

3D Rekonstruktion von Dinosauriern

Tim SUTHAU, Anke BELLMANN, Stefan STOINSKI, Andreas FRIEDRICH, Olaf HELLWICH, Hanns-Christian GUNGA

Zusammenfassung

Das Fachgebiet Computer Vision & Remote Sensing der TU Berlin arbeitet gemeinsam mit dem Institut für Physiologie der FU Berlin im Rahmen des DFG Forschungsprojektes „Biologie der Dinosaurier: Die Evolution des Gigantismus“ an der Vermessung von Dinosaurierskeletten. Diese Messungen erfolgen mittels Laserscanner und photogrammetrischer Methoden. Um Daten über das Leben und Sterben der Dinosaurier zu sammeln, sind die Skelette detailliert zu untersuchen. Eine Vielzahl an physiologischen Daten lassen sich ableiten, wenn die Eigenschaften noch existierender Tiere mit Methoden der Vergleichenden Physiologie anhand des Körpervolumens und der Körperoberfläche hochgerechnet werden. Diese Größen wiederum lassen sich mit Hilfe geeigneter Modellannahmen bestimmen, wenn präzise Daten über die aufgebauten Skelette vorliegen.

Im Folgenden soll die Methodik der Datenerfassung kurz erläutert werden. Die Modellierung der möglichen Außenhaut der vermessenen Dinosaurierskelette stellt die größte Unwägbarkeit bei der Bestimmung physiologischer Daten dar, beispielsweise bei der Volumen- und Gewichtsbestimmung. Hier werden verschiedene Möglichkeiten vorgestellt und diskutiert.

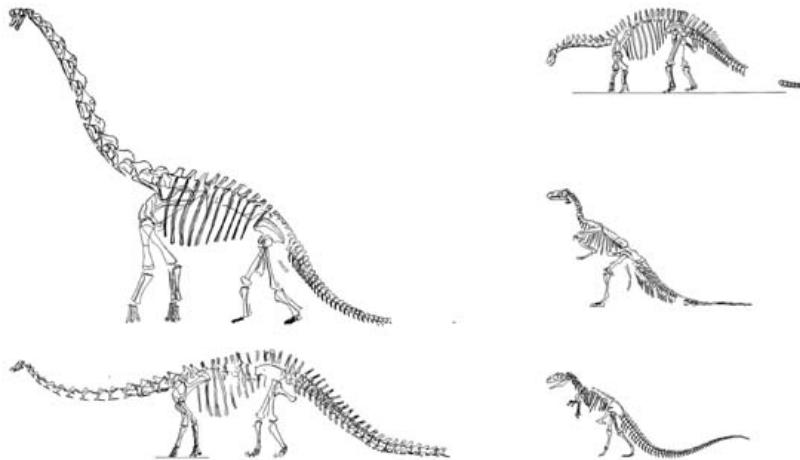


Abb. 1: Vergleich zwischen *Brachiosaurus* (oben links), *Diplodocus* (unten links), *Dicraeosaurus* (oben rechts), *Iguanodon* (mitte rechts), *Allosaurus* (unten rechts) im gleichen Maßstab.

1 Einleitung

Seit dem Beginn der 90iger Jahre beschäftigt sich das Fachgebiet Computer Vision & Remote Sensing (damals: Fachgebiet Photogrammetrie und Kartographie) mit der Vermessung von Dinosaurierskeletten. So wurden in den damaligen Forschungsprojekten 5 verschiedene Dinosaurierskelette mittels photogrammetrischer Methoden aufgenommen (Abb.1) (GUNGA et.al. 1999, WIEDEMANN et.al. 1999). Erste Erfahrungen wurden bei der Vermessung des *Dicraeosaurus hansemanni* und des *Diplodocus carnegi* mit dem Laserscanner des Instituts für Navigation in Stuttgart gesammelt (WIEDEMANN & WEHR 1998).

Im Zuge des seit Anfang des Jahres existierenden Forschungsprojektes sollen weitere Skelette vermessen werden. Hierfür steht ein (Triangulations-) Laserscanner MENSI S25 zur Verfügung. Die Modellierung der Tiere soll durch den Vergleich mit anderen Großsäugern evaluiert werden. Bei diesen Großsäugern handelt es sich um ein Skelett eines Indischen Elefanten aus dem Zoologischen Museum Kopenhagen und ein präpariertes Nashorn aus dem Tierkundemuseum in Dresden. Bei beiden Tieren sind im Gegensatz zu den Dinosaurierskeletten die Lebendgewichte bekannt.

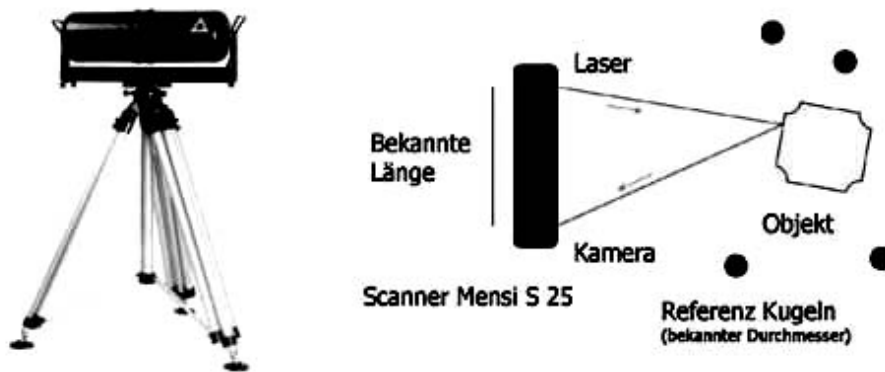


Abb. 2: Bild und Triangulationsprinzip des verwendeten Laserscanner MENSIS S25

2 Methodik der Datenerfassung

Da es sich bei der Vermessung von Dinosaurierskeletten um Objekte mit unregelmäßigen Strukturen handelt bietet sich die Verwendung der Scannertechnik an. Aufgrund der Größe der Tiere (Länge bis 20m, Höhe bis 12m) fiel unsere Wahl auf den Laserscanner S25 der Firma MENSI (Abb. 2). Die Winkelgenauigkeit des Scanners beträgt 0,8mm vertikal und 0,2mm horizontal bei einer Entfernung von 4m (3,8mm vertikal und 3,4 mm horizontal bei einer Entfernung von 10m). Die Genauigkeit der Entfernungsmessung liegt dabei zwischen 0,2mm bei 4m und 1,4mm bei 10m Entfernung (BÖHLER 2003). Die unterschiedlichen Genauigkeiten erklären sich aus dem Triangulationsprinzip. So können für Detailmessungen (z.B. einzelne Schädel) sehr hohe Genauigkeiten erzielt werden. Die angegebenen

Genauigkeiten bei größeren Entfernungen (>10m) erweisen sich als unproblematisch, da die folgende Modellierung diese Genauigkeiten nicht erreichen kann. Der Nachteil der relativ langen Messdauer von maximal 100 Punkten pro Sekunde kann akzeptiert werden, da die Aufnahmen der unbeweglichen Objekte meist in Museen stattfinden und der Aufwand der Vorbereitung der Reisen ungleich höher als der Mehraufwand längerer Messzeiten ist. Bei allen Messepochen wird eine digitale Kamera (Canon, EOS 1D, MarkII) zur photogrammetrischen Vermessung der Objekte verwendet. Diese Aufnahmen können ohne großen Mehraufwand getätigt werden und dienen der Sicherheit. Dies ist vor allem beim Einsatz im Ausland erforderlich, wo der Transport bzw. die Einfuhr des Scanners (Zoll) in das entsprechende Land z.T. problematisch ist.

3 Datenerfassung

3.1 Referenzobjekte -*Präpariertes Nashorn, Indischer Elefant*

Zur Bestimmung physiologischer Parameter aus Dinosaurierskeletten ist es notwendig, Referenzobjekte mit bekanntem Gewicht zu vermessen.

Das präparierte Nashorn *Lipsi* aus dem Tierkundemuseum in Dresden wurde im Mai 2004 (mittels Laserscanner und Photogrammetrie) vermessen. Das präparierte Nashorn wurde in zwei Tagen fast lückenlos erfasst. Benötigt wurden 16 Standpunkte, die mit 15 Passpunkten verknüpft wurden. Dabei wurden ca. 700.000 Punkte gemessen. Die Genauigkeit der Ausgleichung der Standpunkte liegt unter 3mm. (Abb.3 links)

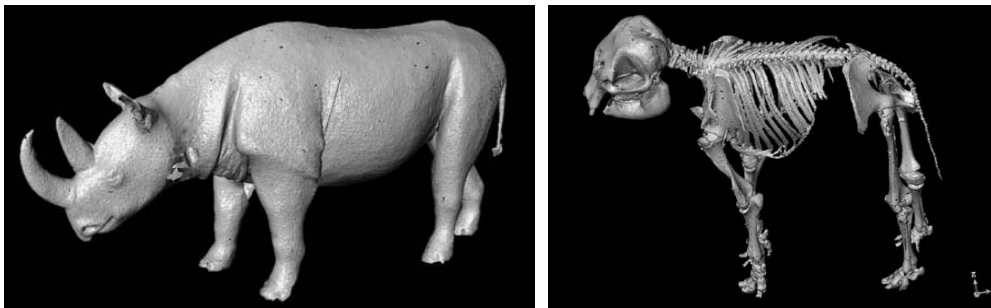


Abb. 3: Ergebnis der Auswertung der Laserscanneraufnahme, **links:** *Präpariertes Nashorn*; **rechts:** *Indischer Elefant*

Das Skelett eines indischen Elefanten aus dem Zoologischen Museum in Kopenhagen wurde im August 2004 (mittels Laserscanner und Photogrammetrie) vermessen. Auch dieses Skelett dient als Referenzobjekt zur Evaluierung der Modellierung der Außenhaut. Dabei ist das Lebendgewicht des Elefanten bekannt. Das Skelett hat eine Größe von 1,70 x 1,50 x 0,70 m³ und wurde mit Hilfe von 7 Standpunkten und 15 Passpunkten an 2 Tagen aufgenommen. Hierbei wurden mehr als 920.000 Punkte gemessen. Die Genauigkeit der Ausgleichung der Standpunkte betrug dabei weniger als 1 mm. (Abb.3 rechts)

3.2 Dinosaurierskelette - *Plateosaurus engelhardti*, *Atlassaurus imelakei*

Zur Bestimmung physiologischer Daten sollen im Forschungsprojekt verschiedene Dinosaurierskelette aufgenommen werden. Im Rahmen dieses Projektes wurde im Juli 2004 an der Universität Tübingen das Skelett des *Plateosaurus engelhardti* aufgenommen. Das Skelett hat eine Größe von 4,30 x 0,80 x 1,90 m³ und wurde mit Hilfe von 10 Standpunkten und 17 Passpunkten an 3 Tagen aufgenommen. Es wurden mehr als 3,2 Mio. Punkte gemessen. Die Genauigkeit der Ausgleichung der Standpunkte betrug dabei weniger als 3 mm. (Abb.4)

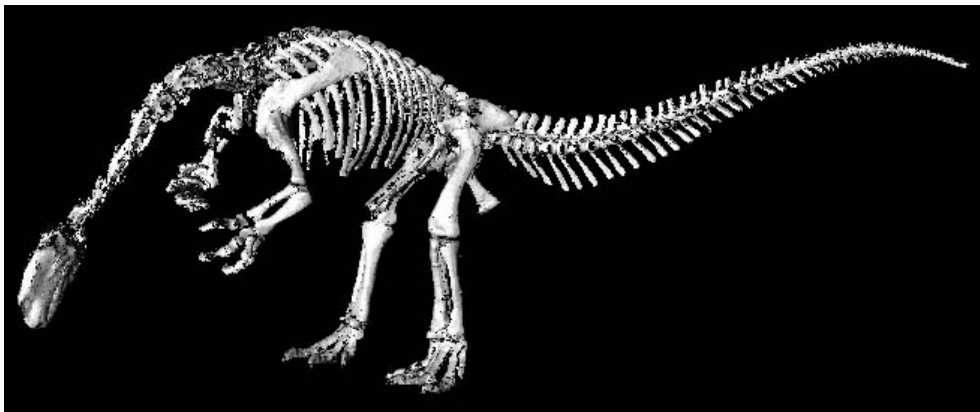


Abb. 4: Ergebnis der Auswertung der Laserscanneraufnahme - *Plateosaurus engelhardti*

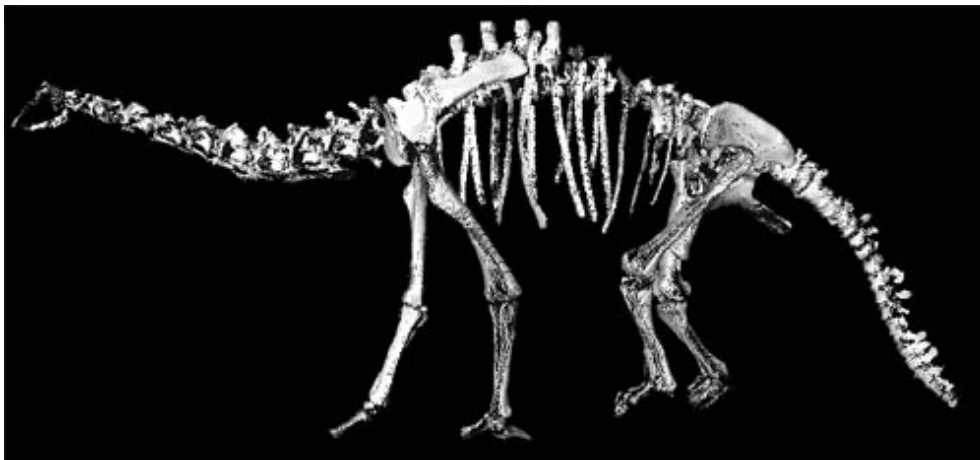


Abb. 5: Ergebnis der Auswertung der Laserscanneraufnahme - *Atlassaurus imelakei*

Im November 2004 wurde in Rabat (Marokko) das Skelett des *Atlassaurus imelakei* aufgenommen. Das Skelett hat eine Größe von 10,00 x 1,90 x 4,50 m³ und wurde mit Hilfe von 16 Standpunkten und 23 Passpunkten an 4 Tagen aufgenommen. Es wurden mehr als 1,1 Mio. Punkte gemessen. (Abb.5)

4 Modellierung

Die bisherigen Modellierungen basierten auf der Grundlage der stereophotogrammetrischen Rekonstruktion der Dinosaurierskelette. Diese Rekonstruktionen wurden ausgedruckt und dienten als maßstäbliche Vorlage für den Physiologen zur zeichnerischen Bestimmung der Außenhaut. Anschließend wurde diese so erstellte Rekonstruktion in geometrischen Primitiven wie Zylinder, Kegelstümpfe und sphärische Kappen zerlegt und sowohl die Oberfläche wie auch das Volumen bestimmt. Auf dieser Grundlage konnten weitere physiologische Daten abgeleitet werden. (GUNGA et.al. 1999)

4.1 CAD-gestützte Berechnung

Eine Weiterentwicklung dieser Vorgehensweise stellt die CAD-gestützte Modellierung der wahrscheinlichen Außenhaut der Dinosaurier dar. Grundlage sind die bereinigten Punktwolken der Dinosaurierskelette. Mit dem entsprechenden physiologischen Hintergrundwissen wird das Tier in Rotationskörper unterteilt (Abb.6). Somit erfolgt eine bessere Anpassung als in früheren Berechnungen. Aufgrund der rein digitalen Bestimmung können Änderungen mit relativ geringem Aufwand vorgenommen werden.

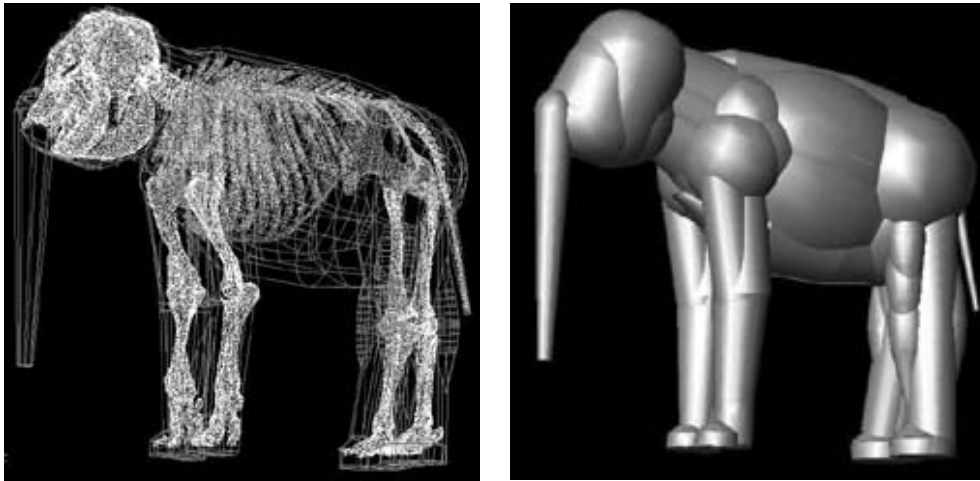


Abb. 6: Modellierung des Indischen Elefanten **links:** CAD-gestützte Bestimmung der Rotationskörper; **rechts:** Ergebnis der Modellierung

Zur Evaluierung der Volumenbestimmung wurden zwei Großsäuger (Nashorn, Indischer Elefant) ausgewählt, von denen das Lebendgewicht bekannt ist. Bei dem im Dresdener Tierkundemuseum gemessenen, präparierten Nashorn entfallen alle durch eine CAD-gestützte Modellierung verursachten Fehler, da nach der Scanneraufnahme sehr schnell das Volumen von 914 dm^3 der aufgenommenen Punktwolke (Abb.3 links) bestimmt werden konnte. Das Lebendgewicht des Nashorns beträgt 1050 kg . Daraus ergibt sich ein spezifisches Gewicht (Quotient aus Gewicht und Volumen) von $1,15 \text{ kg/dm}^3$.

Das im Zoologischen Museum Kopenhagen gemessene Skelett eines Indischen Elefanten (Abb.3 rechts) dient zur Evaluierung der Modellierung der Außenhaut. Das in Abb.5 darge-

stellte Modell hat ein Volumen von 622 dm³. Übernimmt man, das sich beim Nashorn ergebene spezifische Gewicht von 1,15 kg/dm³, so ergibt sich ein Körpergewicht von 715 kg. Das vom Kopenhagener Museum angegebene Lebendgewicht betrug hingegen 850 kg. Dies ist eine Abweichung von ca. 16 %. Dies liegt weitgehend in der Schwankungsbreite des Gewichtes von Säugetieren, beinhaltet jedoch auch die Restfehler der CAD-Modellierung.

4.2 Modellierung mittels Fourier Deskriptoren und moderner Image Warping Verfahren

Im Weiteren wird angestrebt, Restunsicherheiten bei der mathematischen Berechnung zu beseitigen. Dabei stellt die Verwendung von beliebigen Rotationskörpern eine Verbesserung gegenüber den einfachen geometrischen Primitiven dar. Eine weitere Verbesserung wäre die Nutzung beliebiger Außenkonturen. Der Umriss einer digitalisierten Form ist durch die Koordinaten (x_k, y_k) , $0 \leq k \leq N_U$ gegeben, wobei N_U der Anzahl der Pixel im Umriss gleicht. In der komplexen Koordinatenrepräsentation ist ein Umriss durch den Vektor

$$\tilde{U} = \begin{pmatrix} x_0 + \sqrt{-1}y_0 \\ \vdots \\ x_{N_U-1} + \sqrt{-1}y_{N_U-1} \end{pmatrix} \quad (1)$$

bzw.

$$\tilde{U}_k = x_k + \sqrt{-1}y_k, \quad 0 \leq k \leq N_U \quad (2)$$

gegeben. Der Fourier Deskriptor \tilde{F}_μ eines Umrisses \tilde{U}_n ist durch

$$\tilde{F}_\mu = \sum_{k=0}^{N_U-1} \tilde{U}_k \exp\left(-\frac{2\pi\sqrt{-1}}{N_U} k\mu\right), \quad 0 \leq \mu \leq N_U \quad (3)$$

gegeben. \tilde{F} entspricht der Fourier Transformierten von \tilde{U} . Somit ist es jetzt möglich den Dinosaurier mit modellierter Außenhaut in definierten Abständen in *Scheiben* zu schneiden (Abb. 7). Diese *Scheiben* müssen keine Kreise oder Ellipsen sein. Die beliebige Form der Kontur dieser *Scheiben* wird mit Fourier Deskriptoren beschrieben. Die Verbindung der *Scheiben* zum Gesamtobjekt kann anschließend mittels morphologischer Operatoren erfolgen. Eine Volumenberechnung ist möglich.

Erste Tests versprechen gute Resultate. Zurzeit werden diese Ideen in einer Software umgesetzt. Dabei soll ein Visualisierungstool entstehen, welches dem Physiologen erlaubt relativ komfortabel die Außenhaut zu modellieren. Abgesehen vom Einsatz der Fourier Deskriptoren können weiterführend moderne Image Warping Verfahren eingesetzt werden, um lokale Strukturen außerhalb der manuell gezeichneten Umrisse zu erfassen. Ein weiteres Ziel ist

es, automatisch die optimalen Abstände zwischen den von Hand zu verarbeitenden *Scheiben* zu berechnen. Es soll also ein intelligentes Verfahren entwickelt werden, in dem die Anzahl der benötigten Scheiben minimiert wird, ohne dabei die Qualität der berechneten Außenhaut zu beeinträchtigen.

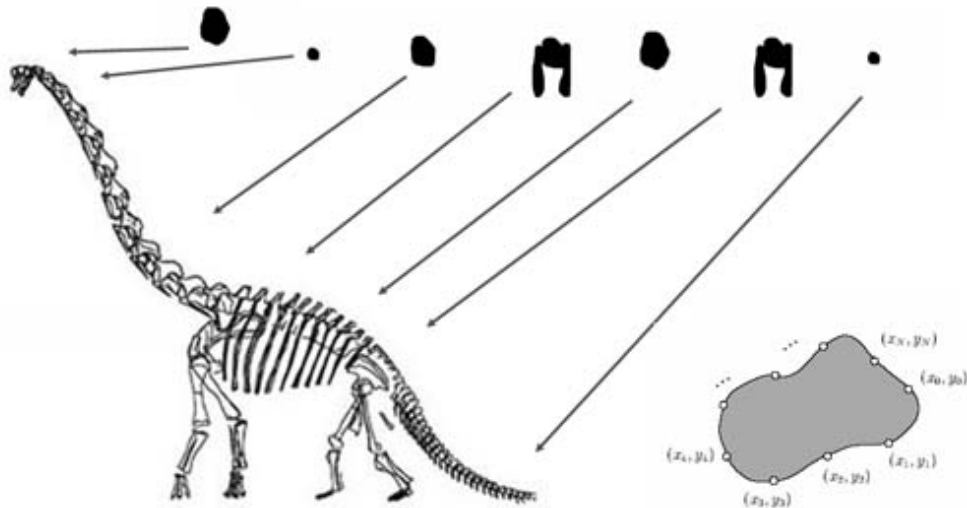


Abb. 7: Zerlegung der Außenhaut des Dinosauriers in *Scheiben*, welche durch Fourier Deskriptoren beschrieben werden (Schematische Darstellung)

5 Danksagung

Die Arbeiten werden durch die Deutsche Forschungsgemeinschaft gefördert. Wir danken den Mitglieder der gesamten Forschergruppe, besonders Martin Sander und Oliver Rauhut für die Hilfe bei der Auswahl und Organisation unserer Reisen. Allen Mitarbeitern der Einrichtungen vor Ort danken wir für die herzliche Aufnahme, Geduld und Betreuung. Stellvertretend hierfür danken wir Herrn Heinrich vom Naturkundemuseum Berlin, Frau Stefen vom Tierkundemuseum Dresden, Heiner Mallison von der Universität Tübingen, Mogens Andersen und Per Christiansen vom Zoologischen Museum in Kopenhagen und Frau Aquesbi und Herrn Rochdy vom Energieministerium in Rabat.

Weitere Informationen und Animationen finden Sie auf unseren WEB-Seiten: <http://www.cv.tu-berlin.de/> bzw. direkt unter: <http://www.cv.tu-berlin.de/forschung/sonder/arbeit/dino/dino.phtml> .

6 Literatur

- Böhler (2003): Böhler, W., Bordas Vicent, M., Marbs, A. *Investigating Laser Scanner Accuracy* - The International Archives of Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences, Vol. XXXIV, Part 5/C15, pp. 696-701 - Antalya - 2003
- Gunga (1999): Gunga, H.Chr., Kirsch, K.A., Rittweger, J., Clarke, A., Albertz, J., Wiedemann, A., Mokry, S., Suthau, T., Wehr, A., Heinrich, W.D. & Schulze H.-P. *Body size and body volume distribution in two sauropods from the Upper Jurassic of Tendaguru / Tanzania / East Africa*. Mitteilungen des Museums für Naturkunde Berlin, Geowissenschaftliche Reihe 2, Berlin, 1999, pp. 91-102.
- Wiedemann (1999): Wiedemann, A., Suthau, T., Albertz, J. *Photogrammetric Survey of Dinosaur Skeletons*. Mitteilungen des Museums für Naturkunde Berlin, Geowissenschaftliche Reihe 2, Berlin, 1999, pp. 113-119.
- Wiedemann & Wehr (1998): Wiedemann, A., Wehr A. *Vermessung von Dinosaurierskeletten mit Stereophotogrammetrie und Laserscanner*. In Franz K List (Hrsg.) *Photogrammetrie im Wandel, Lehre - Forschung - Anwendung*. Proceedings der DGPF-Jahrestagung 1997 in Frankfurt / Main, Deutsche Gesellschaft für Photogrammetrie, Band 6, Berlin, 1998, S. 301-308.