

Prähistorisches Nashorn mit Termin beim Radiologen

Ralf Schindel, Stefan Buob und Alexander Flisch

Inhaltsverzeichnis

Zusammenfassung	135
1. Einleitung	136
2. Problemstellung	136
3. Vom Computertomographen zum physischen Modell	137
4. Datenakquisition	137
5. Datenaufbereitung	139
6. Produktion des Modelles	140
6.1. 3D – Printing (3DP)	140
6.2. Selective Laser Sintering (SLS)	141
7. Schlussfolgerung	141
Dank	142
Literaturverzeichnis	142

Zusammenfassung

Paläontologische Fragestellungen verlangen oft interdisziplinäre und innovative Lösungen – so auch im vorliegenden Fall der Versteinerung von Eschenbach (Kanton St.Gallen).

Der in einem Steinbruch zufällig gefundene versteinerte Schädel eines ca. 20 Millionen Jahre alten Nashorns wurde vorpräpariert. Die freigelegte Oberfläche und die zur besseren Beurteilung erstellten Computertomographie-Bilder liessen vermuten, dass das Nashorn zum Zeitpunkt der Versteinerung im Begriff war, einen Milchzahn abzustossen. Diese Situation machte den Fund noch einzigartiger. Um die Zahnsituation verständlicher zu machen und um Verletzungen des Fundgutes durch eine konventionelle mechanische Freilegung der Versteinerung zu vermeiden, sollte über eine zerstörungsfreie Methode die Zahnkonstellation nachgebildet werden. Dies führte zu der Zusammenarbeit mit dem Institut für Rapid Product Development RPD der FHS St.Gallen Hochschule für Angewandte Wissenschaften und der Empa in Dübendorf.

Die Versteinerung wurde mittels Industrie-Computertomographie an der EMPA gescannt. Beim Institut RPD wurden die gewonnenen Schichtdaten mit einer vor allem

in der Medizin angewandten Software aufbereitet, der interessierende Zahnbereich separiert und aus den zweidimensionalen Schichtbilddaten das 3D-Volumenmodell errechnet. Diese Daten waren die Basis für das Herstellen des physischen Modells mittels zweier neuartiger Produktionsverfahren, so genannte Generative Verfahren (schichtweise aufbauend).

1. Einleitung

«Prähistorisches Nashorn in der modernen Zahnarztpraxis» oder «Generative Verfahren ersetzen den Hammer» oder «Risikominimierung durch zerstörungsfreie Präparation einer Versteinerung mittels High-Tech» – dies sind alles mehr oder weniger ernste Versuche, den treffendsten Titel für dieses doch sehr interdisziplinäre, branchenübergreifende Projekt zu finden. Im folgenden Artikel wird beschrieben, wie in einer Zusammenarbeit zwischen dem Naturmuseum St.Gallen, einem Paläontologen, der EMPA Dübendorf und dem Institut RPD der FHS St.Gallen durch den Einsatz modernster Technologie schnell, präzise und zerstörungsfrei die Zahnsituation eines versteinerten Nashorns detailliert nachgebildet und frei von Verunreinigungen und Sedimentierung visualisiert und modelliert werden konnte.



Abbildung 1:
Teilweise freigelegte Versteinerung
des Schädels mit deutlich sichtbaren
Zahnreihen des Oberkiefers.

2. Problemstellung

In einem Steinbruch in der Nähe von Uznach machte ein Mitarbeiter eine zufällige aber historisch interessante Entdeckung. In einem jahrelang auf dem Betriebsgelände gelagerten Sandsteinblock waren Steingefüge und Farben auszumachen, welche auf eine Versteinerung hinwiesen. Nach einer ersten näheren Betrachtung war man sich gewiss: Hier handelt es sich um einen grossen fossilen Nashornschädel (Abbildung 1), welcher mit grösster Sorgfalt weiter untersucht werden musste (siehe Beitrag Bürgin, Becker, Oberli/Scherler in diesem Band).

Um die Versteinerung mit konventionellen Werkzeugen wie Hammer und Meissel nicht zu beschädigen, wurde der gesamte Schädel mit einem Industrie-Computertomographen (CT) gescannt (Abbildung 2).



Abbildung 2:
Für die Computertomographie
vorbereitete Versteinerung.

Beim Studium der CT-Schichtdaten machte man dann gleich eine weitere Entdeckung: ein «Milchzahn»! Die CT-Daten führten eine Zahnkonstellation zu Tage, in welcher ein nachwachsender den alten, primären Zahn abstösst.

Dieser Fund war von so grosser Bedeutung, dass er einem breiten Publikum zugänglich gemacht werden sollte. In natürlicher Grösse sollte die Form und die Dimension des Zahnwechsels demonstriert werden können. Doch wie soll der komplexe Bereich der Ablösung eines Zahnes visualisiert werden ohne die Originalversteinerung zu zerstören?

3. Vom Computertomographen zum physischen Modell

Das Institut für Rapid Product Development RPD der FHS Hochschule St.Gallen beschäftigt sich seit 1996 mit den Generativen Verfahren, im Speziellen dem Selective Laser Sintering (SLS)-, dem Selective Laser Melting (SLM)- und dem 3D-Printing (3DP)-Verfahren. In enger Zusammenarbeit mit der Industrie entwickelt das Institut verfahrensspezifische Materialien. Diese neuartigen Produktionstechnologien generieren schichtweise Bauteile direkt ab 3D-Daten in Kunststoff oder Metall quasi über Nacht. Neben Anwendungen im Bereich der Herstellung von Funktionsmodellen (Rapid Prototyping) werden diese Technologien auch für die schnelle Produktion von Teile-Kleinserien mit komplexen Geometrien verwendet (Rapid Manufacturing).

Für medizinische Anwendungen schaffte sich das Institut eine spezielle Software (Mimics, Materialise NV, Belgien) an, mit welcher es möglich wurde, direkt auf der Basis der Computertomographie-Daten (CT) den Knochen vom weicheren Gewebe zu separieren und in der Folge den dreidimensionalen Volumenkörper zu berechnen. Diese Daten sind die Basis der Produktion eines detaillierten patientenspezifischen

Schädelmodelles, welches der präoperativen Planung der Implantate und des Einsatzes der Instrumente bei komplexen chirurgischen Eingriffen dient.

Warum also sollte es nicht auch möglich sein, dieselbe Software für das Trennen des fossilen Schädels vom Sandgestein zu verwenden, um auf diese Weise die Zahnsituation zu visualisieren?

Für eine nichtmedizinische, paläontologische Anwendung der Software müssen einige Voraussetzungen erfüllt sein.

- lesbares CT-Format
- klar und homogen erkennbare Dichteunterschiede
- genügend hohe Scan-Auflösung

4. Datenakquisition

Die bei der EMPA in Dübendorf auf einem Industrie-Computertomograph erstellten CT-Daten konnten im DICOM-Format ausgegeben werden, welches in der Medizin zum Standard-Datenformat gehört und somit beim Institut RPD direkt eingelesen werden konnte. Der ganze Schädel hatte eine Länge von etwa 45 cm. Insgesamt wurden 920 Schichten mit einem Abstand von 0.5 mm erstellt. Um den 22 cm dicken Sandstein durchdringen zu können, musste die Röntgenröhre (Comet MXR 451) bei ihrer maximalen Leistung (450 kV 2 mA) betrieben werden. Die Röntgenenergie medizinischer Tomographen wäre zu gering, um ein so grosses Fossil durchstrahlen zu können. Die 920 einzelnen Schichten wurden nach der Datenerfassung zu einem 3D-Volumentomogramm aufeinander gestapelt, was zu einer Datenmenge von über 2 GByte führte. Abbildung 3 zeigt einen CT-Schnitt entlang der Längsachse des Schädels und eine aufgeschnittene 3D-Ansicht.

Die CT-Bilder weisen einen deutlichen Kontrast zwischen den versteinerten Partien des Schädels (Knochen und Zähne) zum umgebenden Sedimentgestein auf. Dies deshalb, weil die Versteinerungen Mineralien enthalten, welche die Röntgenstrahlen stärker ab-

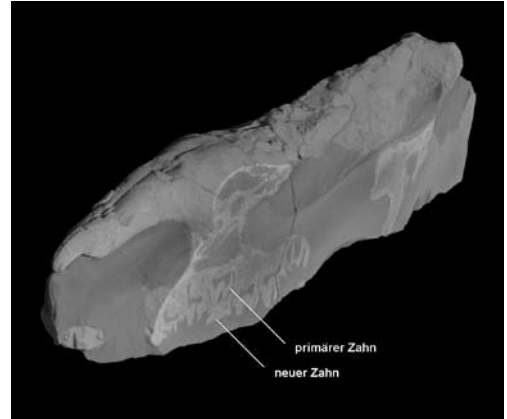
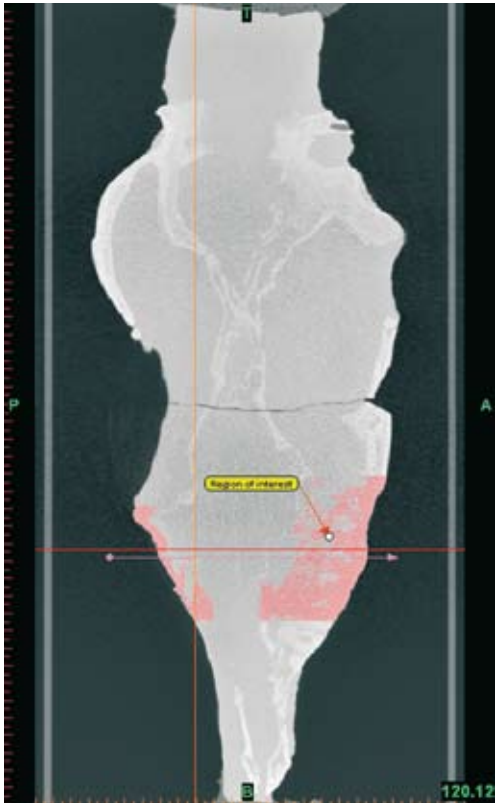


Abbildung 3b:
Aufgeschnittenes 3D-Tomogramm des ganzen Schädels. Versteinerungen erscheinen heller (hohe Röntgen-Absorption), umgebendes Sedimentgestein dunkler (geringe Absorption). Primärer und neuer Zahn sind deutlich sichtbar.

Abbildung 3a:
CT-Schnitt des Fundes in Aufsicht. Der interessierende Zahnbereich ist rot markiert.

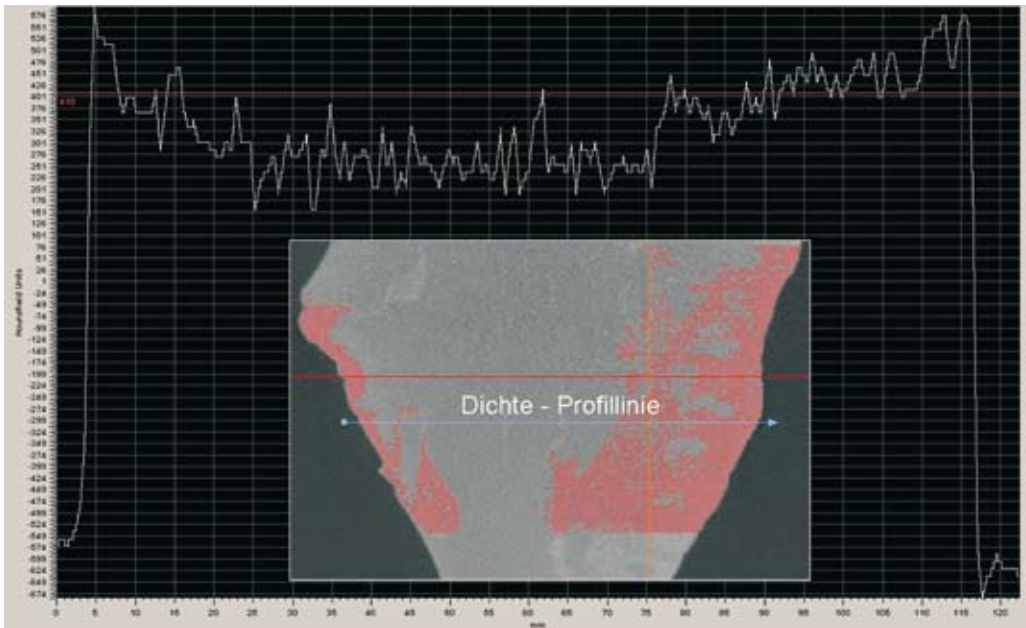


Abbildung 4:
Dichteprofil der Versteinerung gemessen in Hounsfield Units.

sorbieren als das Sedimentgestein. Stärker absorbierende Volumenelemente erscheinen in helleren und Zonen mit geringerer Röntgenabsorption in dunkleren Grauwerten.

In Richtung des Zentrums der Versteinerung ist eine Abnahme der Gesamthelligkeit der Versteinerung ersichtlich (Abbildung 3a). Der Grund liegt darin, dass eine Röntgenröhre ein kontinuierliches Strahlenspektrum erzeugt, welches beim Durchgang durch Materie kein lineares Verhalten aufweist. Der Kontrast zwischen Schädel und Sediment nimmt daher zur Mitte hin ab. Dieser Umstand machte eine saubere Trennung der Versteinerung vom Sedimentgestein schwierig. Mit einer nachfolgenden Bildbearbeitung der CT-Daten konnten die Resultate verbessert werden.

Weil das Hauptinteresse der Ablösung des Milchzahns vom Erwachsenenzahn und den zwei angrenzenden Zähnen galt (Abbildung 3b) und es sich bei der 3D-Datenerstellung um daten- und rechenintensive Prozesse handelt, wurde ein kleinerer Bereich aus der gesamten gescannten Versteinerung definiert (in Abbildung 3a rot markiert). Dieser wurde für die nächsten Schritte weiterverwendet.

5. Datenaufbereitung

Für die Segmentierung, die Loslösung der Versteinerung, wurde eine spezielle Software (MIMICS, Materialise N.V., Belgium) verwendet, welche vor allem in der Medizin für die Präparation von Modellen für die präoperative Planung von komplexen Eingriffen meist im CMF-Bereich (Cranio Maxillo facial) verwendet wird.

Es wurde ein sogenanntes Tresholding durchgeführt. Dabei wird ausgehend vom Dichteprofil der gesamten Versteinerung (Abbildung 4) ein Schwellwert definiert, welcher die Ziel-Grauwerte beinhaltet, welche die Versteinerung ohne das Sedimentgestein beschreiben. Je dichter das durchstrahlte Material ist, desto heller erscheinen die Pixel.

Die hellen Grauwerte beschreiben das versteinerte Nashorn und die dunkleren Pixel das Sedimentgestein. Auf der Abbildung 5 ist erkennbar, dass die Versteinerung relativ gut von den Sedimentgesteinsdaten (dunkelgrau) separiert werden kann. Es ist aber auch ersichtlich, dass der obere primäre Zahn mit dem neuen Zahn am Zahngrund verbunden ist.

Der Grund liegt in der momentanen Auflösungsungenauigkeit der Computertomographie. Folglich musste Schicht für Schicht ein Trennungsverlauf zwischen den zwei Zähnen definiert werden, sodass sich die Zahnoberflächen an keiner Stelle mehr berührten und die Zähne voneinander getrennt werden konnten.

Nun konnte die Separierung und die 3D-Berechnung des <neuen> Zahnes, des primären Zahnes und der zwei angrenzenden Zähne durchgeführt werden. Bei der Konvertierung in sogenannte STL-Files (notwendiges Datenformat zur generativen Fertigung eines physischen Modelles) entstehen Netze, welche über die freigelegten separierten 3D-Volumen gelegt werden und aus Dreiecken bestehen; man spricht deshalb von triangulierten Oberflächen (Abbildung 6). Dieses Datenformat der triangulierten Oberflächen wird direkt verwendet für die Produktion der

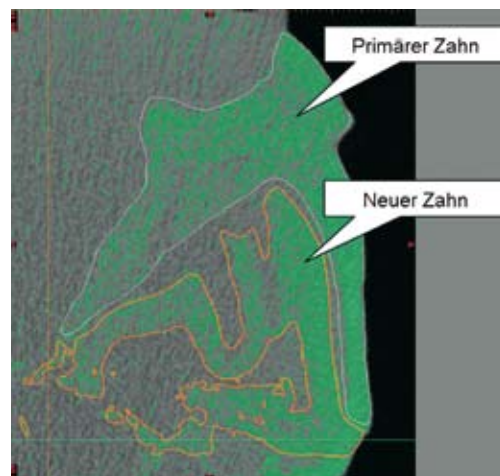


Abbildung 5:
Zahnbereich nach der Anwendung des Schwellwertes und der Definition der Trennlinie (inkl. Zahnkonturlinien).

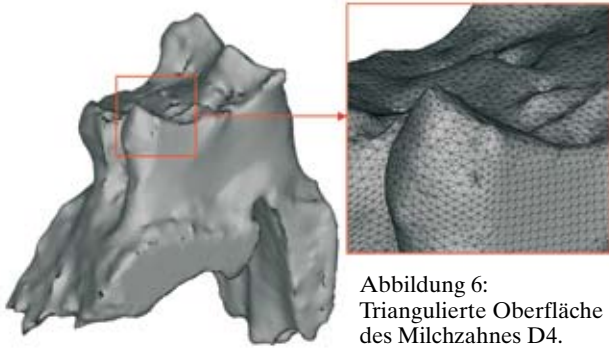


Abbildung 6:
Triangulierte Oberfläche
des Milchzahnes D4.

Abbildung 7:
Triangulierte Daten der Zahn-
konstellation bereit für die Gene-
rative Produktion.

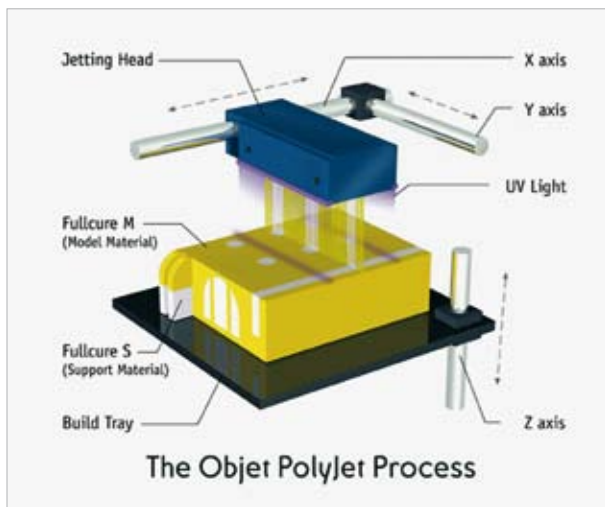
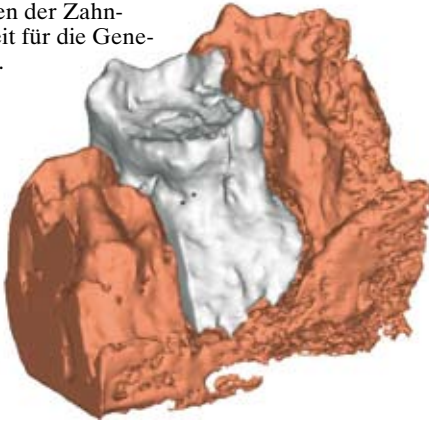


Abbildung 8:
Funktionsschema des 3D-Printing
Prozesses (3DP).

physischen Modelle mit einem Generativen Verfahren. Es liefert z. B. dem Druckkopf des 3D-Printers die Information, an welcher Stelle ein Kunststoff gedruckt werden soll und wo nicht.

6. Produktion des Modelles

Wie Abbildung 7 erkennen lässt, sind die Geometrien und Oberflächen dieser 3D-Daten sehr komplex und weisen Hinterschnitte und Hohlräume auf. Mit konventionellen Fertigungsverfahren wie Fräsen, Drehen, etc. hätte man keine Chance, solch schwierige Formen zu produzieren.

Seit ca. 20 Jahren wird weltweit intensiv an neuartigen, generativ arbeitenden Produktionsverfahren geforscht. Diese schichtweise aufbauend arbeitenden Verfahren, sogenannte Generative Verfahren, bauen Modelle und Bauteile auf der Basis von Pulvermaterialien oder niederviskosen Materialien auf und haben deshalb verfahrensspezifische Vorteile wie z. B. eine hohe Produktivität bei komplexen Geometrien. Seit 1996 arbeitet und forscht das Institut RPD der FHS St.Gallen auf dem Gebiet der Generativen Verfahren und ihren peripheren Technologien und gehört heute weltweit zu den führenden Institutionen auf diesem Fachgebiet. Somit lag es nahe, die komplexen Formen der Nashornzähne über die Generativen Verfahren in der Ostschweiz fertigen zu lassen.

Um die Komplexität der Zahnoberflächen am Modell besser zu visualisieren, wurde entschieden, den primären Zahn in einem transparenten Material 3D zu printen (3DP) und die darunter, respektive daneben liegenden Zähne mit dem Selective Laser Sintering (SLS)-Verfahren zu produzieren.

6.1. 3D-Printing (3DP)

Im 3DP-Verfahren werden die triangulierten Oberflächen übernommen und in 0,016 mm feine Schichten aufgeschnitten. Jede einzelne Schichtinformation wird einem Druckkopf

(ähnlich einem Tintenstrahldrucker) übermitteln, welcher nicht Tinte, sondern ein sehr niederviskoses und UV-Licht härtendes Photopolymer auf eine Plattform druckt. UV-Licht härtet jede Schicht einzeln aus. Es werden jeweils zwei Photopolymere mit verschiedenen Aushärtegraden geprintet. Das härtere Material bildet das Modell ab und das weichere wird als Stützmaterial für Überhänge gebraucht, welches in einem Folgeprozess mit einem Wasserstrahl entfernt wird (Abbildung 8). Auf diese Weise wurde der primäre Zahn, der ‹Milchzahn›, Schicht für Schicht aufgebaut.

6.2. Selective Laser Sintering (SLS)

Das SLS-Verfahren verwendet Kunststoff-Pulvermaterialien. Im Fall der Zahngruppe wurde ein Polyamid 12 (nylonähnlich) verwendet. Die triangulierten Daten werden in 0,1 mm dicke Schichtinformationen geschnitten, welche mit einem CO₂-Laser gescannt werden. Der Laserstrahl bewegt sich schrittweise über das aufgerollte frische Polyamidpulver und trägt Energie entsprechend der erhaltenen Schichtinformationen ein. Das Polyamidpulver schmilzt an jenen Orten, an welchen vom Laser Energie eingetragen wird. An den anderen Stellen bleibt das Pulver pulverförmig. Die Bauplattform senkt sich um 0,1 mm, frisches Pulver wird aufgetragen und der Laser fährt die nächste Schichtinformation im Pulverbett ab (Abbildung 9).

So wurde die Zahnsituation des Nashorns Schicht für Schicht aufgebaut und am Ende konnte das Zahnmodell aus dem Pulverbett entnommen und das lose, nicht versinterte Pulver abgestrahlt werden.

7. Schlussfolgerung

Auf Basis der unvollständig freigelegten Versteinerung konnte direkt ab den Computertomographiedaten eine Replika mit einer verfahrensspezifischen Genauigkeit von 0,1

bis 0,2 mm hergestellt werden. Die feinsten Details konnten sicht- und begreifbar gemacht werden (Abbildung 10), ohne das Risiko eingehen zu müssen, beim Freilegen der Versteinerung diese zu beschädigen.

Wir sind überzeugt, dass diese Prozesskette für die Paläontologie und die Archäologie ein grosses Potential in sich birgt, doch heute leider noch viel zu wenig genutzt wird.

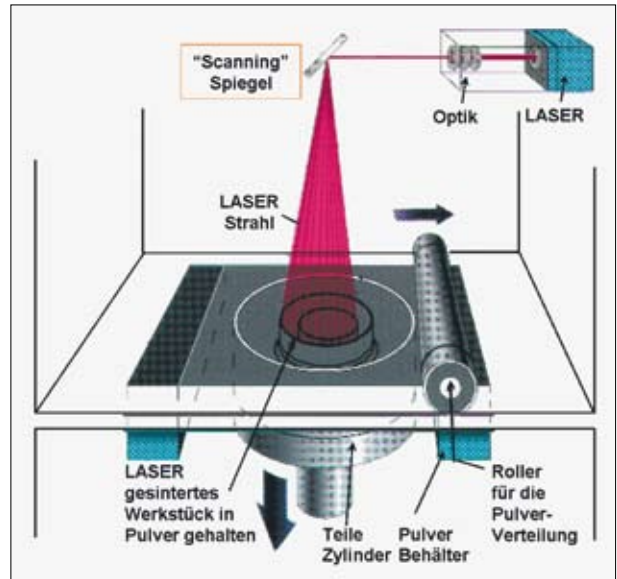


Abbildung 9:
Funktionsschema des Selective Laser Sintering Prozesses (SLS).



Abbildung 10:
Direkt ab CT generativ produziertes Modell mit abnehmbarem Milchzahn D4.

Dank

Interdisziplinär arbeiten heisst, offen sein für neue Prozesse und vielfach auch offen sein für eine andere Denkweise. Dr. Toni Bürgin, Direktor des St.Galler Naturmuseums und Initiant dieses Projektes möchten wir für seine Offenheit und Initiative danken, wie auch Urs Oberli, dem paläontologischen Präparator.

Literaturverzeichnis

- BÜRGIN, T. & BECKER, D. & OBERLI, U. (2008): Ein fossiles Nashorn vom Uznaberg. – Berichte der St.Gallischen Naturwissenschaftlichen Gesellschaft, Band 91, St.Gallen.
- D' HOLLOSZY, M. (2003): Reconstruction of the skull of <Trijntje>. – Antropology Spezial, Materialise.
- FLISCH, A. (1999): Industrial Computed Tomography in Reverse Engineering Applications. – DGZfP-Proceedings BB 67-CD.
- LEVY, G.N. & SCHINDEL, R. & KRUTH, J.-P. (2003): Rapid Manufacturing and Rapid Tooling with Layer Manufacturing (LM) Technologies, State of the Art and Future Perspectives. – CIRP Annals 2003 Vol. 52/2.
- MCALEA, K. & FORDERHASE, P. & HEJMADI, U. & NELSON, C. (1997): Materials and Applications for the Selective Laser Sintering Process. - Proceeding of the 7th International Conference on Rapid Prototyping, San Francisco 1997: 23–33.
- OLSEN, S. (2005): Advanced Mandibular Reconstruction. – 3rd International Conference on Computer Aided Surgery around the Head, Berlin.
- SCHINDEL, R. & LEVY, G. & LAMPERT, CH. & GROSS, W. (2006): Biomaterials are going 3D with Layer Manufacturing Technologies (LM) – Direct and Indirect approaches. – Australasian Society for Biomaterials 16th Annual Conference, Rotorua New Zealand.
- WOHLERS, T. (2004): Wohlers Report 2004. – ISBN 0-9754429-0-2.