

Erstellung von dreidimensional gedruckten,  
anatomisch korrekten Schädeln und  
Unterkiefern von *Canis familiaris* für den Einsatz  
in der anatomischen Lehre

von Hannah Rahel Peters

Inaugural-Dissertation zur Erlangung der Doktorwürde  
der Tierärztlichen Fakultät  
der Ludwig-Maximilians-Universität München

Erstellung von dreidimensional gedruckten,  
anatomisch korrekten Schädeln und  
Unterkiefern von *Canis familiaris* für den Einsatz  
in der anatomischen Lehre

von Hannah Rahel Peters  
aus Freiburg im Breisgau

München 2018

Aus dem Veterinärwissenschaftlichen Department  
der Tierärztlichen Fakultät  
der Ludwig-Maximilians-Universität München

Lehrstuhl für Anatomie, Histologie und Embryologie

Arbeit angefertigt unter der Leitung von:  
Univ.-Prof. Dr. Johann Maierl

Mitbetreuung durch:  
Univ.-Prof. Dr. Cordula Poulsen Nautrup  
und Dr. Inga Wölfel

Gedruckt mit Genehmigung der Tierärztlichen Fakultät  
der Ludwig-Maximilians-Universität München

Dekan: Univ.-Prof. Dr. Reinhard K. Straubinger, Ph.D.

Berichterstatter: Univ.-Prof. Dr. Johann Maierl

Korreferent/en: Univ.-Prof. Dr. Susanne Lauer

Tag der Promotion: 27.07.2018

*gewidmet Cordula Poulsen Nautrup*

## Inhaltsverzeichnis

1	Einleitung .....	3
2	Literaturübersicht .....	4
2.1	Anatomie des Hundeschädels .....	4
2.1.1	Hirnschädel, Cranium (Neurocranium) .....	4
2.1.2	Gesichtsschädel, Facies (Viscerocranium) .....	5
2.1.3	Öffnungen des Schädels.....	7
2.1.4	weitere anatomische Strukturen .....	9
2.1.5	Rassebedingte Unterschiede der Anatomie des Hundeschädels .....	10
2.2	Dreidimensionaler Druck (3D-Druck) .....	11
2.2.1	Grundlagen Generativer Fertigungsverfahren .....	11
2.2.2	Einsatzgebiete .....	12
2.2.3	Übersicht über die wichtigsten Schichtbauverfahren .....	13
2.3	Computertomographie .....	22
2.4	3D-Druck in der Veterinärmedizin .....	24
2.4.1	Allgemeine und klinische Anwendung .....	24
2.4.2	3D-Druck in der veterinärmedizinischen Ausbildung .....	25
2.5	3D Druck in der Humanmedizin .....	27
2.6	Grundlagen des Lernens .....	29
2.7	Herstellung nativer Präparate .....	30
2.7.1	Knochenpräparate .....	30
2.7.2	Nasspräparate mit Formalin.....	33
2.7.3	Plastination .....	34
2.8	Arbeitsschutz .....	34
3	Material und Methoden .....	38
3.1	Beschaffung der Vorlagen .....	38
3.1.1	Schädel eines Deutschen Schäferhundes .....	38
3.1.2	Schädel eines Afghanischen Windhundes.....	39
3.1.3	Schädel eines Boxers .....	40
3.1.4	Schädel eines Bull Terriers.....	41
3.2	Hardware .....	42

3.2.1	Computertomographen .....	42
3.2.2	Computer .....	42
3.2.3	3D-Drucker .....	43
3.2.4	Kamera .....	43
3.3	Software .....	43
3.4	Auswahl der Schädel .....	44
3.5	Vorgehen zur Erstellung der 3D-Druckdateien: Vorversuche .....	45
3.5.1	Anfertigung der 3D-Datensätze .....	45
3.5.2	Schritte in OsiriX .....	46
3.5.3	Schritte in ZBrush .....	47
3.6	Vorgehen zur Erstellung der 3D-Druckdateien: Versuch 3 .....	48
3.6.1	Anfertigung der 3D-Datensätze .....	48
3.6.2	Bearbeitung der 3D-Datensätze in den Softwareprogrammen .....	50
3.6.3	Druckvorbereitung in den Softwareprogrammen .....	58
3.6.4	Druck der 3D-Dateien .....	59
3.6.5	Post-Processing der 3D-Drucke .....	59
3.7	Evaluation .....	61
3.7.1	Evaluationsbogen .....	61
3.7.2	Anfertigung der Abbildungen .....	62
3.7.3	Skript .....	63
3.7.4	Lehrmaterialien .....	63
3.7.5	Ablauf der Evaluation .....	64
4	Ergebnisse .....	67
4.1	Erstellung endgültig verwendbarer DICOM-Datensätze .....	67
4.2	Bearbeitung der OBJ-Dateien .....	67
4.3	Nachbearbeitung der einzelnen digitalen 3D-Dateien .....	69
4.3.1	Virtuelle Dateien des Deutschen Schäferhundes .....	69
4.3.2	Virtuelle Dateien des Afghanischen Windhundes .....	76
4.3.3	Virtuelle Dateien des Boxers .....	78
4.3.4	Virtuelle Dateien des Bull Terriers .....	79
4.4	Kolorierung der Objekte .....	80
4.5	Geometrische Kontrolle .....	80

4.6	Druck der digitalen Dateien.....	81
4.6.1	Upload der Dateien in 3DPrint .....	81
4.6.2	Entnahme aus dem Druckbett .....	81
4.6.3	Entfernung der Pulverrückstände .....	82
4.6.4	Infiltration der Modelle .....	82
4.7	Dreidimensional gedruckte Modelle.....	82
4.7.1	Komplette Oberschädel mit Unterkiefer .....	83
4.7.2	Schnittpräparate des Deutschen Schäferhundes.....	87
4.8	Ergebnisse der objektiven Evaluation .....	90
4.8.1	Der Lernerfolg in Relation zum Ausgangsniveau des Wissensstandes ....	91
4.8.2	Auswertung der Anzahl der nicht beantworteten Fragen je Gruppe .....	92
4.8.3	Auswertung der erreichten Punktzahl je Gruppe .....	95
4.8.4	Auswertung der durchschnittlich erreichten Punktzahl je Gruppe.....	98
4.8.5	Vergleich der drei Gruppen.....	99
4.8.6	Lernfortschritt bei Fragen mit Abbildungen von Schnitten.....	100
4.9	Ergebnisse des subjektiven Fragen der Evaluation .....	101
5	Diskussion .....	103
5.1	Bedeutung der Auswahl der Schädel.....	103
5.2	Wahl des Druckverfahrens.....	105
5.3	Virtuelle dreidimensionale Dateien und Ausdrücke.....	107
5.3.1	Relevanz der Qualität der CT-Datensätze .....	107
5.3.2	Stellenwert der Nachbearbeitung.....	109
5.3.3	Kolorierung der Objekte .....	113
5.3.4	Post-Processing.....	114
5.4	Realitätsnahe Wiedergabe der 3D-Objekte .....	115
5.5	Dreidimensional gedruckte Schnittpräparate .....	118
5.6	Bedeutung und Einsatz von 3D- Modellen in der universitären Lehre .....	122
5.7	Artenvielfalt .....	126
5.8	Zeitaufwand und Druckkosten .....	128
5.9	Evaluation 3D-Ausdrücke .....	129
5.9.1	Objektive Evaluation der 3D-Ausdrücke .....	129
5.9.2	Subjektive Evaluation 3D-Ausdrücke.....	133



5.10	Vergleich des Gefährdungspotentials der Herstellungsmethoden .....	134
5.11	Fazit.....	136
5.12	Ausblick .....	137
6	Zusammenfassung .....	138
7	Summary .....	140
8	Anhang .....	141
8.1	Evaluationsbogen .....	141
8.2	Skript mit Abbildungen .....	145
9	Abbildungsverzeichnis .....	152
10	Tabellenverzeichnis .....	155
11	Literaturverzeichnis.....	156
12	Danksagung.....	162

Alle anatomischen Termini wurden gemäß der 6. Auflage der Nomina Anatomica Veterinaria verwendet (I.C.V.G.A.N., 2017).

## Abkürzungsverzeichnis

2D	zweidimensional
3D	dreidimensional
3DP	3D-Printing
ABS	Acrylnitril-Butadien-Styrol
AM	Additive Manufacturing, Synonym Additive Herstellungsverfahren, Synonym Generative Fertigungsverfahren
CAD	Computer-Aided Design, rechnerunterstütztes Konstruieren
Can.	Canalis
CC	Contour Crafting
CLUT	Color Look Up Table
CT	Computertomographie
DICOM	Digitale Bildgebung und -kommunikation in der Medizin <u>D</u> igital <u>I</u> maging and <u>C</u> ommunications in <u>M</u> edicine
DLP	Digital Light Processing
DSH	Deutscher Schäferhund
EBM	Electron Beam Melting, Elektronenstrahlschmelzen
EU	Europäische Union
FDM	Fused Deposition Modeling
Fiss.	Fissura
FLM	Fused Layer Manufacturing
For.	Foramen
FOV	Field of View
FTI	Film Transfer Imaging
GHS	Globally Harmonized System of Classification and Labelling of Chemicals
HE bzw. HU	Hounsfield-Einheiten bzw. Hounsfield Unit
I <sub>1</sub>	erster Dens incisivus
I <sub>2</sub>	zweiter Dens incisivus
I <sub>3</sub>	dritter Dens incisivus
Inc.	Incisura

## Abkürzungsverzeichnis

---

LMU	Ludwig-Maximilians-Universität
LOM/LLM	Laminated Object Manufacturing/ Layer Laminated Manufacturing
LS	Lasersintern
M <sub>1</sub>	erster Dens molaris
M <sub>2</sub>	zweiter Dens molaris
M <sub>3</sub>	dritter Dens molaris
MC	Multiple Choice
MKG-Chirurgie	Mund-, Kiefer- und Gesichtschirurgie
MRT	Magnetresonanztomografie
NM	Knöchernen Nasenmuscheln, Ossa conchae
OK	Oberkiefer bzw. hier: Oberschädel
P <sub>1</sub>	erster Dens praemolaris
P <sub>2</sub>	zweiter Dens praemolaris
P <sub>3</sub>	dritter Dens praemolaris
P <sub>4</sub>	vierter Dens praemolaris
PJM	Poly-Jet Modeling
PLA	Poly lactide
Proc.	Processus
ROI	Region of Interest
SL	Stereolithography
SLM	Selektives Laser Melting
SLS	Selektives Lasersintern
STL	Stereolithography, standard tessellation language
UK	Unterkiefer
vrml	Virtual Reality Modeling Language
WL	Window Length
WW	Window Width

## 1 Einleitung

Generative Fertigungsverfahren (3D-Druckverfahren) sind seit den 1980er Jahren bekannt, es handelt sich dabei um eine seit langem bekannte Technologie, die jedoch erst in den letzten Jahren sowohl in der Human- als auch in der Veterinärmedizin Einzug gehalten hat (Hagebeucker, 2017). Der 3D-Druck eröffnet eine Vielzahl von Möglichkeiten in der universitären Lehre, in der Therapie und in der Vorbereitung und Durchführung von Operationen.

Essentiell für die spätere tierärztliche Tätigkeit sind profunde Kenntnisse der tierartspezifischen Anatomie. Die anatomische Lehre ist daher grundsätzlicher Bestandteil des Studiums der Veterinärmedizin. Dafür sind neben Anatomiebüchern auch ausreichend anatomische Präparate von guter Qualität als Anschauungsmaterial entscheidend. An osteologischen Präparaten, im Besonderen am Schädel, findet sich eine Vielzahl wichtiger filigraner Strukturen, die erlernt werden müssen und bedeutend für das Verständnis der funktionellen Anatomie sind. Sie sind jedoch an den meisten nativen Schädelpräparaten nach kurzer Zeit unvollständig und beschädigt. Dies mindert den didaktischen Wert der nativen Präparate erheblich. Unabhängig davon stellen Schnittpräparate eine wertvolle Hilfe dar, um auch innenliegende morphologische Merkmale einsehbar zu machen. Diese in ausreichend großer Zahl und entsprechender Qualität, aus nativen Schädeln herzustellen, ist bei entsprechender Anzahl an Studierenden praktisch unmöglich.

Daher sollte im Rahmen dieser Arbeit untersucht werden, ob und wie anatomisch korrekte 3D-Druckmodelle von Hundeschädeln erstellt werden können, die detailgetreu sind und ein natürliches Erscheinungsbild aufweisen. Um einen Einblick in die verschiedenen Grundtypen der Schädelformen zu geben, wurde ein meso-, dolicho- und brachycephaler sowie ramsköpfiger Hundetyp ausgewählt. Auch die Möglichkeit war zu prüfen, standardisierte Schnittpräparate mit neuartiger Schnitfführung herzustellen. Die Eignung der 3D-gedruckten Anschauungsobjekte als didaktisches Mittel in der anatomischen Lehre sollte sowohl objektiv als auch subjektiv evaluiert werden. Hierfür müssen die 3D-Modelle der Hundeschädel alle wichtigen morphologischen Strukturen wirklichkeitsgetreu und anatomisch korrekt wiedergeben.

## 2 Literaturübersicht

### 2.1 Anatomie des Hundeschädels

Die knöcherne Grundlage des Kopfes wird durch das Kopfskelett, den Schädel, gebildet. In diesen knöchernen Strukturen werden neben dem Gehirn sowohl die höheren Sinnesorgane als auch Teile des Atmungs- und Verdauungsapparates sowie seine Hilfsorgane beherbergt. Der Schädel bietet Ursprung und Ansatz für die Gesichts- und Kaumuskulatur (Nickel et al., 2004)

Der Schädel lässt sich in zwei Abschnitte einteilen: kaudal der Hirnschädel, Cranium oder Neurocranium, und rostral der Gesichtsschädel, als Facies, Viscerocranium oder Splanchnocranium bezeichnet (Budras, 2012; Nickel et al., 2004; Salomon, 2015). Wobei der allgemein übliche Begriff Schädel von den Autoren als Bezeichnung für den genauer differenzierten Oberschädel verwendet wird.

Nach erfolgter Verknöcherung sind die Einzelknochen des Kopfes vorzugsweise durch Knochennähte (Suturae) starr miteinander verbunden, wohingegen Unterkiefer und Zungenbein beweglich angelagert sind (König und Liebich, 2014; Nickel et al., 2004).

#### 2.1.1 Hirnschädel, Cranium (Neurocranium)

Der Hirnschädel besteht aus verschiedenen Knochen, welche die Wände der Schädelhöhle formen. Sie sollen im Folgenden kurz erläutert werden. Die Schädelhöhle beherbergt das Gehirn mit seinen Hüllen und die zur Versorgung notwendigen Gefäße. Die Ossa cranii werden nach voller Ausbildung in unpaare und paarige Hirnschädelknochen unterteilt (König und Liebich, 2014; Nickel et al., 2004). Dies ist in Tabelle 1 dargestellt.

Tabelle 1: Übersicht der Knochen des Hirnschädels

Knochen des Hirnschädels	unpaar/ paarig
Os occipitale (Hinterhauptbein)	unpaar
Os sphenoidale (Keilbein)	unpaar
Os interparietale (Zwischenscheitelbein)	unpaar
Os parietale (Scheitelbein)	paarig
Os frontale (Stirnbein)	paarig
Os temporale (Schläfenbein)	paarig
Os ethmoidale (Siebbein)	unpaar

Der basale Teil (Pars basilaris) des Hinterhauptbeins (Os occipitale) bildet gemeinsam mit dem vorderen und hinteren Keilbein (Os praesphenoidale und Os basisphenoidale) den Boden der Schädelhöhle.

Die Genickwand besteht aus der Schuppe des Hinterhauptbeins (Squama occipitalis) und seinen Seitenteilen (Partes laterales). Das paarige Schläfenbein (Os temporale) bildet die Seitenwände aus.

Als Dach schließen sich das Stirnbein (Os frontale), das Scheitelbein (Os parietale) und das Zwischenscheitelbein (Os interparietale) zusammen. Das Siebbein (Os ethmoidale) bildet schließlich die Grenze zum Gesichtsschädel (König und Liebich, 2014; Nickel et al., 2004; Salomon, 2015).

### 2.1.2 Gesichtsschädel, Facies (Viscerocranium)

Die Ossa faciei (vgl. Tabelle 2) schließen sich ähnlich einer Kapsel zusammen, welche die Nasenhöhle umschließt. Wie beim Hirnschädel bilden mehrere Knochen des Gesichtsschädels gemeinsam die Wände der Nasenhöhle. Unterlagert werden sie vom beweglichen Unterkiefer (Mandibula) und vom zwischen seinen Ästen gelegenen Zungenbein (Os hyoideum) (König und Liebich, 2014; Nickel et al., 2004).

Tabelle 2: Übersicht der Knochen des Gesichtsschädels

Knochen des Gesichtsschädels	unpaar/paarig
Os frontale (Stirnbein)	paarig
Os ethmoidale (Siebbein)	unpaar
Os praesphenoidale (vorderes Keilbein)	unpaar
Os nasale (Nasenbein)	paarig
Os lacrimale (Tränenbein)	paarig
Os zygomaticum (Jochbein)	paarig
Maxilla (Oberkieferbein)	paarig
Os incisivum (Zwischenkieferbein)	paarig
Os palatinum (Gaumenbein)	paarig
Vomer (Pflugscharbein)	paarig
Os pterygoideum (Flügelbein)	paarig

Die Knochen des Gesichtsschädels bilden gemeinsam mit den Knochen des Hirnschädels die knöchernen Augenhöhle (Orbita). Stirnbein (Os frontale), Siebbein (Os ethmoidale) und vorderes Keilbein (Os praesphenoidale) sind Hirnschädelknochen, die rostral am Hirnschädel liegen und auf den Gesichtsschädel übergreifen (Nickel et al., 2004). Die quergestellte Lamina cribrosa des Siebbeins trennt tief im Nasengrund die Nasenhöhle von der Schädelhöhle (König und Liebich, 2014). Das Nasendach, Dorsum nasi, wird jederseits gemeinsam vom Stirnbein (Os frontale) und vom Nasenbein (Os nasale) gebildet (Nickel et al., 2004). Die beiden Seitenwände bestehen aus dem Tränenbein (Os lacrimale), dem Jochbein (Os zygomaticum), dem Oberkieferbein (Maxilla) sowie dem Zwischenkieferbein (Os incisivum). Die Bodenwand der Nasenhöhle, die gleichzeitig das Dach der Mundhöhle ist, besteht aus dem Gaumenbein (Os palatinum), dem Oberkieferbein (Maxilla), dem Zwischenkieferbein (Os incisivum) als auch dem Pflugscharbein (Vomer). Das Flügelbein (Os pterygoideum), das Gaumenbein (Os palatinum) und das Keilbein (Os sphenoidale) bilden zusammen mit dem Pflugscharbein (Vomer) das Dach bzw. die Seitenwand der Schlundkopfhöhle (König und Liebich, 2014).

Das Siebbein liegt innerhalb dieser Nasenhöhle und hat die Form eines Rohres, welches von der Außenwand (Lamina externa), gebildet wird. Die Außenwand besteht aus der Bodenplatte (Lamina basalis), beidseits aus einer dünnen Seitenplatte (Lamina orbitalis) und in Richtung der Stirn fungiert die Lamina tectoria als Dachplatte. Der innere Hohlraum wird median durch die Lamina perpendicularis halbiert. Schädelhöhlenwärts grenzt die quergestellte Siebbeinplatte (Lamina cribrosa) den Hohlraum ab. Sie ist durch zahlreiche Löcher durchbrochen, durch sie ziehen die Riechfäden zum Gehirn. Die Ethmoturbinalia ragen in das Lumen. Es handelt sich bei ihnen um die aufgerollten Siebbeinmuscheln, die der Dach- und Seitenplatte entspringen. Die größeren reichen weit nach innen, sie werden Endoturbinalia genannt. Die Ektoturbinalia sind kleiner und verbleiben weiter außen. Zwischen sich lassen sie die Siebbeingänge (Meatus ethmoidales) frei (Nickel et al., 2004).

### 2.1.3 Öffnungen des Schädels

Tabelle 3 listet die Öffnungen des Oberschädels und des Unterkiefers des Hundes auf, die für diese Arbeit von Bedeutung waren. Nebst den Öffnungen ist der Knochen aufgeführt, in dem sich die Struktur befindet.



Tabelle 3: Öffnungen des Oberschädels und des Unterkiefers

<b>Oberschädel</b>	
<i>Öffnung</i>	<i>Knochen</i>
Canalis nervi hypoglossi	Os occipitale
Canalis opticus	Os praesphenoidale
Fissura orbitalis	Os praesphenoidale
Foramen rotundum	Os praesphenoidale und Os basisphenoidale
Canalis alaris mit For. alare caudale und For. alare rostrale	Os basisphenoidale und Os praesphenoidale
Foramen jugulare	Pars basilaris des Os occipitale, Os temporale und Os basisphenoidale
Foramen ovale	Os basisphenoidale
Canalis caroticus	Os basisphenoidale
Foramen spinosum	Os basisphenoidale
Foramina ethmoidalia	Os frontale
Fissura petro-occipitale	Pars petrosa des Os temporale und Pars basilaris des Os occipitale
Foramen retroarticulare	Pars tympanica des Os temporale
Foramen stylomastoideum	Pars petrosa und Pars tympanica des Os temporale
Meatus acusticus externus	Os temporale
Meatus acusticus internus	Os temporale
Foramen maxillare	Maxilla
Foramen palatinum caudale	Maxilla
Foramen sphenopalatinum	Maxilla
Foramen palatinum majus	Maxilla
Foramina palatina minora	Os palatinum
Foramen infraorbitale	Maxilla
Canalis interincisivus	Zwischen den Ossa incisiva beider Seiten

Fissura palatina	Os incisivum
Fossa sacci lacrimalis mit Apertura canalis nasolacrimalis	Os lacrimale
Foramen magnum	Os occipitale
Foramen mastoideum	Os occipitale
<b>Unterkiefer</b>	
<i>Öffnung</i>	<i>Knochen</i>
Foramen mandibulare	Mandibula
Foramen mentale	Mandibula

(König und Liebich, 2014; Nickel et al., 2004)

#### 2.1.4 Weitere anatomische Strukturen

Neben den oben genannten Öffnungen des Schädels waren einige weitere Strukturen von besonderer Bedeutung im Verlauf dieser Arbeit. Tabelle 4 zeigt sie in einer Übersicht.

Tabelle 4: wichtige anatomische Strukturen

Anatomische Struktur	Knochen
Hamulus pterygoideus	Os pterygoideum
Ethmoturbinalia	Os ethmoidale
Os conchae nasalis ventralis	Maxilla (Maxilloturbinalia)
Lamina cribrosa	Os ethmoidale
Spina nasalis caudalis	Os palatinum
Tuber maxillae	Maxilla
Tuberculum musculare	Os sphenoidale
Processus retroarticularis	Os temporale
Processus muscularis	Os temporale
Processus paracondylaris	Os occipitale
Crista partis petrosa	Os temporale
Tentorium cerebelli osseum	Os occipitale
Crista orbitosphenoidalis	Os praesphenoidale
Dorsum sellae turcicae	Os basisphenoidale

(Nickel et al., 2004)

Die Anatomie des Hundeschädels wurde für diese Arbeit zusammengefasst und konzentriert sich auf die für die digitale Bearbeitung bedeutsamen Bereiche. Eine detaillierte Darstellung der Anatomie ist in den gebräuchlichen Lehrbüchern und Atlanten über die Anatomie der Haussäugetiere im Allgemeinen zu finden (König und Liebich, 2014; Nickel et al., 2004; Popesko, 2011; Salomon, 2015). Weiterhin gibt es Werke, die sich ausschließlich mit der Anatomie des Hundes befassen (Budras, 2012; Evans und de Lahunta, 2013b).

#### 2.1.5 Rassebedingte Unterschiede der Anatomie des Hundeschädels

Der domestizierte Hund, Art *Canis familiaris*, stammt aus der Ordnung der Carnivora und der Familie der Canidae. (Evans und de Lahunta, 2013b; Gentry et al., 2004).

Die kraniale Morphologie der Haushunde variiert bemerkenswert stark in Größe und Proportion wie bei keiner anderen Spezies der Säugetiere (Evans und de Lahunta, 2013b; Wayne, 1986). Die Vielfalt an Schädelformen lässt sich in vier große Gruppen fassen. Zum einen die Dolichocephalen, sie erscheinen langnasig und schmalköpfig. Als Beispiele lassen sich Collie und Afghanischer Windhund nennen. Langköpfige Hunderassen zeichnen sich durch einen schmalen Hirnschädel mit markanter *Crista sagittalis externa* sowie einem ausgeprägten Gesichtsschädel aus, dessen Stirn flach zur Nase abfällt.

Die Gruppe der Mesocephalen steht für Schädel mit mittleren Proportionen wie beim Deutschen Schäferhund oder Beagle. Die Länge und Breite des Schädels ist bei diesen Hunderassen ausgewogen. Die Form des Hirnschädels ist mehr rundlich (König und Liebich, 2014). Unter dem Begriff brachycephal versteht man kurzköpfige Schädel wie der eines Boxers oder Pekinesen (Evans und de Lahunta, 2013b). Der Gesamtschädel dieser Rassen ist meist durch eine gedrungene bis kugelige Form gekennzeichnet. Die *Crista sagittalis externa* ist stark reduziert und die Augenhöhlen liegen weit auseinander. Manche dieser Rassen weisen eine *Prognathia inferior* auf. Das Wachstum des Unterkiefers übertrifft das des Gesichts.

Die wohl kleinste der Gruppen ist die der Hunde mit ramsnasiger Kopfform wie bei einem Bull Terrier. Sie ist keil- bis eiförmig (VDH, 2018a). Zwischen Nasenrücken und Stirn fehlt der Stopp, sie gehen ohne Absatz ineinander über, ähnlich wie man es an manchen Pferde- oder Schafrassen beobachten kann. Ein auffälliges Merkmal ist das sogenannte «downface», das durch divergierende Kopflinien entsteht (VDH, 2018a).

Die unterschiedlichen Formen der Schädel durch Züchtung wirken sich unter anderem auch auf die Beißkraft und die Atmung aus (Drake und Klingenberg, 2010; Koch et al., 2003). Insbesondere bei brachycephalen Rassen kann dies mit erheblichen Beeinträchtigungen einhergehen. Wenn eine extreme Verkürzung des Gesichtsschädels und damit auch der Nasenhöhle vorliegt, kann dies zu einer abnormen Konfiguration der Ossa conchae führen mit nachfolgenden Einschränkungen bei der Atmung (Oechtering et al., 2007). Oftmals überragt der Unterkiefer den Oberkiefer, so dass es zu einer Prognathia inferior kommt.

Im Rahmen dieser Arbeit wurde aus jeder dieser Gruppen eine Rasse gewählt.

## **2.2 Dreidimensionaler Druck (3D-Druck)**

Generative Fertigungsverfahren - auch Additive Manufacturing (AM) genannt – sind automatisierte Verfahren, die nach dem Prinzip des Schichtbauverfahrens dreidimensionale physische Objekte aus einem 3D-CAD Datensatz fertigen.

Computer-Aided Design oder Rechnergestütztes Konstruieren (CAD) beschreibt das rechnerunterstützte Erzeugen und Ändern eines geometrischen Modells. Im weiteren Sinne werden darunter sämtliche rechnergestützten Tätigkeiten im Rahmen eines Konstruktionsprozesses verstanden. Dazu zählen auch die geometrische Modellierung, das Simulieren und Berechnen (Pahl, 2013).

### **2.2.1 Grundlagen Generativer Fertigungsverfahren**

Die Prozesskette Generativer Fertigungsverfahren ist wie folgt: an einem Rechner wird z.B. mittels eines CAD Programms, durch Scannen und im medizinischen Bereich hauptsächlich durch Computertomographie (CT) (weniger mittels MRT aufgrund der aufwändigen Segmentierung) ein maßstäbliches virtuelles 3D-Modell erstellt. Dieses Modell wird mittels eines speziellen Programmes in Schnitte oder Schichten umgerechnet und so ein Datensatz erzeugt, der das virtuelle Modell als konturierte Schichten gleichmäßiger Dicke darstellt. Der Datensatz wird vor der Übergabe an die Fertigungsmaschine überprüft (Al-Nawas und Goetze, 2017; Gebhardt, 2016b).

Über eine Schnittstelle wird für jede Schicht dieser aus den Konturdaten (x-y), der Schichtdicke (dz) und der Schichtnummer oder Z-Koordinate bestehende Datensatz

an die Fertigungsmaschine übermittelt und das 3D-Modell kann im Schichtbauverfahren vom Boden bis zur Spitze erstellt werden.

Der Aufbau lässt sich in zwei grundsätzliche Teilschritte gliedern, zunächst das Aufbringen einer Schicht und anschließend deren Verbindung mit der darunterliegenden Schicht. Durch den schichtweisen Aufbau entsteht im Bauteil ein sogenannter Treppenstufeneffekt, der durch manuelle Nachbearbeitung wie z.B. Polieren entfernt werden kann.

Dieses Prinzip wird von allen verfügbaren Maschinen der additiven Herstellungsverfahren umgesetzt, deshalb spricht man auch von „layer-based technology oder layered technology“ (Gebhardt, 2016b). Abbildung 1 zeigt in schematischer Darstellung die Prozessschritte.

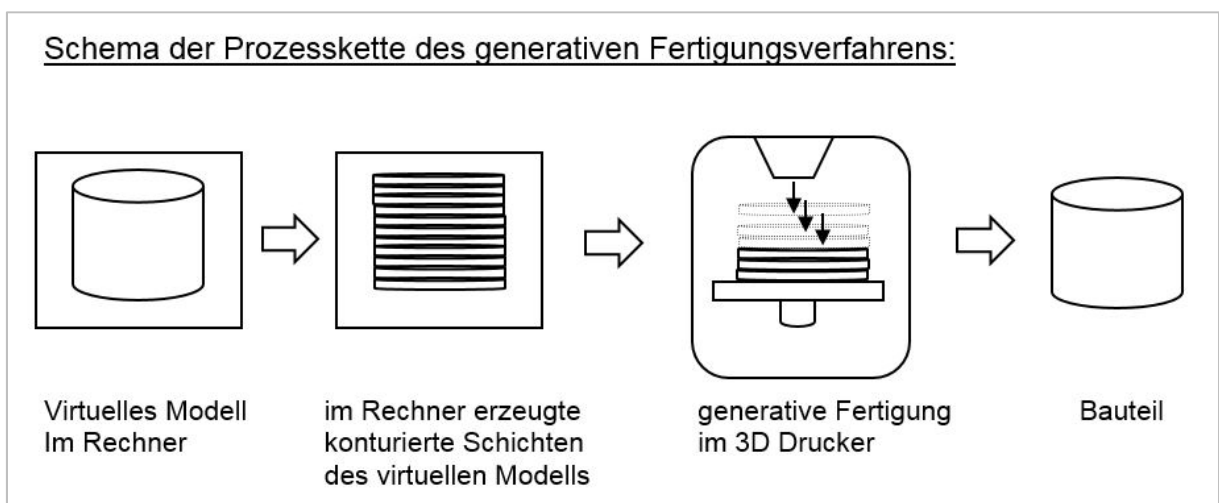


Abbildung 1: Schema der Generativen Fertigungsverfahren

### 2.2.2 Einsatzgebiete

Generative Fertigungsverfahren werden in vielen Bereichen der Industrie wie z.B. im Maschinenbau, der Automobilindustrie, der Luftfahrtindustrie, der Architektur, der Gartenplanung und zunehmend auch in der Medizintechnik eingesetzt, da die Fertigung sehr komplexer Strukturen als einteiliges Bauteil möglich ist.

In der Mund-, Kiefer- und Gesichtschirurgie (MKG-Chirurgie) werden 3D-Modelle zur Vorbereitung und Simulation von Operationen und zur Erstellung passgenauer individueller Implantate eingesetzt (Al-Nawas und Goetze, 2017).

Generative Fertigungsverfahren gelten häufig als teuer, durch die rasante Weiterentwicklung dieser Technologie stellen sie jedoch für viele Bereiche mittlerweile

eine wirtschaftliche Alternative dar. Es müssen keine teuren bauteilspezifischen Werkzeuge erstellt werden da das gewünschte Teil direkt aus dem virtuellen Modell erzeugt wird. Somit sind Generative Verfahren neben den formativen wie Fräsen, Gießen oder Schmieden in vielen Fällen als wirtschaftlich gleichwertig oder sogar überlegen zu sehen (Kollenberg, 2015).

Anforderungen wie Individualisierung, komplexe Geometrie und Funktionsintegration rechtfertigen generative Fertigungsverfahren oft schon, sobald nur einer dieser Parameter gefordert ist. Sind alle drei Anforderungen zu erfüllen, sind Produkte nahezu nur mit AM-Verfahren herzustellen (Breuninger et al., 2013a).

Die Wahl des geeigneten Verfahrens und Materials wird durch die Abmessungen, die zu erwartenden mechanischen Belastungen, die geforderte Oberflächengüte und den gewünschten Einsatz des Bauteils bestimmt (Gebhardt, 2016b).

### 2.2.3 Übersicht über die wichtigsten Schichtbauverfahren

Die Generativen Herstellungsprozesse lassen sich anhand des physikalischen Prinzips der Erzeugung und Konturierung der Schichten in fünf grundlegende Familien einteilen (siehe auch Tabelle 5):

1. Selektives Kleben durch Binder
2. Polymerisation
3. Selektives Schmelzen oder Sintern
4. Konturen schneiden und Fügen
5. Anwendung thermisch aktivierbarer Phasen

(Gebhardt, 2016a)

Tabelle 5: Übersicht über gängige AM-Prozesse

generische Bezeichnung	Abkürzung	Marktbezeichnung	Abkürzung
3D-Drucken	3DP	Dreidimensionales Drucken	3DP
Stereolithografie Polymerisation		Laser-Stereolithografie Polymerdrucken	LS
Lasersintern Laserschmelzen	LS	Selektives Lasersintern Selektives Laserschmelzen Elektronenstrahl-Schmelzen	SLS SLM EBM
Layer Laminate Manufacturing	LLM	Laminated Object Manufacturing	LOM
Fused Layer Manufacturing	FLM	Fused Deposition Modeling	FDM

(Gebhardt, 2016a)

### 2.2.3.1 3D Drucken, Dreidimensionales Drucken, (3DP), Three dimensional Printing

Die ersten Patente des Verfahrens wurden 1993 erteilt, die technologischen Grundlagen wurden am Massachusetts Institute of Technology (MIT), Boston, entwickelt.

Durch den Druckkopf wird der flüssige Binder punktuell auf ein Pulverbett aufgebracht und verklebt dort die Pulverpartikel miteinander. Die bedruckte Ebene wird dann um die Höhe einer Schichtdicke abgesenkt und mit Hilfe einer Rolle mit einer weiteren Lage Pulver bedeckt, die wiederum lokal mit dem Binder beaufschlagt wird – dies wird so lange wiederholt, bis alle Schichten aufgetragen sind. Der Binder sorgt sowohl für die Verklebung der einzelnen Pulverpartikel als auch für die Verbindung der Lagen untereinander. Das Bauteil bleibt bis zur Fertigstellung im Pulverbett und benötigt daher keine zusätzlichen Stützen. Nach Aushärtung des Binders kann das so erstellte Bauteil vom losen Pulver befreit werden. Es können mit diesem Prozess sowohl Kunststoffe als auch keramische Materialien und Metalle verarbeitet werden. Binder sind für nahezu jede Art von Pulver denkbar, daher ist die Auswahl an Baumaterialien fast unbegrenzt. Es können damit auch Anwendungen im pharmazeutischen und medizinischen Bereich realisiert werden. Meist handelt es sich um einen zweistufigen Prozess, da das Bauteil nach der Bauphase noch infiltriert werden muss, um eine hohe

Festigkeit zu erreichen. Ein weiterer Vorteil dieses Verfahrens liegt darin, dass der Binder mit Multidüsen aufgetragen wird und eingefärbt werden kann. Somit können mehrfarbige Teile gefertigt werden an denen spezielle Strukturen hervorzuheben werden (Fastermann, 2012; Gebhardt, 2016a; Gibson et al., 2015b; Kollenberg, 2015). Versuche mit Körperteilen wie einer Hand bewiesen, dass die mittels 3D-Druck reproduzierten Teile sehr realistische Repliken ergaben, die sogar sehr feine Strukturen akkurat nachbildeten. Auch die Reproduzierbarkeit des Druckergebnisses wurde getestet und als sehr gut bewertet (McMenamin et al., 2014). Je nach Druckermodell ist eine fotorealistische Wiedergabe der Farben möglich (3D Systems Europe, 2018).

Dieses Verfahren wurde zur Erstellung der dreidimensionalen Unterrichtsmaterialien dieser Arbeit angewandt.

#### 2.2.3.2 Laser- Stereolithographie

Dies ist sowohl der älteste als auch detaillierteste AM-Prozess. Der Bauraum ist mit flüssigem Monomer befüllt. Das Monomer wie z.B. ein Epoxidharz, ein Vinylethertyp oder ein Acrylat wird mittels eines UV-Laserstrahls lokal angeregt, es reagiert sofort mit Polymerisation und Verfestigung und bildet dadurch die konturierte und detailgetreue Schicht. Nach Aushärtung der bestrahlten Bereiche wird der Bauraum um eine Schichtdicke abgesenkt, es wird neues Monomer aufgebracht (recoating) und der Vorgang wird so oft von unten nach oben wiederholt, bis das Bauteil fertiggestellt ist. Dieses Verfahren benötigt Stützen und limitiert dadurch die Packungsdichte des Modells im Bauraum und somit die Produktivität. Als weitere Nachteile sind die geringere Festigkeit, die stets notwendige Nachhärtung mit UV-Licht und die Beachtung von Arbeitsschutzmaßnahmen zu nennen (Breuninger et al., 2013b; Gebhardt, 2016a; Kollenberg, 2015).

Mit diesem Verfahren können bei Einsatz von Keramikpulver mit Harz sogar keramische Komponenten hergestellt werden. Allerdings muss dann in einem weiteren langwierigen Schritt das Harz durch Wärmebehandlung wieder herausgelöst werden – das Werkstück muss entbindert werden. Man erhält mit dieser Verfahrensweise Werkstücke, die nahezu die gleichen Eigenschaften aufweisen als ob sie konventionell hergestellt worden wären. Eine Weiterentwicklung des Verfahrens an der Technischen Universität Wien durch Prof. Stampfl setzt anstelle eines Lasers ein Projektionssystem



mit LED ein. Dieses Verfahren wird als „Lithography-based Ceramic Manufacturing – LCM – bezeichnet (Kollenberg, 2015).

#### 2.2.3.3 Film Transfer Imaging (FTI)

Dieses Verfahren hat Ähnlichkeit mit dem oben beschriebenen Stereolithographieverfahren. Die Verfestigung erfolgt statt durch einen Laser durch einen Beamer. Gearbeitet wird nicht in einem Bad sondern mit einer mit Fotopolymeren beschichteten Transportfolie, die auf die Bauplattform aufgebracht wird. Die gewünschten Strukturen (Bauteil und Stützen) werden durch die Folie belichtet und ausgehärtet. Das Material der nicht belichteten Bereiche bleibt an der Folie haften und wird gemeinsam mit dieser nach dem Bauprozess abgezogen, in die Druckerkartusche zurücktransportiert und mit dieser ausgewechselt (Fastermann, 2012).

#### 2.2.3.4 Lasersintern – Laserschmelzen (LS)

Mit den generischen Begriffen Lasersintern – Laserschmelzen werden verschiedene Marktbezeichnungen wie Lasersintern (LS), von manchen Herstellern auch Selektives Lasersintern (SLS) genannt, Laser Fusing oder Laser Melting zusammengefasst.

Das Bauprinzip ist wie folgt: Thermoplastisches Pulver wird lokal entsprechend der Kontur des virtuellen Modells aufgeschmolzen und durch Abkühlen wieder verfestigt (Gebhardt, 2016a; Kollenberg, 2015). Wird anstelle des Lasers ein Elektronenstrahl eingesetzt, spricht man von „Electron Beam melting – EBM“, werden Infrarot Heizstrahler als Energielieferant eingesetzt, nennt man das Verfahren „Selektive Mask Sintering“ (Gebhardt, 2016a).

##### 2.2.3.4.1 Lasersintern (LS) oder Selektives Lasersintern (SLS)

Diese Begriffe werden meist in Zusammenhang mit der Verarbeitung von Kunststoffen verwendet. Der Bauraum ist mit Pulver gefüllt, beheizt und vollständig mit Schutzgas gefüllt. Darüber befindet sich ein Laserscanner, der die x-y Kontur des virtuellen Modells überträgt. Auch dieser Bauraum kann in der z-Ebene nach jedem Vorgang um eine Schichtdicke abgesenkt werden, um das Bauteil schichtweise aufzubauen (Gebhardt, 2016a).

Nimmt man die Nachteile wie geringere Genauigkeit und Reinigungsaufwand in Kauf bzw. sind sie für den Einsatzzweck akzeptabel, lässt sich eine Vielzahl von innovativen

Produkten mit guten mechanischen Eigenschaften wirtschaftlich herstellen (Breuninger et al., 2013b).

#### 2.2.3.4.2 Selektives Laserschmelzen (SLM)

Der Laser Sinter Prozess und das selektive Laserschmelzen sind vom Grundsatz her sehr ähnliche Verfahren und die Maschinen für beide Verfahren entsprechen sich weitgehend. Der SLM Prozess wurde entwickelt, um speziell sehr dichte metallische Teile zu fertigen. Es werden Faserlaser mit sehr hoher Strahlqualität eingesetzt, die auch metallische Pulver aufschmelzen können. Das Metallpulver wird nach dem CAD Modell auf der Bauplattform entsprechend einer Schichtdicke selektiv zu einem Schmelzbad aufgeschmolzen und erstarrt in der vorgesehenen Form durch Abkühlung. Die Bauplattform wird abgesenkt, neues Pulver aufgetragen und der Vorgang so oft wiederholt, bis das Bauteil fertiggestellt ist. Viele Metalle und Legierungen, sogar Kohlenstoffstähle, sind mit diesem Verfahren verarbeitbar. Der Bauraum kann beheizt werden, um das Verziehen des Bauteils beim Abkühlen zu vermeiden bzw. zu minimieren. Die resultierende Oberfläche ist rau und, falls entflammbare Metalle wie z. B. Magnesium und Titan eingesetzt werden, muss unter Schutzgasatmosphäre gearbeitet werden (Breuninger et al., 2013b; Gebhardt, 2016a).

#### 2.2.3.4.3 Elektronenstrahl-Schmelzen (EBM)

Ein weiteres dem SLS ähnliches Verfahren ist das Elektronenstrahl-Schmelzen. Statt eines Lasers wird zum Aufschmelzen ein Elektronenstrahl eingesetzt. Ein Vorteil ist die hohe Eindringtiefe durch die höhere Energie, damit können auch spezielle Legierungen auf Titan – oder Nickelbasis verarbeitet werden. Die Metallpulver werden schichtweise auf der Bauplattform aufgeschmolzen und erstarren durch Abkühlung. Im Unterschied zur Arbeit mit dem Laser muss beim Elektronenstrahl-Schmelzen unter Vakuum gearbeitet werden d.h. der Bauraum muss komplett abgedichtet sein. Der Prozess erlaubt durch sehr hohe Scangeschwindigkeit eine deutlich höhere Baugeschwindigkeit pro Schicht als die Arbeit mit dem Laser. Die Oberfläche muss jedoch häufig nachgearbeitet werden (Fastermann, 2012; Gebhardt, 2016a; Gieseke et al., 2016).

### 2.2.3.5 Layer Laminate Manufacturing (LLM)

Dieses Verfahren nutzt vorgefertigte Folien oder Platten und schneidet daraus die Konturen nach den Vorgaben des CAD Datensatzes aus. Anschließend werden die Lagen mit der Oberseite der vorhergehenden Schicht verbunden. Dies erfolgt z.B. durch Kleben oder mit Ultraschall. Als Materialien kommen neben Kunststoffen und Metallen auch Papier und keramische Werkstoffe zum Einsatz. Ein Vorteil des Verfahrens ist die schnelle Fertigung massiver Teile, jedoch können durch die entsprechende Materialauswahl auch fein konturierte Teile hergestellt werden (Gebhardt, 2016a). Durch das schichtweise Verkleben entstehen kaum innere Spannungen und somit wenig Verzug, dies wirkt sich positiv auf die Maßhaltigkeit des Bauteils aus.

### 2.2.3.6 Laminated Object Manufacturing (LOM)

Der älteste bekannte LLM Prozess ist das LOM, das bereits ab 1991 kommerziell verwendet wurde. Dieser Prozess arbeitet mit Papier von 0,07 bis ca. 0,2 mm Stärke als Baumaterial, dessen Unterseite mit einem Kleber beschichtet ist, der durch erwärmen aktiviert wird. Das Papier wird von einer Versorgungsrolle schichtweise in den Bauraum eingebracht. Durch eine Hitzерolle wird der Kleber aktiviert und die neue Schicht dadurch mit der unteren Lage verbunden. Ein Laser schneidet dann die Kontur nach der CAD Modellvorgabe exakt aus. Das überschüssige Material wird abgeschnitten und auf der gegenüberliegenden Seite durch eine Aufnahmerolle gesammelt. Prinzipiell kann jedes Plattenmaterial eingesetzt werden, das sich schneiden und mit der vorherigen Lage verbinden lässt. Nachteil des Verfahrens ist starke Rauchentwicklung und u.U. sogar lokale Flammenbildung, so dass in einem geschlossenen System mit Abzug gearbeitet werden muss (Gebhardt, 2016a; Gibson et al., 2015c; Hagl, 2015b).

### 2.2.3.7 Fused Layer Manufacturing (FLM)

Bei diesem Prozess wird vorgefertigtes thermoplastisches Material wie z.B. ein dünner Kunststoffdraht, durch geheizte Düsen aufgeschmolzen und als Strang schichtweise aufgetragen. Bei Verwendung von farbigem Grundmaterial können auch farbige Bauteile hergestellt werden (Gebhardt, 2016a). Fused Deposition Modeling (FDM) ist eine geschützte eingetragene Markenbezeichnung der Stratasys Company, die jedoch

häufig als generischer Begriff für FLM Verfahren verwendet wird, da es sich dabei um den ersten am Markt verfügbaren FLM Prozess handelt. Das Material wird durch Erhitzen aufgeschmolzen und durch eine Düse in den Bauraum extrudiert. Der Durchmesser der Düse – üblicherweise zwischen 0,1- 0,25 mm – bestimmt den Strangdurchmesser. Dieser entspricht annähernd der gewünschten Schichtdicke einer Schicht. Das aufgetragene Material erhärtet durch Abkühlung (Wärmeleitung in die bereits existierende Schicht) und bildet so die nächste feste Schicht. Während der Produktion sind bedingt durch das Verfahren Stützelemente erforderlich, die gleichzeitig durch eine zweite Düse aus einem anderen Kunststoff gefertigt werden. Die gleichzeitige Handhabung zweier verschiedener Materialien eröffnet grundsätzlich auch die Möglichkeit, Teile aus Mehrfachmaterial herzustellen (Gebhardt, 2016a). Für den FDM Prozess sind zahlreiche Kunststoffmaterialien wie z.B. Acrylnitril-Butadien-Styrol (ABS) und Mischungen mit Polycarbonat (PC) oder Polylactid (PLA) erhältlich. Das Verfahren ist für sehr komplexe Strukturen weniger geeignet und liefert eine schlechtere Oberflächenqualität als andere Verfahren. Ein Vorteil des Verfahrens sind günstige Kosten, dadurch ist es interessant für Firmen, die nur einen kleinen bis mittleren Bedarf an Prototypen haben. Ein Nachteil des Verfahrens ist die erforderliche aufwändige Nachbehandlung zur Entfernung des Stützmaterials (Breuninger et al., 2013b). Eine Limitierung des Verfahrens ergibt sich durch den strangförmigen Auftrag aus runden Düsen. Damit können keine scharfen Kanten und Ecken produziert werden. Der Radius des Durchmessers der Düse findet sich als Rundung sowohl in äußeren als auch in inneren Bereichen des Bauteils (Gibson et al., 2015d).

#### 2.2.3.8 Polymerjetting oder Poly-Jet Modeling (PJM)

Beim Polymerdrucken oder Polymerjetten erfolgt der Auftrag des monomeren fotosensitiven Baumaterials durch Druckköpfe, insofern kann es als 3D-Druckprozess betrachtet werden, der die Methoden des Inkjet Printing und der Stereolithografie verbindet. Die Bauweise des Druckers ist ähnlich einem 2D-Bürodrucker. Ein Vielfachdüsen-Druckkopf bringt das Baumaterial direkt auf die Bauplattform auf. Zwei Hochleistung-UV-Lampen, die synchron mit dem piezoelektrischen Druckkopf bewegt werden, bilden zwei Lichtvorhänge und verfestigen dadurch das Material sofort. Die Fertigstellung des Bauteils erfolgt also durch UV Energie zur Polymerisation analog zum Stereolithografieprozess. Die erzielte Schichtdicke ist sehr fein (0,016 mm),

dadurch ergeben sich sehr glatte Oberflächen. Während des Bauprozesses sind Stützen notwendig, die von einem zweiten Düsensatz gleichzeitig erstellt werden (Gebhardt, 2016a).

Ein Vorteil des Verfahrens ist die Verfügbarkeit von Materialien verschiedener Härte und in verschiedenen Farben, die hohe Genauigkeit sowie die einfachere Handhabung bezüglich notwendiger Arbeitsschutzmaßnahmen im Vergleich zum Stereolithografieverfahren. Ein Nachbelichten zur endgültigen Aushärtung ist ebenfalls nicht erforderlich. Das Verfahren wird bereits eingesetzt um z.B. die Geometrie der Otoplastik eines Hörgerätes herzustellen (Breuninger et al., 2013b; Hagl, 2015b).

Die hohen Materialkosten und der hohe Materialverbrauch für die Stützen sind Nachteile des Verfahrens. Durch geeignete Materialauswahl wird jedoch sichergestellt, dass das Stützmaterial automatisiert ausgewaschen werden kann (Gebhardt, 2016a).

#### 2.2.3.9 Digital Light Processing (DLP) - Lampen-Masken-Verfahren

Dieses Verfahren der Fotopolymerisation benützt einen DLP-Projektor als UV-Lichtquelle. Der Projektor befindet sich unten, das lichtensitive Harz oberhalb in einem Behälter mit Glasboden. Die Kontur der Schicht wird auf die Unterseite des Glasbodens und dadurch auf das Harz projiziert. Die Schichtdicke wird durch eine Bauplattform bestimmt, die von oben in das Harz gefahren wird, bis zwischen der vorhergehenden Lage und dem Glasboden genau die gewünschte Dicke verbleibt. Nach dem Aushärten wird diese Bauplattform um den Betrag einer Schichtdicke hochgefahren, so dass Harz nachfließen kann, dann wird der Vorgang wiederholt. Im Unterschied zu den anderen Verfahren wird das Bauteil auf dem Kopf stehend durch Anheben statt durch Absenken der Bauplattform hergestellt. Dieses Verfahren ist aufgrund der begrenzten Materialmenge und begrenzter Haltbarkeit des Harzes im Reservoir nur für kleine Bauteile geeignet. Weitere Nachteile sind die hohen Materialkosten und die erforderlichen Stützstrukturen. Vorteile sind der schnelle Materialwechsel, die Schnelligkeit des Aufbaus, da in einem Arbeitsgang eine gesamte Lage gefertigt wird und die gute Auflösung (Al-Nawas und Goetze, 2017; Gebhardt, 2016a; Gibson et al., 2015e).

### 2.2.3.10 Laserauftragsschweißen

Mit diesem Prozess können metallische Strukturen hergestellt werden. Er wird häufig für Reparaturanwendungen eingesetzt. Verarbeitbare Materialien sind z.B. Eisen-, Kobalt- und Nickelbasislegierungen, Aluminium und Titan (Gieseke et al., 2016).

Laserauftragsschweißen umfasst u.a. die Prozesse Direct Metal Deposition (DMD), Laser Metal Forming (LMF) oder Laser Engineered Net Shape (LENS). Das LENS-Verfahren arbeitet mit einem nicht-geschichteten CAD Modell (CAD Solid Model). Ein Hochleistungslaser erzeugt ein Schmelzbad, in das das Metallpulver eingetragen wird (Hagl, 2015b).

Im englischen Sprachgebrauch werden diese Verfahren auch unter dem Oberbegriff Directed Energy Deposition (DED) zusammengefasst. Das Baumaterial kann sowohl als Pulver als auch in Draht- oder Bandform vorliegen (Gibson et al., 2015a). Eine Werkzeugoberfläche kann z.B. repariert werden, indem Metallpulver mit einer Düse aufgetragen und während des Auftrags simultan mit dem Laser aufgeschmolzen wird, um sich mit dem Werkstück zu verbinden. Das Verfahren wird auch zur Veredlung von Oberflächen und zur Erhöhung ihrer Widerstandsfestigkeit eingesetzt, auch Metallprototypen können hergestellt werden (Fastermann, 2012).

Vorteile des Verfahrens sind die relative Schnelligkeit bei der Herstellung großer Bauteile und die Möglichkeit der Reparatur teurer Bauteile z.B. in Luft- und Raumfahrt. Nachteile sind die hohen Kosten und der hohe Energiebedarf (Hagl, 2015b).

### 2.2.3.11 Contur Crafting (CC)

Dieses Extrusionsverfahren wurde an der University of Southern California entwickelt, um sehr große Bauteile schnell und kostengünstig zu fertigen. Das Material – z.B. fließfähiger schnellbindender Beton - wird schichtweise bandförmig durch Düsen aufgetragen und baut so z.B. eine Wand oder ein ganzes Gebäude auf. Der Werkstoff wird im Unterschied zu den bisher beschriebenen Verfahren nicht thermisch sondern chemisch ausgehärtet (Hagl, 2015a).

Dicke Schichten ergeben weniger präzise Konturen. Dies wird durch den Einsatz eines oder mehrerer Schaber (scraping tool) vermindert, der die Außenseite der Schichten nach dem Auftragen entsprechend des Modells glättet (Gibson et al., 2015d).

Vorteil des Verfahrens ist, dass z.B. nach einer Naturkatastrophe innerhalb kürzester Zeit komplette Häuser gebaut werden könnten. Der Drucker ist größer als das zu errichtende Gebäude und bringt mittels eines mobilen Roboters Schicht für Schicht auf. Die Schichtdicke beträgt fünf bis zehn Millimeter, dadurch wird ein sehr schneller Baufortschritt erzielt. Ein komplettes Haus kann damit innerhalb von ca. 24 Stunden gedruckt werden, inklusive benötigter Installationsschächte für Elektrik, Lüftungen, Rohre etc., die im Modell bereits berücksichtigt sind. Vorteile des Verfahrens sind seine Schnelligkeit, wenig Baustoffabfall und weniger Lärmbelästigung (Fastermann, 2012).

### **2.3 Computertomographie**

Der englische Physiker Godfrey Hounsfield entwickelte maßgeblich die Computertomographie (CT) und führte Anfang der 1970er den ersten kommerziell erhältlichen CT-Scanner in die Praxis ein (Radeleff und Kauffmann, 2011). Das erste Gerät hatte nur einen einzelnen Detektor, heutige Geräte besitzen im Vergleich hierzu über 4.000 Detektoren (Kramer et al., 2009).

Bei der CT handelt es sich um ein Röntgenschnittverfahren, das zum Bildaufbau einen Computer verwendet. Der untersuchte Körper wird in Querschnittsbildern dargestellt (Radeleff und Kauffmann, 2011). Dieses Verfahren hat sich inzwischen sowohl in der Human- als auch in der Veterinärmedizin als ein relativ kostengünstiges und schnell durchführbares Untersuchungsverfahren etabliert. Es wird bevorzugt bei der Darstellung knöcherner Strukturen wie dem Schädel, der Wirbelsäule oder des Beckens eingesetzt, aber auch zur Diagnose intrakranieller, -thorakaler oder -abdominaler Weichteilpathologien. Ein Nachteil der CT ist die Röntgenstrahlenexposition des untersuchten Individuums, welche aber bei Geräten der neuen Generationen durch eine immer kürzer werdende Untersuchungsdauer deutlich reduziert worden ist (Sonntag und Mihaljević, 2009).

Wie bei der konventionellen Radiologie, passiert bei der CT ein Strahlenbündel mit definierter Strahlendosis aus einer Röntgenröhre den untersuchten Körper (Radeleff und Kauffmann, 2011). Jedoch geschieht dies rotierend und wird dadurch ermöglicht, dass sich die Röntgenröhre um die Längsachse des untersuchten Körpers dreht. Auf der gegenüberliegenden Seite befindet sich ein rotierendes Detektorsystem. Es

misst die Reststrahlendosis nach Abschwächung, d.h. nach Absorption und Streuung im Körper (Sonntag und Mihaljević, 2009). Die Röntgenröhre und der Strahlendetektor sind in der sogenannten „Gantry“ angebracht. Durch sie wird bei der heutzutage üblichen Spiral-CT der Tisch auf dem der Patient liegt während der Untersuchung kontinuierlich nach vorne geschoben (Tischvorschub pro Röntgenrotation in mm) (Radeleff und Kauffmann, 2011). Dieses Scannen erfolgt vollautomatisch und wird von einem Computersystem gesteuert. Es kann zwischen Einzelschicht- und Spiralaufnahmetechnik unterschieden werden (Laubenberger und Laubenberger, 1999b; Sonntag und Mihaljević, 2009). Die Daten werden in DICOM-Datensätzen erfasst, sie können nachträglich bearbeitet und auf verschiedene Art dargestellt werden.

Die gemessene Strahlung in den verschiedenen Winkelstellungen der Strahler-Detektor-Kombination wird in digitale Signale umgewandelt und daraus Röntgenbilder generiert. Mit speziellen Projektionsprogrammen werden einzelne Querschnittsbilder errechnet. Ein Querschnittsbild wird aus der Matrix vieler kleiner Quadrate - Pixel - gebildet (Radeleff und Kauffmann, 2011; Sonntag und Mihaljević, 2009). Der Begriff Pixel setzt sich aus „picture“ (Bild) und „elements“ (Elemente) zusammen (Langenscheidt, 2018). Jedes Pixel ist die zweidimensionale Abbildung eines dreidimensionalen Gewebeareals, das als Voxel bezeichnet wird. Bei der dritten Dimension dieses Gewebeblocks handelt es sich um die Dicke des Schnittbildes. Je mehr Pixel die Matrix bilden, umso höher ist die Auflösung (Sonntag und Mihaljević, 2009; Thrall, 2013). In der Regel besteht die Matrix aus 512x512 Pixeln. Je nach Breite und Höhe des erfassten Körpers oder Objektes variiert also die Größe des Areal, die ein Pixel abbildet.

Auf dem CT-Bild wird der Intensitätswert eines Pixels durch Graustufen dargestellt. Die Grauwertstufen werden einem Gewebe in Abhängigkeit von seinen Eigenschaften zugeordnet. Jedes Gewebe hat einen charakteristischen Abschwächungskoeffizienten. Um die Schwächungskoeffizienten vergleichbar zu machen, entwickelte Godfrey Hounsfield die „Hounsfield-Einheiten“ (HE; englisch Hounsfield Unit, HU). Damit können die Schwächungswerte in Relation zu einem Referenzschwächungsobjekt in HE angegeben werden. Die Skala der HE wurde folgendermaßen festgelegt: Als erster Fixpunkt der Skala dient der Dichtewert von



Wasser, ihm ist ein Wert von 0 HE zugeordnet. Als zweiter Fixpunkt wird der Dichtewert von Luft mit -1000 HE festgesetzt. Außer Knochen (300-3000 HU) haben die meisten Gewebe des menschlichen Körpers einen Wert zwischen -100 und +100 HE. (Laubenberger und Laubenberger, 1999b; Radeleff und Kauffmann, 2011; Sonntag und Mihaljević, 2009). Gewebearten, die dichter sind als Wasser, schwächen die Röntgenstrahlen stärker und weisen höhere, positive HE auf. So weist Knochenpongiosa bis zu 300 HE und Knochenkompakta bis zu 3000 HE auf. Luft und Fett absorbieren die Strahlung in geringerem Maße und haben daher negative HE-Werte (Laubenberger und Laubenberger, 1999b; Sonntag und Mihaljević, 2009).

In der CT können insgesamt 4096 ( $2^{12}$ ) Dichtewerte unterschieden werden, das menschliche Auge kann hingegen lediglich circa 20 Grautöne differenzieren (Radeleff und Kauffmann, 2011). Um den untersuchten Bereich in für das menschliche Auge wahrnehmbare Graustufen aufzuteilen, können sogenannte Fenstereinstellungen vorgenommen werden. Diese ermöglichen einzelne Gewebe anhand des eingegrenzten Intensitätsbereichs optimiert betrachten zu können. Bei der Erstellung der CT-Bilder kann eine Reihe von Artefakten entstehen. Neben gerätebedingten Artefakten oder Artefakten durch Bewegungen, kann es zum Effekt der Aufhärtung der Strahlung kommen (Sonntag und Mihaljević, 2009). Dabei werden vor allem die energieärmeren Anteile der Strahlung absorbiert, wodurch es zu einer relativen Zunahme der energiereichen kommt (Laubenberger und Laubenberger, 1999a). Den Detektor erreicht vornehmlich der härtere Anteil der Strahlung und wird somit auch gemessen. Die führt zu einer stärkeren Körnung des Bildes und kann zu weiteren Artefakten in Form von Streifen führen.

## **2.4 3D-Druck in der Veterinärmedizin**

### **2.4.1 Allgemeine und klinische Anwendung**

Die Errungenschaft Objekte dreidimensional drucken zu können, eröffnet auch in der Veterinärmedizin eine große Vielfalt an Einsatzmöglichkeiten.

Gelenkprothetik, Neurochirurgie, Strahlentherapie, anspruchsvolle orthopädische Eingriffe sowie andere komplexe medizinische Techniken gehören längst zum Alltag

vieler Tierärztinnen und Tierärzte. Hierzu ist in der Regel der Einsatz von Bildgebungsverfahren zur Vorbereitung und Planung notwendig. Additive Manufacturing erweitert diese Möglichkeiten und hilft individuelle therapeutische Lösungsansätze zur Versorgung von Haustieren bereit zu stellen, vor allem in der orthopädischen Chirurgie (Harrysson et al., 2015).

Ein Einsatzgebiet des dreidimensionalen Druckens von anatomischen Modellen ist die Planung und Vorbereitung von Operationen. Mit Hilfe des 3D-Drucks können auf Grundlage von CT-Daten des Patienten exakte Kopien des zukünftigen Operationsfeldes erstellt werden. Diese Art der Visualisierung ermöglicht ein besseres Verständnis der Tierärztinnen und Tierärzte, der Studierenden und der Tierbesitzer in Bezug auf die Gegebenheiten und das kurative Vorhaben der Therapie. In sehr diffizilen Fällen kann dies von besonderem Vorteil sein. Im Falle von drei Hunden mit Exophthalmus, der jeweils durch eine Umfangsvermehrung im Bereich des Auges verursacht wurde, erwiesen sich die Operationsmodelle als sehr hilfreich in der Planung und anschließenden Durchführung der operativen Eingriffe. Die Modelle wurden auf Grundlage von CT-Scans angefertigt (Dorbandt et al., 2016).

#### 2.4.2 3D-Druck in der veterinärmedizinischen Ausbildung

Eines der ersten anatomischen Präparate, die Studierende der Tiermedizin in den Händen halten, sind die Knochen des Skeletts, deren morphologische Strukturen es zu lernen gilt. Das Skelett eines Rindes wurde mit 3D-Drucktechnik nachgebildet und in der Lehre verwendet (Li et al., 2018). Die Studierenden nahmen es gut an und aufgrund seiner Eigenschaften kann es als Alternative zu nativen Knochen dienen. Anatomisches Anschauungsmaterial zur Präparation ist essentiell für die tierärztliche Ausbildung. Eine Studie von Schoenfeld-Tacher et al. (2017), untersuchte, ob durch Additive Manufacturing erstellte Modelle von Hundehirnen plastinierte oder formalinfixierte Präparate ersetzen können. Nach einem Leistungstest der Probanden kamen sie zu dem Ergebnis, dass die Modelle ein gleichwertiges Surrogat für die Lehre der veterinärmedizinischen Neuroanatomie darstellen (Schoenfeld-Tacher et al., 2017). Die Erzeugung einer exakten Kopie eines verweslichen Präparationsobjekts ist ein wirkungsvolles Instrument für die Demonstration und Kommunikation im Unterricht (Doney et al., 2013).

Auch das Übungsmodell eines Hundehohres zum Erlernen des otoskopischen Untersuchungsganges kam 2017 in einer Studie zum Einsatz. Es wurde aus flexiblem Kunststoff hergestellt und dann Studierenden in Kursen zur Verfügung gestellt. In der nachfolgenden subjektiven Evaluation stellte sich heraus, dass die Studierenden das Übungsmodell vor der ersten otoskopischen Untersuchung am lebenden Tier gegenüber der theoretischen Vorbereitung als sehr hilfreich empfanden (Nibblett et al., 2017).

Welche entscheidende Rolle das Lernen und Üben an Modellen spielt, zeigte auch eine Studie aus dem Jahr 2016, bei der Studierende der Veterinärmedizin auf die erste Durchführung einer Ovariohysterektomie an einem lebenden Tier vorbereitet wurden. Die Gruppe, die zusätzlich zu einer schriftlichen Anleitung und einem Video auch an einem Simulationsmodell üben konnte, übertraf die andere Gruppe ohne Simulationsmodell in ihrer Lernleistung (Read et al., 2016). Preece et al. (2013) stellten fest, dass das Lernen mit 3D-Druckmodellen (mehrfarbig und multimateriell) einer distalen Pferdegliedmaße mit Bandstrukturen zu signifikant besseren Lernleistungen der Veterinärstudierenden im anatomischen Unterricht gegenüber dem Lernen mit einem interaktiven 3D-Computermodell oder Textbüchern führte (Preece et al., 2013).

Die Aneignung von klinischen Kompetenzen erfordert viel praktisches und theoretisches Wissen. Die Grundlage, um diese Kompetenzen erwerben zu können ist die fundierte Kenntnis der anatomischen Strukturen. Dazu ist räumliche Vorstellungskraft von Nöten, welche durch den Gebrauch von 3D-Modellen gefördert werden kann (Boyd et al., 2015). Die Bedeutung der räumlichen Vorstellungskraft beim Erlernen der Anatomie haben Berney et al. (2015) untersucht. Der Erfolg des Erlernens und Beherrschens von räumlichen Zusammenhängen und praktischen Fähigkeiten stand in enger Verbindung mit dem individuellen räumlichen Vorstellungsvermögen. Der Einsatz von 3D-Modellen in der Lehre fördert das räumliche Vorstellungsvermögen, was Studierende in diesem Bereich beim Erlernen von Kompetenzen unterstützt (Berney et al., 2015). Auch 3D-Lernmodelle in Softwareprogrammen stellen eine vielversprechende Ergänzung der bisherigen Lern- und Lehrmittel dar (Sunico et al., 2012).

## 2.5 3D Druck in der Humanmedizin

Der 3D-Druck von anatomischen Modellen ist eine innovative Möglichkeit, Lehrmaterialien für die vorklinische Ausbildung bereit zu stellen. In einer Studie gingen Lim et al. (2016), der Frage nach, ob die Effektivität des Lernens mit 3D-gedruckten Modellen von Herzen mit der an natürlichen Präparaten vergleichbar ist. Die Untersuchungsergebnisse zeigten an, dass 3D-gedruckte Modelle in der Lage sind angemessene Supplemente zu herkömmlichen nativen Präparaten darzustellen und ihnen in manchen Punkten in ihren Eigenschaften überlegen sein können (Lim et al., 2016).

Ebenfalls im Jahr 2016 veröffentlichte O'Reilly et al. (2016) eine Studie über den Einsatz von 3D-gedruckten anatomischen Modellen aus mehreren Materialarten zur Darstellung der unteren Extremität inklusive der Blutgefäße. Die Modelle erwiesen sich gleichwertig im Vergleich zu verweslichen Präparaten. Zusätzlich war eine sonografische Untersuchung der Blutgefäße möglich, was ihre Einsatzfähigkeit als Simulationsmodelle noch vorteilhafter machte. Mogali et al. (2018) ermittelten den Wert von 3D-Druckmodellen zur Stoffvermittlung gegenüber Plastinaten aus Sicht der Studierenden. Untersuchungsobjekt war eine obere Gliedmaße. Als klare Vorteile der Drucke zeigten sich ihre Flexibilität, die anatomisch korrekte Wiedergabe der Strukturen, ihre Handlichkeit und hohe Anzahl, in der sie sich herstellen ließen, jedoch waren sie teuer in der Herstellung und weniger detailreich als die Plastinate.

Farb- und Multimaterial-3D-Druck machen es möglich eine Vielzahl von Gewebeeigenschaften zu integrieren. Daher können sie nicht nur in der Lehre eingesetzt werden, sondern auch die Entwicklung medizinischer Geräte verbessern, wenn sie im Vorfeld oder anstelle von aufwändigen in-vivo Studien eingesetzt werden. Multimaterial-3D-Druck-Modelle bieten realistische, für die Symptomatik einer Erkrankung spezifische Anatomie (Stratasys, 2018a).

Ebenfalls geeignet sind solche Modelle für den Einsatz als klinische Schulungsmodelle in der Ausbildung von Medizinerinnen und Medizinern, um praktische Erfahrungen zu ermöglichen. Da die Technik in der Lage ist alle möglichen Arten von Gewebe – von Weichteilgewebe und Muskeln über Knorpelgewebe bis zu Knochen – zu simulieren, können alle notwendigen Merkmale einschließlich subtiler visueller und taktiler Details berücksichtigt werden (Stratasys, 2018b). Damit ermöglicht es der 3D-Druck greifbare

und korrekte Nachbildungen von anatomischen, physiologischen und pathologischen Strukturen zu erstellen (AbouHashem et al., 2015; McMenamin et al., 2014). Der 3D-Druck stellt eine der neuen, vielversprechenden Technologien dar, um die Ausbildung medizinischen Fachpersonals verbessern zu können (AbouHashem et al., 2015).

Multimaterial 3D-Druck von Lernmodellen ermöglicht es einzelne Strukturen optimal darzustellen. So kann zum Beispiel das Parenchym einer Leber transparent gedruckt werden, um den Verlauf der intrahepatischen Blutgefäße aufzuzeigen (Kong et al., 2016) oder es können maßgeschneiderte Modelle zur biomechanischen Illustration wie zum Beispiel des Kehlkopfes und der Stimmbänder angefertigt werden (Smith und Jones, 2017).

Solch eine Darstellung und die Verwendung von anatomischen 3D-Druckmodellen in der medizinischen Ausbildung fördern das räumliche Vorstellungsvermögen und das Verständnis der räumlichen Ausdehnung anatomischer Strukturen (Knoedler et al., 2015; Kong et al., 2016; Pujol et al., 2016). Knoedler et al. (2015) zeigten, dass der Einsatz von 3D-gedruckten Modellen die Ermittlung des „nephrotic scores“ bei der Beurteilung von Nierentumoren signifikant verbesserten im Gegensatz zur zweidimensionalen Darstellung im CT-Bild. Dies trifft besonders auf Studierende des vorklinischen Abschnitts des Studiums zu.

Der positive Effekt auf die Vermittlung von Lerninhalten macht sich in der frühen Phase der Ausbildung (1. bis 3. Ausbildungsjahr) besonders bemerkbar. Chirurgen mit Erfahrung profitieren nicht mehr so deutlich (Knoedler et al., 2015). In der Weiterbildung junger Assistenzärzte in der kardiologischen Intensivpflege konnten 3D-Drucke von Herzen mit typischen angeborenen Herzfehlern mit großem Erfolg eingesetzt werden, um die Versorgung der Patienten bei postoperativen Komplikationen zu verbessern (Costello et al., 2015).

3D-Druckmodelle realer Körper sind in der Lage individuelle Variationen in der Anatomie der einzelnen gesunden oder kranken Menschen abzubilden und sie in der Ausbildung einzusetzen (Pujol et al., 2016; Smith et al., 2018) Der Druck von dreidimensionalen Modellen in verschiedenen, maßstabsgetreuen Größen eröffnet neue Möglichkeiten: verkleinerte Modelle können leicht transportiert und für das private

Lernen genutzt werden, vergrößerte Modelle versetzen in die Lage selbst kleine Strukturen detailliert studieren zu können (Smith et al., 2018) sofern die zugrundeliegenden CT-Datensätze in entsprechend hoher Qualität und Auflösung zur Verfügung stehen.

## **2.6 Grundlagen des Lernens**

Laut den Autoren des Buches Biologie, 2011, versteht man unter dem Begriff Lernen die Modifikation von Verhalten durch Erfahrung und unter Gedächtnis die Fähigkeit des Nervensystems, zu behalten, was gelernt und was erfahren wird (Purves et al., 2011). Als deklaratives oder explizites Gedächtnis werden Erinnerungen an Ereignisse, Menschen, Informationen und Dinge bezeichnet. Der Mensch ist in der Lage sie bewusst abzurufen und zu beschreiben. Wohingegen sich die Inhalte des prozeduralen oder impliziten Gedächtnisses nicht bewusst abrufen und beschreiben lassen. Es sind Erinnerungen durch die der Mensch eine motorische Leistung erbringt. Prozedurale Gedächtnisinhalte werden gebildet, wenn man Fahrrad fahren, Nähen oder Präparieren lernt (Purves et al., 2011).

Beide Arten der Gedächtnisleistung sind als kognitive Fähigkeiten und Fertigkeiten auch in der universitären Ausbildung Studierender und somit auch junger Tierärztinnen und Tierärzte elementar. Die intellektuellen Fertigkeiten und Fähigkeiten, die an Hochschulen gefördert werden, umfassen größtenteils den Bereich, der das Verstehen beinhaltet. Das heißt, wenn Studierende Informationen bekommen, erwartet man, dass sie verstehen worüber gesprochen wird und dass sie von den darin enthaltenen Ideen Gebrauch machen können. Die Information kann sowohl in schriftlicher, verbaler oder symbolischer Form als auch als konkretes, physisches Material vorliegen oder soll anhand einer physikalischen Demonstration begriffen werden (Bloom et al., 1973). Studierende sollen in die Lage versetzt werden, dieses Wissen bei Bedarf zu transferieren, um es auf neue Probleme und Situationen anzuwenden. Dies erfordert eine Analyse und das Verstehen der neuen Situationen. Weiterhin setzt es eine Grundlage an Wissen oder Methoden voraus, die benutzt und angewendet werden können (Bloom et al., 1973). Diese müssen zuvor erlernt werden. Variablen, die den Lernerfolg beeinflussen, sind neben anderen die erlebte Qualität des Lernangebots und die Förderung der Lernmotivation (Kerres, 2000).

Jede Person bevorzugt natürlicherweise einen bestimmten Stil, sich Wissen anzueignen. So sprechen Studierende auf verschiedene Lehrmethoden unterschiedlich an. Der Grund dafür ist, dass unterschiedliche Persönlichkeiten verschiedene Anreize als motivationsanregend empfinden. Es lassen sich sieben Lerntypen unterscheiden. Der **visuelle Typ** bevorzugt es mit Bildern zu lernen, der **auditive Typ** kann Gehörtes leicht in Erinnerung behalten. Der **verbale Typ** lernt bevorzugt aufgrund von Worten in gesprochener oder geschriebener Sprache. Der **physische Typ** gebraucht gerne die Hände oder Bewegung um zu lernen. Logisch-analytisches Denken charakterisiert die Herangehensweisen des **logischen Typen**. Der **soziale Typ** lernt gerne in Gruppen, wohingegen der **zurückgezogene Typ** im Selbststudium für sich alleine Kraft schöpft. Jede Person bevorzugt gleichzeitig mehrere Lernstile. Eine gute Mischung der Lernstile in der Lehre ermöglicht es viele Lernende anzusprechen und erleichtert den Zugang zu wissenschaftlichen Inhalten (Creß, 2006; Reitzer, 2014). 3D-Anschauungsmodelle bereichern diese Mischung und eignen sich daher als sinnvolle Ergänzung des anatomischen Unterrichts.

Die Verknüpfung von taktiler Wahrnehmung und visueller Information, unterstützt den Lernprozess (Hamza-Lup et al., 2011). Eine sinnvolle motorische Interaktion mit dem Lehrobjekt beschleunigt die Aneignung begrifflichen Wissens und fördert die flexible Handhabung von Lehrinhalten (Soden-Fraunhofen et al., 2008).

## 2.7 Herstellung nativer Präparate

### 2.7.1 Knochenpräparate

Skelettpräparate werden klassischerweise durch Abfleischen, Weiche, Mazeration, Entfettung und anschließendes Bleichen hergestellt. Die Autoren Piechocki und Altner (2007d) sowie Niederklopper und Troxler (2001) beschreiben die allgemeinen Grundlagen sowie spezielle Vorgehensweisen.

#### 2.7.1.1 Vorbehandlung

Nach dem Enthäuten und Ausweiden des Tieres werden die Knochen möglichst abgefleischt. Hierzu empfiehlt es sich die Extremitäten sowie den Kopf abzutrennen (Piechocki und Altner, 2007c).

### 2.7.1.2 Fäulnismazeration

Die Fäulnismazeration wird eingesetzt, um das an den Skelettelementen haftende Gewebe ohne Beschädigung der Knochensubstanz vollständig abzulösen (Piechocki und Altner, 2007c). Es bestehen mehrere Möglichkeiten:

Als erstes zu nennen ist die **Kaltwasser-Mazeration**, es ist das einfachste Verfahren. Ein Nachteil dieser Methode ist die starke Geruchsentwicklung sowie die bis zu monatelange Dauer. Sie eignet sich bei porösem Knochenmaterial oder Knorpelskeletten von Embryonen.

Eine weitere Methode ist die **Warmwasser-Mazeration**, sie verläuft am raschesten. Bei einer Temperatur von 30-40°C dauert sie fünf bis sechs Tage. Sie kann aber auf bis zu drei Wochen ausgedehnt werden. Die Tätigkeit der Mikroorganismen setzt bei frischem Knochenmaterial von selbst ein. Um Verfärbungen zu vermeiden, dürfen die Knochen nicht über den Flüssigkeitsstand hinausragen. Damit sich die Knochen später gut entfetten lassen, empfiehlt es sich den durch die Mazeration in den Knochen gelösten Leim direkt zu entfernen. Auch bei der Warmwasser-Mazeration kann es zu einer unangenehmen, intensiven Geruchsentwicklung kommen (Piechocki und Altner, 2007c).

### 2.7.1.3 Skelettierung durch Tiere

Für die Skelettierung durch Kleinstlebewesen eignen sich neben Speckkäfern ebenso die Larven des Mehlkäfers, der Kleidermotte oder Schaben. Es ist genauestens darauf zu achten, dass sie sich nicht unsachgemäß in den Räumlichkeiten verbreiten können (Piechocki und Altner, 2007c).

Der Einsatz von Speckkäfern (*Dermestes laudarius*) wurde 1933 erstmals von Hall und Russell (1933) beschrieben. Die Kleinstlebewesen werden in speziellen Behältnissen gehalten und die abgefleischten Knochen hineingelegt. Es lassen sich ausgezeichnete Ergebnisse erzielen, da feinste Skeletteile und Knochenstrukturen ohne Schaden erhalten bleiben. Dies ist im Besonderen bei Schädelknochen und ihren Binnenstrukturen von großer Bedeutung. Die Fraßleistung der Kleinstlebewesen lässt sich durch verschiedene Parameter erhöhen. Das kann zum Beispiel die Temperatur oder ein zeitweiliges, vorangehendes Fasten der Tiere sein (Piechocki und Altner, 2007c).



#### 2.7.1.4 Chemische Methoden

Im Rahmen der chemischen Methoden kann mit organischen oder anorganischen Mazerationslösungen gearbeitet werden. Eine organische Substanz, die der Mazerationslösung hinzugefügt werden kann, ist Trypsin. Trypsin ist eine Peptidase, es wirkt proteo- und lipolytisch, was zur Schädigung und zum Zerfall der Zellen führt. Die penetrante Geruchsentwicklung, die den Knochen auch nach Abschluss der Behandlung anhaften bleibt, ist jedoch von Nachteil. Weitere Substanzen mit weniger Geruchsentwicklung sind Pepsin, Papain, handelsübliche Waschmittel und Biozym SE (Piechocki und Altner, 2007c). Enzyme wie Papain weisen in der Regel deutliche Sicherheits- und Gesundheitsrisiken auf (Mairs et al., 2004). Piechocki und Altner (2007c) beschrieben die Anwendung von Biozym SE als effektives Mazerationsmittel, das sich in der Praxis gut bewährt hat, da es nach kurzer Zeit zu weitgehend entfleischten Präparaten führt. Es handelt sich um eine eiweißspaltende Enzymlösung, die auch als Waschmittelzusatz Verwendung findet.

Anorganische Mazerationslösungen ermöglichen ein schnelleres Resultat, jedoch kann es bei ungenügender Überwachung der Knochen zu Beschädigungen der Oberfläche oder gar zur Vernichtung kommen. Als chemische Agenzien zur Behandlung können neben weiteren Ammoniak, Kali- oder Natronlauge, Natriumhydrogencarbonat, Natriumperoxid sowie verdünnte Schwefelsäure verwendet werden (Piechocki und Altner, 2007c).

Neuere Studien zeigen, dass eine Mazeration mit Detergenzien wie sie in handelsüblichen Waschmitteln enthalten sind, ebenfalls gute Ergebnisse erzielen. Gleichzeitig ergeben sich beim Einsatz solcher Detergenzien deutlich geringere Probleme bezüglich des Arbeits- und Gesundheitsschutzes (Mairs et al., 2004).

#### 2.7.1.5 Entfettungsverfahren

Laut Piechocki und Altner (2007d) wird die Entfettung vorwiegend aus ästhetischen Gründen vorgenommen. Allerdings ist eine gründliche Entfettung ein entscheidender Faktor für die Haltbarkeitsdauer der Präparate. Der Verlust vieler Stücke in Museen, Sammlungen oder Instituten hätte durch eine chemisch neutrale und dauerhafte Konservierung verhindert werden können (Niederklopper und Troxler, 2001).

Die Warm- oder Heißentfettung bei 20-60°C wird in geschlossenen Fettextraktionsanlagen vorgenommen. Große Entfettungsanlagen stehen in der Tiermedizin jedoch oftmals nicht zur Verfügung (Niederklopper und Troxler, 2001). Zur Fettextraktion sind folgende Mittel geeignet: Petrolbenzin, Schwefelether, Tetrachlormethan (nur in geschlossenen Anlagen erlaubt), Trichlorethylen (schädigende Dämpfe), Schwefelkohlenstoff (leichtentzündlich), Xylol und Soda-Lösung (Piechocki und Altner, 2007c). Einige der früher eingesetzten Lösungsmittel, wie Methylenchlorid und Perchlorethylen aus der Gruppe der chlorierten Kohlenwasserstoffe, sind nicht mehr zugelassen oder aufgrund ihrer giftigen Eigenschaften nur in geschlossenen Systemen erlaubt. Aceton und Benzin können angesichts ihrer leichten Entzündlichkeit nur für eine Kaltentfettung angewendet werden. Für den Einsatz potentiell gefährlicher Stoffe müssen sowohl aufwändige und strikte Maßnahmen und Vorschriften hinsichtlich der Arbeitssicherheit und der Laboreinrichtung als auch des Personenschutzes eingehalten werden (Niederklopper und Troxler, 2001).

#### 2.7.1.6 Weitere Verarbeitung

Abhängig von ihrer Verwendung können die Knochen nach Abschluss der Bearbeitung gebleicht und/oder eine Oberflächenversiegelung durchgeführt werden. Um den Knochen eine einheitliche Farbe zugeben, besteht die Möglichkeit sie mit Wasserstoffperoxid oder Chlorkalk zu bleichen. Das Bleichen der Knochen erfolgt in der Regel aus ästhetischen Gründen (Niederklopper und Troxler, 2001; Piechocki und Altner, 2007c).

#### 2.7.2 Nasspräparate mit Formalin

Nasspräparate werden für wissenschaftliche Zwecke oder Unterrichtszwecke konserviert. J. Blum führte 1893 Formalin als Konservierungsflüssigkeit für zoologische und anatomische Objekte ein. Durch seine antiseptische Wirkung unterbindet Formalin bereits in niedriger Konzentration die Tätigkeit von Fäulnisbakterien. Zusätzlich besitzt Formalin eine relativ gute Diffusionsgeschwindigkeit, um nicht allzu dicke Organe zügig zu durchdringen. Die behandelten Objekte halten sich jahrelang (Piechocki und Altner, 2007a). Nachteile bei der Anwendung von Formalin sind zum einen das Erstarren des Gewebes bei zu

hoher Konzentration sowie der Verlust der natürlichen, ursprünglichen Farbe der Objekte. Von größerer Bedeutung ist zum anderen die gesundheitliche Gefährdung sowohl des Personals als auch der Anwender. Es kann zu Schleimhautreizungen der Atemwege und zu Ekzembildung an der Haut kommen (Piechocki und Altner, 2007a). Seit 2008 wird Formaldehyd als krebserregend eingestuft (Parlament und Rat der EU, 2008).

### 2.7.3 Plastination

Bei dem Verfahren der Plastination werden Gewebswasser und Gewebefett durch einen Reaktionskunststoff ausgetauscht. Die verweslichen Objekte werden so imprägniert. Die erzeugten Präparate sind realitätsnah, strapazierfähig und lange haltbar. Die Methode wurde 1977 von Dr. Gunther von Hagens entwickelt (Piechocki und Altner, 2007b; von Hagens, 1985). Heutzutage werden Kunststoffe wie Silikon S10 zur Präparation von Plastinaten verwendet. Plastinate sind in der universitären Lehre, in Museen, in Sammlungen und in Ausstellungen zu finden. Speziell in der universitären Lehre sind sie von großer Bedeutung, da sie nicht nur im Präparationssaal sondern in jeder Art von Unterricht und Räumlichkeit eingesetzt werden können (Riederer, 2014).

## 2.8 Arbeitsschutz

Sowohl bei der klassischen Herstellung von Präparaten als auch beim Einsatz von 3D-Druckern zur Fertigung der Objekte für Lehrzwecke ist der Arbeitsschutz ein wichtiger Faktor. Die Sicherheit und der Gesundheitsschutz der Beschäftigten bei der Arbeit sind laut Arbeitsschutzgesetz durch den Arbeitgeber fortwährend zu sichern und zu verbessern. Dies erfolgt durch Maßnahmen des Arbeitsschutzes und gilt in allen Tätigkeitsbereichen (BMJV, 1996). Besondere Regelungen, wie in der Verordnung zum Schutz vor Gefahrstoffen festgehalten, gelten für den Umgang mit Gefahrstoffen. Es müssen Maßnahmen zum Schutz der Beschäftigten und anderer Personen bei Tätigkeiten mit Gefahrstoffen getroffen werden. Mensch und Umwelt sind vor stoffbedingten Schädigungen zu schützen (BMJV, 2010).

Bei der herkömmlichen Herstellung von Präparaten kommen verschiedene chemische Stoffe zum Einsatz. Ihre Registrierung, Bewertung, Zulassung und Beschränkung ist

in der Verordnung (EG) Nr. 1907/2006 des Europäischen Parlaments und des Rates vom 18. Dezember 2006 geregelt. Die nicht amtliche Kurzbezeichnung lautet REACH-Verordnung, was für Registration, Evaluation, Authorisation and Restriction of Chemicals steht (Parlament und Rat der EU, 2006). Diese Verordnung soll ein hohes Schutzniveau für die menschliche Gesundheit und für die Umwelt sicherstellen. Die Kennzeichnung und Verpackung der Stoffe ist ebenfalls auf Ebene der Europäischen Union (EU-Ebene) geregelt (Parlament und Rat der EU, 2008).

Bei der klassischen Mazeration liegt die erste potentielle Gefährdung in der Handhabung von scharfen Gegenständen wie Messern und Knochensägen, um den Kopf und die Extremitäten abzutrennen. Bei der Fäulnismazeration stellt die starke Geruchsentwicklung eine erhebliche Beeinträchtigung für die damit Beschäftigten dar (Piechocki und Altner, 2007c).

Die chemischen Methoden der Mazeration arbeiten mit einer Vielzahl unterschiedlicher Chemikalien, deren Verwendung die Einhaltung von Sicherheitsvorschriften und Arbeitsschutzmaßnahmen voraussetzt. Eingesetzt werden u. a. die anorganischen Chemikalien Ammoniak, Kali- und Natronlauge, Natriumperoxid und verdünnte Schwefelsäure. Zur Kategorisierung der Chemikalien bezüglich ihres Gefährdungspotentials und der anzuwendenden Arbeitsschutzmaßnahmen wurden die Sicherheitsdatenblätter der Herstellerfirmen herangezogen, da diese nach den entsprechenden EU und REACH-Verordnungen alle Informationen zum Umgang mit chemischen Stoffen sowie zu möglichen Gefährdungen enthalten und stets auf dem aktuellen Kenntnistand gehalten werden müssen.

Ammoniak ist entzündbares Gas. Es muss von Hitze, heißen Oberflächen, Funken, offenen Flammen sowie anderen Zündquellenarten ferngehalten werden. Es wirkt ätzend auf der Haut und verursacht schwere Augenschäden. Die empfohlenen Schutzmaßnahmen sind: Gas und Dampf dürfen nicht eingeatmet werden, das Tragen von Schutzhandschuhen, Schutzkleidung, Augenschutz und Gesichtsschutz ist erforderlich. Eine Freisetzung in die Umwelt ist zu vermeiden, da es akut und chronisch wassergefährdend ist (AIR LIQUIDE Deutschland GmbH, 2016). Das Sicherheitsdatenblatt wurde gemäß RL 1907/2006/EG (REACH) verfasst.

Kali- und Natronlauge sind stark ätzende Substanzen, die schwere Augenschädigung und Augenreizung sowie schwere Verätzungen der Haut verursachen. Notwendige

persönliche Schutzausrüstung: Atemschutz bei langer oder starker Einwirkung (Feinstaubmaske P2), weiterhin eine dicht schließende Schutzbrille als Augenschutz und extra dicke Schutzhandschuhe aus Gummi oder PVC als Handschutz (AppliChem GmbH, 2016). Die Sicherheitsdatenblätter wurden gemäß Verordnung (EG) Nr. 1272/2008 verfasst.

Natriumperoxid ist ein starkes Oxidationsmittel, das einen Brand oder eine Explosion verursachen kann. Es ist daher von Hitze, heißen Oberflächen, Funken und offenen Flammen fernzuhalten. Es führt bei Kontakt zu schweren Verätzungen der Haut und schweren Augenschäden. Einzuhaltende Schutzmaßnahmen sind das Tragen von Schutzhandschuhen, Schutzkleidung, Augenschutz und Gesichtsschutz (Carl Roth GmbH + Co. KG, 2017). Das Sicherheitsdatenblatt wurde gemäß Verordnung (EG) Nr. 1907/2006 (REACH) verfasst.

Verdünnte Schwefelsäure ist eine ätzende Substanz, die schwere Verätzungen der Haut und schwere Augenschäden verursacht. Die Ätzwirkungen auf der Haut erzeugen eine irreversible Hautschädigung, es kommt zu einer Nekrose, die durch die Epidermis bis in die Dermis reicht. Als Schutzkleidung sind Schutzhandschuhe, Augenschutz und Gesichtsschutz angezeigt (Friedrich Scharr KG, 2016). Das Sicherheitsdatenblatt wurde gemäß der Verordnung (EG) Nr. 1907/2006 (REACH) angefertigt.

Bei der der Mazeration folgenden Entfettung werden vor allem organische Lösungsmittel wie z. B. Petrolbenzin, Diethylether (Schwefelether), Tetrachlormethan, Trichlorethylen und Xylol eingesetzt.

Alle organischen Lösemittel dürfen nicht eingeatmet werden, da sie die Atemwege schädigen, viele sind leicht entzündbar und können Schläfrigkeit und Benommenheit verursachen. Sie sollen nur unter entsprechenden Abzugsvorrichtungen angewendet werden. Nachfolgend sind daher nur die zusätzlichen Klassifizierungen der in Abschnitt 2.7 erwähnten Substanzen genannt.

Petrolbenzin kann bei Verschlucken und Eindringen in die Atemwege tödlich sein (AppliChem GmbH, 2015). Diethylether kann explosionsfähige Peroxide bilden. Wiederholter Kontakt kann zu spröder oder rissiger Haut führen (AUG. HEDINGER GmbH & Co. KG, 2018). Tetrachlormethan steht unter dem Verdacht eine kanzerogene Wirkung auszuüben. Bei längerer oder wiederholter Exposition schädigt

es die Organe (Bernd Kraft GmbH, 2011). Bei Trichlorethylen vermutet man, dass es genetische Defekte verursachen und so kanzerogen wirken kann (Carl Roth GmbH + Co. KG, 2015). Mögliche Folgen auf die Fortpflanzungsfähigkeit sowie eine teratogene Wirkung kann der Kontakt mit Schwefelkohlenstoff haben (Merck KGaA 2017).

Zur Herstellung und Konservierung von Nasspräparaten wird Formalin, eine 35-%ige wässrige Formaldehyd-Lösung mit Methanol, angewendet. Dieses Produkt ist folgendermaßen klassifiziert: es ist giftig bei Verschlucken, Hautkontakt oder Einatmen. Auf der Haut und bei Kontakt mit den Augen verursacht es schwere Verätzungen und schwere Augenschäden. Zudem kann Formaldehyd allergische Hautreaktionen auslösen, die Atemwege reizen, organschädigend und kanzerogen wirken (Carl Roth GmbH + Co. KG, 2016).

Die folgenden Substanzen werden bei der Erstellung von Präparaten mit Hilfe eines 3D-Pulverdruckers eingesetzt. Sowohl das Gipspulver VisiJet® PXL Core (3D Systems Europe, 2013a), die Druckerfarben VisiJet® PXL Colors (3D Systems Europe, 2013c) als auch Reinigungslösung Cleaning SolutionPro (3D Systems Europe, 2013d) sind nicht nach Globally Harmonized System of Classification and Labelling of Chemicals der United Nations (GHS), der Verordnung (EG) Nr. 1272/2008 oder Hazard Communication 2012 (HazCom 2012) klassifiziert (United Nations, 2011; United States Department of Labor, 2012). Das heißt im Sinne dieser Rechtsvorschriften gehen von ihnen keine Gefahren aus. Sie sind als unbedenklich einzustufen.

Klassifiziert ist nur die Infiltrierflüssigkeit, ein Sekundenkleber, ColorBond/zbond® 90. Sie verursacht Hautreizungen und schwere Augenreizungen, kann allergische Hautreaktionen verursachen und die Atemwege reizen. Empfohlene Schutzmaßnahmen sind das Tragen eines zugelassenen Atemschutzes (Atemschutzmaske FFP3), wenn die Belüftung nicht ausreicht, um Dampfkonzentrationen wirksam unter den vorgeschriebenen Grenzwerten zu halten. Zum Schutz der Haut müssen undurchlässige Handschuhe aus Nitril getragen werden. Das Anlegen einer Schutzbrille, einer Schürze und geschlossener Schuhe ist notwendig (3D Systems Europe, 2013b).

### 3 Material und Methoden

#### 3.1 Beschaffung der Vorlagen

Als Vorlagen für die späteren Druckdateien dienten native Präparate verschiedener Hundeschädel, von denen computertomographische (CT) Datensätze erstellt oder bereits vorhandene CT-Datensätze verwendet wurden. Bei den nativen Präparaten handelte es sich um mazerierte (fertig bearbeitete) Oberschädel- und Unterkieferknochen von Hunden. Es wurde aus der Gruppe der dolichocephalen, mesocephalen und der brachycephalen Rassen sowie Rassen mit ramsnasiger Kopfform je ein Tier als Vertreter ausgewählt und –abgebildet. Diese waren der Schädel eines Afghanischen Windhundes, eines Deutschen Schäferhundes, eines Boxers und eines Bull Terriers.

##### 3.1.1 Schädel eines Deutschen Schäferhundes

Die Schädelvorlage für das 3D-Modell des Deutschen Schäferhundes stammte von einer Privatperson, die bestehende CT-Daten für diese Arbeit zur Verfügung stellte (vgl. Abbildung 2 und Abbildung 3). Es handelte sich um den Schädel eines adulten Tieres, da die bleibenden Zähne alle vorhanden und die Suturen alle geschlossen waren. Das genaue Alter sowie das Geschlecht des Tieres waren nicht bekannt. Die CT-Bilder ließen auf eine gute Qualität des nativen Schädels schließen. Das Os nasale verlief im rostralen Bereich der Maxilla und des Os incisivum ventraler als üblich. Seine laterale Kante lag nicht bündig an die Maxilla bzw. das Os incisivum an. Es war in seiner Höhe etwas nach unten und nasenhöhlenwärts versetzt. Es erweckte den Eindruck als wäre es leicht eingedrückt. Lediglich eine geringfügige Abnutzung der Zähne, im Besonderen der Spitzen der Dentes canini (C) ließ sich erkennen.

Die beiden Hälften des Unterkiefers waren in ihrer Symphyse nicht kongruent, sondern leicht gegeneinander verschoben. Die nativen Unterkieferhälften wurden vermutlich künstlich mit Hilfe von Klebstoff zusammengefügt. Der Dens caninus im linken Unterkieferast zeigte an seiner kaudalen Fläche einen rinnenartigen Defekt sowie eine deutlich abgenutzte Spitze. Die Suturen der Knochenanteile waren gut zu sehen. Der Schädel repräsentierte einen Vertreter aus der Gruppe der mesocephalen Rassen.

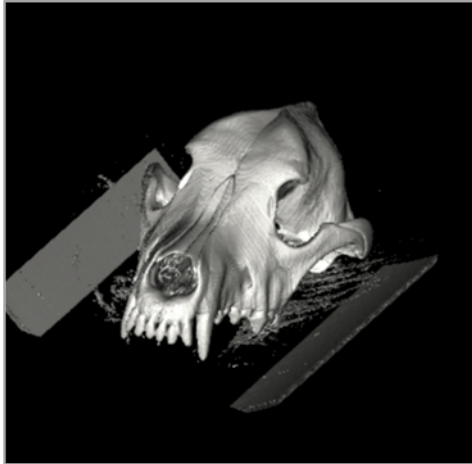


Abbildung 2: CT-Scan des DSH  
Oberschädels

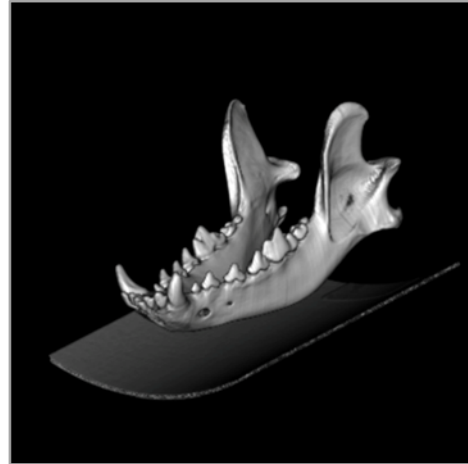


Abbildung 3: CT-Scan des DSH  
Unterkiefers

### 3.1.2 Schädel eines Afghanischen Windhundes

Dieser Schädel war eine Leihgabe der Staatssammlung für Anthropologie und Paläoanatomie München (siehe Abbildung 4). Er wurde im August 1996 präpariert. Es handelte sich um die Schädelknochen eines adulten, männlichen Tieres, denn die bleibenden Zähne waren alle vorhanden und alle Suturen geschlossen. Die knöcherne Abgrenzung der Zahnfächer zur Außenseite des Schädels war an einigen Stellen defekt und brüchig. Die Defekte befanden sich in der rechten Oberkieferhälfte am ersten und zweiten Dens molaris ( $M_1$  und  $M_2$ ) sowie dem vierten Dens praemolaris ( $P_4$ ). Beiden Dentes canini sowie den ersten und dritten Dentes incisivi ( $I_1$  und  $I_3$ ) fehlten die Spitzen. Teile des Enamelums, Substantia adamantina, waren abgesprengt. Am Dens caninus der linken Kieferseite waren Bruchlinien erkennbar. Auf vielen Zähnen fanden sich feste Ablagerungen und die Übergänge zu den knöchernen Zahnfächern waren von reaktiven, proliferativen Veränderungen des Knochens geprägt. Derartige Bereiche waren auch am Margo orbitalis des Os zygomaticum und an weiteren Stellen des Oberschädels sichtbar. Insgesamt waren normalerweise auffällige anatomische Strukturen wie zum Beispiel die Processus relativ schwach ausgeprägt, so auch die Suturen der Knochenanteile. Die Ossa conchae waren beiderseits im ventralen Abschnitt der Nasenhöhle weniger gut erhalten, im dorsalen Teil fanden sich ebenfalls einige Defekte. Die größten Verluste waren im Bereich des rechten Os conchae nasalis dorsalis zu finden.



Im Unterkiefer des Afghanischen Windhundes war an den Dentes praemolares und molares der Bereich des Margo alveolaris auffällig durch reaktive Knochenproliferationen verändert. Im dorsalen Teil der Zahnfächer der restlichen Zähne waren die Veränderungen weniger stark ausgeprägt. An allen Zähnen waren geringgradige feste Ablagerungen zu finden. Der  $M_1$  war auf beiden Seiten an seinen Spitzen beschädigt, der  $M_1$  des linken Unterkieferastes war zusätzlich in seiner Mitte gebrochen, ein Teil des Zahnes fehlte. Der  $M_3$  der rechten Seite fehlte. An beiden Dentes canini waren die Spitzen sowie die rostralen Flächen über die gesamte Länge abgesprengt und fehlten. Die CT-Datensätze wurden in Kooperation mit der Tierklinik Oberhaching erstellt. Der Afghanische Windhund diente als Vorlage für einen Repräsentanten aus der Gruppe der dolichocephalen Rassen.



Abbildung 4: Oberschädel und Unterkiefer des Afghanischen Windhundes

### 3.1.3 Schädel eines Boxers

Die Schädelknochen eines Boxers (siehe Abbildung 5) stellte eine Privatperson zur Verfügung. Geschlecht und genaues Alter des adulten Tieres waren unbekannt. Neben rassetypischen Deformationen fielen am Oberschädel die reaktiven, proliferativen Veränderungen des Knochens im Bereich der Zähne als auch die Anzahl der Zähne ins Auge. Der dritte Dens praemolaris ( $P_3$ ) fehlte beiderseits. In der linken Hälfte der Maxilla fehlten der zweite und dritte Dens molaris an zweiter und dritter Stelle ( $M_2$  und  $M_3$ ), in der rechten Hälfte fehlte der  $M_3$ . Alle vorhandenen Molaren wiesen mittel- bis hochgradige Defekte der knöchernen Zahnfächer auf. Die rostrale

Fläche des linken Dens caninus fehlte. Die Nasenmuscheln waren insgesamt gut erhalten.

Der rostrale Abschnitt des Unterkiefers war ebenfalls durch reaktive Knochenproliferationen verändert. Von den drei beidseitigen Dentes praemolares war jeweils nur der P<sub>3</sub> ausgebildet, so dass der Eindruck eines zweiten Diastemas zwischen Prämolaren und Molaren entstand. Der M<sub>1</sub> und der M<sub>2</sub> waren vorhanden. Beiden M<sub>2</sub> fehlte die labiale Außenfläche des knöchernen Zahnfachs. Der M<sub>3</sub> fehlte auf beiden Unterkieferästen. Die CT-Datensätze wurden ebenfalls in Kooperation mit der Tierklinik Oberhaching erstellt. Der Boxer diente als Vertreter der brachycephalen Rassen.



Abbildung 5: Oberschädel und Unterkiefer des Boxers

#### 3.1.4 Schädel eines Bull Terriers

Die Vorlage für den Schädel eines Bull Terriers (siehe Abbildung 6) war ebenfalls eine Leihgabe einer Privatperson. Genaues Alter und Geschlecht des adulten Tieres waren nicht bekannt. Die Zähne des Oberkiefers waren mehrheitlich unbeschadet. An den lingualen Flächen der Dentes incisivi (I<sub>1</sub>, I<sub>2</sub>, I<sub>3</sub>), der Dentes canini, der P<sub>4</sub>, der M<sub>1</sub> und der M<sub>2</sub> fanden sich Verluste der Substantia adamantina. Die Ossa conchae waren nahezu vollständig erhalten. Spuren ließen darauf schließen, dass der kaudodorsale Teil des Schädeldachs zur Entnahme des Gehirns abgenommen und anschließend sehr sorgfältig mit einer Hilfsmasse wieder fest angefügt worden war.

Am Unterkiefer wiesen die beiden Canini als auch die meisten der Dentes praemolares und molares Schäden am Enamelum auf. Der Dens caninus der linken Seite war der

Länge nach durch einen feinen Riss geteilt. Dem Dens caninus des rechten Unterkieferastes fehlte auf der labialen Fläche über den Großteil der Länge ein flaches Stück der Substantia adamantina. Der P<sub>4</sub> der rechten Seite fehlte.

Auch die CT-Datensätze dieses Schädels wurden in Zusammenarbeit mit der Tierklinik Oberhaching angefertigt. Der Schädel des Bull Terriers zeigte die Ausprägung einer ramsköpfigen, auch „downface“ genannten Schädelform.



Abbildung 6: Oberschädel und Unterkiefer des Bull Terriers

## 3.2 Hardware

### 3.2.1 Computertomographen

Die CT-Datensätze der ausgewählten Hundeschädel wurden mit dem Computertomographen Supria der Firma Hitachi mittels Spiralmodus in der Tierklinik Oberhaching erstellt. Pro Schädel wurde je eine Datei für den Oberschädel und eine für den Unterkiefer angefertigt.

Vorversuche der Scans wurden in der Chirurgischen und Gynäkologischen Kleintierklinik der LMU München angefertigt. Bei diesen wurden mehrere Schädel gleichzeitig in einer Datei erfasst. Es handelte sich um den Computertomographen SOMATOM Definition AS von Siemens.

### 3.2.2 Computer

Im Prozess der weiteren, externen Bearbeitung der Dateien kam ein MacBook Air mit dem Betriebssystem OS X Version 10.9.5 und einem 1.3 GHz Intel Core i5 Prozessor zum Einsatz.

Die Bildbearbeitung sowie die Erstellung der Dateien für die Evaluation wurden mit Hilfe eines Asus Zenbook mit 8 GB Arbeitsspeicher, Intel Core i5-4210U, Prozessor 1.7/ 2.4 GHz und Betriebssystem Windows 7 Ultimate durchgeführt.

An einem Personal-Computer der Anatomie der Tierärztlichen Fakultät der LMU München mit Intel Core i7 Prozessor 3.40 GHz, 16 GB Arbeitsspeicher und dem Betriebssystem Windows 7 Professional erfolgten die unmittelbaren Vorbereitungen für den Ausdruck am 3D-Drucker.

### 3.2.3 3D-Drucker

Das 3D-Druckermodell ProJet 660 Pro von 3D Systems wurde vom Lehrstuhl für Anatomie, Histologie und Embryologie der LMU für den 3D-Ausdruck zur Verfügung gestellt. Es handelte sich um einen Pulverdrucker mit folgenden Eigenschaften: der Bauraum hatte die Maße 254 mm x 381 mm x 203 mm und fasste eine Baukapazität von 1200 Kubikzoll. Die Druckgeschwindigkeit betrug 2-4 Layer pro Minute. Die Schichtdicke betrug 0,089-0,102 mm. Die Druckauflösung lag bei 600 x 540 dpi.

### 3.2.4 Kamera

Eine Spiegelreflexkamera von Canon (EOS 60D) mit Objektiven mit einer Brennweite von 17-85 mm (Übersichtsaufnahmen) sowie 100 mm (Detailaufnahmen) wurde zur Anfertigung der Fotografien der Hundeoberschädel und Unterkiefer sowie der gedruckten Präparate eingesetzt.

## 3.3 Software

Die untenstehende Tabelle 6 zeigt eine Übersicht der Softwareprogramme, die zur Erstellung dieser Arbeit verwendet wurden und ihr jeweiliges Einsatzgebiet.

Tabelle 6: Übersicht über die angewendeten Softwareprogramme

Softwareprogramm	Einsatzbereiche/-Verwendung
Word von Microsoft Office Professional 2013 für PC	Erstellung der Evaluationsbögen und des Skripts zur Evaluation
Excel von Microsoft Office Professional 2013 für PC	Erfassung und Auswertung der Evaluationsdaten
Adobe Photoshop CS6 für PC von Adobe Systems	Bildbearbeitung für Abbildungen im Evaluationsbogen
OsiriX für Mac Version 5.9	DICOM Viewer, Volumen- und Oberflächenrendering, Schneiden
Blender PC-Version 2.72b von Blender Foundation	Zusammensetzung, Bereinigung, Geometriekontrolle
ZBrush 4R7 P3 (x64) für Mac von Pixologic	Modellieren, Fixing, Geometriekontrolle, Kolorierung
3DEdit Pro 2.0 für PC von DeskArtes Oy	Geometriekontrolle
3DPrint PC-Software 1.0.3 von 3D Systems, Inc.	Druck der 3D-Dateien

### 3.4 Auswahl der Schädel

Bei der Auswahl der Hundeschädel wurden folgende Kriterien als Maßstab angelegt: die Knochen durften keine augenscheinlichen, mittelgradig-pathologischen Veränderungen oder Schäden durch Handhabung aufweisen. Gewisse geringgradig bis mittelgradige altersbedingte, reaktive, proliferative Veränderungen des Knochens im Bereich der Zahnfächer und an Knochenrändern wurden gebilligt. Rassebedingte Deformationen der Schädelknochen zählten hierbei nicht zu den pathologischen Veränderungen.

Die knöchernen Strukturen sollten intakt sein. Trotz Sichtung von 567 Schädeln mussten gewisse Defekte in Kauf genommen werden, die bereits bei der Herstellung der Präparate oder beim Handling dieser entstanden waren. Besonderes Augenmerk wurde auf die Unversehrtheit des dünnwandigen Os conchae nasalis dorsalis und ventralis, des Hamulus pterygoideus, der Spina nasalis caudalis, des Processus muscularis und retroarticuaris, des Tuber maxillae, als auch auf die möglichst

vollständige Anzahl und Unversehrtheit der Zähne gelegt. Keiner der 567 gesichteten Schädel entsprach den Kriterien zu 100%, daher wurden Defekte im Post-Processing der Daten in einem Softwareprogramm händisch remodelliert. Dies erfolgte für alle Schädel außer jenem des Deutschen Schäferhundes unter Zuhilfenahme der Originalschädel, Schädel von Tieren der gleichen Rasse und gängiger anatomischer Lehrbücher wie dem „Lehrbuch der Anatomie der Haussäugetiere“ von Nickel et al. (2004).

Um die Fülle der unterschiedlichen Schädelformen der Vielzahl an Hunderassen ansatzweise abzubilden, wurde je ein Schädel aus der Gruppe der mesocephalen, der dolichocephalen, der brachycephalen und der ramsnasigen Hunderassen als Repräsentant gewählt. Die explizit ausgewählten Rassen ergaben sich dann durch die oben genannten Kriterien, die es zu erfüllen galt. Nur diese Exemplare genügten zumindest weitgehend den gestellten Anforderungen.

Dem Deutschen Schäferhund kam aufgrund seines mesocephalen Schädels eine spezielle Bedeutung zu. Er diene als anatomische Grundform, von der es rassetypische Abweichungen gibt. Daher wurden die diversen Schnitte, die als Lehrmaterial dienen sollen, von ihm angefertigt. Es ist diese Art der Schädelform, die in anatomischen Lehrbüchern exemplarisch in Text und Abbildungen erläutert wird wie dies beispielsweise im „Lehrbuch der Anatomie der Haussäugetiere“ von Nickel et al. (2004) oder „Anatomie der Haussäugetiere“ von König und Liebich (2014), der Fall ist.

### **3.5 Vorgehen zur Erstellung der 3D-Druckdateien: Vorversuche**

Der eigentlichen, Erfolg bringenden Methode (Versuch 3) gingen zwei Versuche der Bearbeitung der Datensätze voraus. Da sie aus mehreren Gründen nicht zu den gewünschten Ergebnissen führten, sind sie als Vorversuche zu betrachten.

#### **3.5.1 Anfertigung der 3D-Datensätze**

Die „Digitale Bildgebung und -kommunikation in der Medizin“- Datensätze (DICOM-Datensätze) der Schädel wurden mittels Computertomographen erstellt. Die ersten Scans wurden in der Chirurgischen und Gynäkologischen Kleintierklinik der LMU München angefertigt, in denen mehrere Schädelknochen in einem Scan erfasst wurden. Dabei lagen entweder Oberschädel und Unterkiefer von mehreren Hunden

oder von Hunden und Pferden nebeneinander (vgl. Abbildung 7). Die Pferdeschädel standen nicht in Zusammenhang mit dieser Arbeit. In der Anpassung der Geräteeinstellungen war man bemüht einen geeigneten Kompromiss zu finden, um die unterschiedlichen Objekte in guter Qualität abzubilden. Gelagert wurden die Objekte auf einigen Seiten Papier, um im CT-Bild einen geringen Abstand zwischen Tisch und Objekt zu erzeugen. Wie sich im weiteren Prozess der Bearbeitung der Daten zeigte, lieferten sie aufgrund der Anzahl der Schädel pro Datensatz keine ausreichende Qualität zur Erstellung anatomisch korrekter digitaler 3D- und damit auch Druckdateien. Zu einem späteren Zeitpunkt wurden daher die ausgewählten Schädelknochen in Einzelscans mit optimierter Lagerung und individuell abgestimmter Einstellung der technischen Parameter neu erfasst. Sie konnten zur Erstellung der finalen 3D-Druckdateien genutzt werden (siehe Abschnitt 3.6).

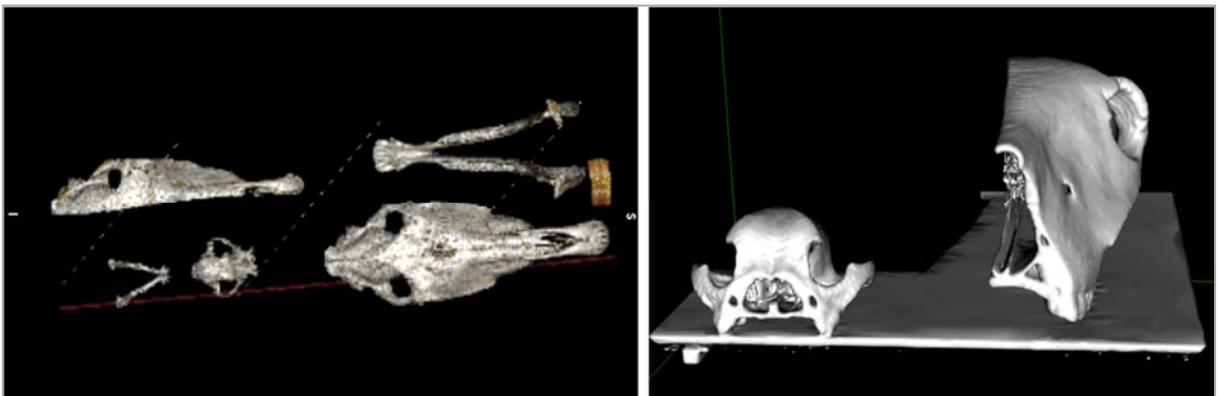


Abbildung 7: links: CT-Scan von Boxer- und Pferdeschädeln; rechts: Querschnitt vom Boxeroberschädel und paramedianen Schnitt eines Pferdeschädels

### 3.5.2 Schritte in OsiriX

Aus den erstellten DICOM-Datensätzen wurde eine einzelne Datei im OBJ-Format für den gesamten Oberschädel bzw. den Unterkiefer exportiert. Es konnte damit nur ein Bereich in hochwertiger Qualität wiedergegeben werden. In Versuch 1 und 2 lag die Priorität auf unterschiedlichen Bereichen. Die Priorisierung eines Knochenanteils führte unweigerlich zu einer Benachteiligung anderer Anteile. Artefakte, die durch den Scan mit dem CT-Gerät entstanden waren, wurden in OsiriX ausgeschnitten und entfernt.

### Versuch 1:

Beim Oberschädel lag der Fokus auf den feinen, knöchernen Strukturen. Als wichtigstes und augenscheinlichstes Kriterium dienten hierzu die optische Qualität der Ossa conchae. Die Einstellungen zum Export der OBJ-Dateien aus OsiriX wurden so gewählt, dass die knöchernen Nasenmuscheln adäquat ausgeprägt und dargestellt waren. Die anderen Bereiche wurden vorerst vernachlässigt, sie sollten im weiteren Verlauf remodelliert werden.

### Versuch 2:

Im zweiten Ansatz lag der Fokus auf einem natürlichen Gesamteindruck der knöchernen Oberflächenstruktur. Wie im ersten Versuch wurde aus dem DICOM-Datensatz eine einzelne Datei im OBJ-Format exportiert. Die Einstellungen zum Export der Datei wurden so gewählt, dass die knöcherne Oberflächenstruktur authentisch erschien, kleinere Knochenfortsätze noch vorhanden waren und eine annehmbare Beschaffenheit aufwies. Das Ergebnis war jedoch nicht zufriedenstellend, da aufgrund dieser Einstellungen die knöchernen Nasenmuscheln überhaupt nicht in der Datei erschienen und die Zähne einer Nachbearbeitung bedurften.

#### 3.5.3 Schritte in ZBrush

In dieser Software wurden die in OsiriX exportierten Dateien im OBJ-Format weiterführend bearbeitet. Bereiche, die nicht lebensecht erschienen wurden unter Zuhilfenahme der Originale modelliert und nachgebildet.

Die Ausgabe des gesamten Oberschädels bzw. Unterkiefers in einer einzigen Datei hatte zur Folge, dass sämtliche Anteile des Schädelknochens verdickt erschienen. Eine Ausnahme bildeten nur jene Bereiche und Strukturen, deren Beschaffenheit man bei der Festsetzung der Einstellungsparameter berücksichtigt hatte.

Im Falle des ersten Versuchs waren es die Ossa conchae. Neben der Verdickung der Schädelknochen war ein großer Detailverlust festzustellen, vor allem im Hinblick auf die knochentypische Oberflächenstruktur. Ihr Aussehen erinnerte an den Anblick eines aus Knete gefertigten Objekts mit unscharfen Begrenzungen und Kanten. Sie wirkten wie aufgequollen oder angeschwollen. Dies betraf in ganz besonderem Maße die Zähne. Sie besaßen in Versuch 1 beinahe das Doppelte ihres ursprünglichen Volumens. Ihr natürliches Erscheinungsbild ging dadurch beinahe vollständig verloren.



Im weiteren Bearbeitungsprozess wurden diese Bereiche durch Modellierung dem Original nachempfunden. Eine wirklichkeitsgetreue Rekonstruktion war nur sehr eingeschränkt umsetzbar.

Nachdem im zweiten Versuch die Priorität auf das Gesamterscheinungsbild des Schädels gelegt wurde, erschien die knöcherne Oberflächenstruktur authentisch und kleine Knochenfortsätze waren vorhanden. Die Zähne erschienen weniger voluminös als im 1. Versuch, mussten aber im Nachgang modelliert werden. Die Ossa conchae konnten auf diesem Weg nicht dargestellt werden, das Lumen der Nasenhöhle war inhaltslos. Sie sollten als eigene Objekte in der Software ZBrush konstruiert und dann eingefügt werden.

Weitere Prozessschritte der Nachbearbeitung wurden für die Dateien aus Versuch 1 und 2 nicht durchgeführt, da das Erreichen eines zufriedenstellenden Ergebnisses nicht zu erwarten war.

### **3.6 Vorgehen zur Erstellung der 3D-Druckdateien: Versuch 3**

Die Vorversuche zeigten, dass DICOM-Datensätze von sehr guter Qualität Grundvoraussetzung für die Entwicklung hochwertiger virtueller, druckbarer 3D-Dateien waren. Gleichzeitig brauchte es einen neuen Weg des Exports der OBJ-Dateien, so dass nicht nur ein kleiner Bereich der Knochen berücksichtigt und exakt abgebildet werden konnte.

#### **3.6.1 Anfertigung der 3D-Datensätze**

Im Rahmen des dritten Versuchs wurden die ausgewählten Schädelknochen des Boxers, des Afghanischen Windhundes und des Bull Terriers mit Hilfe eines CT Scans im Computertomographen der Tierklinik Oberhaching in neuen virtuellen Datensätzen im DICOM-Format abgebildet. Diesmal wurden Einzelscans mit optimierter Lagerung durchgeführt, welche zur Erstellung der finalen 3D-Druckdateien genutzt wurden.

Dank der Computertomographie können neben der Oberflächenstruktur der Oberschädel- und Unterkieferknochen auch innenliegende Binnenstrukturen erfasst und dargestellt werden, welches ihre Betrachtung in virtuellen Schnitten ermöglicht.

Für jeden Oberschädel und Unterkiefer wurde eine individuelle Datei mit geeigneten Einstellungen angefertigt. Es wurden folglich sechs Datensätze erstellt.

Die jeweiligen Knochen wurden dabei auf rechteckigen, formfesten Schaumstoffkissen auf dem CT-Tisch gelagert, um einen optischen Abstand zwischen Objekt und Tisch im späteren CT-Bild zu generieren. Die gescannten Objekte schweben im virtuellen Bild sozusagen über dem CT-Tisch, da die Schaumstoffkissen weitgehend röntgendurchlässig sind.

Die Daten wurden auf einen USB-Stick von Transcend kopiert und auf dem MacBook gespeichert. Sie und die Dateien des Deutschen Schäferhundes wurden als Nächstes in OsiriX weiter aufbereitet.

Die DICOM-Datensätze des Deutschen Schäferhundes stellen hierbei eine Ausnahme dar. Sie wurden von einer Privatperson zur Verfügung gestellt. Es handelt sich um zwei getrennte Datensätze, einen für den Oberschädel und einen für den Unterkiefer. Die genaue Art ihrer Entstehung ist nicht bekannt. Die Betrachtung der DICOM-Datensätze in OsiriX lässt auf eine ähnliche Arbeitsweise schließen.

Es entstanden CT-Datensätze mit verschiedenen Schichtdicken und Bildzahlen. Die folgende Tabelle 7 zeigt eine Übersicht über die Schichtdicke und Anzahl der Bilder der verwendeten Datensätze im DICOM-Format.

Tabelle 7: Daten der verwendeten DICOM-Datensätze

Hunderasse	Knochenanteil	Schichtdicke	Images
Boxer	Oberschädel	0,63 mm	264
	Unterkiefer	0,63 mm	219
Afghanischer Windhund	Oberschädel	0,63 mm	381
	Unterkiefer	0,63 mm	282
Bull Terrier	Oberschädel	1,25 mm	390
	Unterkiefer	0,63 mm	242
Deutscher Schäferhund	Oberschädel	1,0 mm	234
	Unterkiefer		
	Kaudodorsaler Schnitt		
	Paramedianer Schnitt		
	Schnitt in Höhe der Bulla tympanica		
	1. Transversaler Schnitt – Bereich der Ossa conchae		
	2. Transversaler Schnitt – Bereich der Lamina cribrosa bis Ossa conchae		

### 3.6.2 Bearbeitung der 3D-Datensätze in den Softwareprogrammen

#### 3.6.2.1 Schritte in OsiriX

Um im Ergebnis eine wirklichkeitsgetreu und anatomisch korrekte 3D-Druckdatei zu erhalten, zeigte sich im Laufe der Arbeit, dass es erforderlich war, bestimmte Anteile der Schädelknochen digital zuzuschneiden und als einzelne Dateien im OBJ-Format zu exportieren. Diese wurden dann in einer anderen Software nach einer Geometriekontrolle zu einem vollständigen Objekt zusammengesetzt.

Die nötigen Schritte waren wie folgt: Zunächst wurde für den jeweiligen Datensatz im DICOM-Format in der Software OsiriX ein dementsprechend benannter Ordner erstellt

und der entsprechende Datensatz importiert. Jener wurde angewählt und im 3D Volume Rendering Modus (VR-Modus) geöffnet. In dieser Ansicht wurden die Objekte bearbeitet und zugeschnitten.

Ein erster wichtiger Arbeitsvorgang war die Einstellungen so anzupassen, dass beim Scan der CT-Bilder entstandene Artefakte sichtbar wurden und herausgeschnitten werden konnten (vgl. Abbildung 8, Abbildung 9, Abbildung 10 und Abbildung 11).

Die Einstellungen waren zum einen die CLUT (Color Look Up Table) und die Opacity (Deckfähigkeit/Deckkraft) als auch die WL/WW (Window Length/Window Width). Anhand der CLUT lassen sich die Farb- und Deckkraftwerte basierend auf den Grauskala-Werten der CT-Scans bestimmen. Die Opacity stellt eine weitere Anpassungsmöglichkeit in Bezug auf die Deckkraft dar. Über WL/WW werden Kontrast und Intensität eingestellt.

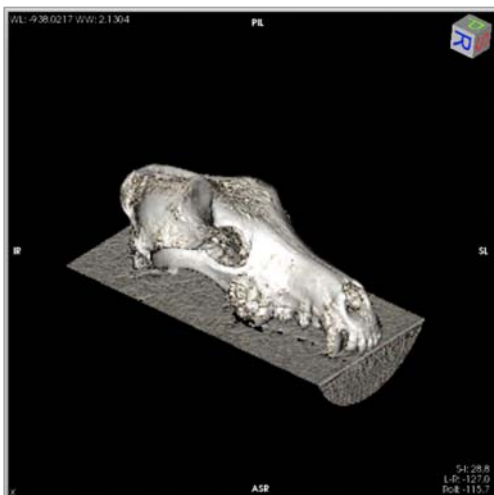


Abbildung 8: OK eines Afghanischen Windhundes - mit Artefakten



Abbildung 9: OK eines Afghanischen Windhundes - ohne Artefakte

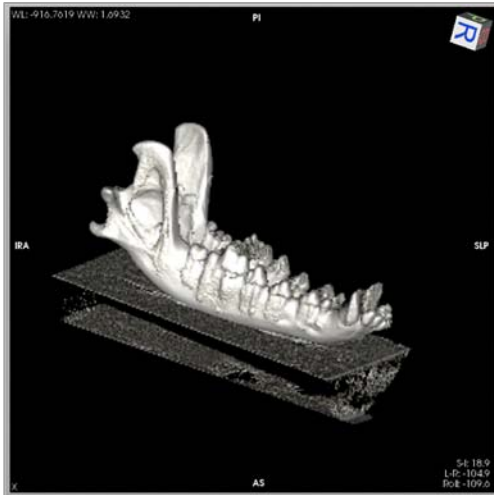


Abbildung 10: UK eines Afghanischen Windhundes - mit Artefakten

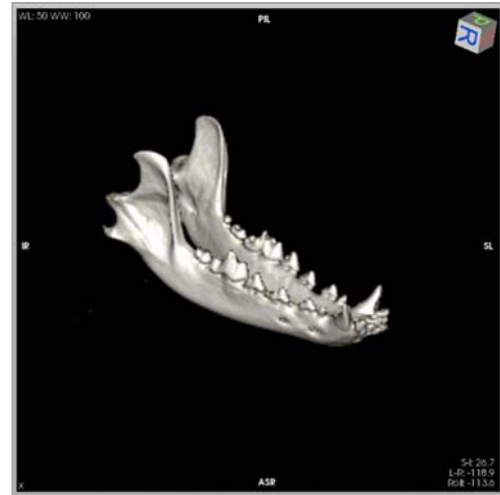


Abbildung 11: UK eines Afghanischen Windhundes - ohne Artefakte

Nach Entfernung der Artefakte oder auch der Oberfläche des mit eingescannten CT-Tisches wurden die Einstellungsparameter erneut angepasst, um eine gute Sichtbarkeit des gewünschten Objektanteils zu gewährleisten.

Am Beispiel des Oberschädels des Afghanischen Windhundes soll dies erläutert werden. Die fertige 3D-Druckdatei des Oberschädels des Afghanischen Windhundes entstand aus ursprünglich fünf einzelnen in OsiriX angefertigten Dateien. Die Objektanteile waren in seinem Fall der Bereich der Zähne (siehe Abbildung 13), der Ossa conchae (siehe Abbildung 16), der Bereich der Orbita (siehe Abbildung 14) sowie der rostrale und der kaudale Anteil der Schädelknochen (siehe Abbildung 12 und Abbildung 15). Für den Unterkiefer des Afghanischen Windhundes wurden zwei separate Dateien erstellt, einmal für den Unterkieferknochen und einmal für die Zähne. Die separaten Anteile wurden exakt zugeschnitten und anschließend im 3D-Surface Rendering Modus (SR) weiter bearbeitet.



Abbildung 12: OK eines Afghanischen Windhundes - Anteil Schädelknochen



Abbildung 13: OK eines Afghanischen Windhundes - Anteil Zähne



Abbildung 14: OK eines Afghanischen Windhundes - Anteil Orbita



Abbildung 15: OK eines Afghanischen Windhundes - Anteil rostrales Ende

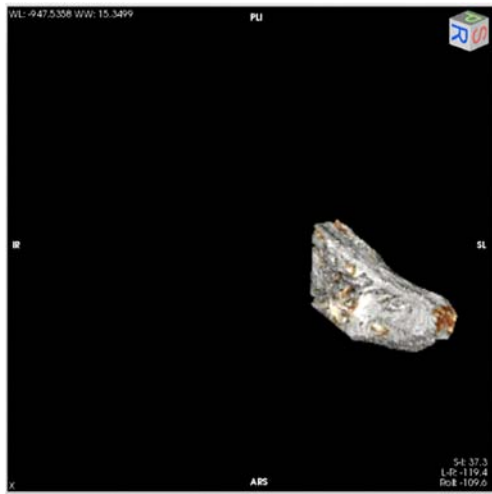


Abbildung 16: OK eines Afghanischen Windhundes - Anteil Nasenmuscheln

Im SR-Modus wurden die Einstellungen der Surface Settings von Resolution, Decimation und Smooth-Iteration sowie von Pixel Value und Transparency vorgenommen. Während Decimation, Smooth-Iteration und Transparency eine untergeordnete Rolle spielen, sind Resolution und Pixel Value entscheidend für die Qualität der Datei. Resolution legt die Strukturausprägung der Oberfläche fest. Die Einstellungsoption Pixel value gibt den Schwellenwert wieder aufgrund dessen die 3D-Rekonstruktion vorgenommen und dargestellt wird. Diese Werte werden entsprechend der Knochendichte und –dicke der ausgewählten anatomischen Struktur reguliert.

Jeder der Datensätze wurde solchermaßen bearbeitet, dass der zugeschnittene Anteil des Objekts die erforderlichen Eigenschaften aufwies. Neben Oberschädel und Unterkiefer wurde vom Deutschen Schäferhund auch eine Reihe an Schnitten erstellt. Jeder dieser Schnitte war eine eigens erstellte Datei, die wie die Oberschädel aus mehreren Anteilen bestand, welche in der Software Blender wieder zusammengesetzt wurden.

Im letzten Schritt wurden die Anteile sämtlicher Objekte als Dateien im OBJ-Format zur weiteren Bearbeitung exportiert.

Je nach Qualität und anatomischer Form wurde die Anzahl der zugeschnittenen Anteile individuell dem einzelnen Oberschädel und Unterkiefer angepasst. Tabelle 8 gibt neben den anatomischen Strukturen auch die Anzahl der einzelnen Dateien wieder.

Tabelle 8: Übersicht über die Anteile der Objekte

Objekt	Knochenanteil	Anatomische Strukturen	Anzahl der einzelnen Dateien
Afghanischer Windhund	Oberschädel	Zähne, Ossa conchae, Orbita, rostraler und kaudaler Anteil des Knochens	5
	Unterkiefer	Corpus mandibulae, Ramus mandibulae, Zähne	3
Boxer	Oberschädel	Knochen, Zähne, Ossa conchae	3
	Unterkiefer	Unterkieferknochen, Zähne	2
Bull Terrier	Oberschädel	Knochen, Zähne, Ossa conchae	3
	Unterkiefer	Unterkieferknochen, Zähne	2
Deutscher Schäferhund	Oberschädel	Zwei Anteile Knochen, Zähne, rostraler und kaudaler Anteil der Ossa conchae	5
	Unterkiefer	Unterkieferknochen, Zähne	2
	Kaudodorsaler Schnitt	Zwei Anteile Knochen, Zähne, rostraler und kaudaler Anteil der Ossa conchae	5
	Paramedianer Schnitt	Knochen, Zähne, Ossa conchae	3
	Schnitt in Höhe der Bulla tympanica	Knochen	1
	1. Transversaler Schnitt – Bereich der Ossa conchae	Knochen, Zähne, Ossa conchae	3
	2. Transversaler Schnitt – Bereich von Lamina cribrosa bis Ossa conchae	Knochen, Zähne, Ossa conchae	3

### 3.6.2.2 Schritte in Blender

Die in OsiriX erstellten OBJ-Dateien wurden zunächst einzeln in Blender importiert und bereinigt. Das bedeutet, dass Polygone, die nicht mit dem Objekt in Verbindung standen und somit Artefakte waren, entfernt werden konnten. Dieser Schritt war vor allem für „freie“ Polygone innerhalb der Binnenstrukturen der Schädel wichtig, denn es war nicht möglich sie in OsiriX zu entfernen. Die überarbeiteten Dateien wurden als



OBJ-Dateien ausgegeben. Durch die Entfernung überflüssiger Polygone konnte die Qualität der Dateien verbessert und die Größe der Datenmenge verringert werden.

Um die verschiedenen Anteile eines Schädels nach ihrer Bereinigung in Blender zusammensetzen, wurden alle Anteile als OBJ-Dateien in Blender importiert (vgl. Abbildung 17). Da sie ursprünglich alle aus dem gleichen CT-Datensatz hergestellt wurden, waren ihre Koordinaten im dreidimensionalen Raum kongruent. Die importierten Anteile fügten sich folglich in der richtigen Position ineinander. Durch eine Funktion der Software ließen sich die Polygonnetze der Objekte zu einem Polygonnetz zusammenfügen und damit als eine OBJ-Datei exportieren.

Nach Weiterbearbeitung in der Software ZBrush wurden die Dateien in den letzten Schritten der Druckvorbereitung in Blender erneut einer Geometriekontrolle unterzogen.

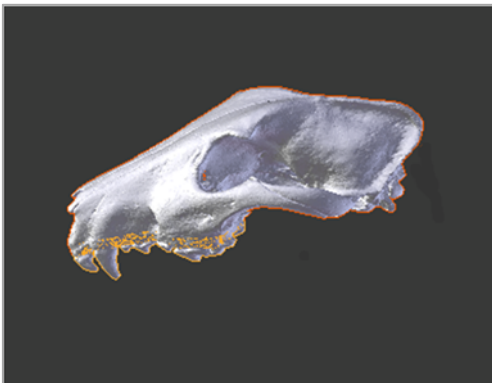


Abbildung 17: Zusammenfügen der Anteile des Oberschädels des Bull Terriers; die farbigen Linien grenzen die Anteile ab

### 3.6.2.3 Schritte in ZBrush

Das Softwareprogramm ZBrush diente dazu feinere Bearbeitungsschritte an den Objekten auszuführen.

Die in Blender geprüfte und zusammengesetzte Datei im OBJ-Format wurde in ZBrush importiert und als Projekt-Datei gespeichert. Nun wurde zunächst das Polygonnetz geprüft und die Zahl der Polygone erhöht, was dazu führte, dass die Oberfläche feinmaschiger wurde und detaillierter bearbeitet werden konnte. Dann wurden die sichtbaren, artifiziellen Grenzen geglättet, die durch das Zusammensetzen der Anteile entstanden waren. Bei Bedarf wurden Strukturen in diesem Bereich remodelliert.

Hierzu wurden die nativen Schädel und Fotos als Vorlage genutzt. Ebenfalls wurde die gesamte Oberfläche der Objekte etwas geglättet, um ein Abzeichen der Polygonformen zu entfernen, das durch die Konvertierung der DICOM-Datei in eine OBJ-Datei entstanden war. Geglättet wurde auch die stufenähnliche Riffelung der Oberfläche, die die einzelnen computertomographischen Aufnahmen widerspiegeln.

Anschließend wurden sämtliche Strukturen des Schädels Schritt für Schritt begutachtet. Angefangen wurde mit den Zähnen, welche in der Regel eine stärkere Nachbearbeitung benötigten, da sich hier an den Originalschädeln die meisten Schäden befanden. Sie galt es zu korrigieren. Besondere Aufmerksamkeit war auch bei sämtlichen Foramina, Canales und Fossae von Nöten. Sie waren teilweise durch die Aufbereitung in OsiriX aufgrund eines zu geringen Durchmessers oder zu geringer Tiefe nicht mehr klar zu erkennen oder nicht mehr durchgängig. Als Beispiel sind die Foramina palatina minora, die Foramina ethmoidalia und der Canalis caroticus zu nennen. Sie und andere wurden mit Hilfe eines 3D Sculpting Brush, dem Curve Tube, oder durch die Subtraktion dafür händisch erstellter Subtools, geometrischer Formen, nachgebildet.

Dünnwandige Strukturen wie die Bulla tympanica, das kaudale Ende der Lamina horizontalis mit dem Choanenrand oder der Hamulus pterygoideus wurden an vielen der Objekte verstärkt, um sie am ausgedruckten Präparat widerstandsfähiger zu machen.

Nach Abschluss der Bearbeitung wurden sämtliche Strukturen einzeln anhand der nativen Präparate, anderer nativer Schädel der gleichen Rasse und anatomischer Lehrbücher und Atlanten auf ihre Vollständigkeit und korrekte Beschaffenheit kontrolliert.

Der nächste Schritt nach der Modellierung war die Kolorierung der Objekte. Hierzu wurde das Polygonnetz geprüft und anschließend der Teil des Objektes maskiert, der eingefärbt werden sollte. Im Falle dieser Schädel sollten die Schädelknochen von den Zähnen farblich abgegrenzt werden, um den späteren Ausdrucken ein möglichst natürliches Erscheinungsbild im Hinblick auf ihre Färbung zu verleihen. Nach Aufbringen der Maske wurden die Farbwerte nach dem RGB-System eingegeben und

der gewünschte Bereich eingefärbt. Da das Polygonnetz zu diesem Zeitpunkt noch sehr feinmaschig war und die Datei damit ein zu großes Datenvolumen hatte, um von der 3D-Drucker Software verarbeitet werden zu können, wurde die Anzahl der Polygone dezimiert. Sie konnte über ein Tool in ZBrush angepasst werden. Die Polygonzahl sollte zwischen 300.000-900.000 liegen und die Dateigröße 100 MB nicht überschreiten. Daraufhin folgte die Vorbereitung der Datei zum Druck.

### 3.6.3 Druckvorbereitung in den Softwareprogrammen

#### 3.6.3.1 Schritte in ZBrush

In ZBrush wurde nach Beendigung der Modellierarbeiten und der Kolorierung eine Geometriekontrolle durchgeführt. Das Programm überprüfte die Polygonanordnung und hatte zum Ziel fehlerhafte oder unzusammenhängende Polygone, geometrische Löcher in der Polygonanordnung oder Unreinheiten aufzuspüren, zu entfernen oder zu reparieren. Dadurch verringerte sich die Anzahl der Polygone ohne Informations- oder Detailverlust. Infolgedessen reduzierte sich auch die Datengröße der Datei, was für ihre Verarbeitung von Vorteil war. Anhand einer Funktion wurden auch die Größenverhältnisse überprüft, um sicherzustellen, dass das Objekt in originaler Größe gedruckt werden konnte. Die fertige Projekt-Datei wurde im vrml-Format (Virtual Reality Modeling Language) exportiert.

#### 3.6.3.2 Schritte in 3D Edit Pro und 3D Print

In 3D Edit Pro konnte eine weitere Geometriekontrolle durchgeführt werden, um die Qualität der Polygonanordnung zu überprüfen und gegebenenfalls zu reparieren.

In der Software 3D Print wurden die unmittelbaren Vorbereitungen für den 3D-Druck vorgenommen. Die Dateien wurden im vrml-Format importiert und im Bauraum angezeigt. Da das Modell mit der Maßeinheit mm in ZBrush ausgegeben worden war, wurde beim Öffnen diese gewählt. Nach und nach wurden die zu druckenden Dateien eingeladen und im Bauraum angeordnet. Der Boden, die erste Ebene des Bauraums, sollte gut gefüllt sein. Die folgenden Ebenen sollten so hoch wie nötig und so niedrig wie möglich gehalten werden. Sobald alle Dateien importiert und angeordnet waren, konnte dank der 3D Print Software eine Kalkulation der voraussichtlichen Druckzeit, des benötigten Materials und der Kosten durchgeführt werden. Abbildung 18 zeigt ein Beispiel für einen Bauraum wie er im Rahmen dieser Arbeit gedruckt wurde.

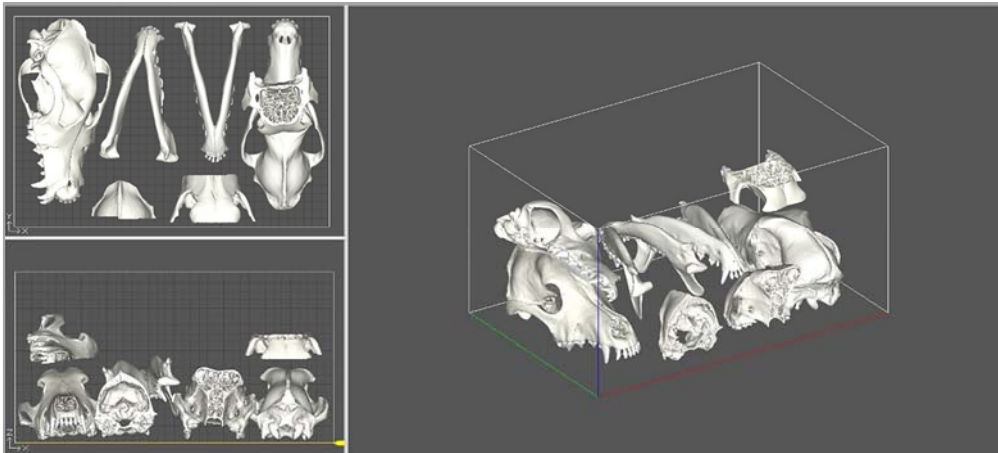


Abbildung 18: Bauraum in 3D Print – Anordnung der Objekte zum Druck, Ansicht aus verschiedenen Blickrichtungen

#### 3.6.4 Druck der 3D-Dateien

Die Drucke wurden mit dem Modell ProJet 660 Pro von 3D Systems gedruckt. Es handelt sich um einen Pulverdrucker. Das verwendete Pulver (VisiJet® PXL Core) ist ein Polymergips-Gemisch und die benötigte Cleaning Solution ist eine organische Flüssigkeit. Der Binder VisiJet® PXL Colors (klar, schwarz, gelb, magenta und cyan) liegt in Form einer dünnflüssigen Lösung vor.

Die Objekte wurden so angeordnet, dass sie den Bauraum optimal ausnutzten und gleichzeitig genug Abstand für eine sichere Entnahme nach Druckbeendigung eingehalten wurde. Nun wurde dem Drucker der Druckbefehl erteilt. Dieser prüfte daraufhin wieviel Material er benötigte und ob es in ausreichender Menge für den Druck zur Verfügung stand. Wenn dies nicht der Fall war, forderte eine Anzeige dazu auf die nötigen Schritte durchzuführen. Anschließend konnte der Druckvorgang gestartet werden. Zunächst wurde der Grund des Bauraums mit einem dichten Pulverbett gefüllt, auf welchem dann Schicht für Schicht die Modelle bis zur ihrer Fertigstellung aufgebaut wurden.

#### 3.6.5 Post-Processing der 3D-Drucke

##### 3.6.5.1 Post-Processing: Entnahme der Präparate aus dem Druckbett

Nach Beendigung des Druckvorgangs und einer Trocknungszeit von mindestens zwei Stunden befanden sich die Präparate im Druckbett des Druckers, welches im gesamten Bauraum dicht mit Pulver befüllt war. Aus diesem Pulver mussten die

Drucke vorsichtig befreit werden (siehe Abbildung 19). Hierzu wurde zunächst mit Hilfe eines Pinsels die glatte Oberfläche aufgelockert und unter Berücksichtigung der Anordnung der Objekte das überschüssige Pulver abgesaugt bis die obere Ebene von Präparaten soweit freigelegt war, dass man sie behutsam aus dem restlichen Pulverbett heben konnte. Der Drucker besitzt einen integrierten Staubsauger, der das abgesaugte Pulver mittels eines Filters recycelt und für zukünftige Drucke zur Verfügung stellt. Die entnommenen Exemplare wurden nach weiterer achtsamer Entfernung des oberflächlich anhaftenden Pulvers auf einem speziellen Tablett platziert. Die gedruckten Objekte waren in dieser Phase der Nachbereitung empfindlich und leicht zu zerbrechen, weshalb sie vorsichtiger Handhabung bedurften. Die Exemplare in den unteren Ebenen wurden nach der gleichen Vorgehensart dem Drucker entnommen und auf dem Tablett platziert.

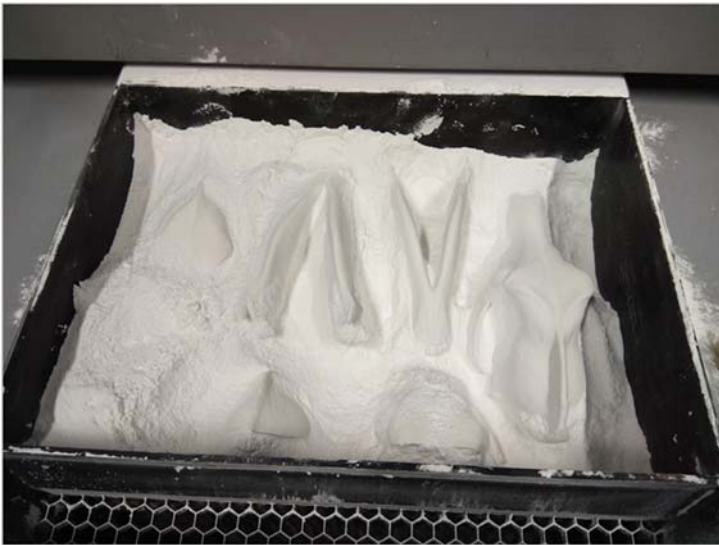


Abbildung 19: Entnahme der Objekte aus dem Druckbett nach grober Entfernung des Pulvers

#### 3.6.5.2 Post-Processing: Festigen der Drucke

Der nächste Schritt der Nachbearbeitung bestand darin, die gedruckten Objekte in der sogenannten Post-Processing-Unit des Druckers durch Erwärmen für zwei bis vier Stunden zu härten. Durch die Erwärmung festigte sich das Polymernetz.

#### 3.6.5.3 Post-Processing: Entfernung des Pulvers

Im Anschluss wurden mit Druckluft die Pulverreste entfernt, unter Zuhilfenahme von dünnen Drähten die einzelnen Foramina und Canales durchgängig gemacht und

abschließend letzte, oberflächliche Pulverreste mit einem Pinsel beseitigt. Die Objektfarben wirkten zu diesem Zeitpunkt (vor dem Infiltrieren) blass.

#### 3.6.5.4 Post-Processing: Infiltrieren der Drucke

Auf einer separat stehenden Werkbank wurden die Drucke weiterbearbeitet, sie wurden mit Sekundenkleber (ColorBond/zbond®) infiltriert. Die Werkbank saugte die entstehenden Gase direkt ab. Ein Vorteil des Sekundenklebers war, dass die Reste der Flüssigkeit wiederverwendet werden konnten. Nach einer Trocknungszeit von etwa einer Stunde, in der sie mehrfach gewendet wurden, um nicht an der Unterlage anzukleben, waren die 3D-Druck-Präparate fertiggestellt. Durch das Infiltrieren wurden ihre mechanischen Eigenschaften verbessert und die Farben deutlich kräftiger.

Im Verlauf des Arbeitsprozesses kam es dazu, dass feine Strukturen wie die Spitzen der Zähne abbrachen. Sie konnten mit handelsüblichem Sekundenkleber wieder befestigt werden.

### 3.7 Evaluation

Für die objektive Evaluation der 3D-Drucke unter Studierenden wurde neben dem Evaluationsbogen mit Abbildungen auch ein Skript angefertigt. Zusätzlich standen verschiedene Präparate zum Lernen zur Verfügung.

#### 3.7.1 Evaluationsbogen

Der Evaluationsbogen bestand aus zehn Wissens- und Verständnisfragen zum Schädel des Hundes. Acht der zehn Fragen waren im Multiple-Choice- bzw. Single-Choice-Format gestellt, in zwei Fragen sollten die Beschriftungen in einer Abbildung mit Hilfe von Zahlen anatomischen Strukturen zugeordnet werden. Dies waren Frage Nummer 6 und 7.

Fünf der acht MC-Fragen, nämlich Frage Nummer 2, 4, 5, 9 und 10, waren Single-Choice-Fragen. Dies war kenntlich gemacht. Bei einer MC-Frage waren zwei Antwortmöglichkeiten korrekt, dies ließ sich aus der Fragestellung ableiten. Es handelte sich hierbei um Frage Nummer 3. Bei zwei MC-Fragen, Frage Nummer 1 und 8, waren drei Antwortmöglichkeiten richtig, die Anzahl der korrekten Antworten ließ sich nicht aus der Frage erschließen.

Die Fragen mit der Nummer 2, 4, 5, 6 und 9 enthielten Abbildungen auf denen mit Pfeilen beschriftete Strukturen erkannt werden sollten. Frage Nummer 7 zeigte ein CT-Bild, welches in seiner Schnittebene der Fotografie des 3D-Präparates in der Abbildung der 6. Frage glich.

Die dritte Gruppe beantwortete im zweiten Durchgang drei zusätzliche Fragen zur subjektiven Bewertung der 3D-Präparate.

Sowohl der Evaluationsbogen als auch das Skript wurden in Word von Microsoft Office Professional 2013 für PC auf einem Asus Zenbook mit Betriebssystem Windows 7 Ultimate erstellt.

Nach Erstellung des Fragebogens wurde er mit fachkundiger Hilfe sowohl von Herrn PD Dr. Reese als auch vor der Durchführung der Evaluation von den wissenschaftlichen Mitarbeitern des Lehrstuhls für Anatomie, Histologie und Embryologie geprüft. Hauptaugenmerk war die Verständlichkeit und der adäquate Schweregrad der Fragen.

### 3.7.2 Anfertigung der Abbildungen

Der Evaluationsbogen enthält sechs Abbildungen von Oberschädeln. Sie alle stammen aus der Datei des Deutschen Schäferhundes. Fünf sind Fotografien der Präparate, die mit dem 3D-Drucker gedruckt wurden. Die erste Abbildung in Frage 2 zeigt eine laterale Ansicht, die zweite und dritte Abbildung in den Fragen 4 und 5 einen kaudodorsalen Blick in die geöffnete Schädelhöhle. Die vierte Abbildung in Frage 6 einen zweistufigen transversalen Schnitt auf Höhe der Bulla tympanica. Die Abbildung in Frage 7 ist ein CT-Bild. Das CT-Bild wurde entsprechend der Abbildung, die den transversalen Schnitt auf Höhe der Bulla tympanica zeigt, ausgesucht. So sollten in der Auswertung der Evaluation Rückschlüsse auf eine Transferleistung der Studierenden ermöglicht werden. Die letzte Abbildung in Frage 9 stellt einen transversalen Schnitt von Lamina cribrosa bis zu den Ossa conchae in der Kaudalansicht dar.

Bei der Herstellung der Fotografien wurde auf eine gute Ausleuchtung und Tiefenschärfe geachtet, damit die anatomischen Strukturen gut erkannt und differenziert werden können. Verwendet wurde eine Spiegelreflexkamera von Canon (EOS 60D) mit Objektiven mit einer Brennweite von 17-85 mm (Übersichtsaufnahmen) sowie 100 mm (Detailaufnahmen). Bearbeitet wurden die Bilder mit Adobe Photoshop

CS6 für PC von Adobe Systems an einem Asus Zenbook mit Betriebssystem Windows 7 Ultimate.

### 3.7.3 Skript

Aufgrund der Menge an Lernstoff, die das Thema „Schädel“ umfasst, musste ein auf die Rahmenbedingungen der Evaluation zugeschnittenes Skript verfasst werden. Dieses wurde den Studierenden in der einstündigen Lernzeit zur Verfügung gestellt. Inhaltlich beschränkte es sich auf die Tierart Hund und anatomische Sachverhalte, die thematisch auf die Fragen abgestimmt waren. Der Text wurde dem „Lehrbuch der Anatomie der Haustiere“, Nickel et al. (2004), entnommen und teilweise leicht abgeändert. Den Studierenden wurden ebenso Ausdrücke von Abbildungen aus den gängigen Lehrbüchern „Lehrbuch der Anatomie der Haustiere“, Nickel et al. (2004), „Anatomie der Haussäugetiere“, König und Liebich (2014), und „Anatomie für die Tiermedizin“, Salomon (2015), zur Verfügung gestellt. Zum einen waren die Abbildungen in schwarz-weiß im DIN A5-Format im Skript abgedruckt, von welchem jede/r Studierende ein Exemplar erhielt. Zum anderen wurden sie als farbige Großdrucke im DIN A4-Format gruppenweise zum Lernen angeboten.

### 3.7.4 Lehrmaterialien

Neben den oben beschriebenen Skripten und farbigen Großdrucken anatomischer Abbildungen, wurden den Studierenden weitere Lehrmaterialien in Abhängigkeit von der Gruppenzuordnung ausgehändigt (vgl. Tabelle 9).



Tabelle 9: Einteilung der Gruppen und der Lehrmaterialien

Raum	Gruppe	Material
Anatomie-Hörsaal	1	Skript und Großdrucke der Abbildungen
Präparier-Saal	2	Skript und Großdrucke der Abbildungen + Native Schädelpräparate
Histologie-Saal	3	Skript und Großdrucke der Abbildungen + 3D-Druck- Präparate

### 3.7.5 Ablauf der Evaluation

Die Evaluation fand am 11.12.2017 im Rahmen einer Anatomie-Vorlesung im dritten Semester statt. Es stand eine Doppelstunde zur Verfügung. Insgesamt nahmen 126 Studierende an der Erhebung teil, jede/r Studierende füllte den Fragebogen zweimal aus. Erstmals vor einer Lernzeit, das zweite Mal nach der Lernzeit. Zu diesem Zeitpunkt hatten alle Studierenden eine Vorlesung zum Thema Schädel gehört. Es konnte demzufolge angenommen werden, dass der Kenntnisstand bei allen Studierenden auf einem ähnlichen Level war. Vorkenntnisse, die sich Studierenden möglicherweise außerhalb des Studiums angeeignet hatten, wurden nicht berücksichtigt.

Den Studierenden war bis zum Tag der Evaluation nicht bekannt, dass eine Bewertung der 3D-Drucke stattfinden sollte. Damit wurde ausgeschlossen, dass besonders punktmäßig interessierte Studierende anwesend und andere abwesend waren.

Die Studierenden wurden zufällig in drei etwa gleich große Gruppen auf drei Räume aufgeteilt, anschließend wurden sie über die Evaluation und den Ablauf informiert. Alle Studierenden füllten den Fragebogen mit zehn Fragen aus. Anschließend erhielten sie das Lehrmaterial. Nach einer Lernzeit von 60 min legten die Studierenden die Materialien beiseite und füllten erneut den Fragebogen aus.

Wie aus der Tabelle 10 ersichtlich ist, erhielten alle Gruppen die Skripte und farbigen Großdrucke. Die zweite Gruppe erhielt zusätzlich als native Präparate ganze und median geschnittene, an Plexiglas-Platten befestigte Oberschädel sowie Unterkiefer

mit denen am Lehrstuhl für Anatomie, Histologie und Embryologie der Tierärztlichen Fakultät der LMU München im Präparierkurs hauptsächlich gelehrt wird.

Die dritte Gruppe hatte als Präparate 3D-Ausdrucke zur Verfügung. Dies waren Oberschädel und Unterkiefer, geringgradig paramedian geschnittene Oberschädel als auch einen kaudodorsalen Schnitt, der Einblick in die Schädelhöhle und ihre Strukturen gewährte. Weiterhin drei transversale Schnitte: einen Schnitt von Lamina cribrosa bis zu den Ossa conchae, einen zweiten, weiter rostral gesetzten Schnitt auf Höhe der Ossa conchae sowie einen Dritten auf Höhe der Bulla tympanica.

Das Ziel der Umfrage war es den Lernfortschritt und Unterschiede im Lernfortschritt in Abhängigkeit von den Lehrmaterialien festzustellen.

Chronologischer Ablauf der Evaluation:

1. Die Studierenden wurden in etwa gleich großen Gruppen zufällig auf die drei Räume verteilt, in dem sie einen Zettel mit der Gruppennummer zogen.
2. Es erfolgte eine kurze Einleitung und Information über den Ablauf der Doppelstunde.
3. Die Evaluationsbögen wurden ausgeteilt und von den Studierenden ausgefüllt. Danach wurden sie eingesammelt.
4. Die Lehrmaterialien wurden ausgeteilt.
5. Die Studierenden hatten eine Stunde Zeit selbstständig mit den Materialien zu lernen. Es wurden keine Fragen beantwortet.
6. Nach Ablauf der Zeit wurden die Lehrmaterialien eingesammelt.
7. Die Evaluationsbögen wurden ein zweites Mal ausgeteilt, die Studierenden füllten sie aus. Gruppe 3 beantwortete zusätzlich drei Fragen zu einer subjektiven Bewertung der 3D-Druck Präparate. Nachfolgend wurden die ausgefüllten Bögen eingesammelt.

Tabelle 10: Lehrmaterialien, die die Gruppen in der Lernzeit nutzen konnten

Gruppennummer	Lehrmaterialien	Aufschlüsselung der Lehrmaterialien
1; 2; 3	Skript	1 Skript pro Studierenden
1; 2; 3	Großdrucke der Abbildungen	6 Sets pro Gruppe bestehend aus 3 Großdrucken der Abbildungen
2	Native Schädelpräparate	6 Sets bestehend aus je 2x Oberschädel mind. 2x Unterkiefer und 2x Medianschnitt an Plexiglas
3	3D- Druck-Präparate	6 Sets bestehend aus je 1x Oberschädel, 1x Unterkiefer, 1x kaudodorsaler Schnitt, 1x Schnitt der Bulla tympanica, 1x transversaler Schnitt Höhe Lamina cribrosa, 1x transversaler Schnitt Höhe Ossa concharum nasalium, 2x paramedianer Schnitt

## **4 Ergebnisse**

Auf Basis der Erfahrungen der Versuche 1 und 2 entwickelte sich die im dritten Versuch angewendete Methode zur Erstellung der dreidimensionalen, druckbaren Dateien.

Die so erarbeiteten Dateien wurden dem Anspruch wirklichkeitsgetreu und anatomisch korrekt zu sein gerecht, sowohl in digitaler als auch in ausgedruckter Form als 3D-Modelle.

### **4.1 Erstellung endgültig verwendbarer DICOM-Datensätze**

Die CT-Datensätze der Vorversuche, die mehr als einen Schädel abbildeten, waren in ihrer Qualität nicht ausreichend, um daraus detailgetreue digitale 3D-Druckdateien zu erstellen. Aufgrund der Vielzahl an unterschiedlichen Schädelknochen, die in einem Datensatz erfasst wurden, konnten den jeweiligen Eigenschaften der Knochen nicht entsprochen werden, sondern es bedurfte eines Kompromisses (vgl. Abschnitt 5.3.1).

Von den Oberschädeln und Unterkiefern der Hunde, inklusive des Deutschen Schäferhundes, wurden erneut CT-Datensätze erstellt. Jedes Objekt wurde in einer einzelnen Datei erfasst. Es war von großer Bedeutung, dass Oberschädel und Unterkiefer getrennt voneinander gescannt wurden, denn die Parameter beim Export im OBJ-Format aus einem DICOM-Datensatz mussten in der Software differenziert gewählt werden. Zudem wäre es sehr aufwändig und außerordentlich fehlerträchtig gewesen ein zusammengesetztes Kiefergelenk digital zu trennen, da es in OsiriX nur möglich war entlang einer Ebene zuschneiden, die in ihrer Tiefe nicht begrenzt war.

### **4.2 Bearbeitung der OBJ-Dateien**

Das Vorgehen wie in Versuch 1 und 2 aus einem DICOM-Datensatz nur eine einzige OBJ-Datei zu exportieren und diese durch Nachbearbeitung druckbar zu machen, stellte sich als nicht zielführend heraus. Aus den gewonnenen Dateien konnten keine anatomisch korrekten Replikat der Hundeschädel erzeugt werden.

In Versuch 1 benötigte die Nachbearbeitung eines Oberschädels bis zu 40 Arbeitsstunden, da eine große Anzahl an Strukturen gewissenhaft und detailgetreu

überarbeitet werden musste. Eine wirklichkeitsgetreue Nachbildung war nicht immer möglich.

Auch wenn der Aufwand der Nachbearbeitung im zweiten Versuch durch die Wahl eines „Mittelwegs“ verringert wurde, handelte es sich nicht um eine praktikable Lösung, um die gewünschten Ergebnisse zu erzielen. Der Zeit- und Arbeitsaufwand für einen Oberschädel war mit bis zu 25 Arbeitsstunden immer noch sehr hoch, obwohl eine weniger starke Abweichung vom Original als in Versuch 1 erreicht wurde und so das Remodellieren erleichterte. Eine Konstruktion der fehlenden Nasenmuscheln in ZBrush war aus technischen und graphischen Gründen in entsprechender Qualität nicht möglich.

Im Gegensatz zu digitalen Dateien für den 3D-Druck von Schädeln anderer Tierarten, wie beispielsweise des Pferdes (Hagebecker, 2017), wurden zur Erzeugung von druckbaren, digitalen Dateien von Hundeschädeln mehrere OBJ-Dateien aus demselben Datensatz benötigt. Dies war notwendig, um den unterschiedlichen Eigenschaften der Objektbereiche hinsichtlich ihrer Dichte und Knochendicke entsprechend gerecht zu werden. Zur Veranschaulichung seien hier beim Hund die vergleichsweise röntgendichten Zähne gegenüber den hauchdünnen Ossa conchae genannt.

Das Zuschneiden der jeweiligen Anteile erwies sich als diffizil, denn aufgrund der dreidimensionalen Darstellung wurde jeweils in einer Ebene im Raum geschnitten. Die jeweilige Ebene war in ihrer Tiefe nicht begrenzbar, was zu einer Limitation der Schnittoptionen führte. In Tabelle 8 sind die Anteile und die zugehörige Anzahl der jeweils erstellten Dateien aufgeführt.

Die Zuschnitte wurden nach ihrer Erstellung in OsiriX in der Software Blender zu einem Objekt zusammengefügt, um ein zusammenhängendes Polygonnetz zu erhalten (vgl. Abbildung 17). Voraussetzung dafür war, dass alle verwendeten Dateien aus demselben DICOM-Datensatz generiert wurden. Nur so besaßen sie kongruente Koordinaten und Proportionen und damit die Voraussetzung für die Integration der Polygonnetze. Dieses neue Objekt wurde wiederum im OBJ-Format exportiert.

Im Nachgang wurden die Übergänge zwischen den Anteilen in der Software ZBrush modelliert und der Schädel als Ganzes geprüft und bei Bedarf bearbeitet. Eine Nachbearbeitung war nötig, der Zeitaufwand war jedoch deutlich verringert. Für diese

Arbeitsschritte mussten nun etwa zehn Arbeitsstunden eingerechnet werden. Mit dieser Methode wurden anatomisch korrekte 3D-Druckdateien von sehr guter Qualität angefertigt.

### **4.3 Nachbearbeitung der einzelnen digitalen 3D-Dateien**

Das Ausmaß des Bearbeitungsaufwands hing sehr stark von der Qualität der originalen Schädel ab. Sie wurden sorgfältig aus rund 570 begutachteten Schädeln ausgewählt. Die gewählte Rasse aus der jeweiligen Gruppe ergab sich dabei aus der Wahl des Oberschädels und Unterkiefers mit bestmöglicher Qualität. Trotz gewissenhafter Auslese mussten gewisse Fehler bzw. Schäden in Kauf genommen werden.

Die auftretenden Mängel, die einer Nachbearbeitung bedurften, waren verschiedener Art. Zum Teil handelte es sich um Schäden an den Originalen, zum anderen um Artefakte der CT-Aufnahmen. Durch die computertomographische Aufnahme wiesen alle Objekte eine unebene Oberfläche mit treppenstufenähnlicher Riffelung auf. Sie wurde mit dem Smoothing-Tool geglättet. Ebenso wurden an jedem Objekt die Übergänge zwischen den zusammengesetzten Anteilen verblendet, dies betraf besonders den Bereich zwischen Knochen und Zähnen. Bei der Überarbeitung der Oberfläche musste darauf geachtet werden, dass die Artefakte beseitigt wurden, die knochentypische Oberflächenstruktur jedoch erhalten blieb. Die Korrekturen wurden in ZBrush durchgeführt.

Die virtuellen 3D-Dateien aller Schädel und Unterkiefer wurden auf ihre anatomische Korrektheit geprüft und bei Bedarf korrigiert, um den Anforderungen der anatomischen Lehre gerecht zu werden.

#### **4.3.1 Virtuelle Dateien des Deutschen Schäferhundes**

##### **4.3.1.1 Ganzer Oberschädel mit Unterkiefer**

###### Oberschädel:

Der erste Dens incisivus ( $I_1$ ) beider Seiten war sehr schmal und wurde geringgradig verdickt, um ihn stabiler zu machen und lebensecht abzubilden. Grubenartige Defekte im linken Dens caninus, in beiden  $P_4$  sowie dem linken  $M_2$  wurden geschlossen.

## Ergebnisse

Von rostral nach kaudal wurden das Foramen palatinum majus und minus (vgl. Abbildung 20), der Choanenstachel, die Forr. ethmoidalia, das For. mastoideum sowie der Canalis nervi hypoglossi verdeutlicht. Defekte in der Orbitawand wurden geschlossen.

Die Lamina sphenothmoidalis des Os palatinum wurde zur Erhöhung der Stabilität verstärkt, ebenso die rostromediale Wand der Bulla tympanica und der Pars orbitalis des Os frontale.

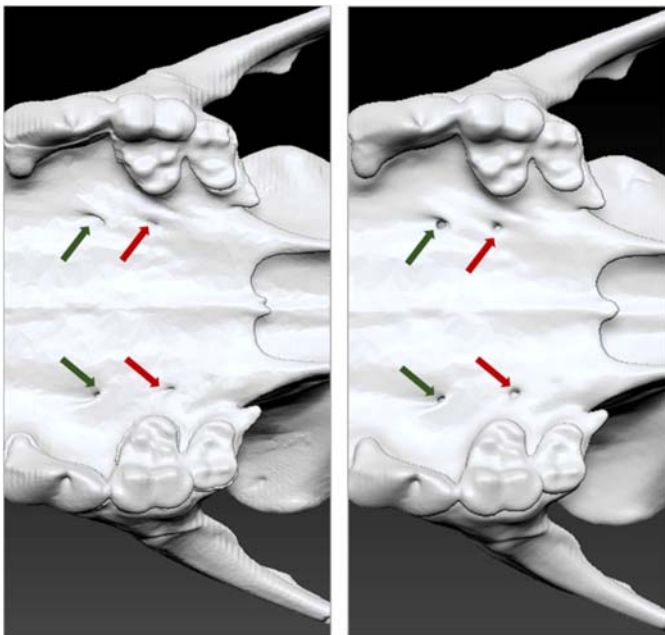


Abbildung 20: Foramen palatinum majus (grüner Pfeil) und minus (roter Pfeil) des DSH; auf dem linken Bild vor und auf dem rechten nach der Bearbeitung

#### Unterkiefer:

Die beiden Hälften waren in ihrer Symphyse künstlich zusammengefügt worden und nicht kongruent, sondern gegeneinander verschoben. Dies wurde zu Beginn korrigiert, so dass der Margo alveolaris stufenlos war (vgl. Abbildung 21 und Abbildung 22). Der Processus coronoideus des Ramus mandibulae wurde verstärkt, nachdem er bei der Entnahme des ersten gedruckten Objekts aus dem Pulverbett brach. Nach der Verstärkung war er stabil.

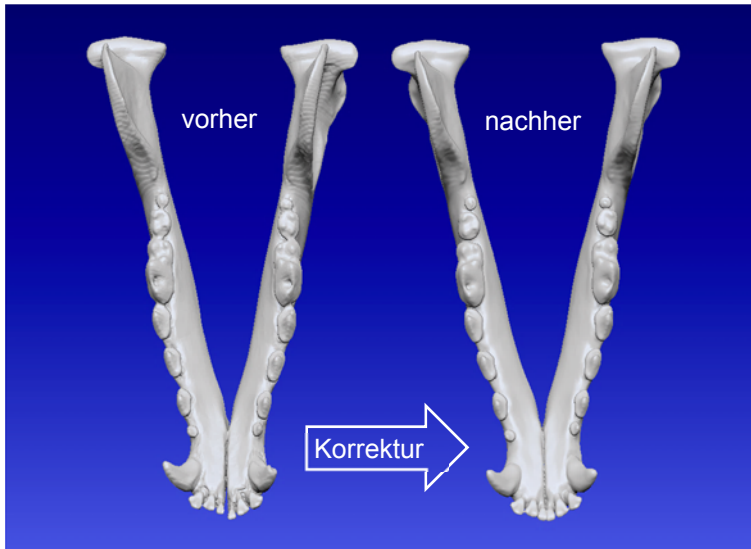


Abbildung 21: DSH Unterkiefer: links vor Bearbeitung und Korrektur der Symphyse – rechts nach Bearbeitung und Korrektur der Symphyse



Abbildung 22: Detailansicht DSH Unterkiefer: links vor Bearbeitung und Korrektur der Symphyse – rechts nach Bearbeitung und Korrektur der Symphyse

#### 4.3.1.2 Paramedianer Schnitt

Die durch die computertomographische Aufnahme entstandenen Schichten waren als treppenstufenähnlicher Unebenheiten an den Schnittflächen zu sehen. Sie wurden geglättet. Nach Modellierung der Zahnhäse, wurde der erste Dens incisivus verstärkt, die Lamina sphenothmoidalis des Os palatinum ausgebessert, die Forr. ethmoidalia vertieft und das Lumen des For. maxillare von Artefakten befreit.



#### 4.3.1.3 Kaudodorsaler Schnitt

Bei diesem Schnitt wurde der kaudodorsale Teil der Schädeldecke entfernt, dies ermöglichte einen Einblick in die Schädelhöhle mit den innen liegenden Strukturen (siehe Abbildung 23 und Abbildung 24). Auch bei diesem Schnitt wurden die treppenstufenähnlichen Unebenheiten an den Schnittflächen gemildert. Da in beiden Kieferhälften der  $I_1$  schwach dargestellt war, wurde er geringgradig vergrößert. Die grubenartigen Defekte am linken Dens caninus, am linken und rechten  $P_4$  als auch am linken  $M_2$  wurden ausgebessert. Das Foramen palatinum majus und minus, die Forr. ethmoidalia und der Canalis nervi hypoglossi wurden vergrößert, um sie wirklichkeitsgetreu wiederzugeben. Im Inneren der Schädelhöhle sind sowohl die Crista orbitosphenoidalis, das Dorsum sellae turcicae als auch die Crista partis petrosa des Os temporale herausgearbeitet worden. Des Weiteren mussten die Durchtrittsstellen der Riechfäden in der Lamina cribrosa des Os ethmoidale teilweise nachgebildet werden.

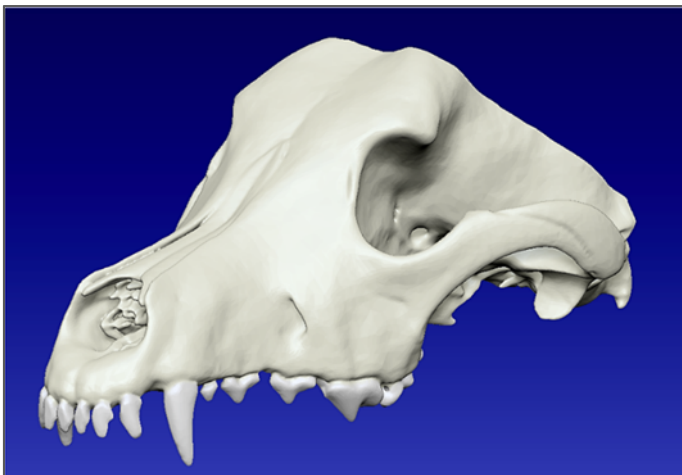


Abbildung 23: DSH kaudodorsaler Schnitt nach Bearbeitung und Kolorierung: Darstellung der Schnittführung in frontaler Ansicht

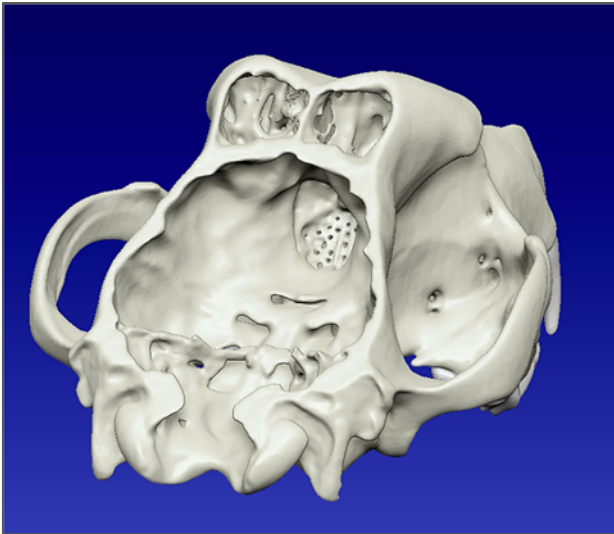


Abbildung 24: DSH kaudodorsaler Schnitt nach Bearbeitung und Kolorierung: Darstellung der Schnittführung in kaudaler Ansicht

#### 4.3.1.4 Transversalschnitte

In allen drei Schnitten wurden der Bereich der Zahnhäse sowie die treppenstufenähnlichen Unebenheiten an den Schnittflächen überarbeitet.

##### 1. Breiter Transversalschnitt:

In der rostralen Ansicht, ab Höhe des P<sub>4</sub>, zeigt dieser Schnitt neben dem Canalis infraorbitalis, dem Vomer und dem Os palatinum, die Ethmoturbinalia sowie Lamina tectoria, orbitalis, basalis und perpendicularis des Os ethmoidale. Durch Schäden bedingte Löcher in diesen Strukturen wurden geschlossen.

Kaudal endet der Schnitt in Höhe der Lamina cribrosa des Ethmoids. Die Forr. palatina minora als auch das Foramen palatinum majus wurden herausgearbeitet. Der Processus sphenoidalis des Os palatinum wurde verstärkt. Artefakte im Foramen maxillare wurden entfernt (siehe Abbildung 25 und Abbildung 26)

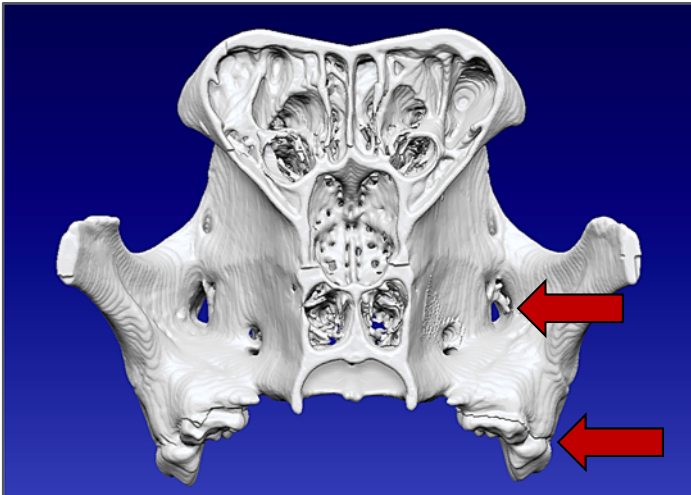


Abbildung 25: DSH breiter Transversalschnitt vor der Bearbeitung; Beispiele der Nachbearbeitung

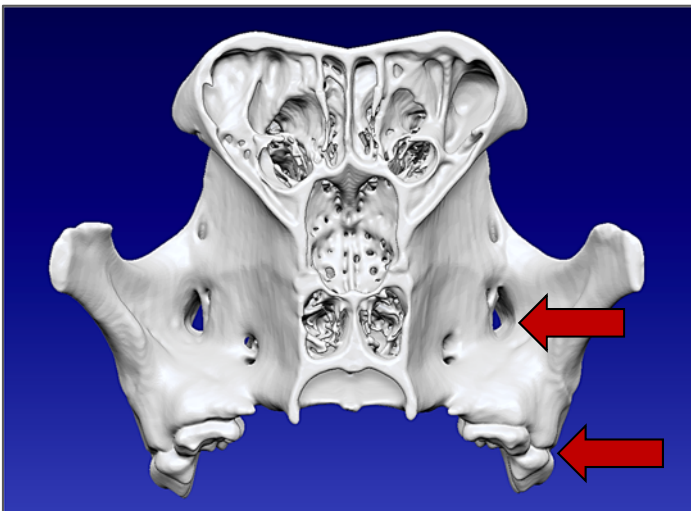


Abbildung 26: DSH breiter Transversalschnitt nach der Bearbeitung; Beispiele der Nachbearbeitung

## 2. Schmaler Transversalschnitt:

Der Schnitt zeigt zur Darstellung der Anteile des Os ethmoidale einen Ausschnitt des Gesichtsschädels von einem schmalen Anteil des P<sub>4</sub> bis zur rostralen Hälfte des M<sub>2</sub> (siehe Abbildung 27 und Abbildung 28). Anschaulich zu sehen sind Lamina tectoria, orbitalis, basalis und perpendicularis sowie das Vomer und die aufgerollten Ethmoturbinalia. Das Foramen maxillare und die Fossa sacci lacrimalis sind zu erkennen. Das Foramen palatinum minus wurde nachgebildet und Defekte am Übergang von Vomer zu Lamina basalis geschlossen.

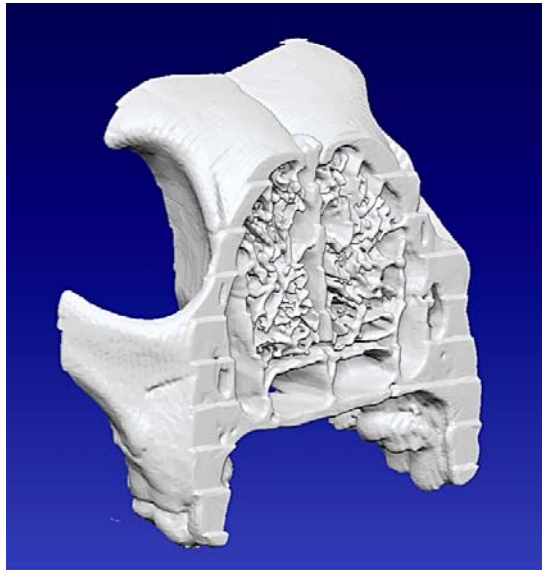


Abbildung 27: schmäler Transversalschnitt vor Bearbeitung: Darstellung der Schnittkanten mit Stufenbildung und der Artefakte

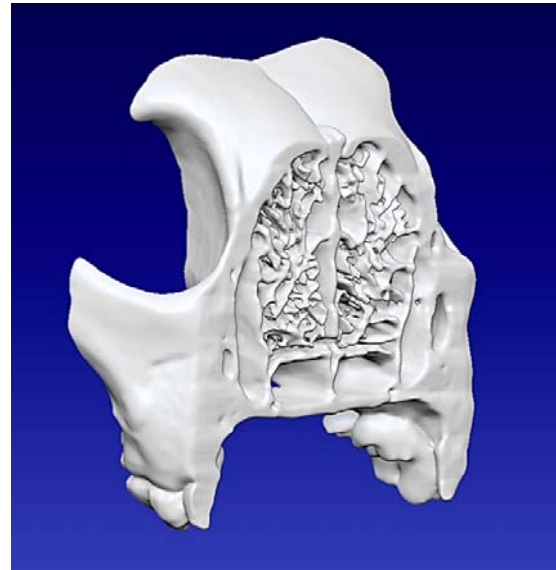


Abbildung 28: schmäler Transversalschnitt nach Bearbeitung: Bereinigung der Schnittkanten und der Artefakte

### 3. Schnitt durch die Bulla tympanica:

Es handelt sich um einen zweistufigen transversalen Schnitt durch die Bulla tympanica bis zum kaudalen Ende des Oberschädels. In der linken Hälfte liegt die Schnittebene im rostralen Drittel des Porus acusticus externus, in der rechten Hälfte am kaudalen Rand des Porus acusticus externus und lässt einen Blick auf weitere Strukturen des Innenohrs zu. Defekte im Tentorium cerebelli osseum wurden ausgebessert und sehr dünnen Bereiche zur Stabilisierung verstärkt. Der Zugang zum Canalis nervi hypoglossi wurde verdeutlicht.

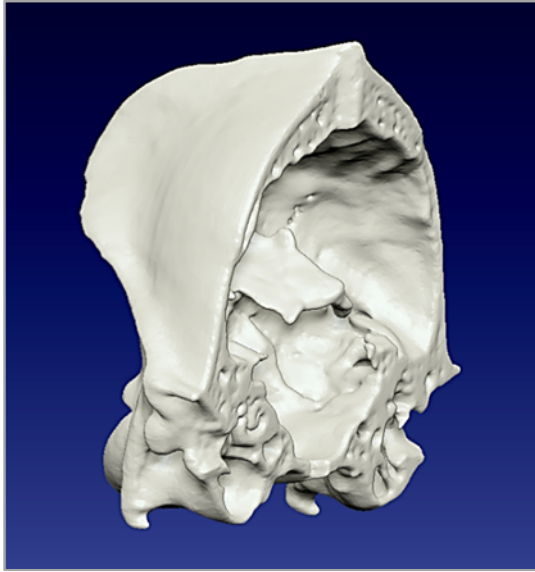


Abbildung 29: DSH zweistufiger Schnitt der Bulla tympanica nach Bearbeitung; rostralaterale Ansicht

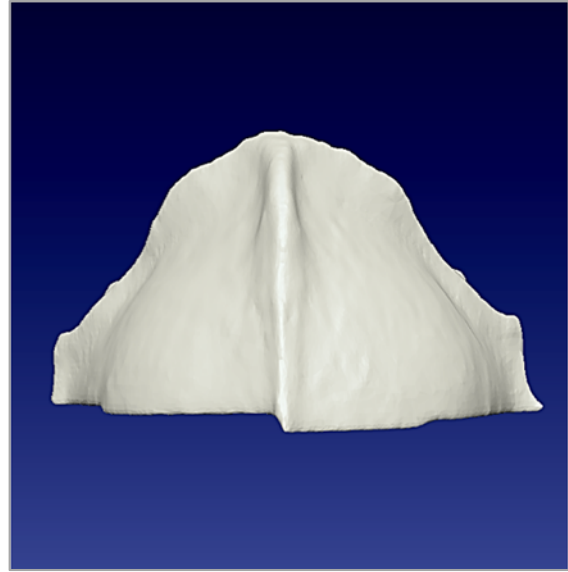


Abbildung 30: DSH zweistufiger Schnitt der Bulla tympanica nach Bearbeitung; dorsale Ansicht

#### 4.3.2 Virtuelle Dateien des Afghanischen Windhundes

##### Oberschädel:

Nachdem die Anteile ineinander verblendet wurden, mussten die ersten und zweiten Dentes incisivi ( $I_1$  und  $I_2$ ) geringgradig in ihrem Volumen vergrößert werden, um stabil zu sein. Ihre Spitzen und die beider Dentes canini wurden nachgebildet, so auch der Hamulus pterygoideus sinister. Nach Vertiefung des For. palatinum majus, der Forr. palatina minora und der Fossa sacci lacrimalis, wurden sowohl die Forr. ethmoidalia, der Canalis nervi hypoglossi als auch das For. sphenopalatinum vergrößert. Das For. palatinum caudale wurde wiederhergestellt. Im kaudalen Abschnitt des Schädels wurden das For. retroarticulare und das For. stylomastoideum herausgearbeitet. Ein Defekt in Form eines Lochs an der Nackenfläche des Os occipitale wurde geschlossen.

##### Unterkiefer:

Das Zusammensetzen von Oberschädel und Unterkiefer im Kiefergelenk (Articulatio temporomandibularis) war beim Afghanischen Windhund nicht möglich. Der Abstand zwischen den Processus condylares war zu gering und der Unterkiefer dadurch 1-2 mm zu lang. Die Zähne fügten sich nicht ineinander. Eine Veränderung der Distanz

## Ergebnisse

und damit des Winkels kann bei einem artifiziiellen Verbinden der beiden Unterkieferäste entstanden sein. Der Winkel zwischen den Unterkieferhälften wurde in der digitalen Datei vergrößert, wodurch sich auch die Länge des Unterkiefers verringerte und so dem Oberschädel angepasst werden konnte (siehe Abbildung 31 und Abbildung 32). Dadurch erhielt man einen Unterkiefer, der mit dem Oberschädel zusammenpasste.

Der erste und zweite Dens incisivus beider Kieferäste wurde stabiler gemacht, danach folgte die Reparatur der Dentes canini. Dem Exemplar des linken Ramus mandibulae fehlte an seiner rostralen Fläche ein flächenhaftes Stück. Auf der rechten Seite war ein kleiner Teil des Enamelums abgesprengt. Ein Defekt im linken  $M_1$  und im rechten  $M_3$  wurde verschlossen. Defekte am rostralen Ende der Symphyse wurden behoben und die Forr. mentalia verdeutlicht.

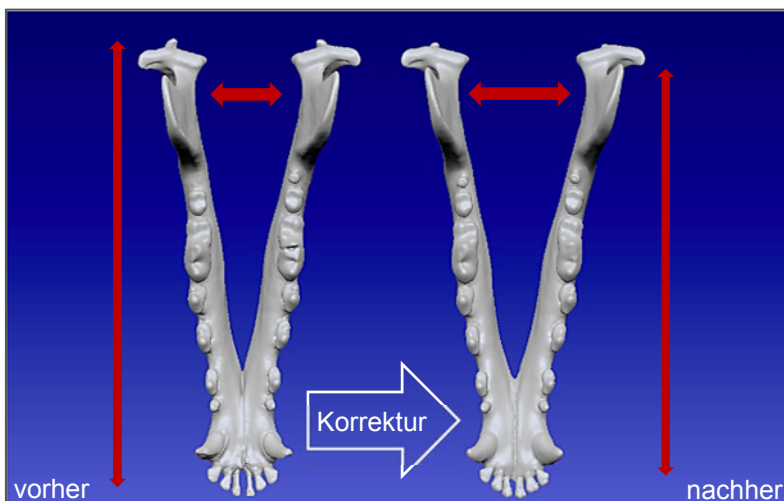


Abbildung 31: Afghanischer Windhund Unterkiefer vor und nach Bearbeitung und Korrektur des Winkels; die roten Pfeile illustrieren die Unterschiede

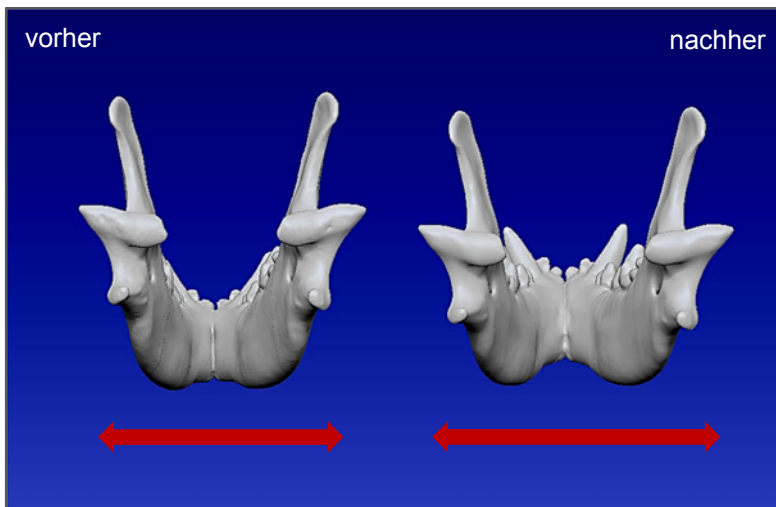


Abbildung 32: Afghanischer Windhund Unterkiefer vor und nach Bearbeitung und Korrektur des Winkels der Unterkieferäste; die roten Pfeile illustrieren die Unterschiede

#### 4.3.3 Virtuelle Dateien des Boxers

##### Oberschädel:

Zunächst wurden wie bei den anderen Objekten die Zahnhälse modelliert. Bei diesem Objekt bedurfte es besonders um den ersten und zweiten Dens molaris der rechten Seite umfangreicher Bearbeitung. Der linke M<sub>2</sub> fehlte, ebenso der M<sub>3</sub> beider Seiten. Die I<sub>1</sub> und I<sub>2</sub> wurden sowohl links als auch rechts überarbeitet. Die rostrale Fläche des linken Dens caninus war abgesplittert und wurde repariert.

Das For. palatinum majus, die Forr. palatina minora, die Forr. ethmoidalia und der Zugang zum Canalis nervi hypoglossi wurden verdeutlicht, die Defekte der Fossa sacci lacrimalis geschlossen. Das sich an der Nackenfläche des Os occipitale befindliche Loch wurde geschlossen. Abbildung 33 zeigt beispielhaft Bearbeitungsbereiche.

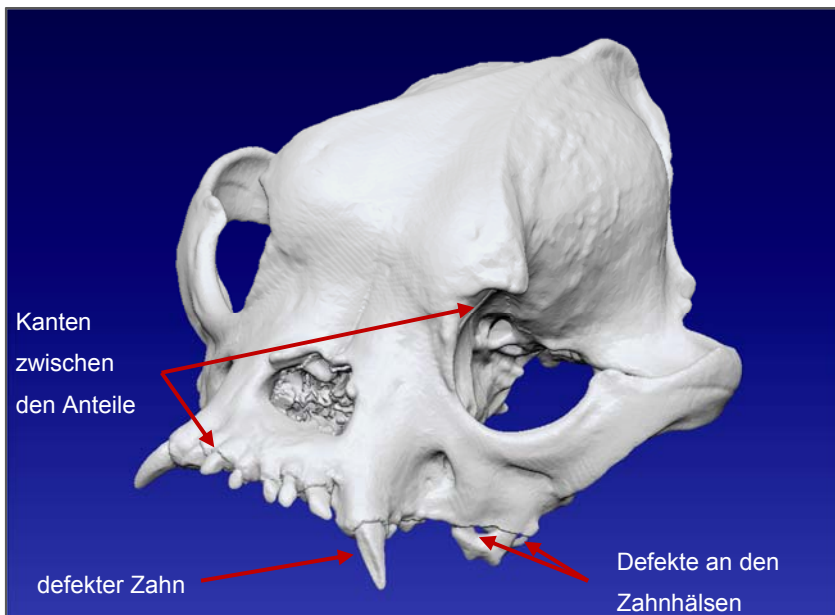


Abbildung 33: Boxer Oberschädel nach Zusammenfügen der Anteile; Beispiele für Bearbeitungsbereiche

#### Unterkiefer:

Der I<sub>1</sub> und I<sub>2</sub> wurden geringgradig verdickt. P<sub>1</sub>, P<sub>2</sub>, P<sub>4</sub> und M<sub>3</sub> wurden beidseits ergänzt. Die Zahnhälsen wurden überarbeitet, wobei sowohl dem vorhandenen P<sub>3</sub> als auch den beiden M<sub>2</sub> die labiale Außenfläche des knöchernen Zahnfachs fehlte. Neben diesen wurden auch Defekte im Bereich der Symphyse behoben.

#### 4.3.4 Virtuelle Dateien des Bull Terriers

#### Oberschädel:

Nach Verblendung der Anteile, im Besonderen im Bereich der Zähne, wurden die Foramina palatina minora und der Canalis nervi hypoglossi verdeutlicht. Artefakte sowohl im Foramen palatinum caudale als auch im Foramen sphenopalatinum wurden entfernt. Es fand eine Ausbesserung der Lamina sphenothmoidalis des Os palatinum statt, ebenso des kaudalen Randes der Fissura palatina.

An den Zähnen wurden die Verluste der Substantia adamantina an den lingualen Flächen der Dentes incisivi, der Dentes canini, der P<sub>4</sub>, der M<sub>1</sub> und der M<sub>2</sub> ausgeglichen.

#### Unterkiefer:

Außer der Überarbeitung der Zahnhälsen, wurden Artefakte am Dens caninus jeder Seite entfernt. Das an der labialen Fläche fehlende Stück des rechten Dens caninus



wurde remodelliert. Der  $I_1$  wurde wie die Symphyse überarbeitet. Der fehlende rechte  $P_4$  wurde ergänzt.

#### **4.4 Kolorierung der Objekte**

Um den Schädeln ein naturgetreues Erscheinungsbild hinsichtlich ihrer Farbe zugeben, wurde nach den passenden RGB-Werten gesucht.

Die Färbung natürlicher Schädelkonchen variiert je nach Alter, Lagerung und Grad der Entfettung während der Herstellung von einem hellen cremeweiß über elfenbeinfarben oder beige bis hin zu einem deutlichen Gelbstich. Die Färbung der dreidimensional gedruckten Knochenmodelle erfolgte in einem geringfügig gelblichen Beigeton (RGB: 247-247-232). Die Zähne wurden in einem gebrochenen Weiß eingefärbt (RGB: 247-247-247), um sie farblich vom Knochen abzugrenzen ohne einen unnatürlich starken Kontrast zu erzeugen. Die Farbwerte wurden anhand des optischen Eindrucks an verschiedenen PC-Bildschirmen und dem Testdruck von kleinen, gefärbten Platten ermittelt. Der Eindruck eines Farbtons variierte je nach Bildschirm und stimmte nicht mit der gedruckten Farbe des infiltrierten Objekts überein. Die Beurteilung am Bildschirm konnte also nur als grober Anhaltspunkt dienen. Ausschlaggebend waren die gedruckten und infiltrierten Testplatten.

#### **4.5 Geometrische Kontrolle**

Um eine druckfähige und intakte Datei zu erhalten, war eine mehrmalige Überprüfung des Polygonnetzes unerlässlich. Zum einen fand nach dem Zusammensetzen der Anteile und vor Beginn der weiteren Bearbeitung eine Kontrolle statt. Durch das Zuschneiden der Bereiche in OsiriX und dem Export im OBJ-Format waren Polygone mit freien Eckpunkten oder anderweitigen Beschädigungen entstanden. Defekte an den originalen Schädelknochen führten in manchen Fällen zu Diskontinuitäten des Polygonnetzes. Für die weitere erfolgreiche Verwendung, mussten diese Fehler repariert werden. Dies war anhand eines Tools namens mesh integrity in ZBrush möglich. Es prüfte die einzelnen Polygone auf ihre Integrität und stellte sie bei Bedarf wieder her. Zur Bereinigung der Dateien konnten zusammenhangslose Polygonstrukturen wie beispielsweise von Artefakten in Blender und in ZBrush entfernt werden.

Nach der anfänglichen geometrischen Kontrolle konnte mit der Nachbearbeitung begonnen werden. Beim Modellieren eines Oberschädels war eine Polygonanzahl von drei bis vier Millionen nicht ungewöhnlich. Die hohe Anzahl ermöglichte detailgenaue Veränderungen. Im Falle von größeren Formveränderungen der einzelnen, sehr kleinen Polygone musste wiederholt eine Kontrolle ihrer Struktur durchgeführt werden, denn durch das Modellieren kam es teilweise zu einer starken Deformation ihrer Form, wie zum Beispiel beim „Langziehen“, um eine abgebrochene Zahnschmelze nachzubilden. Dies begünstigte die Entstehung von freien Eckpunkten und die daraus resultierende Beschädigung des Netzes. Nach Beendigung der Modellierungsarbeiten und der Kolorierung fand eine abschließende Überprüfung und Reduktion der Polygonanzahl statt, um die Druckfähigkeit der Dateien zu gewährleisten.

## **4.6 Druck der digitalen Dateien**

### **4.6.1 Upload der Dateien in 3DPrint**

Die Dateien lagen nach Export in ZBrush im vrml-Format vor. So enthielten sie auch die Daten der Kolorierung. Vor dem Import in 3D Print konnte in 3D Edit Pro eine weitere Geometriekontrolle durchgeführt werden.

Probleme beim Import zeigte die Software sowohl bei einer Dateigröße über 100MB als auch wenn eine abschließende geometrische Kontrolle ausgeblieben war.

Nach dem Einladen wurden die Objekte im Bauraum so angeordnet, dass möglichst keine Fläche verloren ging, jedoch genug Abstand für eine sichere Entnahme gegeben war. Es musste auch darauf geachtet werden, dass sich die Objekte nicht überschneiden oder über die Begrenzung des Bauraums hinausragten.

### **4.6.2 Entnahme aus dem Druckbett**

Nach dem Druck und der Einhaltung einer Trocknungszeit konnten die Objekte vorsichtig dem Bauraum entnommen werden. Dazu musste zunächst das sie umgebende Gipspulver entfernt werden. Trotz behutsamen Vorgehens geschah es jedoch, dass Strukturen abbrechen. Dies passierte beispielsweise bei der Entnahme eines Unterkiefers des Deutschen Schäferhundes, der obere Teil des Ramus mandibulae brach ab. Anfällig für Schäden dieser Art waren auch die Spitzen der

Zähne. Im Nachgang konnten diese Fragmente problemlos mit einem handelsüblichen Alles- oder Sekundenkleber wieder angeklebt werden.

#### 4.6.3 Entfernung der Pulverrückstände

Nach der Entnahme der Objekte aus dem Druckbett, hafteten ihnen noch Pulverrückstände an und die Hohlräume waren mit Pulver gefüllt. Vor dessen Entfernung wurde das Polymernetz der Drucke in der Post-Processing-Unit durch Erwärmung gefestigt. Das überschüssige Pulver wurde im Anschluss mit Hilfe von Druckluft und Pinsel entfernt. Besondere Umsicht war im Bereich der Ossa conchae und der Knochenvorsprünge an der Ventralfläche des Schädels angezeigt. Foramina, Canales und Fossae mussten zusätzlich zum Auspusten mit einem Draht oder dünnen Holzstab von anhaftendem Pulver befreit werden. Eine gründliche Befreiung von Pulverrückständen erforderte Geduld und war in Binnenräumen ohne Öffnungen nicht möglich. Dies führte auf der einen Seite zu einer höheren Stabilität des Objekts, auf der anderen Seite trug es nicht unerheblich zu dessen Gewicht bei.

#### 4.6.4 Infiltration der Modelle

Die von Pulverresten befreiten Objekte wurden mit flüssigen Sekundenkleber, ColorBond/zbonb® 90, infiltriert. Sie wurden in einer Plastikwanne mit der Flüssigkeit übergossen bis alle Stellen, innen wie außen, großzügig benetzt worden waren. Nach dem Abtropfen mussten sie trocknen. In der Trocknungszeit war darauf zu achten, dass sie nicht an der Unterlage festklebten und Löcher nicht durch den Sekundenkleber verstopften. Dazu wurden sie regelmäßig neu positioniert und die Löcher mit einem Draht durchgängig gehalten. Dies konnte bei allen gedruckten Modellen erreicht werden.

Durch die Infiltration wurden die zuvor blassen Farben intensiviert bis es der endgültigen Färbung entsprach, zudem festigte sie die Drucke, wodurch diese widerstandsfähiger wurden.

### 4.7 Dreidimensional gedruckte Modelle

Nach sorgfältiger Durchführung aller Schritte waren die 3D-gedruckten Modelle fertig gestellt und anwendungsbereit. Tabelle 11 zeigt eine Übersicht der Modelle, die sowohl als virtuelle Datei als auch als gedrucktes Modell vorliegen.

Tabelle 11: Übersicht der entstandenen virtuellen und 3D-gedruckten Modelle

Objekt	Datei bzw. gedrucktes Modell
Deutscher Schäferhund	Oberschädel
	Unterkiefer
	Kaudodorsaler bzw. schräg horizontaler Schnitt
	Paramedianer Schnitt
	Schnitt in Höhe der Bulla tympanica
	1. Transversaler Schnitt – Bereich der Ossa conchae
	2. Transversaler Schnitt – Bereich von Lamina cribrosa bis Ossa conchae
Afghanischer Windhund	Oberschädel
	Unterkiefer
Boxer	Oberschädel
	Unterkiefer
Bull Terrier	Oberschädel
	Unterkiefer

#### 4.7.1 Komplette Oberschädel mit Unterkiefer

Jeder der vier kompletten Oberschädel und Unterkiefer war im Zuge der Bearbeitung koloriert worden. Die Kolorierung grenzte Knochenanteile und Zähne voneinander ab und gab den Schädeln ein naturgetreues Erscheinungsbild hinsichtlich ihrer Farbe. Unter Berücksichtigung der individuellen und rassebedingten Charakteristika, waren an den Schädeln alle anatomischen Strukturen wie Foramina, Leisten, Fortsätze, Kanäle und Erhebungen anatomisch korrekt ausgeprägt. Dies gilt sowohl für die erstellten virtuellen Dateien als auch für die dreidimensional gedruckten Präparate. An dieser Stelle wird auf Tabelle 3 in Abschnitt 2.1.3 und Tabelle 4 in Abschnitt 2.1.4 verwiesen. Sie führen die Merkmale übersichtlich auf. Besondere individuelle Ausprägungen an den einzelnen Schädeln sind im Abschnitt 3.1 und 4.3 für jedes Objekt beschrieben.

## Ergebnisse

Abbildung 34 zeigt die CT-Datei des DSH im VR-Modus, sie diene als Grundlage der virtuellen Datei sowie des 3D-Ausdrucks in Abbildung 35. Abbildung 36 zeigt den originalen Oberschädel und Unterkiefer des Afghanischen Windhundes, während Abbildung 37 das zugehörige Druckmodell abbildet. Das Original des Boxeroberschädels ist in Abbildung 38 zu sehen, Abbildung 39 zeigt den Oberschädel als virtuelle Datei. Die des Bull Terriers gibt Abbildung 41 wieder und Abbildung 40 seine native Vorlage.

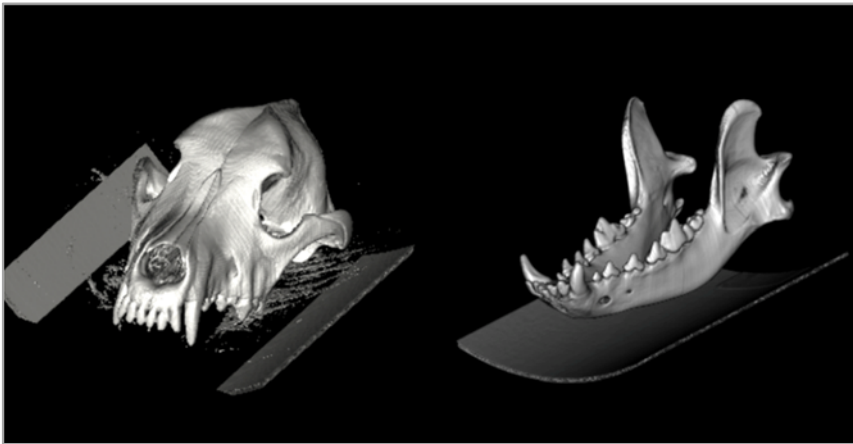


Abbildung 34: CT-Dateien des DSH (Oberschädel und Unterkiefer)



Abbildung 35: 3D-Ausdruck des DSH



Abbildung 36: nativer Schädel des Afghanischen Windhundes



Abbildung 37: 3D-Ausdruck des nativen Schädels des Afghanischen Windhundes aus Abbildung 36



Abbildung 38: nativer Oberschädel des Boxers

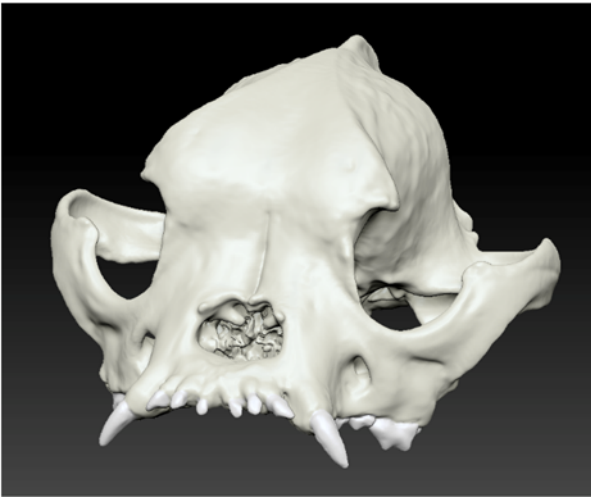


Abbildung 39: 3D-Modell des Oberschädels des Boxers



Abbildung 40: nativer Oberschädel des Bull Terriers



Abbildung 41: 3D-Modell des Oberschädels des Bull Terriers

#### 4.7.2 Schnittpräparate des Deutschen Schäferhundes

Neben dem intakten Oberschädel mit Unterkiefer des DSH wurde ein kaudodorsaler oder schräg horizontaler Schnitt angefertigt (vgl. Abbildung 42). Die Schnittführung wurde so gewählt, dass ein weiter Einblick in die Schädelhöhle mit ihren Strukturen ermöglicht wird. Die zahlreichen Öffnungen im Inneren des Schädels, besonders an der Basalfläche sind wirklichkeitsgetreu abgebildet. Es sind vorhanden der Sulcus chiasmatis, die Fissura orbitalis, das Foramen rotundum, ovale sowie spinosum. Hinzukommen die Öffnungen und Erhebungen an den Seitenflächen. Das Tentorium cerebelli osseum, das Dorsum sellae turcicae und die Lamina cribrosa des Ethmoids sind klar zu erkennen. Der Sinus frontalis beider Seiten ist angeschnitten und von kaudal einsehbar. Analog zum intakten Oberschädel des DSH sind die an den Außenflächen befindlichen Öffnungen, Erhebungen, Leisten und Fortsätze anatomisch korrekt vorzufinden.

Dies gilt auch für die Außenflächen des paramedianen Schnittes. Es handelt sich um die rechte Hälfte des Schädels (vgl. Abbildung 43). Der Schnitt wurde so gewählt, dass die Strukturen des Nasenlumens nicht von der Lamina perpendicularis des Os ethmoidale verdeckt werden, sondern deutlich zu sehen sind. Die sichtbaren Strukturen sind unter anderem die Endo- und Ektoturbinalia, das Vomer, ein Teil der Lamina cribrosa und der Sinus frontalis. Die Öffnungen, Erhebungen, Leisten und Vorsprünge im Inneren der Schädelhöhle sind wie im oben beschriebenen kaudodorsalen Schnitt halbseitig akkurat abgebildet.



Abbildung 42: 3D-Ausdruck des kaudodorsalen Schnittes (DSH)





Abbildung 43: 3D-Ausdruck des paramedianen Schnittes (DSH)

Die Anteile des Os ethmoidale wurden in zwei transversalen Schnitten ästhetisch und naturgetreu dargestellt. Der erste Transversalschnitt ist breiter als der zweite (vgl. Abbildung 44). Er beginnt auf Höhe des P<sub>4</sub> und endet kaudal der Lamina cribrosa. Sie ist von kaudal vollständig dargestellt. Der Blick in den Sinus frontalis und in den unteren Nasengang ist offen. Die Fossa sacci lacriminalis, das Foramen maxillare, das Foramen sphenopalatinum sowie palatinum caudale sind wirklichkeitsgetreu wiedergegeben. In der rostralen Ansicht sind sowohl das Vomer, die Endo- und Ektoturbinalia mit den Meatus ethmoidales als auch die Laminae des Os ethmoidale zu erkennen. Im breiten transversalen Schnitt ist der Canalis infraorbitalis, im schmaleren das Foramen maxillare von rostral zu sehen.

Der zweite, schmalere Transversalschnitt zeigt die oben genannten Strukturen in rostraler Aufsicht, jedoch auf Höhe des kaudalen Endes des P<sub>4</sub> bzw. des M<sub>1</sub> (vgl. Abbildung 45). Er reicht bis zur rostralen Hälfte des M<sub>2</sub>. Aus kaudaler Sicht blickt man auf die filigranen Ossa conchae und in den Sinus frontalis.



Abbildung 44: Transversalschnitt 1 (DSH); rostrale und kaudale Ansicht

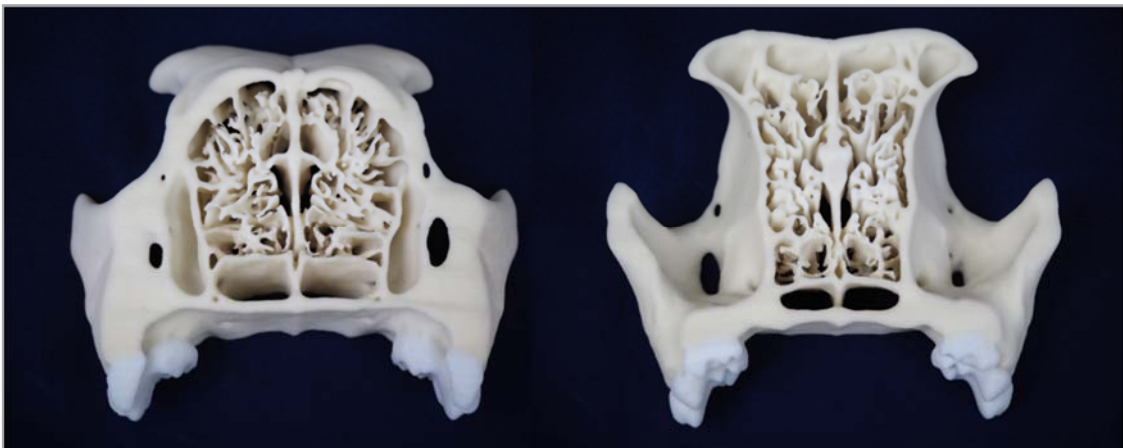


Abbildung 45: Transversalschnitt 2 (DSH); rostrale und kaudale Ansicht

Ein dritter transversaler Schnitt wurde in Höhe der Bulla tympanica gesetzt (Abbildung 46). Er ist zweistufig: in der linken Hälfte liegt die Schnittebene im rostralen Drittel des Porus acusticus externus, in der rechten Hälfte am kaudalen Rand des Porus acusticus externus. Dadurch fallen unterschiedliche Strukturen des Innenohrs ins Auge. Das Tentorium cerebelli osseum sowie Öffnungen in der Schädelhöhle sind wiedergegeben. Abbildung 47 stellt den Bereich des Mittel- und Innenohrs vergrößert dar.

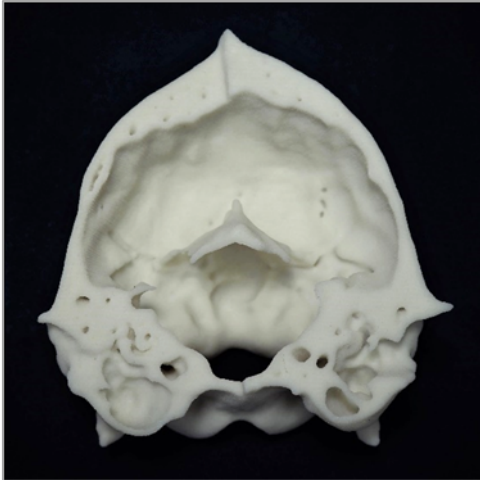


Abbildung 46: Schnitt in Höhe der Bulla tympanica (DSH); rostrale Ansicht



Abbildung 47: Schnitt in Höhe der Bulla tympanica (DSH); rostrale Ansicht; Vergrößerung Bereichs des Mittel- und Innenohrs aus Abbildung 46

#### 4.8 Ergebnisse der objektiven Evaluation

Für die Evaluation wurden 126 Studierende des dritten Semesters ausgewählt. Zu diesem Zeitpunkt hatten alle eine Vorlesung zum Thema Schädel gehört und dadurch konnte von einem theoretisch vergleichbaren Wissenstand ausgegangen werden.

Zunächst wurden die Probanden in drei etwa gleich große Gruppen geteilt und räumlich getrennt. Zur Ermittlung des Ausgangsniveaus füllten alle vor der Lernphase einen Fragebogen (Prä) mit zehn Fragen aus (siehe Anhang). Der Fragebogen enthielt Fragen zum allgemeinen Verständnis, zum Aufbau innerer Strukturen sowie zur

Lokalisierung bestimmter Foramina und Anteile der Knochen. Anschließend wurden pro Gruppe unterschiedliche Lehrmaterialien ausgeteilt, welche in Tabelle 12 dargestellt sind.

Tabelle 12: Übersicht der Gruppen und Lehrmaterialien

Gruppe	Material
1	Skript und Großdrucke der Abbildungen
2	Skript und Großdrucke der Abbildungen + Native Schädelpräparate
3	Skript und Großdrucke der Abbildungen + 3D-Druck-Präparate

Die Probanden hatten 60 Minuten Zeit, sich mit Hilfe der Lehrmaterialien den im Skript enthaltenen Stoff anzueignen. **Gruppe 1** lernte mit dem Skript und Großdrucken der Abbildungen. **Gruppe 2** standen zusätzlich native ganze Oberschädel mit Unterkiefer sowie Medianschnitte von Oberschädeln an Plexiglas fixiert zur Verfügung. **Gruppe 3** erhielt zu Skript und Abbildungen dreidimensional gedruckte Modelle: ganze Oberschädel, Unterkiefer, ein geringgradig paramedianer Schnitt, zwei Transversalschnitte im Bereich des Os ethmoidale, einen Transversalschnitt in Höhe der Bulla tympanica sowie ein kaudodorsaler bzw. schräg horizontaler Schnitt. Nach der Lernzeit und Abgabe der Lehrmaterialien füllten die Studierenden den Fragebogen (Post) erneut aus. Gruppe 3 füllte im Post-Durchgang zusätzlich drei Fragen zur subjektiven Bewertung der 3D-gedruckten Modelle aus.

Für die vorliegende Arbeit ist vor allem der Lernerfolg der dritten Gruppe relevant, um bewerten zu können, ob und wenn ja welche Vorteile der Einsatz von 3D-Präparaten in der Lehre bietet.

#### 4.8.1 Der Lernerfolg in Relation zum Ausgangsniveau des Wissensstandes

Obwohl alle Studierenden eine einheitliche Vorlesung zum Thema Schädel gehört hatten, war der Wissensstand der einzelnen Gruppen zum Zeitpunkt der Beantwortung des ersten Fragebogens (prä) sehr inhomogen (vgl. Abbildung 48). Gruppe 2 und 3 weisen ein vergleichbares Wissensniveau bei ähnlicher Streuung auf während Gruppe 1 im Vergleich dazu deutlich niedrigere Werte mit geringerer Streuung erzielte.

## Ergebnisse

Aufgrund der großen Streuung eignet sich die ausschließliche Berechnung und Bewertung des Mittelwertes nicht für eine qualitativ fundierte Aussage.

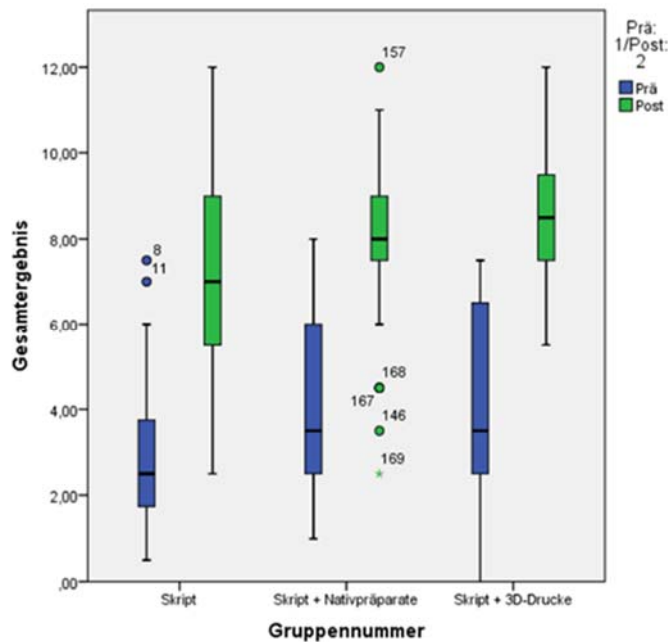


Abbildung 48: Der Lernerfolg in Relation zum Ausgangsniveau

Die Grafik zeigt deutlich, dass sich alle drei Gruppen durch die Lerneinheit erheblich verbessert haben.

Gruppe 1 konnte sich, ausgehend von einem relativ niedrigen Niveau, am deutlichsten verbessern, dabei nahm jedoch die Streuung innerhalb der Gruppe erheblich zu. Bei Gruppe 2 und Gruppe 3 hat sich die Streuungsbreite hingegen stark verringert, d.h. das Wissensniveau vereinheitlicht. Auch bei diesen beiden Gruppen ist der Lernfortschritt markant wobei die besten Ergebnisse in Gruppe 3 erzielt wurden. Dies liefert bereits einen ersten Hinweis darauf, dass das Lernen mit 3D-Präparaten Vorteile bietet.

#### 4.8.2 Auswertung der Anzahl der nicht beantworteten Fragen je Gruppe

Eine erste Einschätzung zum Startniveau der Gruppen und zur Steigerung nach der Lernphase ergab die Auswertung der Anzahl nicht beantworteter Fragen vor und nach der Lernphase. Dies liefert unter der Annahme, dass nicht beantwortet mit nicht gewusst gleichgesetzt wird, einen guten Überblick bezüglich des Lernfortschritts. Die Anzahl der beantworteten Fragen eignete sich nicht für diese Evaluierung, da diese

## Ergebnisse

sowohl falsch als auch teilweise richtig oder vollständig richtig beantwortet werden konnten. Somit ermöglicht diese Betrachtung keine qualitative Aussage.

Die folgenden Grafiken zeigen den prozentualen Anteil der nicht beantworteten Fragen pro Gruppe vor und nach der Lernphase.

## 4.8.2.1 Gruppe 1

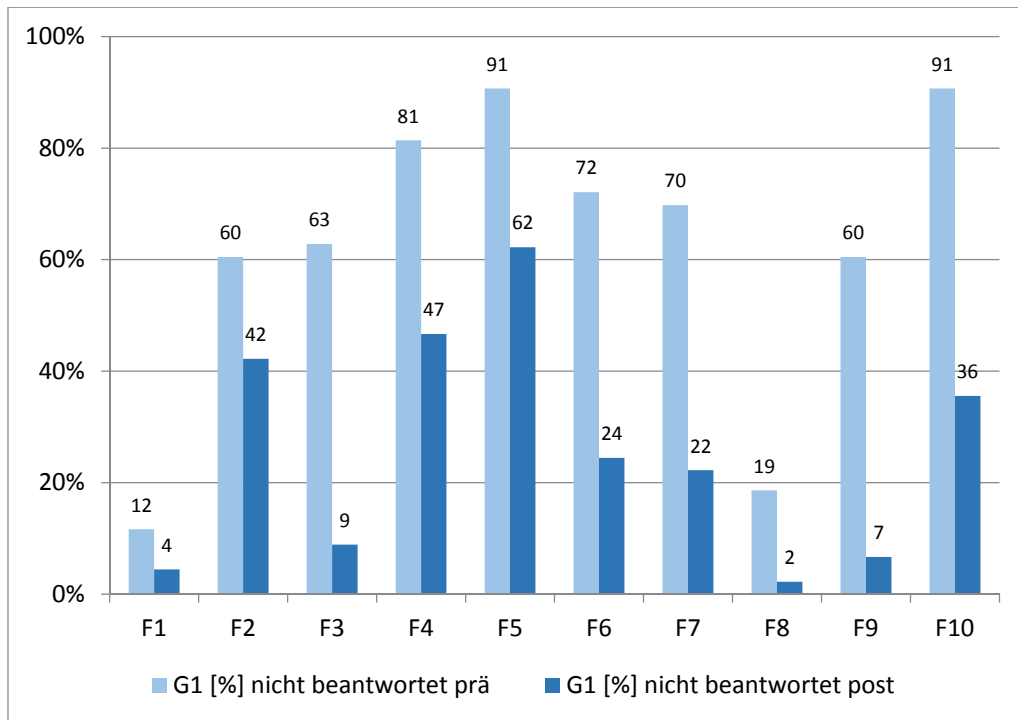


Abbildung 49: nicht beantwortete Fragen vor und nach der Lernphase der Gruppe 1

## Ergebnisse

## 4.8.2.2 Gruppe 2

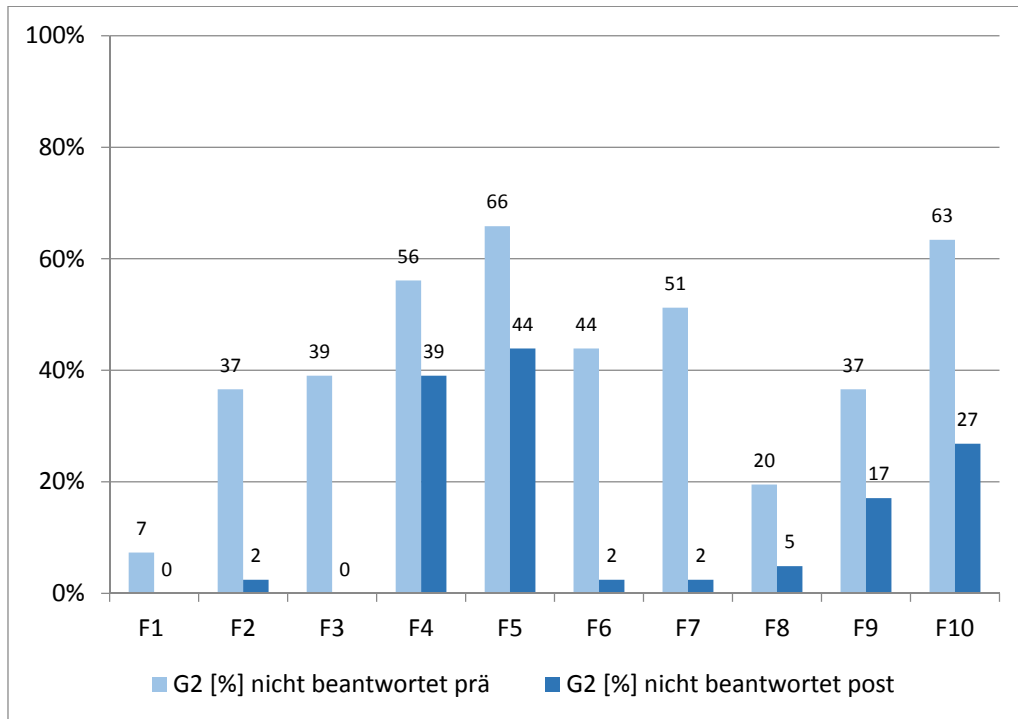


Abbildung 50: nicht beantwortete Fragen vor und nach der Lernphase der Gruppe 2

## 4.8.2.3 Gruppe 3

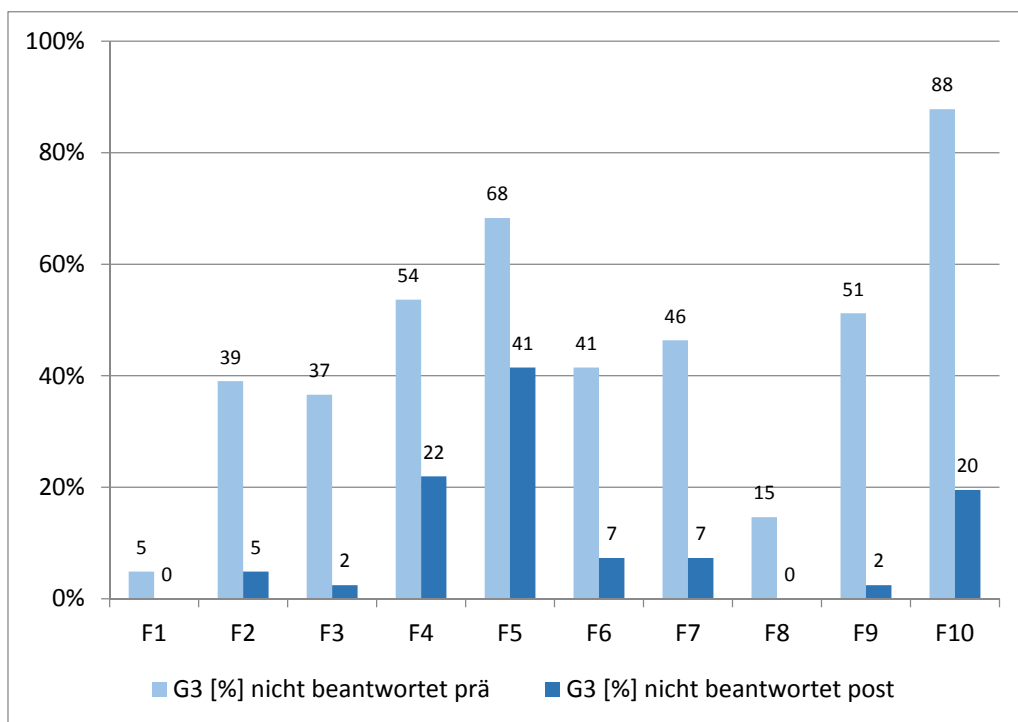


Abbildung 51: nicht beantwortete Fragen vor und nach der Lernphase der Gruppe 3

## Ergebnisse

Alle Graphiken (siehe Abbildung 49, Abbildung 50 und Abbildung 51) zeigen deutlich, dass die Probanden nach der Lernphase erheblich mehr Fragen beantworteten. Dies stützt die These, dass es zulässig ist, im Rahmen dieser Bewertung nicht beantwortet mit nicht gewusst gleichzusetzen.

In Gruppe 1 wurde auch nach der Lernphase nicht jede Frage von allen Probanden beantwortet (alle Fragen post haben einen Wert >0%), während in Gruppe 2 die Fragen 1 und 3 und in Gruppe 3 die Fragen 1 und 8 nach der Lernphase von allen beantwortet wurden.

#### 4.8.3 Auswertung der erreichten Punktzahl je Gruppe

Im nächsten Schritt wurden für jede Gruppe die beantworteten Fragen einzeln ausgewertet. Die tatsächlich erreichte Punktzahl je Frage pro Gruppe wurde ermittelt und als Prozentwert der maximal erreichbaren Punktzahl in den Grafiken dargestellt. Zur Bewertung des Lernerfolgs wurde die Zunahme der korrekten Antworten nach der Lernphase herangezogen. Durch diese Auswertung kann der Lernfortschritt einer Gruppe in Abhängigkeit zur jeweiligen Frage aussagekräftig dargestellt werden.

##### 4.8.3.1 Gruppe 1

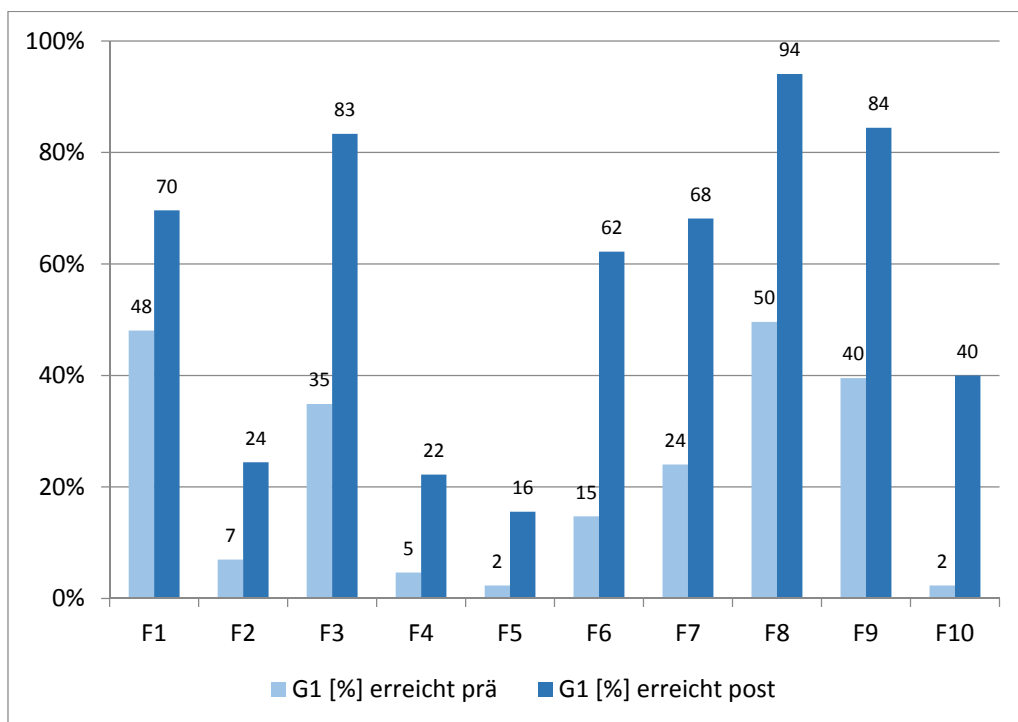


Abbildung 52: Lernfortschritt der Gruppe 1 je Einzelfrage



## Ergebnisse

Bei Gruppe 1 (vgl. Abbildung 52) fällt Frage 10 mit der relativ höchsten Steigerung von 2% auf 40% auf, (20-fach), gefolgt von Frage 5 (von 2% auf 16%) (8-fach) und Frage 4 (von 5% auf 22%) (4,4-fach). Dies waren gleichzeitig die Fragen mit den niedrigsten Werten vor der Lernphase, bei denen daher eine Verbesserung am leichtesten möglich war. Trotz der erheblichen Steigerung ist das Ergebnis nach der Lernphase bei Betrachtung der Absolutwerte nicht als gut zu bewerten, da alle drei Werte weiterhin bei weniger als 50% der Maximalpunktzahl liegen. Der qualitativ höchste Wissenszuwachs ist bei den Fragen 3, 8 und 9 zu erkennen, bei welchen nach der Lernphase jeweils über 80% der Maximalpunktzahl erreicht wurden. Die niedrigsten Werte sowohl vor als auch nach der Lernphase wurden bei den Fragen 2, 4 und 5 erzielt, was darauf schließen lässt, dass die Beantwortung dieser Fragen den Probanden die größten Schwierigkeiten bereitete. Zusammenfassend lässt sich feststellen, dass vor der Lernphase die Werte bei allen Fragen bei kleiner/gleich 50% lagen und nach der Lernphase immerhin 60% der Fragen mit Werten zwischen 60 und 94% der Maximalpunktzahl beantwortet wurden, so dass durchaus ein erheblicher Wissenszuwachs zu erkennen ist.

## 4.8.3.2 Gruppe 2

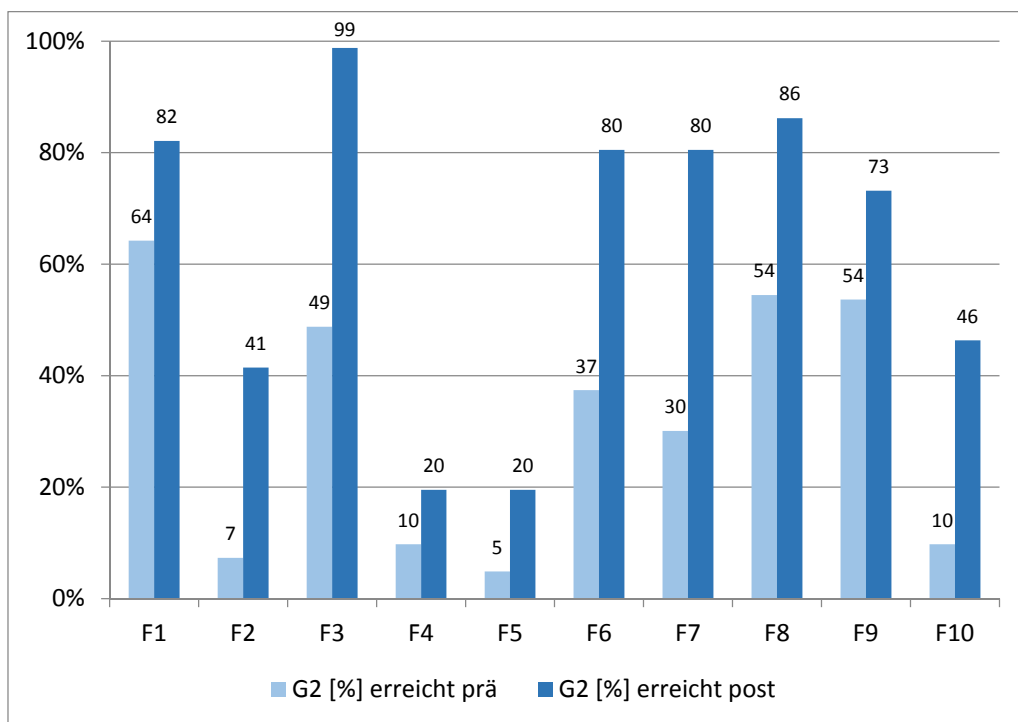


Abbildung 53: Lernfortschritt der Gruppe 2 je Einzelfrage

## Ergebnisse

Gruppe 2 (vgl. Abbildung 53) erzielte bei den Fragen 2 und 5 vor der Lernphase die niedrigsten Werte (7% und 5%). Die Steigerung nach der Lernphase war bei Frage 2 relativ am höchsten (von 7% auf 41%) (5,8-fach), gefolgt von Frage 10 (von 10% auf 46%) (4,6-fach) und Frage 5 (von 5% auf 20%) (4-fach). Die absolut erzielten Werte sind bei Frage 4 und 5 mit je 20% deutlich unterdurchschnittlich, auch Frage 2 und 10 liegen unter 50%. Nach der Lernphase wurden bei 60% der Fragen Werte über 80% erreicht, was als guter Lernerfolg bewertet wird. Die niedrigsten Werte in beiden Durchgängen (prä und post) wurden bei Frage 4 und 5 erzielt, was darauf schließen lässt, dass die Studierenden der Gruppe 2 mit diesen Fragen die größten Schwierigkeiten hatten.

## 4.8.3.3 Gruppe 3

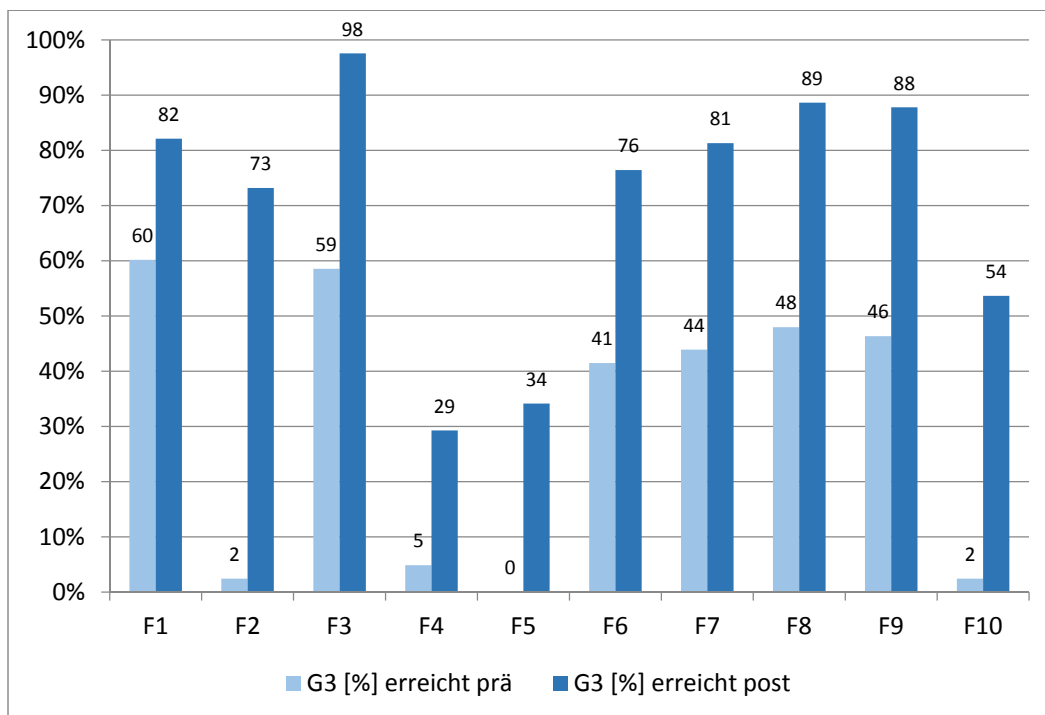


Abbildung 54: Lernfortschritt der Gruppe 3 je Einzelfrage

Gruppe 3 zeigt – außer bei den Fragen 2, 4, 5 und 10 – ein relativ hohes Niveau von über 40% richtiger Antworten vor der Lernphase (vgl. Abbildung 54). Besonders auffällig ist die hohe Steigerung bei Frage 2, deren Wert zunächst nur bei 2% lag und auf 73% anstieg, was gleichzeitig dem höchsten Zuwachs (36,5-fach) entspricht. Eine überproportionale Steigerung zeigen auch Frage 10 (von 2% auf 54%) (27-fach) und

## Ergebnisse

Frage 5 (von 0% auf 34%). Die absoluten Werte liegen nur bei Frage 4 und 5 nach der Lerneinheit unter 50%, alle anderen Fragen liegen deutlich bis erheblich darüber mit dem höchsten Wert bei Frage 3 (98%). Diese Auswertung bestätigt die Richtigkeit der in Abschnitt 4.8.2 getroffenen Annahme, dass eine Auswertung der Anzahl beantworteter Fragen keinen qualitativen Schluss auf das Wissensniveau zulässt. Obwohl von Gruppe 3 bei Frage 5 prä 32% der Probanden die Frage beantwortet hatten wurden 0 Punkte erzielt, da die Antworten alle falsch waren.

#### 4.8.4 Auswertung der durchschnittlich erreichten Punktzahl je Gruppe

Die Darstellung des Mittelwertes der erreichten Punktzahl je Frage und Gruppe diente zur Überprüfung der bisherigen Ergebnisse. Naturgemäß werden durch die Mittelwertbildung die Unterschiede zwischen den Gruppen weniger deutlich dargestellt, es ist jedoch auch an dieser Grafik gut zu erkennen, dass Gruppe 3 sich am stärksten verbessert hat (vgl. Abbildung 55).

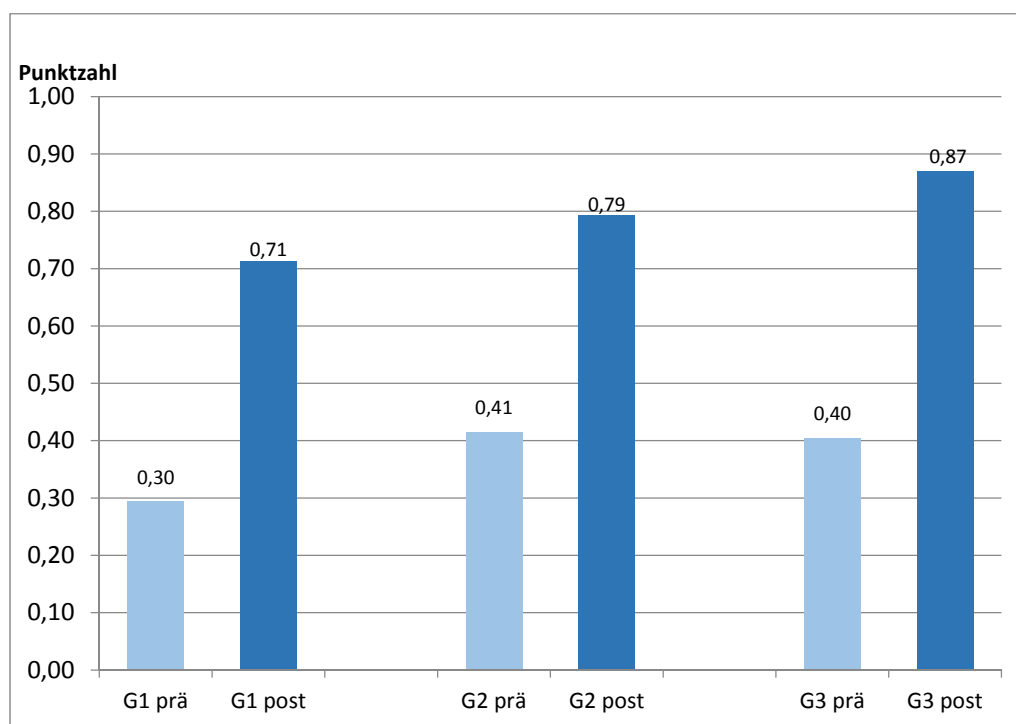


Abbildung 55: Mittelwert der Punktzahl aller Fragen je Gruppe

## Ergebnisse

## 4.8.5 Vergleich der drei Gruppen

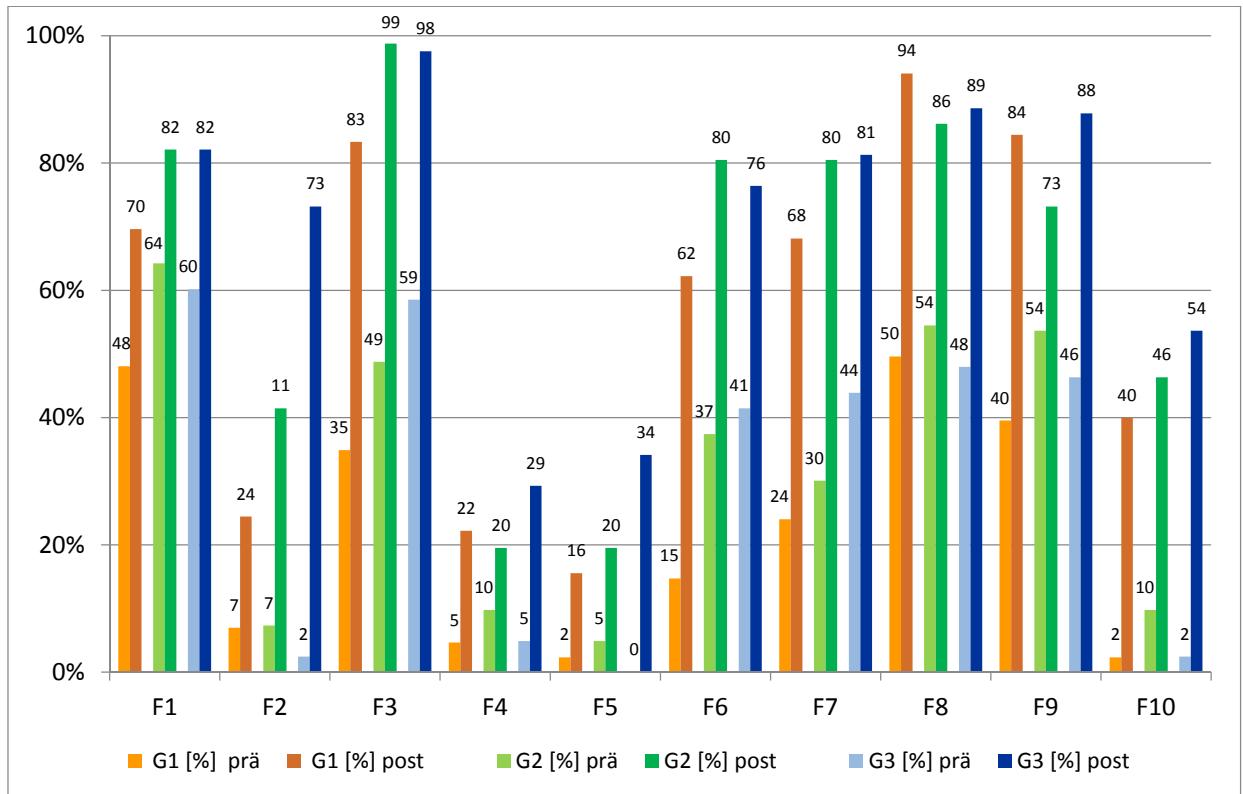


Abbildung 56: Vergleich der Gruppen prä und post für alle Fragen

Die Ergebnisse (vgl. Abbildung 56) von Gruppe 1 liegen nach der Lernphase deutlich unter jenen der anderen beiden Gruppen. Lediglich bei Frage 8 hat Gruppe 1 ein besseres Ergebnis erzielt als die beiden anderen Gruppen. Bei den anderen Fragen ist die Steigerung bei dieser Gruppe unterproportional.

Gruppe 2 und Gruppe 3 zeigen vor der Lernphase ein vergleichbares Profil, die Werte pro Frage liegen in ähnlichen Größenordnungen. Nach der Lerneinheit unterscheiden sich die Ergebnisse deutlicher, vor allem bei den Fragen 2, 4, und 5 ist der Anstieg des Wissensniveaus bei Gruppe 3 erheblich höher als bei den anderen beiden Gruppen. Bei den Gruppen 1 und 2 wurden bei diesen Fragen trotz einer besseren Ausgangssituation – höhere prä Werte als Gruppe 3 – nach der Lernphase niedrigere Werte erzielt. Bereits der Vergleich der 3 Gruppen lässt somit den Schluss zu, dass das Lernen mit den 3D-Drucken (ganze Schädel und diverse Schnitte) gegenüber den anderen Materialien vorteilhaft ist.

## Ergebnisse

## 4.8.6 Lernfortschritt bei Fragen mit Abbildungen von Schnitten

Um die in den vorherigen Abschnitten getroffenen Schlussfolgerungen bezüglich der Effektivität des Lernens mit 3D-Präparaten weiter zu untermauern, wurden die Fragen 2, 4, 5, 6, 7 und 9, für welche räumliches Verständnis besonders wichtig ist, noch einmal separat ausgewertet (vgl. Abbildung 57 und Abbildung 58).

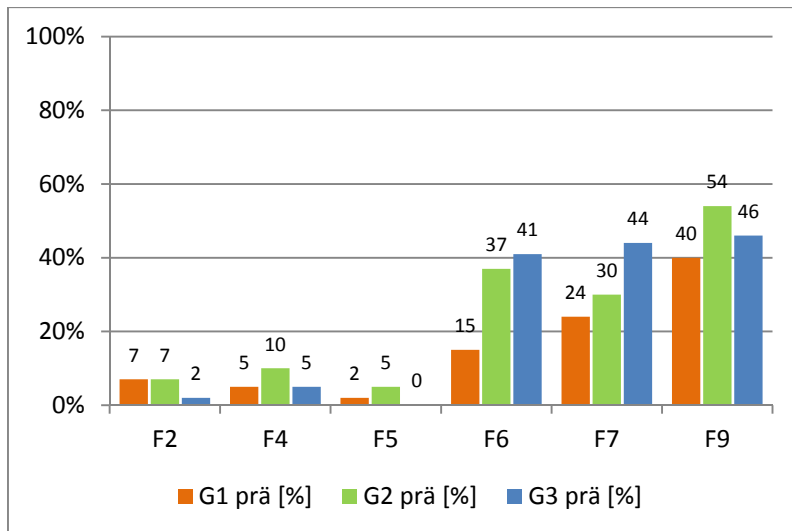


Abbildung 57: Ergebnisse der Fragen mit Abbildungen vor der Lernphase

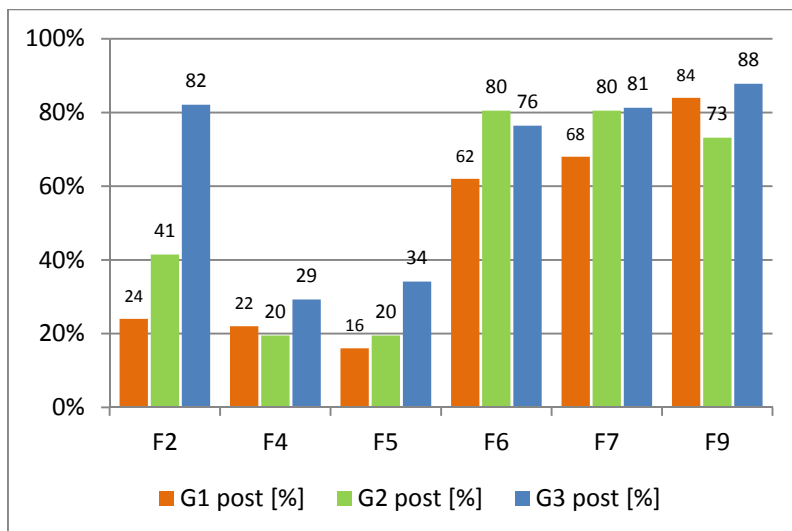


Abbildung 58: Ergebnisse der Fragen mit Abbildungen nach der Lernphase

Der Lernfortschritt von Gruppe 1 ist bei diesen speziell ausgewählten Fragen unterproportional, lediglich bei Frage 9 (single choice) wurde ein gutes Ergebnis von über 80% erzielt. Sowohl Gruppe 2 als auch Gruppe 3 erzielen bei Fragen, die

räumliches Verständnis voraussetzen, auffällig bessere Ergebnisse als Gruppe 1 wobei Gruppe 3 außer bei Frage 6 stets die höchste Punktzahl erreicht hat. Bei den Fragen 2, 4 und 5 erzielte Gruppe 3 vor der Lernzeit die niedrigsten Werte (2%, 5% und 0%) und danach jeweils – bei Frage 2 mit großem Abstand – die besten Werte (82%, 29% und 34%). Auch bei Frage 9 war der Lernfortschritt relativ zum Ausgangsniveau bei Gruppe 3 besser als bei Gruppe 2. Zusammenfassend ist festzustellen, dass sowohl Gruppe 2 als auch Gruppe 3 nach der Lernphase besser abschnitten als Gruppe 1.

#### 4.9 Ergebnisse des subjektiven Fragen der Evaluation

Zusätzlich zur objektiven Evaluation füllte Gruppe 3 im zweiten Fragebogen drei Fragen zur subjektiven Beurteilung der 3D-Präparate aus (vgl. Abbildung 59).

Die erste Frage bezog sich auf die Präparate der ganzen Schädel, die Studierenden sollten die Möglichkeit bewerten, damit zu lernen. 54 % bewerteten dies als sehr gut, 32% als gut, 12% als mittelmäßig und 2% als weniger gut, 0% als nicht gut.

Frage 2 betraf die Schnitte der Schädel, diese bewerteten 56% der Studierenden als sehr vorteilhaft, 37% als vorteilhaft, 5% als mittelmäßig, 2% als weniger vorteilhaft und 0% als nicht vorteilhaft.

In Frage 3 wurde danach gefragt, wie gut die Studierenden sich in den Schnitten zurechtfinden und ob sie sich gut orientieren konnten. 17% gelang dies sehr gut, 56% gut, 25% mittelmäßig, 2% fanden sich weniger gut zurecht und 0% nicht gut.

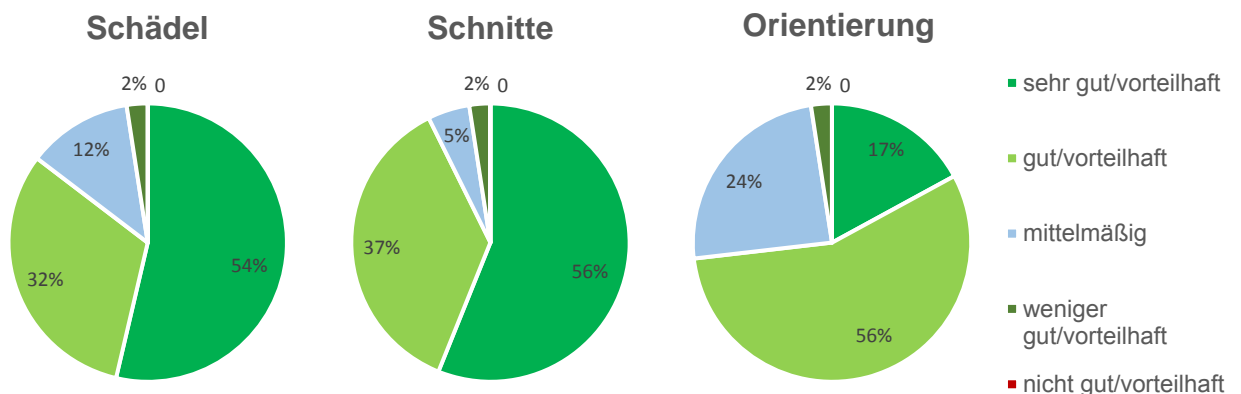


Abbildung 59: subjektive Bewertung der 3D-Präparate

## Ergebnisse

---

Die Möglichkeit, mit 3D-Präparaten zu lernen, wurde von den allermeisten Probanden als sehr gut und vorteilhaft bewertet. Die Orientierung in den Schnitten wurde von 73% als gut bis sehr gut beurteilt, das Lernen mit den Schädeln von 86% und die Schnitte als Lehrmaterial wurden sogar von 93% als gut bis sehr gut bewertet. Die Akzeptanz der 3D-Präparate und ihr Nutzen als Lehrmaterial wurde somit sowohl objektiv als auch subjektiv bestätigt.

## 5 Diskussion

Die hergestellten virtuellen Dateien und dreidimensional gedruckten Modelle erfüllen den Anspruch anatomisch korrekt zu sein, das heißt an ihnen finden sich alle wichtigen anatomischen Strukturen wie beispielsweise Processus und Nasenmuscheln. Pathologische Veränderungen wie reaktive Knochenzubildungen oder Verschleißspuren der Zähne weisen sie hingegen nicht auf, diese wurden behoben. Die Modelle sind damit eine leicht idealisierte Form ihrer nativen Vorlagen zu Gunsten didaktischer Klarheit.

### 5.1 Bedeutung der Auswahl der Schädel

Das Hauptaugenmerk bei der Auswahl der Schädel lag neben ihrer rassetypischen Form und einer einwandfreien Beschaffenheit der Zähne auf einem unversehrten Erhaltungszustand sämtlicher für Studium und Klinik relevanter anatomischer Merkmale. Eine ausführliche Aufstellung aller wichtigen Merkmale ist in Abschnitt 2.1.3 und 2.1.4 aufgeführt. Sie sollten an den ausgewählten Schädeln intakt sein, denn für qualitativ hochwertige digitale und gedruckte 3D-Modelle sind Originalvorlagen von hochwertiger Qualität unerlässlich (McMenamin et al., 2014). Je besser die Qualität der nativen Schädel war, die als Vorlage dienten, desto besser war die Qualität der späteren 3D-Druckdateien und desto geringer der Aufwand an Nachbearbeitung.

Der Erhaltungsgrad der Schädelknochen wird durch natürlichen Verschleiß und Ereignisse in der Lebenszeit der Tiere maßgeblich beeinflusst. Als Vorlagen für die Modelle sollten die Schädel adulter Hunde verwendet werden, jedoch war bei keinem der Tiere das genaue Alter bekannt. Trotzdem konnte sichergestellt werden, dass kein juveniler Schädel als Vorlage herangezogen wurde. Dafür spricht, dass bei jedem der vier Schädelpräparate nur Zähne des permanenten Gebisses vorhanden waren und sie Spuren von Abschleiß sowie Zahnsteinablagerungen aufwiesen. Obendrein waren alle Suturen geschlossen (Nickel et al., 2004). Ein weiterer, klarer Hinweis für eine weit ins Erwachsenenalter reichende Lebenszeit sind die altersbedingten reaktiven Knochenzubildungen im Bereich der Zahnfächer und des Margo alveolaris aller Oberschädel und Unterkiefer. An einigen Schädeln waren sie ebenfalls an weiteren



Stellen deutlich zu erkennen. Die Ausprägung der Veränderungen war je nach Schädelknochen unterschiedlich stark. Bei den eingesetzten Vorlagen für die 3D-Modelle handelte es sich folglich nicht um rein physiologische Oberschädel und Unterkiefer. Wie in Abschnitt 4.3 beschrieben, waren dies jedoch die Schädel mit dem besten Erhaltungszustand.

Dem Anspruch, intakte physiologische Originale zu finden, konnte also trotz der Sichtung von mehreren hundert nativen Exemplaren nicht vollständig entsprochen werden. Einige Defekte und pathologische Veränderungen mussten in Kauf genommen werden. Mithilfe der Modellierungsmöglichkeiten der virtuellen Dateien war es jedoch möglich, die Beschädigungen und pathologischen Veränderungen auszugleichen, um physiologisch korrekte 3D-Ausdrucke zu erhalten. Es war sogar möglich fehlende Zähne zu ersetzen. Rassetypische Deformationen wie die starke Prognathia inferior des Boxers wurden jedoch im Rahmen dieser Arbeit nicht als pathologische, sondern als rassetypische Veränderungen verstanden. Die fertiggestellten digitalen Dateien der Hundeschädel und ihre 3D-Ausdrucke wiesen alle wichtigen Strukturen auf, die für das Verständnis der Anatomie entscheidend sind.

Die Entscheidung für eine spezifische Rasse innerhalb der Gruppe der meso-, dolicho- und brachycephalen bzw. ramsnasigen Hunde, war nicht a priori festgelegt, sondern vielmehr durch die zu erfüllenden Anforderungen an die nativen Vorlagen bedingt. Somit wurden ein Deutscher Schäferhund, ein Afghanischer Windhund, ein Boxer und ein Bull Terrier als Exempel für jede der vier Gruppen gefunden. Diese Auswahl bietet den Studierenden die Möglichkeit, rasseabhängige anatomische Ausprägungen zu vergleichen. Dem Deutschen Schäferhund kam aufgrund seines proportional ausgewogenen mesocephalen Schädels eine spezielle Bedeutung zu. Von ihm wurden die diversen Schnitte angefertigt, da diese Proportionen sich rasseunabhängig in vielen Hunden wiederfinden. Seine Schädelform stellt eine Art anatomische Grundform dar wie sie auch in den gängigen Lehrbüchern der Anatomie verwendet wird (König und Liebich, 2014; Nickel et al., 2004; Salomon, 2015)

## 5.2 Wahl des Druckverfahrens

Zur Fertigung der dreidimensionalen Drucke wurde für diese Arbeit das Pulverdruckverfahren (3DP) eingesetzt. Es ist eines der zwölf gebräuchlichen 3D-Druckverfahren (Breuninger et al., 2013b; Fastermann, 2012; Gebhardt, 2016a). Das hochauflösende Verfahren ermöglichte es die filigranen Strukturen eines Hundeschädels exakt nachzubilden. Die hohe Auflösung soll an einem Beispiel veranschaulicht werden. Die gedruckte Schichtstärke des eingesetzten Druckers beträgt 0,089- 0,102 mm (3D Systems Europe, 2009). Berechnet werden soll die Anzahl der Schichten eines Oberschädels, als Schichtstärke werden 0,1 mm angenommen. Der Hundeschädel des Bull Terriers hat eine Höhe von 100 mm. Folglich besteht der gedruckte Schädel aus 1000 dünnen Schichten, was die Wiedergabe feiner Details ermöglicht.

3DP benötigt im Gegensatz zu Laser-Stereolithographie, Film Transfer Imaging (FTI) oder Fused Layer Manufacturing (FLM) keine Stützmaterialien, die nach dem Druck aus dem Objekt herausgelöst werden müssen (Breuninger et al., 2013b; Kollenberg, 2015). Dies würde sich im Hinblick auf die komplizierten und feinen anatomischen Merkmale der Schädelknochen als problematisch erweisen, da sie beim Ablösen der Stützmaterialien beschädigt werden könnten, was unbedingt zu vermeiden war, um physiologische Modelle zu erhalten.

Andere hochauflösende Verfahren wie zum Beispiel das Lasersintern bieten nicht die Möglichkeit vielfarbig zu drucken, was ein wichtiges Auswahlkriterium war, da an den Schädeln der Unterschied zwischen Knochen und Zähnen farblich dargestellt werden sollte. Die Vielfarbigkeit des Pulverdruckverfahrens schafft die Voraussetzung, um den Schädeln inklusive der Zähne ein natürliches Erscheinungsbild zu verleihen. Dies wäre bei der Nutzung eines FLM-Druckers nicht der Fall gewesen, da nur eine beschränkte Farbpalette an Kunststoff-Filamenten zur Verfügung steht (McMenamin et al., 2014) und nicht wie beim 3DP jeder Farbanteil des CMYK-Spektrums (Cyan, Magenta, Yellow und Key, Key steht für den Schwarzanteil) nuancengenau nach Wunsch abgestimmt werden kann. 3DP ermöglicht den Druck fotorealistischer Farben (3D Systems Europe, 2018).

Mit dieser hochauflösenden und vielfarbigem Form des Additive Manufacturing können die gedruckten Modelle von Knochen nicht nur in ihrer Farbe und Textur dem Original lebensecht nachempfunden werden, sondern auch einzelne Knochenanteile bzw. über Suturen verbundene Knochenanteile exakt abgegrenzt und bunt koloriert werden. Diese Verdeutlichung bestimmter Bereiche wurde von Studierenden als sehr hilfreich beim Erlernen der Anatomie empfunden (Hagebeuker, 2017).

Darüber hinaus entschied man sich aufgrund der haptischen Wahrnehmung der Oberfläche für das 3DP. Zwar ist die Oberfläche etwas rauer als die echter Knochen, was ein bekannter Nachteil ist (Breuninger et al., 2013b), jedoch kommt sie im Gegensatz zur geriffelten Haptik eines FLM-Ausdrucks sehr nahe an die eines nativen Knochens heran. Die stufenähnliche Oberfläche eines FLM-Drucks kommt durch das Schichten der dünnen Filament-Fäden zustande. Zusätzlich ergibt sich eine Limitierung durch den strangförmigen Auftrag aus den runden Düsen: es können keine scharfen Kanten oder Ecken produziert werden (Gebhardt, 2016a; Gibson et al., 2015d). Dadurch ist keine detailgetreue Replikation eines Schädels möglich.

Die Infiltration von Pulverdrucken mit Sekundenkleber mildert die leicht körnige Oberflächenstruktur ab. Die Infiltration ist ein Schritt des standardmäßigen Post-Processings und verursacht keinen Mehraufwand. Durch optionales Lackieren kann der körnige taktile Eindruck sogar nahezu vollständig aufgehoben werden (Hagebeuker, 2017) und stellt somit keinen relevanten Aspekt dar, auf den Pulverdruck zu verzichten.

Bei den Generativen Druckverfahren des Selektiven Laserschmelzens (SLM), Elektronenstrahl-Schmelzens (EBM) und Laserauftragsschweißens werden vor allem Metalle verarbeitet, was für diese Arbeit nicht in Frage kam, da der Einsatz eines Metalls eine lebensechte Wiedergabe der Vorlagen ausschließt (Breuninger et al., 2013b; Gebhardt, 2016a; Gieseke et al., 2016; Hagl, 2015b). Poly-Jet Modeling (PJM) und Digital Light Processing (DLP) scheiden aufgrund der hohen Materialkosten und benötigten Stützmaterialien für den Druck von Modellen aus. Laminated Object Manufacturing (LOM) ist ein sehr aufwändiges Verfahren, das hoher Sicherheitsmaßnahmen bedarf und zusätzlich nicht die Vorteile des 3DP bietet (Fastermann, 2012). Das Verfahren des Layer Lamine Manufacturing (LLM) eignet sich für massive Teile und Contour Crafting (CC) besonders für große Bauteile. Beides

trifft nicht auf einen Schädel zu. Im Gegenteil, es braucht ein Verfahren, das filigrane Strukturen exakt drucken kann.

Obwohl FLM-Drucker als alternative Druckverfahren durch die Materialbeschaffenheit grundsätzlich eine bessere Stabilität bieten, sind sowohl die Druckzeiten länger als auch die Verbrauchskosten höher. Die Anschaffung des Equipments von Druckern, die das Verfahren des LS anwenden, ist kostenintensiver als beim 3DP (Breuninger et al., 2013b; Fastermann, 2012). Auch aus diesen Gründen wurde auf diese Verfahren verzichtet.

Das FLM-Druckverfahren wäre als einziges Alternativverfahren in Frage gekommen, daher wird in den folgenden Abschnitten der Vergleich vorrangig zu diesem Verfahren angestellt. Nach Abwägung der Vor- und Nachteile von 3DP und FLM fiel die Entscheidung aus den bereits erläuterten Gründen zugunsten des 3DP. Wegen seiner genannten Nachteile und der Vorteile des 3DP entschied man sich aber gegen seinen Einsatz.

### **5.3 Virtuelle dreidimensionale Dateien und Ausdrücke**

#### 5.3.1 Relevanz der Qualität der CT-Datensätze

Zur Anfertigung der virtuellen Dateien wurden verschiedene CT-Datensätze erstellt. Sie unterschieden sich auffällig in ihrer Qualität. Grund dafür war die Anzahl an zeitgleich gescannten Objekten, nicht die technische Ausstattung der CT-Geräte. Der erste Datensatz bildete neben dem Oberschädel und Unterkiefer des Boxers, einen ganzen und halbierten Oberschädel sowie Unterkiefer eines Pferdes ab. Die Knochen des Pferdes standen nicht in Zusammenhang mit dieser Arbeit, sie wurden für eine andere Arbeit erfasst (Hagebeuker, 2017). Bei der Weiterbearbeitung des Datensatzes wurde der Schädelknochen des Boxers als Region of interest (ROI) eingegrenzt. Hier wurde deutlich, dass er in seiner Darstellung unscharf erschien. Die Oberfläche wirkte rau und kantig. Die exportierten Dateien im OBJ-Format belegten diesen Eindruck. Deshalb war es notwendig, weitere CT-Datensätze abgestimmt auf die einzelnen Schädel zu erstellen, denn die unscharfen Bereiche konnten nicht zu anatomisch korrekten Modellen aufgearbeitet werden. Die Abweichungen von der physiologischen

Schädelstruktur waren zu groß, als dass eine wirklichkeitsgetreue Rekonstruktion umsetzbar gewesen wäre.

Die erste Ursache der Problematik soll im Folgenden an einer Beispielrechnung verdeutlicht werden. Der gemeinsame Scan mit nebeneinander angeordneten Hunde- und Pferdeschädeln führte zu einer Expansion der Fläche des Field of View (FOV) auf etwa 33 x 45 cm. Bei einem einzelnen Hundeschädel wären es durchschnittlich 10 x 14 cm gewesen. Unabhängig von der Größe des FOV steht für den Scan eine Bildmatrix von 512 x 512 Pixel zur Verfügung. Der Begriff Pixel setzt sich aus „picture“ (Bild) und „elements“ (Elemente) zusammen (Langenscheidt, 2018). Jedes Pixel ist die zweidimensionale Abbildung eines Gewebeareals (Sonntag und Mihaljević, 2009). Beträgt die Höhe der FOV wie in diesem Fall 33 cm und die Breite 45 cm, bildet jedes Pixel ein Areal von 0,06 x 0,09 cm ab. Ist die Länge und Breite des FOV allerdings 10 cm, stellt jedes Pixel nur 0,02 x 0,03 cm dar. Durch eine Expansion des FOV vergrößert sich auch der Bereich den jedes Pixel abbildet. Je größer der Bereich eines Pixels, desto schlechter die Auflösung und desto unschärfer die Darstellung. Zusätzlich wird die Stufenbildung zwischen den einzelnen CT-Schichten stärker.

Hinzu kommt der Effekt der sogenannten Aufhärtung der Strahlung. Für diesen Effekt sind die energieabhängigen Schwächungskoeffizienten beim Durchtritt durch Materie verantwortlich (Laubenberger und Laubenberger, 1999a). Durch die dicke und dichte Knochen- und Zahnstruktur des Pferdeschädels werden die energieärmeren („weicheren“) Anteile der Strahlung absorbiert. Nur der energiereichere („härtere“) Anteil der Strahlung durchdringt die Objekte und wird vom Detektor gemessen. Aus diesen Messungen wird das Bild berechnet. Eine Aufhärtung der Strahlung kann zu einer stärkeren Körnung des Bildes, zu Streifen und zu anderen Artefakten führen. Dies war bei den erstellten Scans der Fall, so dass sie nicht verwendet werden konnten. Somit waren diese Datensätze nicht nutzbar. Weil es bei der computertomographischen Erfassung von Schädelknochen keiner Anwesenheit von Personal bedarf, waren keine Maßnahmen hinsichtlich des Strahlenschutzes notwendig.

Der Algorithmus für die Rekonstruktion des Bildes im Computer wird durch einen definierten Faltungskern (respektive Kernel oder Filter) festgelegt. Er bestimmt die Darstellung der Oberfläche. Dies kann entweder eine besondere Betonung und

Schärfe der Konturen und Kanten mit Hilfe eines hochfrequenten Filters sein oder ein niederfrequenter Kern, der die Oberfläche homogen und geglättet abbildet. Der Erste wird vor allem zur Wiedergabe von Knochen, der Zweite von Weichteilgewebe eingesetzt (d'Anjou, 2013). Im Falle der Hundeschädel brauchte es einen geeigneten Kompromiss, um neben klar definierter Konturen ebenfalls dünnwandige Strukturen zu erhalten.

Im zweiten CT-Datensatz wurden vier Hundeoberschädel nebeneinander angeordnet und erfasst, im Dritten die zugehörigen Unterkiefer auf die gleiche Art platziert und gescannt. Auch wenn die Qualität der rekonstruierten Bilder besser war als im ersten Durchgang, bestanden die beschriebenen Probleme weiterhin. Erst die Anfertigung einzelner Datensätze pro Oberschädel und Unterkiefer führte zur erforderlichen Detailschärfe und ausreichender Darstellung filigraner Knochenanteile. Sie konnten als qualitativ hochwertige Grundlage zur Weiterverarbeitung genutzt werden. Dass neben qualitativ hochwertigen Originalschädeln die Qualität der CT-Datensätze eine zwingend erforderliche Voraussetzung für die erfolgreiche Erstellung anatomisch korrekter dreidimensionaler Modelle ist, wird auch in der Literatur beschrieben (McMenamin et al., 2014). Die Erfahrungen der beiden Vorversuche bestätigten dies. Nur mit den einzeln erstellten Datensätzen konnten wirklichkeitsgetreue und anatomisch korrekte, virtuelle Modelle der Schädel erarbeitet werden, auch wenn trotzdem ein gewisser Detailverlust, beispielsweise am feinen Processus muscularis, hingenommen werden musste. Dieser bewegte sich jedoch in für die Lehre nicht relevanten Bereichen bzw. konnte durch Nachbearbeitung ausgeglichen werden.

### 5.3.2 Stellenwert der Nachbearbeitung

Wie auch die Vorversuche zeigten, bestimmte neben anderen Faktoren die Qualität des CT-Datensatzes essentiell das Ausmaß sowie das Gelingen der digitalen Nachbearbeitung. Um physiologische dreidimensionale Modelle zu erhalten, wurden die pathologischen Veränderungen im Prozess der Nachbearbeitung entfernt und remodelliert. Ohne diese Korrekturen wären sie für den anatomischen Unterricht unbrauchbar gewesen, so können sie jedoch uneingeschränkt dafür eingesetzt werden.

Schwächer ausgeprägte Defekte wie altersbedingte reaktive Knochenzubildungen, präparationsbedingte kleinflächige Absprengungen der Substantia adamantina oder

auch individuelle Knochenporen werden bei der Erfassung mit einem CT-Gerät in der abgebildeten Datei nicht wiedergegeben und müssen demzufolge nicht nachbearbeitet werden. Zusätzlich gehen durch die mehrfache prozessbedingte rechnerische Verarbeitung der Daten feine Details verloren. Dieser Detailverlust wird auch in der Literatur beschrieben (Knoedler et al., 2015; Mogali et al., 2018; Schoenfeld-Tacher et al., 2017). Er konnte im Zuge dieser Arbeit durch die Art der Erstellung der Dateien beschränkt und auf einem niedrigen, vertretbaren Niveau gehalten werden. Die einzelnen Dateien umfassten jeweils nur einen abgegrenzten Bereich, woraus eine bessere Qualität und höhere Detailgenauigkeit resultierten. Die Methode wurde anhand der Erfahrungen der Vorversuche entwickelt und wird in Kapitel 3.6 beschrieben. Größere Defekte wie ein quergebrochener Zahn (M<sub>1</sub>) des Afghanischen Windhundes, werden abgemildert. Hinsichtlich pathologischer Veränderungen sowie Beschädigungen durch Herstellung, Handhabung oder Lagerung ist der Effekt der Abmilderung ein klarer Vorteil, denn diese Mängel müssen in der späteren digitalen Datei nicht oder weniger aufwändig repariert werden. Deutlich wird aber auch, dass die virtuellen Dateien aus den genannten Gründen zunächst keine physiologischen Schädelknochen abbilden, obgleich dies Ziel dieser Arbeit war. Wichtig ist jedoch anzumerken, dass das Fehlen individueller Details wie Knochenporen oder nicht zu benennenden Feinheiten sich nicht nachteilig auf den didaktischen Wert der virtuellen und physischen 3D-Modelle auswirkt (Schoenfeld-Tacher et al., 2017), denn sie sind für das Verständnis der Anatomie nicht bedeutsam. Im Gegenteil, eine Reduktion der Informationen auf die wichtigen anatomischen Strukturen stellte einen didaktischen Vorteil dar und erleichtert ihr Erlernen, da es die Menge an Informationen, die kognitiv verarbeitet werden muss, eingrenzt (Schoenfeld-Tacher et al., 2017).

Durch das angewendete CT-Schnittbildverfahren entstehen Stufen in der abgebildeten Datei. Sie müssen bearbeitet werden, denn sie geben keine natürliche Knochenoberfläche wieder und entsprechen nicht dem Erscheinungsbild physiologischer Schädel. Die Stufen werden solchermaßen digital geglättet, dass die Stufen weit genug abgeschwächt sind, die Oberfläche des Modells aber nicht unnatürlich glatt und gleichmäßig wirkt. Ferner konnte die Erscheinung der Knochenoberfläche durch die Anpassung der Polygonanzahl positiv beeinflusst werden.

Der Verlust von Zähnen oder abgebrochene Spitzen war keine Seltenheit. Dem Oberschädel des Boxers fehlte der linksseitige M<sub>2</sub> und M<sub>3</sub>. Sie konnten anhand der ordnungsgleichen Zähne der rechten Kieferhälfte durch Verdoppelung oder Spiegelung nachgebildet werden. Alle weiteren Defekte wurden ebenfalls durch Modellierung behoben, um einen physiologischen Zustand herzustellen. Dies gelang, da die Originale und andere Schädel der jeweiligen Rasse, die in diesem Bereich intakt waren, als Vorlage genutzt wurden, so im Falle der dritten Dentes praemolares der Maxilla des Boxers. Sie fehlten beidseits, konnten aber anhand eines zweiten nativen Boxerschädels virtuell konstruiert werden. Ergänzend wurden Abbildungen in Anatomiebüchern (Budras, 2012; König und Liebich, 2014; Nickel et al., 2004; Salomon, 2015) genutzt. Mit diesen zahlreichen Vorlagen konnte das physiologische Aussehen einer betroffenen Struktur eindeutig nachvollzogen und als anatomisch korrektes Abbild modelliert werden. Das Gleiche gilt für die Ausbesserung und Nachbildung von Foramina, Canales und Erhebungen (vgl. Abschnitt 4).

Das Ergebnis dieser Arbeit sind 13 anatomisch korrekte virtuelle Dateien und 3D-Ausdrucke von Hundeoberschädeln, Unterkiefern und verschiedener Schnitte. Die Bereitstellung physiologischer Präparate, seien sie natürlicher Herkunft oder artifiziell hergestellt, ist von großer Bedeutung für die anatomische Lehre und vorklinische Ausbildung (Boyd et al., 2015). Ohne Frage ist auch die Kenntnis pathologischer Veränderungen von hoher Wichtigkeit für den späteren Berufsalltag (AbouHashem et al., 2015) einer/s praktizierenden Tierärztin/Tierarztes. Allerdings braucht es dazu das sichere Wissen um das physiologische Aussehen als Grundlage zur Unterscheidung zu pathologischen Veränderungen. In der frühen Phase der Ausbildung sollten die Studierenden demnach zuallererst und vorrangig mit physiologischen Präparaten konfrontiert werden, um eine Überforderung oder Verwirrung zu vermeiden (Bloom et al., 1973). Sie werden in ausreichender Anzahl benötigt (AbouHashem et al., 2015). Der 3D-Druck ermöglicht eine unbegrenzte Replikation und schnelle Bereitstellung von Modellen.

In diesem Zusammenhang stellte die CT-Datei des Oberschädels des DSH und folglich auch die daraus erzeugten virtuellen Dateien – der Oberschädel, der paramediane und der kaudodorsale Schnitt – eine Ausnahme dar. Das Os nasale des DSH war im rostralen Bereich geringfügig ventral verlagert. Diese individuelle



Abweichung wurde bewusst nicht korrigiert, weil zum einen keine nachteilige Auswirkung auf die Eignung als didaktisches Mittel zu erwarten war und zum anderen aus graphisch-technischen Gründen, denn eine Korrektur wäre mit einem unverhältnismäßigen Mehraufwand einhergegangen. Die nativen Schädelpräparate, die den Studierenden zur Verfügung stehen, weisen durchgehend solcherlei individuelle Merkmale auf.

Der Schädel des DSH wies weiterhin nur ein Foramen palatinum minus auf, hingegen sind bei den meisten Hundeschädeln zwei oder mehr Foramina palatina minora zu erkennen (Evans und de Lahunta, 2013a; Nickel et al., 2004). Da alle Schnitte vom Schädel des DSH angefertigt wurden, enthalten sie alle nur ein For. palatinum minus (vgl. Abschnitt 4.3.1). Da es sich hierbei nicht um eine pathologische Veränderung handelt, sondern um eine seltenere anatomische Variante, die einen didaktischen Wert hat, wurde es bewusst so belassen.

Dateien von Hundeschädeln wie sie im Rahmen dieser Arbeit hergestellt wurden, sind bisher nicht bekannt. Auf den gängigen Homepages mit Druckmodellen finden sich zwar durchaus Dateien von Hundeschädeln, jedoch enthalten sie nicht alle knöchernen Strukturen und sind nicht anatomisch korrekt. Es handelt sich entweder um die unbearbeitete dreidimensionale Darstellung eines CT-Scans inklusive Artefakten oder eines daraus erstellten Modells in seiner Rohversion (Anonymous, 2018, n.n.; Bluebie, 2014; University of Edinburgh, 2017; vetoblender, 2017). Diese Dateien und ihre möglichen resultierenden 3D-Drucke werden dem Anspruch nicht gerecht, ein wirklichkeitsgetreues Replikat der originalen Schädel zu sein. Ziel dieser Arbeit war es jedoch, anatomisch korrekte Schädel nachzubilden. Daher musste der Zeitaufwand für die Bearbeitung der CT-Datensätze und exportierten OBJ-Dateien in Kauf genommen werden. Nur anatomisch korrekte, detailgetreue Präparate mit allen Foramina, Processus und Canales ermöglichen es den Studierenden, das erwartete Lernniveau zu erreichen (Alali et al., 2017; Li et al., 2018). Die Ergebnisse der Evaluation bestätigen dies (vgl. Abschnitt 4.8). Die Gruppe, die mit den 3D-Modellen lernte, schnitt insgesamt am besten ab. Somit ist die Bearbeitung der 3D-Modelle erforderlich und sinnvoll. In der Literatur wird vom Druck von Abschnitten innerhalb der Schädelknochen berichtet (Dorbandt et al., 2016; Nibblett et al., 2017), allerdings nicht von kompletten Oberschädeln mit Unterkiefern sowie Schnitten der knöchernen

Strukturen als Anschauungsmaterial für die Lehre. Skelettknochen eines Rindes wurden mit 3D-Drucktechnik nachgebildet und in der Lehre verwendet (Li et al., 2018) auch Schädel verschiedener Equiden wurden für diesen Zweck gedruckt (Hagebecker, 2017).

### 5.3.3 Kolorierung der Objekte

Kolorierte oder mit Textur belegte Modelle kommen sowohl in der Veterinärmedizin (Hagebecker, 2017) als auch Humanmedizin zum Einsatz (McMenamin et al., 2014). Durch die Wahl farbiger Komponenten (z.B. farbiges Kunststofffilament) können ein- (Li et al., 2018) oder mehrfarbige Modelle (Mogali et al., 2018; O'Reilly et al., 2016) erzeugt werden. Die Palette an Farben ist jedoch bei vielen Verfahren beschränkt und vom Angebot des jeweiligen Herstellers abhängig. Ein großer Vorteil des für diese Arbeit ausgewählten 3DP ist, dass nicht nur beliebig viele Farben, sondern auch Farbübergänge und Farbschattierungen in einem Objekt gedruckt werden können. Das ist mit anderen 3D-Druckern auf diese Weise nicht möglich, da sie in der Regel nicht mehr als drei Farben gleichzeitig einsetzen können. Der 3DP mischt, vergleichbar einem Tintenstrahldrucker, jeden Farbton bedarfsgerecht. Dadurch kann jede Farbschattierung des CMYK-Spektrums fotorealistisch gedruckt werden (3D Systems Europe, 2018).

In den gängigen Anatomiewerken im deutschsprachigen Raum und darüber hinaus finden sich kolorierte 2D-Grafiken von Schädelknochen (Budras, 2012; Evans und de Lahunta, 2013a; Nickel et al., 2004). Zur Sicherung eines zusätzlichen Lerneffekts werden auch Fotografien bunt bemalter Schädelknochen genutzt (Salomon, 2015). Im Rahmen dieser Arbeit fand ebenfalls eine Kolorierung des ursprünglich rein weißen Schädeldrucks statt, jedoch nicht zur besseren Orientierung, sondern um den dreidimensionalen Ausdrucken ein natürliches Aussehen zu verleihen. Da das Gipspulver rein weiß ist (3D Systems Europe, 2013a), mussten dafür die Knochenstrukturen mit einem geringfügig gelblichen Beigeton eingefärbt werden. Die Zähne wurden mit einem gebrochenen Weißton belegt, der den eines echten Zahns im unversehrten Zustand imitiert. Dieses Vorgehen bringt eine gewisse Idealisierung mit sich. Darüber hinaus werden Schädelpräparate im Zuge der Herstellung mit verdünntem Wasserstoffperoxid gebleicht, so dass auch an nativen Schädeln die Zähne ideal weiß sind. Zähne eines adulten Hundes zeigen in vivo üblicherweise

gelbliche Verfärbungen und Zahnsteinablagerungen. Diese Idealisierung am 3D-Modell ist für den anatomischen Unterricht allerdings nicht von Belang. Daher können die Drucke für den anatomischen Unterricht verwendet werden.

Die Anordnung der Modelle im Bauraum des Druckers führte aus technischen Gründen zu geringgradigen Farbabweichungen. Waren die Bauteile in Längsrichtung ausgerichtet, stellte sich eine Seite etwas heller dar als die andere. Durch Querausrichtung im Bauraum konnte der Effekt der farblichen Unterschiede verringert werden. Die Ursache des Problems ist nicht eindeutig festzustellen, ein Faktor ist der schichtweise Aufbau der Objekte und dass die Färbung nur die äußersten Schichten des Objekts durchdringt. Da es sich um ein bekanntes, technisch bedingtes Problem des Pulverdruckers handelte, konnte es nicht vollständig behoben werden. Durch die geschickte Ausrichtung im Prozessraum und die Infiltration im Post-Processing wurden die Farbabweichungen so weit gemindert, dass sie nicht mehr ins Gewicht fielen. Mit diesen Korrekturen war das Druckverfahren für diese Arbeit gut geeignet.

#### 5.3.4 Post-Processing

Der erste Schritt des Post-Processing bestand darin, die 3D-Ausdrucke vorsichtig aus dem pulvergefüllten Druckbett auszugraben. Zu diesem Zeitpunkt waren die Objekte noch fragil, was als Nachteil gegenüber Kunststoffdrucken (FLM-Verfahren) zu bewerten ist. Als Vorteile sind allerdings die fotorealistische Vielfarbigkeit, die hochauflösende Oberflächenstruktur und der Verzicht auf Stützstrukturen anzuführen. Stützmaterialien wären bei einem Druck mit Kunststofffilamenten jedoch unerlässlich (Breuninger et al., 2013b; Kollenberg, 2015). Ihre Entfernung an feinen Strukturen ist problematisch und führt für gewöhnlich zu Beschädigungen, zudem ist die Auflösung deutlich geringer (Gebhardt, 2016a). Beim Pulverdruckverfahren verbesserte eine Trocknungszeit von mindestens zwei Stunden vor der Entnahme die Stabilität. Daher wurde der Startzeitpunkt des Druckprozess so gelegt, dass die Objekte nach Abschluss noch mehrere Stunden im Druckbett ruhen konnten.

Das anschließende Erwärmen und die Infiltration mit dem Sekundenkleber Colorbond/zbond® (3D Systems Europe, 2013b) führte zu einer guten Stabilität der gedruckten Objekte. Feine Strukturen der 3D-Ausdrucke wie die Ossa conchae sind stabiler als ihre nativen, hauchdünnen Vorlagen. Grund dafür ist, dass diese Strukturen durch den beschriebenen Detailverlust weniger filigran sind. Sie sind dennoch als

anatomisch korrektes Anschauungsmaterial für die Studierenden geeignet. Andere Bereiche, wie in diesem Fall vor allem die Spitzen der Zähne, sind hingegen an den originalen Schädelknochen stabiler als an den 3D-Modellen. 3D-Kunststoffdrucke brechen bei Stürzen sehr viel weniger leicht als solche aus gipsartigem Material. Jedoch fehlen 3D-Modellen aus Kunststoff in der Regel viele Details wie zum Beispiel die natürliche Farbigkeit und Oberflächenstruktur. Die infiltrierten Pulverdrucke der Hundeschädel weisen eine gute Stabilität beim Handling auf und eignen sich aufgrund ihrer Vorteile sehr gut für den anatomischen Unterricht.

Sofern es im Verlauf des Post-Processings zum Abbrechen dünnwandiger Strukturen kam, wurden sie nach Infiltration und vollständigem Trocknen mit Sekunden- oder Alleskleber wieder befestigt. Die Grenze zwischen Objekt und angefügtem Bruchteil war nach dem Verkleben kaum zu sehen und beeinträchtigte die Qualität des Modells nicht. Dieses Problem im Post-Processing von 3DP-gedruckten Modellen ist nicht unbekannt (Hagebeuker, 2017). Durch sorgfältiges Arbeiten und mit zunehmender Erfahrung in der Durchführung der Arbeitsschritte kam es nur noch sehr selten zum Abbrechen von Strukturen.

Durch Infiltration der Objekte wurden die Farben so zur Geltung gebracht, dass sie ihren eigentlichen Farbwert annahmen. Die Infiltration war folglich zwingend notwendig, sowohl wegen der Stabilität als auch wegen der Farbgebung. Die gipsartige, leicht körnige Oberfläche (Breuninger et al., 2013b), wurde feiner und glatter. Bei der Infiltration wurden die vorgeschriebenen Arbeitsschutzmaßnahmen beachtet (3D Systems Europe, 2013b). Das Tragen einer Schutzbrille, undurchlässiger Handschuhe und einer Schürze waren notwendig, um einen Kontakt der Flüssigkeit mit Augen oder Haut zu vermeiden. Dies brachte einen vertretbaren zeitlichen Mehraufwand mit sich, denn ein Kittel wurde zum Schutz der persönlichen Kleidung ohnehin getragen und eine Werkbank mit Abzug sorgte für ausreichende Belüftung. In der etwa einstündigen Trocknungszeit mussten die infiltrierten 3D-Modelle regelmäßig gewendet werden, um ein Anhaften an der Unterlage zu vermeiden.

#### **5.4 Realitätsnahe Wiedergabe der 3D-Objekte**

Spuren natürlichen Verschleißes während der Lebenszeit der Tiere sowie Beschädigungen durch Herstellung, Handhabung oder Lagerung der originalen Knochenpräparate wurden in den digitalen Dateien behoben und physiologische 3D-

Ausdrucke erzeugt. Obwohl Proportionen und Morphologie der Schädelknochen durch die Nachbearbeitung nicht verändert wurden, gelten für sie nicht die Anforderungen um für biometrische Messungen geeignet zu sein. Dies war nicht Zielsetzung dieser Arbeit. Weiterhin sind Unterschiede in den Proportionen Teil der biologischen Vielfalt (Evans und de Lahunta, 2013a).

Die dreidimensionalen Modelle sind aus technischen, ästhetischen und didaktischen Gründen nicht identisch mit den zugrundeliegenden Originalen. Jedoch erfüllen die 3D-gedruckten Oberschädel, Unterkiefer und Schnitte den Anspruch, eine anatomisch korrekte Nachbildung ihrer Vorlage zu sein. Damit können sie uneingeschränkt als hilfreiches, hochwertiges Anschauungsmaterial in der tiermedizinischen Lehre eingesetzt werden (Schoenfeld-Tacher et al., 2017). Sie zeigen den physiologischen Zustand und eignen sich deshalb besonders gut für die anatomische Grundausbildung (Doney et al., 2013).

Die morphologischen Merkmale wurden präzise wiedergegeben, wenngleich die Oberfläche der gedruckten Modelle glatter und weniger differenziert ist als die der Originale. Bei der Erfassung der nativen Schädel mit einem Computertomographen entstehen Stufen in den abgebildeten Dateien, die geglättet werden müssen, da dieses Erscheinungsbild nicht physiologischen Schädeln entspricht. Zusätzlich gehen besonders feine Details der Knochenoberfläche durch die mehrfache rechnerische Verarbeitung der Daten verloren (vgl. Abschnitt 5.3.1). Diese sind indes für das Verständnis der Anatomie nicht bedeutsam. Im Gegenteil, die Reduktion abkömmlicher Details erleichtert den Lernprozess, da die Studierenden ihre kognitiven Ressourcen zielgerichtet für die wichtigen anatomischen Merkmale einsetzen (Schoenfeld-Tacher et al., 2017). Ebenso zeigen anatomische Zeichnungen in Standardwerken der Anatomie in erster Linie die didaktisch wichtigen Attribute und vernachlässigen feine Oberflächenstrukturen (Nickel et al., 2004). Somit können die 3D-Drucke als effektive Lehrmaterialien eingesetzt werden, gerade weil sie nicht zu 100% dem Original entsprechen. Eine zusätzliche Einschränkung der Detailvielfalt bringen die derzeitigen informationstechnischen Rahmenbedingungen mit sich. Überschreiten die digitalen Dateien eine Größe von 100 MB, kann die Software die Datenmenge nicht mehr verarbeiten. Mit fortschreitender Entwicklung der 3D-Druck Technologie wird diese Einschränkung in naher Zukunft mit hoher Wahrscheinlichkeit

aufgehoben sein. Ergänzend soll erwähnt werden, dass die Dateigröße von 100 MB für die Wiedergabe einer hohen Detailgenauigkeit und folglich qualitativ hochwertiger Drucke sehr gute Möglichkeiten bietet.

Der haptische Eindruck der Oberfläche der 3D-gedruckten Präparate ist leicht rau und nicht mit dem eines nativen Schädels gleichzusetzen. Bedingt ist dies durch die Korngröße des Polymer-Gipsgemisches beim 3DP (Breuninger et al., 2013b). Der Farbeindruck eines nativen Schädels wird durch die Kolorierung imitiert. Das Gewicht der 3D-Ausdrucke unterscheidet sich von dem der originalen Schädel. Während der 3D-gedruckte Unterkiefer des Afghanischen Windhundes mit 133 g nicht viel schwerer ist als sein natives Vorbild mit 110 g, wird der Unterschied beim Wiegen seines Oberschädels wesentlich deutlicher. Das Original wiegt 220 g, das zugehörige 3D-Modell 450 g. Der Gewichtsunterschied kann durch die abgeschlossenen Binnenräume wie dem Sinus frontalis erklärt werden. Aus solchen unzugänglichen Innenräumen konnte das Pulver nicht entfernt werden. Außerdem enthalten die 3D-Modell nicht wie natürlicher Knochen Diploe, sondern verdichtetes Pulver. Bei den angefertigten Schnitten hingegen konnte je nach Schnittführung aus solchen Räumen das Pulver entfernt und somit das Gewicht verringert werden. Hinsichtlich des Gewichts weichen die dreidimensional gedruckten Schädel folglich von ihren originalen Vorlagen ab. Bei einem FLM-Druck wären weniger Unterschiede zu erwarten, da die Füllung der Innenräume definiert werden kann (Gebhardt, 2016a). Hinsichtlich der Oberflächenstruktur, der farblichen Erscheinung sowie benötigter Stützmaterialien ist der 3DP dem FLM-Druck jedoch, wie bereits ausgeführt, überlegen. Die gedruckten Schädelknochen sind in bestimmten Bereichen wie den Nasenmuscheln in ihrer Stabilität den nativen überlegen. Andere Bereiche wie die Zähne brechen leichter als an echten Schädeln. Jedoch bekommen die Zähne der Drucke keine Spannungsrisse wie es beispielsweise am Dens caninus eines nativen Schädelpräparates bei längerer Lagerung für gewöhnlich der Fall ist. Die Stabilität ist also von der jeweiligen Region abhängig. Diese Beobachtung stützt sich auf die Erfahrungen während des Post-Processings, ist jedoch noch nicht genauer untersucht worden, da es nicht Teil der Aufgabenstellung dieser Arbeit war, was aber gemacht werden könnte.

Auch wenn die feinen Oberflächendetails der dreidimensionalen Ausdrücke nicht so exakt sind wie die der echten Präparate, so verdeutlichen sie anschaulich anatomisch wichtige Merkmale und werden von Studierenden als hilfreich beim Lernen empfunden (Hagebecker, 2017). Eine hohe Akzeptanz dreidimensional gedruckter Präparate bei den Studierenden zeigte auch Li et al. (2018). Mit Additive Manufacturing hergestellte Knochenpräparate werden an zwei Universitäten in Sydney bereits erfolgreich in der humanmedizinischen Lehre eingesetzt (Alali et al., 2017). Lim et al. (2016) sehen sie als innovative Hilfsmittel in der vorklinischen Ausbildung. Die Ergebnisse der subjektiven Evaluation der 3D-Modelle dieser Dissertation unterstreichen dies. 86% der Studierenden bewerteten die Option mit 3D-Drucken zu lernen als sehr gut oder gut. Im Rahmen der objektiven Evaluation dieser Arbeit zeigte die Gruppe, die mit 3D-Ausdrücken lernte, die besten Lernfortschritte.

Zusammenfassend kann festgestellt werden, dass 3D-gedruckte Modelle von Tierknochen nach derzeitigem technischen Stand sehr gut geeignet sind um die anatomische Lehre sinnvoll zu ergänzen. Aufgrund ihrer Eigenschaften können sie sogar als Alternative für native Knochen genutzt werden (Li et al., 2018)

### **5.5 Dreidimensional gedruckte Schnittpräparate**

Die Anfertigung von Schnitten anatomischer Präparate ist ein gut bewährtes Mittel, um innenliegende Strukturen einsehbar zu machen. Diese Option ist für Skelettgebiete mit komplexer innerer Ausgestaltung wie dem Oberschädel von Hunden von besonderer Bedeutung.

Die im Rahmen dieser Arbeit angefertigten Schnitte ermöglichen auf unterschiedliche Weise Einblicke in die Organisation der innenliegenden Strukturen eines Hundeoberschädels, die dem Betrachter sonst verborgen bleiben. Der Vorteil schwer einsehbare anatomische Strukturen sichtbar zu machen, wird auch in der Literatur beschrieben (Alali et al., 2017). Vom Oberschädel des Deutschen Schäferhundes wurden fünf Schnitte angefertigt. Neben einem geringgradig paramedianen und kaudodorsalen Schnitt mit Eröffnung der Schädelhöhle, sind die drei transversalen Schnitte von besonderer Bedeutung. Für die Eigenschaften, die Bearbeitung und das Post-Processing gelten die gleichen Aspekte wie in Abschnitt 5.3.2 und 5.3.4 diskutiert. Der schräg horizontale Schnitt gibt den Blick von kaudodorsal in die Schädelhöhle frei. Er und der geringgradig paramediane Schnitt sind den gezeichneten Abbildungen im

Lehrbuch der Haussäugetiere von Nickel et al. (2004), nachempfunden. Diese Schnittführung ermöglicht es den Studierenden, die Strukturen durch Drehen der Modelle aus jeder Perspektive zu erkunden. Dieses Vorgehen fördert das Verständnis der räumlichen Ausdehnung der Strukturen (Knoedler et al., 2015; Pujol et al., 2016). Präparate mit kaudodorsaler Eröffnung der Schädelhöhle stehen den Studierenden der Tierärztlichen Fakultät der LMU nicht als haptisch erfassbare Lehrmaterialien zur Verfügung. Ihre Bereitstellung ist somit als großer Zugewinn für die Studierenden zu bewerten.

Der paramediane Schnitt zeigt unter anderem die Anordnung der Endo- und Ektoturbinalia des Os ethmoidale sowie das Vomer, und auch das Innere der Schädelhöhle. Schnitte dieser Art stehen den Studierenden derzeit in begrenzter Anzahl und mit an Plexiglas befestigter Schnittfläche zur Verfügung. Aufgrund des natürlichen Verschleißes und der studienbedingten Abnutzung sind nur wenige in einem guten Zustand. Die dreidimensionalen Drucke bieten den Vorteil, dass die Anzahl und die Einschränkung der Sicht aufgehoben werden. Die Möglichkeit für Studierende, die Präparate in die Hand zu nehmen, zu drehen und zu untersuchen, sowie die Verläufe von Kanälen gegebenenfalls durch Sondierung mit einem Draht nachzuvollziehen, erleichtert das Verstehen und steigert die erlebte Qualität des Lernangebots deutlich. Die erlebte Qualität des Lernangebots wiederum ist ein wichtiger Faktor erfolgreichen Lernens und wirkt sich positiv aus auf den Lernerfolg aus (Kerres, 2000).

Ein großer technischer Vorteil des dreidimensionalen Drucks virtueller Dateien ist die große Bandbreite an variablen Schnittführungsoptionen. Schnitte, die an Nativpräparaten nicht möglich sind, können angefertigt werden (vgl. Schnitt in Höhe der Bulla tympanica). Die Möglichkeiten der Schnittführung an nativen Schädeln ist begrenzt und die Durchführung ein heikles Verfahren. In der Regel ist der erste Versuch gleichzeitig der letzte, da für ein Nachschneiden nicht mehr ausreichend intakter Knochen zur Verfügung steht. Auch das Sägeblatt an sich führt zu Verlusten von mindestens 1 mm Knochenmaterial. Besonders kleine und schmale Strukturen im Bereich des Sägeblatts werden weggeschnitten, so dass ein späteres Zusammensetzen der Teile nicht mehr möglich ist, da der Bereich der Breite des Sägeblatts fehlt. Des Weiteren zerbrechen feine, innenliegende Strukturen leicht oder



gehen verloren. Dies betrifft vornehmlich die Ossa conchae, die als dünnwandige Ethmoturbinalia in das Lumen ragend die Nasenhöhle füllen (Nickel et al., 2004). Darüber hinaus ist bei Schnitten durch Anteile des Gesichtsschädels mit einem Splintern der Zahnhartsubstanz zu rechnen. Die geschilderte Problematik erübrigt sich beim digitalen Schneiden der Oberschädel, denn es findet weder eine physische Krafteinwirkung von Werkzeugen statt, noch kommt es zum Verlust von Strukturen durch ein Sägeblatt. Die Teile können verlustfrei wieder zusammengefügt werden. Gesetzt der Fall es würde zu einem Verlust durch das Schneiden kommen, kann dieser ohne großen Aufwand durch eine angepasste Gegendatei ausgeglichen werden, um einen exakt zusammensetzbaren Schädel zu erhalten. Ein weiterer Vorteil der virtuellen Dateien ist, dass das Objekt digital beliebig oft geschnitten werden kann bis die ideale Ebene gefunden wurde. Auch können aus einer Datei sämtliche erwünschte Schnitte in verschiedenen Ebenen und Winkeln angefertigt werden. So wurden aus der Datei des Oberschädels des DSH sowohl diverse transversale als auch paramediane und schräg horizontale Schnitte erstellt.

An den Schnittflächen entstehen aufgrund des CT-Verfahrens Kanten. Diese können mit geringem Aufwand im Zuge der Nachbearbeitung der digitalen Dateien geglättet werden. Siehe hierzu die Abbildungen des schmalen Transversalschnitts in Abschnitt 4.3.1.4.

Zwei der drei transversalen Schnitte zeigen einen Bereich vornehmlich des Gesichtsschädels. Ein breiter Schnitt stellt die knöchernen Strukturen ab dem P<sub>4</sub> bis einschließlich der Lamina cribrosa des Os ethmoidale dar. Der schmalere Schnitt reicht vom kaudalen Ende des P<sub>4</sub> bis zur rostralen Hälfte des M<sub>2</sub> (vgl. Abschnitt 4.3.1). Beide ermöglichen eine sehr detaillierte Sicht auf die Morphologie und Organisation der filigranen Ethmoturbinalia im Lumen der Nasenhöhle sowie auf die Laminae des Os ethmoidale. Auch wenn die Endo- und Ektoturbinalia im Original dünnwandiger sind, bedeuten diese Schnitte einen großen Fortschritt. Die Studierenden hatten bisher keine Möglichkeit Schnitte solcher Art zu betrachten oder haptisch zu erfassen. Selbst in den anatomischen Standardwerken finden sich kaum Abbildungen. Oftmals finden sich nur schematische Zeichnungen oder es sind andere Tierarten abgebildet (König und Liebich, 2014; Nickel et al., 2004; Salomon, 2015). Dabei ist eine fundierte Kenntnis dieser Strukturen von großer Bedeutung für die klinische Arbeit. Nicht selten

werden Patienten mit Rhinitis, Fremdkörperverdacht in den oberen Atemwegen oder züchtungsbedingter Verformung der Nasenmuscheln vorgestellt (Oechtering et al., 2007). Zur optimalen Versorgung der Patienten muss das Wissen über die räumliche Anordnung und Ausdehnung der anatomischen Strukturen vorhanden sein.

Die anatomischen Gegebenheiten der Nasenhöhle stellen die Studierenden vor eine erhebliche lerntechnische Herausforderung. Die gedankliche räumliche Vorstellung der Form und Organisation verschiedener anatomischer Strukturen, wie den zahlreichen Anteilen des Os ethmoidale, ist ein entscheidender Schritt im Lernprozess (Pujol et al., 2016). Die Annahme, dass die angefertigten Schnitte eine sinnvolle Hilfestellung beim Erlangen anatomischer Kenntnisse darstellen, zeigten nicht nur die Ergebnisse der objektiven Evaluation. Der Lernfortschritt der Gruppe, die mit ihnen lernte, wurde sehr positiv beeinflusst. Fragen 4 und 5 des Evaluationsbogens bereiteten allen Probanden die größten Schwierigkeiten. Diese beiden Fragen zeigten den kaudodorsalen Schnitt, der Einblick in die eröffnete Schädelhöhle gibt. Während alle Gruppen vor der Lernphase nur zwischen 0 und 10% der maximalen Punktzahl erreichten, konnte die Gruppe, die mit den 3D-Präparaten lernte, sich bei Frage 4 von 5% auf 29% und bei Frage 5 sogar von 0% auf 34% verbessern. Die beiden anderen Gruppen erreichten bei Frage 4 maximal 22% und bei Frage 5 20%. Der Vorteil, mit den 3D-Präparaten zu lernen, wird durch diese überproportionale Steigerung sehr deutlich (vgl. Abschnitt 4.8). Auch die Auswertung der subjektiven Fragen im Rahmen der Evaluation bestätigte diese Annahme. 93% der Studierenden aus Gruppe 3 bewerteten den Einsatz der Schnitte als sehr vorteilhaft und vorteilhaft. Die Ergebnisse einer subjektiven Befragung der Studierenden der Tierärztlichen Fakultät München im Jahr 2017 für Präparate des Pferdeschädels fielen ähnlich aus. Der Transversalschnitt eines Esels und der Schnitt einer eröffneten Schädelhöhle eines adulten Bayerischen Warmblutpferdes wurden im Gesamteindruck mit über 81% als sehr gut oder gut bewertet (Hagebeuker, 2017).

Der dritte transversale Schnitt wurde in Höhe der Bulla tympanica gesetzt. Die Besonderheit ist die innovative Schnittführung. Der Schnitt zeigt die eröffneten Strukturen gleichzeitig auf zwei Ebenen in kranio-lateraler und dorsaler Ansicht (vgl. Abbildung 29, Abbildung 30 und Abbildung 46).

Solch eine Schnittführung ist an nativen Knochen unmöglich beispielsweise im Hinblick auf die Gehörknöchelchen. Es muss eingeräumt werden, dass es zu einem Detailverlust der Strukturen des Mittel- und Innenohrs kam. Gründe sind die Erfassung durch das CT-Gerät, die Verarbeitung der Daten und die Nachbearbeitung. Jedoch besteht die vorteilhafte Möglichkeit, diese Strukturen durch Einsatz eines Micro-CTs detailgetreu nachzustellen und ihre natürliche Konfiguration abzubilden (McMenamin et al., 2014; Smith et al., 2018). Dadurch können beispielsweise Hammer, Amboss und Steigbügel in physiologischer Lage einsehbar gemacht werden.

Dank der neuen vielfältigen Möglichkeiten in der Schnittführung, ist es denkbar weitere interessante morphologische Strukturen wie zum Beispiel die Ausdehnung des Recessus maxillaris oder Sinus frontalis für die Lehre oder die Forschung visuell zugänglich zu machen. Darüber hinaus kann die transversale und mediane Schnittführung kombiniert werden. Derart aufwändige Präparate mit unkonventionellen Schnittführungen können auch Kolleginnen und Kollegen in Klinik und Paraklinik bei ihrer täglichen Arbeit unterstützen und grundsätzlich – unter Berücksichtigung des Zeitaufwandes – auch nach konkretem Bedarf angefertigt werden.

### **5.6 Bedeutung und Einsatz von 3D-Modellen in der universitären Lehre**

Seit Jahrhunderten sind verwesliche Präparationsobjekte fester Bestandteil der medizinischen Ausbildung. In den letzten Jahren wurden sie mehr und mehr durch künstliche Präparationsobjekte ergänzt (O'Reilly et al., 2016). Beide werden eingesetzt, um den Lernstoff anschaulich zu vermitteln. Profunde und detaillierte Kenntnisse der anatomischen Strukturen sind essentiell für den klinischen Beruf als Tierärztin oder Tierarzt (Boyd et al., 2015).

Im Rahmen dieser Dissertation wurden virtuelle und physische dreidimensionale Modelle von Hundeoberschädeln und Unterkiefern erstellt. Sie dienen dem Einsatz in der Lehre und der Ergänzung der bestehenden Lehrmaterialien. Der große Nutzen von physischen Anschauungsmodellen beim Lernen ist belegt (Preece et al., 2013) und allgemein bekannt. Durch sie wird neben der visuellen und der auditiven zusätzlich die taktile Wahrnehmung angesprochen. Die Verknüpfung von taktile Wahrnehmung und visueller Information unterstützt den Lernprozess (Hamza-Lup et al., 2011). 3D-Modelle ermöglichen das Ansprechen des haptischen Sinns, sie können betastet und untersucht werden. Diese haptische Erfahrung von Informationen ist ein besonderer

Vorteil des 3D-Drucks gegenüber anderen Darstellungsweisen in Büchern oder am PC-Bildschirm (Doney et al., 2013).

Knochen lassen sich gut replizieren (Doney et al., 2013). Sie sind monochrom in ihrer Farbigkeit und ihr visuelles und haptisches Erscheinungsbild kann bei der Replikation mittels 3D-Druck bewahrt werden (AbouHashem et al., 2015; Hagebeuker, 2017). Aus diesen Gründen wurde ein Element des Skelettapparats für diese Arbeit ausgewählt. Die Entscheidung für den Hundeschädel wurde getroffen, da Tierärztinnen und Tierärzte in der Praxis sehr oft mit Hunden konfrontiert sind. Der Hund ist nach der Katze das in Deutschland am stärksten vertretene Haustier (Statista, 2018). Es ist also von großer Bedeutung, dass Veterinärmedizinerinnen und Veterinärmediziner – studierend oder praktizierend – die Anatomie des Hundeschädels beherrschen.

Der Schädel ist in seinem Aufbau sehr komplex, da er – im Gegensatz zu Gliedmaßen – innen und außen über anatomisch wichtige Strukturen verfügt und eine große Anzahl morphologischer Strukturen umfasst. Sie zu lernen und ihre räumliche Anordnung zu erfassen, stellt für Studierende eine große Herausforderung dar. Damit die 3D-Modelle diesen Lernprozess sinnvoll ergänzen können, müssen sie möglichst realitätsnah sein. Der 3D-Druck erlaubt die Herstellung detailreicher und detailgenauer Modelle (Doney et al., 2013). Die erfolgreiche Erstellung solcher Modelle war das Ziel dieser Dissertation, welches mit Hilfe der entwickelten Methode erreicht wurde. Entscheidend waren dabei CT-Datensätze von hoher Qualität und eine umfangreiche und qualitativ einwandfreie Bearbeitung der digitalen Dateien wie sie im Zuge dieser Arbeit durchgeführt wurden. So entstanden anatomisch korrekte Präparate für die Lehre, die sehr gut die Anforderungen erfüllen realitätsnah und detailgetreu zu sein.

Um die räumliche Organisation und Ausdehnung der Strukturen des Hundeoberschädels erfassen zu können bedarf es räumlicher Vorstellungskraft. Dies insbesondere, wenn Studierende aus den Informationen eines statischen zweidimensionalen Bildes gedanklich ein dreidimensionales Objekt erzeugen müssen (Berney et al., 2015) wie es beim Lernen mit einem Anatomiebuch der Fall ist. Diese gedankliche räumliche Vorstellung ist ein entscheidender Schritt im Lernprozess (Pujol et al., 2016). Er kann besonders für Studierende im vorklinischen Abschnitt des Studiums herausfordernd sein (Knoedler et al., 2015), denn sie verfügen über ein sehr begrenztes anatomisches Wissen. An dieser Stelle helfen 3D-Modelle die Lücke

zwischen 2D-Darstellung und der mentalen dreidimensionalen Vorstellung zu schließen und diesen Schritt zu erleichtern. Dies gilt im Besonderen, wenn sie wie die erstellten Schnitte, Einblick in Strukturen ermöglichen, die üblicherweise nicht eingesehen werden können. Anhand der Schnitte, die in dieser Arbeit angefertigt wurden, können die Studierenden beispielsweise die Organisation der Ossa conchae und die Lage des Vomer aus verschiedenen Perspektiven betrachten und nachverfolgen. Auch wenn nicht alle Endo- und Ektoturbinalia gleich zart und zerbrechlich sind wie im realen Schädelpräparat, so gewinnen die Studierenden doch einen anatomisch korrekten Eindruck bezüglich ihrer Organisation. Die Ergebnisse der objektiven Evaluation ergaben ebenfalls, dass die Schnitte einen Vorteil beim Erlernen anatomischer Strukturen bieten. Die separate Auswertung der Fragen, für die räumliches Verständnis besonders wichtig war, zeigte sehr anschaulich, dass das Lernen mit den 3D-Präparaten ein immenser Vorteil für die Studierenden war, denn sie schnitten bei der Beantwortung der Fragen erheblich besser ab. Die besseren Ergebnisse der Fragen 4 und 5 wurden im vorherigen Abschnitt bereits aufgeführt, bei Frage 2 die auch zu diesem Komplex gehört, erzielte Gruppe 1 24%, Gruppe 2 41% und Gruppe 3 82% der maximalen Punktzahl - also etwa dreimal so viel wie Gruppe 1 und doppelt so viel wie Gruppe 2 (vgl. Abschnitt 4.8).

Indem die 3D-Ausdrucke gleichzeitig haptisch erfahrbare Objekte darstellen (Knoedler et al., 2015), werden verschiedene Sinnesmodalitäten angesprochen. Die Informationen werden multisensorisch vermittelt und prägen sich leichter ein (Yeom et al., 2017). Es konnte gezeigt werden, dass eine sinnvolle motorische Interaktion mit dem Lernobjekt die Aneignung von Wissens beschleunigt (Soden-Fraunhofen et al., 2008). Diese Erkenntnisse lassen sich auf die vorliegenden 3D-gedruckten Modelle der Hundeschädel und ihrer Schnitte übertragen und verleihen ihnen dadurch einen hohen didaktischen Wert.

Dass 3D-Drucke wertvoll für die medizinische und tiermedizinische Lehre sind, belegten in den letzten Jahren viele Studien. Sie betonten die zahlreichen neuen Einsatzmöglichkeiten und die gute Qualität der dreidimensionalen Drucke (Alali et al., 2017; Knoedler et al., 2015; Kong et al., 2016; Mogali et al., 2018; Preece et al., 2013). Eine Studie von Knoedler et al. (2015) bewies, dass der Einsatz von 3D-gedruckten Modellen vor allem bei Studierenden im ersten Ausbildungsjahr sehr positive

Ergebnisse erzielte und damit besonders für die Grundausbildung große Vorteile mit sich bringt.

Die Qualität der Lehrmaterialien ist ein wichtiger didaktischer Faktor. Eine hohe Qualität der Lehrmaterialien fördert die Lernmotivation der Lernenden und führt damit zu einer Erhöhung der Lernintensität, was wiederum nicht nur die subjektive, sondern auch die objektive Lernleistung verstärkt (Kerres, 2000). Dieser positive Effekt ist von den 3D-Ausdrucken dieser Hundeschädel zu erwarten, da die Studierenden der Gruppe 3 sie mit über 90% als sehr gut und gut beurteilten. Auch das erfolgreiche Abschneiden der Gruppe 3 in der objektiven Evaluation, wie in den vorhergehenden Abschnitten diskutiert, bestätigt diese These.

Damit die Studierenden von hochwertigem Lehrmaterial profitieren können, muss dieses in ausreichender Menge vorhanden sein. Dank des 3D-Drucks von anatomischem Anschauungsmaterial kann dieses in kurzer Zeit in großer Anzahl repliziert und zur Verfügung gestellt werden. Der Druck und die Nachbearbeitung von acht Repliken der Präparate wie sie im Rahmen dieser Arbeit hergestellt wurden, kann in nur acht bis neun Arbeitsstunden fertiggestellt werden. Für die Anfertigung einer neuen, druckfertigen Datei ist ein deutlich höherer Zeitaufwand zu kalkulieren (vgl. Abschnitt 5.8). Je nach Wahl der Präparate kann die Anzahl pro Zeiteinheit niedriger oder höher sein. Es passen zum Beispiel mehr Schnitte als intakte Oberschädel in den Prozessraum des Druckers, somit können mehr Präparate gleichzeitig gedruckt werden. Die Nachbearbeitung der Schnitte erfordert deutlich weniger Zeit als die der intakten Oberschädel, womit die Dauer der Gesamtarbeitszeit in etwa konstant bleibt. Dass eine ausreichende Menge an Anschauungsmaterial für das Erlernen anatomischer Kenntnisse Voraussetzung ist, ist auch in der Literatur bekannt (AbouHashem et al., 2015). Der 3D-Druck ist somit der klassischen Präparation hinsichtlich des Zeitfaktors deutlich überlegen, da im Prinzip unbegrenzt Repliken erstellt werden können, während native Präparate nicht in unbegrenzter Anzahl zur Verfügung stehen.

An der Tierärztlichen Fakultät der LMU sind zwar zahlenmäßig ausreichende Hundeschädel vorhanden, jedoch weist die große Mehrheit teils erhebliche Schäden auf. Diese betreffen im Besonderen die filigranen knöchernen Strukturen. Sofern sie bei der Herstellung der nativen Präparate vollständig erhalten werden konnten, werden

sie durch das Handling und ihre Aufbewahrung bereits nach kurzer Zeit beschädigt oder zerstört. Hier bietet der 3D-Druck weitere Vorteile. Obwohl die gedruckten Repliken nicht in allen Bereichen stabiler sind als echte Knochen, so können sie leichter und schneller ersetzt werden (Doney et al., 2013). Man ist nicht auf die Verfügbarkeit von Hundekadavern angewiesen und muss nicht die Zeitdauer der Herstellung der Knochenpräparate abwarten. Darüber hinaus entfällt das zeitaufwändige, kostenintensive und darüber hinaus gesundheitsschädliche und unter Umständen sogar explosionsgefährliche Entfetten der nativen Schädelpräparate.

Die dreidimensionalen Präparate der Hundeschädel reichen jedoch aus technischen Gründen nicht ganz an den großen Detailreichtum nativer Schädel heran (vgl. Abschnitt 5.4), dennoch geben sie alle relevanten Charakteristika anatomisch korrekt wieder und erleichtern dadurch das Lernen.

In der Literatur werden neben dem 3D-Druck von Tierknochen (Doney et al., 2013; Hagebecker, 2017; Li et al., 2018) zahlreiche weitere Einsatzmöglichkeiten von Modellen genannt, die mit Hilfe des Additive Manufacturing hergestellt wurden. Im Bereich der anatomischen Lehre stellten Mogali et al. (2018) und Knoedler et al. (2015) die Vorteile und Limitierungen von teils flexiblen, multimaterial gedruckten Modellen gegenüber Plastinaten dar.

Das Modell eines Hundeohrs mit grünmarkiertem Trommelfell wurde gefertigt, daran konnten Studierende den otoskopischen Untersuchungsgang üben (Nibblett et al., 2017). Auf die erste Ovariohysterektomie an einem lebenden Tier wurden Studierende anhand eines Simulationsmodells erfolgreich vorbereitet (Read et al., 2016). Auch in der Weiterbildung ausgebildeter Humanmediziner werden 3D-Präparate eingesetzt (Costello et al., 2015). Jedoch werden 3D-Ausdrucke im medizinischen Bereich nicht nur zu Ausbildungszwecken eingesetzt, sondern auch zur Planung von Operationen (Alali et al., 2017) oder Herstellung passgenauer, individueller Implantate für Patienten (Harrysson et al., 2015). Sie können ebenso in der Kommunikation mit Patientenbesitzern nützlich sein (Dorbandt et al., 2016), beispielsweise bei der Erläuterung einer Tumorthherapie.

## **5.7 Artenvielfalt**

Die Anzahl der domestizierten Hunde an heutigen Hunderassen (*Canis familiaris*) ist sehr groß und damit auch die Vielfalt anatomischer Varianten. Allein der Verband für

das Deutsche Hundewesen führt Beschreibungen von 300 Rassen (VDH, 2018b). Die kraniale Morphologie der Haushunde variiert bemerkenswert stark in Größe und Proportion verglichen mit anderen Spezies der Säugetiere (Evans und de Lahunta, 2013b; Wayne, 1986). Im beruflichen Alltag begegnet praktizierenden Tierärztinnen und Tierärzten eine große Bandbreite verschiedener Hunderassen. Umso bedeutender ist es die Studierenden in einem angemessenen Rahmen vorzubereiten.

Die durch Züchtung bedingten unterschiedlichen Formen der Schädel wirken sich nicht allein auf das phänotypische Erscheinungsbild der Tiere aus, sondern werfen auch neue klinische Fragestellungen auf. Strukturelle Veränderungen oder Fehlbildungen beeinflussen beispielsweise Atmung und Beißkraft. Sie können gravierende Funktionsstörungen bedingen (Drake und Klingenberg, 2010; Oechtering et al., 2007). Insbesondere brachycephale Rassen weisen erhebliche Beeinträchtigungen auf. Wenn eine extreme Verkürzung des Gesichtsschädels und damit auch der Nasenhöhle vorliegt, führt dies zu einer abnormen Konfiguration der Ossa conchae. Die Folge ist, dass Anteile der Nasenmuscheln die Atemwege verlegen (Oechtering et al., 2007). Zu enge Nasenöffnungen und ein überlanges, verdicktes Gaumensegel gehen ebenfalls damit einher. Abhilfe von Beschwerden und Einschränkungen schaffen in der Regel nur operative Eingriffe (Koch et al., 2003; Oechtering et al., 2007). Für deren erfolgreiche Durchführung bilden fundierte anatomische Kenntnisse die Voraussetzung.

Im Zuge dieser Arbeit wurde deshalb je ein Vertreter der dolicho-, meso- und brachycephalen Gruppe sowie ramsköpfiger Hunderassen als 3D-Modell erstellt. Diese sind ein Afghanischer Windhund, ein Deutscher Schäferhund, ein Boxer und ein Bull Terrier. Für ein umfangreicheres Verständnis sollten noch mehr verschiedene Rassen zur Verfügung stehen, doch mit diesen vier Vertretern wird den Studierenden bereits ein guter Überblick über die vier Grundtypen von Schädelformen ermöglicht. Für gewöhnlich stehen nur die Schädel mesocephaler Hunde zur Verfügung und werden in den Abbildungen der Anatomiebücher gezeigt (König und Liebich, 2014; Nickel et al., 2004; Salomon, 2015).



## 5.8 Zeitaufwand und Druckkosten

Die herkömmliche Herstellung von Skelettpräparaten dauert Tage bis Wochen (Piechocki und Altner, 2007c). Die Erstellung von zwei druckbaren digitalen Dateien – einem Hundeschädel und seinem Unterkiefer – dauert mit allen ihren Arbeitsschritten etwa 30 Arbeitsstunden, wenn man die im Rahmen dieser Arbeit entwickelte Methode anwendet (vgl. Abschnitt 3.6). Die Erstellung von zwei solcher Dateien im Rahmen der Vorversuche hätte aufgrund der intensiven Nachbearbeitung weit über 40 Arbeitsstunden benötigt.

Der Arbeitsaufwand von fünf Werktagen muss im Gegensatz zu nativen Schädelpräparaten nur einmal geleistet werden, denn die angefertigte Datei kann anschließend in unbegrenzter Vielzahl bedarfsgerecht repliziert werden. Jedoch braucht es einen mazerierten Hundeschädel von guter Qualität als Grundlage.

Die Replikation inklusive des Post-Processings benötigt ohne Druckzeit für einen einzelnen 3D-gedruckten Hundeschädel und seinen Unterkiefer etwa sechs Arbeitsstunden. Das Post-Processing umfasst die Entnahme aus dem Druckbett, die Erwärmung in der Post-Processing Unit des Druckers für zwei Stunden, die gründliche Befreiung von Pulverresten sowie die Infiltration mit folgender Trocknungszeit von einer Stunde. Ein großer Vorteil ist, dass bei der Herstellung mehrerer 3D-Ausdrucke der Zeitaufwand pro Objekt stark sinkt. Wird der Bauraum beispielsweise mit acht Objekten gefüllt, senkt dies durch die bessere Nutzung des zur Verfügung stehenden Raumes nicht nur deutlich die Kosten pro Modell, sondern ermöglicht die Fertigstellung der acht 3D-Ausdrucke in 8 bis 9 Arbeitsstunden. Als Beispiel diene die Fertigungszeit der acht dreidimensionalen Modelle, die im Bauraum in Abschnitt 3.6.3.2 gezeigt sind. Daraus lässt sich schließen, dass die Wirtschaftlichkeit eines 3DP mit optimierter Ausnutzung des Bauraums steigt und zwar nicht nur hinsichtlich des Arbeitsaufwands, sondern auch bezüglich des eingesetzten Materials pro Präparat (Hagebeuker, 2017; Kollenberg, 2015). Der 3D-Druck gilt als der kosteneffektivste Weg eine große Anzahl an osteologischen Modellen zu erhalten, wenn die nötige Ausstattung für den Druck einmal erworben wurde (AbouHashem et al., 2015). Dadurch, dass nun druckbare Dateien vorliegen, können die Schädelpräparate mit deutlich geringerem Zeitaufwand hergestellt werden. Allerdings sind auch die Anschaffungskosten von Drucker und Druckmaterial zu berücksichtigen. Je nach Modell und Ausstattung kostet der Drucker

zwischen 75.000 bis 120.000 €. Ein entsprechendes Budget ist daher die Voraussetzung, um einen solchen 3D-Drucker anschaffen und betreiben zu können.

## **5.9 Evaluation der 3D-Ausdrucke**

### 5.9.1 Objektive Evaluation der 3D-Ausdrucke

#### 5.9.1.1 Aufbau der Evaluation

Die Evaluation wurde den Studierenden nicht angekündigt, es nahmen folglich alle daran teil, die an diesem Tag anwesend waren. Die Befragung wurde absichtlich nicht in der freien Zeit der Studierenden geplant, um nicht nur freiwillige Teilnehmer zu haben, die möglicherweise besonders motiviert und vorbereitet gewesen sein könnten. Es war wichtig, eine Gruppe durchschnittlicher Studierender bewerten zu lassen, um Ergebnisse zu erhalten, die das Wissensniveau und den Lernfortschritt einer solchen Gruppe repräsentieren. Die Studierenden wurden nach dem Zufallsprinzip in drei Gruppen geteilt und räumlich voneinander getrennt, so dass kein Austausch zwischen den Gruppen stattfinden konnte, um so zuverlässig zu verhindern, dass die Resultate verfälscht würden.

Die Studierenden des dritten Semesters wurden gewählt, weil sie bereits Grundkenntnisse der Anatomie erworben haben und in der Lage sind, den komplexen Lernstoff des Schädels zu begreifen und weil das Thema Schädel zu diesem Zeitpunkt im Lehrplan steht, bei Studierenden aus dem 1. Semester wäre dies nicht gegeben gewesen.

Aufgrund der sehr umfassenden Stoffmenge des Themas und der kurzen Lernzeit von einer Stunde wurde ein Skript verfasst, welches in seinem Inhalt und Umfang auf die Rahmenbedingungen der Umfrage zugeschnitten war. Hinsichtlich der tierartspezifischen Ausprägungen der anatomischen Strukturen wurde nur der Hund berücksichtigt. Andere Tierarten wurden aufgrund des Dissertationsthemas außer Acht gelassen.

Vor der Durchführung der Evaluation wurde der Fragebogen von wissenschaftlichen Mitarbeitern des Lehrstuhls geprüft, um einen adäquaten Schweregrad und eine gute Verständlichkeit der Fragen zu gewährleisten. Der Fragebogen wurde sowohl vor als auch nach der Lernzeit von den Probanden ausgefüllt, um das Ausgangsniveau des

Wissens erfassen zu können und Lernfortschritte feststellen zu können und so eine objektive Evaluierung zu ermöglichen.

Er bestand aus zehn Fragen die teils reine Wissensfragen waren und teils das Erfassen und Wiedergeben räumlicher Strukturen erforderlich machten. Eine höhere Anzahl an Fragen wäre von Vorteil für die Aussagekraft der Auswertung gewesen, es bestand jedoch Konsens während der Vorbereitung der Evaluation, dass die zur Verfügung stehende Zeit eine deutlich ausführlichere Abfrage nicht zulässt. Die Fragebögen wurden nicht markiert, sondern zufällig verteilt, da es das Ziel der Evaluation war, die Veränderung innerhalb einer Gruppe zu erfassen und nicht Einzelpersonen zu bewerten. Konsequenz war, dass die Zuordnung eines Bogens zu einem Probanden nicht gewünscht, aber auch nicht möglich war. Es war den Teilnehmern nicht erlaubt, während der Lernzeit Fragen zu stellen und Hilfestellung zu erhalten. Ziel war es, anhand der Ergebnisse Unterschiede im Lernfortschritt bei Verfügbarkeit verschiedenartiger Lehrmittel zu dokumentieren, zu analysieren und zu bewerten. Im Besonderen sollte untersucht werden, inwiefern die gedruckten Schnittmodelle sich auf die Lernleistung auswirken, da einige dieser Schnitte an nativen Knochen nur schwierig oder gar nicht durchgeführt werden können. Sie stehen daher den Studierenden wenn überhaupt nur in begrenzter Anzahl zur Verfügung. Mithilfe des 3D-Drucks können sie in großer Menge repliziert und als Lehrmaterial bereitgestellt werden. Dazu erhielten die Gruppen unterschiedliche Lehrmaterialien. Es sollte untersucht werden, ob Unterschiede sowohl zwischen dem Lernen ohne und mit Präparaten, als auch mögliche Unterschiede im Lernerfolg abhängig von der Art der Präparate – native Schädel und 3D-Modelle von Schädelknochen – festgestellt werden können (vgl. Abschnitt 3.7 und 4.8).

#### 5.9.1.2 Interpretation der Ergebnisse der objektiven Evaluation

Die Auswertung der Prä-Fragebögen zeigte deutliche Unterschiede im Wissensstand der Probanden der einzelnen Gruppen. Aufgrund der großen Streuung war lediglich die Berechnung des Mittelwertes zur Bewertung nicht geeignet. Faktoren für die Unterschiede können die Vorbereitung des Lernstoffs im Selbststudium durch einige Probanden, Vorkenntnisse durch eine fachbezogene Ausbildung, Praktika oder Berufserfahrung außerhalb des Studiums sein. Möglich ist auch beliebiges, geratenes Ankreuzen der Antwortoptionen. Obwohl um Unterlassung eines solchen Verhaltens

gebeten wurde, kann dieser Faktor nicht vollständig ausgeschlossen werden. Ebenfalls unzulässig war ein Austausch unter den Probanden während des Ausfüllens des Fragebogens- sowohl im Prä- als auch im Post-Durchgang. Durch eine ausreichende Anzahl an Aufsichtspersonal wurde diese Fehlerquelle so niedrig wie möglich gehalten.

Es ließ sich feststellen, dass sich jede der drei Gruppen durch die Lerneinheit erheblich verbessert hat. In Gruppe 2 und 3 war das absolut erreichte Niveau am höchsten und die Streubreite post zu prä nahm stark ab d.h., das Wissensniveau vereinheitlichte sich. Da diesen beiden Gruppen Präparate zur Verfügung standen bestätigt dies, dass der Einsatz verschiedener Lehrmaterialien sich positiv auswirkt. Da der Lernstoff nicht nur visuell zur Verfügung stand, sondern auch haptisch erfahrbar war, wurden mehrere Lerntypen angesprochen und jeder konnte entsprechend seines bevorzugten Lernstils den Stoff erfassen (Creß, 2006; Reitzer, 2014). Die Effektivität des Lernprozesses wurde eindeutig durch die Verknüpfung von visueller Information und taktiler Wahrnehmung unterstützt (Hamza-Lup et al., 2011). Dies erklärt auch, dass die Streuung in Gruppe 1 nach der Lernzeit zunahm, denn vermutlich wurden hier der größte Lernfortschritt durch hauptsächlich visuelle und verbale Lerntypen erzielt während der eher taktile Lerntyp nicht so stark profitieren konnte (Creß, 2006; Reitzer, 2014). Insgesamt wurden die besten Fortschritte von Gruppe 3 erzielt. Ihnen standen neben den 3D-Ausdrucken intakter Oberschädel und des paramedianen Schnitts, die Gruppe 2 als native Präparate erhielt, zusätzlich vier weitere Schnitte als 3D-Präparate zur Verfügung (vgl. Abschnitt 3.7 und 4.8). Somit lieferte bereits diese erste Auswertung Hinweise auf den vorteilhaften Einsatz von dreidimensional gedruckten, osteologischen Modellen.

Die nachfolgende Auswertung der nichtbeantworteten Fragen bestätigte dies. Die Anzahl der nichtbeantworteten Fragen wurden zur Feststellung des Lernfortschritts herangezogen, da sie unter der Annahme, dass nicht ausgefüllt nicht gewusst gleichgesetzt wurde, eine eindeutige Aussage ermöglichte. Der Vorteil dieser Vorgehensweise war, dass die Auswertung pro Gruppe eindeutig die Unterschiede zwischen den einzelnen Gruppen sichtbar machte, der Nachteil, dass nur eine quantitative Aussage möglich war. Die Anzahl der beantworteten Fragen, die sich als

Differenz ergibt, bedeutet nicht gleichzeitig, dass diese auch alle tatsächlich richtig beantwortet waren. Alle drei Gruppen beantworteten nach der Lernphase erheblich mehr Fragen als zuvor. Auffällig ist hierbei, dass nur in den Gruppen mit nativen oder artifiziellen Präparaten als Lehrmaterial nach der Lernphase je zwei Fragen nun von allen Probanden beantwortet wurden während dies bei Gruppe 1 nicht der Fall war. Bei der Auswertung der einzelnen Fragen je Gruppe zeigte sich, dass der Rückgang der Anzahl an nicht beantworteten Fragen bei Gruppe 3 am stärksten ausfiel, Gruppe 2 im Vergleich etwas schlechter abschnitt und Gruppe 1 auch nach der Lerneinheit noch zu einem relativ hohen Prozentsatz gewisse Fragen überhaupt nicht beantwortete.

Um auch eine qualitative Bewertung vornehmen zu können, wurde ausgewertet, zu welchem Prozentsatz die beantworteten Fragen richtig waren. Die Ergebnisse von Gruppe 3 übertrafen auch bei dieser Auswertung jene der beiden anderen Gruppen. Insbesondere bei Fragen mit Abbildungen, die dieser Gruppe zusätzlich als Präparate vorlagen, ist der Unterschied zu den anderen Gruppen erheblich. Die am schwierigsten zu beantwortenden Fragen für alle Gruppen waren Frage 4 und 5, die im Abbild des kaudodorsalen Schnittes die Zuordnung des Foramen rotundum und der Fissura orbitalis verlangten. Durch seinen Einblick aus kaudodorsaler Richtung in die eröffnete Schädelhöhle erleichtert der Schnitt die Zuordnung der Strukturen. Er steht Studierenden als klassisches Knochenpräparat normalerweise nicht oder nur in sehr geringer Anzahl zur Verfügung, da es sich nicht um einen Standardpräparat handelt. Gruppe 3 ist bei diesen Fragen den anderen Gruppen deutlich überlegen, dies bestätigt, dass das Lernen mit den 3D-Präparaten sowohl dem Lernen mit Printmedien als auch dem Lernen mit nativen Präparaten überlegen ist, was auch in der Literatur bezüglich 3D-Ausdrucken beschrieben wird (Alali et al., 2017; Lim et al., 2016). Frage 6 und Frage 7 zeigen die gleiche Struktur einmal als Fotografie und einmal als CT-Bild. Da die Ergebnisse je Gruppe teils bei Frage 6 und teils bei Frage 7 besser sind, ist keine Tendenz zu erkennen und somit kann keine allgemeingültige Aussage zur Transferleistung gemacht werden.

3D-Präparate sind als Lehrmaterial äußerst effektiv einzusetzen. Sie verbessern nicht nur das Verständnis für räumliche Strukturen sondern haben auch gegenüber den nativen Präparaten den großen Vorteil, dass sie einfach und kostengünstig repliziert

werden können, sobald der Prototyp erstellt wurde (Berney et al., 2015; Doney et al., 2013; Knoedler et al., 2015). Somit bieten sie die Möglichkeit allen Studierenden die Ausdrücke in kaudodorsaler Schnitfführung zur Verfügung zu stellen, was mit nativen Präparaten nicht möglich ist.

Obwohl die Darstellung der Mittelwerte nicht die erste Wahl zur Auswertung dieser Umfrage war, wurde sie als zusätzliche Validierung der gewonnen Erkenntnisse durchgeführt. Sie bekräftigt die positiven Ergebnisse, dass der Einsatz von osteologischen 3D-Drucken ein hilfreiches Lehrmedium darstellt. Denn es zeigte sich auch hier, dass Gruppe 3 den größten Lernfortschritt erzielte. Auch Doney et al. (2013) sieht 3D-Drucke von Tierknochen als ein hilfreiches Mittel für Lehrende, da sie die Möglichkeit der visuellen Kommunikation (Demonstration am Anschauungsmodell) bieten und den Studierenden helfen, ein klareres Verständnis der Anatomie zu erlangen.

#### 5.9.2 Subjektive Evaluation der 3D-Ausdrucke

Gruppe 3 bewertete nach der Lernzeit zusätzlich subjektiv die 3D-Präparate anhand von drei Fragen. Die 3D-Drucke wurden als Lehrmittel ausgesprochen positiv bewertet. Die ganzen Schädel wurden von 54% als sehr gut und von 32 % als gut bewertet, die Schnitte sogar von 56% als sehr gut und von weiteren 37 % als gut. Die bessere Zugänglichkeit zu inneren Strukturen, die durch den Einsatz von 3D-Präparaten möglich ist, wurde von den Probanden sehr geschätzt. Die Orientierung in den Präparaten wurde überwiegend als gut und von 17% als sehr gut bewertet. Während der Evaluation der 3D-Drucke hatten die Studierenden keine Möglichkeit Fragen zu stellen oder Hilfe bei der Identifizierung von Strukturen in den teils neuen Schnitten zu erhalten. Um die Orientierung in Schnitten zu verbessern, sollten 3D-Präparate daher im Rahmen betreuter Kurse und/oder zusammen mit kursbegleitenden Skripten zur Verfügung gestellt werden, dies umso mehr, da einige der Schnitte nicht in Abbildungen der gängigen Anatomiebücher zu finden sind (König und Liebich, 2014; Nickel et al., 2004; Salomon, 2015). Ein gutes Lernmedium kann dazu beitragen Lernprozesse positiv zu gestalten und zu unterstützen (Kerres, 2000). Die didaktische Qualität eines Lernangebots liegt bekanntermaßen nicht nur im Medium, sondern hängt auch von der Anwendung und Umsetzung im Unterricht ab. Dies trifft auch für den Einsatz von 3D-Präparaten zu.

### **5.10 Vergleich des Gefährdungspotentials der Herstellungsmethoden**

Bei der Herstellung nativer und artifizierender anatomischer Präparate sind strikte Maßnahmen der Arbeitssicherheit und des Personenschutzes einzuhalten (Niederklopper und Troxler, 2001; Piechocki und Altner, 2007c). Die Einhaltung der Arbeitsschutzbestimmungen sind in Deutschland und europaweit gesetzlich geregelt. Das nationale Arbeitsschutzgesetz definiert Maßnahmen und gilt in allen Tätigkeitsbereichen (BMJV, 1996). Der Umgang mit Gefahrstoffen ist in der Verordnung zum Schutz vor Gefahrstoffen gesondert geregelt. Beschäftigte und andere Personen müssen bei Tätigkeiten mit Gefahrstoffen durch bestimmte Vorkehrungen geschützt werden. Mensch und Umwelt sind grundsätzlich vor stoffbedingten Schädigungen zu bewahren (BMJV, 2010).

Bei der Herstellung von Skelettpräparaten unter Anwendung der klassischen Mazeration liegt die erste potentielle Gefährdung in der Handhabung von scharfen Gegenständen wie Messer und Knochensägen, um den Kopf und die Extremitäten abzutrennen. Die starke Geruchsentwicklung bei der Fäulnismazeration stellt eine erhebliche Beeinträchtigung für die damit Beschäftigten dar (Piechocki und Altner, 2007c).

Die sichere Verwendung unterschiedlicher Chemikalien setzt zuweilen umfangreiche Arbeitsschutzmaßnahmen voraus. Eingesetzt werden u.a. Ammoniak, Kali- und Natronlauge, Natriumperoxid und verdünnte Schwefelsäure. Sie wirken bei Hautkontakt ätzend. Als Schutzmaßnahmen sind das Tragen von Schutzhandschuhen, Schutzkleidung, Augen- sowie Gesichtsschutz vorgesehen (AIR LIQUIDE Deutschland GmbH, 2016; AppliChem GmbH, 2016; Carl Roth GmbH + Co. KG, 2017; Friedrich Scharr KG, 2016; Vinnolit GmbH & Co. KG, 2016). Die Schutzkleidung muss vom Arbeitgeber zur Verfügung gestellt werden.

Angaben sowohl zu den anzuwendenden Arbeitsschutzmaßnahmen als auch die Kategorisierung der Chemikalien bezüglich ihres Gefährdungspotentials müssen in Sicherheitsdatenblättern der Herstellerfirmen aufgeführt werden. Die Art der Angaben wird durch die entsprechenden EU- und REACH-Verordnungen definiert (Parlament und Rat der EU, 2006; United Nations, 2011; United States Department of Labor, 2012). Sie müssen alle Informationen zum Umgang mit chemischen Stoffen sowie zu

möglichen Gefährdungen enthalten und stets auf dem aktuellen Kenntnisstand gehalten werden.

Bei der Entfettung der Knochen werden vor allem organische Lösungsmittel eingesetzt. Sie dürfen nicht eingeatmet werden und sollen nur unter geeigneten Abzugsvorrichtungen angewendet werden (AppliChem GmbH, 2015; AUG. HEDINGER GmbH & Co. KG, 2018; Bernd Kraft GmbH, 2011; Carl Roth GmbH + Co. KG, 2015; Merck KGaA 2017).

Die vielfachen Gefahrenquellen der herkömmlichen Herstellung von Skelettpräparaten erfordern strikte und umfassende Maßnahmen bezüglich des Personenschutzes und der Arbeitssicherheit.

Bei dieser Arbeit wurde zur Fertigung der dreidimensionalen Modelle ein Pulverdrucker, ProJet 660 Pro von 3D-Systems, eingesetzt. Unter den verwendeten Materialien ist lediglich die Infiltrationsflüssigkeit ColorBond/zbond® 90 (Sekundenkleber) (3D Systems Europe, 2013b) nach den drei Vorschriften klassifiziert. Sie wirkt reizend auf Haut, Augen und Atemwege, daher muss für ausreichend Belüftung gesorgt und entsprechende Schutzkleidung getragen werden (3D Systems Europe, 2013b). Im Rahmen dieser Arbeit wurden alle Sicherheitsmaßnahmen zuverlässig eingehalten.

Die übrigen eingesetzten Materialien sind ein Polymergipsgemisch (3D Systems Europe, 2013a), Druckerfarben (3D Systems Europe, 2013c) und eine Reinigungslösung (3D Systems Europe, 2013d). Keines dieser Produkte ist nach dem GHS, der entsprechenden VO durch das Parlament und Rat der EU (2008) oder der HazCom 2012 klassifiziert (United Nations, 2011; United States Department of Labor, 2012). Sie sind folglich als unbedenklich einzustufen.

Bereits die Kürze der aufgelisteten möglichen Gefährdungen und Sicherheitshinweise zeigt eindrücklich, dass die Erstellung von Präparaten mittels 3D-Druck die Exposition der Beschäftigten mit gesundheitsschädlichen Substanzen deutlich verringert und die erforderlichen Arbeitsschutzmaßnahmen im Vergleich zu den herkömmlichen Methoden leicht zu erfüllen sind. Die Gesundheitsgefährdung der Mitarbeiter ist somit beim der Einsatz eines 3D-Druckers zur Herstellung von anatomischen Präparaten viel niedriger und ist daher der klassischen Herstellung von Knochenpräparaten



vorzuziehen. Lediglich beim Umgang mit der Infiltrierflüssigkeit sind gewisse Schutzmaßnahmen zu beachten (3D Systems Europe, 2013b). Im Vergleich zu herkömmlichen Herstellungsverfahren, die teils mit kanzerogenen oder mutagenen Stoffen arbeiten, ist das Gefährdungspotential jedoch deutlich geringer und mit wenigen, geeigneten Methoden (Schutzkleidung, Belüftung etc.) gut zu beherrschen.

Die Weiterentwicklung dieses Generativen Fertigungsverfahrens und die sehr guten Lernerfolge der Probanden eröffnen somit vielfältige Möglichkeiten zur Erstellung von unterschiedlichsten Lehrmaterialien. Durch den Einsatz flexibler Baumaterialien in Generativen Fertigungsverfahren können sogar realitätsnahe Weichteil-Anschauungsmaterialien erstellt werden und dadurch im Vergleich zu Originalpräparaten aus klassischen Herstellungsverfahren sehr gute Ergebnisse erzielt werden. Auch unter hygienischen Gesichtspunkten ist der 3D-Druck den originalen Präparaten überlegen. Aufgrund mangelhafter Entfettung kommt es bei nativen Schädeln nach einigen Monaten oder Jahren häufig zu einem Durchschlagen des Fettes. Die Knochen verfärben sich gelblich (Piechocki und Altner, 2007c). Bei Präparaten, die mit Additive Manufacturing hergestellt wurden, kann der Effekt des Nachfettens nicht auftreten.

### **5.11 Fazit**

Im Rahmen dieser Dissertation entstanden erstmalig anatomisch korrekte, dreidimensionale Ausdrücke von Hundeoberschädeln und Unterkiefern. Die 3D-Modelle zeigen anschaulich rassespezifische Unterschiede der Schädelformen. Zusätzlich wurden vielfältige Schnitte mit teils neuartiger Schnittführung angefertigt. Sie ermöglichen den Einblick in üblicherweise nicht einsehbare Strukturen. Die 3D-gedruckten Schädelpräparate eignen sich als sehr gute Ergänzung der nativen Skelettpräparate für den anatomischen Unterricht. Dies gilt im Besonderen für die Schnittpräparate und konnte sowohl in einer objektiven als auch in einer subjektiven Evaluation bestätigt werden. Sie liegen als digitale Dateien vor, welche virtuell betrachtet und bewegt werden können. Diese Dateien können unter geringem zeitlichem und arbeitstechnischem Aufwand in erforderlicher Anzahl repliziert werden.

## 5.12 Ausblick

Üblicherweise stehen den Studierenden mesocephale Hundeschädel als Anschauungsobjekte zur Verfügung. Die Auswahl an Schädeln, die im Rahmen dieser Arbeit getroffen wurde, erweitert dieses Spektrum und ermöglicht den Studierenden einen Rassevergleich der vier Grundtypen von Schädeln. Jede dieser vier Gruppen umfasst für sich bereits eine sehr große Vielfalt an Variationen. Um interessierten Studierenden mehr Möglichkeiten zur Betrachtung unterschiedlicher Hunderassen zu geben, könnten weitere Schädel verschiedenster Hunde in druckbaren digitalen Dateien erfasst und in einer Sammlung gebündelt werden. Diese Datenbank könnte durch Dateien zusätzlicher Tierarten erweitert werden wie beispielsweise Katzen oder ausgefallenerer Tierarten, deren Skelette weniger leicht verfügbar sind, wie zum Beispiel Neuweltkameliden. Es eignen sich nicht nur die Schädel adulter Tiere, sondern auch die juveniler (Hagebeucker, 2017) sowie das gesamte Skelett und die Organe. Mit fortschreitender Technik wird es leichter sein auch Organstrukturen und Blutgefäße darzustellen. Unter Zuhilfenahme des 3D-Drucks können bereits heute Präparate beispielsweise der Leber hergestellt werden, deren Parenchym transparent gefertigt ist, um den inneren Verlauf der Blutgefäße sichtbar und nachvollziehbar zu machen (Kong et al., 2016). Diese Anwendung des 3D-Drucks fand im humanmedizinischen Bereich statt und sollte auch auf die Veterinärmedizin ausgeweitet werden.

Neben physiologischen Modellen, die einen Ausschnitt der Bandbreite anatomischer Varianten widerspiegeln, können auch pathologische Veränderungen unterschiedlichster Art in die Sammlung aufgenommen werden. Interessant sind ebenso Knochen seltener oder ausgestorbener Wildtiere sowie archäologischer Funde. Viele Wildtier- aber vor allem archäologische – Funde sind sehr selten. Durch den 3D-Druck können sie vielen Studierenden zugänglich gemacht werden. Ihr Einsatz ist jedoch nicht auf die universitäre Lehre beschränkt, die Dateien und ihre Replikate können darüber hinaus für Untersuchungen und biomechanische Tests zu Forschungszwecken an sonst einmaligen Knochen eingesetzt werden, ohne die Originale zu zerstören. Dies ist ein weiterer Vorteil des 3D Drucks, der in den nächsten Jahren ausgebaut werden sollte. Die Erstellung einer umfassenden digitalen Datenbank würde hier eine Vielzahl spannender Optionen eröffnen.

## 6 Zusammenfassung

### **Erstellung von dreidimensional gedruckten, anatomisch korrekten Oberschädeln und Unterkiefern von *Canis familiaris* für den Einsatz in der anatomischen Lehre**

Der 3D-Druck von anatomischen Präparaten hält in der Veterinärmedizin immer mehr Einzug. Dies gilt auch für die anatomische Lehre. Im Rahmen dieser Dissertation wurde eine Methode entwickelt, um aus CT-Datensätzen von Hundeoberschädeln und Unterkiefern anatomisch korrekte, druckbare digitale Dateien zu erarbeiten. Als Vorlagen dienten der Schädel eines mesocephalen Deutschen Schäferhundes (DSH), eines dolichocephalen Afghanischen Windhundes, eines brachycephalen Boxers und eines ramsköpfigen Bull Terriers, wobei bei der Auswahl auf typische Vertreter der jeweiligen Gruppe geachtet wurde. Aus den CT-Datensätzen wurden mittels eines mehrstufigen Bearbeitungsprozesses anatomisch korrekte, kolorierte, 3D-Dateien von ganzen Hundeoberschädeln, Unterkiefern sowie verschiedenen und teils neuartigen Schnitten (des DSH) erstellt. Diese wurden anschließend mit einem Pulverdrucker (3DP) ausgedruckt und durchliefen das Post-Processing. Es umfasste das Säubern, Härten und Infiltrieren der Drucke. Danach wiesen die 3D-gedruckten Präparate eine natürliche Farbgebung, eine ausreichende Stabilität sowie ein lebensechtes, detailgetreues Erscheinungsbild im Vergleich zu nativen Schädeln auf. Die Eignung der 3D-Präparate als didaktisches Anschauungsmaterial in der anatomischen Lehre wurde sowohl in einer objektiven als auch in einer subjektiven Evaluation untersucht. Die Auswertung der objektiven Evaluation zeigte, dass die erstellten 3D-Modelle der Schädel zu sehr guten Lernfortschritten führten. Im Hinblick auf Fragen mit Abbildungen von Schnitten erzielte die Gruppe mit den 3D-Modellen bei 90% der Fragen nach der Lernzeit die besten Ergebnisse. Solche Schnittpräparate stehen den Studierenden für gewöhnlich sehr selten zur Verfügung. Zusätzlich finden sich nur in wenigen Anatomiebüchern entsprechende Abbildungen. Mit Hilfe des 3D-Drucks können die Modelle schnell in ausreichender Anzahl zur Verfügung gestellt werden. In der subjektiven Evaluation bewerteten bis zu 93% der Studierenden die Möglichkeit mit 3D-Modellen zu lernen als sehr gut oder gut. Aufgrund dieser Ergebnisse konnte

## Zusammenfassung

---

die Schlussfolgerung gezogen werden, dass die erstellten, physiologisch korrekten 3D-Modelle sehr hilfreich für die anatomische Grundausbildung von Veterinärmedizinstudierenden sind und die vorhandenen nativen Präparate sehr sinnvoll ergänzen können.

## 7 Summary

### **The Production of Three-Dimensional Prints of Anatomically-Correct Skulls and Lower Jaws of *Canis Familiaris* for Use in Teaching Anatomy**

3D-printing of anatomical specimens is increasingly used in veterinary medicine. This is also true for the teaching of anatomy. In this dissertation, a method was developed to create anatomically-correct, printable, digital files from CT datasets of the skulls and lower jaws of dogs. The skulls of a mesocephalic German Shephard, a dolichocephalic Afghan Windhound, a brachycephalic Boxer and a downfaced Bull Terrier were used as typical examples of these groups. Using a multi-step process, anatomically-correct, colored, 3D files of whole skulls and jaws as well as different and to some extent new cross-sections (of the German Shephard) were created from the CT data sets. These were then printed with a powder bed 3D printer (3DP) and post-processed. This included the cleaning, hardening, and infiltration of the prints. This resulted in a natural coloring, a sufficient stability, as well as a realistic, detailed appearance of the 3D-printed specimens in comparison with real skulls. The use of the 3D-specimens as didactic visual material for teaching anatomy was examined in both objective and subjective evaluations. The results of the objective evaluation showed that the 3D-models of the skulls supported very well the progress of learning. With regard to questions with images of cross-sections, the group with the 3D models achieved the best results in 90 percent of the questions. Such cross-section specimens are rarely available for students and only very few anatomy books have such figures. With the help of 3D-printing, models can be quickly prepared and made available in the required number. In the subjective evaluation, 93 percent of the students evaluated the opportunity of learning with 3D-models as very good or good. On the basis of these results, it can be concluded that physiologically-correct 3D-models are very helpful for the training of veterinary-medicine students in basic anatomy, and can be useful additions to the real specimens that are available.

## 8 Anhang

### 8.1 Evaluationsbogen

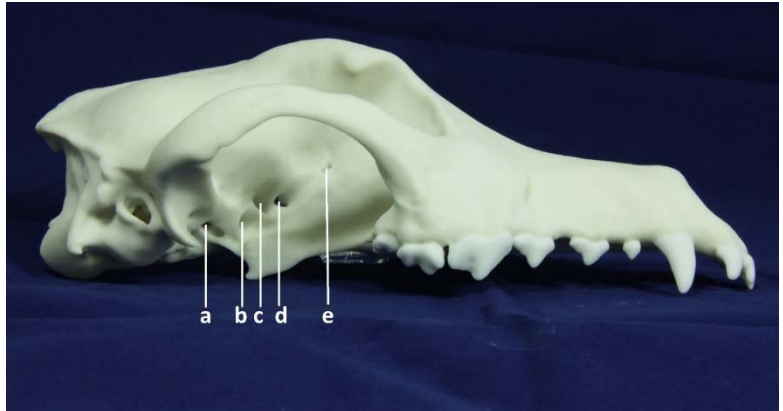
Hinweis: es können eine oder mehrere Antwortmöglichkeiten richtig sein, sofern es nicht anders vermerkt ist.

1. Welche dieser Knochen sind an der Bildung des Gesichtsschädels beteiligt?

- Os frontale
- Os temporale
- Os occipitale
- Os zygomaticum
- Os palatinum

2. Welcher Buchstabe in der Abbildung markiert die Fissura orbitalis?  
Bitte kreuzen Sie nur eine Antwortmöglichkeit an.

- a       b       c
- d       e

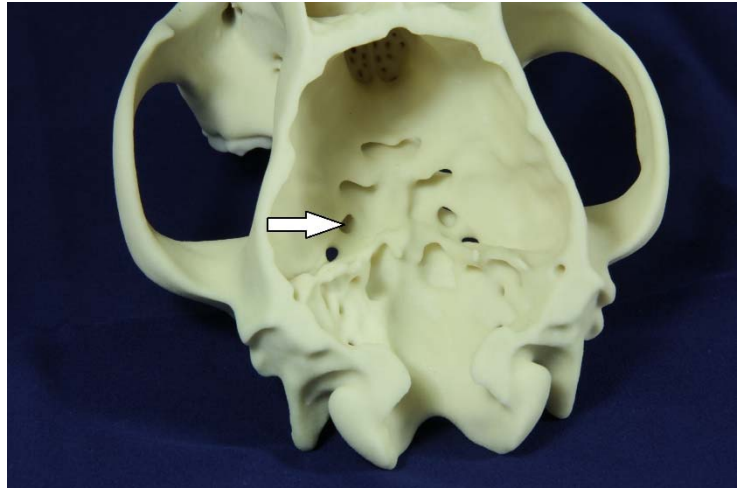


3. Welche Foramina sind die Eingangs- und Ausgangsöffnung des Canalis alaris?

- Foramen ovale
- Foramen alare caudale
- Foramen palatinum caudale
- Foramen rotundum
- Foramen alare rostrale

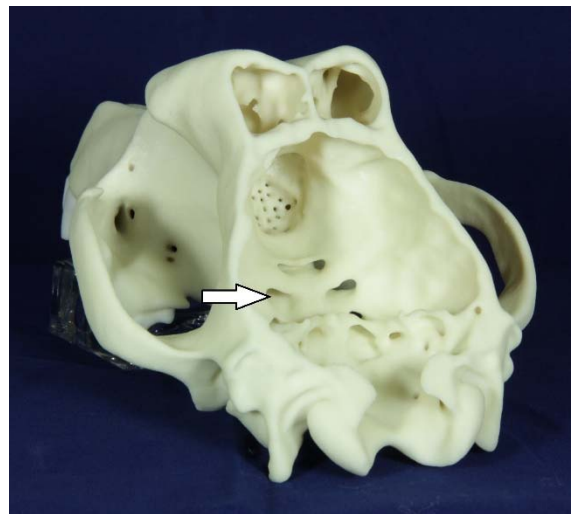
4. Worauf zeigt der Pfeil in der unten stehenden Abbildung?  
Bitte kreuzen Sie nur eine Antwortmöglichkeit an.

- Foramen ovale
- Meatus acusticus internus
- Foramen rotundum
- Foramen mastoideum
- Canalis opticus



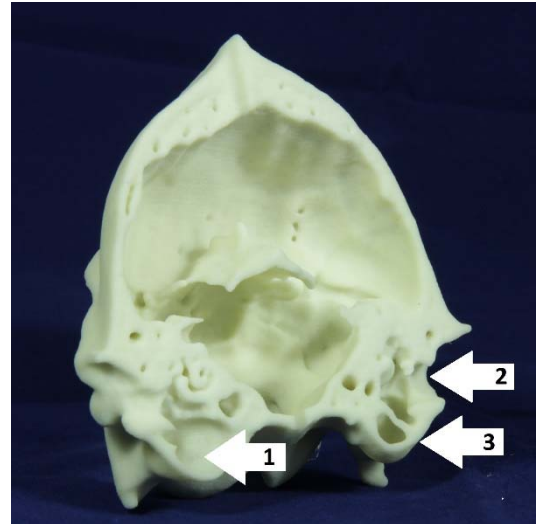
5. Worauf zeigt der Pfeil in der unten stehenden Abbildung?  
Bitte kreuzen Sie nur eine Antwortmöglichkeit an.

- Foramen rotundum
- Fossa hypophysialis
- Fissura orbitalis
- Sulcus chiasmatis
- Fossa cranii caudalis



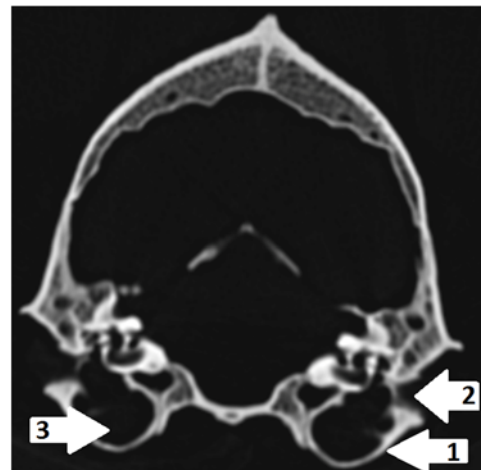
6. Ordnen Sie die Zahlen der Pfeile auf der Abbildung den korrekten anatomischen Bezeichnungen zu.

- Bulla tympanica
- Meatus acusticus externus
- Cavum tympani



7. Ordnen Sie die Zahlen der Pfeile auf der Abbildung den korrekten anatomischen Bezeichnungen zu.

- Bulla tympanica
- Meatus acusticus externus
- Cavum tympani



8. Welche der genannten Strukturen sind Anteile des Os ethmoidale?

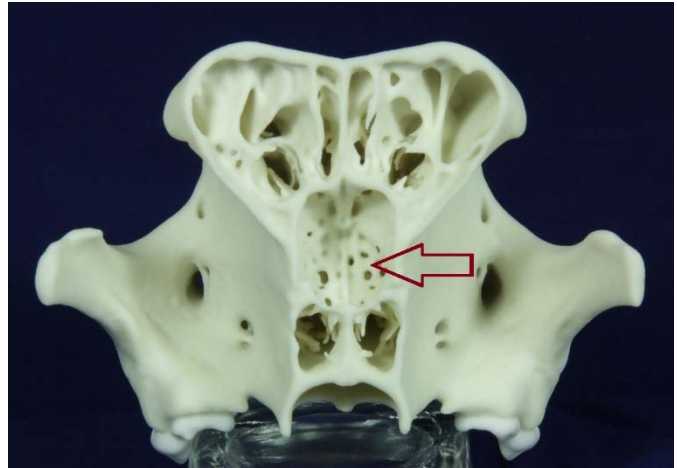
- Lamina tectoria
- Sinus frontalis
- Lamina cribrosa
- Ethmoturbinalia
- Processus rostralis



9. Worauf zeigt der Pfeil in der unten stehenden Abbildung?

Bitte kreuzen Sie nur eine Antwortmöglichkeit an.

- Sinus frontalis
- Foramina sphenopalatinum
- Foramen maxillare
- Fossa lacrimalis
- Lamina cribrosa



10. In welchem Knochen liegt der Canalis alaris?

- Os temporale
- Os frontale
- Os palatinum
- Os basisphenoidale
- Os occipitale

11. Wie bewerten Sie die Möglichkeit mit 3D-gedruckten ganzen Schädeln zu lernen?

- sehr gut
- gut
- mittelmäßig
- weniger gut
- nicht gut

12. Wie bewerten Sie die Möglichkeit mit 3D-gedruckten Schnitten der Schädel zu lernen?

- sehr vorteilhaft
- vorteilhaft
- mittelmäßig
- weniger vorteilhaft
- nicht vorteilhaft

13. Wie gut haben Sie sich in den Schnitten zu Recht gefunden und orientieren können?

- sehr gut
- gut
- mittelmäßig
- weniger gut
- nicht gut

## 8.2 Skript mit Abbildungen

Liebe Studentinnen und Studenten,

in diesem Skript sind für Sie nur die knöchernen Strukturen wichtig. Es ist nur die Anatomie des Hundes berücksichtigt, auf tierartige Unterschiede wird nicht eingegangen.

Dieses Skript enthält lediglich ausgewählte Inhalte und hat keinen Anspruch auf Vollständigkeit.

### Siebbein – Os ethmoidale

Das Siebbein, Os ethmoidale, hat die Form eines von der Außenwand, Lamina externa, gebildeten liegenden Rohres. Sie besteht aus der stirnwärts gelegenen Dachplatte, Lamina tectoria, der beiderseitigen papierdünnen und porösen Seitenplatte, Lamina orbitalis, und der Bodenplatte, Lamina basalis. Schädelhöhlenwärts ist das Rohr durch die quergestellte Siebbeinplatte, Lamina cribrosa, abgegrenzt. Die mediane Scheidewand, Lamina perpendicularis, halbiert den Hohlraum, wodurch der äußerlich einheitliche Zylinder zu einem Doppelrohr wird. Von der Dach- und Seitenplatte ragt jederseits das Siebbeinlabyrinth, Labyrinthus ethmoidalis, in sein Inneres vor.

Die quergestellte Siebbeinplatte, Lamina cribrosa, trennt die Nasehöhle von der Schädelhöhle und lässt durch ihre zahlreichen Löcher Riechfäden zum Riechkolben des Gehirns durchtreten.

Das Siebbeinlabyrinth, Labyrinthus ethmoidalis, umfasst die aufgerollten Siebbeinmuscheln, Ethmoturbinalia. Sie ragen von der Dach- sowie der Seitenplatte in das Innere des Siebbeins vor und lassen zwischen sich die Siebbeingänge, Meatus ethmoidales, frei. Jede Siebbeinmuschel ist mit ihrer Basallamelle an den

Außenwänden und kaudal auch an der Siebplatte befestigt. Die Ethmoturbinalia sind in zwei Reihen angeordnet. Die größeren von ihnen reichen weit nach innen und werden deshalb Endoturbinalia genannt; die kleineren verbleiben weiter außen und werden daher als Ektoturbinalia bezeichnet.

### Schläfenbein – Os temporale

Das Schläfenbein bildet den unteren Abschnitt der Seitenwand des Schädels und greift auch auf dessen Basalfläche über. Es entsteht aus der Verschmelzung folgender Teile: aus der Schläfenbeinschuppe, Pars squamosa, dem Felsenteil Pars petrosa und dem Paukenteil, Pars tympanica. Pars petrosa und Pars tympanica beherbergen das Innen- und das Mittelohr.

Der Paukenteil, Pars tympanica ist der rostroventrale, an der Basis des Schläfenbeins gelegene Anteil. Seine, bei Haussäugetieren mächtige Paukenblase, Bulla tympanica, ist besonders augenfällig. Sie enthält die Paukenhöhle, Cavum tympani. Ihre mediale Wand wird von der Lateralfäche des Petrosums gebildet. Aus dem oberen Abschnitt der Paukenblase, Bulla tympanica, erhebt sich nach lateral gerichtet der knöcherne äußere Gehörgang, Meatus acusticus externus. Dieser endet mit dem Porus acusticus externus. Dem Meatus acusticus externus schließt sich der knorpelige Gehörgang und die Ohrmuschel an.

### Orbita

Die knöcherne Augenhöhle, Orbita, befindet sich an der Grenze von Hirn- und Gesichtsschädel und wird von den Knochen beider Schädelabschnitte gebildet. Sie dient der Aufnahme des Augapfels und seiner Nebenorgane.

Die mediale Wand der Orbita wird vom Stirnbein, Tränenbein, den Flügeln des Praesphenoids und der Perpendikularplatte des Gaumenbeins gebildet. Die Orbita steht mit der Schädelhöhle durch mehrere als Durchtrittsstellen für Nerven und Blutgefäße in Verbindung. Es sind dies von oben nach unten folgend: das meist doppelte Foramen ethmoidale für den Durchtritt der A. und V. ethmoidalis externa, der Canalis opticus, durch den der Sehnerv in die Orbita gelangt, die Fissura orbitalis, die der Nervus ophthalmicus und die Augenmuskelnerven passieren, und schließlich das Foramen rotundum als Austrittsöffnung für den Nervus maxillaris. Das Foramen rotundum mündet rostral, aus dem Schädelinneren kommend in den Flügelkanal,

Canalis alaris, welcher im Os basisphenoidale liegt. Er beginnt mit dem Foramen alare caudale und endet im Foramen alare rostrale.

In der Fossa pterygopalatina befindet sich rostral das verhältnismäßig weitlumige, hochovale Foramen maxillare und etwas tiefer von ihm, weiter kaudomedial das deutlich kleinere, rundliche Foramen sphenopalatinum. Unmittelbar unterhalb dieses Loches liegt das ebenfalls enge, querovale Foramen palatinum caudale.

#### Gesichtsschädel, Facies (Viscerocranium)

Die Knochen des Gesichtsschädels, Ossa faciei, fügen sich zu einer Kapsel zusammen, die die Nasenhöhle umschließt. Gleichzeitig stellt die untere Fläche der Nasenkapsel das Dach der Mundhöhle dar. Die Mundhöhle wird seitlich und ventral vom beweglichen Unterkiefer, Mandibula, begrenzt. Die Knochen des Hirnschädels und die des Gesichtsschädels bilden gemeinsam die knöcherne Augenhöhle, Orbita. Die drei rostral gelegenen Hirnschädelknochen Stirnbein (Os frontale), Siebbein (Os ethmoidale) und Keilbein (Os sphenoidale), greifen auf den Gesichtsschädel über. So wird das Nasendach, Dorsum nasi, jederseits gemeinsam vom Stirnbein, Os frontale, und vom Nasenbein, Os nasale, gebildet. Jede Seitenwand wird geformt vom: Tränenbein, Os lacrimale, Jochbein, Os zygomaticum, Oberkieferbein, Maxilla und dem zugleich die Gesichtsspitze bildenden Zwischenkieferbein, Os incisivum. An der Entstehung der Bodenwand der Nasenhöhle, die die Dachwand der Mundhöhle darstellt, beteiligen sich paarig das Gaumenbein, Os palatinum, das Oberkieferbein sowie das Zwischenkieferbein; nasenhöhlenwärts ist ihnen das unpaare Pflugscharbein, Vomer, aufgelagert.

#### Schädelhöhle, Cavum cranii

In der Schädelhöhle sind die große und die kleine Abteilung durch das von dorsal einragende, gut ausgeprägte Tentorium cerebelli osseum, seitlich durch die markante Crista partis petrosae und basal durch das hohe Dorsum sellae turcicae deutlich voneinander abgegrenzt.

Die nackenseitige Wand enthält dorsal den Meatus temporalis. Dorsal beiderseits des Foramen magnum liegt das Foramen mastoideum, durch das Blutgefäße ihren Weg nehmen. In den beiden Condyli occipitales verläuft jeweils der Canalis condylaris, der kaudal mit einer Öffnung kaudodorsal vom Canalis nervi hypoglossi beginnt und rostral hinter dem Foramen jugulare mündet.

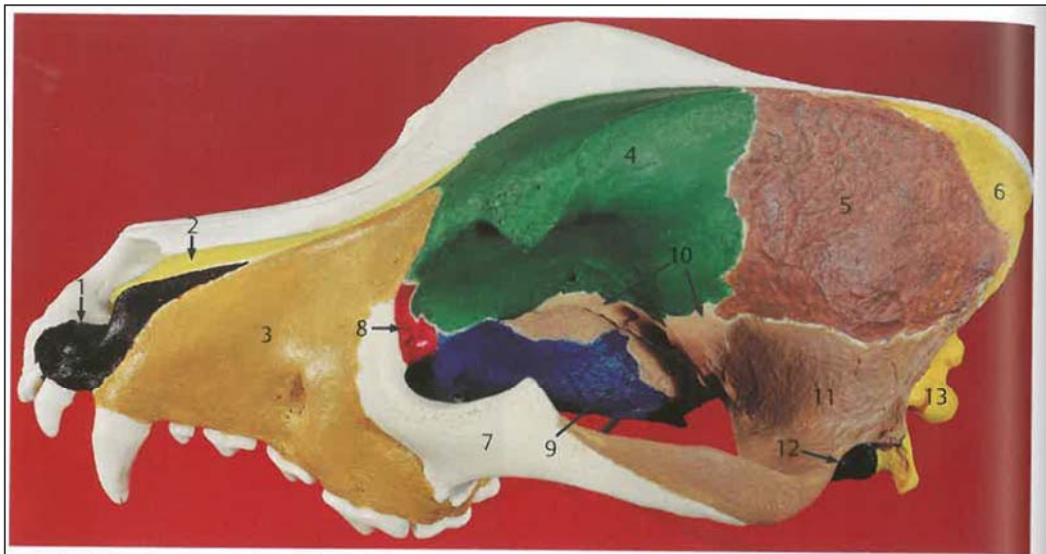
Die basale Wand ist durch geringe Höhenunterschiede ihrer drei Schädelgruben gekennzeichnet. Die Fossa cranii rostralis ist, ebenso wie die Riechkolben des Gehirns, sehr lang. Die scharf berandete Crista orbitosphenoidalis ragt geringgradig nach kaudal vor, so dass der Sulcus chiasmatis lediglich als flache Grube ausgebildet ist.

Im Bereich der mittleren Schädelgrube finden sich in ihrer basalen Wand folgende Löcher: rostral die Fissura orbitalis, in der Mitte das Foramen rotundum, in dem der laterale Sulcus nervi maxillaris endet, und kaudal das Foramen ovale. Lateral vom Foramen ovale findet sich das enge Foramen spinosum, welches häufig nur eine laterale Einkerbung des Foramen ovale ist.

Zusammenfassend lassen sich in der rostralen und mittleren Schädelgrube bei kaudodorsaler Einsicht in die Schädelhöhle folgende große Strukturen beidseits von kranial nach kaudal erkennen: Sulcus chiasmatis, lateral davon Canalis opticus, gefolgt von Fissura orbitalis und dann Foramen rotundum. Kaudal und leicht lateral des Foramen rotundum schließlich das Foramen ovale.

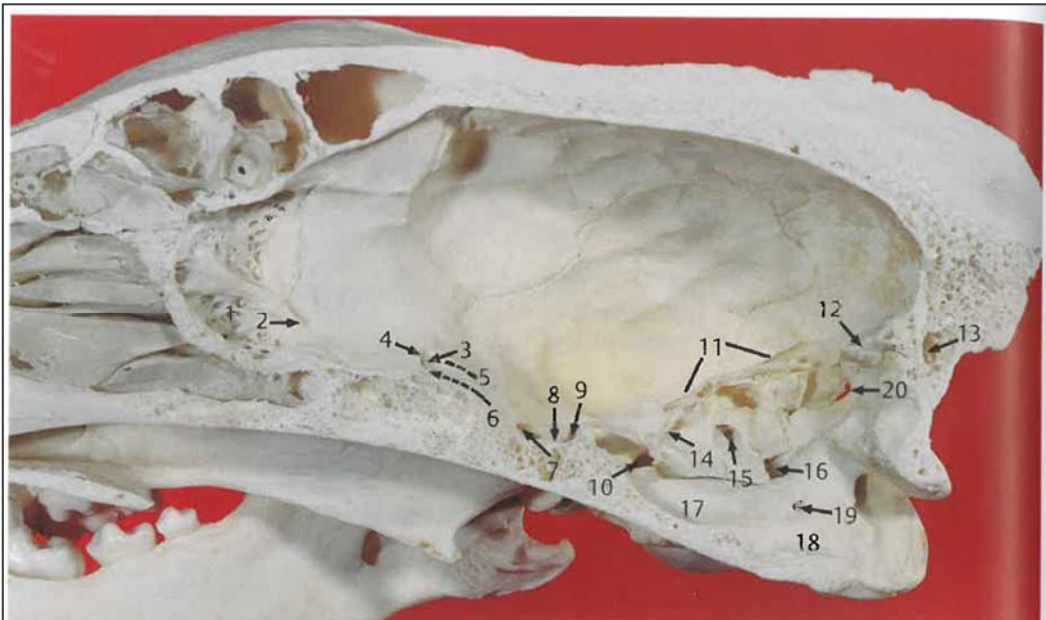
Das Temporale und die Pars basilaris des Okzipitale sind in der Sutura occipitotympánica miteinander verbunden. Kaudal von der Naht findet sich das Foramen jugulare.

An den Seitenflächen bildet die Öffnung des Meatus acusticus internus einen horizontal abgeplatteten Spalt. Dorsal von ihm öffnet sich der Verbindungsgang zum Meatus temporalis, und kaudal liegen das Foramen jugulare sowie die rostrale Öffnung des Canalis condylaris. Rostral vom inneren Gehörgang endlich mündet der Canalis caroticus.

Abbildungen:

**2.66** Schädelknochen eines Hundes, farbig markiert, Seitenansicht

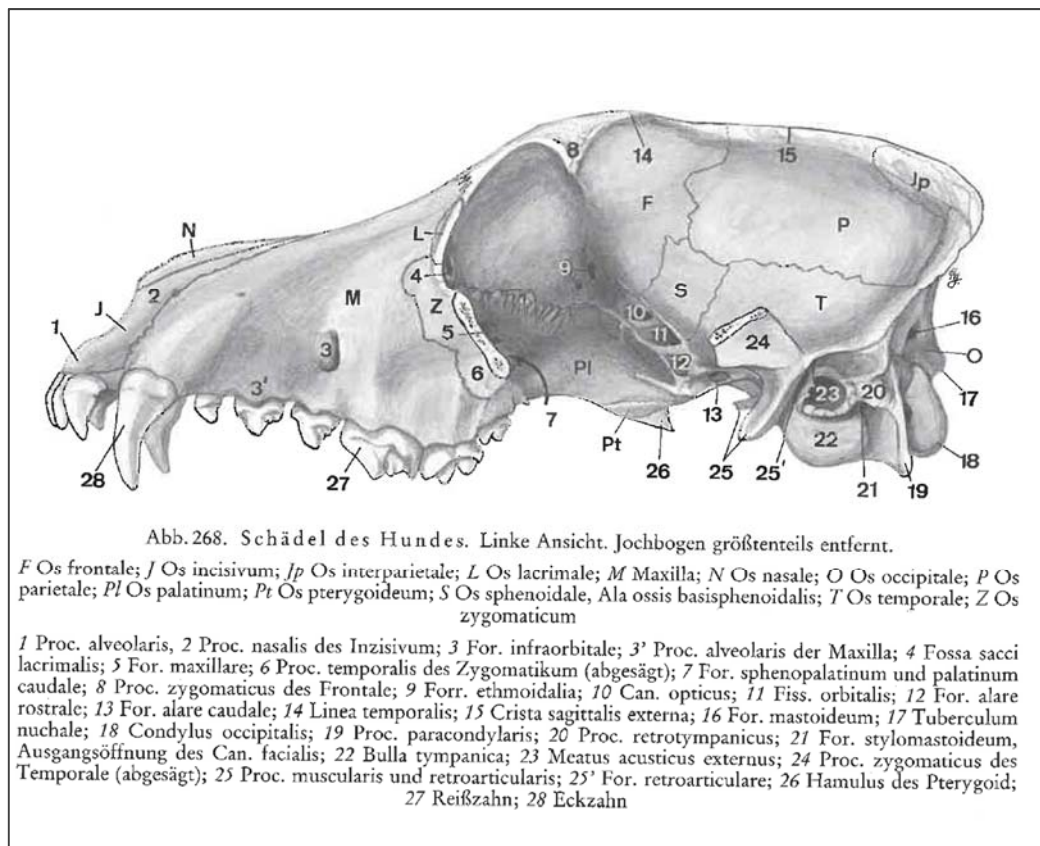
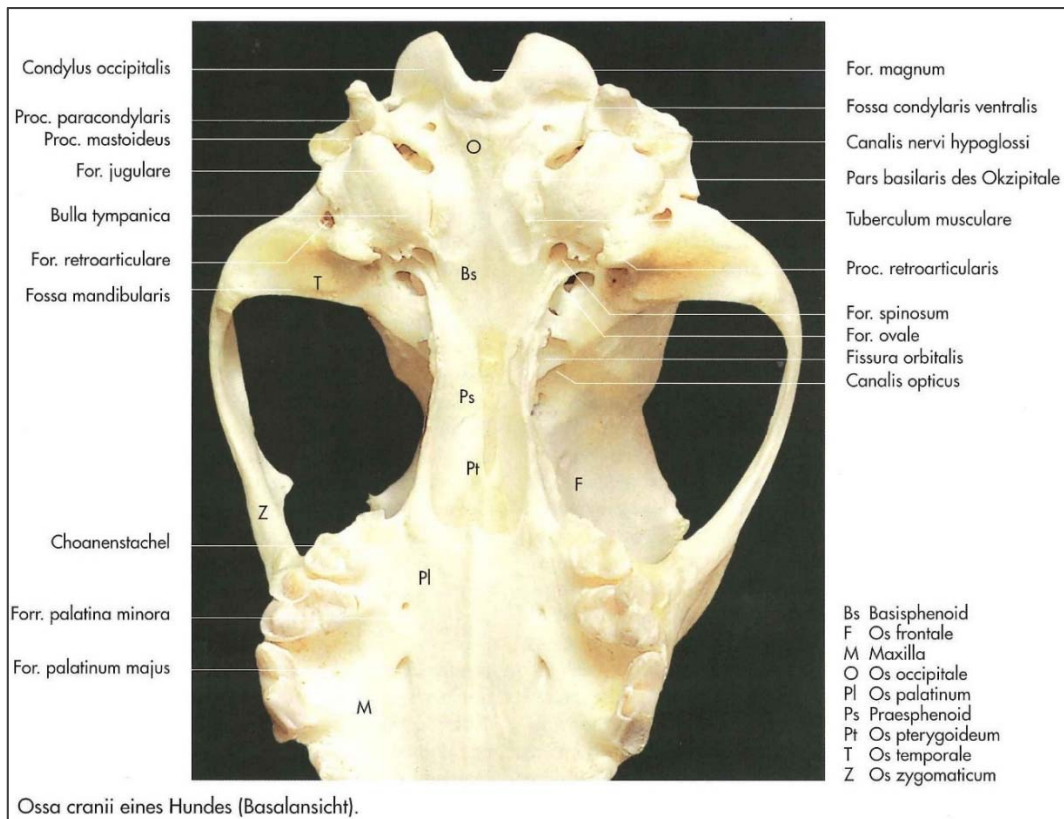
- |                     |  |
|---------------------|--|
| 1 Os incisivum      | 8 Os lacrimale                         |
| 2 Os nasale         | 9 Os palatinum                         |
| 3 Maxilla           | 10 Os basisphenoidale                  |
| 4 Os frontale       | 11 Os temporale                        |
| 5 Os parietale      | 12 Felsenbeinpyramide des Os temporale |
| 6 Os interparietale | 13 Os occipitale                       |
| 7 Os zygomaticum    |  |



**2.87** Schädelhöhle eines Hundes, Sagittalschnitt

- |   |   |   |
|---|---|---|
| 1 Lamina cribrosa des Os ethmoidale   | 8 Fossa hypophysealis                                     | 16 For. jugulare (Austritt Nn. glossopharyngeus, IX; vagus, X; accessorius, XI) |
| 2 For. ethmoidale (Eintritt N. ethmoidalis)   | 9 For. ovale (Austritt N. mandibularis von V)             | 17 Impressio pontica  |
| 3 Canalis opticus (Eintritt N. opticus, II)   | 10 Canalis caroticus (Eintritt A. carotis interna)        | 18 Impressio medullaris   |
| 4 Crista orbitosphenoidalis   | 11 Crista partis petrosae                                 | 19 Canalis nervi hypoglossi (Austritt N. hypoglossus, XII)                      |
| 5 Sulcus chiasmaticus   | 12 Tentorium cerebelli osseum                             | 20 For. mastoideum  |
| 6 Fissura orbitalis (Austritt N. ophthalmicus von V; Nn. oculomotorius, III; trochlearis IV; abducens VI) | 13 Canalis sinus transversi                               |   |
| 7 For. rotundum (Austritt N. maxillaris von V)  | 14 Canalis nervi trigemini (enthält Ganglion trigeminale) |   |
|   | 15 Porus acusticus internus                               |   |

## Anhang



Quellen: in gekürzter und leicht abgeänderter Form; Lehrbuch der Anatomie der Haustiere, 8. Auflage, Nickel/Schummer/Seiferle; Anatomie der Haussäugetiere, 4. Auflage, König/Liebich; Anatomie für die Tiermedizin, 2. Auflage, Salomon/Geyer



## 9 Abbildungsverzeichnis

Abbildung 1: Schema der Generativen Fertigungsverfahren.....	12
Abbildung 2: CT-Scan des DSH Oberschädels .....	39
Abbildung 3: CT-Scan des DSH Unterkiefers.....	39
Abbildung 4: Oberschädel und Unterkiefer des Afghanischen Windhundes .....	40
Abbildung 5: Oberschädel und Unterkiefer des Boxers.....	41
Abbildung 6: Oberschädel und Unterkiefer des Bull Terriers.....	42
Abbildung 7: links: CT-Scan von Boxer- und Pferdeschädeln; rechts: Querschnitt vom Boxeroberschädel und paramedianen Schnitt eines Pferdeschädels.....	46
Abbildung 8: OK eines Afghanischen Windhundes - mit Artefakten.....	51
Abbildung 9: OK eines Afghanischen Windhundes - ohne Artefakte.....	51
Abbildung 10: UK eines Afghanischen Windhundes - mit Artefakten .....	52
Abbildung 11: UK eines Afghanischen Windhundes - ohne Artefakte.....	52
Abbildung 12: OK eines Afghanischen Windhundes - Anteil Schädelknochen .....	53
Abbildung 13: OK eines Afghanischen Windhundes - Anteil Zähne.....	53
Abbildung 14: OK eines Afghanischen Windhundes - Anteil Orbita .....	53
Abbildung 15: OK eines Afghanischen Windhundes - Anteil rostrales Ende.....	53
Abbildung 16: OK eines Afghanischen Windhundes - Anteil Nasenmuscheln .....	54
Abbildung 17: Zusammenfügen der Anteile des Oberschädels des Bull Terriers; die farbigen Linien grenzen die Anteile ab.....	56
Abbildung 18: Bauraum in 3D Print – Anordnung der Objekte zum Druck, Ansicht aus verschiedenen Blickrichtungen .....	59
Abbildung 19: Entnahme der Objekte aus dem Druckbett nach grober Entfernung des Pulvers .....	60
Abbildung 20: Foramen palatinum majus (grüner Pfeil) und minus (roter Pfeil) des DSH; auf dem linken Bild vor und auf dem rechten nach der Bearbeitung .....	70

---

Abbildung 21: DSH Unterkiefer: links vor Bearbeitung und Korrektur der Symphyse – rechts nach Bearbeitung und Korrektur der Symphyse .....	71
Abbildung 22: Detailansicht DSH Unterkiefer: links vor Bearbeitung und Korrektur der Symphyse – rechts nach Bearbeitung und Korrektur der Symphyse.....	71
Abbildung 23: DSH kaudodorsaler Schnitt nach Bearbeitung und Kolorierung: Darstellung der Schnittführung in frontaler Ansicht .....	72
Abbildung 24: DSH kaudodorsaler Schnitt nach Bearbeitung und Kolorierung: Darstellung der Schnittführung in kaudaler Ansicht.....	73
Abbildung 25: DSH breiter Transversalschnitt vor der Bearbeitung; Beispiele der Nachbearbeitung.....	74
Abbildung 26: DSH breiter Transversalschnitt nach der Bearbeitung; Beispiele der Nachbearbeitung.....	74
Abbildung 27: schmaler Transversalschnitt vor Bearbeitung: Darstellung der Schnittkanten mit Stufenbildung und der Artefakte.....	75
Abbildung 28: schmaler Transversalschnitt nach Bearbeitung: Bereinigung der Stufenbildung und der Artefakte.....	75
Abbildung 29: DSH zweistufiger Schnitt der Bulla tympanica nach Bearbeitung; rostralaterale Ansicht .....	76
Abbildung 30: DSH zweistufiger Schnitt der Bulla tympanica nach Bearbeitung; dorsale Ansicht .....	76
Abbildung 31: Afghanischer Windhund Unterkiefer vor und nach Bearbeitung und Korrektur des Winkels; die roten Pfeile illustrieren die Unterschiede .....	77
Abbildung 32: Afghanischer Windhund Unterkiefer vor und nach Bearbeitung und Korrektur des Winkels der Unterkieferäste; die roten Pfeile illustrieren die Unterschiede.....	78
Abbildung 33: Boxer Oberschädel nach Zusammenfügen der Anteile; Beispiele für Bearbeitungsbereiche .....	79
Abbildung 34: CT-Dateien des DSH (Oberschädel und Unterkiefer).....	84
Abbildung 35: 3D-Ausdruck des DSH.....	84
Abbildung 36: nativer Schädel des Afghanischen Windhundes .....	85

## Abbildungsverzeichnis

---

Abbildung 37: 3D-Ausdruck des nativen Schädels des Afghanischen Windhundes aus Abbildung 36 .....	85
Abbildung 38: nativer Oberschädel des Boxers.....	85
Abbildung 39: 3D-Modell des Oberschädels des Boxers .....	86
Abbildung 40: nativer Oberschädel des Bull Terriers .....	86
Abbildung 41: 3D-Modell des Oberschädels des Bull Terriers .....	86
Abbildung 42: 3D-Ausdruck des kaudodorsalen Schnittes (DSH).....	87
Abbildung 43: 3D-Ausdruck des paramedianen Schnittes (DSH) .....	88
Abbildung 44: Transversalschnitt 1 (DSH); rostrale und kaudale Ansicht .....	89
Abbildung 45: Transversalschnitt 2 (DSH); rostrale und kaudale Ansicht .....	89
Abbildung 46: Schnitt in Höhe der Bulla tympanica (DSH); rostrale Ansicht.....	90
Abbildung 47: Schnitt in Höhe der Bulla tympanica (DSH); rostrale Ansicht; Vergrößerung Bereichs des Mittel- und Innenohrs aus Abbildung 46.....	90
Abbildung 48: Der Lernerfolg in Relation zum Ausgangsniveau .....	92
Abbildung 49: nicht beantwortete Fragen vor und nach der Lernphase der Gruppe 1 .....	93
Abbildung 50: nicht beantwortete Fragen vor und nach der Lernphase der Gruppe 2.....	94
Abbildung 51: nicht beantwortete Fragen vor und nach der Lernphase der Gruppe 3.....	94
Abbildung 52: Lernfortschritt der Gruppe 1 je Einzelfrage.....	95
Abbildung 53: Lernfortschritt der Gruppe 2 je Einzelfrage.....	96
Abbildung 54: Lernfortschritt der Gruppe 3 je Einzelfrage.....	97
Abbildung 55: Mittelwert der Punktzahl aller Fragen je Gruppe .....	98
Abbildung 56: Vergleich der Gruppen prä und post für alle Fragen .....	99
Abbildung 57: Ergebnisse der Fragen mit Abbildungen vor der Lernphase .....	100
Abbildung 58: Ergebnisse der Fragen mit Abbildungen nach der Lernphase .....	100
Abbildung 59: subjektive Bewertung der 3D-Präparate.....	101

**10 Tabellenverzeichnis**

Tabelle 1: Übersicht der Knochen des Hirnschädels.....	5
Tabelle 2: Übersicht der Knochen des Gesichtsschädels .....	6
Tabelle 3: Öffnungen des Oberschädels und des Unterkiefers .....	8
Tabelle 4: wichtige anatomische Strukturen .....	9
Tabelle 5: Übersicht über gängige AM-Prozesse .....	14
Tabelle 6: Übersicht über die angewendeten Softwareprogramme.....	44
Tabelle 7: Daten der verwendeten DICOM-Datensätze .....	50
Tabelle 8: Übersicht über die Anteile der Objekte .....	55
Tabelle 9: Einteilung der Gruppen und der Lehrmaterialien .....	64
Tabelle 10: Lehrmaterialien, die die Gruppen in der Lernzeit nutzen konnten .....	66
Tabelle 11: Übersicht der entstandenen virtuellen und 3D-gedruckten Modelle .....	83
Tabelle 12: Übersicht der Gruppen und Lehrmaterialien.....	91

## 11 Literaturverzeichnis

- 3D Systems Europe (2009): ZPrinter Hardware Manual. Hemel Hempsted, 3D-Systems Europe Ltd.
- 3D Systems Europe (2013a): Sicherheitsdatenblatt VisiJet® PXL Core. Hemel Hempsted, 3D-Systems Europe Ltd.
- 3D Systems Europe (2013b): Sicherheitsdatenblatt Colorbond/zbond® 90. Hemel Hempstead, 3D-Systems Europe Ltd.
- 3D Systems Europe (2013c): Sicherheitsdatenblatt VisiJet® PXL Colors. Hemel Hempsted, 3D-Systems Europe Ltd.
- 3D Systems Europe (2013d): Sicherheitsdatenblatt Cleaning SolutionPro. Hemel Hempsted, 3D-Systems Europe Ltd.
- 3D Systems Europe (2018): ProJet 660Pro, 3D-Systems Europe Ltd.
- AbouHashem, Y., Dayal, M., Savanah, S. und Strkalj, G. (2015): The application of 3D printing in anatomy education. *Med Educ Online* 20, 29847.
- AIR LIQUIDE Deutschland GmbH (2016): Sicherheitsdatenblatt Ammoniak. Düsseldorf, AIR LIQUIDE Deutschland GmbH.
- Al-Nawas, B. und Goetze, E. (2017): 3-D-Druck in der MKG-Chirurgie. *MKG-Chirurg* 10, 234-243.
- Alali, A., Griffin, M., Calonge, W. und Butler, P. (2017): 3D Printed Models As Teaching Models And Surgical Planning Tool. *Plast Reconstr Surg Glob Open* 5, 14-15.
- Anonymous (2018): Dog Skull 3d model, free3d.com.
- Anonymous (n.n.): Skull mass. Washington DC, U.S. Department of Health and Human Services.
- AppliChem GmbH (2015): Sicherheitsdatenblatt Petroleumbenzin. Darmstadt, AppliChem GmbH.
- AppliChem GmbH (2016): Sicherheitsdatenblatt deconex® 22 LIQ - Kaliumhydroxid. Darmstadt, AppliChem GmbH.
- AUG. HEDINGER GmbH & Co. KG (2018): Sicherheitsdatenblatt Ether (Diethylether). Stuttgart, AUG. HEDINGER GmbH & Co. KG.
- Bernd Kraft GmbH (2011): Sicherheitsdatenblatt Tetrachlormethan. Duisburg, Bernd Kraft GmbH.
- Berney, S., Betrancourt, M., Molinari, G. und Hoyek, N. (2015): How spatial abilities and dynamic visualizations interplay when learning functional anatomy with 3D anatomical models. *Anat Sci Educ* 8, 452-62.
- Bloom, B. S., Engelhart, M. D. und Fünher, E. (1973): *Taxonomie von Lernzielen im kognitiven Bereich*. Beltz Weinheim, Germany.
- Bluebie (2014): Bitey the Dog Skull, Thingiverse.
- BMJV (1996): Arbeitsschutzgesetz - ArbSchG, Bundesministeriums der Justiz und für Verbraucherschutz.
- BMJV (2010): Verordnung zum Schutz vor Gefahrenstoffen, Bundesministerium der Justiz und für Verbraucherschutz.
- Boyd, S., Clarkson, E. und Mather, B. (2015): Learning in the third dimension. *Vet Rec* 176, i-ii.
- Breuninger, J., Becker, R., Wolf, A., Rommel, S. und Verl, A. (2013a): Einleitung. In: *Generative Fertigung mit Kunststoffen: Konzeption und Konstruktion für Selektives Lasersintern*, pp. 1-22. Springer-Verlag.

- 
- Breuninger, J., Becker, R., Wolf, A., Rommel, S. und Verl, A. (2013b): Technologie. In: Generative Fertigung mit Kunststoffen: Konzeption und Konstruktion für Selektives Lasersintern, pp. 23-112. Springer-Verlag.
- Budras, K.-D. (2012): Kopf. In: K.-D. Budras, Ed. Atlas der Anatomie des Hundes, 9. Auflage pp. 88-107. Schlütersche, Hannover.
- Carl Roth GmbH + Co. KG (2015): Sicherheitsdatenblatt Trichlorethylen  $\geq 98$  %. Karlsruhe, Carl Roth GmbH + Co KG.
- Carl Roth GmbH + Co. KG (2016): Sicherheitsdatenblatt Formaldehydlösung ROTIPURAN® 37%. Karlsruhe, Carl Roth GmbH + Co KG.
- Carl Roth GmbH + Co. KG (2017): Sicherheitsdatenblatt Natriumperoxid  $\geq 95$  %. Karlsruhe, Carl Roth GmbH + Co. KG.
- Costello, J. P., Olivieri, L. J., Su, L., Krieger, A., Alfares, F., Thabit, O., Marshall, M. B., Yoo, S. J., Kim, P. C., Jonas, R. A. und Nath, D. S. (2015): Incorporating three-dimensional printing into a simulation-based congenital heart disease and critical care training curriculum for resident physicians. *Congenit Heart Dis* 10, 185-90.
- Creß, U. (2006): Lernorientierungen, Lernstile, Lerntypen und kognitive Stile, pp. 365-377.
- d'Anjou, M.-A. (2013): Principles of Computed Tomography and Magnetic Resonance Imaging. In: D. E. Thrall, Ed. Textbook of Veterinary Diagnostic Radiology, pp. 50-73. Elsevier Health Sciences, St. Louis.
- Doney, E., Krumdick, L. A., Diener, J. M., Wathen, C. A., Chapman, S. E., Stamile, B., Scott, J. E., Ravosa, M. J., Van Avermaete, T. und Leevy, W. M. (2013): 3D printing of preclinical X-ray computed tomographic data sets. *J Vis Exp*, e50250.
- Dorbandt, D. M., Joslyn, S. K. und Hamor, R. E. (2016): Three-dimensional printing of orbital and peri-orbital masses in three dogs and its potential applications in veterinary ophthalmology. *Vet Ophthalmol*.
- Drake, A. G. und Klingenberg, C. P. (2010): Large-scale diversification of skull shape in domestic dogs: disparity and modularity. *Am Nat* 175, 289-301.
- Evans, H. E. und de Lahunta, A. (2013a): Chapter 4 The Skeleleton. In: Miller's Anatomy of the Dog, pp. 1-12: 80-157. Elsevier Saunders.
- Evans, H. E. und de Lahunta, A. (2013b): Chapter 1 The Dog and Its Relatives; Chapter 4 The Skeleleton. In: Miller's Anatomy of the Dog, pp. 1-12: 80-157. Elsevier Saunders.
- Fastermann, P. (2012): Rapid-Prototyping-Verfahren: eine Übersicht. In: 3D-Druck/Rapid Prototyping: Eine Zukunftstechnologie - kompakt erklärt, pp. 117-126. Springer-Verlag, Berlin.
- Friedrich Scharr KG (2016): Sicherheitsdatenblatt Schwefelsäure. Stuttgart, Friedrich Scharr KG.
- Gebhardt, A. (2016a): Schichtbauverfahren. In: 3D-Drucken Grundlagen und Anwendungen des Additive Manufacturing (AM), 2. Auflage, pp. 33-68. Hanser.
- Gebhardt, A. (2016b): Grundbegriffe, Definitionen und Anwendungen. In: 3D-Drucken Grundlagen und Anwendungen des Additive Manufacturing (AM), 2. Auflage, pp. 1-32. Hanser.
- Gentry, A., Clutton-Brock, J. und Groves, C. P. (2004): The naming of wild animal species and their domestic derivatives. *Journal of Archaeological Science* 31, 645-651.

- 
- Gibson, I., Rosen, D. und Stucker, B. (2015a): Directed Energy Deposition Processes. In: I. Gibson, D. Rosen und B. Stucker, Eds., Additive Manufacturing Technologies: 3D Printing, Rapid Prototyping, and Direct Digital Manufacturing, pp. 245-268. Springer New York, New York, NY.
- Gibson, I., Rosen, D. und Stucker, B. (2015b): Development of Additive Manufacturing Technology. In: I. Gibson, D. Rosen und B. Stucker, Eds., Additive Manufacturing Technologies: 3D Printing, Rapid Prototyping, and Direct Digital Manufacturing, pp. 19-42. Springer New York, New York, NY.
- Gibson, I., Rosen, D. und Stucker, B. (2015c): Sheet Lamination Processes. In: I. Gibson, D. Rosen und B. Stucker, Eds., Additive Manufacturing Technologies: 3D Printing, Rapid Prototyping, and Direct Digital Manufacturing, pp. 219-244. Springer New York, New York, NY.
- Gibson, I., Rosen, D. und Stucker, B. (2015d): Extrusion Based Systems. In: I. Gibson, D. Rosen und B. Stucker, Eds., Additive Manufacturing Technologies: 3D Printing, Rapid Prototyping, and Direct Digital Manufacturing, pp. 147-173. Springer New York, New York, NY.
- Gibson, I., Rosen, D. und Stucker, B. (2015e): Vat Photopolymerization Processes. In: I. Gibson, D. Rosen und B. Stucker, Eds., Additive Manufacturing Technologies: 3D Printing, Rapid Prototyping, and Direct Digital Manufacturing, pp. 63-106. Springer New York, New York, NY.
- Gieseke, M., Albrecht, D., Nölke, C., Kaierle, S., Suttman, O. und Overmeyer, L. (2016): Laserbasierte Technologien. In: R. Lachmayer, R. B. Lippert und T. Fahlbusch, Eds., 3D-Druck beleuchtet: Additive Manufacturing auf dem Weg in die Anwendung, pp. 19-30. Springer-Verlag.
- Hagebeueker, K. (2017): Anatomisch korrekte dreidimensionale Ausdrücke von Schädeln und Unterkiefern der Gattung Equus als Grundlage für den anatomischen Unterricht. Diss. med. vet., München.
- Hagl, R. (2015a): Materialien und Anwendungen. In: Das 3D-Druck-Kompodium: Leitfaden für Unternehmer, Berater und Innovationstreiber, pp. 37-56. Springer-Verlag.
- Hagl, R. (2015b): 3D-Druck Technologien. In: Das 3D-Druck-Kompodium: Leitfaden für Unternehmer, Berater und Innovationstreiber, pp. 15-36. Springer-Verlag.
- Hall, E. R. und Russell, W. C. (1933): Dermestid Beetles as an Aid in Cleaning Bones. *J Mammal* 14, 372-374.
- Hamza-Lup, F. G., Bogdan, C. M., Popovici, D. M. und Costea, O. D. (2011): A survey of visuo-haptic simulation in surgical training. *Proc eLmL*, 57-62.
- Harrysson, O. L. A., Marcellin-Little, D. J. und Horn, T. J. (2015): Applications of Metal Additive Manufacturing in Veterinary Orthopedic Surgery. *JOM* 67, 647-654.
- I.C.V.G.A.N. (2017): Nomina Anatomica Veterinaria, 6.Auflage. I. C. o. V. G. A. Nomenclature. Hannover, Editorial Committee Hanover.
- Kerres, M. (2000): Information und Kommunikation bei mediengestütztem Lernen. *ZfE* 3, 111-130.
- Knoedler, M., Feibus, A. H., Lange, A., Maddox, M. M., Ledet, E., Thomas, R. und Silberstein, J. L. (2015): Individualized Physical 3-dimensional Kidney Tumor Models Constructed From 3-dimensional Printers Result in Improved Trainee Anatomic Understanding. *Urology* 85, 1257-1262.
- Koch, D. A., Arnold, S., Hubler, M. und Montavon, P. M. (2003): Brachycephalic syndrome in dogs. *COMP CONT EDUC PRACT* 25, 48-55.

- 
- Kollenberg, W. (2015): Industrielle Fertigung von Keramik mit 3D-Druck. *Keram. Z* 67, 1.
- Kong, X., Nie, L., Zhang, H., Wang, Z., Ye, Q., Tang, L., Huang, W. und Li, J. (2016): Do 3D Printing Models Improve Anatomical Teaching About Hepatic Segments to Medical Students? A Randomized Controlled Study. *World J Surg* 40, 1969-76.
- König, H. E. und Liebich, H.-G. (2014): Skelett des Stammes. In: H. E. König und H.-G. Liebich, Eds., *Anatomie der Haussäugetiere*, 6. Auflage, pp. 53-114. Schattauer, Stuttgart.
- Kramer, M., Gomerčić, H. und Mihaljević, M. (2009): CT-und MRT-Atlas: Transversalanatomie des Hundes. Georg Thieme Verlag, Stuttgart.
- Langenscheidt (2018): Langenscheidt Fremdwörterbuch, Langenscheidt GmbH & Co. KG.
- Laubenberger, T. und Laubenberger, J. (1999a): Grundlagen. In: T. Laubenberger, Ed. *Technik der medizinischen Radiologie: Diagnostik, Strahlentherapie, Strahlenschutz*, pp. 31-60. Deutscher Ärzteverlag, Köln.
- Laubenberger, T. und Laubenberger, J. (1999b): Computertomographie. In: T. Laubenberger, Ed. *Technik der medizinischen Radiologie: Diagnostik, Strahlentherapie, Strahlenschutz*, pp. 326-354. Deutscher Ärzteverlag, Köln.
- Li, F., Liu, C., Song, X., Huan, Y., Gao, S. und Jiang, Z. (2018): Production of accurate skeletal models of domestic animals using three-dimensional scanning and printing technology. *Anat Sci Educ* 11, 73-80.
- Lim, K. H. A., Loo, Z. Y., Goldie, S. J., Adams, J. W. und McMenamin, P. G. (2016): Use of 3D printed models in medical education: A randomized control trial comparing 3D prints versus cadaveric materials for learning external cardiac anatomy. *Anatomical sciences education* 9, 213-221.
- Mairs, S., Swift, B. und Ruty, G. N. (2004): Detergent: an alternative approach to traditional bone cleaning methods for forensic practice. *Am J Forensic Med Pathol* 25, 276-84.
- McMenamin, P. G., Quayle, M. R., McHenry, C. R. und Adams, J. W. (2014): The production of anatomical teaching resources using three-dimensional (3D) printing technology. *Anat Sci Educ* 7, 479-86.
- Merck KGaA (2017): Sicherheitsdatenblatt EMSURE® ACS-Schwefelkohlenstoff. Darmstadt Merck KGaA
- Mogali, S. R., Yeong, W. Y., Tan, H. K. J., Tan, G. J. S., Abrahams, P. H., Zary, N., Low-Beer, N. und Ferenczi, M. A. (2018): Evaluation by medical students of the educational value of multi-material and multi-colored three-dimensional printed models of the upper limb for anatomical education. *Anat Sci Educ* 11, 54-64.
- Nibblett, B. M. D., Pereira, M. M., Sithole, F., Orchard, P. A. D. und Bauman, E. B. (2017): Design and Validation of a Three-Dimensional Printed Flexible Canine Otoscopy Teaching Model. *Simul Healthc* 12, 91-95.
- Nickel, R., Schummer, A. und Seiferle, E. (2004): passivier Bewegungsapparat, Skelettsystem. In: *Lehrbuch der Anatomie der Haustiere*, Band I; 8. Auflage, pp. 128-186. Parey, Berlin.
- Niederklopper, P. und Troxler, M. (2001): Knochenpräparation: Handbuch für Praktiker. Romei AG.
- O'Reilly, M. K., Reese, S., Herlihy, T., Geoghegan, T., Cantwell, C. P., Feeney, R. N. M. und Jones, J. F. X. (2016): Fabrication and assessment of 3D printed



- anatomical models of the lower limb for anatomical teaching and femoral vessel access training in medicine. *Anat Sci Educ* 9, 71-79.
- Oechtering, T. H., Oechtering, G. U. und Nöller, C. (2007): Strukturelle Besonderheiten der Nase brachyzephaler Hunderassen in der Computertomographie. *Tierärztl Prax* 35, 177-187.
- Pahl, G. (2013): Konstruieren mit 3D-CAD-Systemen: Grundlagen, Arbeitstechnik, Anwendungen. Springer-Verlag.
- Parlament und Rat der EU (2006): REACH- Verordnung; VO (EG) Nr. 1907/2006, Europäisches Parlament und Rat der Europäischen Union.
- Parlament und Rat der EU (2008): Verordnung (EG) Nr. 1272/2008, Europäisches Parlament und Rat der Europäischen Union.
- Piechocki, R. und Altner, H.-J. (2007a): Herstellung von Präparaten innerer Organe. In: *Makroskopische Präparationstechnik* 5. Auflage, pp. 317-349. Gustav Fischer Verlag Jena 1998, Stuttgart.
- Piechocki, R. und Altner, H.-J. (2007b): Sondertechniken zur Herstellung von Trockenpräparaten. In: *Makroskopische Präparationstechnik* 5. Auflage, pp. 207-244. Gustav Fischer Verlag Jena 1998, Stuttgart.
- Piechocki, R. und Altner, H.-J. (2007c): Herstellung von Skelettpräparaten. In: *Makroskopische Präparationstechnik* 5. Auflage, pp. 245-274. Gustav Fischer Verlag Jena 1998, Stuttgart.
- Piechocki, R. und Altner, H.-J. (2007d): *Makroskopische Präparationstechnik* 5. Auflage. Gustav Fischer Verlag Jena 1998, Stuttgart.
- Popesko, P. (2011): *Atlas der topographischen Anatomie der Haustiere*, 7. Auflage. Georg Thieme.
- Preece, D., Williams, S. B., Lam, R. und Weller, R. (2013): "Let's get physical": advantages of a physical model over 3D computer models and textbooks in learning imaging anatomy. *Anat Sci Educ* 6, 216-24.
- Pujol, S., Baldwin, M., Nassiri, J., Kikinis, R. und Shaffer, K. (2016): Using 3D Modeling Techniques to Enhance Teaching of Difficult Anatomical Concepts. *Acad Radiol* 23, 507-516.
- Purves, W. K., Sadava, D., Gordon, O. H. und Heller, C. H. (2011): Das Nervensystem von Säugern: Struktur und höhere Funktionen. In: *Biologie*, 9. Auflage, pp. 1009-1120. Jürgen Markl.
- Radeleff, B. und Kauffmann, G. (2011): Röntgendiagnostik. In: W. Weber, Ed. *Radiologie: Bildgebende Verfahren, Strahlentherapie, Nuklearmedizin und Strahlenschutz*, pp. 57-208. Elsevier, Urban&FischerVerlag, München.
- Read, E. K., Vallevand, A. und Farrell, R. M. (2016): Evaluation of Veterinary Student Surgical Skills Preparation for Ovariohysterectomy Using Simulators: A Pilot Study. *J Vet Med Educ* 43, 190-213.
- Reitzer, C. (2014): Kapitel 6. In: *Erfolgreich lehren: Ermutigen, motivieren, begeistern*, pp. Springer.
- Riederer, B. M. (2014): Plastination and its importance in teaching anatomy. Critical points for long-term preservation of human tissue. *J Anat* 224, 309-15.
- Salomon, F.-V. (2015): Bewegungsapparat. In: F.-V. Salomon, H. Geyer und U. Gille, Eds., *Anatomie für die Tiermedizin*, 3. Auflage, pp. 23-234. Enke.
- Schoenfeld-Tacher, R. M., Horn, T. J., Scheviak, T. A., Royal, K. D. und Hudson, L. C. (2017): Evaluation of 3D Additively Manufactured Canine Brain Models for Teaching Veterinary Neuroanatomy. *J Vet Med Educ* 44, 612-619.

- 
- Smith, C. F., Tollemache, N., Covill, D. und Johnston, M. (2018): Take away body parts! An investigation into the use of 3D-printed anatomical models in undergraduate anatomy education. *Anat Sci Educ* 11, 44-53.
- Smith, M. L. und Jones, J. F. X. (2017): Dual-extrusion 3D printing of anatomical models for education. *Anat Sci Educ* 11, 65-72.
- Soden-Fraunhofen, R. v., Sim, E.-J., Liebich, S., Frank, K. und Kiefer, M. (2008): Die Rolle der motorischen Interaktion beim Erwerb begrifflichen Wissens. *Z Entwickl Pädagogis* 22, 47-58.
- Sonntag, F. und Mihaljević, M. (2009): Grundlagen der Computertomographie. In: M. Kramer, H. Gomerčić und M. Mihaljević, Eds., *CT-und MRT-Atlas: Transversalanatomie des Hundes*, pp. 3-10. Georg Thieme Verlag, Stuttgart.
- Statista (2018): Statistiken zu Haustieren in Deutschland. Hamburg, Statista GmbH.
- Stratasys (2018a): Vorklinische Tests medizinischer Geräte. Stratasys Ltd., Stratasys Ltd.
- Stratasys (2018b): Klinische Schulungsmodelle, Stratasys Ltd.
- Sunico, S. K., Hamel, C., Styner, M., Robertson, I. D., Kornegay, J. N., Bettini, C., Parks, J., Wilber, K., Smallwood, J. E. und Thrall, D. E. (2012): Two anatomic resources of canine pelvic limb muscles based on CT and MRI. *Vet Radiol Ultrasound* 53, 266-72.
- Thrall, D. E. (2013): *Textbook of Veterinary Diagnostic Radiology*. Elsevier Health Sciences, St. Louis.
- United Nations (2011): *Globally Harmonized System of Classification and Labelling of Chemicals*. New York, Geneva, United Nations.
- United States Department of Labor (2012): *Hazard Communication*. Washington DC, United States Department of Labor.
- University of Edinburgh (2017): *Dog (Canis familiaris) Brachycephalic*. New York, Sketchfab.
- VDH (2018a): Bull Terrier - Eintrag Rasselexikon, Verband für das Deutsche Hundewesen (VDH) e.V.
- VDH (2018b): *Verband für das Deutsche Hundewesen (VDH) e.V.*
- vetoblender (2017): *3D Model Of Dog Skeleton*. New York, Sketchfab.
- Vinnolit GmbH & Co. KG (2016): *Sicherheitsdatenblatt Natronlauge 50%*. Ismaning, Vinnolit GmbH & Co. KG.
- von Hagens, G. (1985): *Heidelberger Plastinationshefter*. Anatomisches Institut I Universität Heidelberg.
- Wayne, R. K. (1986): Cranial morphology of domestic and wild canids: the influence of development on morphological change. *Evolution* 40, 243-261.
- Yeom, S., Choi-Lundberg, D. L., Fluck, A. E. und Sale, A. (2017): Factors influencing undergraduate students' acceptance of a haptic interface for learning gross anatomy. *Interactive Technology and Smart Education* 14, 50-66.

## 12 Danksagung

Meiner Doktormutter Frau Prof. Dr. Cordula Poulsen Nautrup, deren unerwarteter Tod sie viel zu früh aus dem Leben gerissen hat, danke ich herzlich für die vertrauensvolle Überlassung meines Dissertationsthemas sowie die fachliche und moralische Unterstützung. Ich danke ihr für ihre freundliche und warmherzige Art. Sie hatte stets ein offenes Ohr für Ihre Doktoranden.

Meinen herzlichen Dank möchte ich meinem Doktorvater Herrn Prof. Dr. Johann Maierl aussprechen, welcher die Betreuung übernommen hat und mir die Fortführung der Dissertation ermöglichte. Vielen Dank für Ihre kompetente fachliche Unterstützung, Ihre Zeit, Ihren guten Rat und Ihre freundliche Art und Weise im Umgang mit ihren Doktoranden.

Ein ganz besonderer Dank gilt auch meinen Betreuerinnen Frau Dr. Inga Wölfel und Frau Dr. Elisabeth Zandt. Frau Dr. Inga Wölfel, die mit mir an einigen Nachmittage viele Stunden am 3D-Drucker verbrachte. Ich danke ihr für ermunternden Worte und ihre optimistische Art beim gemeinsamen Suchen nach neuen Lösungen. Ein herzliches Dankeschön auch an Frau Dr. Elisabeth Zandt für das hilfreiche, schnelle Korrekturlesen und die starke moralische Unterstützung, ganz besonders in der Endphase der Dissertation.

Der Staatssammlung für Anthropologie und Paläoanatomie München danke ich für die freundliche Bereitstellung von Hundeschädeln aus ihren Beständen. Als Vorlage wurde der Schädel eines Afghanischen Windhundes eingesetzt. Mein Dank richtet sich im Besonderen an Herrn Prof. Dr. Joris Peters sowie Frau Dr. Henriette Obermaier und Frau Britta Möllenkamp, die stets freundlich meine Fragen beantwortete und mir half den Schädel des Afghanischen Windhundes zu finden.

Für die vertrauensvolle Leihgabe der Hundeschädel von Bull Terrier und Boxer als Vorlage für die 3D-Modelle möchte ich Frau Mitterer und Herrn Hecher sehr danken. Ein herzliches Dankeschön möchte ich Frau Dr. Peissner für die CT-Datensätze des Oberschädels und Unterkiefers des Deutschen Schäferhundes aussprechen.

Herrn PD Dr. Sven Reese danke ich sehr für die kompetente fachliche Unterstützung bei der Erstellung des Evaluationsbogens und der statistischen Auswertung der Daten.

Ein freundliches Dankeschön möchte ich auch Frau Prof. Dr. Andrea Meyer-Lindenberg und Herrn Dr. Andreas Brühschwein aussprechen für ihr Entgegenkommen und ihre Hilfe bei der Erstellung der CT-Datensätze der Hundeschädel.

An dieser Stelle geht auch ein großer Dank an die Tierklinik Oberhaching für kollegiale und freundliche Kooperation bei der Erstellung der digitalen Datensätze der Hundeoberschädel und Unterkiefer, ganz besonders möchte ich mich hierbei an Frau Dr. Bettina Gutmannsbauer und Herrn Dr. Peter Scabell wenden.

Außerdem gilt mein Dank den Mitarbeitern des Instituts für Anatomie, Histologie und Embryologie. Hervorheben möchte ich Herr Hecher, Frau Mitterer, Frau Dr. Weber und Frau Dr. Vater für ihre Hilfsbereitschaft und ihren Rat.

Gleiches gilt für Herr Hiermeier von der Zoologischen Staatssammlung München für die Unterstützung bei der Suche nach nativen Hundeschädeln als Vorlage für die 3D-Modelle. Auch Herrn Tilke von 3Dimensionales und Herrn Wagner von 3D Systems danke ich für Unterstützung und schnelle Hilfe.

Nicht zuletzt möchte ich meiner Familie und meinen Freunden danken. Allen voran danke ich von ganzem Herzen meinen Eltern, die mich während der Zeit der Dissertation und des gesamten Studiums in jeder Hinsicht nach Kräften unermüdlich unterstützten und ermutigten. Danke, dass Ihr mit eurer Geduld und Liebe meinen bisherigen Weg ermöglicht habt. Dies gilt ebenso für meine Tante Regina Laws. Danke, dass Ihr mir geholfen habt, das Ziel zu erreichen und diesen Traum wahr werden zu lassen.

Christoph, ein ganz besonderer Dank geht an Dich für Deine Geduld, Deine liebevolle Unterstützung und Deine aufbauenden Worte, die mir immer wieder Zuversicht gaben.

Zu guter Letzt möchte ich meinem geliebten Bruder Felix und meinen Freunden danken – fürs Dasein, für aufmunternde Worte und Eure wertvolle Unterstützung. Danke Lucie, Bekky, Michael, Sarah, Laura, Tini, Krissi, Anke, Anna und Rachel.