

Bild-basierte 3D-Rekonstruktion texturarmer Kleinwiederkäuerknochen – erste Leistungsuntersuchungen

DARIA HOLLENSTEIN¹ & STEPHAN NEBIKER¹

Zusammenfassung: Im Rahmen eines interdisziplinären Forschungsprojekts sollen feldtaugliche Verfahren zur automatischen Klassifizierung von archäologischen Knochenfunden entwickelt werden. In einem ersten Schritt werden kostengünstige Lösungsansätze zur bildbasierten Erfassung und 3D-Rekonstruktion ausgewählter Skelettelemente untersucht. Im Zentrum dieses Beitrags steht die 3D-Rekonstruktion von Skelettelementen kleiner Wiederkäuer. Diese Objekte stellen aufgrund ihrer zum Teil geringen Größe und mangelnder Textur besondere Anforderungen. Für die Untersuchungen wurden Studienobjekte mit einer handelsüblichen DSLR-Kamera erfasst und mittels Structure-from-Motion-Ansätzen bildbasiert rekonstruiert. Dabei wurden die Resultate unterschiedlicher Aufnahmekonfigurationen mit Referenzmodellen aus Daten eines Streifenlichtscanners verglichen. Die bildbasierten 3D-Modelle erfüllen mit Abweichungen, die sich weitestgehend im Submillimeter-Bereich bewegen, grundsätzlich die Genauigkeitsanforderungen, um für morphologische Analysen und als Referenz für die Artenbestimmung herangezogen zu werden. Die verwendete Basis-Aufnahmekonfiguration kann durch kontrastverstärkende Maßnahmen und das Aufnehmen zusätzlicher Bilder pro Drehtellerumdrehung im Hinblick auf die resultierende Objektgenauigkeit optimiert werden.

1 Einleitung

Die morphologische Artenbestimmung archäologischer Tierknochenfunden erfordert herkömmlicherweise einen ausreichenden Bestand an modernen Referenzskeletten aus einer anatomischen Vergleichssammlung. Nicht immer stehen in der Praxis entsprechende Vergleichsskelette zur Verfügung: Zum Teil decken die zugänglichen Sammlungen nicht das benötigte Artenspektrum oder eine ausreichende Varietät innerhalb der gefragten Spezies ab, oder die Artenbestimmung muss im Feld erfolgen, ohne dass eine Vergleichssammlung konsultiert werden kann.

Mit dem Aufkommen hochauflösender Verfahren für die 3D-Digitalisierung und der Entwicklung entsprechender Verarbeitungs- und Analysesoftware, besteht die Möglichkeit 3D-Daten von Skelettelementen oder ganzen Skeletten aus Vergleichssammlungen ortsunabhängig verfügbar zu machen. Das Potential neuer Digitalisierungstechnologien für die Bereitstellung von 3D-Modellen von Vergleichssammlungsstücken für die Archäozoologie wurde bisher erst in Einzelprojekten genutzt. Vor allem mit Hilfe von vergleichsweise teuren Scannern wurden wichtige Einzelobjekte (MARSHALL UNIVERSITY 2005) oder Sammlungen vollständiger Skelette (DIGIMORPH STAFF 2002; INSTITUTE OF BIOTECHNOLOGY, UNIVERSITY OF HELSINKI 2003; NIVEN et al. 2009) in 3D digitalisiert und virtuell bereitgestellt. So sind zum Teil umfassende Kataloge vollständiger Einzelskelette für bestimmte Artenspektren in hoher Qualität entstanden (BETTS et al. 2011; COLLEGE OF THE HOLY CROSS et al. 2011). Für die archäozoologische Bestimmungspraxis werden aber ganze Reihen einzelner Skelettelemente einer bestimmten

¹ Fachhochschule Nordwestschweiz FHNW, Institut Vermessung und Geoinformation IVGI, Gründenstrasse 40, CH-4132 Muttenz, E-Mail: [daria.hollenstein, stephan.nebiker]@fhnw.ch

Spezies benötigt. Von einer flächendeckenden Digitalisierung vorhandener Vergleichsbestände, was letztlich eine ortsunabhängige Artenbestimmung erlauben würde, kann noch nicht die Rede sein. Mit ein Grund dafür ist möglicherweise, dass die bisher angewandten Digitalisierungsverfahren meist auf teuren Sensortechnologien beruhen, deren Anwendung Expertenwissen voraussetzt.

Im Rahmen eines interdisziplinären Forschungsprojekts sollen feldtaugliche Verfahren zur automatischen Klassifizierung von archäologischen Knochenfunden entwickelt werden. In einem ersten Schritt werden kostengünstige, bildbasierte Lösungsansätze für die 3D-Rekonstruktion ausgewählter Skelettelemente untersucht. Da für das Vorhaben eine größere Reihe moderner Tierknochen digitalisiert werden soll, ist ein Verfahren nötig, das bei hoher Aufnahmeeffizienz 3D-Modelle in zweckdienlicher Auflösung und Genauigkeit liefert.

Bildbasierte Verfahren, wie die 3D-Rekonstruktion mit Structure-from-Motion (SfM)-Ansätzen, erfüllen diese Anforderungen grundsätzlich (KERSTEN & LINDSTAEDT 2012; KOUTSOUDIS et al. 2013; OMELANOWSKY et al. 2013; LERMA & MUIR 2013; REMONDINO et al. 2014; KOUTSOUDIS et al. 2015) und sind zusammen mit einem Drehteller gut geeignet für die Digitalisierung kleiner, leichter Objekte. Allerdings stellt die 3D-Rekonstruktion moderner Skelettelemente aus anatomischen Vergleichssammlungen besondere Herausforderungen (vgl. KOUTSOUDIS et al. 2015): die Oberfläche moderner Vergleichsskelette ist meist hell und texturarm. Bei SfM-gestützten Verfahren basiert die Rekonstruktion der Kameraorientierung auf der Erkennung homologer Bildpunkte für die Verknüpfung der Bilder. Dazu sind Erkennungsmerkmale auf der Objekt Oberfläche unabdinglich. Die Güte und Zahl der gefundenen Bildverknüpfungspunkte hat einen positiven Einfluss auf den Erfolg der Bildorientierung und auf die Genauigkeit der Objektrekonstruktion (KOUTSOUDIS et al. 2015). Für die SfM-basierte Objektrekonstruktion wäre also eine texturreiche Oberfläche mit starken Kontrasten ideal. Die Anwendung von Verfahren, welche direkt auf die Oberfläche einwirken um dem Problem mangelnder Texturierung zu begegnen, ist jedoch bei der Digitalisierung von Objekten aus anatomischen Vergleichssammlungen aus kuratorischen Gründen nicht zulässig.

Im Folgenden werden die Resultate einer Vorstudie präsentiert, in welcher die Tauglichkeit des SfM-Ansatzes für die bildbasierte 3D-Rekonstruktion moderner Kleinwiederkäuerknochen (Größe z.T. < 40 mm) untersucht wurde. Damit die resultierenden 3D-Modelle den Zwecken morphologischer Analysen und als Referenz für die Artenbestimmung genügen, müssen sie sowohl hinsichtlich der Auflösung wie auch hinsichtlich der Genauigkeit Qualitätsansprüche im Submillimeterbereich erfüllen. Um diese Anforderungen zu erfüllen, wurde daher abhängig von der Objektgröße mit unterschiedlichen Abbildungsmaßstäben gearbeitet. Neben den grundsätzlichen Tauglichkeitstests wurden verschiedene Parameter der Aufnahmekonfiguration und ihr Einfluss auf die Aufnahmeeffizienz und die resultierende Objektgenauigkeit untersucht: Dazu wurde eine Basis-Aufnahmekonfiguration hinsichtlich gewählter Hintergrundgestaltung und Lichtquelle, Anzahl aufgenommener Bilder und Abbildungsmaßstab variiert. Die resultierenden 3D-Rekonstruktionen wurden mit Referenzmodellen aus Streifenlichtscanning-Daten verglichen. Eingangs werden die Untersuchungsgegenstände, die Sensoraufstellung und die Bildverarbeitung für die 3D-Rekonstruktion dargelegt. Es folgt eine Beschreibung der Basis-Aufnahmekonfiguration und ihrer Variationen für die experimentelle Datenaufnahme. Schließlich werden die

Resultate mit dem Referenzmodell aus Streifenlichtscanning-Daten verglichen und die gewonnenen Erkenntnisse für eine optimierte Aufnahmekonfiguration diskutiert.

2 Ausgangslage

2.1 Verwendete Studienobjekte

Für die Studie wurden zwei Skelettelemente unterschiedlicher Größenordnung herangezogen (Abb. 1). Das größere Objekt ist ein Humerus (150.8 mm Länge) der Ziege, das kleinere ist ein Zehenknochen – Phalang I – (40.0 mm Länge) vom Schaf. Beide Objekte verfügen über eine helle Oberfläche mit geringfügiger Texturierung. Vom morphologische Standpunkt her sind nicht nur die Gesamtgeometrie des Objektes sowie die Form von Gelenkrollen und Fortsätzen interessant, sondern auch Merkmale wie das Vorhandensein und die Position kleiner Foramina (Öffnungen für Blutgefäße), deren Grösse am Ziegen-Humerus ca. 2 mm beträgt, oder der Verlauf feiner Knochenkämme.

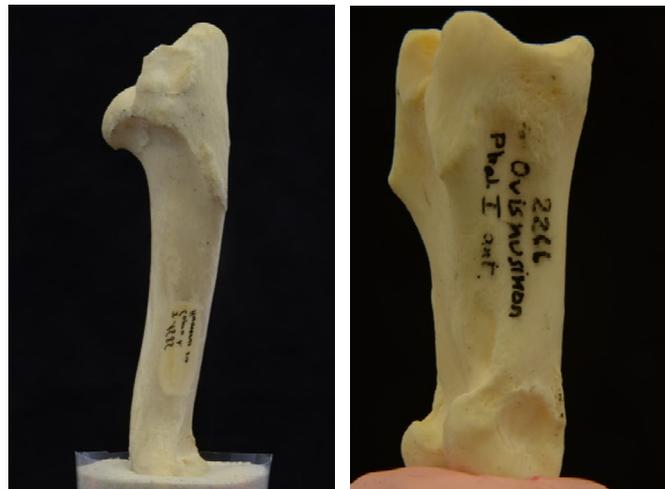


Abb. 1: Studienobjekte – Humerus (max. Länge 151.0 mm) (links), Phalang I (max. Länge 40.0 mm) (rechts)

2.2 Grundlegende Merkmale der Sensoraufstellung

Für die Aufnahme der Bilder wurde eine handelsübliche DSLR-Kamera, vom Typ Nikon D7000 (16.2 Megapixel, 23.6 mm × 15.6 mm Sensorgröße) mit einem Nikkor AF-S 18-105 mm Zoom-Objektiv in Kombination mit dem Seitz Roundshot VR Drive als automatischer Drehteller verwendet (Abb. 2 links). Das Skelettelement wurde mittels Plastilin oder kleinem Sandkasten vertikal auf dem Drehteller positioniert. Die Drehtelleroberfläche wurde mit einer gemusterten Auflage bedeckt. Das Muster dient einerseits als Maßstab für die Skalierung der 3D-Modelle und andererseits liefert es zusätzliche Merkmale für die Verknüpfung von Bildpaaren. Für die Vollerfassung des Objekts sind mindestens zwei Einstellungen, respektive Bildreihen, nötig: Einmal wird das Skelettelement mit dem proximalen Gelenkende nach oben auf dem Drehteller positioniert und einmal mit dem distalen Gelenkende (Abb. 2 Mitte & rechts).

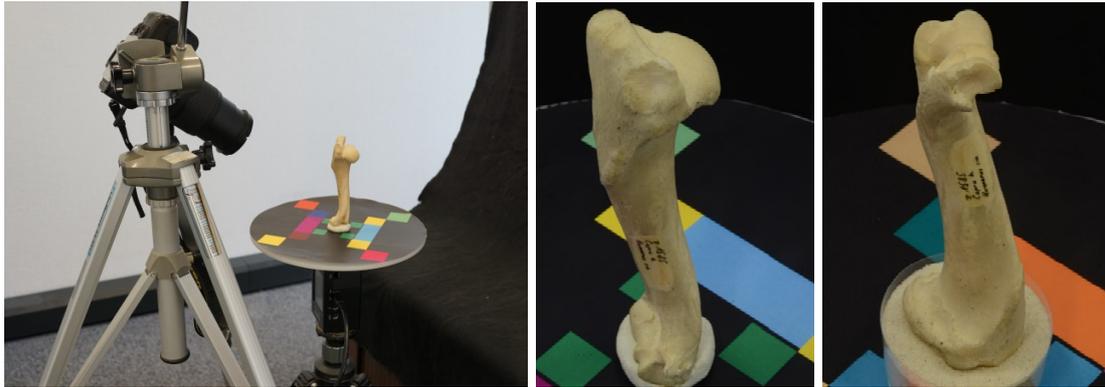


Abb. 2: Sensoraufstellung (links), Skelettelementpositionierung mit dem proximalen Gelenk nach oben (Mitte) und mit dem distalen Gelenk nach oben (rechts).

In Anlehnung an die Resultate anderer Studien (KOUTSOUDIS et al. 2013; REMONDINO et al. 2012) wurde auf eine vorgängige Kalibrierung der Kamera verzichtet. Die Kameraparameter wurden über die Selbstkalibrierung mit der verwendeten Software bestimmt. Dies auch weil die Kalibrierung der Kamerakonstanten bei der Digitalisierung einer grösseren Reihe von Tierknochen nicht praktikabel wäre. Die Kamerakonstante müsste für jedes Objekt der Messreihe separat kalibriert werden, da aufgrund der geringen Tiefenschärfe in diesem Distanz- und Abbildungsmaßstabsbereich für jedes Objekt neu fokussiert werden muss, damit das gesamte Objekt scharf abgebildet wird.

Auf eine rigorose Kontrolle der Lichtverhältnisse wurde beim Experiment ebenfalls verzichtet, da in der Praxis eine Kontrolle nicht möglich sein wird und mit einer Mischung aus Natur- und Kunstlicht – konkret Deckenbeleuchtung – gearbeitet werden muss. Das Resultat sind leichte Belichtungsunterschiede zwischen den einzelnen Bildern. Wo im folgenden Kapitel 3D-Modelle direkt miteinander verglichen werden, wurden die Bilder für die Rekonstruktionen in direkter Folge und mit derselben Belichtungszeit aufgenommen, sofern nicht explizit anders vermerkt. Die Aufnahmeverhältnisse sind somit vergleichbar.

2.3 Datenprozessierung

Die Bilddaten wurden mit der SfM-Software Agisoft Photoscan Version 1.6.0 zu 3D-Oberflächenmodellen verarbeitet. Bei allen Rekonstruktionen wurde demselben Verarbeitungsprozess gefolgt (Ausnahme Modell D, vgl. 3.2.4) und die Einstellung der Programm-Parameter wurde für alle Modelle beibehalten:

Zuerst wurden jeweils alle Bilder zusammen orientiert, welche für die Rekonstruktion eines Knochenmodells herangezogen wurden. Das so berechnete Modell wurde anhand des Maßstabs auf der Drehtellerauflage skaliert. Anschließend wurden dichte Punktwolken für jede einzelne Bildreihe generiert und manuell bereinigt. Dann wurden die dichten Punktwolken der einzelnen Bildreihen miteinander vereinigt. Aus der vereinigten Punktwolke wurde das 3D-Oberflächenmodell abgeleitet. In Geomagic Qualify Version 12 wurden Ausreißer bereinigt.

2.4 3D-Modellevaluation mittels Referenzmodellen

Für die Evaluierung der resultierenden 3D-Netze wurden Referenzmodelle des Humerus und des Phalangen mit einem hochauflösenden GOM ATOS I Streifenlichtscanner (spez. Genauigkeit <

50 µm) angefertigt. Die Referenzmodelle werden in der vorliegenden Studie als fehlerfreie Werte angenommen. Die Registrierung der bildbasierten 3D-Rekonstruktionen mit den Referenzmodellen erfolgte in 3D Reshaper 2015 MR1 und CloudCompare Version 2.6.2 in zwei Schritten: Einer groben Ausrichtung anhand dreier manuell gesetzter Punkte folgte eine bestgeeignete Registrierung mittels Methode der kleinsten Quadrate. Danach erfolgte in derselben Software der Oberflächenvergleich zwischen bildbasierter Rekonstruktion und Referenzmodell, das heißt die Berechnung von Distanzkarten.

3 Datenaufnahme

3.1 Basis-Aufnahmekonfiguration

In der Basis-Aufnahmekonfiguration (Abb. 2 links, Tabelle 1: Modelle A1, B1, C1) betrug der Winkel der Kamerakonstanten auf die Drehtelleroberfläche ca. -45° . Für die Aufnahmen des Humerus betrug der geringste Abstand zwischen Kameraobjektiv und Skelettelement ca. 300 mm. Bei diesem Abstand und einer Brennweite von 105 mm wird der Humerus längs des Sensors in etwa bildfüllend aufgenommen. In dieser Konfiguration wurden jeweils zwei Vollumdrehungen des Drehtellers mit je 36 Bildern im Abstand von 10° aufgenommen: eine Umdrehung für die Objektpositionierung mit dem proximalen Gelenkende nach oben und eine mit dem distalen Gelenkende nach oben. Position und Fokus der Kamera wurden zwischen diesen beiden Einstellungen unverändert gelassen. Aus dieser Aufstellung ergibt sich eine Vollerfassung des Objekts. Als Hintergrundfarbe wurde schwarz gewählt.

Ausgehend von der Basis-Aufnahmekonfiguration wurden in den Experimenten A-D jeweils Parameter variiert (Tabelle 1), um zu untersuchen, ob damit einerseits eine Verbesserung der Modellgenauigkeit oder eine höhere Aufnahmeeffizienz bei vergleichbarer Modellqualität erzielt werden kann. Wo im Kapitel 4 Resultate unterschiedlicher Aufnahmekonfigurationen miteinander verglichen werden, sind jeweils ein gleichbleibender Abstand zum Objekt und dieselbe Brennweite ohne Neufokussierung zwischen diesen Konfigurationen gegeben.

3.2 Variationen der Basis-Aufnahmekonfiguration

3.2.1 Hintergrundfarbe

In Experiment A wurde die Verwendung unterschiedlicher Hintergrundfarben getestet. Ziel der Untersuchung war das Finden einer Balance zwischen Kontrastverstärkung und Minimierung der Belichtungsdauer. Für das Gelingen der Bildorientierung mittels SfM-Verfahren ist der Hintergrund idealerweise kontrastlos und unterscheidet sich im Grauwert deutlich vom Objekt und den Farben des Maßstabmusters. Gleichzeitig sollte die Grauwertvarianz innerhalb des Objektbereichs möglichst groß sein. Diese Faktoren begünstigen den Erfolg des Matching-Algorithmus beim Identifizieren homologer Punkten auf dem Objekt in den verschiedenen Bildern. Ein dunkler Hintergrund (schwarz oder dunkelgrün) entspricht im vorliegenden Fall am ehesten diesen Anforderungen. Andererseits gilt, je dunkler der Hintergrund, desto länger die Belichtungszeit. Neben der Basis-Aufnahmekonfiguration mit schwarzem Hintergrund (Modell A1) wurde die Verwendung von Rot (Modell A2) und Hellgrün (Modell A3) getestet. Die Belichtungszeit lässt sich bei Verwendung von Rot oder Hellgrün um eine, respektive zwei

Belichtungsstufen reduzieren im Vergleich zu Schwarz. Je nach Lichtverhältnissen bedeutet das eine Einsparung von über einer halben Minute pro Vollumdrehung auf dem Drehteller.

Tab. 1: Experimente A1-D mit den entsprechenden Parametern (N/K: Natur- und Kunstlicht; N: Naturlicht)

Modell	Objekt	Einstellung	Brennweite [mm]	Distanz [mm]	Base-to-height ratio	Konvergenzwinkel	Pixelgröße im Objektraum [mm]	Bilder/Reihe	Hintergrundfarbe	Beleuchtung	Belichtungszeit
A1	Humerus	-45°	105	300	0.175	10.0°	0.014	36	schwarz	N/K	1.3
A2	Humerus	-45°	105	300	0.175	10.0°	0.014	36	rot	N/K	1.6
A3	Humerus	-45°	105	300	0.175	10.0°	0.014	36	hellgrün	N/K	2
B1	Humerus	-45°	105	320	0.175	10.0°	0.015	36	schwarz	N/K	1.3"
B2	Humerus	-45°	105	320	0.175	10.0°	0.015	36	schwarz	N	3"
C1	Humerus	-45°	105	320	0.175	10.0°	0.015	36	schwarz	N/K	1.3"
C2	Humerus	-45°	105	320	0.116	6.7°	0.015	54	schwarz	N/K	1.3"
C3	Humerus	-45°	105	320	0.088	5.0°	0.015	72	schwarz	N/K	1.3"
D	Phalang I	-45°/0°	173	100/130	0.116	6.7	0.003/ 0.004	54	schwarz	N/K	1"

3.2.2 Beleuchtung

In Experiment B wurde die Lichtquellenkombination aus Natur- und Kunstlicht (Modell B1) in der Basis-Aufnahmekonfiguration mit Naturlicht als einzige Belichtungsquelle (Modell B2) verglichen. Der Vorteil des reinen Naturlichts sind stärkere Kontraste auf der Objekt Oberfläche. Mit eingeschaltetem Deckenlicht hingegen verringern sich die Belichtungsunterschiede zwischen den einzelnen Bildern und die Belichtungszeit verkürzt sich.

3.2.3 Anzahl Bilder

Für Experiment C wurde die Anzahl Bilder pro Modellrekonstruktion variiert. Gegenüber der Grundeinstellung von 36 Bildern (Modell C1) wurde die Anzahl auf 54 (Modell C2) und 72 Bilder (Modell C3) erhöht. Eine größere Anzahl Bilder resultiert in breiteren Überlappungsbereichen zwischen den Bildern. Das Basis-Höhen-Verhältnis ändert sich von 0.175 bei 36 Bildern zu 0.116 bei 54 respektive 0.088 bei 72 Bildern (Tabelle 1). Bei kleinerem Basis-Höhen-Verhältnis können potentiell mehr oder bessere Verknüpfungspunkte für die Orientierung der Bilder gefunden werden. Andererseits verschlechtert sich dadurch die aus der Kameraaufstellung resultierende Strahlenschnittgeometrie und der Aufwand für die Prozessierung steigt erheblich.

3.2.4 Geringe Objektgröße (Phalang I)

Kleinere Skelettelemente, wie der erste Phalang (40 mm Länge) (Modell D), können mit der beschriebenen Basis-Aufnahmekonfiguration nicht befriedigend rekonstruiert werden, da sie an der Naheinstellgrenze des Objektivs in keiner Richtung des Sensors auch nur annähernd bildfüllend sind. Um den Abbildungsmaßstab mit einfachen Mitteln zu vergrößern, wurden dem

Nikkor AF-S 18-105 mm Zoom-Objektiv bei einer Brennweite von 105 mm Makrozwi-
sche-
ringe von einer Gesamtlänge von 68 mm vorgelagert. Damit kann der Phalang in der Ansicht in
Längsrichtung des Sensors bildfüllend aufgenommen werden. Die kürzeste Distanz zwischen
Objektiv und Skelettelement in dieser Aufstellung beträgt 100 mm in der -45° -Winkel-
Draufsicht und 130 mm in der Horizontalansicht. Neben den beiden Einstellungen der Basis-
Aufnahmekonfiguration, mit denen aufgrund der begrenzten Tiefenschärfe nicht mehr das ganze
Objekt, sondern nur noch das proximale, respektive das distale Gelenkende aufgenommen
werden können, wurden zusätzlich Bilder aus einer horizontalen Einstellung auf das Objekt für
die 3D-Rekonstruktion verwendet. In allen drei Einstellungen wurden 54 Bilder pro
Vollumdrehung des Drehtellers aufgenommen. Für Modell D konnte nachdem die Bilder
sämtlicher Reihen miteinander orientiert waren direkt die dichte Punktwolke über alle Bilder
gerechnet werden, da die Fixierung des Objekts (Plastilin) nicht in den Bildausschnitten der -45° -
Einstellungen enthalten ist.

4 Resultate

Die Resultate aus den Experimenten A-D werden in Tabelle 2 präsentiert. Einige Feststellungen
können über die einzelnen Experimente hinaus für alle rekonstruierten 3D-Modelle gemacht
werden: Grundsätzlich erfüllen alle 3D-Modelle weitestgehend die formulierten Genauigkeits-
anforderungen im Submillimeter-Bereich (Tabelle 2): Der mittlere Bildmessfehler (mean
reprojection error) beträgt je nach Modell und Bild zwischen 0.9 und 1.4 Pixel beim Humerus
und zwischen 1.7 und 2.6 Pixeln beim Phalangen. Die grössten Abweichungen zum
Referenzobjekt betragen je nach Modell zwischen 1.0 und 1.6 mm. Die Standardabweichung (σ)
zur mittleren Abweichung vom Referenzobjekt beträgt maximal 0.16 mm. Bildbasierte
Verfahren sind also durchaus geeignet für die 3D-Rekonstruktion texturarmer
Kleinwiederkäuerknochen. Auch ohne anspruchsvolle Requisiten (vgl. KOUTSOUDIS et al. 2015)
ist für geringfügig texturierte Tierknochen mit einer Aufstellung, wie sie als Basis-
Aufnahmekonfiguration in Kapitel 3.1 beschrieben wurde, eine hohe Genauigkeit erzielbar.
Modell A1 z.B. weicht über 96.8% der Punkte bzw. der Oberfläche um maximal ± 0.3 mm vom
Referenzmodell ab (Abb. 3, links). Abweichungen von mehr als ± 0.1 mm zum Referenzobjekt
treten bei allen Modellen in erster Linie im Bereich der Gelenkenden auf (vgl. Abb. 3, links) und
zwar dort, wo das Modell auf den Bilddaten lediglich einer Einstellung basiert, weil der
entsprechende Bereich nur durch eine Bildreihe abgedeckt ist. Die grössten Abweichungen
gegenüber dem Referenzmodell treten in konkaven Bereichen der Skelettelementoberfläche auf.
Werden die Modelle im Hinblick auf die formulierten morphologischen Anforderungen einer
visuellen Prüfung unterzogen ist festzustellen, dass gerade die genannten Abweichungen in
konkaven Bereichen der Knochenoberfläche mitunter problematische Auswirkungen haben: Die
Foramina z.B. sind auch bei Modellen mit geringen Abweichungen gegenüber dem Referenz-
modell nur undeutlich zu erkennen (Abb. 3, rechts).

Auch wenn Vergleiche zwischen Modellen aus unterschiedlichen Experimenten aufgrund der
schlecht kontrollierbaren Rahmenbedingungen schwierig sind, zeichnet sich ein Zusammenhang
zwischen der Pixelgrösse im Objektraum (Tabelle 1) und der Modellgenauigkeit (Tabelle 2) ab
(vgl. A1 und D mit B1 und C1).

Ferner ist die Genauigkeit der Orientierung der verschiedenen Bildreihen zueinander entscheidend. Aber mit der verwendeten Software ist bzgl. der vorgestellten Experimente nur bedingt eruierbar, was eine exakte Orientierung der Bildreihen zueinander ausmacht.

Tab. 2: Kenngrößen der Oberflächenmodelle aus Experimenten A-D

Modell	Mittlerer Bildmessfehler der Bildorientierung [mm]	Mittlere Abweichung zum Referenzmodell [mm]	σ zur mittleren Abweichung zum Referenzmodell [mm]	größte Abweichungen zum Referenzmodell [mm]	Modelloberfläche mit Abweichung zum Referenzmodell \leq 0.1mm [%]	Modelloberfläche mit Abweichung zum Referenzmodell \leq 0.3mm [%]	Modelloberfläche mit Abweichung zum Referenzmodell \leq 1mm [%]
A1	1.1	0.018	0.098	1.10/-0.93	74.3	96.8	100.0
A2	1.0-1.3	-0.067	0.117	1.08/-0.97	58.8	94.4	100.0
A3	1.0-1.2	0.085	0.160	1.26/-1.58	53.4	84.6	99.9
B1	0.9-1.1	0.054	0.134	1.48/-1.15	61.9	91.7	99.9
B2	0.9-1.2	-0.047	0.080	1.28/-0.48	71.8	98.7	100.0
C1	0.9-1.1	0.073	0.157	1.63/-1.29	57.5	85.1	99.8
C2	1.1-1.3	0.027	0.102	1.50/-1.01	74.1	96.4	100.0
C3	1.1-1.4	-0.049	0.103	1.27/0.53	68.1	96.4	99.9
D	1.7-2.5	0.082	0.070	0.62/-0.22	68.3	99.4	100.0

4.1 Hintergrundfarben (A1-A3)

Experiment A (Tabelle 2) zeigt, dass mit deutlichen Qualitätseinbußen zu rechnen ist, wenn zugunsten verkürzter Belichtungszeiten, eine hellere Hintergrundfarbe, wie Rot oder Grün, gewählt wird. Die auf den Gesamtrekonstruktionsprozess gesehen relativ geringe Zeiteinsparung scheint aufgrund dieses Experimentes nicht lohnenswert.

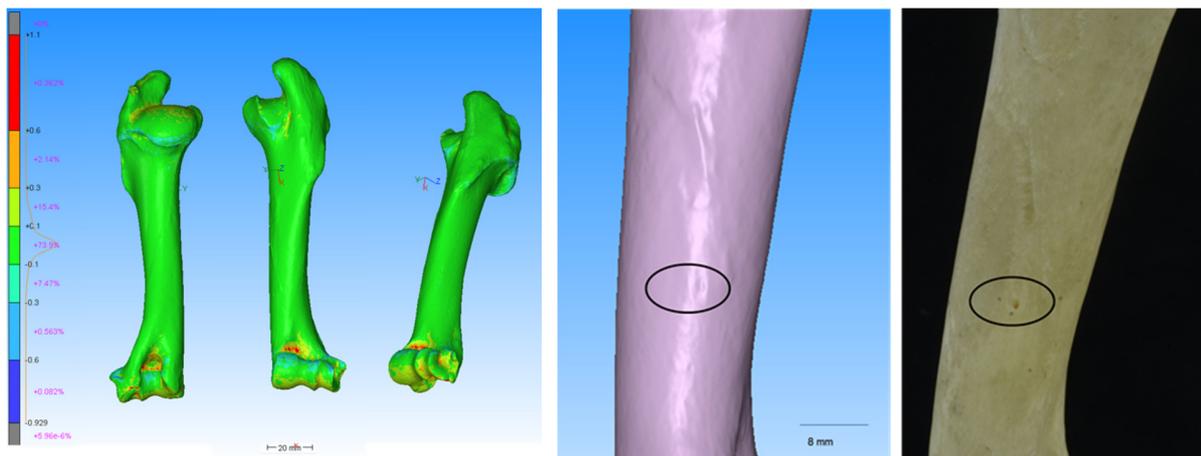


Abb. 3: Model A1 gefärbt nach Distanzen zum Referenzmodell in mm (links), Sichtbarkeit des Foramen am Humerusschaft auf Model A1 und im Bild des Untersuchungsgegenstandes (rechts)

4.2 Beleuchtung

Die ausschließliche Verwendung von Naturlicht als Beleuchtungsquelle (Modell B2), also die Kontrastverstärkung auf der Objektoberfläche mittels Ausschalten des Deckenlichts, ergibt im direkten Vergleich mit der Basis-Aufnahmekonfiguration (Modell B1) eine Verbesserung der Modellgenauigkeit. Dieser Befund ist abhängig von den natürlichen Lichtverhältnissen im Moment der Aufnahme. Zum Zeitpunkt der Aufnahmen für dieses Experiment war durch Ausschalten des Deckenlichts eine deutliche Kontrastverstärkung auf dem Objekt erkennbar (Abb. 5). Dies ist nicht bei allen Witterungsverhältnissen und Tageszeiten der Fall. Für diesen Befund ist insofern eine bedingte Reproduzierbarkeit zu erwarten. Experimente A1 und D1 (Tabelle 2) machen zudem deutlich, dass das Ausschalten des Deckenlichts keine Voraussetzung für eine hohe Modellgenauigkeit ist. Sehr gute Ergebnisse sind auch mit eingeschaltetem Deckenlicht möglich.

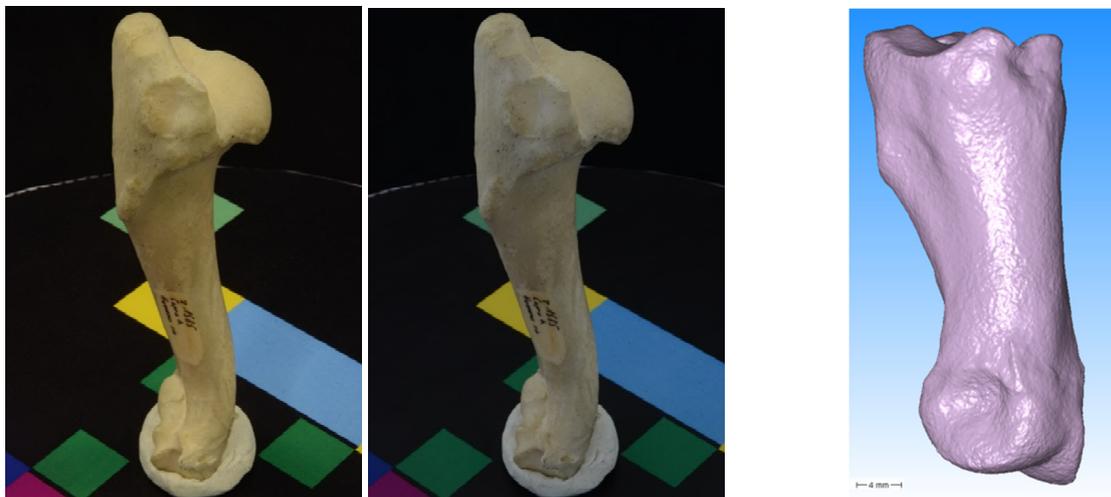


Abb. 4: Aufnahme des Studienobjekts bei Kunstlicht- (links) und Naturlicht-Verhältnissen (Mitte); Oberflächenmodell D (rechts)

4.3 Anzahl Bilder

Mit 54 Bildern pro Einstellung (C2) ergab sich in Experiment C (Tabelle 2) eine deutliche Verbesserung gegenüber der Verwendung von 36 Bildern (C1). Wenn statt der 54 Bilder, 72 Bilder verwendet werden, verbessert sich die Genauigkeit nur noch geringfügig. Neben dem fehlenden Vorteil hinsichtlich Genauigkeitszuwachs steigt die Verarbeitungsdauer für die Modellrekonstruktion bei 72 Bildern erheblich: Sie beträgt deutlich mehr als das Doppelte der Rekonstruktion aus 36 Bildern.

4.4 Geringe Objektgröße

Der Phalang (Modell D) konnte unter Verwendung von Makro-Zwischenringen mit einer vergleichsweise hohen Genauigkeit (Tabelle 2) (mittlere Abweichung = 0.08 mm, $\sigma = \pm 0.07$ mm) zum Referenzmodell rekonstruiert werden. Die errechnete Punktwolke, respektive das abgeleitete Modell, weisen aber Rauschen auf (Abb. 4, rechts). Die Verwendung von 72 Bildern pro Reihe, sowie die Verwendung einer Drehtellerauflage, die im Zentrum mehr Musterung aufweist, könnten hier allenfalls zusätzlich Verbesserung bringen.

5 Fazit und Ausblick

Mit den Experimenten A1-E konnte gezeigt werden, dass mit kostengünstigen bild-basierten Verfahren 3D-Rekonstruktionen texturarmer Kleinwiederkäuerknochen mit einer Genauigkeit im Submillimeterbereich ohne weiteres realisierbar sind. Der für diese Experimente angewandte Bildverarbeitungsprozess ist jedoch relativ aufwändig, da aufgrund der verwendeten Plastilin- und Sandfixierung des Knochens nicht direkt alle Bildreihen zu einem Modell verrechnet werden können, sondern die dichten Punktwolken separat für jede Reihe gerechnet, bereinigt (Entfernen des Plastilin- respektive Sandbereiches) und anschliessend vereinigt werden müssen. Die Verwendung einer Fixierung des Skelettelementes, welche eine solche Nachbearbeitung überflüssig macht, würde einerseits eine Effizienzsteigerung bedeuten und andererseits würden Ungenauigkeiten bei der Vereinigung der dichten Punktwolken vermieden. Ein anderer Ansatz wäre – analog zum Vorgehen bei Modell D – die Wahl eines Bildausschnittes, der die Objektfixierung nicht enthält.

Bei kommenden Experimenten könnten zudem Objektivverzerrungsparameter durch eine vorgängige Kalibrierung bestimmt und in der Ausgleichung berücksichtigt werden. Die vorgängige Bestimmung der Verzerrungsparameter könnte Verbesserungen der Modellgenauigkeiten bringen. Ferner sollte der Einfluss des Abbildungsmassstabs systematischer untersucht werden. Im Falle des Humerus ist eine Vergrösserung nur möglich, wenn nicht mehr das ganze Objekt im Bild ist. Dies führt allerdings zu erheblichem Mehraufwand bei den Bildaufnahmen (fünf statt zwei Bildreihen) und bei der Modellberechnung. Eine Kosten-Nutzen-Evaluation wäre hier nötig. Schliesslich muss in weiteren Experimenten die Reproduzierbarkeit der Modellgenauigkeit bei gegebener Distanz zwischen Kamera und Objekt für andere Humeri und Phalangen überprüft werden, die in der Oberflächenbeschaffenheit von den Untersuchungsgegenständen abweichen.

6 Danksagung

Wir bedanken uns bei der Abteilung Integrative Prähistorische und Naturwissenschaftlichen Archäologie der Universität Basel, namentlich Prof. Jörg Schibler, für die zur Verfügung gestellten Kleinwiederkäuerknochen. Weiter danken wir dem Institut für Medizinal- und Analysetechnologie der Fachhochschule Nordwestschweiz, das freundlicherweise seinen GOM ATOS Scanner zur Verfügung gestellt und bei der Anfertigung der Referenzmodelle Hand geboten hat.

7 Literaturverzeichnis

BETTS, M.W., MASCHNER, H.D.G., SCHOU, C.D., SCHLADER, R., HOLMES, J., CLEMENT, N. & SMUIN, M., 2011: Virtual zooarchaeology: building a web-based reference collection of northern vertebrates for archaeofaunal research and education. *Journal of Archaeological Science* **38** (4), 755-762.

- COLLEGE OF THE HOLY CROSS, MUSEUM OF COMPARATIVE ZOOLOGY & HARVARD UNIVERSITY, 2011: Aves 3D. A three dimensional database of avian skeletal morphology. <http://aves3d.org/> (aufgerufen im August 2015).
- INSTITUTE OF BIOTECHNOLOGY, UNIVERSITY OF HELSINKI, 2003. MorphoBrowser. Verfügbar unter: <http://morphobrowser.biocenter.helsinki.fi/> (aufgerufen im August 2015).
- DIGIMORPH STAFF, 2002: Digital Morphology - A unique biological visualization library @ DigiMorph.Org. <http://digimorph.org/aboutdigimorph.phtml> (aufgerufen im April 2016).
- LERMA, J.L. & MUIR, C., 2014: Evaluating the 3D documentation of an early Christian upright stone with carvings from Scotland with multiples images. *Journal of Archaeological Science* **46**, 311-318.
- KERSTEN, T.P. & LINDSTAEDT, M., 2012: Generierung von 3D Punktwolken durch kamera-basierte low-cost Systeme – Workflow und praktische Beispiele. Schriftenreihe des DVW, Band 69, Terrestrisches Laserscanning 2012 (TLS2012), Beiträge zum 121. DVW Seminar am 13. und 14. Dezember 2012 in Fulda, Wissner-Verlag, Augsburg, 25-46.
- KOUTSOUDIS, A., VIDMAR, B., IONNAKIS, G. ARNAOUTOGLU, F. PAVLIDIS, G. & CHAMZAS, C., 2015: Using noise function-based patterns to enhance photogrammetric 3D reconstruction performance of featureless surfaces. *Journal of Cultural Heritage* **16** (5), 664-670.
- KOUTSOUDIS, A., VIDMAR, B. & ARNAOUTOGLU, F., 2013: Performance evaluation of a multi-image 3D reconstruction software on a low-feature artefact. *Journal of Archaeological Science* **40**, 4450-4456.
- MARSHALL UNIVERSITY 2005: PaleoView3D – an interactive 3D fossil museum. <http://paleoview3d.marshall.edu/> (aufgerufen im April 2016).
- NIVEN, L., STEELE, T. E., FINKE, H., GERNAT, T. & HUBLIN, J.-J., 2009: Virtual skeletons: using a structured light scanner to create a 3D faunal comparative collection. *Journal of Archaeological Science* **36**, 2018-2023.
- OMELANOWSKY, D., KERSTEN, T., & LINDSTAEDT, M., 2013: Untersuchungen von Low-Cost Systemen zur 3D-Rekonstruktion kleiner Objekte. *Photogrammetrie, Laserscanning, Optische 3D-Messtechnik - Beiträge der Oldenburger 3D-Tage 2010*, Luhmann, T. & Müller, C. (Hrsg.), VDE Verlag GmbH, Berlin/Offenbach, 217-228.
- REMONDINO, F., DEL PIZZO, S., KERSTEN, T.P. & TROISI, S., 2012: Low-cost and open-source solutions for automated image orientation a critical overview. *Lecture Notes in Computer Science* **7616**, 40-54.
- REMONDINO, F., SEPRA, M.G., NOCERINO, E., MENNA, F. & NEX, F., 2014: State of the Art in High Density Image Matching. *The Photogrammetric Record* **29** (146), 144-166.