmierung erzeugt. Für starke Unterschiede in der Absorption kann eine Rampe, entsprechend der verwendeten Filterung und des Rekonstruktionsalgorithmus, über mehrere Pixel entstehen.

Die Position der wahren Oberfläche wird entweder als der Halbwert zwischen Null und 100% Material angesehen, oder durch den Wendepunkt der Kurve der Schnittlinie senkrecht zur Tangente der Oberfläche bestimmt. Daher ist der HU-Wert (Hounsfield Unit, oder Grauwert des Bildes), nach dem die Oberfläche zu berechnen ist, lokal von dem Maximalwert der Materialdichte abhängig. Besteht ein Objekt aus zwei oder mehr Materialien, so ist dieser also keinesfalls mehr global anzugeben.

In den Messungen der Büste der Nofretete von 2006 mit dem Siemens Somatom sensation 64 [10] wird für den Kalkstein eine Dichte von 1001 bis 1600 HU und für die Stuckauflage⁵ Dichtewerte zwischen 400 und 1000 HU angegeben. Beide Materialien zeigen also eine breite Dichteverteilung. Im Falle des Kalksteins zeigt die Abbil-

dung 2b aus Huppertz et al. [10] Einschlüsse mit höherer und geringerer Dichte (Dichte hier als äquivalent zum gemessenen linearen Schwächungskoeffizienten genommen). Abhängig von der Höhe des CT-Schnittes in der Büste und damit von der Länge des durchstrahlten Materials, führt aber das Bildrauschen dazu, dass man beide Materialien nicht unterscheiden kann. Zwei Materialien, beide mit Einschlüssen und Fehlstellen, machen es schwer, die Oberfläche zu definieren.

Ist es möglich, die Steinoberfläche unter dem Stuck zu finden?

Dazu muss die aufliegende Schicht mit einer geringeren Dichte (der Stuck) virtuell entfernt werden. Dies kann mittels eines so genannten „ray trace“ Programms durchgeführt werden, indem man die Dichtewerte unterhalb eines bestimmten Wertes durchsichtig setzt. Um den Übergang weicher zu gestalten, benutzt man eine Rampe in der Transparenz zwischen Null und 100% des Materialwertes, der sichtbar bleiben soll. Dieser Bereich sollte um den oben gefundenen Wendepunkt liegen.

Aus den in [10] veröffentlichten Bildern, ist nicht ersichtlich, welche Methode und welche Schwellwerte für die abgebildeten Oberflächen benutzt wurden. Die Ursache des Irrtums war schon zwei Jahre zuvor in der ZDF-Dokumentation „ZDF Expedition, Jäger der verlorenen Schätze, Die Odyssee der Nofretete“, ZDF, 2007 deutlich zu erkennen. In dem Film wurde der Computerbildschirm gezeigt, während die Oberfläche generiert wurde. Dadurch waren nicht nur das jeweilige Bild, sondern auch die dazu gehörigen Parameter der Dichteverteilung und der durchsichtig gestellten Teildichten sichtbar. Leider dürfen aus urheberrechtlichen Gründen weder Einzelbilder noch Ausschnitte eines digitalen Mitschnittes hier veröffentlicht werden. Wir haben daher das Szenario des Films mit unserem eigenen Bildverarbeitungsprogramm nachgestellt. Abbildung 1 zeigt die daraus resultierende Oberfläche mit den verwendeten Parametern. Rechts unten im Bild ist die HU-Verteilung (der Dichte) dargestellt. Das Intervall 2 gibt die zur Darstellung ausgewählten Werte wieder. Wichtig hierbei ist, dass die Sichtbarkeitschwelle nach dem Maximum der HU-Werte gesetzt wurde und nur eine geringe Anzahl von Werten mit einer sehr hohen Dichte einschließt. Dies bedeutet, dass die gezeigte Oberfläche weit innerhalb des Steins liegt! Das „zweite Gesicht der Nofretete“ ist definitiv nur virtuell vorhanden. Die logische Überprüfung dieses Ergebnisses



Abb. 1: Das virtuelle zweite Gesicht der Nofretete, erzeugt mit einem VolumeGraphics „ray tracer“, die Durchsichtigkeit ist im Fenster gegeben.

fehlt. Wenn es möglich ist, einen globalen Schwellwert für die Darstellung der Oberfläche zu wählen, so ist dieser vorher zu bestimmen. Durch eine freie Wahl des Schwellwertes kann hingegen jede beliebige Oberfläche erzeugt werden, die in der Realität nicht existiert.

Vergleich mit einem Betonbohrkern

Wie wichtig (und schwierig) es ist, die richtigen Parameter zu wählen, kann besser an einer Betonprobe gezeigt werden, die aus einer größeren Wand hohlgebohrt wurde. Die Oberfläche ist durch das Bohren glatt geschliffen. Dieser Körper wurde mit unserer 225kV μ CT gemessen. Der Beton besteht aus Steinen und Bindemittel, die in der Dichte unterschiedlich sind, und aus Luftporen. Abbildung 2 und 3 zeigen zwei virtuelle Oberflächen, jeweils mit den verwendeten Parametern. Abbildung 2 zeigt die Oberfläche glatt, so wie wir sie von außen sehen. Würde man daran den Durchmesser ermitteln, so wäre dieser größer als der wahre Wert, weil die Schwelle zu tief gesetzt wurde und viele Punkte mit zum Objekt gezählt werden, die nicht der oben genannten Regel entsprechen. Verschiebt man die Sichtbarkeitschwelle über das Maximum der Dichtewerte, so entsteht Abbildung 3, die Oberfläche enthält jetzt deutliche Vertiefungen. Die Realität ist aber anders.

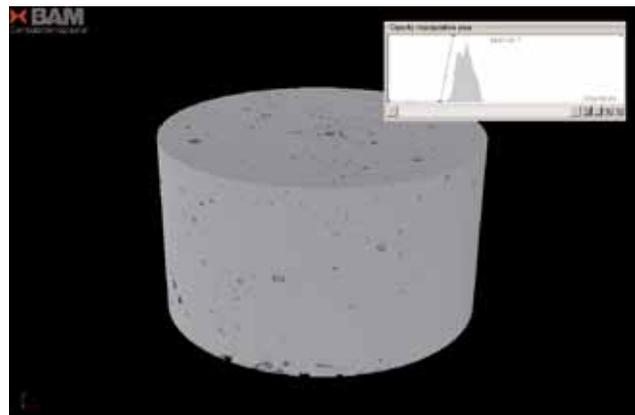


Abb. 2: Oberfläche eines Bohrzylinders aus Beton mit Parameterangaben.

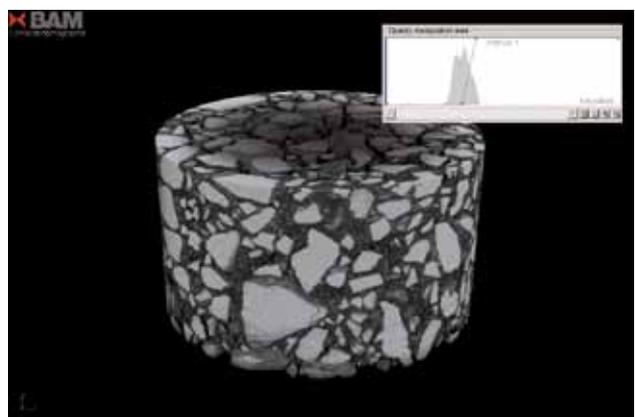


Abb. 3: Weitere Oberfläche eines Bohrzylinders aus Beton mit Parameterangaben.

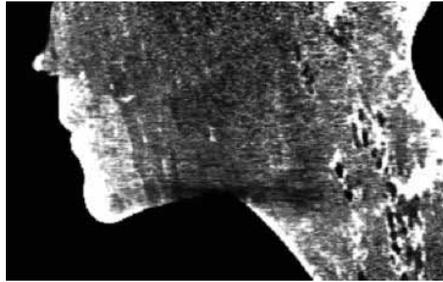


Abb. 4: Äderung des Steins im Bereich des Gesichts, Datensatz von 2006.

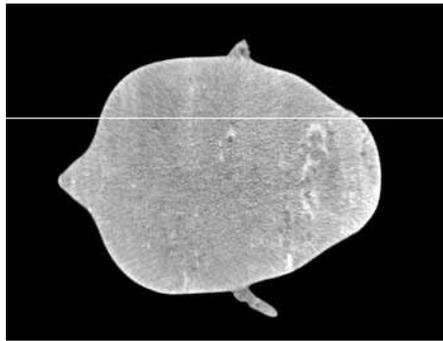


Abb. 5: CT-Schnitt in mittlerer Gesichtshöhe (K390, 2006), Dichteverteilung entlang der weißen Linie in Abbildung 6.

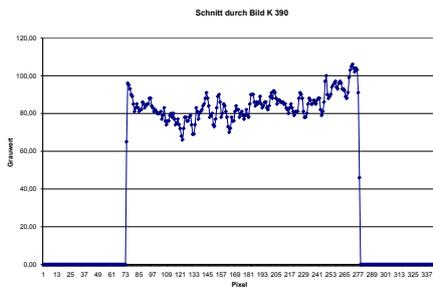


Abb. 6: Grauwertverteilung der Linie aus Abbildung 5. An beiden Enden ist der Aufhärungsartefakt sichtbar. Die Stuckauflage ist nicht erkennbar.

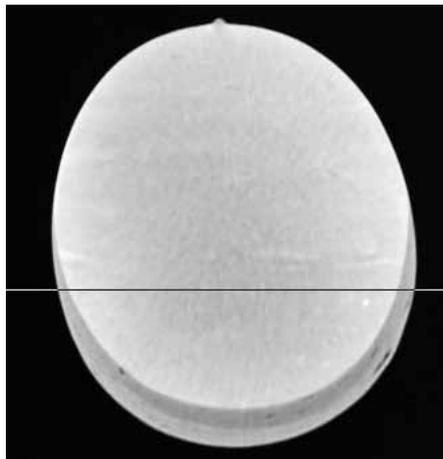


Abb. 7: CT-Schnitt in der Höhe des Helms (scan 20, 1992), Dichteverteilung entlang der weißen Linie in Abbildung 8.

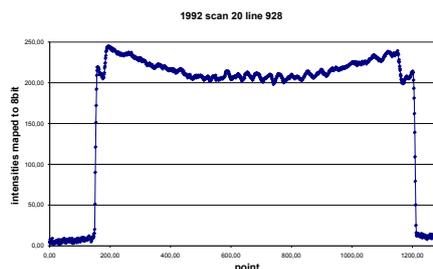


Abb. 8: Grauwertverteilung der Linie aus Abbildung 7. An beiden Enden ist der Aufhärungsartefakt sichtbar. Zwei Stuckschichten sind erkennbar.

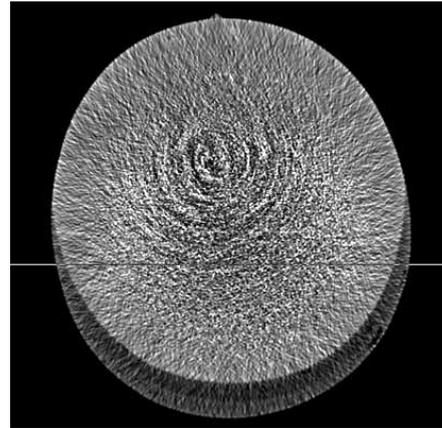


Abb. 9: Datensatz von 2006, Höhe wie in Abbildung 7, Dichteverteilung in Abbildung 10.

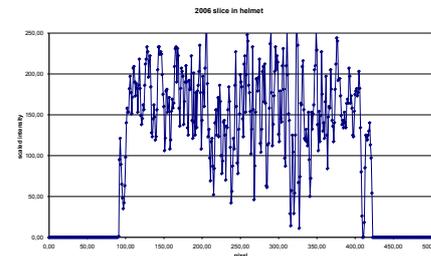


Abb. 10: Grauwertverteilung der Linie aus Abbildung 9. Eine Stuckschicht ist erkennbar.

Weitere Untersuchungen

Warum liegen die Vertiefungen im virtuellen Gesicht von Nofretete [10] parallel zur Nase und werden darum als Falten interpretiert? Die Antwort ist in dem senkrechten Schnitt durch den Datensatz in Abbildung 4 zu sehen. Die Grauwertverteilung wurde hier so gespreizt, dass auch kleinere Änderungen sichtbar sind. Die Adern im Stein sind nun deutlich als helle und dunkle Streifen sichtbar. Sie liegen parallel zur Gesichtsoberfläche, wie auch in [10] erwähnt wird. Treten sie an der Gesichtsoberfläche aus, so ergibt sich eine symmetrische Verteilung. Wenn es eine zweite darstellbare Oberfläche hinter der bemalten gibt, so sollte diese Schicht auch in einer einzelnen Schnittebene (z. B. Fig. 2e in Huppertz et al.) sichtbar sein. Die Dichte des Stucks ist geringer als die des Steins. Daher sollte eine Stuckauflage als dunkler Rand am Stein erscheinen. Dies ist nicht der Fall. Auch nicht bei der dargestellten (gemittelten) Schichthöhe von 2 mm. Im Gegenteil: Der äußere Rand erscheint heller als das innere Steinmaterial. (siehe Abbildung 5 und 6). Auch die dünne Schicht der Malgrundlage, von der wir wissen, dass sie vorhanden ist, ist nicht sichtbar. Offensichtlich verfälscht hier ein Aufhärungsartefakt die Dichtewerte zu höheren Werten am Rand (in der Rekonstruktion nicht berücksichtigte Änderung des Spektrums der Röntgenstrahlung beim Durchgang durch das Material). Tatsächlich stellt der Aufhärungsartefakt ein wichtiges Problem in der industriellen CT dar, falls mehr als ein Material im Tomogramm vorhanden ist. In der medizinischen CT ist die Aufhärungskorrektur in den Rekonstruktionsalgorithmus für biologische Materialien, mit Knochen als höchstem Dichtewert, fest eingebaut.

Vergleich der beiden CT Datensätze

Die in Huppertz et al. [10] wiedergegebenen CT-Schnitte haben eine Schichtdicke von 2 bis 2,5 mm (siehe dort Bildunterschrift 2) und sind so weit von der nominellen

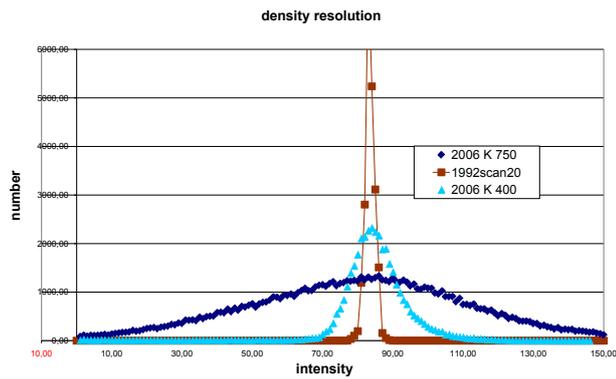


Abb. 11: Dichteauflösung für verschiedene CT-Schichten, siehe Text.

möglichen (0,6 mm) entfernt und näher an der in 1992 benutzten Schichthöhe von 5 mm. Im Vergleich haben die Messungen von 1992 den Vorteil, dass hier für jede einzelne Schichtmessung die maximal mögliche Brenndauer der Röhre genutzt wurde, die benutzte Röhrenspannung ist auch etwas höher. Durch die größere Detektorfläche in 1992 (ca. 8,4-fach) werden bedeutend mehr Photonen gemessen und die Dichteauflösung im Tomogramm ist wesentlich besser. Im Falle der Spiral-CT-Maschine (2006) wurde die ganze Messung innerhalb einer Minute durchgeführt, wodurch die Dichteauflösung stark eingeschränkt ist. Andererseits ist die Bildgröße für beide Anlagen (im CT-Schnitt horizontal) gleich, nur in der Senkrechten wurden wesentlich mehr Bilder gemessen. (1992: Siemens Somatom Plus, 137kV, 580mAs, Schichthöhe 5mm, 6,4min gesamte Meßzeit. 2006: Siemens Somatom Sensation 64, 120kV, 400mAs, Schichthöhe 0.6mm, ~1min gesamte Meßzeit). In Abbildung 7 und 9 sind zwei vergleichbare Schnitte in Höhe des Helms wiedergegeben. Die Verteilung der Dichtewerte kann jeweils sehr gut anhand der weißen Schnittlinie (Ergebnis in Abbildung 8 und 10) gezeigt werden. Aus Abbildung 10 (Daten 2006) kann geschlossen werden, dass die gewählte Röhrenspannung und Stromstärke zu gering waren, um das Objekt zu durchdringen: es ergibt sich 100% Rauschen. Abbildung 11 zeigt die Grauwertverteilung aus einem nahezu gleichen Schnitt aus 1992 und 2006 (2006: 2006 K 750; 1992: 1992scan20). Zum Vergleich ist auch die Dichteverteilung einer Schicht in mittlerer Gesichtshöhe angegeben (2006 K 400). Durch die längere Messzeit pro Pixel,

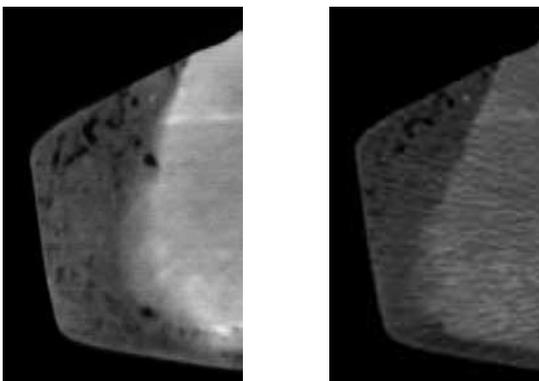


Abb. 12: Vergleich der Detailerkennbarkeit beider Messungen. Messung von 1992 (links) und 2006.

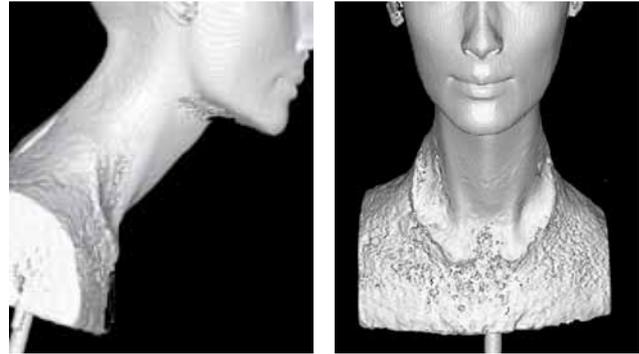


Abb. 13: Zwei virtuelle senkrecht zueinander stehende Ansichten der Büste (verzerrte Darstellung) aus dem 2006er Datensatz.

höhere Spannung und Strom, und den größeren Kollimator ist der Unterschied augenfällig.

Die Sichtbarkeit einer Anzeige, zum Beispiel ein Riss oder ein Einschluss, hängt gleichermaßen von der Dichte- als auch von der Ortsauflösung ab (Hierzu: ASTM "Standard Guide for Computed Tomography (CT) Imaging", E-1441). Je besser die Dichteauflösung, desto kleinere Details sind erkennbar, auch wenn sie unterhalb der Ortsauflösung liegen, solange es sich um separate Anzeigen handelt. Dies kann wiederum an zwei ähnlichen CT-Schnitten aus beiden Messungen gezeigt werden. Abbildung 12 links zeigt einen CT-Schnitt aus 1992 mit einer seltsam geformten Pore (oder Einschluss mit geringer Dichte). Der Schnitt rechts von 2006 ist in nahezu der gleichen Höhe. Da die Schichthöhe 1992 größer war, werden mehr Anzeigen in einem Bild aufsummiert. Nicht senkrechte Kanten, wie der Stein im Inneren, werden verbreitert dargestellt.

Da die Oberfläche der Büste der Nofretete sehr empfindlich ist, sollte jede Handhabung gründlich geplant sein. Es wäre sicherlich klüger gewesen, zunächst eine Testmessung mit einem ähnlichen Steinobjekt durchzuführen. Ein Vergleich der 1992er Daten mit den Ergebnissen der Testmessung hätte dann eine sorgfältige Planung der Messung erlaubt. Mit zwei vergleichbaren Datensätzen in einem Abstand von 14 Jahren hätte so eine eventuelle Veränderung des Schadensbildes an der Büste festgestellt werden können.

Abbildung 2d in Huppertz et al. zeigt eine herausgebrochene und reparierte Stelle. Im Artikel wird festgestellt, dass hier ein anderes Material zur Reparatur benutzt wurde. In der Dokumentation der Nofretete ist dieser Unfall beschrieben, und wir haben die Bestätigung des Restaurators, dass er das originale Teil wieder eingeklebt hat. Es könnte sein, dass der Klebstoff das Bruchstück teilweise getränkt hat und so die Dichte erhöhte. Dieses Beispiel zeigt, mit welcher Vorsicht Schlüsse aus CT-Aufnahmen gezogen werden müssen.

Viele interessante Fragen

Es gibt noch viele interessante Fragen rund um die Büste der Nofretete. Eine ist: Warum (und wann) wurde der Stuck aufgebracht? Eine wirklich schlüssige Erklärung gibt

es bisher nicht. Wir akzeptieren einfach die gegebene Erklärung, dass der antike Bildhauer diese als eine Korrektur auf den ursprünglich gehauenen Stein aufbrachte, um den Helm geradlinig und nicht wie ursprünglich, leicht gebogen, darzustellen. Interessant ist auch der Bereich des auf den Schultern aufgetragenen Stucks. Dies geschah nur in einem scharf örtlich begrenzten Bereich, im Nacken bildet der Stein eine Stufe gegen den Stuck, der Stein ist hier, (im Bereich des Zopfes) nicht überdeckt. Der ausgeschlagene Bereich könnte also planvoll angelegt sein. Abbildung 13 zeigt zwei virtuelle senkrecht zueinander stehende Ansichten der Büste (verzerrte Darstellung) aus dem 2006er Datensatz. Dargestellt ist eine „isosurface“ des Steins. (= Fläche aller Grauwerte eines bestimmten Wertes, zur Problematik siehe oben). Um Überschneidungen mit Material aus dem Stuck zu vermeiden, wurde dieser vorher, falls notwendig, per Hand im Tomogramm entfernt. Eine automatische Unterscheidung ist auf Grund des hohen Rauschens teilweise nicht möglich. Die raue Oberfläche hinterm Kinn entsteht durch die Strahlaufhärtung. Hinter dem entfernten Stuck ist sie teilweise durch das zunehmende Rauschen bedingt.

Schlussfolgerung

In der Bildverarbeitung sollte man immer ein gewisses Misstrauen gegenüber seinen eigenen Ergebnissen behalten: Es gibt definitiv kein zweites Gesicht der Nofretete.

Tomographien sollten mit einem geeigneten System gemessen werden. Falls Materialien mit einer Dichte stark abweichend von 1g/ccm gemessen werden sollen, müssen spezialisierte Geräte verwendet werden. Im Bereich der Medizin hingegen ist die Strahlenreduktion und die mögliche Erhöhung der Ortsauflösung ein wichtiges Argument für den schnellen Spiral-CT-Scanner.

Dieser Artikel wurde in englischer Sprache in der September-Ausgabe des e-Journals ndt.net veröffentlicht.

Anmerkungen

- 1 Ägyptisches Museum und Papyrussammlung, Bodestr. 1-3, 10178 Berlin
 - 2 Imaging Science Institut, Robert-Koch-Platz 7, 10115 Berlin
 - 3 Rathgen-Forschungslabor, Schloßstr. 1A, 14059 Berlin
 - 4 Staatliche Museen zu Berlin, Generaldirektion, Stauffenbergstraße 41, 10785 Berlin
 - 5 Stuck wird hier ohne Bestimmung der chemischen Zusammensetzung für alle Materialien geringerer Dichte verwendet, die aufmodelliert wurden. Kalkstein, Stein bezeichnet entsprechend das dichtere Material
- ### Literaturangaben
- [1] Cesareo R, Brunetti A, Mascarenhas S, Robert R, Castellano A, et al.: X and γ -ray tomography for the study of works of art. In: 6th International Conference on “Non-Destructive Testing and Microanalysis for the Diagnostics and Conservation of the Cultural and Environmental Heritage”, Rome, May 17th–20th 1999, proceedings, pp. 17–29 (1999)
 - [2] Proceedings Industrielle Computertomografie, Fachtagung 27.-28. Februar 2008, Wels/Austria, Shaker Verlag, Aachen, (2008)
 - [3] Illerhaus B., Goebbels J., Riesemeier H., Staiger H., Correction techniques for detector systems in 3D-CT. Proc. Soc. Photo Opt. Instrum. Eng. Vol. 3152, (1997)
 - [4] Illerhaus B., Onel Y., Goebbels J., Correction techniques for 2D detectors to be used with high energy X-ray sources for CT, part II. Proc. Soc. Photo Opt. Instrum. Eng. Vol. 5535, (2004)
 - [5] <http://www.welt.de/wissenschaft/article3477870/Das-zweite-geheime-Gesicht-der-Nofretete.html>
 - [6] Reimers P and Goebbels J, New possibilities of nondestructive evaluation by X-ray computed tomography, Mater. Eval. 41 (1983) pp. 732 - 737 und
Heidt H., Goebbels J., Reimers P., Ketschau A., Development and Application of an universal CAT-Scanner, 11th World Conference on NDT, Las Vegas, Novembre 3 – 8, (1985), pp. 664-671
 - [7] Badde, A., Illerhaus, B., Three Dimensional Computerized Microtomography in the Analysis of Sculpture., Scanning, (2008 Jan 23); 30(1): pp. 16-26
 - [8] Rolf Krauss (1987, 1991), Zur modernen Geschichte der Büste der Nofretete, in: Jahrbuch Preußischer Kulturbesitz Band XXIV (1987), S. 87-156
 - [9] Lemke AJ, Hosten N, Beier J, Wildung D, Zwicker C, Felix R. Non-destructive examination of Egyptian works of art [in Deutsch]. Med. Bild (1995); 2, pp 55–62
 - [10] Huppertz A, Wildung D., Kemp B. J., Nentwig T., Asbach P., Rasche F. M., Hamm B., Nondestructive Insights into Composition of the Sculpture of Egyptian Queen Nefertiti with CT, Radiology: Volume 251: Number 1, (April 2009), pp. 233–240
 - [11] Bartscher M., Hilpert U., Goebbels J., Weidemann G., Enhancement and Proof of Accuracy of Industrial Computed Tomography (CT) Measurements, In: CIRP Annals: Manufacturing technology, Elsevier, (2007) 56 Heft: 1, pp. 495-498, ISSN: 0007-8506, 1726-0604
 - [12] <http://www.volumegraphics.com/>
 - [13] <http://www.ndt.net/article/v05n05/zscherp/zscherp.htm>