

Morphometrische Untersuchungen des Kehlskeletts
bei singulärer Anlage des Cornu superius der Cartilago thyroidea.
Untersuchungen zur forensischen Traumatologie.

Inauguraldissertation
zur Erlangung des Grades eines Doktors der Medizin
des Fachbereiches Humanmedizin
der Justus-Liebig-Universität Gießen

vorgelegt von Can-Felix Winzek
aus Berlin

Gießen 2020

Aus dem Fachbereich Medizin
der Justus-Liebig-Universität
Gießen

Institut für Rechtsmedizin
Direktor: Uni.-Prof. Dr. med. Dr. jur. Dettmeyer

1. Gutachter: Prof. Dr. Dr. Dettmeyer
2. Gutachter: Priv. Doz. Dr. Dr. Streckbein
Tag der Disputation: 04.08.2020

Inhalt

1	Einleitung	1
1.1	Fragestellung.....	2
2	Material und Methoden	3
2.1	Material.....	3
2.1.1	Alters- und Geschlechtsverteilung	4
2.2	Methoden	6
2.2.1	Überblick.....	6
2.3	Präparative Darstellung	7
2.4	Bildgebende Verfahren: Mikro-Computertomographie	8
2.4.1	Überblick über Möglichkeiten in der Mikro-Computertomographie	8
2.4.2	Überblick über Skyscan 1173	8
2.4.3	Aufbau und Funktionsweise	9
2.4.4	Konfiguration des μ -CT	10
2.4.5	Ablauf.....	10
2.4.6	Kontrastierung mit Phosphorwolframsäure.....	11
2.4.7	Bildanalysesoftware	13
2.4.8	Statistische Auswertung	13
2.5	Definition der Messpunkte und -strecken	14
2.5.1	Vermessungen des Schildknorpels.....	14
2.5.2	Messungen am Ringknorpel	18
3	Ergebnisse	22
3.1	Deskriptive Analyse des Gesamtkollektivs	22
3.2	Geschlechtsdimorphismus.....	24
3.3	Altersabhängigkeit.....	28
3.4	Vergleich der Kollektive und der Symmetrie	29
3.5	Hauptkomponentenanalyse	33
4	Diskussion.....	35
4.1	Morphologie und Traumatologie der Schildknorpeloberhörner.....	36
4.2	Morphologie und Traumatologie von Schild- und Ringknorpel	43
4.3	Ossifikation und Vulnerabilität der Schildknorpelplatten	51
5	Fazit.....	56
5.1	Zusammenfassung/Abstract	60
6	Verzeichnisse.....	62
7	Danksagung.....	72
8	Curriculum vitae und Publikationen.....	73

1 Einleitung

In der angewandten Forschung der klinischen und klinisch-theoretischen medizinischen Fächer hat die makroskopische Anatomie einen festen Platz. So bedarf es kaum einer Erläuterung, dass die Entwicklung oder Modifizierung von Operationsmethoden am ossären Apparat nur vom makroskopischen Befund ausgehen kann. Eine primär an die Makroskopie gebundene Aufgabe in der Rechtsmedizin ist die Verletzungsanalyse. Diese fußt auf der Kenntnis der anatomischen Struktur eines verletzten Gewebes. Von „Struktur“ eines Gewebes zu sprechen heißt, von dessen Topographie, Gefüge und innerem Aufbau, mit dem Spektrum vom makroskopischen bis zum molekularen Bereich auszugehen (Tillmann 2003).

Hier schließt die vorgelegte morphometrische Untersuchung eines ganzen Organs an, nämlich des Larynx bei beidseitiger oder einseitiger Agenesie der Schildknorpeloberhörner (SOHÖ). Bei dieser in der Embryonal- oder Fetalzeit entstandenen Fehlbildung stellt sich die Frage nach der Symmetrie im ganzen Organ. Deshalb galt es zu prüfen, ob bei diesem Merkmal dann Larynx in seiner Konfiguration oder in Details der Struktur eine Seitendifferenz aufwies. Verglichen wurden die beiden symmetrischen Formen - nämlich reguläre beidseitige Anlage der SOHÖ in einem Kontrollkollektiv sowie vollständige Agenesie - mit der einseitigen Agenesie. Derartige Untersuchungen sind bisher nicht durchgeführt worden. Auf den Ergebnissen dieser Untersuchungen aufbauend, soll dann auf biomechanische und traumatologische Aspekte näher eingegangen werden.

Angaben zur Inzidenz des ein- oder beidseitigen Fehlens des SOHO variieren in erster Linie wohl abhängig von der Größe der Kollektive; unilateral 0,8% (Thiel 2005), 1,3% (Harjeet 1989), 2,6% (Peters und Umlandt 1973) 7,3% (La Grandmaison et al. 2003), bilateral 0,9% (Harjeet 1989) sowie uni-/bilateral in 2,6% (Naimo et al. 2013).

Bei den bisherigen morphometrischen Untersuchungen des normalen kindlichen und adulten Kehlkopfs¹ (Eckel et al. 1994) wurden verschiedene Messmethoden eingesetzt. Sie reichen vom Nonius bis zum CT und MRT. Demgegenüber konnte die Genauigkeit der eigenen Untersuchung durch die Verwendung des μ -CTs und erforderlichenfalls einer Kontrastierung des Knorpels noch deutlich verbessert werden.

¹ Fußnote: Es soll bereits an dieser Stelle gesagt werden, dass die älteste ausführliche morphometrische Untersuchung des Kehlkopfs von 1927 aus dem Würzburger Anatomischen Institut in Absprache mit meinen Betreuern der Arbeit nicht zitiert werden soll. So lag bei dem Autor ein Rassenvorverständnis vor, das er in seinen Untersuchungen im Sinne eines Zirkelschlusses als bestätigt ansah. Das soll nicht tradiert werden.

1.1 Fragestellung

Kehlköpfe mit einseitiger Schildknorpeloberhornanlage aus dem Obduktionsgut des Instituts für Rechtsmedizin der Universität Göttingen und des Rechtsmedizinischen Instituts in Kassel sollen mikro-computertomographisch untersucht und mit Kehlköpfen mit regulärer Oberhornanlage mittels eines Matchings verglichen werden. In diesem Rahmen steht die Vermessung von Schild- und Ringknorpel im Vordergrund. Sie soll in erster Linie Aufschluss über die Abhängigkeit der Schildknorpeloberhornanlage und Kehlkopfsymmetrie geben. Weiterhin können alters- und geschlechtsgebundene Merkmale untersucht werden. Durch die Untersuchungen soll auch ein Beitrag zur rechtsmedizinisch traumatologischen Forschung geleistet werden. Sie verfolgen, vergleichend mit dem Normalbefund, Fragen der Formstabilität und Vulnerabilität von Schild- und Ringknorpel bei Agenesie eines oder beider Schildknorpeloberhörner (SOHÖ).

2 Material und Methoden

2.1 Material

Die vorliegende Untersuchung stützte sich auf 49 Kehlkopfpräparate aus dem Obduktionsgut der Institute für Rechtsmedizin der Universität Göttingen zwischen den Jahren 2005-2007 und der Rechtsmedizin Kassel zwischen 2010-2013. Es handelte sich um ein forensisches Material, bei dem die Präparate ausschließlich aus gerichtlich angeordneten Obduktionen stammten. Sie wurden in diesem Rahmen im Auftrag der StA für eine etwaige spätere Analyse asserviert. Auswahlkriterium für die durchgeführte morphometrische Analyse waren im Verumkollektiv Kehlkopfpräparate, bei denen entweder kein Schildknorpeloberhorn (n=5; Abb. 1c) oder nur einseitig (n=21; Abb. 1b) angelegt war. Diese wurden mit einem Vergleichskollektiv mit regulär beidseitiger Anlage (n=23; Abb. 1a) im Paarvergleich unter Berücksichtigung der Kontrollvariablen Alter und Geschlecht gematcht. Weiteres Auswahlkriterium im Vergleichskollektiv war der postmortale Erhaltungszustand der formalinfixierten Präparate.

In wenigen Fällen (n=3) wurde die Zuordnung zu den beiden Kollektiven nach der radiologischen Darstellung korrigiert.

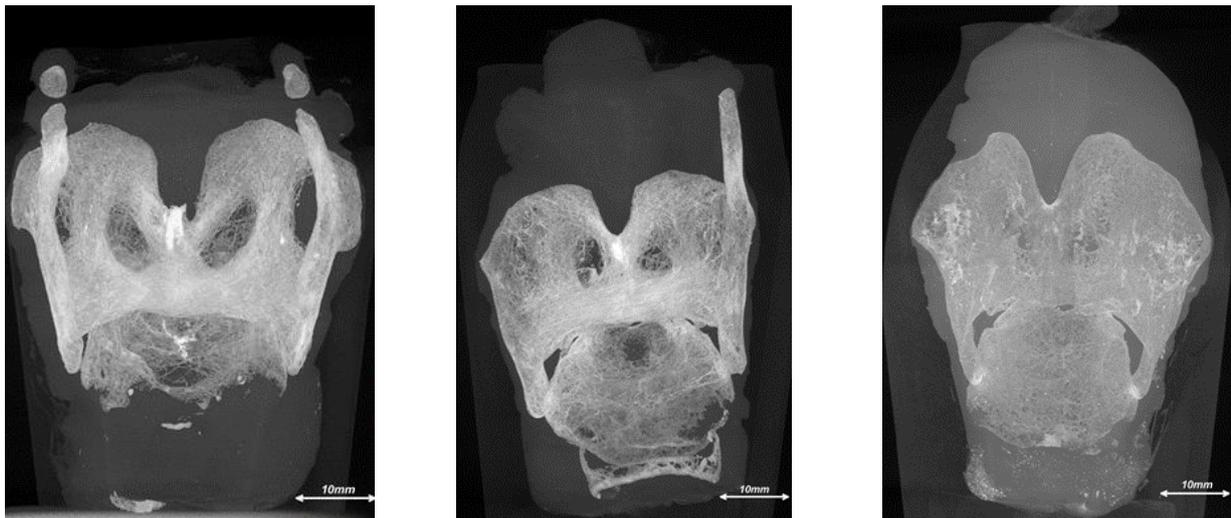


Abb. 1: a.-p.; Maximum Intensity Projection (Kehlköpfe v.l.n.r. angeordnet) 1a) reguläre Anlage der Schildknorpeloberhörner mit jeweils einer *Cartilago triticea* (KK#30); 1b) einseitige Anlage (KK#42); 1c) fehlende Anlage der Schildknorpeloberhörner (KK#37)

2.1.1 Alters- und Geschlechtsverteilung

Die Präparate (n=49) stammen von 23 gestorbenen Frauen im Lebensalter von 24-93 Jahren (Median 68 Jahre) und von 26 gestorbenen Männern im Alter von 33-79 Jahren (Median 64,5 Jahre). Das Kollektiv ist nicht normalverteilt, entsprechend werden Mittelwert und Varianz nicht angegeben. Die Angaben zu den beiden Subkollektiven und zu den Paarbildungen sind in Tab. 1 und Tab. 2 zusammengestellt.

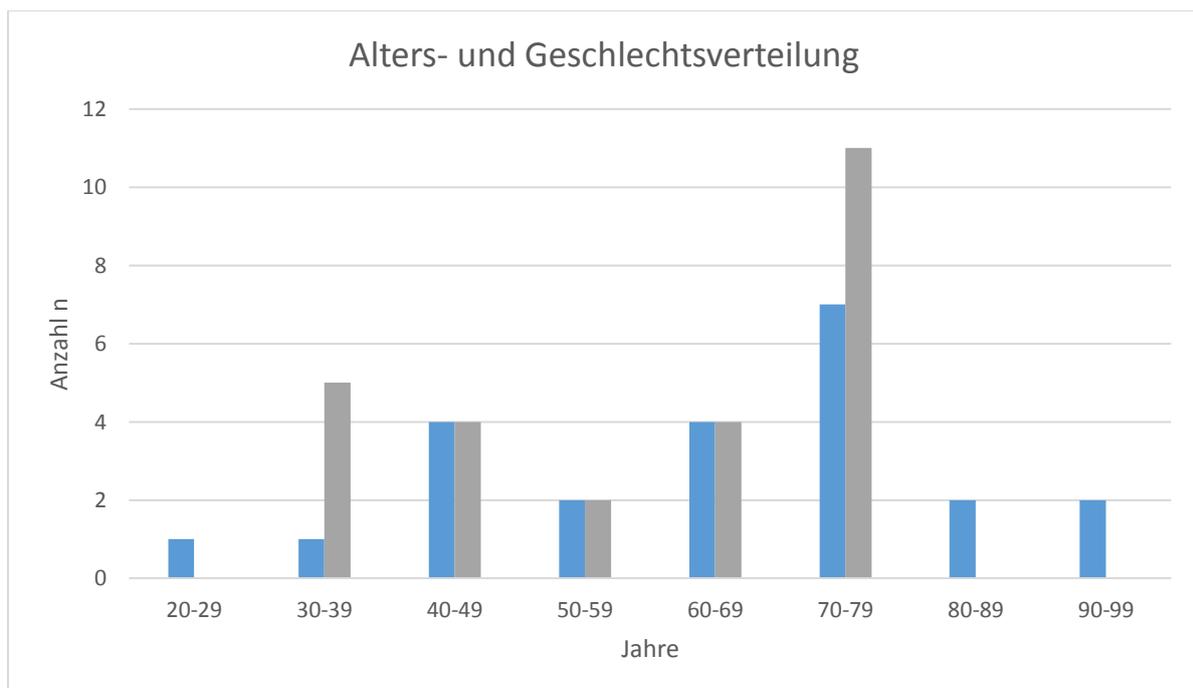


Diagramm 1: Alters- und Geschlechtsverteilung; blau = weiblich, grau = männlich

Paarzuordnungen – Kehlköpfe – weibliches Kollektiv

Paar	0 OH	Alter in J.	1 OH	Alter in J.	2 OH	Alter in J.
1			KK#1	33	KK#2	24
2			KK#3	40	KK#4	41
3			KK#5	43	KK#6	42
4			KK#7	53	KK#8	52
5	KK#9	65	KK#10	64	KK#11	60
6			KK#12	71	KK#13	64
7			KK#14	71	KK#15	73
8			KK#16	77	KK#17	75
9			KK#18	79	KK#19	79
10			KK#20	85	KK#21	83
11	KK#22	96			KK#23	93

Tab. 1: Fortlaufende Nummerierung #1-#23, Paarnummerierung 1-11; OH = Schildknorpeloberhorn

Paarzuordnungen – Kehlköpfe – männliches Kollektiv

Paar	0 OH	Alter in J.	1 OH	Alter in J.	2 OH	Alter in J.
12			KK#24	35	KK#25	37
13	KK#26	39	KK#27	39	KK#28	38
14			KK#29	41	KK#30	42
15			KK#31	46	KK#32	48
16			KK#33	50	KK#34	50
17			KK#35	62	KK#36	61
18	KK#37	67			KK#38	68
19	KK#39	74	KK#40	73	KK#41	73
20			KK#42	75	KK#43	73
21			KK#44	75	KK#45	74
22			KK#46	76	KK#47	76
23			KK#48	78	KK#49	79

Tab. 2: Fortlaufende Nummerierung #24-#49, Paarnummerierung 12-23; OH = Schildknorpeloberhorn

2.2 Methoden

2.2.1 Überblick

Im Rahmen dieser Untersuchung erfolgte die radiologische Verarbeitung der asservierten Kehlköpfe mittels Mikro-Computertomographie (μ -CT). Nach den μ -CT-Scans konnten die Datensätze der Kehlkopfaufnahmen im DATAVIEWER® (siehe Kapitel 2.4.7) geöffnet werden. Mit diesem Programm wurden die Präparate in der Sagittal-, Koronal- und Transversalebene ausgerichtet. Nach der Achsausrichtung der Kehlköpfe schloss sich die Darstellung der Schnittbilder der definierten Messebenen an (sämtliche Messebenen orientierten sich an den ursprünglichen Hauptscharen der anatomischen Körperebenen). Die Daten der bestimmten Schnittbilder wurden für jede Messebene getrennt in einem singulären Bild gespeichert und zur Dokumentation nach einem festgelegten Muster beschriftet. Die gespeicherten Bilder der Tomographieebene wurden im nächsten Schritt mit CT ANALYSER® geöffnet. Die Kombination aus der Sektionsnummer, der vermessenen Strecke bzw. ihrer Messpunkte oder des bestimmten Winkels als Akronym kodierte jeden Screenshot. Eine geeignete Speicherfunktion für Messwerte war in dem verwendeten Programm nicht integriert. Microsoft Excel 2016 fungierte als Programm zur Aufbewahrung der Messdaten.

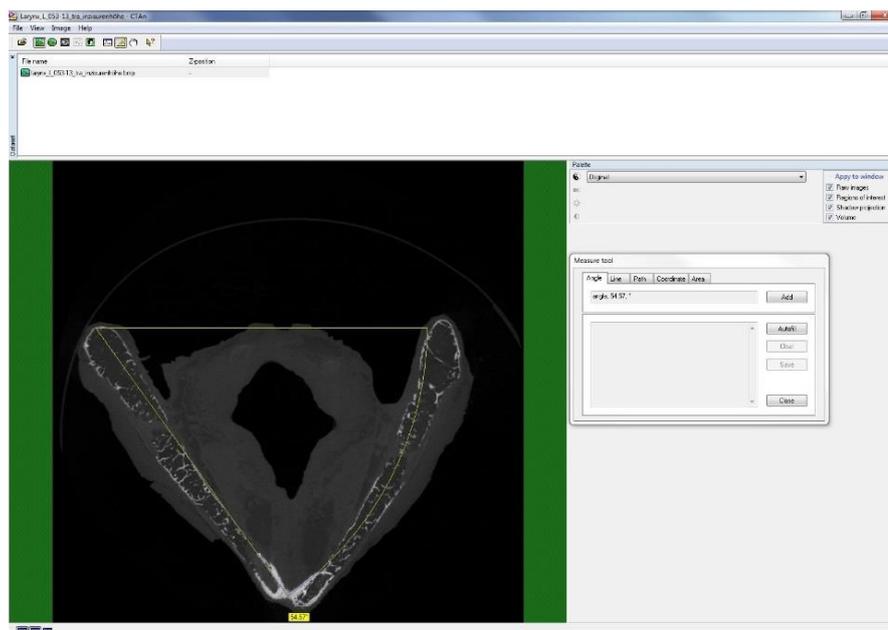


Abb. 2: Transversalschnitt; Screenshot von KK#42; Winkelmessung der re. Schildknorpelplatte auf Höhe des kranialen Anteils der Schildknorpelkommissur; Winkel zwischen der Horizontaltangente an Punkt B und der Strecke \overline{AB}

2.3 Präparative Darstellung

Der autoptischen Entnahme der Kehlskelette (Saternus und Madea 2007) ging eine typische rechtsmedizinische Darstellung der Halsweichteile in sog. Blutleere voraus; Durchtrennung der Mundbodenmuskulatur; Horizontalschnitt durch das Palatinum im Grenzbereich Palatinum durum/molle und dorsal/laterale Schnittführung bis auf die retropharyngeale Verschiebeschicht; Umschneidung der Apertura thoracis; Entnahme des sog. Hals-Lungen-Pakets.

Am entnommenen Paket erfolgte die Durchtrennung des Velum palatinum linkseitig der Uvula palatina; Frontalschnitt durch den Zungengrund in Höhe des Foramen caecum; Längsauftrennung des Ösophagus.

Ein Parallelschnitt wurde dann durch die kranial am Zungenbein inserierende Muskulatur einschließlich der Ligg. stylohyoideae unter Schonung der Cornua minora gelegt. Es folgte die kaudale Durchtrennung der Mm. thyrohyoidei, Ligg. thyrohyoideae und der Membrana thyrohyoidea (stets ggfs. kranial einer etwaigen Cartilago triticea). Die Pseudobursa im Corpus hyoidei blieb belassen. Es erfolgte die Fixation des Zungenbeins in Formalin.

Die Präparation des Larynx wurde wie folgt durchgeführt:

Ablösung der Pars laryngea pharyngis vom Larynx unter Belassen der Insertion des M. constrictor pharyngis. Die Schnittführung verlief unter Belassen von Schilddrüse und Nebenschilddrüsen weiter paratracheal in der Verschiebeschicht (lateral des großen Gefäß- und Nervenbündels) bis an die Bifurcatio tracheae; präparativ wurde der Ösophagus in der Richtung von kaudal bis kranial (inkonstant zwischen Unterrand des Cricoids und oberer Insertion der Mm. cricoarytaenoidei posterior) längs aufgetrennt, die Schilddrüse bds. abgelöst und das Präparat zwischen 2. und 3. Trachealspange abgesetzt. Der Kehlkopf verblieb in toto. Zum Schluss erfolgte die Formalinfixation des Kehlkopfs.

2.4 Bildgebende Verfahren: Mikro-Computertomographie

2.4.1 Überblick über Möglichkeiten in der Mikro-Computertomographie

Die Mikro-Computertomographie ist ein seit den 1980er Jahren bestehendes Verfahren (Elliott und Dover 1982) zur hochauflösenden zwei- und dreidimensionalen Darstellung von kleinen Proben (Kalender 2011) mit einer heute möglichen Ortsauflösung unter 5 μm (Ritman 2011). Sie dient der quantitativen und qualitativen Strukturanalyse auf Trabekelzebene und kann so zur Bestimmung von Trabekelanzahl, Knochenvolumen, Gewebvolumen und Knochendichte (Engelke et al. 1999; Bouxsein et al. 2010) verwendet werden. Eine zusätzliche Kontrastierung ermöglicht eine differenziertere Untersuchung von nicht-mineralisiertem Weichteilgewebe (Pauwels et al. 2013). Durch diese Fortschritte konnte sich die $\mu\text{-CT}$ als nicht-destruktives, bildgebendes Verfahren im Mikrobereich etablieren und stellt so eine Alternative zu histologischen Untersuchungen dar (Thomsen et al. 2005).

2.4.2 Überblick über Skyscan 1173

Für die $\mu\text{-CT}$ -Aufnahmen wurde der $\mu\text{-CT}$ Skyscan 1173 der Firma Bruker verwendet (vgl. Tab. 3). Bei der integrierten Detektorkamera handelte es sich um einen Flachbild-detektor der Firma Hamamatsu mit maximalen 130 kV Stromspannung und 300 μA Stromstärke. Die höchste Leistungsstufe von 8 W wurde nicht übertroffen. Die Matrix des Detektors betrug 2240 x 2240 Pixeln bei 16 Bits. Das Bildformat wurde als TIFF ausgegeben.

$\mu\text{-CT}$: Skyscan 1173 der Firma Bruker

Röntgenröhre:	Spannung: 40-130 kV, Leistung: 8 W, Fokusgröße: <5 μm
Detektor:	Flat-panel Sensor; Matrix: 2240 x 2240 Pixel, 12 Bit
Maximale Objektgröße:	Ob- 140 mm Durchmesser, 200 mm Länge (100-140 mm Scanlänge)
Ortsauflösung:	<4-5 μm , 7-8 μm bei niedrig-kontrastierter Auflösung
Volumenscanzeit:	Minuten bis Stunden
Geometrie:	Fächer- oder Kegelstrahl

Tab. 3: Eigenschaften vom Skyscan 1173 der Bruker Corporation (Bruker GmbH)

2.4.3 Aufbau und Funktionsweise

Der Grundaufbau des verwendeten μ -CT besteht vereinfacht aus einer Strahlenquelle und einem Detektor (Abb. 3). Zwischen der stationären Röntgenstrahlquelle und dem Detektor kann Probenmaterial eingebracht und rotiert werden. Neben der möglichen 360° Rotation ist ein Manövrieren zur Positionsoptimierung der Probe entlang der Horizontal- und Vertikalsachse möglich. Durch eine Positionsänderung auf die Strahlenquelle zu oder von dieser weg wird die sogenannte Image-Pixel-Size und somit die Voxelkantenlänge festgelegt. Die von der Strahlenquelle emittierte Röntgenstrahlung gelangt über Kollimatoren und Filter zur Probe. Dies zielt auf eine verbesserte Transmission durch die Probe ab. Bei der so erzeugten Strahlenaufhärtung wird durch den Filter die harte von der weichen und energieärmeren Strahlung zur Reduktion von Artefakten isoliert (Meganck et al. 2009). Die an der Strahlungsquelle entstehende Strahlengeometrie entspricht einem Fächer- oder Kegelstrahl (Kalender 2011). Sie orientiert sich an dem von Feldkamp et al. 1989 entwickelten Modell zur Kegelstrahlgeometrie zur dreidimensionalen Darstellung (Feldkamp et al. 1989). An dem hinter der Probe positionierten Flachbilddetektor wird die Absorption aufgezeichnet. Dabei erfolgt an einem Szintillator die Konversion von Röntgenstrahlen in visuelles Licht. Eine in Reihe geschaltete Fotodiode (TFD – thin-film diode) wandelt das Licht in Elektronen um, die am Dünnfilmtransistor (TFT – thin-film transistor) registriert werden (Kotter und Langer 2002). Nach der Digitalisierung erfolgt die Bildausgabe in Graustufen.

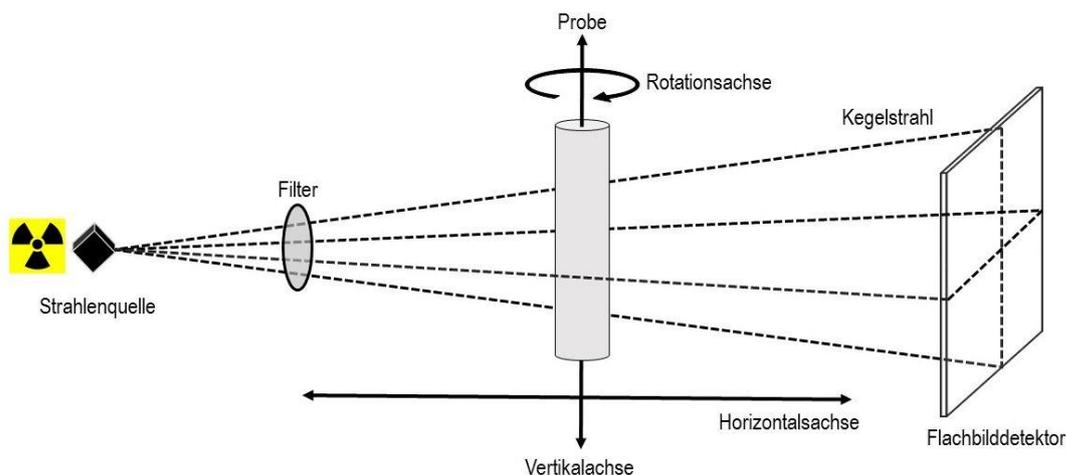


Abb. 3: Vereinfachte Darstellung eines μ -CT. Die Probe kann in den dargestellten Achsen frei bewegt werden. Die Abbildung wurde modifiziert dargestellt nach Computed Tomography (Kalender 2011)

:

2.4.4 Konfiguration des μ -CT

In der Vorbereitung wurden unter anderem folgende Parameter festgelegt: Die Aufnahmen erfolgten nach dem „Step-and-Shoot“-Prinzip. Die angestrebte Gesamtrotation von entweder 180° oder 360° wurde in Teilrotationsschritte unterteilt. Zum einen wurden der Winkel einer Rotationsstufe, der benötigte Filter, die Belichtungszeit, die auch aus der Dicke, Größe, Dichte und dem verwendeten Filter resultiert, programmiert. Zum anderen exekutierte der μ -CT an jeder Position eine gesetzte Anzahl an Aufnahmen. Diese sogenannten „Frames“ bezwecken eine Verbesserung des Signalrauschverhältnisses (Roth und Rauser 2014). Die verwendete Fein- oder Mikrofokusröntgenröhre im Bereich von $5\text{-}50\ \mu\text{m}$ ermöglichte eine hohe Ortsauflösung. Durch die Wahl eines möglichst kleinen Brennflecks wird der geometrischen Unschärfe entgegengewirkt (Abb. 4). Die durchaus sehr lange Volumenscanzeit ist also von der Anzahl der durchgeführten Frames, der Rotationsstufenanzahl und der durch Präparatkonfiguration bzw. dem verwendeten Filter bestimmten Belichtungszeit abhängig.

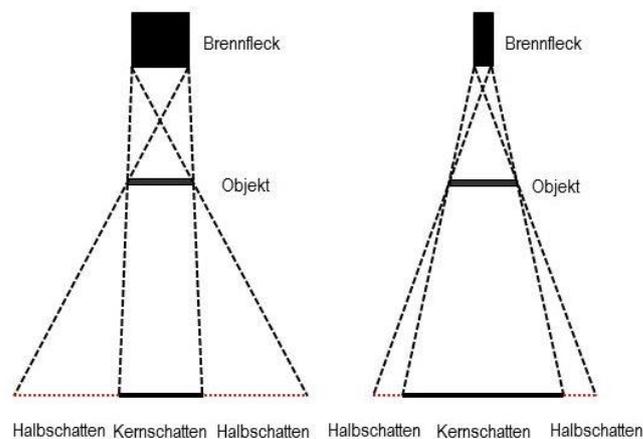


Abb. 4: Vereinfachte Darstellung des Einflusses der Brennfleckgröße auf die geometrische Unschärfe in Form des Halbschattens

2.4.5 Ablauf

Für die μ -CT-Scans wurden die formalinfixierten Kehlköpfe einzeln unter einem Abzug vorsichtig von überschüssiger Fixierflüssigkeit befreit. Zur weiteren Mobilisierung von in den Hohlräumen rückständiger Flüssigkeit ruhten die Präparate weitere 10 Minuten unter dem Abzug. Um ein Austrocknung in der Probenkammer zu verhindern wurden die Kehlköpfe mit einer Schutzfolie umwickelt, sodann in aufrechter Position - gesichert mit mehreren Styroporkissen - in einen Probenträger (Papiertrinkbecher) gestellt. Die ver-

wandten Materialien wiesen vernachlässigbare absorptive Eigenschaften auf. Der Proben­träger wurde dann mit Wachs auf einem Probenhalter fixiert. Der beladene Proben­halter wurde anschließend auf der Proben­bühne in der μ -CT-Probenkammer befestigt. Im letzten Schritt erfolgte die Eingabe der benötigten Scan-Parameter.

Die Kehl­köpfe wurden für die Scans nach Größe in drei Gruppen mit festgelegter „Image Pixel Size“ von 24,5 μm , 26,6 μm und 30,9 μm eingeteilt. Aufgrund der Probengröße mussten Oversize-Scans durchgeführt werden. Hierbei wurde automatisch die Probe in mehrere Scans in der Vertikalachse aufgeteilt und in der Rekonstruktion zu einem vollständigen bündigen Datensatz komplementiert. In der vorliegenden Arbeit erfolgten zwei Übergrößen­scans pro Kehl­kopf. Dichte, Größe und Dicke der einzelnen Proben entschieden über die Auswahl des Filters und somit über die benötigte Spannung, Stromstärke und die resultierende Belichtungsdauer.

Stromspannung/-stärke	Belichtungszeit	∅ Gesamtdauer/Scan
100 kV / 80 μA	600 ms	2,5 Std.
80 kV / 80 μA	750 ms	3 Std.
130 kV / 60 μA	1150 ms	4 Std.

Tab. 4: *Verwendete Einstellungen von Stromspannung und -stärke; resultierende Belichtungszeit in Millisekunden; durchschnittliche Gesamtscandauer in Stunden*

Die Rotationsschritte betragen $0,20^\circ$ mit je vier Frames. Je nach Probe wurde entweder ein 1 mm Aluminium-Filter oder ein 0,25 mm Messing-Filter verwendet. In der Datenerfassung folgenden Rekonstruktion wurden die Datensätze in BMP mit 256 Grauwertstufen gespeichert.

2.4.6 Kontrastierung mit Phosphorwolframsäure

Bei fünf Präparaten war aufgrund der limitierten Röntgenkontrastierung von der nicht oder kaum mineralisierten Knorpelstruktur keine ausreichende Darstellung der Mess­ebenen durch die alleinige μ -CT-Aufnahme möglich. Dies machte eine Kontrastierung mit Phosphorwolframsäure (PTA) notwendig. (Metscher 2009) konnten nachweisen, dass Phosphorwolframsäure bei gleichzeitig einfacher Handhabung eine hochkontrastierte Darstellung von formalinfixiertem Weichgewebe ermöglicht. (Pauwels et al. 2013) darauf hin, dass eine 24 Stunden Kontrastierung nicht ausreichend sei und erst nach einigen Tagen der Einbettung ausreichende Ergebnisse mit Phosphorwolframsäure erbracht werden konnten.

Die eigenen Präparate wurden 4 Tage in 3,5-5% Phosphorwolframsäure (Firma Morphisto GmbH) eingelegt. Anschließend erfolgte der μ -CT-Scan (vgl. Abb. 5). PTA-Aufnahmen wurden an KK#1, KK#2, KK#7, KK#10, KK#16 und KK#27 durchgeführt.

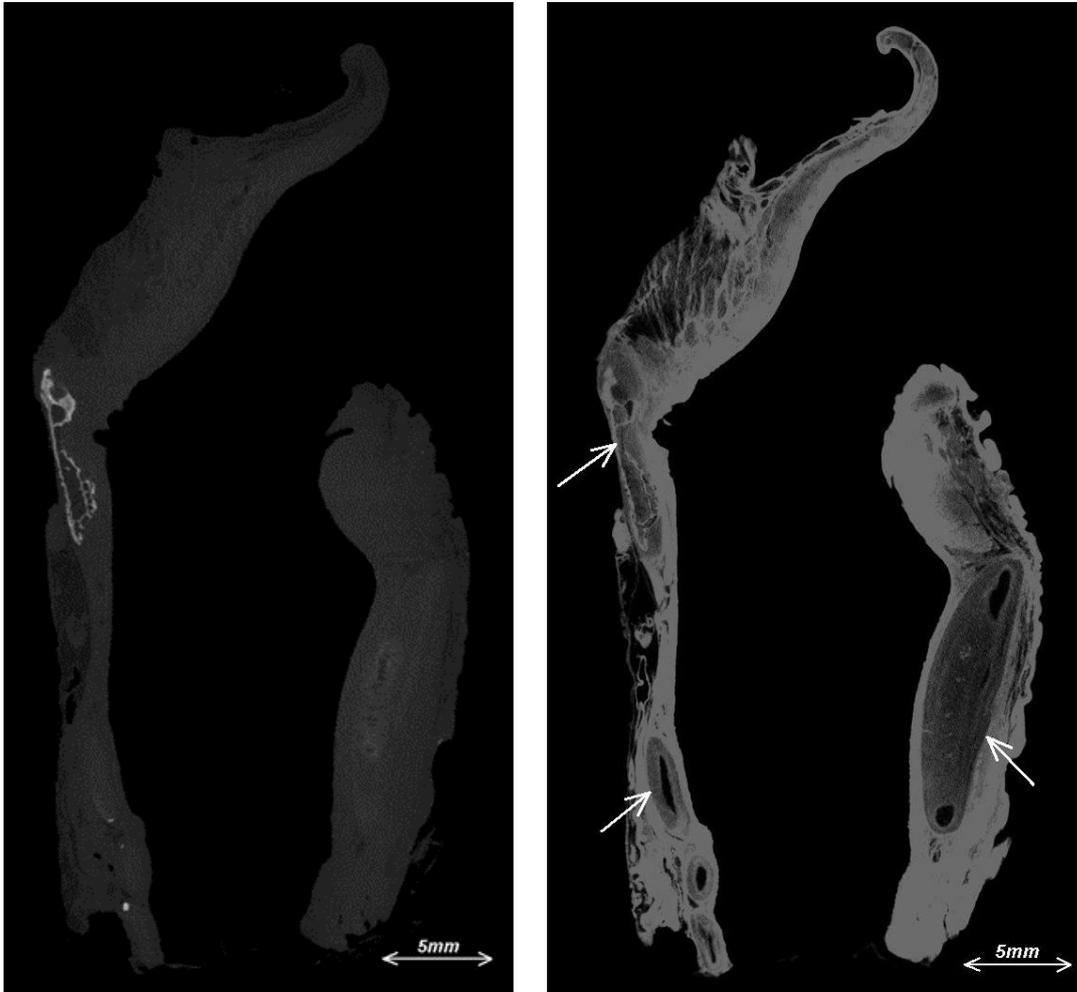


Abb. 5: Sagittalschnitt durch die Inzisur; links: Kehlkopf vor Kontrastierung mit Phosphorwolframsäure; rechts: Kehlkopf nach viertägiger Kontrastierung mit Phosphorwolframsäure, Pfeile zeigen verbesserte Visualisierung des weniger kalzifizierten Knorpels; KK#16 (weiblich, 64 Jahre)

2.4.7 Bildanalysesoftware

Zur Analyse und Bearbeitung der Datensätze wurde DATAVIEWER® (Version 1.5.2.4 64-Bit © 2004-2011 SkyScan, © 2012-2015 Bruker microCT) und CT ANALYSER® (Version 1.16.4.1 64 Bit © 2003-2011 SkyScan, © 2012-16 Bruker mircoCT) verwendet. Die Screenshots wurden in PAINT® (Microsoft Windows Version 6.1 © Microsoft Corporation) gespeichert und im JPG-Format gesichert.

2.4.8 Statistische Auswertung

Zur Auswertung der Ergebnisse wurde IBM © SPSS ® Statistics (Version 24.0.0.0, 64-Bit) genutzt.

2.5 Definition der Messpunkte und -strecken

Nach dem rezenten Schrifttum ist die Konfiguration des Kehlskelettes näherungsweise symmetrisch (Tillmann et al. 1987; Sprinzi et al. 1999; Moll und Moll 2006; Drake et al. 2007; Schiebler und Korf 2007). Ob und ggfs. wie weitreichend eine funktionelle Beanspruchung, konkret eine einseitige Biegebeanspruchung beim Vorliegen von nur einem Kehlkopfoberhorn zu einer Modifikation der primär angelegten Grundform führt, sollte durch vergleichende Messungen eingegrenzt werden. Die Auswahl der Messpunkte und der durch sie gebildeten Strecken mussten zur Reproduzierbarkeit mehrere Kriterien erfüllen: Die ausgewählten Messpunkte mussten weitgehend altersunabhängig, dementsprechend unabhängig vom Ossifikationsgrad, konstant darstellbar sein sowie eine Aussage zur Gesamtkonfiguration vom Kehlkopf (Schild- und Ringknorpel) erlauben. Für den Schildknorpel wurden 4 Messdistanzen und 6 Winkel, für den Ringknorpel 7 Messstrecken und ein 1 Winkel bestimmt (siehe Abb. 6 bis 12).

2.5.1 Vermessungen des Schildknorpels

Für die Vermessungen wurden in der Sagittal-, in der Transversal- und der in der Koronalebene tomographische Ebenen entlang von anatomischen Landmarken definiert. Als gut reproduzierbares Merkmal galt die Mitte der oberen Inzisur des Schildknorpels als Bezugspunkt für die überwiegende Zahl der Messungen. Von hier wurde zunächst der Winkel zwischen rechter und linker Schildknorpelplatte bestimmt; somit der Winkel zwischen den verlängerten Geraden \overline{AB} und \overline{CD} an deren Schnittpunkt (Abb. 7). Dieser Winkel wurde als Winkel α definiert (Abb. 6). Er entspricht der Summe aus dem Winkel β (gebildet zwischen dem Lot, gefällt auf die Horizontaltangente in A, und der Strecke \overline{AB}) und dem Winkel γ (zwischen der Geraden \overline{CD} und dem Lot, gefällt auf die Horizontaltangente in B). Im weiteren Schritt erfolgte die Distanzmessung, von der Inzisur ausgehend (Punkt A bzw. B), zu den dorsalen Schildknorpelplattenenden jeweils der rechten (\overline{AB}) und der linken (\overline{CD}) Seite. Der dritte Schritt umfasste die Messung der Distanz zwischen den dorsalen Schildknorpelplattenenden (\overline{BD}) (Abb. 7).

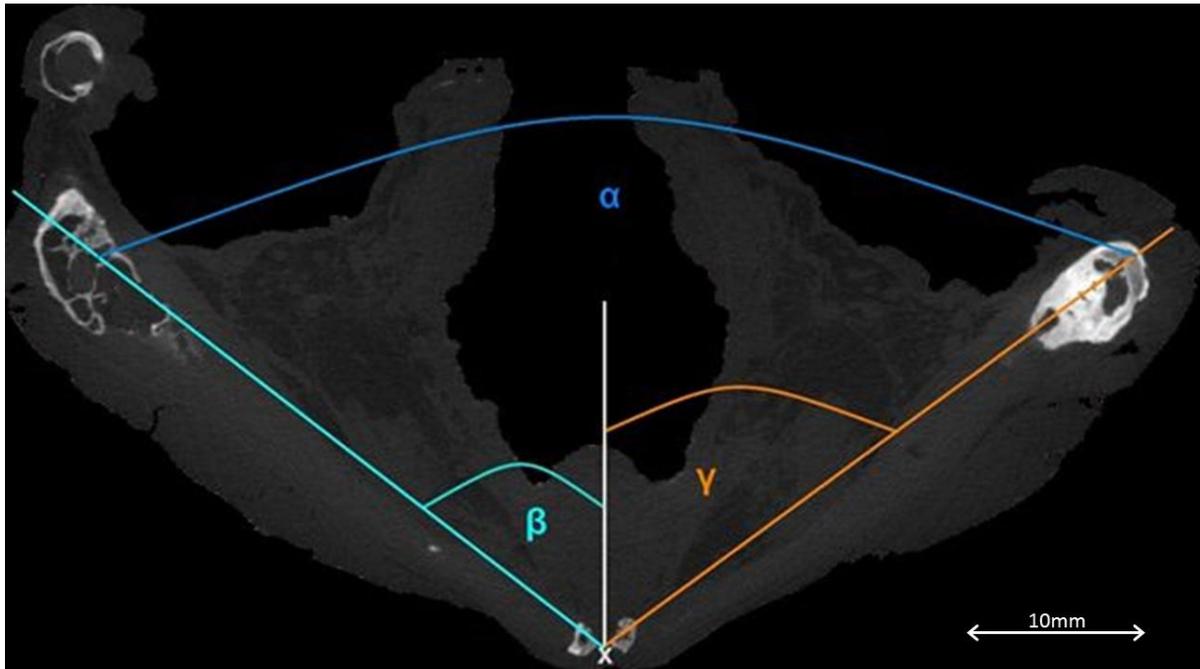


Abb. 6: Transversalschnitt auf Schildknorpelinzisurhöhe; Winkel α (blau) = Winkel zw. Schildknorpelplatten; Winkel β (türkis) – gebildet durch das Lot auf die Horizontaltangente in A und der Strecke \overline{AB} ; Winkel γ (orange) - zwischen der Geraden \overline{CD} und dem Lot auf die Horizontaltangente in B; X entspricht der Inzisur; Schildknorpel KK#16

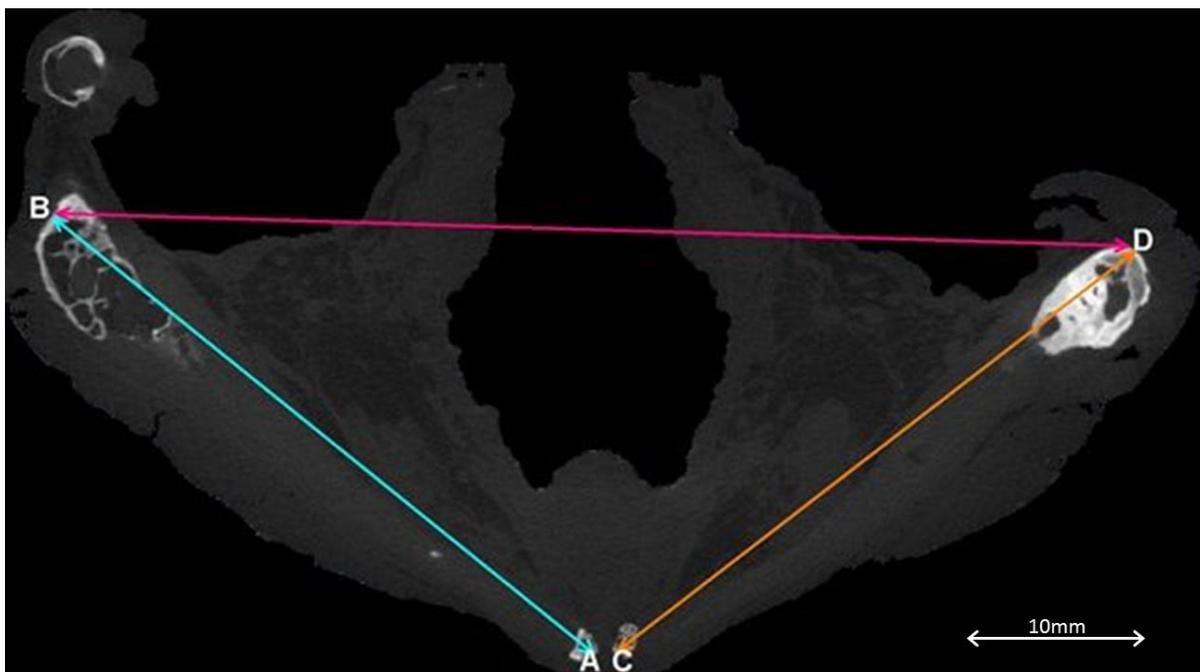


Abb. 7: Transversalschnitt auf Schildknorpelinzisurhöhe; x = Inzisur; türkiser Pfeil = Strecke \overline{AB} ; oranger Pfeil = Strecke \overline{CD} ; grellrosa Pfeil = Strecke \overline{BD} ; Schildknorpel KK#16

Durch das Ende der Schildknorpelplatte wurde koronal eine weitere Schnittebene gelegt (Abb. 8). Wegen der uneinheitlichen Verknöcherung und dem unregelmäßigen Verlauf der Hinterkanten der jeweiligen Schildknorpelplattenenden wurde die Ebene im dorsalen Ende positioniert. Dies machte eine Bestimmung der lateralen Neigung der Schildknorpelplatten möglich. Diese Neigung entspricht dem Winkel zwischen dem Lot gefällt auf die horizontale Tangente in den Punkten E bzw. G und den Strecken \overline{EF} (rechte Seite) und \overline{GH} (linke Seite). Die Strecken \overline{EF} und \overline{GH} beschreiben jeweils die Höhen der Schildknorpelplatten. Der Winkel rechts wurde als δ und links als ε benannt.

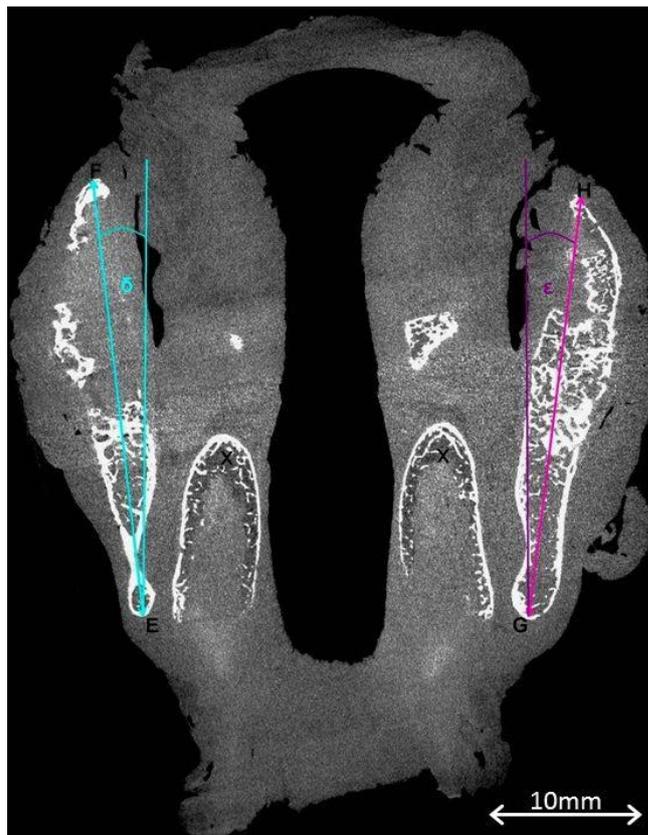


Abb. 8: Koronalschnitt durch den Schildknorpel (dorsaler Rand); X = Ringknorpelanschnitt; Winkel δ (türkis): Lateralneigung der re. Schildknorpelplatte; Winkel ε (grellrosa): Lateralneigung der li. Schildknorpelplatte; Schildknorpel KK#26

Die darauffolgende Messebene stellte den sagittalen Schnitt durch die Schildknorpelkommissurebene dar (Abb. 9). Diese war zur oberen Schildknorpelinzisur ausgerichtet. In diesem Schnittbild konnte die Kommissurhöhe des Schildknorpels und dessen Neigungswinkel nach ventral (Winkel ζ) zur Senkrechten in Grad bestimmt werden und liegt zwischen \overline{IJ} und dem Lot gefällt auf die horizontale Tangente durch I. Die Strecke \overline{IJ} entspricht der Höhe der Kommissur. Dieses Schnittbild erwies sich zur weiteren Beurteilung des Ringknorpels als sinnvoll (siehe unten).

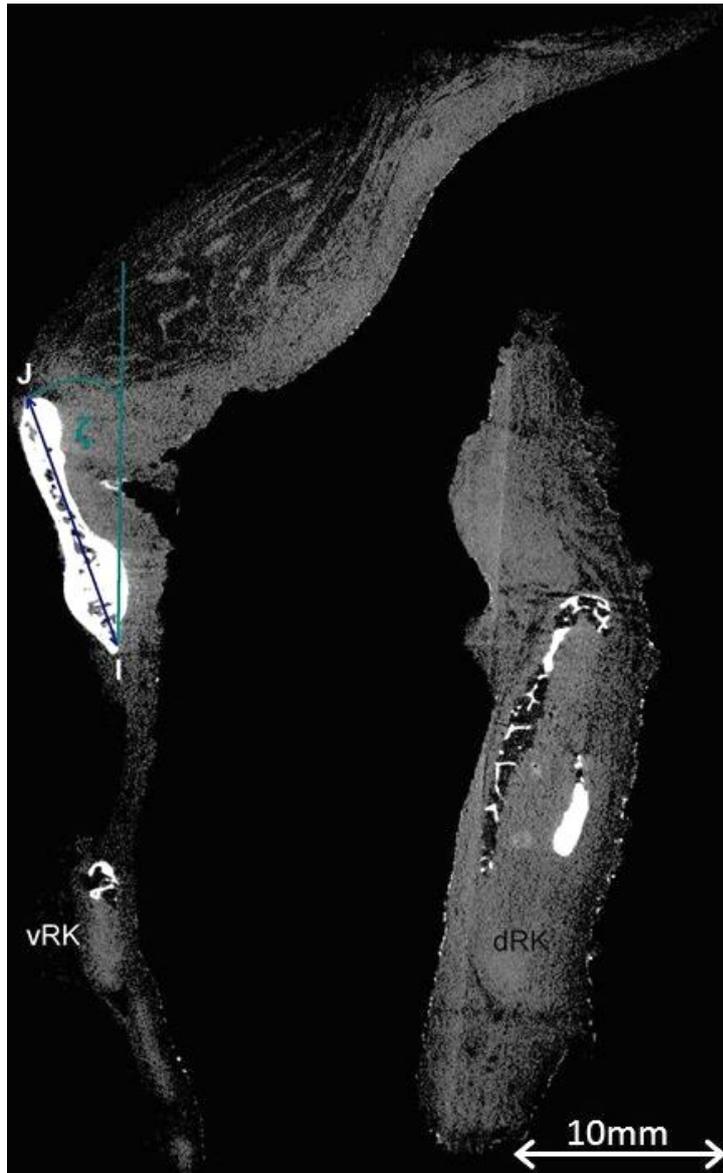


Abb. 9: Sagittalschnitt durch die Schildknorpelkommissur; vRK = ventraler Ringknorpelanteil; dRK = dorsaler Ringknorpelanteil; dunkelblauer Pfeil: Schildknorpelkommissur (\overline{IJ}) und daran angelegt der Winkel ζ (türkis) als dessen Neigungswinkel nach ventral zum Lot auf die horizontalen Tangente in I; Schild- und Ringknorpel KK#22

2.5.2 Messungen am Ringknorpel

Für die Vermessung des Ringknorpels wurde die Transversal- und die Sagittalschnittebene gewählt. Die transversale Ebene wurde im DATAVIEWER® standardmäßig in das obere Drittel des ventralen Ringknorpelanteils gelegt. Aufgrund der deutlich unterschiedlichen Ossifikationsausprägung zwischen den einzelnen individuellen Kehlköpfen musste gelegentlich nach kaudal abgewichen werden. Das anschließend gespeicherte Schnittbild wurde in CT ANALYSER® geöffnet. Im ersten Schritt erfolgte die Vermessung in Bezug auf die Zentralachsen im Quasizentrum (Zentrum/Mittelpunkt Z) des Rings der ventro-dorsalen und der lateralen Ausdehnung des durch den Ringknorpel gebildeten inneren Rings (Abb. 10). Für die Vermessung wurde annäherungsweise ein Kreis als Grundform des Ringknorpels vorausgesetzt. Als Ansatzpunkt diente entweder bereits gebildeter Knochen als auch der Knorpel durch Anpassung der Graustufen zur Differenzierungsoptimierung zum nicht knorpeligen Gewebe. Ergänzt wurde im nächsten Schritt die Vermessung der Durchmesser des äußeren Rings ebenfalls in ventro-dorsaler und lateraler Ausdehnung (Abb. 11).

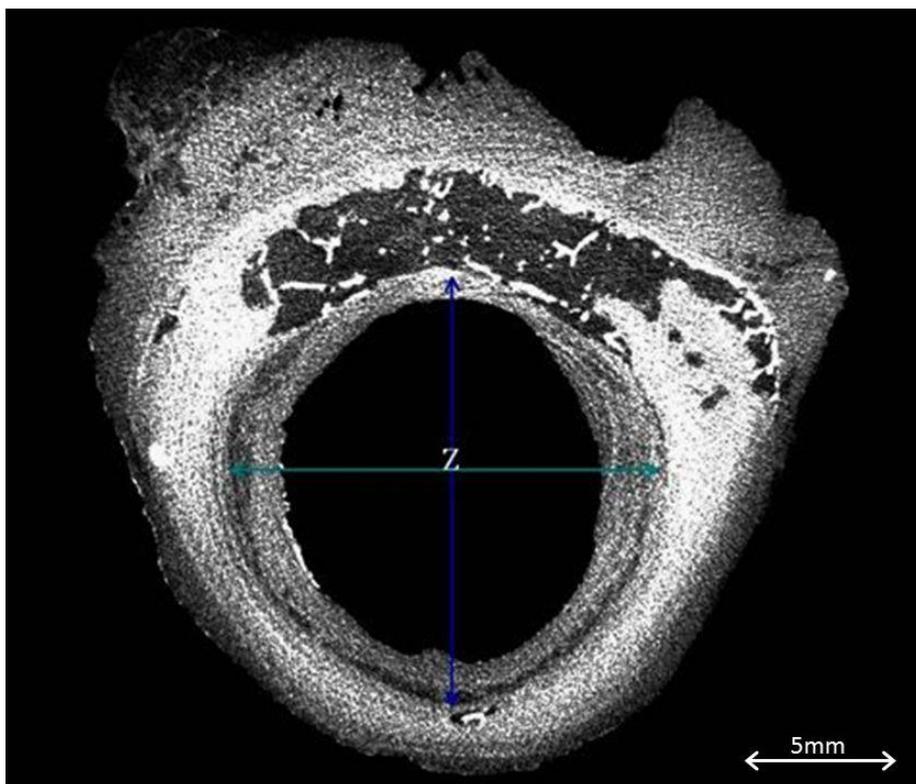


Abb. 10: Transversalebene; blauer Pfeil: ventro-dorsale Ausdehnung des inneren Rings; grüner Pfeil: laterale Ausdehnung des inneren Rings; Z= Zentrum; Ringknorpel KK#40

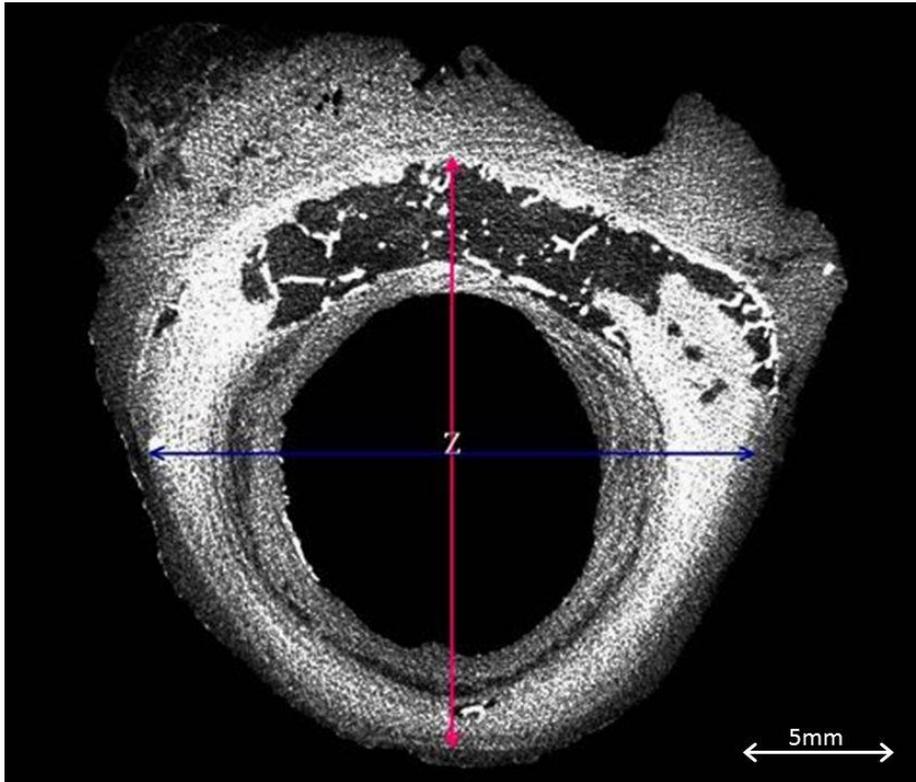


Abb. 11: Transversalebene; grellrosa Pfeil: ventro-dorsale Ausdehnung des äußeren Rings; blauer Pfeil: laterale Ausdehnung des äußeren Rings; Z = Zentrum; Ringknorpel KK#40

Die zweite Dimension bezog sich auf die Sagittalebene, die im Sagittalschnitt durch die Schildknorpelkommissur verlief. Neben der Beurteilungsmöglichkeit der Schildknorpelkommissur diente dieser Schnitt auch der weiteren Ringknorpelvermessung. Die in Abb. 12 gezeigten Punkte entsprechen: Punkt K dem unteren Rand des ventralen Ringknorpelanteils, Punkt L dem oberen. Punkt M stellt den unteren Rand des dorsalen Ringknorpelanteils, Punkt N den oberen dar. In dieser Schnittebene war somit die maximale Höhe des Ringknorpels ventral (\overline{KL}) und dorsal (\overline{MN}), die Distanz von der Oberkante des ventralen zur Oberkante des dorsalen Ringknorpelrings (\overline{LN}) sowie die Neigung des hinteren Ringknorpelanteils nach dorsal erkennbar. Der Neigungswinkel (als Winkel η benannt) des dorsalen Rands des Ringknorpels wurde zwischen der durch die Punkte M und N gebildeten Strecke und dem Lot, gefällt auf die Horizontaltangente, in Punkt M gemessen (vgl. re. Bild in Abb. 12).

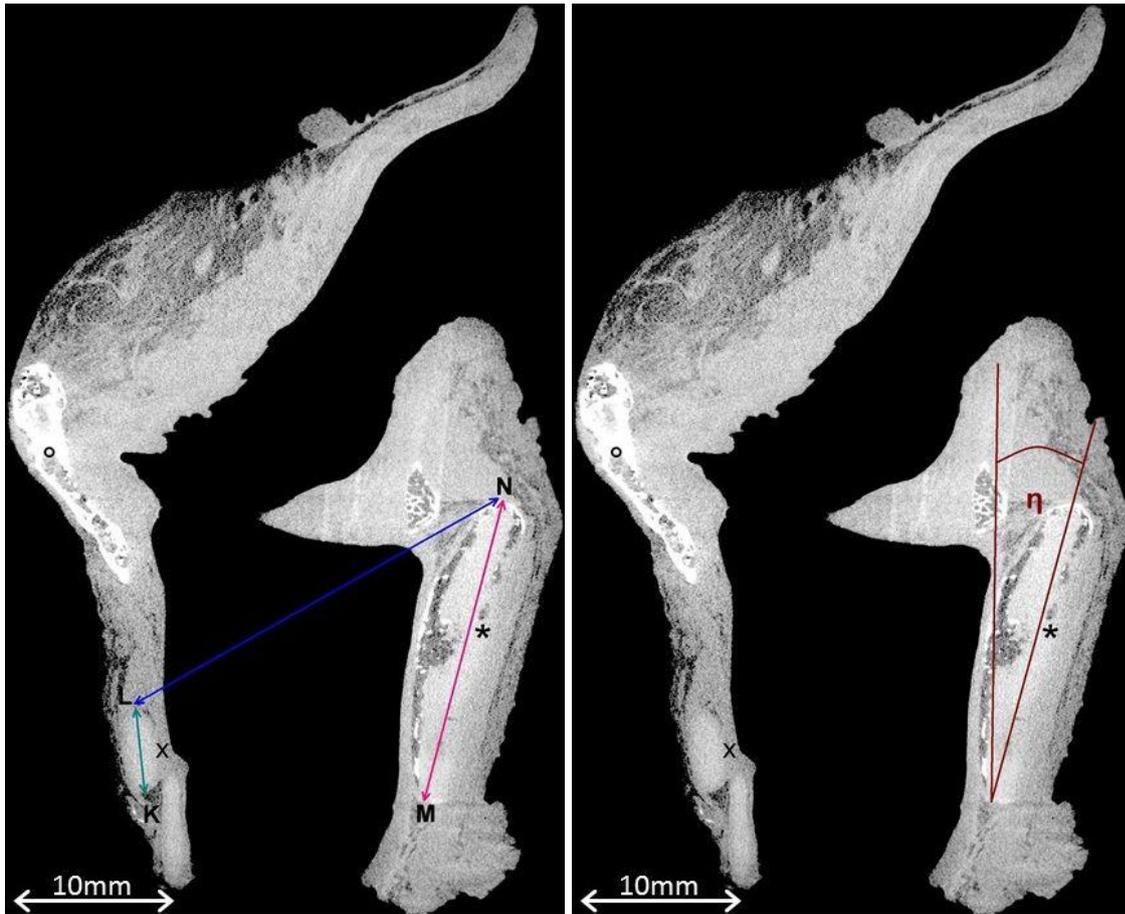


Abb. 12: Sagittalschnitt; O = Schildknorpelkommissur; * = Ringknorpel dorsal; X = Ringknorpel ventral; linkes Bild – roter Pfeil: Höhe des Ringknorpels ventral (\overline{KL}); gelber Pfeil: Distanz der Oberkanten von Ringknorpel dorsal u. ventral (\overline{LN}); grüner Pfeil: Höhe Ringknorpel dorsal (\overline{MN}); rechtes Bild – Winkel η (türkis) zeigt die Neigung des Ringknorpels dorsal; KK#43

Übersicht Bezeichnungen der Variablen:

AGE	Alter
SEX	Geschlecht
SUM_OH	Anzahl Schildknorpeloberhörner
W_SKP_INZ	Winkel α
W_SKP_IN_RE	Winkel β
W_SKP_IN_LI	Winkel γ
W_SK_RE	Winkel δ
W_SK_LI	Winkel ϵ
L_SK_INZ_RE	Strecke \overline{AB}
L_SK_INZ_LI	Strecke \overline{CD}
D_SKP	Strecke \overline{BD}
H_SKK	Strecke \overline{IJ}
W_SKK	Winkel ζ
H_RK_V	Strecke \overline{KL}
H_RK_D	Strecke \overline{MN}
W_RK_DN	Winkel η
D_RK_OS	Strecke \overline{LN}
L_RK_IR_VD	ventro-dorsaler \emptyset (innen) RK
L_RK_IR_LL	latero-lateral \emptyset (innen) RK
L_RK_AR_VD	ventro-dorsaler \emptyset (außen) RK
L_RK_AR_LL	latero-lateral \emptyset (außen) RK

3 Ergebnisse

Von 49 Kehlkopfpräparaten wurden mikrocomputertomographische Aufnahmen angefertigt. Es lagen 23 weibliche und 26 männliche Präparate vor. Aus dem Gesamtkollektiv wurden insgesamt 23 Paarungen gebildet (siehe Tab. 1 und Tab. 2). Bei 23 Kehlkopfpräparaten lag die reguläre Schildknorpeloberhornanlage (11 weibliche, 12 männlich), bei 21 weiteren (10 weiblich und 11 männlich) nur die einseitige Schildknorpeloberhornanlage (bei 6 fehlte das rechte und bei 15 das linke Schildknorpeloberhorn) vor und bei den restlichen 5 Präparaten (2 weibliche, 3 männlich) fehlte diese Anlage beidseitig – diese sind nur additiv gepaart worden. Insgesamt wurden 18 Messstrecken ausgewählt (10 für den Schildknorpel und 8 für den Ringknorpel). An 5 Präparaten wurde eine zusätzliche Färbung mit PTA durchgeführt.

3.1 Deskriptive Analyse des Gesamtkollektivs

Im ersten Schritt der Auswertung erfolgte die deskriptive Analyse für das Gesamtkollektiv unabhängig von Geschlecht und der Kehlkopfkonfiguration (Tab. 5 und 6). Im Vordergrund stand hier die Darstellung von Mittelwert, Standardfehler, Standardabweichung und der Minima und Maxima. Bei der graphischen Darstellung fanden sich keine erheblichen Abweichungen von einer Normalverteilung, sodass für die weiteren statistischen Verfahren auch Normalverteilung angenommen wurde. Beispielhaft ist die Werteverteilung für Winkel α aufgeführt.

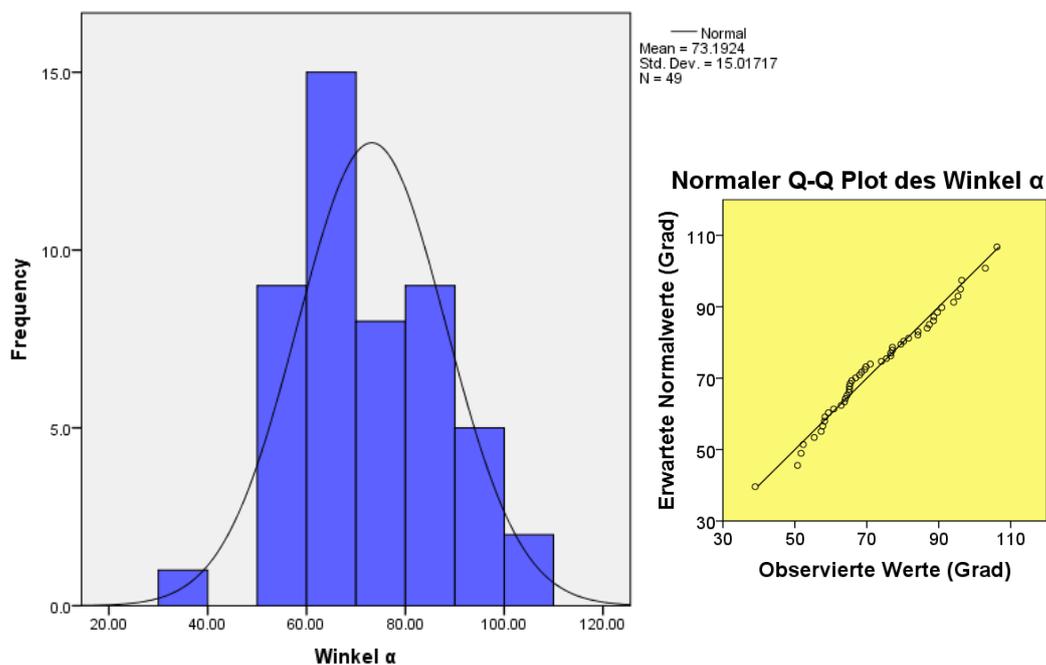


Diagramm 2: Beispiel für die näherungsweise vorhandene Normalverteilung der Werte anhand des Winkel α ; Frequency = Häufigkeit; Diagramm re.: Darstellung eines Q-Q Plots für den Winkel α - die Linie gibt die Normalverteilung wieder. Um diese schwanken die einzelnen Messwerte

Deskriptive Analyse für das Gesamtkollektiv (Schildknorpel)

		Winkel α	Winkel β	Winkel γ	Strecke BD	Strecke AB	Strecke CD	Winkel δ	Winkel ϵ	Strecke IJ	Winkel ζ
n	valide	49	49	49	49	49	49	49	49	49	49
Mittel		73.19	36.44	36.75	39.25	35.15	34.35	13.91	11.60	14.87	20.85
Std.-Fehler		2.15	1.24	1.045	0.79	0.92	1.07	0.92	0.87	0.47	1.15
Median		69.76	35.44	35.31	39.7	36.64	34.69	12.6	11.47	14.81	20.44
Std.-Abweichung		15.02	8.68	7.32	5.516	6.45	7.46	6.42	6.07	3.28	8.05
Varianz		225.52	75.38	53.51	30.43	41.61	55.6	41.18	36.8	10.79	64.81
Minimum		38.98	17.07	21.91	26.77	19.46	20.41	4.00	-3.06	8.50	0.26
Maximum		106.21	55.33	51.75	54.57	46.50	53.78	28.13	30.28	22.20	36.94
Perzentile	25	63.35	32.21	30.74	35.85	29.75	29.26	9.01	8.1	12.58	16.31
	50	69.76	35.43	35.31	39.7	36.64	34.69	12.6	11.47	14.81	20.44
	75	85.54	40.58	44.24	42.8	40.31	39.53	18.31	14.75	17.39	26.43

*sämtliche Winkelangaben in Grad; Strecken- und Durchmesserangaben (= \emptyset) in mm

Tab. 5: Deskriptive Analyse für das Gesamtkollektiv der Messstrecken am Schildknorpel; Winkel in Grad, Längen/Durchmesser in mm

Deskriptive Analyse für das Gesamtkollektiv (Ringknorpel)

		ventro- dorsaler \emptyset (innen)	latero-lat- eraler \emptyset (innen)	latero-lat- eraler \emptyset (außen)	ventro- dorsaler \emptyset (außen)	Strecke MN	Strecke KL	Strecke LN	Winkel η
n	valide	49	49	49	49	49	49	49	49
Mittel		19.00	19.37	25.86	25.04	22.2	6.41	29.06	10.1
Std.-Fehler		0.38	0.41	0.5	0.48	0.38	0.16	0.51	0.68
Median		19.51	19.8	26.62	25.95	22.17	6.55	29.11	9.92
Std.-Abweichung		2.67	2.87	3.46	3.36	2.62	1.15	3.54	4.75
Varianz		7.14	8.183	11.99	11.27	6.89	1.32	12.52	22.57
Minimum		14.33	13.75	19.55	19.68	17.61	3.87	24.23	1.06
Maximum		25.28	24.96	32.95	33.11	26.96	10.18	36.18	20.24
Perzentile	25	16.5	16.85	22.045	21.71	19.69	5.98	25.20	6.13
	50	19.51	19.8	26.62	25.95	22.17	6.55	29.11	9.92
	75	21.36	21.37	28.25	28.03	24.37	6.89	32.33	13.27

*sämtliche Winkelangaben in Grad; Strecken- und Durchmesserangaben (= \emptyset) in mm

Tab. 6: Deskriptive Analyse für das Gesamtkollektiv der Messstrecken am Ringknorpel; Winkel in Grad, Längen/Durchmesser in mm

3.2 Geschlechtsdimorphismus

Aus den Ergebnissen der morphometrischen Analyse (Tab.8 und 9) wird ein Geschlechtsdimorphismus deutlich. Er betraf an der Schildknorpelplatte die gemessenen Strecken: Länge der Schildknorpelplatten, Abstand zwischen den dorsalen Enden der Schildknorpelplatten, Höhe der Schildknorpelkommissur sowie die vermessenen Dimensionen des Ringknorpels. Stets fand sich ein $p=0,01$ (siehe Tab. 7). Die Mittelwerte waren im männlichen Kollektiv größer als die Mittelwerte im weiblichen. Dagegen waren die Winkel zwischen den Schildknorpelplatten in der Transversalebene im männlichen Kollektiv ($65,48^\circ$) statistisch gesichert kleiner als die im weiblichen ($81,92^\circ$); $p<0,001$, Mittelwertdifferenz von $16,44^\circ$. Auch die Neigung der Schildknorpelplatten nach lateral (Winkel δ [re.] und Winkel ε [li.]) wies eine Mittelwertdifferenz von $7,34^\circ$ (Winkel δ mit $p<0,001$) und $6,42^\circ$ (Winkel ε mit $p<0,001$) ergab einen Geschlechtsdimorphismus. Auch ergab sich eine Abhängigkeit vom Geschlecht für den Winkel der Schildknorpelkommissur und der Dorsalneigung des dorsalen Ringknorpelrandes. Die Mittelwerte für Winkel ζ (Winkel der Schildknorpelkommissur zum Lot [kranio-kaudal] in der unteren Inzisur) und η (Dorsalneigung des dorsalen Ringknorpelrandes) waren im weiblichen Kollektiv kleiner als im männlichen. Nur die p-Werte für den Winkel ζ und η lagen im Vergleich zum Rest ($p<0,001$) bei $p=0,039$ bzw. bei $p=0,149$.

Mittelwertvergleich in Abhängigkeit vom Geschlecht

Schildknorpel: t-Test zum Mittelwertvergleich				Ringknorpel: t-Test zum Mittelwertvergleich			
	p-Wert	Mittelwertdifferenz	Standardfehler d. MW-Diff.		p-Wert	Mittelwertdifferenz	Standardfehler d. MW-Diff.
Winkel α	0.000	16.43824	3.62251	ventro-dorsaler \emptyset (innen) RK	0.000	-3.20370	0.61557
Winkel β	0.000	8.91834	2.14837	vatero-lateraler \emptyset (innen) RK	0.000	-4.05090	0.57932
Winkel γ	0.000	7.54726	1.80716	vatero-lateraler \emptyset (außen) RK	0.000	-5.04721	0.67931
Strecke BD	0.002	-4.65331	1.44425				
Strecke AB	0.000	-9.54495	1.24234	ventro-dorsaler \emptyset (außen) RK	0.000	-4.69248	0.68890
Strecke CD	0.000	-10.15505	1.56810				
Winkel δ	0.000	7.33594	1.51695	Strecke MN	0.000	-3.56327	0.55337
Winkel ε	0.000	6.41936	1.48429	Strecke KL	0.001	-1.08759	0.29222
Strecke IJ	0.000	-4.08935	0.73958	Strecke LN	0.000	-5.17379	0.69134
Winkel ζ	0.039	-4.73100	2.22423	Winkel η	0.149	-1.97137	1.34399

Tab. 7: t-Test zur Prüfung der Abhängigkeit vom Geschlecht; \emptyset = Durchmesser, p-Wertangaben von 0.000 entsprechen $p<0,001$

Schildknorpelplattenwinkel: Geschlechtervergleich

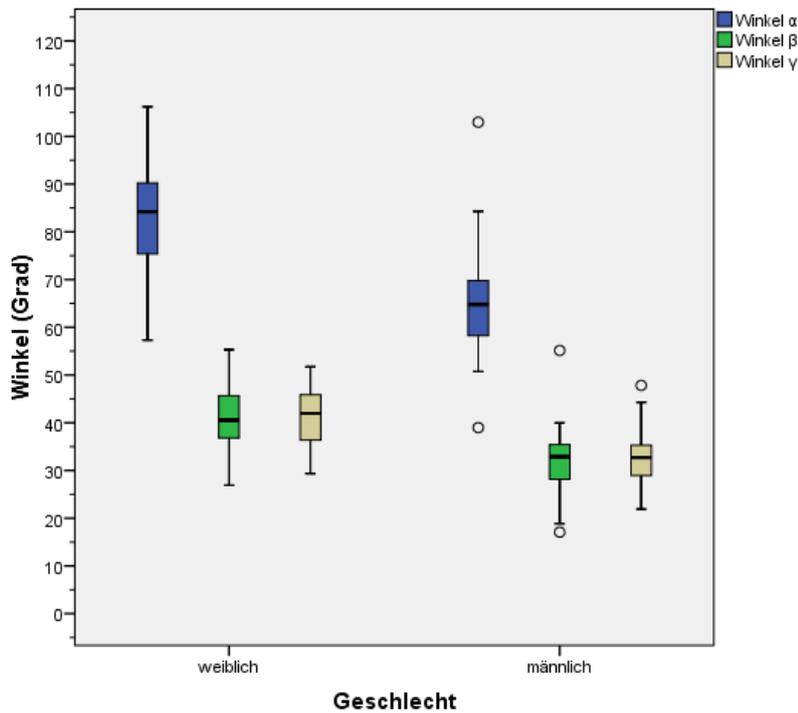


Diagramm 3: Geschlechtervergleich für die gemessenen Winkel zw. den Schildknorpelplatten (transversal). Winkel α (Gesamtwinkel zw. Schildknorpelplatten), Winkel β (Winkel zw. re. Schildknorpelplatte und ventro-dorsaler Achse), Winkel γ (Winkel zw. li. Schildknorpelplatte und ventro-dorsaler Achse); Mittelwerte – weibliches Kollektiv: Winkel α (81,92°), Winkel β (41,18°), Winkel γ (40,75°); Mittelwerte – männliches Kollektiv: Winkel α (65,48°), Winkel β (32,26°), Winkel γ (33,2°); p-Werte je <0,001

Lateralneigung der Schildknorpelplatten: Geschlechtervergleich

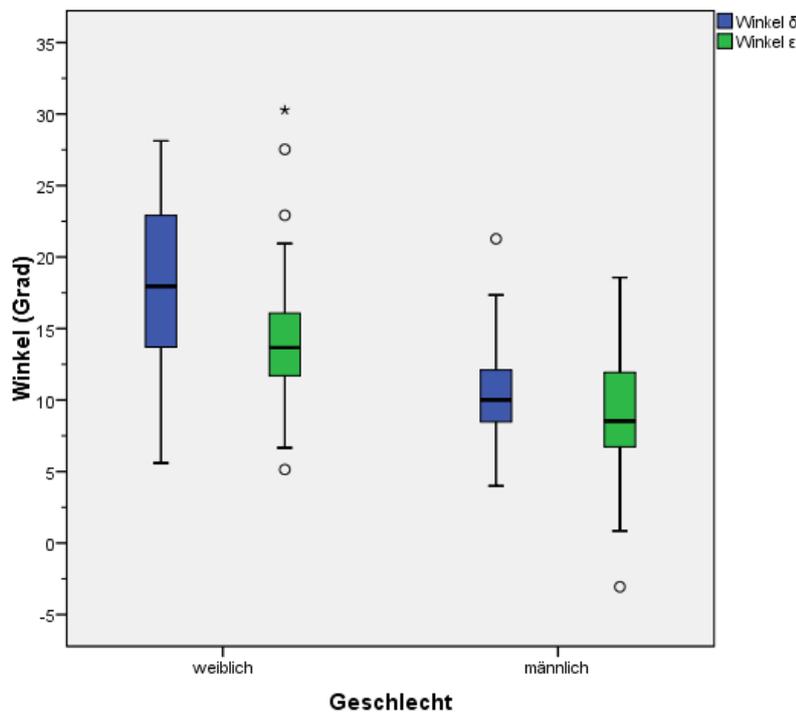


Diagramm 4: Geschlechtervergleich für den Neigungswinkel der Schildknorpelplatten nach lateral (koronal); gemessen zum kranio-kaudalen Lot. Winkel δ (Lateralneigungswinkel der re. Schildknorpelplatte), Winkel ϵ (Lateralneigungswinkel der li. Schildknorpelplatte) Mittelwerte – weibliches Kollektiv: Winkel δ (17,81°), Winkel ϵ (15,01°); Mittelwerte – männliches Kollektiv: Winkel δ (10,47°), Winkel ϵ (8,59°); p-Werte je <0,001

Schildknorpelplattenlänge: Geschlechtervergleich

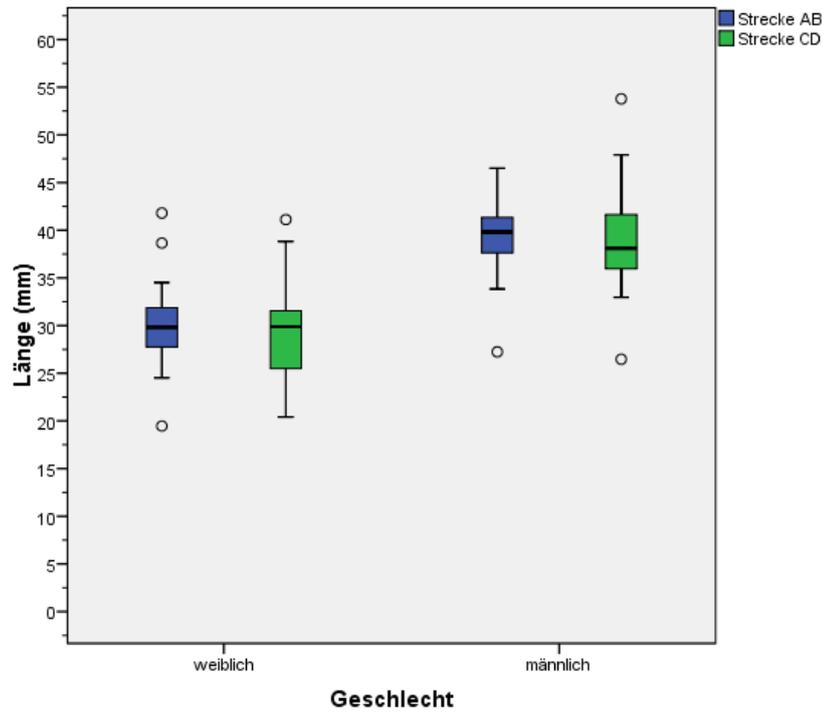


Diagramm 5: Geschlechtervergleich für die Schildknorpelplattenlänge (transversal) der rechten und linken Seite. Strecke AB (Länge der re. Schildknorpelplatte), Strecke CD (Länge der li. Schildknorpelplatte), Mittelwerte – weibliches Kollektiv: Strecke AB (30,08mm), Strecke CD (28,96mm); Mittelwerte – männliches Kollektiv: Strecke AB (39,63mm), Strecke CD (39,13mm); p-Werte je <0,001

Deskriptive Analyse nach Geschlecht (Schildknorpel)

Geschlecht			Winkel α	Winkel β	Winkel γ	Strecke BD	Strecke AB	Strecke CD	Winkel δ	Winkel ε	Strecke IJ	Winkel ζ	
weiblich	n	valide	23	23	23	23	23	23	23	23	23	23	
	Mittel		81.92	41.18	40.75	36.78	30.08	28.96	17.81	15.01	12.7	18.34	
	Std.-Fehler		2.7	1.5	1.47	1.19	0.95	1.11	1.35	1.24	0.49	1.55	
	Median		84.2	40.54	41.99	35.97	29.83	29.89	17.96	13.67	12.61	19.62	
	Std.-Abweichung		12.94	7.19	7.02	5.65	4.56	5.34	6.49	5.93	2.34	7.41	
	Varianz		167.32	51.62	49.33	31.94	20.75	28.40	42.08	35.12	5.46	54.88	
	Minimum		57.32	26.92	29.32	28.7	19.46	20.41	5.60	5.14	8.50	0.26	
	Maximum		106.21	55.33	51.75	54.57	41.80	41.12	28.13	30.28	18.00	33.56	
	Perzentile	25		74.07	36.24	36.05	33.53	27.67	25.01	13.01	11.47	10.64	14.04
		50		84.2	40.54	41.99	35.97	29.83	29.89	17.96	13.67	12.61	19.62
		75		90.85	46.9	45.97	38.99	32.04	31.71	24.32	16.55	14.31	23.71
männlich	n	valide	26	26	26	26	26	26	26	26	26	26	
	Mittel		65.48	32.26	33.2	41.44	39.63	39.13	10.47	8.59	16.79	23.07	
	Std.-Fehler		2.45	1.53	1.1	0.872	0.81	1.2	0.78	0.87	0.55	1.58	
	Median		64.7	32.86	32.73	41.23	39.83	38.12	10.02	8.53	16.53	21.64	
	Std.-Abweichung		12.4	7.78	5.62	4.45	4.14	5.62	3.97	4.43	2.78	8.076	
	Varianz		153.8	60.47	31.52	19.75	17.15	31.43	15.77	19.65	7.75	65.21	
	Minimum		38.98	17.07	21.91	26.77	27.24	26.47	4.00	-3.06	10.42	1.16	
	Maximum		102.97	55.15	47.82	49.99	46.50	53.78	21.27	18.57	22.20	36.94	
	Perzentile	25		58.13	27.78	28.87	39.85	37.59	35.94	8.35	6.33	15.05	18.43
		50		64.77	32.86	32.73	41.23	39.83	38.12	10.02	8.53	16.53	21.64
		75		70.06	35.81	35.53	43.78	41.36	42.13	12.13	11.95	18.44	29.95

*sämtliche Winkelangaben in Grad; Strecken- und Durchmesserangaben (= Ø) in mm

Tab. 9: Deskriptive Analyse für das weibliche und männliche Kollektiv (Schildknorpel)

Deskriptive Analyse nach Geschlecht (Ringknorpel)

Geschlecht			ventro-dorsaler Ø (innen)	latero-lateraler Ø (innen)	latero-lateraler Ø (außen)	ventro-dorsaler Ø (außen)	Strecke MN	Strecke KL	Strecke LN	Winkel η	
weiblich	n	valide	23	23	23	23	23	23	23	23	
	Mittel		17.30	17.22	23.18	22.55	20.30	5.83	26.31	9.05	
	Std.-Fehler		0.50	0.50	0.64	0.62	0.45	0.24	0.61	0.96	
	Median		16.74	16.57	21.77	21.67	19.62	5.98	25.10	7.80	
	Std.-Abweichung		2.39	2.41	3.08	2.97	2.17	1.17	2.91	4.58	
	Varianz		5.73	5.81	9.47	8.85	4.69	1.37	8.45	21.01	
	Minimum		14.33	13.75	19.55	19.68	17.61	3.87	24.23	3.32	
	Maximum		25.28	24.96	32.95	33.11	26.88	7.69	36.18	18.79	
	Perzentile	25		16.12	15.54	21.17	20.90	19.02	4.72	24.57	5.28
		50		16.74	16.57	21.77	21.67	19.62	5.98	25.10	7.80
		75		18.00	18.59	24.69	23.62	20.61	6.70	26.99	11.83
männlich	n	valide	26	26	26	26	26	26	26	26	
	Mittel		20.51	21.27	28.23	27.24	23.87	6.92	31.49	11.03	
	Std.-Fehler		0.37	0.32	0.29	0.35	0.33	0.17	0.37	0.94	
	Median		21.13	21.09	28.07	27.88	23.28	6.69	32.18	11.01	
	Std.-Abweichung		1.91	1.61	1.50	1.76	1.70	0.87	1.88	4.79	
	Varianz		3.65	2.59	2.26	3.10	2.90	0.76	3.53	22.96	
	Minimum		15.92	18.42	24.91	22.86	21.40	6.02	26.93	1.06	
	Maximum		22.97	23.95	30.73	29.15	26.96	10.18	34.38	20.24	
	Perzentile	25		19.60	20.34	27.39	26.59	22.52	6.45	30.12	7.44
		50		21.13	21.09	28.07	27.88	23.28	6.69	32.18	11.01
		75		21.93	22.46	29.50	28.41	25.32	7.17	32.90	13.92

*sämtliche Winkelangaben in Grad; Strecken- und Durchmesserangaben (= Ø) in mm

Tab. 8: Deskriptive Analyse für das weibliche und männliche Kollektiv (Ringknorpel)

3.3 Altersabhängigkeit

Im Hinblick auf eine Altersabhängigkeit waren keine sicheren Unterschiede zu erkennen. Für die meisten Messgrößen zeigten sich keine Veränderungen mit steigendem Alter. In Tabelle 10 ist die Korrelation der einzelnen Messwerte zum Alter dargestellt. Danach lässt sich keine Altersabhängigkeit erkennen.

Alterskorrelation

		Winkel α	Winkel β	Winkel γ	Strecke BD	Strecke AB	Strecke CD	Winkel δ	Winkel ϵ	Strecke IJ
Alter	Pearson Correlation	0.092	0.053	0.125	-0.281	-0.238	-0.104	0.032	-0.013	0.121
	p-Wert	0.531	0.719	0.391	0.051	0.100	0.476	0.828	0.930	0.409
	N valide	49	49	49	49	49	49	49	49	49
		Winkel ζ	ventrodorsaler \emptyset (innen) RK	laterolateraler \emptyset (innen) RK	laterolateraler \emptyset (außen) RK	ventrodorsaler \emptyset (außen) RK	Strecke MN	Strecke KL	Strecke LN	Winkel η
Alter	Pearson Correlation	-0.194	-0.126	-0.085	-0.174	-0.122	-0.166	-0.062	-0.142	0.013
	p-Wert	0.183	0.388	0.560	0.233	0.404	0.253	0.673	0.332	0.927
	N valide	49	49	49	49	49	49	49	49	49

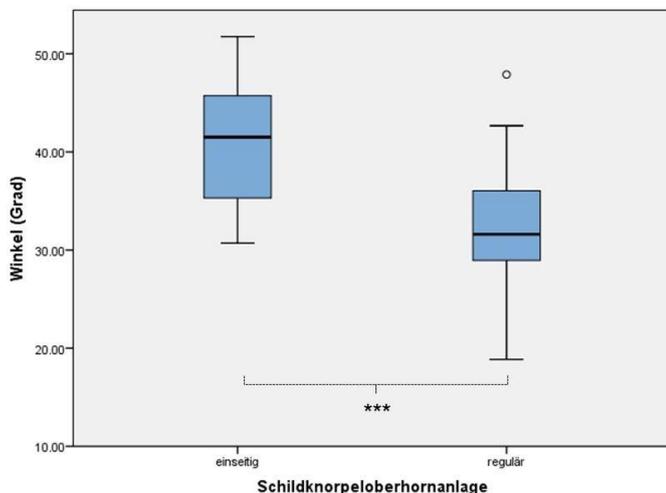
Tab. 10: Alterskorrelation der einzelnen Messwerte. Dargestellt die Pearson-Korrelation, p-Wert und die Anzahl der gewerteten Kehlköpfe; RK = Ringknorpel

3.4 Vergleich der Kollektive und der Symmetrie

Zur Beantwortung der Frage, ob ein symmetrisches Gefüge bei regulärer und/oder bei einseitiger Schildknorpeloberhornanlage zu finden ist, diente ein schrittweise durchgeführter Vergleich zwischen der linken bzw. rechten Seite jedes Kehlkopfes und den beiden gebildeten Kollektiven mit einseitiger und regulärer Anlage unter Berücksichtigung der gebildeten Paare. Die Frage nach einer bestehenden Symmetrie sollte durch die Auswahl einzelner Messvariablen beantwortet werden. Besonderes Interesse galt Variablen, bei denen eine Gegenseite und ein anatomischer Bezug zum dorsalen Anteil der Schildknorpelplatten vorlagen. Hierfür wurden die Messgrößen Winkel β , Winkel γ , Winkel δ , Winkel ε , Strecke \overline{AB} und die Strecke \overline{CD} ausgewählt.

Für den einfachen Rechts-Links-Vergleich für die Variablen Winkel β & Winkel γ ergab der t-Test bei Winkel β ein $p=0,02$ und für den Winkel γ ein $p=0,03$ beim Vergleich von einseitiger und regulärer Anlage. Für die Winkel δ & Winkel ε sowie für die Strecken \overline{AB} & \overline{CD} zeigten sich keine nennenswerten Unterschiede für das einseitige bzw. das reguläre Kollektiv mit p -Werten größer 0,1. Allerdings erfolgte an dieser Stelle zunächst nicht die Berücksichtigung der jeweilig fehlenden Seite des Kollektives mit einseitiger Agenesie, sodass sich als erstes der Vergleich der angelegten Schildknorpeloberhornseite mit der jeweils identischen Seite des Partnerkehlkopfs aus dem Kontrollkollektiv und als

Winkel zw. Schildknorpelplatte und ventrodorsaler Achse: Paarvergleich der Seite mit fehlender Schildknorpeloberhornanlage



Winkel zw. Schildknorpelplatte und ventrodorsaler Achse: Paarvergleich der Seite mit vorhandener Schildknorpeloberhornanlage

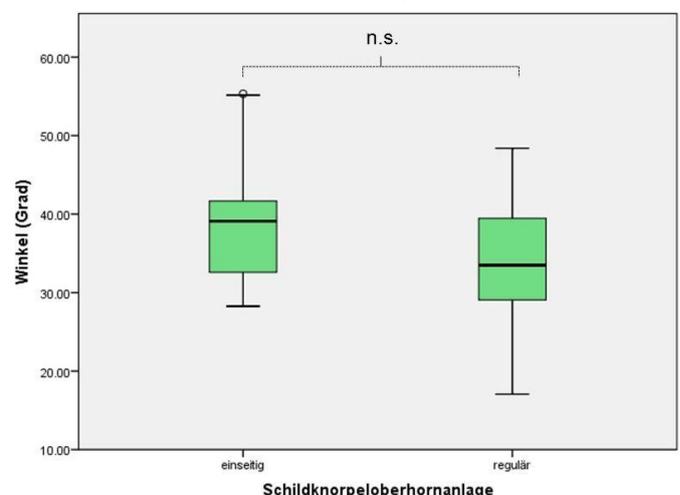
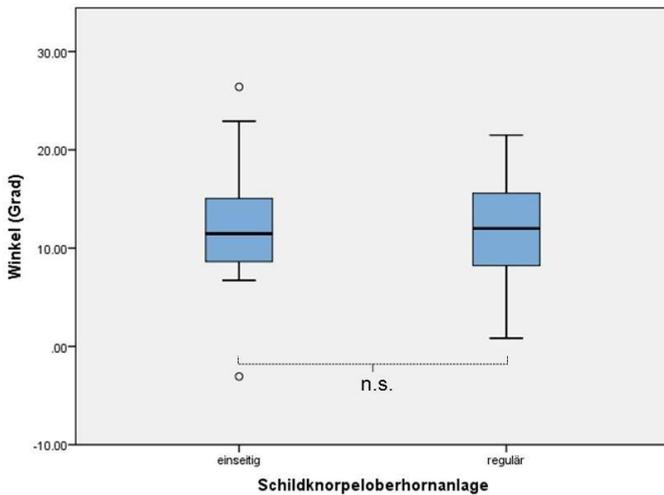


Diagramm 6: Paarvergleich für die Seite mit fehlender (links) und angelegter Schildknorpeloberhornanlage (rechts), ausgehend vom Kollektiv mit singulärer Anlage und dem Kontrollkollektiv. Aufgetragen die gemittelten Winkel in Grad für den Winkel zwischen der Schildknorpelplatte und der ventro-dorsalen Achse (seitenunabhängig); *** = $p < 0,001$, n.s. = nicht signifikant

Lateralneigungswinkel der Schildknorpelplatten: Paarvergleich der Seite mit fehlender Schildknorpeloberhornanlage



Lateralneigungswinkel der Schildknorpelplatten: Paarvergleich der Seite mit vorhandener Schildknorpeloberhornanlage

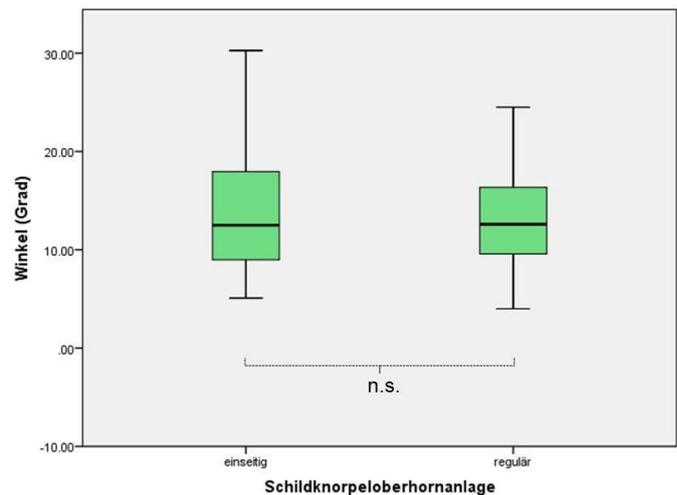


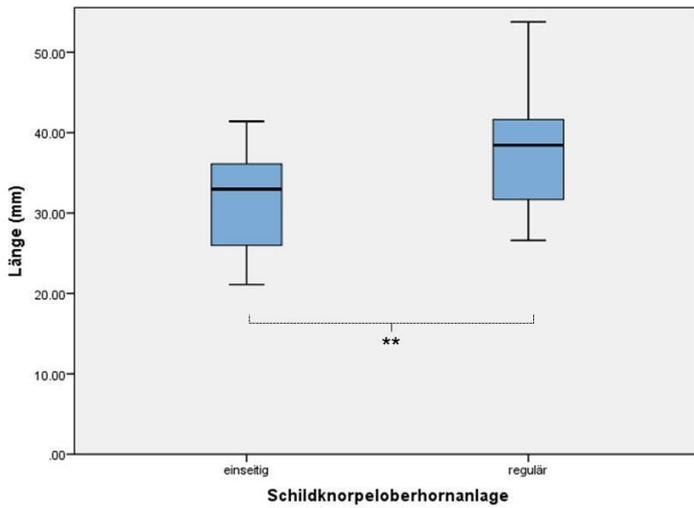
Diagramm 7: Paarvergleich für die Seite mit fehlender (links) und angelegter Schildknorpeloberhornanlage (rechts), ausgehend vom Kollektiv mit singulärer Anlage und dem Kontrollkollektiv. Aufgetragen die gemittelten Winkel in Grad für den Neigungswinkel der Schildknorpelplatte nach lateral (seitenunabhängig); n.s. = nicht signifikant

zweites der Vergleich der nicht angelegten Seite mit der kongruenten Seite des Partnerkehlkopfs anschloss.

Daraus ergaben sich für jeden Kehlkopf und Vergleich mit dem jeweiligen Partner zwei neue Variablen für die drei Messebenen: Winkel der Schildknorpelplatten zur ventro-dorsale Achse (Winkel β & Winkel γ), Lateralneigung der Schildknorpelplatten (Winkel δ & Winkel ϵ) und die ventro-dorsale Länge der Schildknorpelplatten (Strecken \overline{AB} & \overline{CD}). Diese neu gebildeten Variablen wurden jeweils mit Bezug auf die entweder angelegte Seite oder fehlende Seite kodiert.

Während der Neigungswinkel der Schildknorpelplatte nach lateral gemittelt keinen eindeutigen Unterschied zwischen einseitiger Agenesie ($p=0,687$) und regulärer beidseitiger Anlage des Schildknorpeloberhorns ($p=0,362$) erkennen ließ (Diagramm 7), traf das auf die Länge der Schildknorpelplatten und den Winkel β bzw. Winkel γ nicht zu. Die Länge war bei einseitiger Anlage kürzer - der Winkel hingegen größer (Diagramm 6, 8). Der t-Test ergab der Vergleich mit der fehlenden Schildknorpeloberhornanlage ein $p<0,001$ für den Winkel zwischen den Schildknorpelplatten (Mittelwertdifferenz: $8,66^\circ$) und ein $p=0,003$ für die Schildknorpelplattenlänge (Mittelwertdifferenz: $6,41$ mm). Ein Unterschied ist daher anzunehmen.

Schildknorpelplattenlänge: Paarvergleich der Seite mit fehlender Schildknorpeloberhornanlage



Schildknorpelplattenlänge: Paarvergleich der Seite mit vorhandener Schildknorpeloberhornanlage

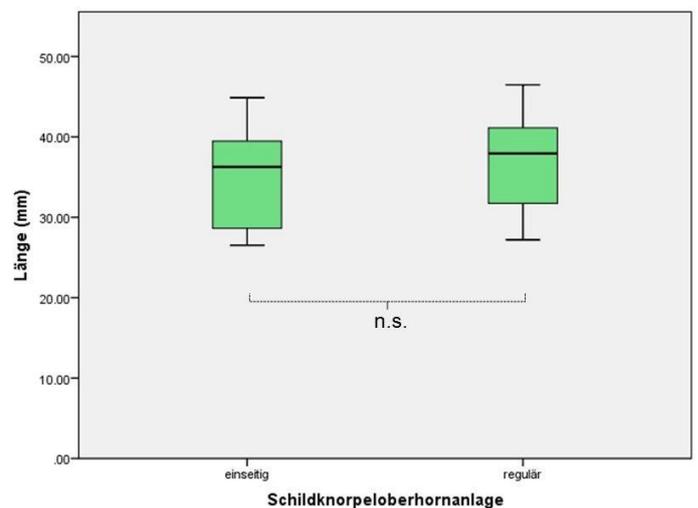


Diagramm 8: Paarvergleich für die Seite mit fehlender (links) und angelegter Schildknorpeloberhornanlage (rechts), ausgehend vom Kollektiv mit singulärer Anlage und dem Kontrollkollektiv; gemittelte Länge in mm für die Länge der Schildknorpelplatten (ventro-dorsal); n.s. = nicht signifikant, ** = $p < 0,01$

Die Beantwortung der Symmetriefrage benötigte einen weiteren Ansatz: In einem ideal symmetrischen Körper ergibt die Differenz der kongruenten Seiten Null. Je weiter die Kontur einer Struktur von der Symmetrie abweicht, desto größer muss der Differenzbetrag sein. Diese Überlegung galt es, auf die zwei Hauptkollektive zu übertragen. Im Mittel konnte für die Differenz der lateralen Neigungswinkel der Schildknorpelplatten kein Unterschied zwischen den Kollektiven nachgewiesen werden ($p=0,817$ und Mittelwertabweichung = $0,28^\circ$).

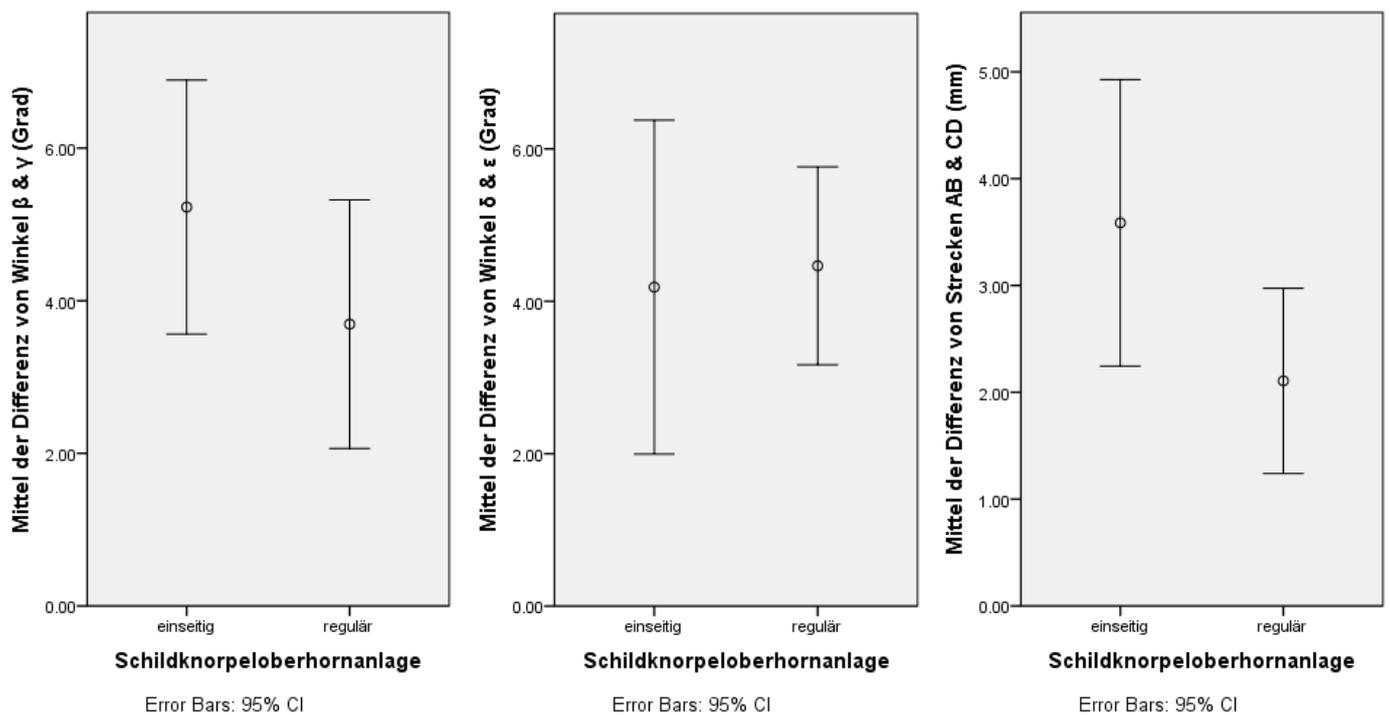


Diagramm 9: Gemittelte Differenzen für die Messebenen: Schildknorpelplattenwinkel zur gedachten ventro-dorsalen Achse (links); lateraler Neigungswinkel der Schildknorpelplatte (mittig); Länge der Schildknorpelplatten in der transversalen Ebene (rechts)

Keine signifikanten Unterschiede ergaben sich zwischen den beiden Kollektiven im t-Test für zwei die Symmetrie beschreibende Parameter, so für die Länge ($p=0,056$, Mittelwertdifferenz = 1,48 mm) und dem Winkel der Schildknorpelplatten zur ventro-dorsalen Achse ($p=0,178$, Mittelwertdifferenz = $1,53^\circ$), siehe dazu auch Diagramm 9.

Die Summe der errechneten Differenzen wurde in einem Symmetrie-Score zusammengefasst. Dieser Score wurde mit Hilfe einer Z-Transformation erstellt. Diese diente der ausgeglichenen Gewichtung der einfließenden Variablen unabhängig von ihrem eigentlichen Betrag. Es ergab sich dabei ein $p=0,139$ und eine Mittelwertdifferenz = 0,95, so dass auch für den Symmetrie-Score wahrscheinlich kein Unterschied zwischen einseitiger und regulärer Anlage vorliegt. Bei vollständig fehlender Schildknorpeloberhornanlage errechnete sich ein $p=0,284$ mit einer Mittelwertdifferenz von 0,99.

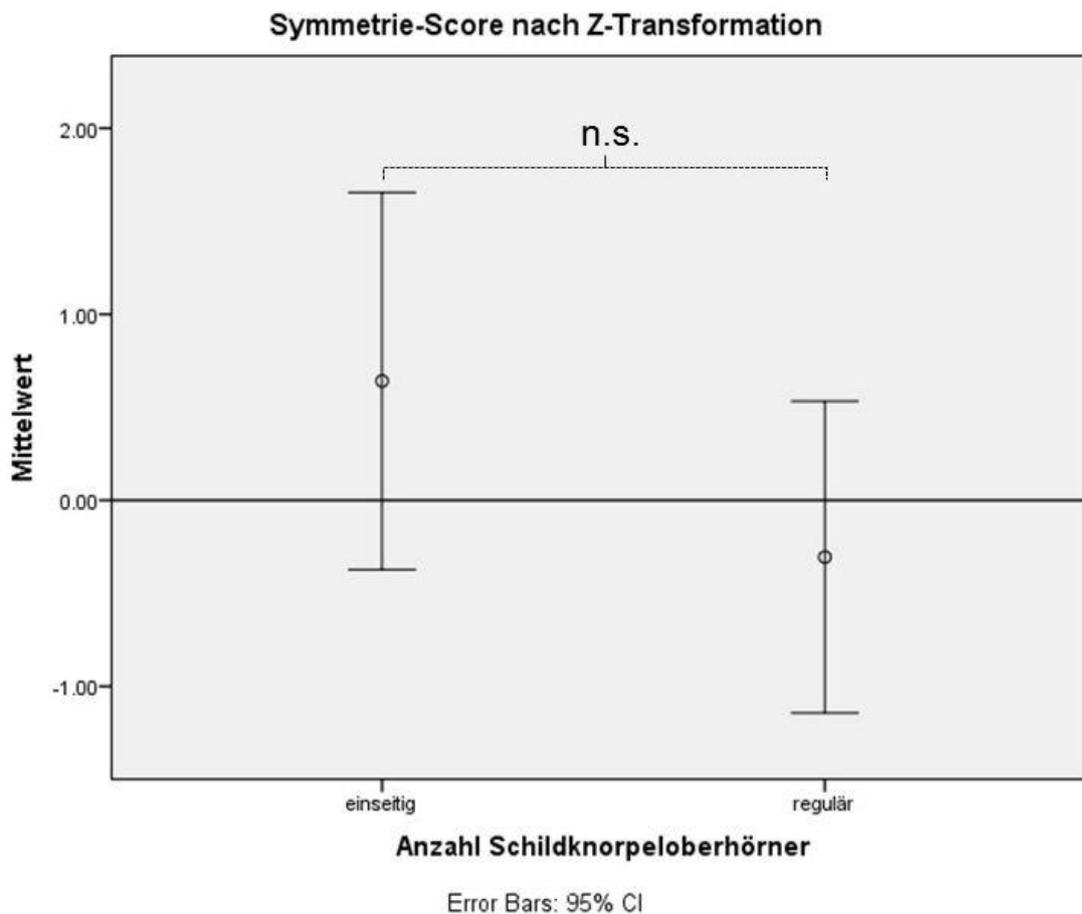


Diagramm 10: Darstellung des Symmetrie-Scores – entspricht der Summe der in Diagramm 9 aufgeführten Differenzen nach Z-Transformation (dimensionslos); $p=0,139$, Mittelwertdifferenz = 0,95; n.s. = nicht signifikant

3.5 Hauptkomponentenanalyse

Zusammenfassend wurde ein weiteres statistisches Verfahren, die Hauptkomponentenanalyse, zur Visualisierung der gemessenen Werte in ihrer Ganzheit eingesetzt. Sie stellte ein nützliches Werkzeug dar, um die einzelnen Variablen in ihrem Gesamtkontext ins Verhältnis zu bringen. Aus der Vielzahl der statistischen Variablen wurden aussagekräftige Linearkombinationen errechnet. Diese Hauptkomponenten an sich fungierten lediglich als Hilfsmittel, um einen Bezugspunkt für die eigentlichen Variablen zu verkörpern. Diese Darstellung ließ es zu, ohne eine Quantifizierung Vermutungen über den Bezug der Variablen untereinander aufgrund ihrer ähnlichen Beziehungen zu den Hauptkomponenten zu diskutieren.

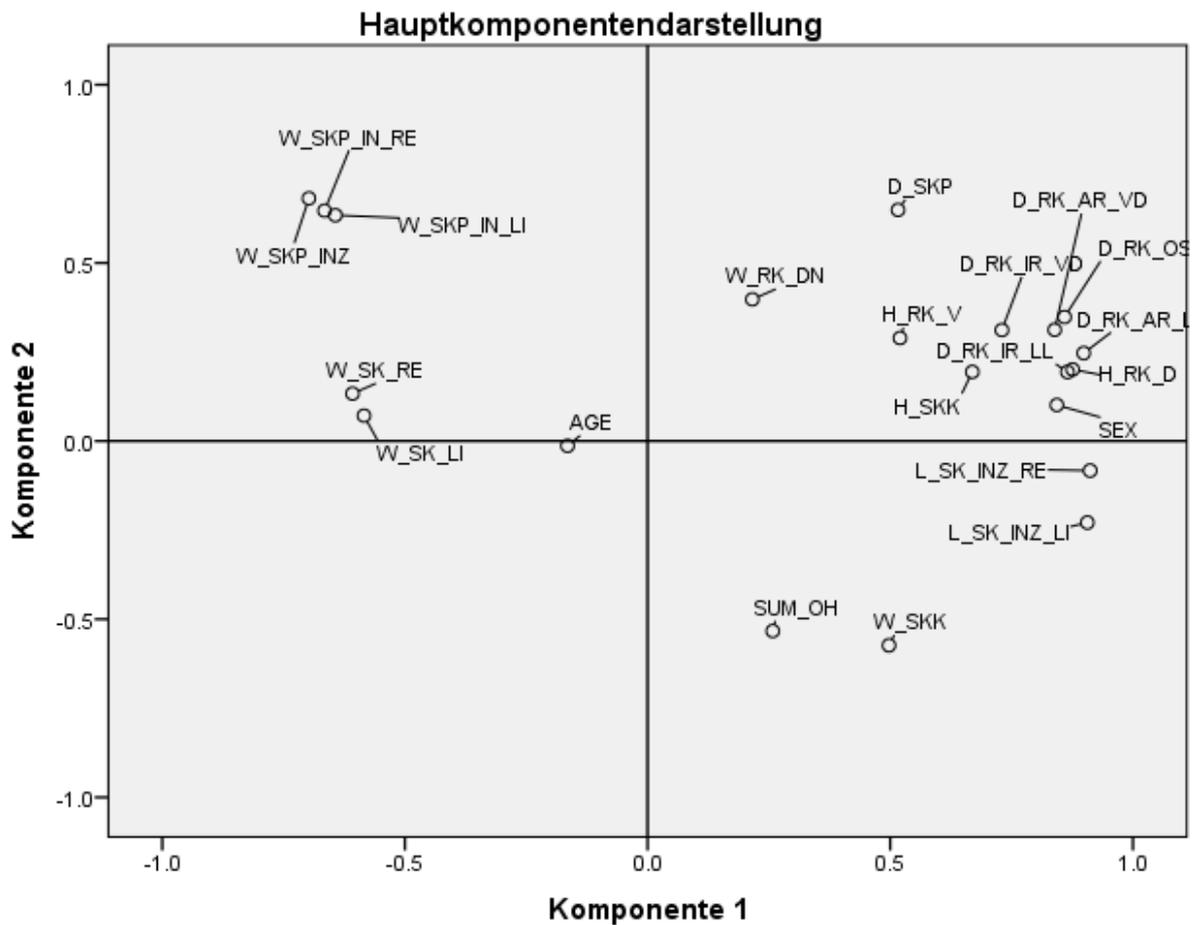


Diagramm 11: Darstellung der einzelnen Messvariablen im Verhältnis zu den zwei wesentlichen Hauptkomponenten

Übersicht Bezeichnungen der Variablen:

AGE	Alter
SEX	Geschlecht
SUM_OH	Anzahl Schildknorpeloberhörner
W_SKP_INZ	Winkel α
W_SKP_IN_RE	Winkel β
W_SKP_IN_LI	Winkel γ
W_SK_RE	Winkel δ
W_SK_LI	Winkel ε
L_SK_INZ_RE	Strecke \overline{AB}
L_SK_INZ_LI	Strecke \overline{CD}
D_SKP	Strecke \overline{BD}
H_SKK	Strecke \overline{IJ}
W_SKK	Winkel ζ
H_RK_V	Strecke \overline{KL}
H_RK_D	Strecke \overline{MN}
W_RK_DN	Winkel η
D_RK_OS	Strecke \overline{LN}
L_RK_IR_VD	ventro-dorsaler \emptyset (innen) RK
L_RK_IR_LL	latero-lateral \emptyset (innen) RK
L_RK_AR_VD	ventro-dorsaler \emptyset (außen) RK
L_RK_AR_LL	latero-lateral \emptyset (außen) RK

4 Diskussion

Bei der Beurteilung eines Tötungsdelikts als Folge von Gewalt gegen den Hals stellt sich grundsätzlich die Frage, ob auch bereits ein leichter Griff gegen den Hals ausreichen könnte, den Tod eines Menschen herbeizuführen. Als theoretische Möglichkeit wird das zwar im Schrifttum erwogen, ausgelöst durch einen Karotis-Sinus-Reflex bei erheblicher kardialer Vorbelastung, letztlich aber verneint (Henßge 1990; Kleemann et al. 1990; Brinkmann 2004; Dettmeyer 2011; Dettmeyer et al. 2015). So gäbe es bisher im gesamten rezenten Schrifttum keine gesicherte Kasuistik, die einen solchen Reflextod belegen könnte. Selbst bei erheblicher direkter Gewalt wie beim Kampfsport wurde der Reflextod nicht beschrieben (Misliwetz und Denk 1990).

Unter demselben Aspekt, nämlich zu Verletzungsfolgen beispielsweise durch geringe Krafteinwirkung, beispielsweise durch einen leichten Zug an der Kleidung oder auch durch einen unbeabsichtigten Griff gegen den Hals, soll der Blick auf das Kehlskelett geworfen werden. Dazu soll zunächst gesagt werden, dass bei regulärer Konfiguration des Schildknorpels mit der Anlage beider Schildknorpeloberhörner selbst bei Asymmetrien des Zungenbeins von hoher Formstabilität auszugehen ist (Scheik 1987). Knöcherne Verletzungen wurden bei diesem Normalbefund nur nach erheblicher direkter oder indirekter Gewalt gegen den Hals beschrieben (Saternus 1979).

Bisher ließen sich allerdings die sehr feinen Verletzungen nicht immer nachweisen. Das könnte sich ändern, wenn die hier verwandte μ -CT-Technik für die postmortale Diagnostik auch routinemäßig eingesetzt werden kann.

Die Frage, ob es zu knöchernen Verletzungen des Kehlskelettes unter nur geringer Gewalteinwirkung kommen könne, stellt sich dann neu, wenn der Kehlkopf selber eine erhebliche Asymmetrie aufweist. Eine solche ist die Agenesie eines der beiden Schildknorpeloberhörner (SOHÖ). Über diese Fehlanlage finden sich vorwiegend im rechtsmedizinischen Schrifttum Häufigkeitsangaben. Eine darüber hinaus nähere radiologische Untersuchung hat es bisher nicht gegeben. Auch fehlen Angaben zur Konfiguration von Schild- und Ringknorpel bei Vorliegen dieser Agenesie.

Im ersten Abschnitt der Diskussion soll noch nicht auf die Agenesie des Schildknorpeloberhorns (SOHO) eingegangen werden. Vielmehr soll unter dem Aspekt der forensischen Verletzungsrekonstruktion die Frage gestellt werden, bei welcher Konfiguration

ein singular vorhanden SOHO unter flächiger Krafteinleitung (Drosseleffekt) besonders frakturgefährdet ist. Zur Beantwortung dieser Frage sollen Ossifikation, Winkelstellung des Horns in der Sagittalebene und Hornkrümmung näher betrachtet werden.

Der zweite Abschnitt gilt der Diskussion der Ergebnisse der morphometrischen Untersuchungen von Schild- und Ringknorpel, auch unter den Aspekten Alternsgang und Geschlechtsdimorphismus. Hier liegt der Schwerpunkt der durchgeführten Untersuchung. Auf diesen Messergebnissen fußen dann Überlegungen zur Vulnerabilität der Schildknorpelplatten (SKP) unter seitlicher Krafteinleitung (Griff an den Hals).

Der dritte Abschnitt dient der Darstellung der Ossifikation der SKP bei Agenesie eines oder beider Schildknorpeloberhörner im intraindividuellen Seitenvergleich. Dadurch werden zusätzliche Details für Beurteilung der Vulnerabilität der SKP unter seitlicher Krafteinleitung geliefert.

4.1 Morphologie und Traumatologie der Schildknorpeloberhörner

Bei der Krafteinleitung in den Hals wird einmal zwischen mittelbaren Verletzungen (Retropharynx und Halswirbelsäule) und unmittelbaren (Oberhaut, Subcutis, Muskulatur, Gefäße, Nerven, Lymphknoten und Kehlskelett) unterschieden. Eine zusätzliche Unterteilung bei unmittelbarer Krafteinleitung kann zwischen „flächig ventral“ (Erhängen, Drosseln, Schlag) und „Punktlast lateral“ (Würgen) erfolgen (Koebeke und Saturnus 1979). Letztere Einteilung bezieht sich direkt auf das Kehlskelett und soll im Folgenden durchgehend verwandt werden.

Wenige Parameter bestimmen das Bruchverhalten der SOHÖ. Das sind der Umfang, die Topographie der Ossifikation, die Konfiguration und die Winkelstellung in der Sagittalebene. Die Ossifikation des SOHO kann unterschiedlich verlaufen. So kann es im Alterungsprozess weitgehend kontinuierlich ossifizieren, wie es in Abb. 15 gut erkennbar wird. Daneben finden sich häufig Verkalkungen oder Ossifikationslücken in den SOHÖ, also Inhomogenitäten. Sie können ein erhebliches Ausmaß erreichen.

Abb.13 zeigt dafür ein Beispiel. Es stammt aus der Kontrollgruppe, d.h. die Anlage ist symmetrisch bei regelrechter Anlage beider SOHÖ.

Unter Bezug auf die Kasuistik muss noch einmal die Frage gestellt werden, ob ein geringes Trauma bereits bei einem symmetrischen Kehlskelett zu einer knöchernen Verletzung führen könnte.

Kasuistik: Bekannt waren aus der Vorgeschichte des 48-jährigen Mannes eine Alkoholkrankheit mit Fettleber und eine hochgradig stenosierende Koronarsklerose, was später autopsisch bestätigt wurde.

Akutsituation: Unter hochgradiger Alkoholisierung (3,48‰) war er unbeobachtet nach vorn auf den Kopf gestürzt und hatte sich dabei eine stark blutende Platzwunde in Stirnmitte zu-gezogen. Mit dieser stark blutenden Kopfplatzwunde war er in seine Wohnung gegangen. Dort war es ihm nicht gelungen, eine ausreichende Blutstillung zu erreichen. Trotzdem setzte er sich in einen Sessel. So wurde er tot aufgefunden. Der geschilderte Ablauf ergab sich aus der Verteilung der Blutspuren.

Gerichtliche Obduktion: Todesursache äußeres Verbluten bei hochgradiger Alkoholin-
toxikation.

Verletzungen: Der Tote wies kein Schädel-Hirn-Trauma auf. Durch die rückwärtige Überstreckung des Halses beim Sturz mit Stirnaufschlag war es weder zu Einblutungen in die Halsweichteile, retropharyngeal noch in der HWS gekommen. Kehlkopf und Zungenbein waren makroskopisch unverletzt ohne Weichteilblutung.

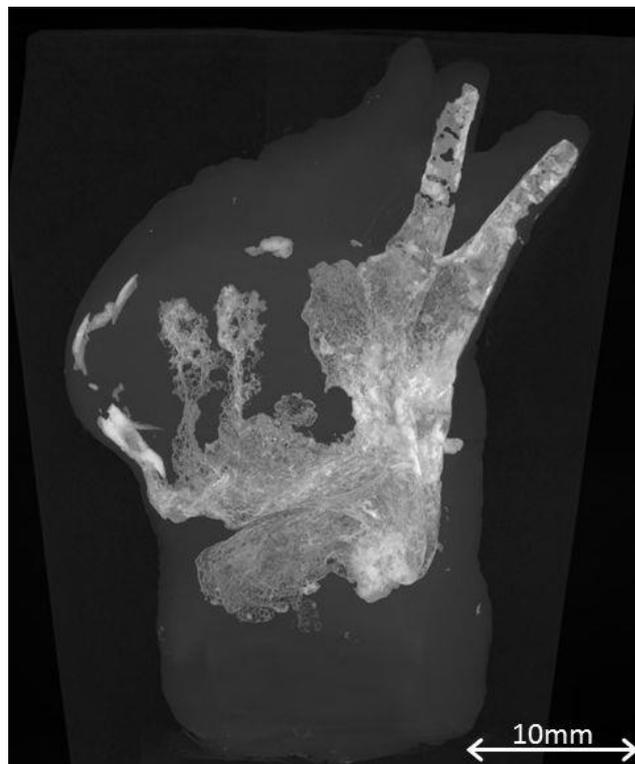


Abb. 13: seitlicher Strahlengang; Maximum Intensity Projection; 48 Jahre, männlich; KK#32

Radiologische Untersuchung:

Symmetrische Ossifikation von Schild- und Ringknorpel sowie umfangreiche Ossifikationsstörungen in beiden SOHÖ. Dabei fanden sich in der seitlichen Darstellung unter leichter Linksdrehung in der μ -CT zwei inkomplette Frakturen im linken SOHO, einmal an dessen Basis mit leichter ventraler Einstauchung und dann in Hornmitte subtotal an der Grenze zu einer linsenförmigen Sklerosierung des Knochens oder Verkalkung. Damit lag im unteren Drittel des linken Horns ein inkomplettes achsengerechtes Fragment vor.

Wegen der leichten Linksdrehung des Objekts erscheint in Abb. 13 der dorsale Neigungswinkel des frakturierten Horns im Vergleich mit dem auf der rechten Seite als zu steil. Hier bestand makroskopisch am Präparat eine Symmetrie. Beide SOHÖ waren in etwa gleichsinnig nach dorsal geneigt.

Fasst man diese Ergebnisse zusammen, dann hat ein geringes indirektes Trauma selbst bei symmetrischer Konfiguration des Kehlkopfs zur knöchernen Verletzung eines der beiden SOHÖ geführt. Die inkomplette Fraktur war nur radiologisch im μ -CT-Bild erkennbar und an das Vorliegen ausgedehnter Ossifikationsstörungen gebunden.

Wendet man diese radiologischen Untersuchungsergebnisse auf die Frage an, wie hoch die Frakturgefährdung bei einer singulären Anlage der SOHÖ ist, dann können sie nicht direkt übertragen werden. Es müssen dabei Ossifikation, Winkelstellung des Horns in der Sagittalebene und Hornkrümmung berücksichtigt werden.

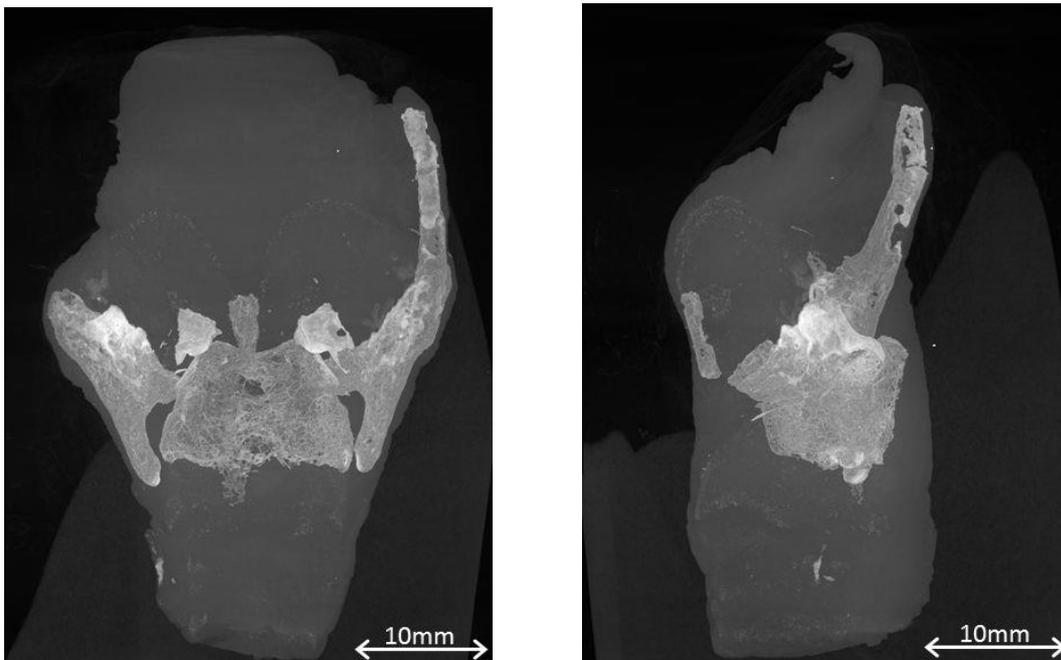


Abb. 14: a.-p. (links) und seitlicher Strahlengang (rechts); Maximum Intensity Projection; Kehlkopf einer 77 Jahre alt gewordenen Frau mit Agenesie des rechten Schildknorpeloberhorns. Inhomogenitäten und große Ossifikationslücken im linken SOHO; KK#16

Wird das Kehlskelett bei „flächig ventraler“ Krafteinleitung (z.B. durch Zug an der Kleidung) an die HWS angestemmt, so ist der Vektor nach dorso-kranial gerichtet. Die Kontaktstellen sind die SOHÖ und die Endbereiche der großen Zungenbeinhörner. Dadurch werden die SOHÖ gegen die Schildknorpelplatten gebogen.

Unter dieser Biegung wäre eine Ossifikationslücke eine Schwachstelle, ein *locus minoris resistentiae*, mit einer dort zu erwartenden Fraktur (Bockholdt et al. 2003). Abb. 14 gibt ein Beispiel für ein großes singuläres Horn mit zahlreichen Inhomogenitäten und ausgedehnten Ossifikationslücken wieder. Weiterhin ist die Spitze des SOHO mit der Cartilago triticaea inkomplett verschmolzen. Auch wenn es sich nicht um ein so zartes Horn handelt, wie es die beiden Hörner in Abb. 13 sind, sondern um ein großes kräftiges Horn, das eine hohe Biegefestigkeit aufweisen dürfte, so zeigt sich doch, dass auch dabei beträchtliche Inhomogenitäten und Ossifikationslücken vorliegen können. Sie müssen es aber nicht, wie Abb. 15 a, b zeigt. Es treten also sowohl bei regulärer als auch bei nur singulärer Anlage Ossifikationslücken und Verkalkungen auf. Sie sind nicht an die Dimensionierung des SOHO gebunden.

Die Größe der biegenden Kraft hängt von der Länge des Hebelarms ab, also der Länge des SOHO, und vom Winkel, den das Horn in der Sagittalebene gegen den Hinterrand des Schildknorpels bildet.

Nach der Winkelstellung lassen sich zwei unterschiedliche Formen unterscheiden, nämlich der langgestreckte nach dorsal gerichtete Typ und der basal bogenförmige (Tasmaska und Hinz 1969). Letzterer geht entweder in eine Steilstellung über oder verläuft insgesamt bogenförmig nach ventral, wobei Scheitelpunkt etwa auf der Hälfte der Länge liegt (Abb. 15).

Im „*Spannungsoptischen Modellversuch*“ zeigte sich, dass die Spannungsmaxima unabhängig vom Typ der Neigung in der Sagittalebene der SOHÖ im unteren Drittel liegen (Saternus et al. 2013). Ein Unterschied zwischen symmetrischer Anlage und singulärem Horn ist nach den Modellversuchen nicht zu erwarten.

Verumkollektiv und Kontrollkollektiv unterschieden sich in Hinblick auf die Winkelstellung der SOHÖ nicht nennenswert.

In Abb. 16 findet sich ein Beispiel für das Vorkommen beider Horn Typen an einem Kehlkopf. Während das primär gerade nach dorsal gerichtete SOHO an seiner Basis frakturiert und leicht nach ventral disloziert worden ist, ist das nach ventral gebogene unverletzt geblieben. Der Grad der Ossifikation ist in beiden Hörnern in etwa gleich.

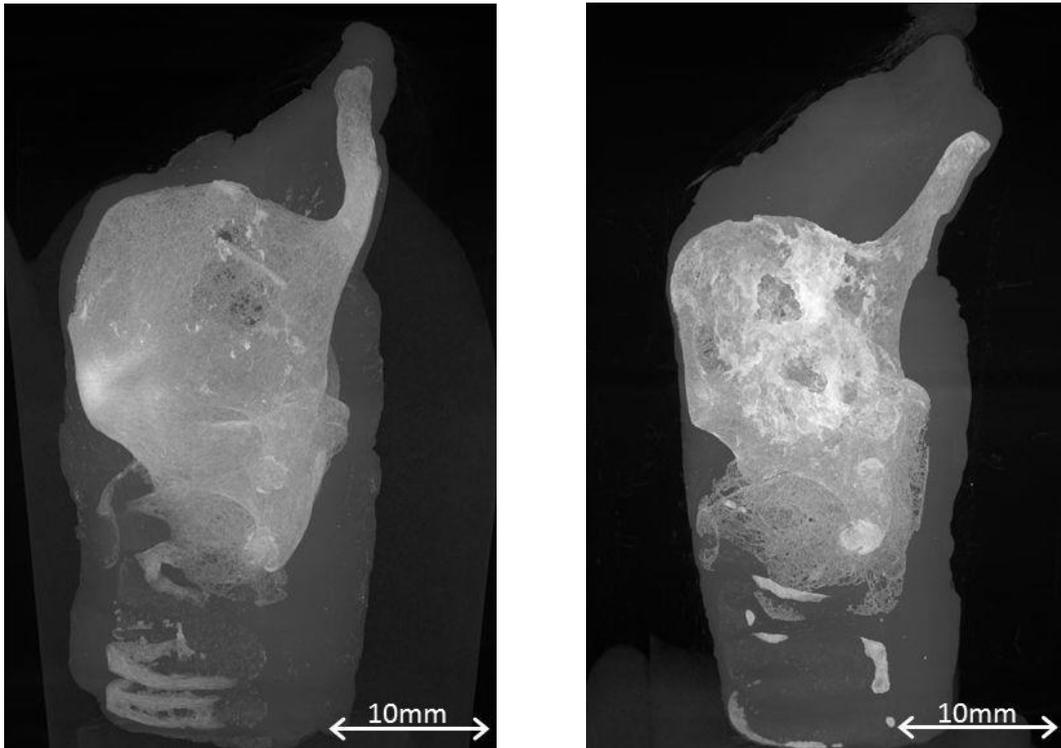


Abb. 15: seitlicher Strahlengang; Maximum Intensity Projection; a) links (KK#48) mit bogenförmigem, nach ventral gerichtetem Schildknorpeloberhorn; b) rechts (KK#16) mit nach dorsal geneigtem Schildknorpeloberhorn

Die beiden Hörner unterschieden sich aber in Hinblick auf die Länge des Hebelarms und auf die Art des Kontakts an der HWS. So ist bei dem ventral geneigten Horn von einem kürzeren Hebelarm und einem flächigen Kontakt mit der HWS auszugehen, umgekehrt bei einem Horn in Steilstellung oder Dorsalneigung von einem Punktkontakt.

Die Winkelstellung erklärt auch die Ergebnisse einer radiologischen Untersuchung von 89 SOHO-Frakturen infolge direkter Gewalt gegen den Hals. Danach wiesen die betroffenen Oberhörner - bis auf einen Fall - einen Winkel von $\leq 180^\circ$ auf (Scheik 1987). Der Messpunkt für die Winkelbestimmung lag in Höhe eines Schnittpunktes, gebildet aus der Achse des SOHO mit einer dorsal angelegten Tangente. Der Winkel selber wurde gegen die Tangente gemessen. Mit 180° wäre also eine Steilstellung des SOHO angegeben. Im eigenen Material war die Steilstellung in beiden Kollektiven der häufigste Typ. Ausnahmen davon sind selten, z.B. die Mitteilung eines radiologischen Befundes von Frakturen beider ventral gebogener SOHÖ nach suizidalem Erhängen (Saternus 1979).

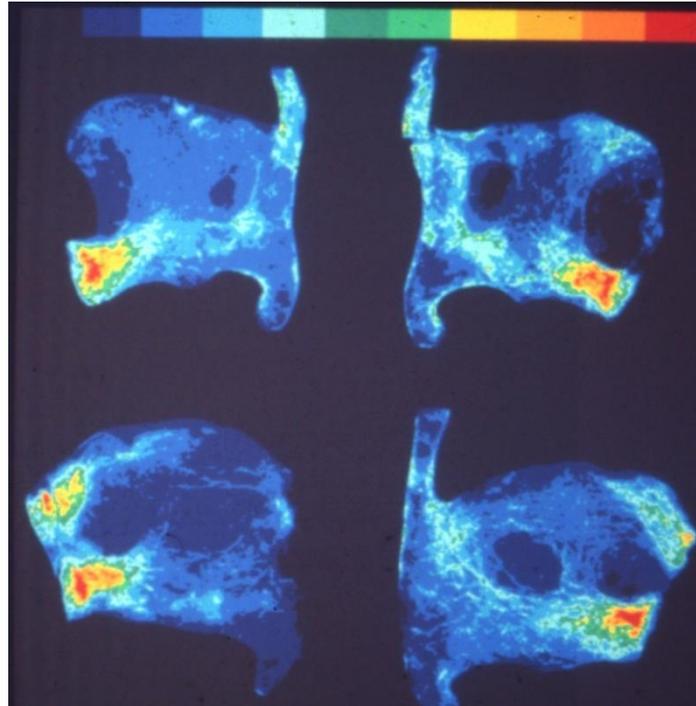


Abb. 16: Halbquantitative Wiedergabe der Knochendichte im Äquidensitenbild; obere Reihe: symmetrische Konfiguration, jedoch unterschiedlicher Neigung des SOHO in der Sagittalebene; untere Reihe: Agenesie des linken SOHO. Abbildung mit der freundlichen Erlaubnis von Prof. Dr. Saternus aus einer nicht veröffentlichten Arbeit eingefügt

In der postmortalen Medizin sind Frakturen der SOHÖ häufig beschrieben worden. Wesentlich seltener finden sich Angaben zu den knöchernen Verletzungen des Kehlskeletts. Die Mitteilungen zur Traumatologie von Kehlkopf und Zungenbein stammen überwiegend von Untersuchungen nach suizidalem Erhängen.

Die SOHO-Fraktur wird dabei durchgehend als die häufigste Verletzung des Kehlskeletts genannt, allerdings differieren die Angaben über deren Inzidenz erheblich: 0% (Sen Gupta 1965), 8,8% (Feigin 1999), 28% (Clément et al. 2011), 36% (Ryk und Silcocks 1992), 47,5% (Green et al. 2000), 44,8% (Davison und Marshall 1986), 55% (Polson 1985), 58,6% (Uzün et al. 2007), 76,6% (Khokhlov 1997) und 87% (Saternus 1979).

Frakturen der SOHÖ können offensichtlich leicht der klinischen Diagnostik entgehen. So hat (Maxeiner 1999) aus dem Berliner Obduktionsgut (Freie Universität) zahlreiche Fälle mit überlebten SOHO-Frakturen zusammengestellt, bei denen die Vorgeschichte dahingehend leer war. Allerdings lässt sich noch nicht daraus sicher schließen, dass es sich um nur geringe Gewalt gegen den Hals gehandelt haben muss. Im Rahmen des Möglichen läge auch, dass entweder die Verletzung durch ein schwereres Trauma überdeckt wurde oder die Fraktur eine nur geringe Symptomatik ohne Atemnot aufgewiesen hat und deshalb keine speziellen Untersuchungen erfolgten. Unabhängig von dieser klinischen Konstellation finden sich Angaben (Khokhlov 1998; Maxeiner 2004; Koşar et al.

2015), dass bei rechtsmedizinischen Verletzungsanalysen aus dem Fehlen eines Schildknorpeloberhorns fälschlich auf ein erlittenes Schildknorpeltrauma mit Luxation eines Fragments geschlossen wurde. Zur traumatologischen Einordnung soll noch einmal auf die Eingangsfrage zurückgekommen werden. Die Frage war, ob eine knöcherne Verletzung des Kehlskeletts eventuell auch Folge einer relativ geringen Gewalt gegen den Hals sein könne. Nach den hier durchgeführten Untersuchungen lässt sich das für die SOHO-Fraktur bei einem Zusammentreffen begünstigender Faktoren nicht ausschließen.

Die eine Fraktur begünstigenden Faktoren ergeben sich aus: Singularität, Dimensionierung, Ossifikation, Hornlänge, Winkelstellung und Hornbiegung.

Den bisher betrachteten Risikofaktoren stehen stabilisierende gegenüber, auf die eingegangen werden soll. So kann ein auch nur singular angelegtes SOHO in sich selbst eine hohe Formstabilität aufweisen. Weiterhin betrifft es den Übergang des Horns in die Schildknorpelplatte (SKP). Claassen spricht von spongiösem Knochen in den SKP (Claassen 1999).

In den μ -CT-Aufnahmen (Abb.13-15 und 17-19) wird die Spongiosa gut erkennbar. Aus Abb. 17 ist ersichtlich, dass sich breite Spongiosazüge von der Höhe des Tuberculum superius mit solchen aus der Basis des SOHO kreuzen und etwa die obere Hälfte vom Dorsum thyroideum bilden.

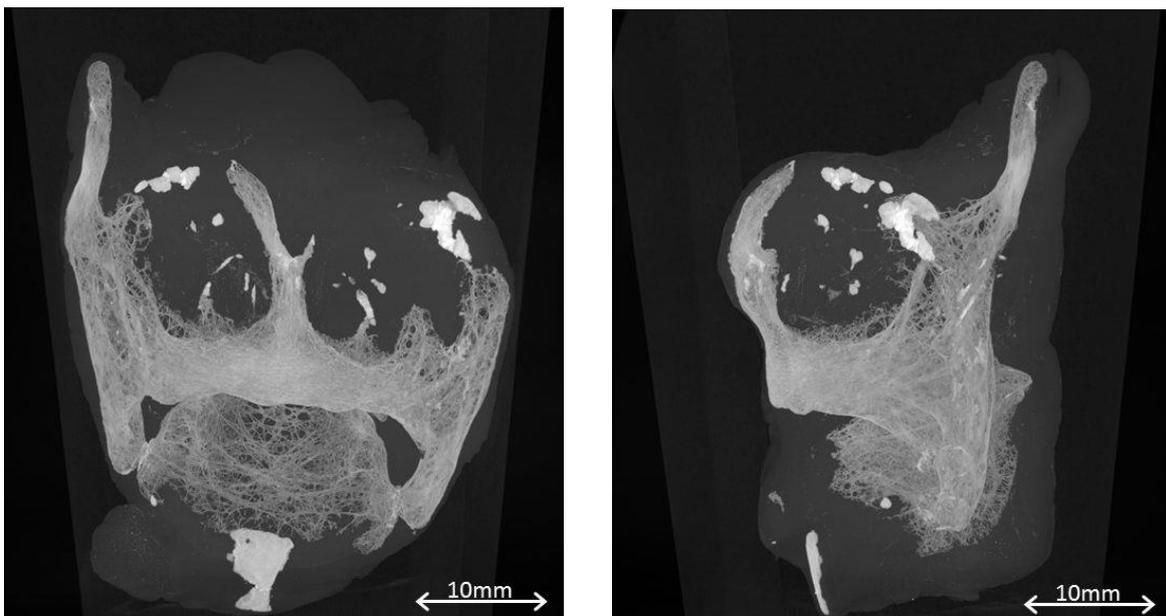


Abb. 17: a.-p. und seitlicher Strahlengang; Maximum Intensity Projection: 72 Jahre, männlich, links Agenesie SOHO; sehr deutliche Spongiosazüge; KK#40

Ohne auf Details in der Spongiosaarchitektur einzugehen, erstreckt sich von der Basis des SOHO eine umfangreiche bogenförmige Ossifikation bis in die Mitte der dorsalen Anteile der SKP. Letztlich erstreckt sie sich bis in die ventro-kaudalen Partien des Schildknorpelunterrandes. Diese Form der Ossifikation wird auch in der halbquantitativen Darstellung der Knochendichte, dem Äquidensitenbild, erkennbar (Abb. 16).

Damit lässt sich sagen, dass bei einer flächigen Kraffeinleitung von vorn in den Hals aus physikalischen Gründen ein Kehlkopf mit singulärer Anlage eines SOHO wegen der Lastverteilung von zwei Hörnern auf eines eine höhere Frakturgefährdung aufweisen muss. Damit ist aber noch nicht alles über die tatsächliche Vulnerabilität des SOHO gesagt. Vielmehr haben die im Rahmen dieser Arbeit durchgeführte Untersuchungen unter Einsatz des μ -CT gezeigt, dass selbst bei symmetrischer Anlage der SOHÖ bei Vorliegen erheblicher Ossifikationsstörungen und zarten Hörnern eine geringe indirekte Gewalteinwirkung zu inkompletten SOHO-Frakturen führen kann.

Übertragen auf einseitige Agenesie der SOHÖ bedeutet das, dass es Konstellationen gibt, unter denen eine nur geringe Gewalteinwirkung, vergleichbar dem Ziehen an der Kleidung, zur Fraktur eines singulär vorliegenden Horns führen kann. Diese Untersuchungsergebnisse werden für die klinisch stationären und ambulanten Untersuchungen, insbesondere aber auch bei klinisch-rechtsmedizinischen Untersuchungen dann relevant, wenn ein Verdacht auf das Vorliegen „häuslicher Gewalt“ besteht. Letztlich betreffen sie die Diagnostik bei jeder tätlichen Auseinandersetzung, bei der der Hals in irgendeiner Weise tangiert worden ist.

4.2 Morphologie und Traumatologie von Schild- und Ringknorpel

Die Eingangsfrage war, ob mit der Agenesie eines SOHO die Topographie des ganzen Organs Kehlkopf verändert ist. Dieses war eine Frage nach der Symmetrie. Um hier eine Antwort geben zu können, erfolgte zu der Stichprobe der bei den gerichtlichen Obduktionen unausgewählt asservierten Präparaten mit der Agenesie eine Paarzuordnung mit regulären Kehlkopfpräparaten. Die Paarbildung (Matching) erfolgte unter Berücksichtigung der Variablen Alter und Geschlecht. Die Präparate entstammten dem laufenden Obduktionsgut, und zwar in der Reihenfolge, wie die Staatsanwaltschaft eine Asservierung beauftragt hatte.

Die durchgeführte morphometrische Untersuchung erfolgte zerstörungsfrei radiologisch. Vermessen wurden Schild- und Ringknorpel. Weitere Untersuchungen sind an diesem Material möglich. Die Datensätze der μ -CTs sind im Institut für experimentelle Radiologie der Justus-Liebig-Universität Gießen vollständig archiviert.

Die definierten Messpunkte und damit vorgegebenen Abstände und Winkel wurden zur Reproduzierbarkeit unabhängig vom Ossifikationsgrad und damit auch weitgehend altersunabhängig gewählt. Sie mussten eine Aussage zur Gesamtkonfiguration des Kehlkopfes (Schild- und Ringknorpel) erlauben. Für den Schildknorpel wurden 4 Messstrecken und 6 Winkel, für den Ringknorpel 7 Messstrecken und ein 1 Winkel definiert (Abb. 6-12).

In der Regel wird in den modernen Lehrbüchern der Anatomie der Kehlkopf als ein symmetrisch aufgebautes Organ dargestellt, was im Detail auch für Schild- und Ringknorpel gilt (McHanwell 2008). In einem weiteren anatomischen Standardwerk findet sich die Beschreibung der Konfiguration des Kehlkopfes als ein „*formstabiles System von gelenkig verbundenen Knorpelplatten*“ (Aumüller 2010). Diese Frage der Formstabilität spielt, wie bereits ausgeführt, in der forensischen Traumatologie eine große Rolle.

Der Schildknorpel wird als winklige, schiffsbugartige Verbindung zweier viereckiger sich in der Medianen treffenden Platten beschrieben. Beim Ringknorpel wird meist der Vergleich mit einem Siegelring gewählt. Genauere Vermessungen zeigten bislang eine bilaterale Asymmetrie ohne statistische Signifikanz (Sprinzel et al. 1999; Hirano et al. 1989; Jain und Dhall 2010).

Von vollständiger Symmetrie kann im menschlichen Organismus aber nicht ausgegangen werden, so auch nicht zwischen den beiden Schildknorpelplatten und den die Seitigkeit ausdrückenden Variablen des Ringknorpels. Der Bezug ist, dass bei der Prüfung auf Symmetrie die Differenz zwischen den dafür relevanten Variablen bei Kongruenz gleich Null ist.

Es wurden zwei verschiedene Vorgehensweisen gewählt, nämlich der Vergleich zwischen dem Kollektiv mit einseitiger Anlage des SOHO und der Kontrollgruppe sowie der intraindividuelle Vergleich.

Nimmt man als wichtige Kenngröße den lateralen Neigungswinkel der Schildknorpelplatten, so ließ sich für die Differenz kein Unterschied zwischen den Kollektiven erkennen ($p=0,817$, Mittelwertabweichung = $0,28^\circ$). Ein vergleichbares Ergebnis lieferte der t-Test für die Länge ($p=0,056$, Mittelwertdifferenz = $1,48\text{mm}$) und dem Winkel der SKP zur ventro-dorsalen Achse ($p=0,178$, Mittelwertdifferenz = $1,53^\circ$). Für den Ringknorpel ergaben sich im Kollektivvergleich keine signifikanten Unterschiede. Exemplarisch für den außen gebildeten Ring: Für die latero-laterale Ausdehnung errechnete sich ein p-Wert = $0,331$ mit einer angegebenen Mittelwertdifferenz = $1,00\text{ mm}$; für die ventro-dorsale ein p-Wert = $0,282$ mit einer Mittelwertdifferenz = $1,14\text{ mm}$. Die latero-laterale war stets größer als die ventro-dorsale Ausdehnung.

Die Summe der errechneten Differenzen wurde in einem Symmetrie-Score - bestehend aus dem Lateralneigungswinkel, dem Winkel β/γ , abhängig von der betrachteten Seite

und der Länge der Schildknorpelplatte - zusammengefasst, erstellt über eine Z-Transformation.

Damit wurde eine ausgeglichene Gewichtung der einfließenden Variablen unabhängig von ihrem eigentlichen Betrag erreicht. Bei einem p-Wert = 0,139 und einer Mittelwertdifferenz = 0,95 ließen sich auch anhand des Symmetrie-Scores sicheren Unterschiede als Hinweis auf eine Asymmetrie zwischen einseitiger und regulärer Anlage nicht erkennen.

Der Vollständigkeit halber wurden Kehlköpfe mit beidseitiger Agenesie der SOHÖ in die Untersuchung mit einbezogen, obwohl sich dabei die Frage der Abweichung von der

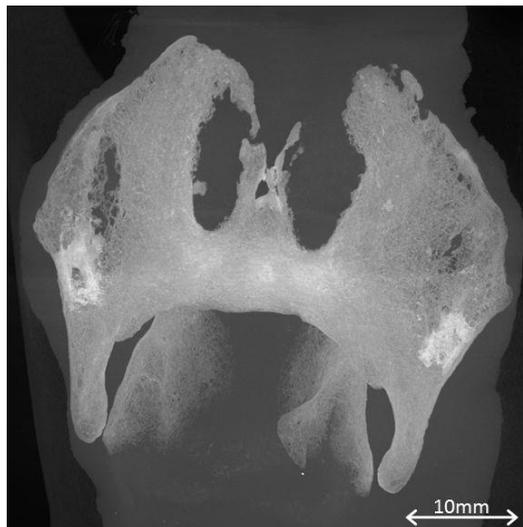


Abb. 18: a.-p.; Maximum Intensity Projection; 39 Jahre alt gewordener Mann; KK#26

Symmetrie zunächst nicht stellte. Im Vergleich der Symmetrie-Scores von Kontrollkollektiv versus Kollektiv der beidseitig fehlenden SOHÖ ergaben sich keine signifikanten Unterschiede (p-Wert von 0,284 mit einer Mittelwertdifferenz von 0,99). Jedoch ist bei der geringen Anzahl der Kehlköpfe mit beidseitig fehlenden Schildknorpeloberhörnern eine Aussagekraft nur eingeschränkt möglich.

Abb. 18 veranschaulicht eine symmetrische Ossifikation. Beidseitig ist das Dorsum thyroideum ossifiziert. Eine umfangreiche Ossifikation nimmt den Bereich zwischen der Mitte des SKP-Unterrands und dem gesamten Dorsum ein. Die Symmetrie wird an fast identische knöcherne Verdichtungen in der Mitte des Dorsum thyroideum besonders deutlich. Von einer hohen Druckfestigkeit und Formstabilität bei einem solchen Kehlkopf ist auszugehen.

Die damit vor dem Hintergrund einer forensischen Verletzungsrekonstruktion aufgeworfene Frage, ob mit der Konstellation einseitige Agenesie oder beidseitige Agenesie des

SOHO auch eine erhebliche Abweichung der Konfiguration von Schildknorpel und Ringknorpel verbunden ist, ist durch die vorliegenden Untersuchungen beantwortet worden. Sie ist es nicht.

Eine der grundsätzlich zu beantwortenden Fragen ist die nach dem Geschlechtsdimorphismus für den Schildknorpel. Dazu liegen zahlreiche anthropologische und rechtsmedizinische Untersuchungen vor. Verwiesen sei zunächst auf eine Untersuchung an insgesamt 589 menschlichen Kehlköpfen durch Byrdy und Jelisiejew (1971). Mit direkter Messung am präparierten Objekt legten sie 23 Merkmale fest. Anhand von 382 Kehlkopfpräparaten von Erwachsenen (147 Frauen, 235 Männer) gingen sie der Frage nach, welche anatomischen Merkmale davon die beste Trennung für die Angabe zum Geschlecht aufwiesen. Dabei zeigten sie, dass sämtliche verwandte Merkmale statistisch eine signifikante Trennung zwischen weiblichem und männlichem Kehlkopf erlaubten. Mit Hilfe der sequenziellen Diskriminanzanalyse erfolgten Paarbildungen, um die am höchsten differenzierenden Merkmale zu erkennen. Dabei ließen sich in einem Dreieratz (Kehlkopfhöhe, Schildknorpelbreite als Sagittaldurchmesser und Ringknorpelbreite als Horizontaldurchmesser) die beiden Geschlechtergruppen fast vollständig trennen. Von den 382 Kehlköpfen konnte nur in 1,8% eine Zuordnung anhand der charakteristischen Größen zum tatsächlichen Geschlecht nicht erfolgen.

Eine Unabhängigkeit von der verwandten Messmethode wurde auch durch die hier vorliegende eigene Untersuchung an beiden Kollektiven bestätigt (Tab. 9). Die Unterschiede für die gemessenen Variablen waren in Bezug auf die Geschlechterrelation statistisch signifikant (Tab. 7).

Bei der Betrachtung des Winkels zwischen den Schildknorpelplatten (in dieser Arbeit als Winkel α bezeichnet) ergaben die eigenen Messungen einen Mittelwert mit einer Streuung für das weibliche Kollektiv von $81,92^{\circ} \pm 12,9^{\circ}$ und für das männliche von $65,48^{\circ} \pm 12,4^{\circ}$. Sprinzi et al. erhielten, mit dem Nonius gemessen, für den Winkel zwischen den Schildknorpelplatten $80,68^{\circ}$ im weiblichen Kollektiv und $65,75^{\circ}$ im männlichen. Interessanterweise rangieren die Mittelwertangaben anderer Autoren zwischen 81° - 108° (Frauen) und 65° - 86° (Männer) ((Byrdy und Jelisiejew 1971) [*weiblich* - $84,14^{\circ}$; *männlich* - $76,37^{\circ}$]; (Sprinzi et al. 1999; Jain und Dhall 2010; Ajmani 1990; Kovac et al. 2010; Loth et al. 2015; Singla et al. 2015). Obwohl auch bei anderen Parametern die Messwerte erheblich streuten, ließ sich durchgehend ein Geschlechtsdimorphismus nachweisen. Die erhebliche Streuung der Messwerte lässt sich, wie Sprinzi vermutete, zum einen durch unterschiedliche Messmethoden, nicht einheitlich festgelegte Messpunkte und uneinheitliche Messstrecken erklären. Als weiterer Aspekt sollte dennoch die Kollektivgröße – bestimmt zu einem gewissen Grad – als mögliche Ursache für die Unterschiede in Betracht gezogen werden. Die Lateralneigung der Schildknorpelplatten

zeigte ebenfalls statistisch gesichert ($p < 0,001$) einen Geschlechtsdimorphismus; im weiblichen Kollektiv war der Winkel größer als im männlichen. Bei so deutlichen geschlechtsgebundenen Ausprägungen bestand die Erwartung, auch feinere Unterschiede in Schild- und Ringknorpel erfassen zu können. Deshalb schien es gerechtfertigt, den Geschlechtsdimorphismus trotz der dann geringen Fallzahl an den Subkollektiven zu überprüfen, also differenziert nach regulärer und singulärer Anlage des SOHO. Diese Unterschiede waren statistisch auch für die jeweiligen Subkollektive statistisch gesichert. Der p-Wert für den Winkel zwischen SKP (MW-Diff.: $15,07^\circ$), den Lateralneigungswinkel (MW-Diff.: $7,86^\circ$ [re.], $8,37^\circ$ [li.]) sowie der Länge der SKP (MW-Diff.= $9,17$ mm [re.], $8,8$ mm [li.]) ergab sich im Verumkollektiv ein p-Wert kleiner $0,01$. Für das Kontrollkollektiv ergab sich ebenfalls ein p-Wert unter $0,01$ mit Mittelwertdifferenz von $16,75^\circ$ für den Winkel zwischen den SKP, $6,8^\circ$ (re.) bzw. $4,95^\circ$ (li.) für den Lateralneigungswinkel der SKP und $9,16$ mm (li.) bzw. $10,85$ mm (re.) für die Länge der Schildknorpelplatten.

Auch für den Ringknorpel wiesen die benutzten Parameter einen Geschlechtsdimorphismus auf. Die Abweichung des Ringknorpels vom geometrischen Idealtyp als kreisrundem Siegelring war in der lateralen Ausdehnung größer als in der antero-posterioren. Die für den Geschlechtervergleich berechneten p-Werte $\leq 0,001$ mit einer Mittelwertdifferenz = $4,69$ mm für die äußere ventro-dorsale Strecke durch das Ringknorpelzentrum sowie einer Mittelwertdifferenz = $5,05$ mm in der äußeren lateralen Ausdehnung ergaben somit einen gesicherten Unterschied zwischen dem größeren männlichen Ringknorpel und dem kleineren weiblichen. Dasselbe galt für die ventrale Höhe ($p < 0,001$; MW-Diff.= $1,09$ mm) und den dorsalen Ringknorpelanteil (MW-Diff.= $3,56$ mm). Dagegen fand sich für den Neigungswinkel der dorsalen Ringknorpelrückfläche nach posterior keine Abhängigkeit vom Geschlecht ($p = 0,149$; MW-Diff.= $1,97^\circ$). In der getrennten Betrachtung der Subkollektive konnte der Geschlechtsdimorphismus ebenfalls am Ringknorpel aufgezeigt werden. Dort zeigte die statistische Auswertung für die Strecken durch das Ringknorpelzentrum je einen p-Wert $< 0,001$ in beiden getrennt betrachteten Subkollektiven. Auch Subramanyam et al. postulierten eine Geschlechtsbestimmbarkeit anhand des Schildknorpels mit einer Genauigkeit von $92,3\%$ (Subramanyam et al. 2014).

Ergänzend lieferte die Hauptkomponentenanalyse eine Visualisierung des Geschlechtsdimorphismus. In der Darstellung der Einzelwerte in Beziehung zu den bereits in Diagramm 11 aufgeführten Hauptkomponenten ist eine geschlechtliche Zweiteilung der Einzelwerte zu erkennen. Die 49 individuellen Kehlköpfe wurden im Diagramm 12 zu den zwei Hauptkomponenten in Bezug gesetzt. Durch die farbliche Markierung des Geschlechts (grün = männlich; blau = weiblich) ist der Unterschied zwischen den Ge-

schlechtern sichtbar. Es ergibt sich ein Überblick über das Verhältnis der einzelnen gemessenen Variablen und der direkte visuelle Bezug der einzelnen geschlechtsmarkierten Kehlköpfe (Abkürzungen der Messvariablen s.o.).

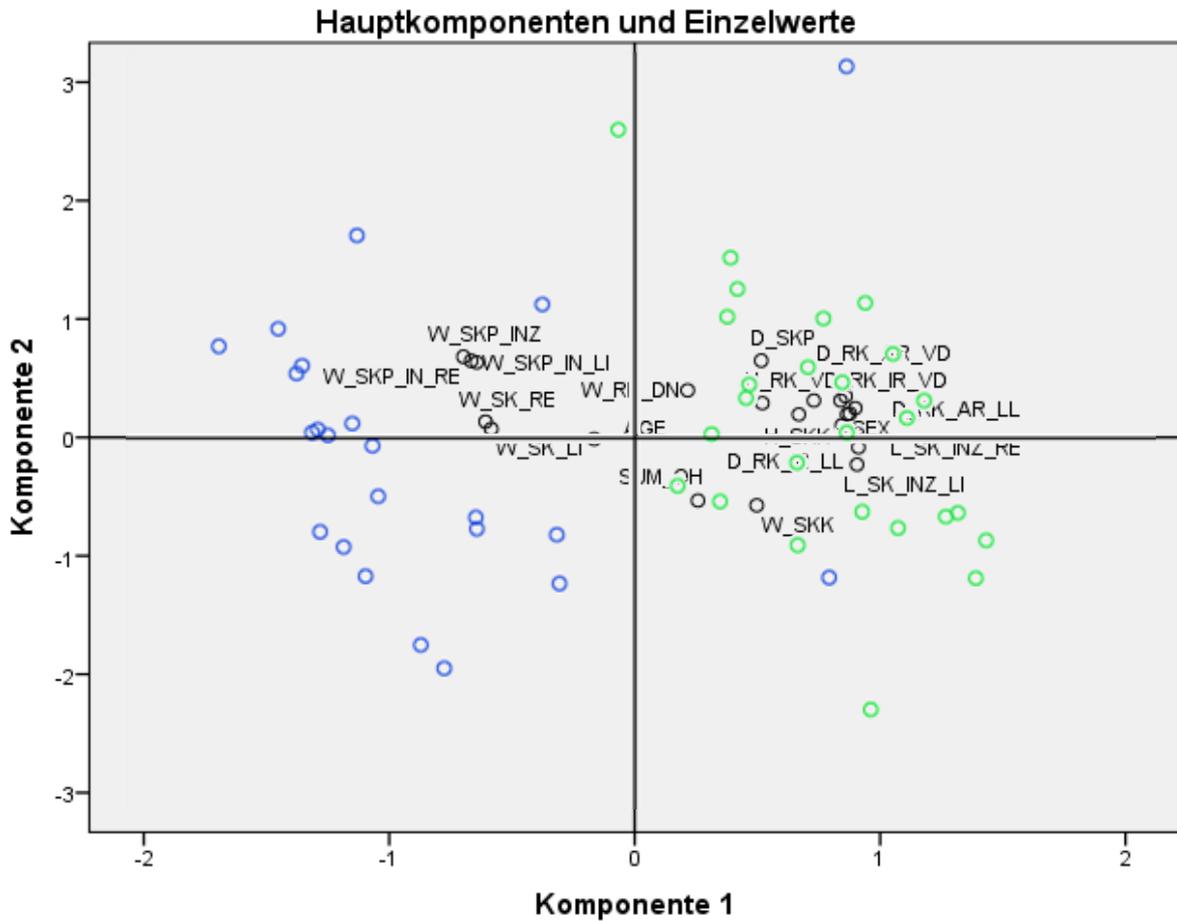


Diagramm 12: Geschlechtsspezifische Darstellung der 49 Kehlköpfe, im Bezug zu den Hauptkomponenten und den einzelnen Messvariablen (= schwarz); grün = männlich, blau = weiblich; Skala im Vergleich zu Diagramm 11 angepasst

Ein Geschlechtsdimorphismus wird auch in Bezug auf die Ossifikation des Schildknorpels und darüber hinaus für die Lebensaltersbestimmung diskutiert. Eine Übersicht dazu findet sich in dem umfangreichen rechtsmedizinischen Handbuchbeitrag von (Maxeiner 2004). Besonders unter dem Aspekt der Identifikation unbekannter Toter wurde von Leopold (Leopold 1978, 1998) die Möglichkeiten einer Lebensaltersbestimmung anhand des Ossifikationsgrades des Schildknorpels geprüft. Dafür wurden von ihm im Jahr 1978 Stadien in relativ engen Intervallen definiert. Stets ging der Ossifikation des Kehlkopfs des Mannes der bei der Frau voraus. Die ersten Knochenkerne fänden sich an der Basis des Unterhorns oder im Tuberculum thyroideum inferius im Lebensalter von 15 Jahren (männlich) und 16 Jahren (weiblich). Zwischen dem 18. und 21. Lebensjahr bilde sich ein sog. „unteres hinteres Dreieck“. Dabei sei mit 26 Jahren (beim Mann) und 28 Jahren (bei der Frau) die Ossifikation des Cornu inferius abgeschlossen, dagegen die des Cornu superius, also des SOHO, beim Mann mit 31 Jahren und bei der Frau mit 58 Jahren.

In der späteren Mitteilung aus dem Jahr 1998 (Leopold und Schäfer, siehe Leopold (1998)) wurde unter Modifizierung eines Schemas von Vlcek et al. ein Dekaden-Schema für den Altersgang des männlichen Kehlkopfs erstellt (Vlcek 1980). Danach lässt sich in der bildhaft wiedergegebenen Varianz mit geringen Überschneidungen das Lebensalter nur für den Mann anhand des Kehlkopfs nach einem Stufenmodell bis zur 5. Dekade bestimmen. Bei der Frau gelinge die Lebensaltersbestimmung anhand des Ossifikationsmusters des Kehlkopfs allenfalls nur orientierend.

Als Beginn der Ossifikation des männlichen Kehlkopfs geben die Autoren ein Lebensalter zwischen 15 und 17 Jahren an. Danach treten „die ersten Knochenkerne am hinteren Rand“ im Bereich des Tuberculum thyroideum kaudale und im Cornu cricoideum“ auf. Allerdings stehen die Autoren mit ihrem Stufenschema teilweise im Widerspruch. Danach wird das Tuberculum thyroideum inferius erst im 4. Dezennium ossifiziert.

Diese Angabe, dass die ersten Knochenkerne am hinteren Rand im Bereich des Cornu inferius auftreten, anschließend das Horn selber komplett ossifiziert werde, konnte hier bei der eigenen Untersuchung nicht bestätigt werden. Von einem systematischen Vergleich zwischen „beidseitiger versus einseitiger Anlage des SOHO“ wurde aber wegen der erheblichen Variation der Ossifikation in den kleinen Subkollektiven abgesehen.

Hinweisend konnten aber dazu zwei Fälle miteinander verglichen werden, also jeweils einer mit regulärer und mit singulärer Anlage der SOHÖ. Dazu wurde in beiden Schildknorpelhälften die Verteilung Knochendichte als Äquidensiten wiedergegeben (Abb. 16). Es handelte sich um Kehlköpfe mit in etwa gleichem Ossifikationsgrad von Männern (≤ 5 .Dezennium). In diesen Präparaten unterschied sich der Modus der Ossifikation des Cornu inferius nicht. Sowohl beim Kehlkopf mit singulärer Anlage des SOHO als auch bei dem mit regulärer Anlage der SOHÖ war das Cornu inferius trotz bereits bestehender

umfangreicher Ossifikation der Schildknorpelplatten kaum ossifiziert. Als Ergebnis ist festzuhalten: Das Unterhorn ossifiziert nicht in frühen Jahren, sondern erst im sehr späten Lebensalter, und eine Abweichung davon fand sich auch im Falle einer Agenesie des SOHO nicht. Das stimmt mit früheren Untersuchungen an regulären Kehlköpfen überein (Saternus et al. 2013).

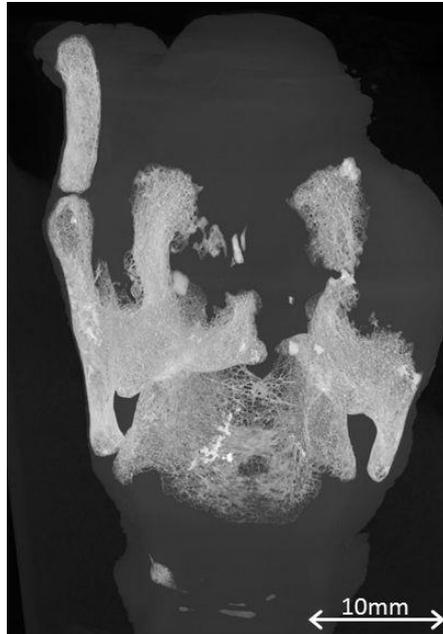


Abb. 19: a.-p.; Maximum Intensity Projection; 35 Jahre alt gewordener Mann mit links fehlendem SOHO; KK#24

Die hier durchgeführten Untersuchungen dienen der Beschreibung des Schildknorpels bei einseitiger Anlage bzw. kontralateral einseitiger Agenesie eines SOHO. Beide Begriffe wurden synonym verwendet, je nachdem, welche Seite des Schildknorpels gemeint war.

Als Gesamtergebnis dieser morphometrischen Untersuchungen kann gesagt werden, dass die Eingangshypothese, eine einseitige Agenesie könne mit weiteren Asymmetrien von Schildknorpel und Ringknorpel vergesellschaftet sein, verworfen werden muss. Die Aussage stützt sich auf den statistischen Vergleich von Parametern zur Beschreibung der Morphologie des Kehlkopfs, wie sie im internationalen Schrifttum eingeführt sind.

Eine solche Untersuchung, wie sie hier im Rahmen rechtsmedizinischer Grundlagenforschung durchgeführt worden ist, lag bisher nicht vor. Die eingesetzte μ -CT-Technik erlaubt genauere Aussagen zum Verlauf der Ossifikation im Alternsgang als sie bisher in konventionellen radiologischen Untersuchungen möglich waren. Im folgenden Abschnitt soll ausschließlich unter traumatologischen Aspekten darauf eingegangen werden. Diese Eingrenzung erfolgt, weil noch Untersuchungen zur Ossifikation der Spongiosa an demselben Material durchgeführt werden.

4.3 Ossifikation und Vulnerabilität der Schildknorpelplatten

Die diesen morphometrischen Untersuchungen zu Grunde liegende Frage, ob die einseitige oder auch beidseitige Agenesie des SOHO mit Fehlbildungen von Schild- und/oder Ringknorpel vergesellschaftet sei, konnte beantwortet werden. Bei der statistischen Analyse erwies sich nur einer der gewählten Symmetrie-Parameter als signifikant unterschiedlich im Vergleich der beiden Kollektive von „einseitiger Agenesie des SOHO“ versus „regulärer beidseitige Anlage der SOHÖ“. Er beschrieb den unmittelbaren Bereich der Agenesie, also nicht die Gesamtkonfiguration dieser Schildknorpelhälfte. Deshalb ist es wohl berechtigt, auch einen Kehlkopf mit einseitiger Agenesie des SOHO als ein „*formstabiles System von gelenkig verbundenen Knorpelplatten*“ (Aumüller 2010) anzusehen.

Dieses Ergebnis „Formstabilität“ wird für Schild- und Ringknorpel mechanisch verstanden.

Deshalb lässt sich allein aus der Geometrie nicht sagen, dass ein Kehlkopf mit einseitiger Agenesie des SOHO für Schild- und/oder Ringknorpel eine größere Vulnerabilität aufweist als ein regulärer Kehlkopf.

Wie bei der Betrachtung der SOHO-Fraktur soll auch beim Schildknorpel gefragt werden, ob Inhomogenitäten vorliegen, die aus traumatologischer Sicht dann doch zu dem Ergebnis einer erhöhten Vulnerabilität führen könnten. Der Prozess der Ossifikation des hyalinen Knorpels der Schildknorpelplatten (SKP) führt zu Inhomogenität. Damit schließt sich die Frage an, ob bei Agenesie eines SOHO oder auch beider SOHÖ die Ossifikation der SKP anders verläuft als beim regulären Kehlkopf. Bezug wird im Hinblick auf eine Frakturgefährdung auf die umschriebene seitliche Einwirkung auf den Kehlkopf (laterale Punktlast = Würgen, Griff an den Hals) genommen.

Dazu liegen bisher keine Untersuchungen vor, obwohl das Kehlskelett bei jeder gerichtsmedizinischen Obduktion untersucht wird. Diese Untersuchungen erstrecken sich autoptisch sowohl auf den knöchernen Befund als auch auf die Weichteilverletzung. Es wurde schon gesagt, dass im Einzelfall bei der rechtsmedizinischen Verletzungsanalyse die SOHO-Agenesie fälschlich für eine Luxationsfraktur des Schildknorpeloberhorns gehalten worden ist.

Nach den eigenen Untersuchungen stellt sich allerdings die Frage, wie das unter direkter Sicht möglich war. Vorstellbar wäre, dass Frakturen der SKP wahrscheinlich nicht immer ohne eine radiologische Darstellung gefunden werden können. Das gilt sicher umso mehr bei der ambulanten oder auch stationären Untersuchung eines verletzten Patienten. Deshalb müsste zwischen postmortaler und klinischer Rechtsmedizin unterschieden

werden. In der klinischen Rechtsmedizin finden sich wie bei klinischen Diagnostik knöcherne Verletzungen des laryngo-hyoidalen Komplexes nur als Rarität (Angood P.B. et al. 1986; Gussack et al. 1986).

Klammert man einmal schwere Schädel-Hirn-Traumata nach Kinnaufschlag (Saternus 1979) und direkte Verletzungen durch Schuss und Stich aus (Senders 1994; Dunsby und Davison 2011), dann sind Weichteilverletzungen des Kehlkopfs, nicht aber knöcherne Schildknorpelverletzungen von klinischer Bedeutung. Vorzugsweise äußern sich solche Weichteilverletzungen in obstruktiven Atemwegsbehinderungen und/oder post-traumatischen Stimmbandschädigung (Brosch und Johannsen 1999; Hoover et al. 1998). Ein umfangreiches Schrifttum findet sich aus der Rettungsmedizin über Intubationsschädigungen der Kehlkopfweichteile. Darauf soll hier nicht näher eingegangen werden.

Im Hinblick auf die Eingangsfrage nach der Vulnerabilität des Schildknorpels war festgestellt worden, dass ein leichter Griff gegen den Hals wegen der Formstabilität des Kehlkopfs weder bei regulärer Anlage der Oberhörner noch bei Agenesie eines der beiden SOHÖ eine Fraktur von Schildknorpel und Ringknorpel erwarten ließe. Damit ist aber noch nicht die Frage beantwortet worden, ob überhaupt bei Gewalt gegen den Hals in Abhängigkeit von der Agenesie eines SOHO dafür eine Seitigkeit besteht. Voraussetzung wären dafür Unterschiede in der Ossifikation. Diese werden sowohl in der Darstellung im μ -CT (Abb. 17, 19) als auch im Äquidensitenbild (Abb. 16) erkennbar.

Bei Vorliegen eines SOHO erstrecken sich von dessen Basis bis an den Unterrand der Inzisur bogenförmig dichte Spongiosazüge. Dieses ist unabhängig davon, ob es sich um einen regulären Kehlkopf mit beidseitiger Anlage der SOHÖ oder um die Hornseite bei kontralateraler Agenesie handelt. Es kommt also darauf an, dass überhaupt ein Horn ausgebildet ist. Damit könnte die Ossifikation zumindest teilweise funktionell erklärt werden. Dieses wäre die physiologische Beanspruchung des SOHO, insbesondere beim Schlucken. Für die Richtigkeit diese Sicht könnte eine davon abweichende Ausbreitung der Ossifikation auf der Seite der Agenesie sprechen. Völlig ausschließen lässt es sich aber auch nicht, dass die Ossifikation der SKP weitgehend genetisch determiniert ist.

Es soll versucht werden, die Hypothese, wonach die Funktion wesentlich den Verlauf der Ossifikation des Dorsum thyroideum bestimmt, an 5 Kasuistiken zu entwickeln.

Eine Agenesie des SOHO könnte sich in zwei verschiedenen Formen manifestieren. Die erste wäre es, dass es sich um eine fehlende Anlage zusammen mit dem gesamten Dorsum thyroideum handeln könnte. Dafür könnten die Befunde in Abb. 19 und auch noch in Abb. 16 sprechen. Dem ständen die Ergebnisse der durchgeführten morphometrischen Untersuchungen gegenüber. Sie haben gezeigt, dass auch ein Kehlkopf bei einseitiger Agenesie des SOHO symmetrisch konfiguriert ist und die SKP gleichsinnig

knorpelig angelegt sind. Um eine Fehlanlage des Knorpels handelt es sich dabei also nicht. Der Knorpel wird vielmehr dorsal nicht ossifiziert.

Der zweite Modus würde besagen, dass es sich um eine Agenesie nur des SOHO handelt und fast die gesamte Veränderung der Ossifikation auf dem damit verbundenen funktionellen Ausfall beruht.

Folgt man der zweiten Version, dann könnten die Abbildungen 19,16 und 17 in aufsteigender Reihe verschiedene Stadien der Ossifikation des Dorsum thyroideum wiedergeben. Das würde dann bedeuten, dass bei Fehlen des SOHO die Ossifikation der dorsalen Anteile der SKP allein vom unteren Anteil des knöchernen Bogens ausginge.

Bei beidseitiger Anlage der SOHÖ und auf der Hornseite bei der einseitigen Anlage lassen sich jeweils eine Ossifikation (Spongiosa) in Höhe des Oberrandes der SKP und in der Horn-basis erkennen, die gemeinsam dann die obere Hälfte der dorsalen Ossifikation der SKP bilden. Den unteren hinteren knöchernen Bogen der SKP bilden gemeinsam Spongiosabündel, die von Kranial und von der Mitte des Unterrandes der SKP kommen (Abb. 15,16).

Bei fehlendem SOHO liegt eine andere Verteilung der Spongiosa vor. So ist die SKP insgesamt geringer ossifiziert. Unabhängig davon, welche Erklärung für die Ossifikation bei der Agenesie eines SOHO angesehen wird, muss von einer gesicherten Seitigkeit ausgegangen werden.

Zuerst sollen die beiden Schildknorpelhälften betrachtet werden, bei denen das Horn nicht angelegt und das Dorsum nicht ossifiziert ist. Das Beispiel dafür ist der Kehlkopf des 35 Jahre alt gewordenen Mannes (Abb. 19). Auf der Seite der Agenesie liegt dorsal nur Spongiosa im horizontalen Teil des unteren Bogens und im Schildknorpelunterhorn vor. In Abbildung 16 wird aus der Dichteverteilung des Knochens ersichtlich, dass das Unterhorn nicht zum unteren Bogen gehört, sondern, davon abgesetzt, geringer ossifiziert ist. Ausschließlich vom unteren horizontalen Teil des knöchernen Bogens der SKP geht Spongiosa in den dorsalen Teil des Bogens ein. Dabei ist besonders zu beachten, dass diese Spongiosa nur als schmaler Saum vorhanden ist. Es gibt keinen Grund, diese feine kranial ausgerichtete Spongiosa nicht als beginnende Ossifikation des Dorsum thyroideum anzusehen.

Eine deutlich weiterreichende Ossifikation findet sich in der Abbildung 16 im Äquidensitenbild. Wieder ist der Unterrand der SKP auf der Seite der Agenesie stark ossifiziert. Zart verläuft die Spongiosa von dort zur Mitte des Hinterrands der SKP. Diese Richtung der Ossifikation wird angenommen und nicht die umgekehrte, weil im Gegensatz zur kontralateralen Hornseite sowohl der obere als auch der untere Anteil des dorsalen Knorpels nicht ossifiziert sind.

Mit der Hypothese, dass es sich bei der Agenesie des SOHO um eine größere Fehlanlage unter Einschluss des Dorsum thyroideum handelt, ließe sich diese Ossifikation nicht erklären.

Dafür, dass für eine Ossifikation des Dorsum thyroideum die Funktion des SOHO doch nicht erforderlich wird, könnten die Befunde in Abbildung 17 sprechen. Es handelt sich um den Kehlkopf eines 72 Jahre alt gewordenen Mannes. Das Dorsum hat auf beiden Seiten etwa dieselbe Höhe. Auf der Hornseite ist es breiter als auf der der Agenesie des SOHO.

Weil die Spongiosabündel grob und strähnig sind, können sie in der a.-p.-Darstellung getrennt erkannt werden. Danach verläuft ein besonders großes und dichtes Bündel vom vorderen unteren Anteil des Bogens bis in die „Spitze“ des Dorsum thyroideum. Das ist eine Abweichung von der regulären Ossifikation.

Daraus lässt sich der Schluss ziehen, dass der gesamte dorsale Bereich von kaudal aus ossifiziert wurde. Auf eine solche Richtung der Ossifikation könnten auch die sehr feinen Ausziehungen der Spongiosa auf der Spitze des Dorsums hinweisen.

In Abbildung 18 entsteht auch bei einem Kehlkopf eines 39 Jahre alt gewordenen Mannes mit beidseitiger Agenesie des SOHO der Eindruck einer von kaudal des Dorsum thyroideum ausgehenden Ossifikation.

Abschließend stellt sich die Frage, was das einseitige Fehlen des dorsalen knöchernen Rahmens der SKP oder von Teile davon im Hinblick auf die Frakturgefährdung des Schildknorpels unter bilateralem Druck auf die SKP bedeutet. Zunächst stellt es eine Minderung der Stabilität dar. Diese kann dann relevant werden, wenn sich gleichzeitig starke regressive Veränderungen mit Mineralisationen im Knorpel finden. Die verschiedenen Stadien der Ossifikation ergeben in Wechselwirkung mit Inhomogenitäten, wie Verkalkungen des Knorpels, den Grad der Frakturgefährdung der SKP, ohne dass eine quantitative Angabe möglich wäre.

Auch kann die traumatologische Bedeutung diese Anlagestörung nicht abgeschätzt werden, so lange die Schildknorpelplatten noch rein aus hyalinem Knorpel bestehen.

Bei einem Vergleich der beiden hier aufgestellten Hypothesen zum Modus der Ossifikation des Dorsum thyroideum sprechen die eigenen morphometrischen Untersuchungen und der intraindividuelle Vergleich der Kehlköpfe mit einer Agenesie des SOHO gegen die Sicht, dass eine Agenesie des Oberhorns Teil einer Fehlanlage des gesamten Dorsum thyroideum sei.

Die Untersuchungsergebnisse liefern stattdessen Bausteine für die Hypothese, wonach praktisch die gesamten Veränderungen in der Ossifikation des Dorsum thyroideum als Folge des funktionellen Ausfalls des Oberhorns anzusehen sind.

Fasst man diese Ergebnisse unter traumatologischen Gesichtspunkten zusammen, dann kommt dem Modus der Ossifikation mit der Bildung eines knöchernen Rahmens große Bedeutung zu. So ist ein Kehlkopf auch noch weitgehend als formstabil anzusehen, wenn zwar in Folge der Agenesie des SOHO eine Ossifikation des Oberrandes der SKP ausbleibt, aber das Dorsum thyroideum komplett ossifiziert ist. Weil der knöcherne Rahmen nicht ganz geschlossen und in das Dorsum weniger Material (Spongiosa) eingegangen ist, dürfte zumindest theoretisch der Widerstand auf seitlichen Druck der Norm gegenüber gemindert sein.

Wesentlich eingeschränkt wird die Formstabilität und Festigkeit bei vollständigem Fehlen der Ossifikation des Dorsum thyroideum. Dazwischen bewegt sich das gesamte Spektrum erhöhter Vulnerabilität.

In eine Frakturanalyse müsste nach den hier durchgeführten Untersuchungen der dorsale Ossifikationsbefund als individuelle Größe mit eingehen, wobei allerdings bisher auch nur eine halbquantitative Abschätzung nicht möglich ist. Dafür bedürfte es einer mathematischen Modellierung (Finite Elemente). Es kann aber gesagt werden, dass sich eine klinisch oder autoptisch diagnostizierte Fraktur der Schildknorpelplatte nicht darauf zurückführen lässt, dass ein leichter Griff an den Hals erfolgte. Das gilt auch dann, wenn es sich um einen Kehlkopf mit komplett fehlender Ossifikation des Dorsum thyroideum handelt.

5 Fazit

Im Jahr 1868 nannte (Luschka 1868) das Fehlen eines Schildknorpeloberhorns eine „*unscheinbare Bildungsanomalie*“. Jetzt, etwa 150 Jahre später, stellte sich für die forensische Traumatologie immer noch die Frage, ob bei einer Verletzungsrekonstruktion nach Gewalt gegen den Hals dem Fehlen eines Schildknorpeloberhorns (SOHO) eine Bedeutung zukommt. Diese Frage ist relevant, weil die einseitige Agenesie eines Schildknorpeloberhorns nicht selten ist (Khokhlov 1998; Wastrak 1970; Hajjioannou et al. 2010; Joshi et al. 2011; Advenier et al. 2014; Hejna et al. 2015).

Eine klinische Symptomatik dafür ist nicht bekannt. Aber in foro kann diese Anomalie bedeutsam werden, wenn es um die Frage geht, ob ein auch nur leichter Griff an den Hals oder ein Ziehen an der Kleidung Ursache einer Fraktur im Kehlskelett sein könnte. Man spricht in einem solchen Zusammenhang von einer Gelegenheitsursache. Bei regulärer Anlage der SOHÖ wird ein solcher Zusammenhang verneint. Die Frage der singulären Anlage wurde bisher nicht thematisiert.

Eine systematische Untersuchung des Kehlkopfs mit einseitiger Agenesie des Schildknorpels erfolgte hier zum ersten Mal. Bisher handelte es sich um Häufigkeitsbeschreibungen dieser Anomalie im Rahmen forensischer Fragestellungen.

Bei der jetzt durchgeführten Untersuchung sollte geprüft werden, ob die SOHO-Agenesie eventuell mit weiteren Anomalien an Schild- und/oder Ringknorpel verbunden ist. Dazu wurden, orientiert am anthropologischen und rechtsmedizinischen Schrifttum, insgesamt 18 Messpunkte und Winkel zur Beschreibung der Symmetrie festgelegt, davon 10 für den Schildknorpel und 8 für den Ringknorpel. Die Vermessungen erfolgten anhand von μ -CT-Aufnahmen des gesamten Kehlkopfs.

Der Stichprobe der Kehlköpfe mit einseitiger ($n=21$) oder beidseitiger ($n=5$) SOHO-Agenesie wurde ein Vergleichskollektiv gegenübergestellt. Die Kehlköpfe stammten aus dem fortlaufenden rechtsmedizinischen Sektionsgut und waren im Auftrag der Staatsanwaltschaft für etwaige weitere Ermittlungen asserviert worden. Auswahlkriterien waren der Erhaltungszustand der Kehlköpfe, eine reguläre Konfiguration mit beidseitiger Anlage der SOHÖ sowie für einen Paarvergleich (Matching) das Alter und Geschlecht.

Für diese beiden Parameter wird im einschlägigen Schrifttum für Konfiguration und Ossifikation des Kehlkopfs eine Abhängigkeit diskutiert.

Das Vergleichskollektiv diente der Definition der Symmetrie (Varianz der Messwerte). Das war erforderlich, weil der menschliche Kehlkopf in allen Altersstadien z.T. deutlich von der reinen Symmetrie abweicht, wie sie aus didaktischen Gründen in den geläufigen anatomischen Darstellungen für den Kehlkopf und im Detail für Schild- und Ringknorpel gewählt wird.

Das Ergebnis dieser morphometrischen Untersuchung war, dass die Messwerte normalverteilt waren und sich bis auf einen der verwandten Parameter für die SKP keine statistisch gesicherten Unterschiede zwischen dem Verumkollektiv und dem Vergleichskollektiv gefunden haben.

Für den Ringknorpel ergaben sich keine Abweichungen von der Symmetrie im Rahmen der durch das Vergleichskollektiv vorgegebenen Varianz.

In der hier erstmaligen Untersuchung des Kollektivs mit einseitiger Schildknorpeloberhornanlage ergab der Vergleich mit dem zugewiesenen Partnerkehlkopf nur für den Winkel zum Lot der fehlenden Seite einen signifikanten Unterschied ($p < 0,001$; MW-Diff.= $8,66^\circ$). Dabei handelt es sich um einen der Parameter, die Auskunft über die unmittelbare Nachbarschaft der Agenesie geben können. Er ging in den gebildeten Symmetrie-Score ein (bestehend aus der Länge, dem Lateralneigungswinkel und dem Winkel zwischen den Schildknorpelplatten) ein. Trotzdem wurde insgesamt auch im intraindividuellen Vergleich keine größere Asymmetrie bei bestehender einseitiger SOHO-Agenesie deutlich ($p=0,139$).

Im Gesamtkollektiv ($n=49$) wurde der bekannte Geschlechtsdimorphismus bestätigt. Er war trotz der kleinen Fallzahl in den Subkollektiven von beidseitig angelegtem SOHO und einseitiger Agenesie erkennbar.

Grundsätzlich besteht unabhängig vom Geschlecht eine Altersabhängigkeit für die Ossifikation des Schildknorpels. Das gilt insbesondere für die hier zu betrachtenden dorsalen Anteile der SKP.

Wurde als Ergebnis zwischen vollständiger oder einseitiger Anlage der SOHÖ keine sichere Abweichung von der Symmetrie in Schildknorpel und Ringknorpel festgestellt, so fand sie sich doch bei der Ossifikation der SKP.

Diese Angabe stützt sich auf einen intraindividuellen Seitenvergleich an informativen Fällen in den Darstellungen in der μ -CT und in der Umsetzung in Äquidensiten. Der Ossifikationsgrad erlaubte den Vergleich.

Danach wies die Seite mit der Agenesie des Oberhorns eine von der Gegenseite und vom Normalbefund abweichende Ossifikation auf. Dort fehlten die beiden kranialen Spongiosabündel, die gemeinsam die oberen Partien der dorsalen Ossifikation der SKP bilden. Im Einzelbeispiel fehlte die gesamte Ossifikation der Dorsum thyroideum bei Agenesie des SOHO.

An Kasuistiken wurde gezeigt, dass die Ossifikation bei Agenesie eines SOHO die Richtung vom kaudalen Bogen aus nach kranial nimmt. Dazu fanden sich Stadien von beginnender bis zur vollständigen Ossifikation des Dorsum thyroideum. Eine gegenläufige

kranio-kaudale Ossifikation fand sich nicht. Allerdings stützt sich die Aussage auf eine noch kleine Fallzahl.

Als ein wesentliches Ergebnis dieser Untersuchung soll die Hypothese aufgestellt werden, dass die Veränderungen in der Ossifikation des Dorsum thyroideum bei Agenesie eines SOHO überwiegend durch dessen funktionellen Ausfall erklärt werden können.

Betrachtet man unter traumatologischen Aspekten die Ergebnisse der Untersuchungen von Kehlköpfen mit Agenesie eines SOHO, dann wiesen beide Kehlkopfhälften mechanisch Besonderheiten auf, die eine Frakturentstehung begünstigten.

Für die forensische Beurteilung der Vulnerabilität des singulären SOHO wurde als praxisnah die leichte flächige Krafteinleitung in den Hals über Ziehen an der Kleidung (Drosseleffekt) gewählt. Dafür wurden Konstellationen beschrieben, bei denen es zur Fraktur des Oberhorns kommen kann. Es wurden morphologische Kriterien entwickelt. Aus den Variablen Hornlänge, Hornumfang, Winkel in der Sagittalebene, Hornkrümmung und Topographie von Inhomogenitäten lässt sich die Frakturgefährdung für das singuläre SOHO abschätzen, aber nicht quantifizieren.

Daraus ergab sich allerdings doch, dass es bei einer Gelegenheitsursache zur Fraktur des singulären Schildknorpeloberhorns kommen kann. Für die rechtsmedizinische Verletzungsrekonstruktion hat diese Feststellung eine große Bedeutung.

Im Hinblick auf ein weiteres Trauma, möglicherweise provoziert durch ein Gelegenheitsursache, wurde der Frage nachgegangen, ob für die umschriebene laterale Krafteinleitung in den Kehlkopf (Griff an den Hals, Würgen) eine erhöhte Frakturgefährdung von Schildknorpel und Ringknorpel bei Agenesie eines SOHO gegeben sei.

Das war die Frage nach der Formstabilität. Dafür ergaben die morphometrischen Untersuchungen keinen Hinweis auf relevante Unterschiede zwischen den Kollektiven. Gesicherte Abweichungen von der Symmetrie fanden sich auch nicht nach einer getrennt geschlechts-bezogenen Betrachtung. Setzt man Formstabilität und Symmetrie in etwa gleich, dann wies ein Kehlkopf mit singulärer Anlage des SOHO keine höhere Gefährdung für eine Schildknorpelfraktur auf als einer mit regulärer Anlage der SOHÖ.

Allerdings wies die Seite der Agenesie eine deutlich geringere und geänderte Ossifikation auf als die Hornseite im intraindividuellen Vergleich und im Vergleich mit regulärer Hornanlage. Dieses wird ausführlich dargestellt und anhand des Ossifikationsmusters beschrieben. Grad und Topographie der Ossifikation müssen mithin bei der Verletzungsanalyse berücksichtigt werden. Dass es allerdings durch eine Gelegenheitsursache, wie durch einen leichten Griff an den Hals, zur Schildknorpelfraktur kommen könnte, wäre morphologisch nicht zu begründen.

Damit konnten die hier erstmals durchgeführten morphometrischen Untersuchungen in Verbindung mit der Beschreibung der Ossifikation des Schilddrüsenknorpels bei einseitiger Agenesie des Schilddrüsenknorpeloberhorns nicht nur einen Beitrag zur funktionellen Anatomie leisten, sondern, daraus abgeleitet, eine Grundlage für die Frakturanalyse von zwei relevanten Formen der Gewalt gegen den Hals werden.

5.1 Zusammenfassung/Abstract

MORPHOMETRIC STUDIES OF THE LARYNX WITH UNILATERAL AGENESIS OF THE CORNU SUPERIUS OF THE CARTILAGO THYROIDEA. A FORENSIC TRAUMATOLOGY INVESTIGATION

BACKGROUND AND OBJECTIVE: The profound knowledge of the laryngeal cartilage is a key benefit for medico-legal investigations. Its importance for the assessments of trauma to the cervical tissues has led to comprehensively implemented studies. The unilateral agenesis of one upper thyroid horn is thought to be a rare anomaly. Yet its significance has not been fully investigated so far. This study aims to classify this anomaly of the larynx by comparison to regular configured thyroid cartilages.

MATERIAL AND METHOD: 49 larynxes (23 from deceased women, 26 from deceased men; 23 regular, 21 unilateral, 5 bilateral agenesis) were obtained in post-mortem examinations for further investigations by the department of public prosecution. Each larynx was scanned using micro-computed tomography for high-resolution imaging. The partial incorporation of contrast agents helped in cases of low ossification. 18 parameters (consisting of 7 angles and 11 distances) were measured on the thyroid and cricoid cartilages to summarize the overall laryngeal framework.

RESULTS: In total 882 measurements were performed on the 49 larynxes (median: women = 68 years; male = 64.5 years). A gender dimorphism could be confirmed: E.g. the angle between the thyroid alae was in women $81.92^{\circ} \pm 12.9^{\circ}$ and in men $65.48^{\circ} \pm 12.4^{\circ}$ ($p < 0.001$). As for the analysis of the two main groups (using matched pairs) no distinguishable difference could be found for the laryngeal and cricoid cartilages. The overall comparison of the intraindividual symmetry using a symmetry score showed no significance ($p = 0.139$).

CONCLUSION: In medico-legal investigations the vulnerability of the laryngeal complex is one of the main aspects in the assessment of cervical trauma. Due to the probable vector of force to the larynx different criteria have been used to estimate its framework stability. Important parameters are e.g. the symmetry and ossification of the larynx. This study showed that the agenesis of one upper thyroid horn does not affect its symmetry, yet the different ossification pattern seen in the individual analysis varied enormously. Especially the posterior parts showed an asymmetrical inhomogeneous ossification in the intraindividual comparison of the group with the unilaterally missing horn. This was not found in the other groups. Thus, a greater susceptibility to injury is more likely when planar force to the larynx is administered.

MORPHOMETRISCHE UNTERSUCHUNGEN DES KEHLSKELETTS BEI SINGULÄRER ANLAGE DES CORNU SUPERIUS DER CARTILAGO THYROIDEA. UNTERSUCHUNGEN ZUR FORENSISCHEN TRAUMATOLOGIE

HINTERGRUND UND ZIELSETZUNG: Die grundlegende Kenntnis des Schildknorpels stellt einen entschiedenen Vorteil für rechtsmedizinische Untersuchungen bei Gewalt gegen den Hals dar. Diese Dringlichkeit führte bereits zu ausgedehnten Untersuchungen der Halsorgane. Die einseitige Agenesie der Schildknorpeloberhörner wird für eine Seltenheit gehalten. Allerdings wurde seine Bedeutung bisher nicht näher untersucht. Diese Untersuchung soll einen Beitrag zur Einordnung dieser Anomalie im Vergleich mit regulären Kehlköpfen leisten.

MATERIAL UND METHODIK: 49 Kehlköpfe (23 von gestorbenen Frauen, 26 von gestorbenen Männern; 23 mit regulärer Schildknorpelkonfiguration, 21 mit einseitiger und fünf mit bilateraler Agenesie) stammen aus gerichtlich angeordneten Obduktionen. Von jedem Kehlkopf wurde mittels Mikrocomputertomographie hochauflösende Bilder erzeugt. Teilweise wurde Kontrastmittel bei geringer Ossifikation verwendet. 18 Parameter (7 Winkel, 11 Strecken) wurden am Schild- und Ringknorpel gemessen.

ERGEBNISSE: Insgesamt wurden 882 Messungen an den 49 Kehlköpfen (Median: weiblich = 68 Jahre; männlich = 64,5 Jahre) durchgeführt. Ein Geschlechtsdimorphismus konnte bestätigt werden: Beispielsweise betrug der Winkel zwischen den Schildknorpelplatten bei Frau $81,92^{\circ} \pm 12,9^{\circ}$ und bei Männern $65,48^{\circ} \pm 12,4^{\circ}$ ($p < 0,001$). Die Analyse der beiden Paar-zugeordneten Gruppen zeigte keinen signifikanten Unterschied. Der intraindividuelle Symmetrievergleich zeigte ebenfalls keinen signifikanten Unterschied. ($p = 0,139$).

SCHLUSSFOLGERUNG: Die Verletzbarkeit des laryngealen Komplexes stellt im Rahmen von rechtsmedizinischen Untersuchungen bei Gewalt gegen den Hals eine Hauptgrundlage dar. Verschiedene Kriterien wurden herangeführt, um dessen Stabilität und Vulnerabilität einzuordnen. Die Symmetrie und Ossifikation des Kehlkopfes sind wichtige Parameter. Diese Untersuchung konnte zeigen, dass die einseitige Agenesie eines Schildknorpeloberhorns keinen Einfluss auf die Symmetrie hat, allerdings mit großen Unterschieden in der Ossifikationsausprägung. Vor allem die dorsalen Anteile wiesen im intraindividuellen Vergleich besonders im Kollektiv mit einseitiger Schildknorpeloberhornanlage eine asymmetrische, inhomogene Ossifikation auf. Daher ist von einer größeren Verletzungsanfälligkeit bei flächiger Krafteinwirkung auszugehen.

6 Verzeichnisse

6.1 Abkürzungsverzeichnis

CT	Computertomographie
HWS	Halswirbelsäule
KK	Kehlkopf
μ-CT	Mikro-Computertomographie
MRT	Magnetresonanztomographie
MW(-Diff.)	Mittelwert(-differenz)
PTA	Phosphorwolframsäure
RK	Ringknorpel
SK	Schildknorpel
SKP	Schildknorpelplatte
SOHA	Schildknorpeloberhornanlage
SOHO	Schildknorpeloberhorn
SOHÖ	Schildknorpeloberhörner
StA	Staatsanwaltschaft
ZB	Zungenbein

6.2 Abbildungsverzeichnis

ABB. 1: A.-P.; MAXIMUM INTENSITY PROJECTION (KEHLKÖPFE V.L.N.R. ANGEORDNET) 1A) REGULÄRE ANLAGE DER SCHILDKNORPELOBERHÖRNER MIT JEWEILS EINER CARTILAGO TRITICEA (KK#30); 1B) EINSEITIGE ANLAGE (KK#42); 1C) FEHLENDE ANLAGE DER SCHILDKNORPELOBERHÖRNER (KK#37).....	3
ABB. 2: TRANSVERSALSCHNITT; SCREENSHOT VON KK#42; WINKELMESSUNG DER RE. SCHILDKNORPELPLATTE AUF HÖHE DES KRANIALEN ANTEILS DER SCHILDKNORPELKOMMISSUR; WINKEL ZWISCHEN DER HORIZONTALTANGENTE AN PUNKT B UND DER STRECKE <i>AB</i>	6
ABB. 3: VEREINFACHTE DARSTELLUNG EINES μ -CT. DIE PROBE KANN IN DEN DARGESTELLTEN ACHSEN FREI BEWEGT WERDEN. DIE ABBILDUNG WURDE MODIFIZIERT DARGESTELLT NACH COMPUTED TOMOGRAPHY (KALENDER 2011).....	9
ABB. 4: VEREINFACHTE DARSTELLUNG DES EINFLUSSES DER BRENNFLECKGRÖÖE AUF DIE GEOMETRISCHE UNSCHÄRFE IN FORM DES HALBSCHATTENS	10
ABB. 5: SAGITTALSCHNITT DURCH DIE INZISUR; LINKS: KEHLKOPF VOR KONTRASTIERUNG MIT PHOSPHORWOLFRAMSÄURE; RECHTS: KEHLKOPF NACH VIERTÄGIGER KONTRASTIERUNG MIT PHOSPHORWOLFRAMSÄURE, PFEILE ZEIGEN VERBESSERTE VISUALISIERUNG DES WENIGER KALZIFIZIERTEN KNORPELS; KK#16 (WEIBLICH, 64 JAHRE).....	12
ABB. 6: TRANVERSALSCHNITT AUF SCHILDKNORPELINZISURHÖHE; WINKEL A (BLAU) = WINKEL ZW. SCHILDKNORPELPLATTEN; WINKEL B (TÜRKIS) – GEBILDET DURCH DAS LOT AUF DIE HORIZONTALTANGENTE IN A UND DER STRECKE <i>AB</i> ; WINKEL Γ (ORANGE) - ZWISCHEN DER GERADEN <i>CD</i> UND DEM LOT AUF DIE HORIZONTALTANGENTE IN B; X ENTSPRICHT DER INZISUR; SCHILDKNORPEL KK#16	15
ABB. 7: TRANVERSALSCHNITT AUF SCHILDKNORPELINZISURHÖHE; X = INZISUR; TÜRKISER PFEIL = STRECKE <i>AB</i> ; ORANGER PFEIL = STRECKE <i>CD</i> ; GRELLROSA PFEIL = STRECKE <i>BD</i> ; SCHILDKNORPEL KK#16.....	15
ABB. 8: KORONALSCHNITT DURCH DEN SCHILDKNORPEL (DORSALER RAND); X = RINGKNORPELANSCHNITT; WINKEL Δ (TÜRKIS): LATERALNEIGUNG DER RE. SCHILDKNORPELPLATTE; WINKEL ϵ (GRELLROSA): LATERALNEIGUNG DER LI. SCHILDKNORPELPLATTE; SCHILDKNORPEL KK#26	16
ABB. 9: SAGITTALSCHNITT DURCH DIE SCHILDKNORPELKOMMISSUR; VRK = VENTRALER RINGKNORPELANTEIL; DRK = DORSALER RINGKNORPELANTEIL; DUNKELBLAUER PFEIL: SCHILDKNORPELKOMMISSUR (<i>IJ</i>) UND DARAN ANGELEGT DER WINKEL Z (TÜRKIS) ALS DESSEN NEIGUNGSWINKEL NACH VENTRAL ZUM LOT AUF DIE HORIZONTALEN TANGENTE IN I; SCHILD- UND RINGKNORPEL KK#22	17
ABB. 10: TRANSVERSALEBENE; BLAUER PFEIL: VENTRO-DORSALE AUSDEHNUNG DES INNEREN RINGS; GRÜNER PFEIL: LATERALE AUSDEHNUNG DES INNEREN RINGS; Z = ZENTRUM; RINGKNORPEL KK#40	18
ABB. 11: TRANSVERSALEBENE; GRELLROSA PFEIL: VENTRO-DORSALE AUSDEHNUNG DES ÄUßEREN RINGS; BLAUER PFEIL: LATERALE AUSDEHNUNG DES ÄUßEREN RINGS; Z = ZENTRUM; RINGKNORPEL KK#40.....	19
ABB. 12: SAGITTALSCHNITT; O = SCHILDKNORPELKOMMISSUR; * = RINGKNORPEL DORSAL; X = RINGKNORPEL VENTRAL; LINKES BILD – ROTER PFEIL: HÖHE DES RINGKNORPELS VENTRAL (<i>KL</i>); GELBER PFEIL: DISTANZ DER OBERKANTEN VON RINGKNORPEL DORSAL U. VENTRAL (<i>LN</i>); GRÜNER PFEIL: HÖHE RINGKNORPEL DORSAL (<i>MN</i>); RECHTES BILD – WINKEL H (TÜRKIS) ZEIGT DIE NEIGUNG DES RINGKNORPELS DORSAL; KK#43	20
ABB. 13: SEITLICHER STRAHLENGANG; MAXIMUM INTENSITY PROJECTION; 48 JAHRE, MÄNNLICH; KK#32.....	37
ABB. 14: A.-P. (LINKS) UND SEITLICHER STRAHLENGANG (RECHTS); MAXIMUM INTENSITY PROJECTION; KEHLKOPF EINER 77 JAHRE ALT GEWORDENEN FRAU MIT AGENESIE DES RECHTEN SCHILDKNORPELOBERHORNS. INHOMOGENITÄTEN UND GROÖE OSSIFIKATIONSLÜCKEN IM LINKEN SOHO; KK#16	38
ABB. 15: SEITLICHER STRAHLENGANG; MAXIMUM INTENSITY PROJECTION; A) LINKS (KK#48) MIT BOGENFÖRMIGEM, NACH VENTRAL GERICHTETEM SCHILDKNORPELOBERHORN; B) RECHTS (KK#16) MIT NACH DORSAL GENEIGTEM SCHILDKNORPELOBERHORN	40
ABB. 16: HALBQUANTITATIVE WIEDERGABE DER KNOCHENDICHTE IM ÄQUIDENSITÄTENBILD; OBERE REIHE: SYMMETRISCHE KONFIGURATION, JEDOCH UNTERSCHIEDLICHER NEIGUNG DES SOHO IN DER SAGITTALEBENE; UNTERE REIHE: AGENESIE DES LINKEN SOHO. ABBILDUNG MIT DER FREUNDLICHEN ERLAUBNIS VON PROF. DR. SATERNUS AUS EINER NICHT VERÖFFENTLICHEN ARBEIT EINGEFÜGT	41
ABB. 17: A.-P. UND SEITLICHER STRAHLENGANG; MAXIMUM INTENSITY PROJECTION: 72 JAHRE, MÄNNLICH, LINKS AGENESIE SOHO; SEHR DEUTLICHE SPONGIOSAZÜGE; KK#40	42
ABB. 18: A.-P.; MAXIMUM INTENSITY PROJECTION; 39 JAHRE ALT GEWORDENER MANN; KK#26	45
ABB. 19: A.-P.; MAXIMUM INTENSITY PROJECTION; 35 JAHRE ALT GEWORDENER MANN MIT LINKS FEHLENDEM SOHO; KK#24	50

6.3 Tabellenverzeichnis

TAB. 1: FORTLAUFENDE NUMMERIERUNG #1-#23, PAARNUMMERIERUNG 1-11; OH = SCHILDKNORPELOBERHORN.....	5
TAB. 2: FORTLAUFENDE NUMMERIERUNG #24-#49, PAARNUMMERIERUNG 12-23; OH = SCHILDKNORPELOBERHORN.....	5
TAB. 3: EIGENSCHAFTEN VOM SKYSCAN 1173 DER BRUKER CORPORATION (BRUKER GMBH).....	8
TAB. 4: VERWENDETE EINSTELLUNGEN VON STROMSPANNUNG UND -STÄRKE; RESULTIERENDE BELICHTUNGSZEIT IN MILLISEKUNDEN; DURCHSCHNITTLICHE GESAMTSCANDAUER IN STUNDEN	11
TAB. 5: DESKRIPTIVE ANALYSE FÜR DAS GESAMTKOLLEKTIV DER MESSSTRECKEN AM SCHILDKNORPEL; WINKEL IN GRAD, LÄNGEN/DURCHMESSER IN MM	23
TAB. 6: DESKRIPTIVE ANALYSE FÜR DAS GESAMTKOLLEKTIV DER MESSSTRECKEN AM RINGKNORPEL; WINKEL IN GRAD, LÄNGEN/DURCHMESSER IN MM	23
TAB. 7: T-TEST ZUR PRÜFUNG DER ABHÄNGIGKEIT VOM GESCHLECHT; \emptyset = DURCHMESSER, P-WERTANGABEN VON 0.000 ENTSPRECHEN $P < 0,001$	24
TAB. 8: DESKRIPTIVE ANALYSE FÜR DAS WEIBLICHE UND MÄNNLICHE KOLLEKTIV (SCHILDKNORPEL)	27
TAB. 9: DESKRIPTIVE ANALYSE FÜR DAS WEIBLICHE UND MÄNNLICHE KOLLEKTIV (RINGKNORPEL).....	27
TAB. 10: ALTERSKORRELATION DER EINZELNEN MESSWERTE. DARGESTELLT DIE PEARSON-KORRELATION, P-WERT UND DIE ANZAHL DER GEWERTETEN KEHLKÖPFE; RK = RINGKNORPEL	28

6.4 Diagrammverzeichnis

DIAGRAMM 1: ALTERS- UND GESCHLECHTSVERTEILUNG; BLAU = WEIBLICH, GRAU = MÄNNLICH	4
DIAGRAMM 2: BEISPIEL FÜR DIE NÄHERUNGSWEISE VORHANDENE NORMALVERTEILUNG DER WERTE ANHAND DES WINKEL A; FREQUENCY = HÄUFIGKEIT; DIAGRAMM RE.: DARSTELLUNG EINES Q-Q PLOTS FÜR DEN WINKEL A - DIE LINIE GIBT DIE NORMALVERTEILUNG WIEDER. UM DIESE SCHWANKEN DIE EINZELNEN MESSWERTE	22
DIAGRAMM 3: GESCHLECHTERVERGLEICH FÜR DIE GEMESSENEN WINKEL ZW. DEN SCHILDKNORPELPLATTEN (TRANSVERSAL). WINKEL A (GESAMTWINKEL ZW. SCHILDKNORPELPLATTEN), WINKEL B (WINKEL ZW. RE. SCHILDKNORPELPLATTE UND VENTRO-DORSALER ACHSE), WINKEL Γ (WINKEL ZW. LI. SCHILDKNORPELPLATTE UND VENTRO-DORSALER ACHSE); MITTELWERTE – WEIBLICHES KOLLEKTIV: WINKEL A (81,92°), WINKEL B (41,18°), WINKEL Γ (40,75°); MITTELWERTE – MÄNNLICHES KOLLEKTIV: WINKEL A (65,48°), WINKEL B (32,26°), WINKEL Γ (33,2°); P-WERTE JE <0,001	25
DIAGRAMM 4: GESCHLECHTERVERGLEICH FÜR DEN NEIGUNGSWINKEL DER SCHILDKNORPELPLATTEN NACH LATERAL (KORONAL); GEMESSEN ZUM KRANIO-KAUDALEN LOT. WINKEL Δ (LATERALNEIGUNGSWINKEL DER RE. SCHILDKNORPELPLATTE), WINKEL E (LATERALNEIGUNGSWINKEL DER LI. SCHILDKNORPELPLATTE) MITTELWERTE – WEIBLICHES KOLLEKTIV: WINKEL Δ (17,81°), WINKEL E (15,01°); MITTELWERTE – MÄNNLICHES KOLLEKTIV: WINKEL Δ (10,47°), WINKEL E (8,59°); P-WERTE JE <0,001.....	25
DIAGRAMM 5: GESCHLECHTERVERGLEICH FÜR DIE SCHILDKNORPELPLATTENLÄNGE (TRANSVERSAL) DER RECHTEN UND LINKEN SEITE. STRECKE AB (LÄNGE DER RE. SCHILDKNORPELPLATTE), STRECKE CD (LÄNGE DER LI. SCHILDKNORPELPLATTE), MITTELWERTE – WEIBLICHES KOLLEKTIV: STRECKE AB (30,08MM), STRECKE CD (28.96MM); MITTELWERTE – MÄNNLICHES KOLLEKTIV: STRECKE AB (39,63MM), STRECKE CD (39,13MM); P-WERTE JE <0,001.....	26
DIAGRAMM 6: PAARVERGLEICH FÜR DIE SEITE MIT FEHLENDER (LINKS) UND ANGELEGTER SCHILDKNORPELOBERHORNANLAGE (RECHTS), AUSGEHEND VOM KOLLEKTIV MIT SINGULÄRER ANLAGE UND DEM KONTROLLKOLLEKTIV. AUFGETRAGEN DIE GEMITTELTEN WINKEL IN GRAD FÜR DEN WINKEL ZWISCHEN DER SCHILDKNORPELPLATTE UND DER VENTRO-DORSALEN ACHSE (SEITENUNABHÄNGIG); *** = $p < 0,001$, N.S. = NICHT SIGNIFIKANT.....	29
DIAGRAMM 7: PAARVERGLEICH FÜR DIE SEITE MIT FEHLENDER (LINKS) UND ANGELEGTER SCHILDKNORPELOBERHORNANLAGE (RECHTS), AUSGEHEND VOM KOLLEKTIV MIT SINGULÄRER ANLAGE UND DEM KONTROLLKOLLEKTIV. AUFGETRAGEN DIE GEMITTELTEN WINKEL IN GRAD FÜR DEN NEIGUNGSWINKEL DER SCHILDKNORPELPLATTE NACH LATERAL (SEITENUNABHÄNGIG); N.S. = NICHT SIGNIFIKANT	30
DIAGRAMM 8: PAARVERGLEICH FÜR DIE SEITE MIT FEHLENDER (LINKS) UND ANGELEGTER SCHILDKNORPELOBERHORNANLAGE (RECHTS), AUSGEHEND VOM KOLLEKTIV MIT SINGULÄRER ANLAGE UND DEM KONTROLLKOLLEKTIV; GEMITTELTE LÄNGE IN MM FÜR DIE LÄNGE DER SCHILDKNORPELPLATTEN (VENTRO-DORSAL); N.S. = NICHT SIGNIFIKANT, ** = $p < 0,01$...	31
DIAGRAMM 9: GEMITTELTE DIFFERENZEN FÜR DIE MESSEBENEN: SCHILDKNORPELPLATTENWINKEL ZUR GEDACHTEN VENTRO- DORSALEN ACHSE (LINKS); LATERALER NEIGUNGSWINKEL DER SCHILDKNORPELPLATTE (MITTIG); LÄNGE DER SCHILDKNORPELPLATTEN IN DER TRANSVERSALEN EBENE (RECHTS)	31
DIAGRAMM 10: DARSTELLUNG DES SYMMETRIE-SCORES – ENTSPRICHT DER SUMME DER IN DIAGRAMM 9 AUFGEFÜHRTE DIFFERENZEN NACH Z-TRANSFORMATION (DIMENSIONSLOS); $p = 0,139$, MITTELWERTDIFFERENZ = 0,95; N.S. = NICHT SIGNIFIKANT.....	32
DIAGRAMM 11: DARSTELLUNG DER EINZELNEN MESSVARIABLEN IM VERHÄLTNIS ZU DEN ZWEI WESENTLICHEN HAUPTKOMPONENTEN	33
DIAGRAMM 12: GESCHLECHTSSPEZIFISCHE DARSTELLUNG DER 49 KEHLKÖPFE, IM BEZUG ZU DEN HAUPTKOMPONENTEN UND DEN EINZELNEN MESSVARIABLEN (= SCHWARZ); GRÜN = MÄNNLICH, BLAU = WEIBLICH; SKALA IM VERGLEICH ZU DIAGRAMM 11 ANGEPASST	48

6.5 Literaturverzeichnis

- Advenier, A. S.; La Grandmaison, G. L. de; Cavard, S.; Pyatigorskaya, N.; Malicier, D.; Charlier, P. (2014): Laryngeal anomalies: Pitfalls in adult forensic autopsies. In: *Medicine, Science and the Law* 54 (1), S. 1–7. DOI: 10.1177/0025802413485731.
- Ajmani, M. L. (1990): A metrical study of the laryngeal skeleton in adult Nigerians. In: *Eur J Anat* 171, S. 187–191.
- Angood P.B.; Attia E.L.; Brown, R.; Mulder, D. (1986): Extrinsic Civilian Trauma to the Larynx and Cervical Trachea. Important Predictors of Long-term Morbidity. In: *J Trauma* 26 (10), S. 869–873. DOI: 10.1097/00005373-198610000-00002.
- Aumüller, G. (2010): Halsorgane. Larynx. In: Anatomie. 208 Tabellen. 2., überarb. Aufl. Stuttgart: Thieme (Duale Reihe), S. 832.
- Bockholdt, B.; Hempelmann, M.; Maxeiner, H. (2003): Experimental investigations of fractures of the upper thyroid horns. In: *Leg Med* 5, S252-S255. DOI: 10.1016/S1344-6223(02)00142-6.
- Bouxsein, M. L.; Boyd, S. K.; Christiansen, B. A.; Guldborg, R. E.; Jepsen, K. J.; Müller, R. (2010): Guidelines for assessment of bone microstructure in rodents using micro-computed tomography. In: *J Bone Miner Res* 25 (7), S. 1468–1486. DOI: 10.1002/jbmr.141.
- Brinkmann, B. (2004): Karotissinusreflex/Vagusreflex. In: B. Brinkmann und B. Madea (Hg.): Handbuch der gerichtlichen Medizin, Bd. 2. Berlin, Heidelberg, New York: Springer (1&2), S. 717–719.
- Brosch, S.; Johannsen, H. S. (1999): Clinical course of acute laryngeal trauma and associated effects on phonation. In: *J. Laryngol. Otol.* 113 (01). DOI: 10.1017/S0022215100143154.
- Bruker GmbH: Bruker Skyscan 1173. Technische Details. Online verfügbar unter <https://www.bruker.com/products/microtomography/micro-ct-for-sample-scanning/skyscan-1173/technical-details.html>.
- Byrdy, M.; Jelisiejew, T. (1971): Der Wert des geschlechtlichen Dimorphismus der menschlichen Kehlkopfknorpel in Identitätsuntersuchungen. In: *Kriminalistik und forensische Wissenschaft* (6), S. 153–159.
- Claassen, H. (1999): Untersuchungen zur Mineralisation und Knochenbildung im Schildknorpel und im ersten Rippenknorpel. Ein Beitrag zur Anatomie der sogenannten permanenten Knorpel. Als Ms. gedr. Aachen: Shaker (Berichte aus der Medizin).
- Clément, R.; Guay, J.-P.; Sauvageau, A. (2011): Fracture of the neck structures in suicidal hangings. A Retrospective study on contributing variables. In: *Forensic Science International* 207 (1-3), S. 122–126. DOI: 10.1016/j.forsciint.2010.09.016.
- Davison, A.; Marshall, T. K. (1986): Hanging in Northern Ireland—A Survey. In: *Medicine, Science and the Law* 26 (1), S. 23–28. DOI: 10.1177/002580248602600105.
- Dettmeyer, R.; Verhoff, M. A.; Schütz, H. F. (2015): Forensic Medicine. Fundamentals and Perspectives. Softcover reprint of the original 1st ed. 2014. Berlin: Springer Berlin; Springer.
- Dettmeyer, R. B. (2011): Forensic Histopathology. Berlin, Heidelberg: Springer Berlin Heidelberg.
- Drake, R. L.; Vogl, W.; Mitchell, A. W. M.; Paulsen, F. (Hg.) (2007): Gray's Anatomie für Studenten. 1. Aufl. München: Elsevier Urban & Fischer.
- Dunsby, A.-M.; Davison, A. M. (2011): Causes of laryngeal cartilage and hyoid bone fractures found at postmortem. In: *Medicine, Science and the Law* 51 (2), S. 109–113. DOI: 10.1258/msl.2010.010209.
- Eckel, H. E.; Sittel, C.; Zorowka, P.; Jerke, A. (1994): Dimensions of the laryngeal framework in adults. In: *Surg Radiol Anat* 16 (1), S. 31–36. DOI: 10.1007/BF01627918.

- Elliott, J. C.; Dover, S. D. (1982): X-ray microtomography. In: *Journal of Microscopy* 126 (2), S. 211–213. DOI: 10.1111/j.1365-2818.1982.tb00376.x.
- Engelke, K.; Karolczak, M.; Lutz, A.; Seibert, U.; Schaller, S.; Kalender, W. (1999): Mikro-CT. In: *Der Radiologe* 39 (3), S. 203–212. DOI: 10.1007/s001170050497.
- Feigin, G. (1999): Frequency of neck organ fractures in hanging. In: *The American journal of forensic medicine and pathology* 20 (2), S. 128–130.
- Feldkamp, L. A.; Jesion, G.; Kubinski, D. J. (1989): Fundamental Aspects of micro-CT in Cone-Beam Geometry. In: Donald O. Thompson und Dale E. Chimenti (Hg.): *Review of Progress in Quantitative Nondestructive Evaluation*. Boston, MA: Springer US, S. 381–388.
- Green, H.; James, R. A.; Gilbert, J. D.; Byard, R. W. (2000): Fractures of the hyoid bone and laryngeal cartilages in suicidal hanging. In: *Journal of clinical forensic medicine* 7 (3), S. 123–126. DOI: 10.1054/jcfm.2000.0419.
- Gussack, G.; Jurkovich, G.; Luterman, A. (1986): Laryngotracheal trauma: a protocol approach to a rare injury. In: *The Laryngoscope* 96 (6), 660–665. DOI: 10.1288/00005537-198606000-00013.
- Hajjiannou, J. K.; Florou, V.; Kousoulis, P. (2010): Superior thyroid cornu anatomical variation causing globus pharyngeus and Dysphagia. In: *Case reports in medicine*. DOI: 10.1155/2010/142928.
- Harjeet, J. I. (1989): Agenesis of superior cornua of thyroid cartilage in north-west Indians. In: *J Anat Soc India* 38 (1), S. 37–40.
- Hejna, P.; Janík, M.; Urbanová, P. (2015): Agenesis of the superior cornua of the thyroid cartilage: a rare variant of medicolegal importance. In: *Am J Forensic Med Pathol* 36 (1), S. 10–12. DOI: 10.1097/PAF.0000000000000131.
- Henßge, C. (1990): Beweisthema todesursächliche/lebensgefährliche Halskompression. Pathophysiologische Aspekte der Interpretation. In: Bernd Brinkmann und Klaus Püschel (Hg.): *Ersticken: Fortschritte in der Beweisführung Festschrift für Werner Janssen*. Berlin, Heidelberg: Springer Berlin Heidelberg, S. 3–13.
- Hirano, M.; Kurita, S.; Yukizane, K.; Hibi, S. (1989): Asymmetry of the laryngeal framework: a morphologic study of cadaver larynges. In: *Ann Otol Rhinol Laryngol* 98 (2), S. 135–140. DOI: 10.1177/000348948909800210.
- Hoover, C. A.; McLaughlin, R. B.; Sataloff, R. T.; Lyons, K. M.; McCarter, A. A. (1998): Vocal fold hemorrhage following laryngeal trauma. In: *Ear, nose, & throat journal* 77 (5), S. 364–366.
- Jain, M.; Dhall, U. (2010): Morphometry of the Thyroid and Cricoid Cartilages in Adults on C.T. Scan. In: *J Anat Soc India* 59 (1), S. 19–23. DOI: 10.1016/S0003-2778(10)80005-X.
- Joshi, M. M.; Joshi, S. S.; Joshi, S. D. (2011): Absence of superior cornua. A rare variant of thyroid cartilage anatomy. In: *Int J Stu Res*, S. 88–89. DOI: 10.5549/IJSR.1.3.88-89.
- Kalender, W. A. (2011): *Computed tomography. Fundamentals, system technology, image quality, applications*. 3rd rev. ed., 2011. Germany: Publicis Pub. Online verfügbar unter <http://site.ebrary.com/lib/alltitles/docDetail.action?docID=10504146>.
- Khokhlov, V. D. (1997): Injuries to the hyoid bone and laryngeal cartilages. In: *Forensic Science International* 88 (3), S. 173–183. DOI: 10.1016/S0379-0738(97)00101-1.
- Khokhlov, V. D. (1998): Anomalies of the thyroid cartilage and their forensic medical significance. In: *Sudebno-meditsinskaia ekspertiza* 41 (2), S. 23–26.
- Kleemann, W. J.; Urban, R.; Graf, U.; Tröger, H. D. (1990): Kann ein Griff an den Hals zum reflektorischen Herztod führen? In: Bernd Brinkmann und Klaus Püschel (Hg.): *Ersticken: Fortschritte in der Beweisführung Festschrift für Werner Janssen*. Berlin, Heidelberg: Springer Berlin Heidelberg, S. 14–20.
- Koebke, J.; Saternus, K.-S. (1979): Das Verletzungsmuster des Zungenbeins (The injury pattern of the hyoid bone). In: *Z Rechtsmed (Zeitschrift für Rechtsmedizin)* (84), S. 19–35.

- Koşar, M. İ.; Tetiker, H.; Uğuz Gençer, C.; Balcı, Y.; Şahan, M. (2015): A variation of the thyroid cartilage. Absence of left superior cornu. In: *Cumhuriyet Med J* 37 (2), S. 161. DOI: 10.7197/cmj.v37i2.5000105122.
- Kotter, E.; Langer, M. (2002): Digital radiography with large-area flat-panel detectors. In: *European radiology* 12 (10), S. 2562–2570. DOI: 10.1007/s00330-002-1350-1.
- Kovac, T.; Popović, B.; Marjanović, K.; Wertheimer, V.; Kovacević, M.; Nikolić, V. et al. (2010): Morphometric characteristics of thyroid cartilage in people of Eastern Croatia. In: *Collegium antropologicum* 34 (3), S. 1069–1073.
- La Grandmaison, G. L. de; Banasr, A.; Durigon, M. (2003): Age Estimation Using Radiographic Analysis of Laryngeal Cartilage. In: *Am J Forensic Med Pathol.* 24 (1), S. 96–99. DOI: 10.1097/01.PAF.0000052756.47528.6D.
- Leopold, D. (1978): Ossifikation des Kehlkopfknorpels. In: Horst Hunger und Dieter Leopold (Hg.): Identifikation. Berlin, Heidelberg: Springer Berlin Heidelberg, S. 157–158.
- Leopold, D. (Hg.) (1998): Identifikation unbekannter Toter. Interdisziplinäre Methodik, forensische Osteologie; mit 95 Tabellen. Lübeck: Schmidt-Römhild (Arbeitsmethoden der medizinischen und naturwissenschaftlichen Kriminalistik, 22).
- Loth, A.; Corny, J.; Santini, L.; Dahan, L.; Dessi, P.; Adalian, P.; Fakhry, N. (2015): Analysis of Hyoid-Larynx Complex Using 3D Geometric Morphometrics. In: *Dysphagia* 30 (3), S. 357–364. DOI: 10.1007/s00455-015-9609-2.
- Luschka, H. von (1868): Über den Mangel eines continuirlichen oberen Hornes der Cartilago thyreoidea des Menschen. In: *Archiv für Pathologische Anatomie und Physiologie und für Klinische Medicin* 42 (4), S. 478–479. DOI: 10.1007/BF02005731.
- Maxeiner, H. (1999): Abgeheilte Frakturen von Kehlkopf und Zungenbein im forensischen Obduktionsgut. In: *Archiv für Kriminologie* 203 (5-6), S. 175–183.
- Maxeiner, H. (2004): Verletzungen des Kehlkopfs. In: B. Brinkmann und B. Madea (Hg.): Handbuch der gerichtlichen Medizin, I. Berlin, Heidelberg, New York: Springer (1&2), 734-748.
- McHanwell, S. (2008): Larynx. In: Susan Standring und Neel Ananad (Hg.): Gray's anatomy. The anatomical basis of clinical practice. 40th Ed. Philadelphia, Pa.: Elsevier, S. 577–582.
- Meganck, J. A.; Kozloff, K. M.; Thornton, M. M.; Broski, S. M.; Goldstein, S. A. (2009): Beam hardening artifacts in micro-computed tomography scanning can be reduced by X-ray beam filtration and the resulting images can be used to accurately measure BMD. In: *Bone* 45 (6), S. 1104–1116. DOI: 10.1016/j.bone.2009.07.078.
- Metscher, B. D. (2009): MicroCT for comparative morphology. Simple staining methods allow high-contrast 3D imaging of diverse non-mineralized animal tissues. In: *BMC physiology* 9, S. 11. DOI: 10.1186/1472.6793-9-11.
- Missliwetz, J.; Denk, W. (1990): Obstruktive Asphyxie in Kampfsportarten. In: Bernd Brinkmann und Klaus Püschel (Hg.): Ersticken: Fortschritte in der Beweisführung Festschrift für Werner Janssen. Berlin, Heidelberg: Springer Berlin Heidelberg, S. 35–41.
- Moll, K. J.; Moll, M. (2006): Anatomie. Kurzlehrbuch zum Gegenstandskatalog. 18., überarb. Aufl. München: Elsevier Urban & Fischer.
- Naimo, P.; O'Donnell, C.; Basset, R.; Briggs, C. (2013): The use of computed tomography in determining developmental changes, anomalies, and trauma of the thyroid cartilage. In: *Forensic Sci Med Pathol* 9 (3), S. 377–385. DOI: 10.1007/s12024-013-9457-z.
- Pauwels, E.; van Loo, D.; Cornillie, P.; Brabant, L.; van Hoorebeke, L. (2013): An exploratory study of contrast agents for soft tissue visualization by means of high resolution X-ray computed tomography imaging. In: *J. Microsc* 250 (1), S. 21–31. DOI: 10.1111/jmi.12013.
- Peters, K.; Umlandt, P. (1973): Röntgendiagnostik zur Erkennung von Verletzungen des Kehlrüsts und des Zungenbeins. In: *Beiträge zur gerichtlichen Medizin* (30), S. 345–356.
- Polson, C. J. (1985): Hanging. In: C. J. Polson und Gee, D. J., Night, B. (Hg.): The Essentials of Forensic Medicine. 4. Aufl. London, England: Pergamon Press, S. 357–388.

- Ritman, E. L. (2011): Current Status of Developments and Applications of Micro-CT. In: *Annu. Rev. Biomed. Eng.* 13 (1), S. 531–552. DOI: 10.1146/annurev-bioeng-071910-124717.
- Roth, D. J.; Rauser, R. W. (2014): The Effect of Experimental Variables on Industrial X-Ray Micro-Computed Sensitivity. National Aeronautics and Space Administration, Glenn Research Center. Cleveland, Ohio. Online verfügbar unter <http://www.sti.nasa.gov>, zuletzt geprüft am 28.07.2017.
- Ryk, J.; Silcocks, P. (1992): Suicidal hanging in Cardiff — A 15-year retrospective study. In: *Forensic Science International* 56 (2), S. 167–175. DOI: 10.1016/0379-0738(92)90175-V.
- Saternus, K.-S. (1979): Die Verletzungen von Halswirbelsäule und von Halsweichteilen. Stuttgart: Hippokrates (Die Wirbelsäule in Forschung und Praxis, 84).
- Saternus, K.-S.; Madea, B. (Hg.) (2007): Gerichtliche Obduktion. Umgang mit dem toten Menschen und Obduktionstechnik. Lübeck: Schmidt-Römhild (Research in legal medicine, 36).
- Saternus, K.-S.; Maxeiner, H.; Kernbach-Wighton, G.; Koebke, J. (2013): Traumatology of the superior thyroid horns in suicidal hanging - an injury analysis. In: *Legal medicine (Tokyo, Japan)* 15 (3), S. 134–139. DOI: 10.1016/j.legalmed.2012.10.008.
- Scheik, A. (1987): Verletzungen von Zungenbein und Kehlkopf bei Tötung durch Erwürgen oder Erdrosseln, bei suizidalem Erhängen sowie bei notfallmäßiger Intubation. Dissertation. Universität zu Köln, Köln. Medizinische Fakultät.
- Schiebler, T. H.; Korf, H.-W. (2007): Anatomie. Histologie, Entwicklungsgeschichte, makroskopische und mikroskopische Anatomie, Topographie. 10. Aufl. Stuttgart: Steinkopff. Online verfügbar unter <http://dx.doi.org/10.1007/978-3-7985-1771-4>.
- Sen Gupta, B. K. (1965): Studies on 101 cases of death due to hanging. In: *Journal of the Indian Medical Association* 45 (3), S. 135–140.
- Senders, C. W. (1994): Laryngeal trauma. In: Frank William Blaisdell (Hg.): Cervicothoracic trauma. 2. ed. New York: Thieme Med. Publ (Trauma management, 3), S. 160–177.
- Singla, R. K.; Kaur, R.; Laxmi, V. (2015): Morphology and Morphometry of Adult Human Cricoid Cartilage. A Cadaveric Study in North Indian Population. In: *IJAR* 3 (1), S. 910–914. DOI: 10.16965/ijar.2015.109.
- Sprinzi, G. M.; Eckel, H. E.; Sittel, C.; Pototschnig, C.; Koebke, J. (1999): Morphometric measurements of the cartilaginous larynx. An anatomic correlate of laryngeal surgery. In: *Head Neck* 21 (8), S. 743–750.
- Subramanyam, S.; Murali, G.; Mandal, S. P.; Bansal, Y. S.; Singh, D. (2014): Sex Determination from Anthropological Measurements of Thyroid Cartilage in the Population of Punjab. In: *Journal of Indian Academy of Forensic Medicine* 36 (4), S. 367–370.
- Tamaska, L.; Hinz, P. (1969): Kehlkopfverletzungen bei Schleudertrauma der Halswirbelsäule. In: *Zbl. Verkehrs-Med* (15), S. 98–104.
- Thiel, S. (2005): Die dorsale Konfiguration des Schildknorpels. Dissertation. Georg-August-Universität, Göttingen. Medizinische Fakultät.
- Thomsen, J. S.; Laib, A.; Koller, B.; Prohaska, S.; Mosekilde, L.; Gowin, W. (2005): Stereological measures of trabecular bone structure: comparison of 3D micro computed tomography with 2D histological sections in human proximal tibial bone biopsies. In: *J. Microsc* 218 (Pt 2), S. 171–179. DOI: 10.1111/j.1365-2818.2005.01469.x.
- Tillmann, B. (2003): Definition des Normbegriffes. In: Bernhard Tillmann (Hg.): Bewegungsapparat, Bd. 1. 3., überarb. Aufl. Stuttgart: Thieme, S. 4.
- Tillmann, B.; Leonhardt, H.; Rauber, A.; Kopsch, F. (Hg.) (1987): Anatomie des Menschen. Lehrbuch und Atlas. [Neuauf]. Stuttgart: Thieme (2).
- Uzün, I.; Büyüç, Y.; Gürpınar, K. (2007): Suicidal hanging: fatalities in Istanbul retrospective analysis of 761 autopsy cases. In: *Journal of forensic and legal medicine* 14 (7), S. 406–409. DOI: 10.1016/j.jflm.2007.01.002.

Vlcek, E. (1980): Estimation of age from skeletal material based on the degree of thyroid cartilage ossification. In: *Soudni lekarstvi* 25 (1), S. 6–11, zuletzt geprüft am zit. nach Leopold 1998, Abb. 3, S. 302.

Wastrak, P. (1970): Forensische Larynxradiologie unter besonderer Berücksichtigung der Alters- und Geschlechtsbestimmung. Dissertation. Universität zu Köln, Köln. Medizinische Fakultät.

Erklärung zur Dissertation:

„Hiermit erkläre ich, dass ich die vorliegende Arbeit selbständig und ohne unzulässige Hilfe oder Benutzung anderer als der angegebenen Hilfsmittel angefertigt habe. Alle Textstellen, die wörtlich oder sinngemäß aus veröffentlichten oder nichtveröffentlichten Schriften entnommen sind, und alle Angaben, die auf mündlichen Auskünften beruhen, sind als solche kenntlich gemacht. Bei den von mir durchgeführten und in der Dissertation erwähnten Untersuchungen habe ich die Grundsätze guter wissenschaftlicher Praxis, wie sie in der „*Satzung der Justus-Liebig-Universität Gießen zur Sicherung guter wissenschaftlicher Praxis*“ niedergelegt sind, eingehalten sowie ethische, datenschutzrechtliche und tierschutzrechtliche Grundsätze befolgt. Ich versichere, dass Dritte von mir weder unmittelbar noch mittelbar geldwerte Leistungen für Arbeiten erhalten haben, die im Zusammenhang mit dem Inhalt der vorgelegten Dissertation stehen, oder habe diese nachstehend spezifiziert. Die vorgelegte Arbeit wurde weder im Inland noch im Ausland in gleicher oder ähnlicher Form einer anderen Prüfungsbehörde zum Zweck einer Promotion oder eines anderen Prüfungsverfahrens vorgelegt. Alles aus anderen Quellen und von anderen Personen übernommene Material, das in der Arbeit verwendet wurde oder auf das direkten Bezug genommen wird, wurde als solches kenntlich gemacht. Insbesondere wurden alle Personen genannt, die direkt und indirekt an der Entstehung der vorliegenden Arbeit beteiligt waren. Mit der Überprüfung meiner Arbeit durch eine Plagiatserkennungssoftware bzw. ein internetbasiertes Softwareprogramm erkläre ich mich einverstanden.“

Gießen, den 28.08.2020

Ort, Datum

Can-Felix Winzek

Unterschrift

7 Danksagung

Die Fertigstellung dieser Dissertation wäre ohne Unterstützung nicht möglich gewesen. Aus diesem Grund möchte ich insbesondere an die folgenden Personen meinen herzlichsten Dank aussprechen:

Zunächst möchte ich em. Univ.-Prof. Dr. med. Dr. iur. h.c. Klaus-Steffen Saternus (Göttingen) und Univ.-Prof. Dr. med. Dr. iur. Dettmeyer (Gießen) für die gemeinsame Vergabe des Themas danken.

Im Besonderen danke ich em. Univ.-Prof. Dr. med. Dr. iur. h.c. Klaus-Steffen Saternus für das Bereitstellen der autoptisch entnommenen Präparate, für die intensive Betreuung während der Entwicklung bis hin zur Fertigstellung der Arbeit sowie seiner Expertise, seiner ansteckenden Begeisterung für das Thema und die motivierende Unterstützung, auf die ich jederzeit bauen konnte, ganz herzlich.

Mein herzlicher Dank richtet sich auch an Univ.-Prof. Dr. med. Dr. iur. Dettmeyer (Gießen) für die stetige Unterstützung, die unaufhörliche Hilfe bei Problemen und die Bereitstellung von Ressourcen, ohne die die Arbeit nicht hätte entstehen können.

Auch möchte ich Dr. med. Christoph Birngruber meinen Dank für die andauernde Geduld und den beharrlichen Rat aussprechen. Er begegnete auch meinen vielen kleinen Problemen auf dem Weg mit Verständnis und motivierenden Lösungsansätzen.

Für die Nutzung des Mikrocomputertomographen und die gute Zusammenarbeit möchte ich Dr. med. Marian Kampschulte danken. Erst mit seinem Knowhow war die Entwicklung der Methodik und die technische Umsetzung möglich.

Überdies hinaus danke ich ganz herzlich Dip. Ing. Gunhild Martels für die zeitaufwendige Erstellung des Bildmaterials und die freundliche Hilfe bei technischen Problemen. Für die ausführliche statistische Beratung danke ich Dr. Jörn Pons-Kühnemann aus dem Institut für Medizinische Informatik der Universität Gießen.

Letztlich danke ich Luisa Hartrampf für das Teamwork und die freundschaftliche Unterstützung.

8 Curriculum vitae und Publikationen

Der Lebenslauf wurde aus der endgültigen Fassung der Arbeit entfernt.

Publikationen:

Winzek C-F, Hartrampf LCM, Kampschulte M et al. (2019) Unilateral and bilateral agenesis of the upper thyroid horns - A morphometric analysis of the larynx. Forensic Science International 301: 225–230. doi: 10.1016/j.forsciint.2019.05.038

Hartrampf LCM, Winzek C-F, Kampschulte M et al. (2019) Zur Geschlechts- und Altersabhängigkeit der Ossifikation der Cartilago thyroidea. Rechtsmedizin. doi: 10.1007/s00194-019-0300-z