Aus der Klinik und Poliklinik für Hals-, Nasen-, Ohrenheilkunde,
Kopf- und Halschirurgie
(Direktor Univ.-Prof. Dr. med. habil. Werner Hosemann)
der Universitätsmedizin der Universität Greifswald

Dimensionen der Trachea und des laryngotrachealen Übergangs in der MRT-Bildgebung in einer epidemiologisch repräsentativen Kohorte

Inaugural – Dissertation

zur

Erlangung des akademischen

Grades

Doktor der Medizin
(Dr. med.)

der

Universitätsmedizin

der

Universität Greifswald

2019

vorgelegt von:
Catherine Désirée Schmidt
geb. am: 24.03.1990
in: Villingen-Schwenningen

Dekan:	Prof. Dr. med. Karlhans Endlich
1. Gutachter:	PD Dr. med. Achim Beule
2. Gutachter:	PD Dr. med. Annekatrin Coordes

Tag der Disputation: 20.07.2020

Inhaltsverzeichnis

Inhaltsverzeichnis I

Abkürzungsverzeichnis V

Abbildungsverzeichnis VI

Tabellenverzeichnis IX

1 Einleitung 1

1.1 Vorwort 1

1.2 Anatomie der unteren Atemwege - Kehlkopf und Trachea 2

1.3 Klinische Bedeutung der Trachea und des laryngotrachealen Übergangs 4

1.3.1 Stenosen und mögliche Ätiologien 4

1.3.2 Rekonstruktive Chirurgie 6

1.4 Einflussfaktoren 10

1.5 Stand der Forschung 11

1.6 Ziele dieser Studie 12

2 Probanden und Messmethodik 13

2.1 Probandenkollektiv 13

2.2 SHIP-MRT 14

2.3 Software 14

2.4 Entwicklung der Messmethode 15

2.5 Erhebung der Messparameter 16

2.5.1 Teil 1: Parameter zur Trachea und dem laryngotrachealen Übergang 18

2.5.1.1 Maximaler anterior-posteriore Durchmesser 20

2.5.1.2 Maximaler transversaler Durchmesser 21

2.5.1.3 Minimaler anterior-posteriore Durchmesser 22

2.5.1.4 Minimaler transversaler Durchmesser 22

2.5.1.5 Transversaler Durchmesser 4 mm von anterior 23

2.5.1.6 Volumen ... 24
2.5.2 Teil 2: Parameter zum Ringknorpel ... 25
2.5.2.1 Zusammenfassung der Durchmesser ... 25
2.5.2.2 Querschnittsfläche ... 26
2.6 Statistische Auswertung ... 27
2.6.1 Reliabilitätsanalyse ... 27
2.6.2 Deskriptive Analyse ... 27
2.6.3 Statistische Analyse ... 28
2.6.4 Prävalenzen ... 28
3 Ergebnisse ... 30
3.1 Messmethodik und Reliabilitätsanalyse ... 30
3.2 Teil 1: Parameter zur Trachea und dem laryngotrachealen Übergang ... 35
3.2.1 Deskriptive Analyse Teil 1 ... 35
3.2.1.1 Charakterisierung der Population Teil 1 ... 35
3.2.1.2 MRT-Auswertung Teil 1 ... 37
3.2.1.3 Maximaler anterior-posteriore Durchmesser ... 38
3.2.1.4 Maximaler transversaler Durchmesser ... 39
3.2.1.5 Transversaler Durchmesser 4 mm von anterior ... 40
3.2.1.6 Volumen ... 41
3.2.2 Statistische Analyse Teil 1 ... 42
3.2.2.1 Einfluss von Geschlecht und Alter ... 42
3.2.2.2 Korrelationen zwischen dem Alter und den Parametern ... 43
3.3 Teil 2: Parameter zum Ringknorpel ... 45
3.3.1 Deskriptive Analyse Teil 2 ... 45
3.3.1.1 Charakterisierung der Population Teil 2 ... 45
3.3.1.2 MRT-Auswertung Teil 2 ... 49
3.3.1.3 Deskription der Parameter zum Ringknorpel ... 49
3.3.2 Statistische Analyse Teil 2 ... 50

3.3.2.1 Einflussfaktoren auf den maximalen anterior-posterioren Durchmesser 50
3.3.2.2 Einflussfaktoren auf den maximalen transversalen Durchmesser .. 54
3.3.2.3 Einflussfaktoren auf den transversalen Durchmesser 4 mm von anterior 57
3.3.2.4 Einflussfaktoren auf die Querschnittsfläche 60
3.3.2.5 Korrelationen 63
3.3.2.6 Multivariate Regressionsanalyse 63
3.4 Prävalenzen 66
4 Diskussion 68
4.1 Methodik 68
4.1.1 Population 68
4.1.2 MRT 68
4.1.3 Reliabilität der Messparameter 69
4.1.4 Software 70
4.2 Teil 1: Einflussfaktoren auf die Parameter zur Trachea und dem laryngotrachealen Übergang 71
4.2.1 Maximaler anterior-posteriore und maximaler transversaler Durchmesser 71
4.2.2 Transversaler Durchmesser 4 mm von anterior 78
4.2.3 Volumen 79
4.2.4 Einfluss des Alters auf die Parameter zur Trachea und dem laryngotrachealen Übergang 82
4.3 Teil 2: Einflussfaktoren auf die Parameter zum Ringknorpel 83
4.3.1 Maximaler anterior-posteriore und maximaler transversaler Durchmesser 83
4.3.2 Transversaler Durchmesser 4 mm von anterior 89
4.3.3 Querschnittsfläche 91
4.3.4 Einfluss einer diagnostizierten Schilddrüsenerkrankung 94

4.3.5 Einfluss einer durchgemachten Radiojodtherapie 95

4.4 Prävalenzen 95

5 Zusammenfassung 97

Literaturverzeichnis XI

Anhang XXV

Danksagung XXVIII

Abkürzungsverzeichnis

Abb.	Abbildung
APmax	Maximaler anterior-posteriore Durchmesser
APmin	Minimaler anterior-posteriore Durchmesser
BMI	Body Mass Index
bzw.	beziehungsweise
CSA	Querschnittsfläche
CT	Computertomographie
DS	Diagnostizierte Schilddrüsenerkrankung
etc.	et cetera
ggf.	gegebenenfalls
inkl.	inklusive
LL4mmVA	Transversaler Durchmesser 4 mm von anterior
LLmax	Maximaler transversaler Durchmesser
LLmin	Minimaler transversaler Durchmesser
LTR	Laryngotracheale Rekonstruktion
LTÜG	Laryngotrachealer Übergang
Max	Maximum
Min	Minimum
MRT	Magnetresonanztomographie
Mw	Mittelwert
n	Fallzahl
r	Korrelationskoeffizient
RJT	Radiojodtherapie
SGS	Subglottische Stenose
Std	Standardabweichung
Tab.	Tabelle
TS	Trachealstenose
u.a.	unter anderem
Vol	Volumen
vs.	versus
z.B.	zum Beispiel
95%-KI	95 % - Konfidenzintervall

Abbildungsverzeichnis

Abb. 1: Übersicht der in der MRT relevanten Orientierungspunkte 17
Abb. 2: Darstellung der ausgemessenen Ebenen in der MRT 18
Abb. 3: Beispiel Glottis 19
Abb. 4: Beispiel Carina 19
Abb. 5: Maximaler anterior-posteriore Durchmesser 20
Abb. 6: APmax mit jeweils 5 mm Distanz 20
Abb. 7: Maximaler transversaler Durchmesser 21
Abb. 8: LLmax mit jeweils 5 mm Distanz 21
Abb. 9: Minimaler anterior-posteriore Durchmesser 22
Abb. 10: Minimaler transversaler Durchmesser 22
Abb. 11: Transversaler Durchmesser 4 mm von anterior 23
Abb. 12: Volumen 24
Abb. 13: Beispiel Cricoid 25
Abb. 14: Gesamtdarstellung von APmax, LLmax und LL4mmVA 25
Abb. 15: Querschnittsfläche 26
Abb. 16: Darstellung der Parameter in MeVisLab 26
Abb. 17: Bland-Altman-Plot von APmax und APmin 31
Abb. 18: Bland-Altman-Plot von APmax und LLmax 32
Abb. 19: Bland-Altman-Plot von APmin und LLmin 33
Abb. 20: Bland-Altman-Plot von LL4mmVA und Volumen 33
Abb. 21: Bland-Altman-Plot von CSA 34
Abb. 22: Geschlechterverteilung von Population 1 35
Abb. 23: Altersklassen und deren Verteilung von Population 1 36
Abb. 24: Verteilung der Slices pro Proband zur Darstellung der Trachea und ..... des LTÜGs 37
Abb. 25: APmax der Trachea und des LTÜGs in Abhängigkeit von der ..... subglottischen Distanz bei Männern und Frauen 38
Abb. 26: LLmax der Trachea und des LTÜGs in Abhängigkeit von der ..... subglottischen Distanz bei Männern und Frauen 39
Abb. 27: LL4mmVA der Trachea und des LTÜGs in Abhängigkeit von der ..... subglottischen Distanz bei Männern und Frauen 40
Abb. 28: Volumen in Abhängigkeit vom Geschlecht 41

Abb. 29: Geschlechterverteilung von Population 2 45
Abb. 30: Altersklassen und deren Verteilung von Population 2 46
Abb. 31: Gewichtsklassen und deren Verteilung von Population 2..... 46
Abb. 32: Größenklassen und deren Verteilung von Population 2 47
Abb. 33: Boxplot des BMI‘s mit Grenzen des 95%-KI 47
Abb. 34: Boxplot des Schilddrüsenvolumens mit Grenzen des 95%-KI 47
Abb. 35: Verteilung zu den Angaben einer Schilddrüsenerkrankung 48
Abb. 36: Verteilung zu den Angaben einer Radiojodtherapie 48
Abb. 37: Verteilung zur Abbildung einer Carina in der MRT 49
Abb. 38: APmax in Abhängigkeit vom Geschlecht 50
Abb. 39: APmax in Abhängigkeit vom Alter 51
Abb. 40: APmax in Abhängigkeit vom Körpergewicht..... 52
Abb. 41: APmax in Abhängigkeit von der Körpergröße 52
Abb. 42: APmax in Abhängigkeit von einer Schilddrüsenerkrankung 53
Abb. 43: APmax in Abhängigkeit von einer Radiojodtherapie..... 53
Abb. 44: LLmax in Abhängigkeit vom Geschlecht..... 54
Abb. 45: LLmax in Abhängigkeit vom Alter 54
Abb. 46: LLmax in Abhängigkeit vom Körpergewicht..... 55
Abb. 47: LLmax in Abhängigkeit von der Körpergröße 55
Abb. 48: LLmax in Abhängigkeit von einer Schilddrüsenerkrankung 56
Abb. 49: LLmax in Abhängigkeit von einer Radiojodtherapie..... 56
Abb. 50: LL4mmVA in Abhängigkeit vom Geschlecht..... 57
Abb. 51: LL4mmVA in Abhängigkeit vom Alter 57
Abb. 52: LL4mmVA in Abhängigkeit vom Körpergewicht..... 58
Abb. 53: LL4mmVA in Abhängigkeit von der Körpergröße 58
Abb. 54: LL4mmVA in Abhängigkeit von einer Schilddrüsenerkrankung 59
Abb. 55: LL4mmVA in Abhängigkeit von einer Radiojodtherapie..... 59
Abb. 56: CSA in Abhängigkeit vom Geschlecht 60
Abb. 57: CSA in Abhängigkeit vom Alter 60
Abb. 58: CSA in Abhängigkeit vom Körpergewicht..... 61
Abb. 59: CSA in Abhängigkeit von der Körpergröße 61
Abb. 60: CSA in Abhängigkeit von einer Schilddrüsenerkrankung 62
Abb. 61: CSA in Abhängigkeit von einer Radiojodtherapie 62

Abb. 62: Prävalenzen der Trachealstenose und Trachealaffektion durch die Schilddrüse 66
Abb. 63: Bildmorphologische Darstellung von Trachealstenosen 67
Abb. 64: Bildmorphologische Darstellung von Trachealaffektionen durch die Schilddrüse 67

Tabellenverzeichnis

Tab. 1: Protokoll der Halsschnitte der SHIP-MRT 14
Tab. 2: Erfasste Parameter in den MRT-Bildern 16
Tab. 3: Intraklassen-Korrelationskoeffizient mit 95%-Konfidenzintervall und..... Spearman Korrelationskoeffizient der Messparameter 32
Tab. 4: Umrechnung von Sliceanzahl in Distanz zur Glottis in mm 37
Tab. 5: Volumen in Abhängigkeit vom Geschlecht 41
Tab. 6: Vergleich der Parameter zwischen den Geschlechtern und Altersklassen ... 42
Tab. 7: Zusammenhang zwischen dem Alter und den Durchmessern auf..... unterschiedlichen Ebenen der Trachea und des LTÜGs 43
Tab. 8: Deskription der erhobenen Messwerte zu den Parametern des..... Ringknorpels 49
Tab. 9: APmax in Abhängigkeit vom Geschlecht 50
Tab. 10: APmax in Abhängigkeit vom Alter 51
Tab. 11: APmax in den dichotomisierten Altersgruppen 51
Tab. 12: APmax in Abhängigkeit vom Körpergewicht 52
Tab. 13: APmax in Abhängigkeit von der Körpergröße 52
Tab. 14: APmax in Abhängigkeit von einer Schilddrüsenerkrankung 53
Tab. 15: APmax in Abhängigkeit von einer Radiojodtherpie 53
Tab. 16: LLmax in Abhängigkeit vom Geschlecht 54
Tab. 17: LLmax in Abhängigkeit vom Alter 54
Tab. 18: LLmax in Abhängigkeit vom Körpergewicht 55
Tab. 19: LLmax in Abhängigkeit von der Körpergröße 55
Tab. 20: LLmax in Abhängigkeit von einer Schilddrüseerkrankung 56
Tab. 21: LLmax in Abhängigkeit von einer Radiojodtherapie 56
Tab. 22: LL4mmVA in Abhängigkeit vom Geschlecht 57
Tab. 23: LL4mmVA in Abhängigkeit vom Alter 57
Tab. 24: LL4mmVA in Abhängigkeit vom Körpergewicht 58
Tab. 25: LL4mmVA in Abhängigkeit von der Körpergröße 58
Tab. 26: LL4mmVA in Abhängigkeit von einer Schilddrüsenerkrankung 59
Tab. 27: LL4mmVA in Abhängigkeit von einer Radiojodtherapie 59
Tab. 28: CSA in Abhängigkeit vom Geschlecht 60
Tab. 29: CSA in Abhängigkeit vom Alter 60

Tab. 30: CSA in Abhängigkeit vom Körpergewicht 61
Tab. 31: CSA in Abhängigkeit von der Körpergröße 61
Tab. 32: CSA in Abhängigkeit von einer Schilddrüsenerkrankung 62
Tab. 33: CSA in Abhängigkeit von einer Radiojodtherapie 62
Tab. 34: Korrelationen zwischen den Parametern und den demographischen..... Angaben 63
Tab. 35: Regressionsanalyse zu Einflussfaktoren auf APmax..... 64
Tab. 36: Regressionsanalyse zu Einflussfaktoren auf LLmax 64
Tab. 37: Regressionsanalyse zu Einflussfaktoren auf LL4mmVA 65
Tab. 38: Regressionsanalyse zu Einflussfaktoren auf CSA..... 65
Tab. 39: Vergleichsstudie zu APmax in Abhängigkeit von der subglottischen..... Distanz..... 72
Tab. 40: Vergleichsstudie zu LLmax in Abhängigkeit von der subglottischen ..... Distanz..... 73
Tab. 41: Vergleichsstudien zu APmax und LLmax der Trachea und des LTÜGs 74
Tab. 42: Vergleichsstudien zum Volumen 80
Tab. 43: Vergleichsstudien zu APmax und LLmax des Ringknorpels..... 84
Tab. 44: Vergleichsstudien zu den Korrelationen zwischen der Körpergröße ..... und LLmax..... 88
Tab. 45: Vergleichstudie zur Regressionsanalyse zu Einflussfaktoren auf LLmax ... 89
Tab. 46: Vergleichsstudien zu CSA 92
Tab. 47: APmax der Trachea und des LTÜGs in Abhängigkeit von der ..... subglottischen Distanz bei Männern und Frauen..... XXV
Tab. 48: LLmax der Trachea und des LTÜGs in Abhängigkeit von der ..... subglottischen Distanz bei Männern und Frauen..... XXVI
Tab. 49: LL4mmVA der Trachea und des LTÜGs in Abhängigkeit von der ..... subglottischen Distanz bei Männern und Frauen..... XXVII

1 Einleitung

1.1 Vorwort

Intubationen können zu Verletzungen der Atemwege führen und so zu narbigen Stenosen der Trachea und der subglottischen Region [1]. Solche Verletzungen, aber auch Trachealstenosen anderer Genese, engen die Atemwege ein und führen zu Einschränkungen im Alltag [2,3]. Um solche Engstellen der Atemwege möglichst erfolgreich zu behandeln, bestehen therapeutische Ansätze in der rekonstruktiven Chirurgie, in der Einlage von Stents oder in der Lasertherapie. Die absolute Grundlage jener Eingriffe ist es, die Anatomie der unteren Atemwege explizit zu kennen. Relevant sind hierfür vor allem die Dimensionen der Trachea und des laryngotrachealen Übergangs, der klinischen Engstelle [4].

Um weitere Erkenntnisse über bevölkerungsrepräsentative Maße der subglottischen Atemwege und mögliche Einflussfaktoren auf deren Dimensionen zu erhalten, wurde innerhalb einer norddeutschen Population die Trachea und der laryngotracheale Übergang ausgemessen und der Einfluss relevanter Parameter geprüft. Die bisherige Datenlage, welche sich mit der Ausmessung der unteren Atemwege beschäftigt, ist aktuell unzureichend. Am häufigsten wurden dabei Studien publiziert, in denen die Diagnostik mittels Computertomographie (CT) durchgeführt wurde. In der vorliegenden Arbeit finden die Untersuchungen mittels Magnetresonanztomographie (MRT) statt. Dies erlaubt zum einen deutlich präzisere Einblicke zur Quantifizierung der Atemwege als andere bildgebende Verfahren, zum anderen bringt die MRT keine Strahlenbelastung für die Patienten mit sich [5]. Durch diese Methode werden wesentliche neue Erkenntnisse über die Anatomie der unteren Atemwege erwartet.

Das langfristige Ziel dieser Untersuchung ist es, dazu beitragen zu können, die rekonstruktive Chirurgie der Trachea und des laryngotrachealen Übergangs zu optimieren und damit die Lebensqualität der betroffenen Patienten zu verbessern.

1.2 Anatomie der unteren Atemwege - Kehlkopf und Trachea

Diese Arbeit bezieht sich vor allem auf jene Bereiche der Atemwege, welche für interventionelle Eingriffe und Operationen bei Stenosen der Trachea und des laryngotrachealen Übergangs (LTÜG) bedeutend sind, weshalb ein Fokus auf die Region kaudal der Glottis gelegt wurde.

Der Kehlkopf und die Trachea sind Bestandteile des luftleitenden Systems und zählen zu den unteren Atemwegen. Kaudal der Glottis befindet sich die subglottische Region. Diese wird nach kranial durch die Stimmlippen und nach kaudal durch den Unterrand des Ringknorpels (Cricoid) begrenzt [6]. Der Ringknorpel bildet zudem die klinisch engste Stelle des Kehlkopfes [4,7–9]. Er stellt einen geschlossenen Ring dar, wodurch die Größe von endotracheal eingeführten Instrumenten oder Tuben durch seine Dimensionen beschränkt wird [8]. Bei Schwellungen nimmt das Gewebe jedoch hauptsächlich zum Innenlumen hin zu, wodurch die Atemwege eingeengt werden [9]. In und um den Larynx befindet sich ein ausgeprägter Muskel- und Bandapparat. Besondere Bedeutung hat hier das Ligamentum cricothyroideum medianum, welches zwischen dem Ringknorpel und dem Schildknorpel verläuft. Dieses Band wird bei konventionell nicht erfolgreicher Atemwegssicherung oder bei Verlegung der Atemwege durch eine Cricothyroidotomie eingeschnitten, um die Sicherung des Atemwegs zu gewährleisten [10]. Eine Komplikation nach Cricothyroidotomie besteht in der Provokation von Stenosen der Trachea und des LTÜGs [11,12].

Die Luftröhre stellt eine Verbindung zwischen Kehlkopf und dem linken und rechten Hauptbronchus dar. Die Trachea hat ihren Beginn am Unterrand des Ringknorpels und erstreckt sich bis zur Carina. Diese ist ein Sporn, welcher auf Höhe der Bifurcatio tracheae in das Lumen ragt. Nach dorsal grenzt die Trachea an den Ösophagus. Die Schilddrüse liegt seitlich und ventral der Trachea sowie des LTÜGs an. In der Luftröhre sind 16 - 20 c-förmige Knorpelspangen übereinander angeordnet, welche zusammen mit dem Cricoid die Luftröhre vor allem bei der Inspiration offen halten [6]. Die Knorpel der Trachea werden durch Gefäße versorgt, welche an ihrer Innenseite entlang laufen. Dies wird als Ursache dafür diskutiert, dass bei zirkulärer Kompression des trachealen Innenlumens ischämische Nekrosen der Knorpel resultieren können [13].

Sensibel wird der subglottische Raum und die Trachea vom Nervus laryngeus recurrens innerviert, welcher vom Nervus vagus abgeht. Er versorgt zudem alle inneren Kehlkopfmuskeln. Sein Verlauf zieht durch den oberen Brustbereich, wobei er rechtsseitig um den Truncus brachiocephalicus und linksseitig um den Arcus aortae verläuft. Anschließend zieht er zwischen Trachea und Ösophagus nach kranial zum Kehlkopf [6]. Durch seinen Verlauf ist er durch pathologische Veränderungen [14,15] sowie operative Eingriffe im Thorax gefährdet [16,17].

Ausgekleidet ist die Schleimhaut der Luftröhre und des Kehlkopfes kaudal der Glottis durch mehrreihiges Flimmerepithel, welches Schleim sezerniert und dadurch die Luft anfeuchtet und Staubpartikel abfängt. Zusätzlich transportiert das Flimmerepithel den Schleim Richtung Pharynx und kann von dort aus abgehustet oder geschluckt werden. Der Kehlkopf dient zum einen der Stimmbildung durch Öffnung und Schließen der Stimmlippen. Zum anderen ermöglicht er den Schluckakt durch Verschluss des Kehlkopfes [6].

1.3 Klinische Bedeutung der Trachea und des laryngotrachealen Übergangs

Da diese Arbeit dazu beitragen soll, die rekonstruktive Chirurgie der unteren Atemwege, welche u.a. Anwendung bei Stenosen findet, weiter zu entwickeln, soll im Folgenden vor allem auf Stenosen der Trachea und des laryngotrachealen Übergangs eingegangen und deren bedeutendsten Ätiologien erörtert werden.

1.3.1 Stenosen und mögliche Ätiologien

Eine Stenose der Atemwege stellt eine Einengung des luftleitenden Lumens dar [18]. Um die Problematik von Stenosen zu verdeutlichen, soll das Hagen-Poiseuille-Gesetz genannt werden. Dieses beschreibt die Abhängigkeit des Strömungswiderstandes (R) einer Flüssigkeit vom Radius (r) und der Länge (l) des durchfließenden kreisförmigen Lumens, sowie von der Viskosität (η) der Flüssigkeit: $R = \frac{8 * l * \eta}{\pi * r^4}$ [19].

Überträgt man das Gesetz auf die Atemwege, bedeutet dies eine Erhöhung des Atemwegswiderstands (R) umgekehrt proportional zur vierten Potenz des Radius (r) [9]. Halbiert sich also der Radius, so steigt der Atemwegswiderstand auf das 16-fache an. Trotz dessen werden Betroffene jedoch meist erst ab einer Obstruktion > 50 % des Lumens symptomatisch [20] und beschreiben z.B. Dyspnoe, einen Stridor oder chronischen Husten [18].

Zur Einschätzung einer Stenose sowie der präoperativen Abschätzung einer erfolgreichen Therapie wird oft die Klassifikation nach Cotton/Myer [21] verwendet, welche in vier Schweregrade untergliedert wird. Diese dient primär der Graduierung von subglottischen Stenosen (SGS), wird aber teilweise auf Stenosen der Trachea und des laryngotrachealen Übergangs übertragen [22,23]. Die Klassifikation orientiert sich am Außendurchmesser eines Endotrachealtubus, welcher gerade noch durch die Stenose hindurch geführt werden kann. Jene Größe wird folgend mit der Tubusgröße verglichen, welche bei gesunden altersentprechenden Probanden genutzt wird. Die Gradeinteilung richtet sich dabei nach der Verengung des Lumens. Grad I ist definiert bis zu einer Lumenreduktion

um 50 %, Grad II beschreibt eine Lumenverminderung von 51 - 70 % und Grad III von 71 - 99 %. Grad IV stellt eine komplette Verlegung des Lumens dar [21].

Stenosen der Atemwege können unterschiedlich lokalisiert sein. So können sie als Trachealstenose vorliegen, als subglottische Stenose oder kombiniert als laryngo-tracheale Stenose, welche den Kehlkopf und die Trachea mit einschließt [24]. Die häufigsten Ursachen für die Entstehung von Stenosen der Atemwege sind die endotracheale Intubation [1,4,25–27] und die Tracheostoma-Anlage [1,25–27]. Die Inzidenz einer Stenose nach Intubation reichte um 1980 dabei von 10 - 19 % [28,29]. Allerdings ging die Anzahl der Neuerkrankungen dank der Weiterentwicklung der Materialien von Endotrachealtuben und technischer Verbesserung, wie Niedrigcuffsysteme und Cuffdruck-Kontrollen zurück [30] und liegt aktuell zwischen 0,06 - 7 % [30–32].

Post-Intubationsstenosen sind meist symmetrisch angeordnet sowie kurzstreckig, was einer Länge < 2 cm entspricht [33]. Ursächlich für Verletzungen der Atemwege können unter anderem zu große Endotrachealtuben [8,34] oder zu hohe Cuff-Drücke sein [35,36]. Dabei kann es durch Kompression zur Schädigung der Mukosa und Bildung von Granulationsgewebe kommen, mit im Verlauf Ausbildung einer harten Stenose durch Vernarbung [37,38]. Bei Langzeitintubationen über vier Tage ist das Risiko für die Entstehung von Stenosen erhöht [39,40]. Zudem stellt die Intubation ein generelles Risiko dar, da nach Extubation eine potenzielle Reintubation notwendig werden kann, was mit einer erhöhten Mortalität verknüpft ist [41–43]. Durch genauere Kenntnisse der Dimensionen des Larynx und der Trachea können durch die richtige Größe von operativen Instrumenten [8,44] oder Tuben [8,34,44,45] sowie durch angepasste Cuff-Drücke [30] unnötige Verletzungen und Komplikationen verringert werden [8,30,34,44,45].

Eine weitere mögliche Ursache von Stenosen der unteren Atemwege ist eine Kompression von außen auf das Lumen. Durch die anatomische Nähe der Schilddrüse zu den unteren Atemwegen kann es bei Volumenzunahme der Schilddrüse (z.B. Struma) zu einer Deviation [46] oder Kompression der Trachea kommen [46–48]. Eine solche Struma-bedingte Kompression kann auch eine Tracheomalazie verursachen [49,50], wobei dies eine Instabilität der Knorpelspangen darstellt, die während der Exspiration zum Kollaps des Lumens

führen kann [18]. Weitere Ursachen einer solchen Instabilität können Tumoren [51–53] oder auch die Tracheostoma-Anlage [54,55] sein. Eine klare Operationsindikation ist eine benigne Struma, bei welcher es durch Kompression der Atemwege zu Dyspnoe und Stridor kommt [48]. Stang et al. 2012 [56] beschrieben, dass bei 17 % der Patienten mit Struma Hinweise einer Atemwegsobstruktion vorliegen, welche jedoch durch eine Schilddrüsenresektion wesentlich gelindert werden konnte. Dies verdeutlicht die Notwendigkeit über die Kenntnis der anatomischen Nähe der Schilddrüse zu den Atemwegen.

Weitere Ursachen von Trachealstenosen und Stenosen des TLÜGs sind entzündlicher Genese (z.B. Tuberkulose oder Wegener Granulomatose), eine Amyloidose oder angeborene Fehlbildungen [18]. Eine Verengung der Atemwege bei Kindern stellt häufig die kongenitale subglottische Stenose dar [22]. Weiterhin können neben der idiopathischen Genese auch Trauma oder Bestrahlungen zu Trachealstenosen führen [4,57], wobei vor allem bei einem endoluminalen Trauma der Trachea oder des Kehlkopfes eine Diagnosestellung erschwert sein kann [58].

Je nach Lokalisation, Länge, Grad und Beschaffenheit der Stenose werden unterschiedliche diagnostische und therapeutische Ansätze verfolgt. Vor allem niedrig graduierte und kurzstreckige Stenosen können mit Dilatation oder Laserabtragung behandelt werden [22]. Die Gefahr bei einer Lasertherapie besteht jedoch in der Schädigung des Ringknorpels, weshalb die Anwendung mittels Laser so selten wie möglich genutzt werden sollte [4]. Vor allem aber die operative und rekonstruktive Versorgung einer Stenose hat in den letzten Jahren zunehmend an Bedeutung gewonnen.

1.3.2 Rekonstruktive Chirurgie

Die rekonstruktive Chirurgie ist die Erstlinientherapie bei laryngotrachealen Stenosen [4,59] und Trachealstenosen [60,61]. Die häufigsten Indikationen für tracheale und laryngotracheale Rekonstruktionen stellen die Stenose nach Intubation [22,27,59,62–65] oder Tracheostomie [27,62,64] dar, sowie aufgrund einer idiopathischen Genese [4,59,63,64] oder eines Tumors [62,63]. Der Beginn der chirurgischen Rekonstruktion des Larynx bei vorliegender Stenose fand seinen Anfang in den 60er Jahren [66,67]. Während dieser Zeit nahm die

Langzeitbeatmung und dadurch auch erworbene Stenosen der unteren Atemwege zu [68], wobei vor allem Kinder betroffen waren [69]. Ein Vorreiter der Rekonstruktion der Atemwege bei Stenosen des LTÜGs waren Pearson et al. [70], welche 1975 die ursprüngliche Technik der laryngotrachealen Rekonstruktion (LTR) mit partieller Resektion des Cricoids beschrieben. Dabei wird die dorsale Knorpelplatte des Cricoids in vivo belassen und somit eine Schonung des Nervus laryngeus recurrens erzielt [70]. Diese Technik der LTR ist auch heute noch das gängigste Verfahren bei zirkulären und anterioren laryngotrachealen Stenosen [64,65,71]. Eine weitere Variation der Rekonstruktion ist nach Spaltung des Cricoids zusätzlich ein Knorpelstück zur Erweiterung des Lumens zu transplantieren [72]. Dabei besteht z.B. bei zirkulären Stenosen die Variante das Cricoid anterior und posterior zu spalten und zwei Knorpelstücke einzusetzen, wobei der rekonstruierte Bereich oft durch einen Stent oder Tubus stabilisiert werden muss [22].

Zu unterscheiden ist die beschriebene Technik von der trachealen Rekonstruktion (TR). 1972 beschrieb Grillo [73] die noch heute gängige Technik zur Resektion und Rekonstruktion der Trachea aufgrund von Trachealstenosen. Dabei wird das stenosierte Segment reseziert und die jeweiligen Enden als End-zu-End-Anastomose vernäht [73]. In der Literatur wurden bereits Resektionen mit einer trachealen Länge > 4 cm beschrieben [60,63,65]. Generelle Ziele der LTR und TR sind die Linderung der Beschwerden und die Abwendung von weiteren Interventionen, wie eine notwendige Tracheostoma-Anlage oder ein erneuter chirurgischer Eingriff [62,64].

Innerhalb der einzelnen Techniken von LTR und TR liegen unterschiedliche Angaben vor. Die Erfolgsquote einer ausreichenden Erweiterung des Lumens beider Techniken ist sehr vielversprechend und liegt bei Erwachsenen bei 74 - 97,3 % [22,23,60,62–65,74,75], wobei bei beiden Formen die Mortalitätsrate < 2 % liegt [60,63–65,74]. Generell kommen bei der LTR postoperative Komplikationen häufiger vor als bei der TR [74], wobei insgesamt Komplikationsraten zwischen 18,2 – 56,0 % beschrieben sind [60,62–64]. Dies mag darin begründet sein, dass der subglottische Bereich die engste Stelle der Atemwege darstellt und in unmittelbarer Nähe zu den Stimmlippen und laryngealer Nerven liegt, durch deren Schädigung es zu Komplikationen kommen kann [74]. Postoperative

Komplikationen sind vor allem Restenosen (7,6 - 37,5 % [22,60,62,65,74]), die Ausbildung von Granulationsgewebe (0,8 - 37,5 % [22,60,63]) sowie Wundinfektionen (5,4 - 10,6 % [60,62,64,65]). Kommt es zur Restenose aufgrund von Granulationen, bestehen therapeutische Möglichkeiten in der Resektion mittels Laser, der Einlage eines Stents [59] oder Debridement mit Hilfe eines Bronchoskops [76]. Wundinfektionen können mit einer Drainage, antibiotisch oder konservativ therapiert werden [59]. Das Risiko der Reintubation wird vor allem bei der LTR bis 7,8 % [74,77] beschrieben, während nach TR < 3 % [74,77] der Patienten reintubiert werden müssen. Relevant sind zudem Schädigungen der Stimmfunktion nach laryngotrachealem Eingriff. Nach einer LTR und TR variiert die Rate einer Dysfunktion der Stimmlippen von 5 - 43 % [62,74,75,77]. Beschrieben wurde eine Schädigung des Nervus laryngeus recurrens vor allem nach einer LTR aufgrund der anatomischen Nähe zum Cricoid [74]. Falls es zu einer Schädigung der Stimmlippenfunktion kommt, kann bei einer Paralyse eine logopädische Therapie [22] oder Steroide [65] angewendet werden, um eine mögliche Besserung zu erzielen [22,65]. Auch bei einem Ödem des Kehlkopfes kann die Verwendung von Steroiden erforderlich sein, wobei bei einer Progredienz mit klinisch relevantem Glottisödem und einem Stridor eine Tracheostoma-Anlage notwendig werden kann. Um das Risiko eines Kehlkopfödems zu mindern, werden zudem die Kopfhochlagerung und die Schonung der Stimme empfohlen [64].

Ein hohes Risiko für postoperative Komplikationen sind nach Angaben in der Literatur Resektionen ≥ 4 cm [60,63]. Weitere Risikofaktoren sind eine Reoperation aufgrund unzureichender Erweiterung des Lumens, Diabetes mellitus, eine bereits durchgemachte LTR, Patienten im Alter < 17 Jahren und eine Tracheostoma-Anlage vor der LTR [63]. Kinder unter 17 Jahren reagieren bei einer Rekonstruktion der Atemwege häufiger mit der Ausbildung von Granulationsgewebe (42,9 - 52,9 % [22,78]), vor allem wenn ein Stent zur zusätzlichen Stabilisierung verwendet wurde [22,78], sowie einer Tracheomalazie (23,5%) [22]. Zudem wird diskutiert, dass Erwachsene bei einer Knorpeltransplantation ein höheres Risiko für Infektionen haben als Kinder, da der Knorpel beim älteren Erwachsenen bereits teils ossifiziert ist und eine längere Heilungszeit benötigt [22].

Um Komplikationen möglichst gering zu halten, wird empfohlen entzündliche Herde vor der Operation soweit wie möglich zu reduzieren und zu sanieren. Vor allem Patienten, welche ein Tracheostoma tragen, können eine bakterielle Besiedlung haben und sollten präoperativ lokal und systemisch antibiotisch abgedeckt werden [59]. Zudem wird die Anwendung einer Hochdosissteroidtherapie (> 10 mg/d) als weiterer Risikofaktor für Komplikationen der Anastomose diskutiert [63].

Um eine Stenose präoperativ abschätzen und beurteilen zu können, wird die laryngotracheale Endoskopie empfohlen. Dabei können die Funktion des Larynx sowie mögliche Entzündungen besser beurteilt werden als bei einer statischen Bildgebung [64]. Ein besonderes Risiko tragen Patienten mit neurologischen Ausfällen, da postoperativ eine gewisse Körperkontrolle für ein gutes Ergebnis notwendig ist und der Kopf teils in Flexionsstellung gehalten werden muss, um den Zug auf die Rekonstruktion zu reduzieren [65]. Zudem muss Sekret abgehustet werden und der Schluckakt möglich sein, da sonst eine Aspirationsgefahr besteht [79]. Daher sollte bei Patienten mit neurologischem Defizit oder bei starken psychischen Einschränkungen die Indikation einer Operation ausreichend geklärt sein [65,79].

Zur Beurteilung einer erfolgreichen Therapie werden überwiegend die mögliche Dekanülierung oder eine ausreichende Erweiterung des Lumens genutzt [62,64,74]. Dennoch sollte auch eine subjektive Analyse erfolgen und der Standpunkt des Patienten mehr Beachtung erhalten. Zwar beschreiben die Patienten häufig eine Besserung der Dyspnoe und einen verminderten oder ausbleibenden Stridor, allerdings kann die Einschränkung der Stimmfunktion zu einer Minderung der Lebensqualität führen. Insgesamt sollte dieser Aspekt mehr beachtet werden, die aktuelle Datenlage hierzu ist eher unzureichend [74].

1.4 Einflussfaktoren

Der am häufigsten beschriebene Einflussfaktor auf die Dimensionen der Trachea und des LTÜGs ist das Geschlecht. Danach besitzen Männer größere Dimensionen der Trachea [80,81] und des LTÜGs [8,82] als Frauen. Ein weiterer Einflussfaktor scheint das Alter zu sein, wobei bis zum 30. Lebensjahr die Dimensionen der Trachea ansteigen [80]. Zum Einfluss des Alters auf das Cricoid wurde eine Zunahme der Durchmesser vor allem in der kindlichen Entwicklung mit einer breiten Variation beschrieben [83]. Weiterhin wird in der Literatur ein Unterschied der Maße der Atemwege bei einzelnen Ethnien beschrieben. Danach haben Kaukasier und Nigerianer größere tracheale Durchmesser als mongolische Probanden [84], bzw. zeigten einen größeren Durchmesser des Cricoids als Probanden aus Indien [85]. Zudem wurden die Dimensionen der Trachea auf den Einfluss durch die Körpergröße geprüft, wobei Li et al. 2017 [86] einen Zusammenhang festellte, während Kamel et al. 2009 [81] dies widerlegte. Einen Zusammenhang zwischen dem Body Mass Index (BMI) und den trachealen Dimensionen hat D'Anza et al. 2015 [34] beschrieben. Im Hinblick auf einen relevanten Einfluss der Körpergröße auf den Ringknorpels gehen die Studienergebnisse in Abhängigkeit der untersuchten Population auseinander. Too-Chung und Green stellten 1974 [87] eine lineare Korrelation zu der Körpergröße bei Kindern fest, Randestad et al. widerlegten dies 2000 [8] bei einer erwachsenen Population. Ein Einfluss durch das Körpergewicht auf die Dimensionen des Ringknorpels konnte nicht bestätigt werden [8]. Dagegen ist der Einfluss einer vergrößerten Schilddrüse auf die Atemwege durch Kompression bekannt [46–48]. Im Hinblick auf das Trachealvolumen konnte bei Rauchern eine Korrelation zwischen diesem und dem Lungenvolumen beschrieben werden, welches bei Rauchern durch ein Lungenemphysem vergrößert sein kann [88].

1.5 Stand der Forschung

Durch den zunehmenden Progress an chirurgischen Eingriffen der Atemwege haben auch die bildgebenden Verfahren zur Darstellung der luftleitenden Systeme an Bedeutung gewonnen. Die Methoden zur Darstellung der Atemwege mittels konventionellem Röntgen rückte - zugunsten moderner Techniken wie CT, MRT oder Ultraschall - zunehmend in den Hintergrund.

Die Ausmessungen der Atemwege beziehen sich vor allem auf die Durchmesser und Querschnittsflächen. Am häufigsten wurden die Messungen mittels CT durchgeführt, welches eine hohe Auflösung zur Quantifizierung der Atemwege mit dreidimensionaler Darstellung erlaubt [5]. Durch die CT können Kaliber der Atemwege ab einem Durchmesser von 2 mm präzise gemessen werden [89,90]. Zur Darstellung werden die Dichteunterschiede der einzelnen Gewebe genutzt, welche die Strahlung unterschiedlich stark resorbieren. Diese werden in Hounsfield-Einheiten (HE) angegeben, wobei die Darstellung von Knochen den Dichtewerten > 250 HE entspricht. Das Lungenparenchym besitzt Dichtewerte von -400 – -800 HE [91]. Zur Darstellung der Atemwege werden Werte im Bereich von -349 – -950 HE verwendet [92]. Mittels CT können Trachealstenosen sehr gut detektiert und ihr Ausmaß evaluiert werden, was der weiteren Planung von therapeutischen Eingriffen dient [93].

Zur Darstellung und Ausmessung des Larynx und vor allem des Ringknorpels liegen einige Untersuchungen mit sonographischer Bildgebung vor. Dabei erfolgte durch den Ultraschall vor allem die Evaluation der Anatomie zur Einschätzung schwieriger Atemwege [94] sowie zur Wahl der richtigen Tubusgröße für eine Intubation [95]. Weitere Untersuchungen des Kehlkopfes wurden an Präparaten ex vivo durchgeführt [8,82].

Zur weiteren Quantifizierung der Trachea und des LTÜGs eignet sich zudem die MRT [5], welche aufgrund der fehlenden Strahlenbelastung Vorteile mit sich bringt [5,91]. Durch ein Magnetfeld werden Wasserstoffprotonen in Schwingung versetzt, wodurch diese in ein Bildsignal umgewandelt und projiziert werden [91]. Bisher wurde die MRT vor allem für die Darstellung von Gewebsstrukturen wie Nerven und Muskeln verwendet [5]. Das Tracheallumen kann widerum aufgrund der hypointensen Darstellung (dunkel) von Luft gut abgebildet werden, wodurch eine

Luft-Gewebs-Grenze ersichtlich wird. Dadurch können z.B. Trachealstenosen anhand des luftleitenden Tracheallumens detektiert werden [96]. Zur Quantifizierung der Atemwege kann neben der Darstellung des Lumens auch das umliegende Gewebe gut beurteilt werden. Dies erlaubt pathologische Befunde, wie Tumoren [91] oder Struma [97] sowie die Detektion von Kompressionen der Atemwege [96] oder einer Tracheomalazie [98].

Zur neuen Technik zählt auch die virtuelle Endoskopie, mit welcher anhand von CT- oder MRT-Bildern virtuelle Rekonstruktionen angefertigt werden und in 3D-Darstellung virtuell endoskopiert werden kann [99]. Diese Technik eignet sich gut zur präoperativen Beurteilung [59], Diagnostik und therapeutischen Planung von Trachealstenosen und erlangt zunehmendes Interesse [99].

1.6 Ziele dieser Studie

Durch die Ausmessung der Trachea und des LTÜGs mittels MRT-Daten innerhalb einer epidemiologisch-repräsentativen Kohorte sollen folgende Ziele erreicht werden:

1. Mit Hilfe einer manuellen Ausmessung der Trachea und des LTÜGs sollen deren bevölkerungsrepräsentative Dimensionen bestimmt und Korrelationen zu spezifischen Parametern festgestellt werden.
2. Es sollen Vergleichsdaten erhoben werden, um mögliche Differenzen zu diskutieren und weitere Einflussfaktoren auf das Lumen der Trachea und des LTÜGs zu ergründen.
3. Mittels bevölkerungsrepräsentativer Daten sollen Rekonstruktionsziele definiert und damit neue Erkenntnisse für die rekonstruktive Chirurgie der Trachea und des LTÜGs gewonnen werden [84].
4. Um das Verletzungsrisiko zu senken, sollen die gewonnenen Erkenntnisse über bevölkerungsrepräsentative Dimensionen der Trachea und des LTÜGs eine Orientierung für die optimale Tubusgröße liefern [34,44,45].
5. Zudem sollen mögliche Auskünfte über die Prävalenz von Trachealstenosen und Trachealaffektionen durch die Schilddrüse erhalten werden.

2 Probanden und Messmethodik

2.1 Probandenkollektiv

Die Bilddaten für diese Arbeit stammen aus der SHIP-Studie (Study of Health in Pomerania), deren Ziel unter anderem die Feststellung der Inzidenz und Prävalenz bestimmter Erkrankungen, den jeweiligen Verlauf sowie die Evaluation von Einfluss- und Risikofaktoren, ist [100–102].

Die Probandenpopulation der SHIP-Studie stammt aus der Region West-Vorpommern und besteht aus zwei unabhängigen, epidemiologisch repräsentativen Kohorten. Mittels Randomisierung wurde eine bestimmte Anzahl an Probanden herausgesucht, welche nach Alter und Geschlecht stratifiziert waren [100–102]. Die erste Datenerhebung wird als SHIP-0 bezeichnet und fand von 1997 bis 2001 statt, wobei eine Teilnehmerzahl von 4.308 Probanden erreicht wurde. Es folgten das 5-Jahres-Follow-up SHIP-1 und das 10-Jahres-Follow-up SHIP-2. Außerdem wurde von 2008 bis 2011 eine weitere unabhängige, stratifizierte und randomisierte Stichprobe von 8.016 Probanden ausgewählt und als SHIP-TREND-0 bezeichnet [101,102].

Bei den Probanden von SHIP-2 und SHIP-TREND-0 wurde zusätzlich eine Ganzkörper-MRT durchgeführt, vorausgesetzt es lagen keine Kontraindikationen vor. Zu diesen zählten z.B. Klaustrophobie oder eine frühere Implantation von nicht MRT-tauglichen Implantaten [103].

Für die vorliegende Arbeit wurden 3.226 MRT-Datensätze der Halsregion von Probanden aus SHIP-2 und SHIP-TREND-0 verwendet.

2.2 SHIP-MRT

Alle MRT-Untersuchungen wurden an einem 1,5 Tesla MRT (Magneto Avanto; Siemens Medical System, Erlangen, Deutschland) durchgeführt [103]. Für die Messreihe und Analyse der Arbeit wurden die MRT-Bilder der Halsschnitte verwendet. Die segmentierte Ausmessung erfolgte an der axialen Ausrichtung in T1-Gewichtung mit einer Schichtdicke von 4 mm. Weitere Sequenzparameter waren (Tab. 1, [103]):

Tab. 1: Protokoll der Halsschnitte der SHIP-MRT

Sequenz	TR [msec]	TE [msec]	Flipwinkel	Voxelgröße [mm]	Scanzeit [min]
Ax T1 TSE	5.870	110	150°	1.0x0.8x4	02:02

Ax = axial, TSE = Turbo Spin Echo, TR = Repetitionszeit, TE = Echozeit

2.3 Software

Die Messungen wurden mittels des Bildbearbeitungs-Programmes MeVisLab Version 2.4 von MeVis Medical Solutions AG durchgeführt [104]. MeVisLab ermöglicht u.a. eine Segmentierung, Volumetrie und funktionelle Analysen von Bilddatensätzen sowie deren Beurteilung in axialer, sagittaler und coronarer Darstellung. Diese Bilddatensätze können dimensioniert und durch individuelle Programmierung z.B. Längen, Flächen und Volumina ausgemessen werden. Zusätzlich besteht die Möglichkeit eines Zooms durch die Einstellung "Select Volume of Interest" sowie der Einstellung von Helligkeit und Kontrast durch den Mousecursor. Durch ein zusätzliches, speziell programmiertes Plug-In konnte die Querschnittsfläche in mm^2 bestimmt werden.

Für diese Arbeit wurden die Durchmesser über den Link "Diameter" mittels gerader Linien vermessen. Die jeweiligen Längen wurden von MeVisLab in mm angezeigt und manuell in eine Tabelle übernommen. Durch "Measure Boundaries" wurden durchgehende Markierungslinien gezogen und dadurch die Fläche der einzelnen Messebenen bestimmt und das Volumen der Trachea und des LTÜGs von MeVisLab berechnet [104]. Die Werte wurden gespeichert und automatisiert für die Auswertung übernommen.

2.4 Entwicklung der Messmethode

Zu Beginn der vorliegenden Untersuchung sollten die ausgewählten Messpunkte von der Glottis nach kaudal bis zur Carina bestimmt werden. Diese waren: der maximale anterior-posteriore Durchmesser (APmax), der maximale transversale Durchmesser (LLmax), der minimale anterior-posteriore Durchmesser (APmin), der minimale transversale Durchmesser (LLmin), der transversale Durchmesser 4 mm von anterior (LL4mmVA) und das Volumen (Vol). Nach Evaluation der 3.226 MRT-Datensätze von SHIP-2 und SHIP-TREND-0 zeigte sich jedoch, dass nur bei einem geringen Anteil der Hals-MRT-Datensätze eine Carina abgebildet war, sodass man die gewählten Parameter entweder von der Glottis bis zum letzten abgebildeten Slice oder bis zur Carina bestimmte, falls diese dargestellt war. Um das Messverfahren zu erlernen und zu trainieren erfolgte eine erste Schulung des Readers.

Für die Erstzertifizierung wurden nachfolgend mit dem Zufallsgenerator "Agitos" [105] 100 Datensätze aus den vorhanden Hals-MRT-Datensätzen randomisiert ausgewählt. Anhand dieser Datensätze wurde das Volumen sowie die festgelegten Messparameter der Trachea und des LTÜGs nach der zuvor entwickelten Methodik vermessen. Nach Analyse der Reliabilität wurde nur mit den reliablen Parametern weiter gearbeitet, alle unzureichend reliablen Parameter wurden nicht weiter verfolgt. Anschließend wurden die reliablen Parameter in den Datensätzen von 801 Probanden vollständig manuell ausgemessen. Die Ergebnisse lieferten erste Angaben für die zu erwartenden Kenngrößen. Zudem sollen sie als Vergleichsgrößen für Validierungen einer semiautomatischen Volumetrie dienen, mit welcher die verbliebenen Datensätze künftig ausgemessen werden könnten [106]. Die Erfassung der Daten über die 801 Probanden zur Ausmessung der Trachea und des LTÜGs wird in Teil 1 beschrieben.

Zur weiteren Quantifizierung und Evaluation bevölkerungsrepräsentativer Maße des LTÜGs wurde der Ringknorpel auf Ebene des Ringknorpelbogens (Arcus cricoideus) betrachtet. Diese ist die klinisch engste Stelle der unteren Atemwege und hat dadurch besondere Bedeutung [4,7–9]. Auf dieser Ebene wurde zusätzlich die Querschnittfsfläche (CSA) ausgemessen und dieser Parameter auf Reliabilität überprüft. Das Vorgehen sowie die Ergebnisse der Ausmessung der MRT-Bilder

des Ringknorpels an dieser Stelle erfolgte für alle 3.226 Datensätze und wird in Teil 2 der vorliegenden Arbeit beschrieben.

2.5 Erhebung der Messparameter

Die bearbeiteten Datensätze stammen aus den Erhebungen SHIP-2 und SHIP-TREND-0. Die Ausmessung der Trachea und des LTÜGs sowie speziell des Ringknorpels erfolgte in axialer Schnittebene. Sagittale und coronare Schnitte unterstützten die räumliche Darstellung der Trachea und des Ringknorpels sowie die Auffindung der Glottis und Carina.

Alle anhand der MRT-Bilder analysierten Parameter entsprechen den Maßen des Innenlumens bzw. der Innendurchmesser der Trachea sowie des LTÜGs. Die Trachea und der LTÜG wurden nach Ausschluss der nicht reliablen Parameter (P3, P4) mittels der vier Parameter: P1, P2, P5 und P6 ausgemessen. Das Lumen des Ringknorpels wurde ebenfalls mittels vier Parameter ausgemessen: P1, P2, P5 und P7 (Tab. 2).

Tab. 2: Erfasste Parameter in den MRT-Bildern

Parameter	Beschreibung	Lokalisation
P1	Maximaler anterior-posteriore Durchmesser (APmax)	**-Trachea und LTÜG:** jeder zu messende Slice kaudal ab Glottis **-Ringknorpel**
P2	Maximaler transversaler Durchmesser (LLmax)	**-Trachea und LTÜG:**jeder zu messende Slice kaudal ab Glottis **-Ringknorpel**
P3	Minimaler anterior-posteriore Durchmesser (APmin)	**-Trachea und LTÜG:** jeder zu messende Slice kaudal ab Glottis **→ unzureichend reliabler Parameter**
P4	Minimaler transversaler Durchmesser (LLmin)	**-Trachea und LTÜG:** jeder zu messende Slice kaudal ab Glottis **→ unzureichend reliabler Parameter**
P5	Transversaler Durchmesser 4 mm von anterior (LL4mmVA)	**-Trachea und LTÜG:** jeder zu messende Slice kaudal ab Glottis **-Ringknorpel**
P6	Volumen (Vol)	**-Trachea und LTÜG:** bei Probanden mit Abbildung der Carina
P7	Querschnittsfläche (CSA)	**-Ringknorpel**

Da diese Arbeit aus zwei Teilen besteht, ist nachfolgend eine Übersicht zu den einzelnen Inhalten der Messungen von Teil 1 und Teil 2 angegeben.

Übersicht der in den MRT-Bildern gemessenen Parameter

2.5.1 Teil 1: Parameter zur Trachea und dem laryngotrachealen Übergang

- 2.5.1.1 Maximaler anterior-posteriore Durchmesser
- 2.5.1.2 Maximaler transversaler Durchmesser
- 2.5.1.3 Minimaler anterior-posteriore Durchmesser
- 2.5.1.4 Minimaler transversaler Durchmesser
- 2.5.1.5 Transversaler Durchmesser 4mm von anterior
- 2.5.1.6 Volumen

2.5.2 Teil 2: Parameter zum Ringknorpel

- 2.5.2.1 Zusammenfassung der Durchmesser
- 2.5.2.2 Querschnittsfläche

Eine Übersicht soll wichtige Orientierungspunkte (Glottis, Ringknorpel, Carina) der Trachea und des LTÜGs der Hals-MRT zeigen (Abb. 1).

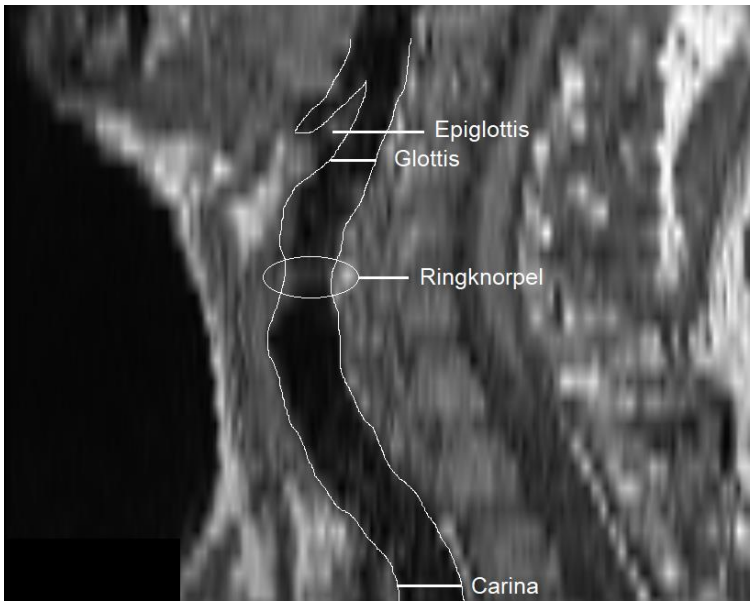


Abb. 1: Übersicht der in der MRT relevanten Orientierungspunkte

2.5.1 Teil 1: Parameter zur Trachea und dem laryngotrachealen Übergang

Nachfolgend ist ein Hals-MRT-Bild, sagittale Darstellung, eines Probanden gezeigt. Darin sind die Ebenen der einzelnen gemessenen Slices eingezeichnet, wobei Slice 0 die Stimmbandebene (Glottis) als Startebene der Messungen definiert. Nach kaudal verlaufend wurden die Slices als Slice 1, Slice 2, Slice 3 etc. bezeichnet (Abb. 2). Insgesamt wurde von der Glottis nach kaudal bis zum letzten abgebildeten Slice gemessen oder bis einen Slice kranial der Carina (Schlussebene), falls diese abgebildet war.

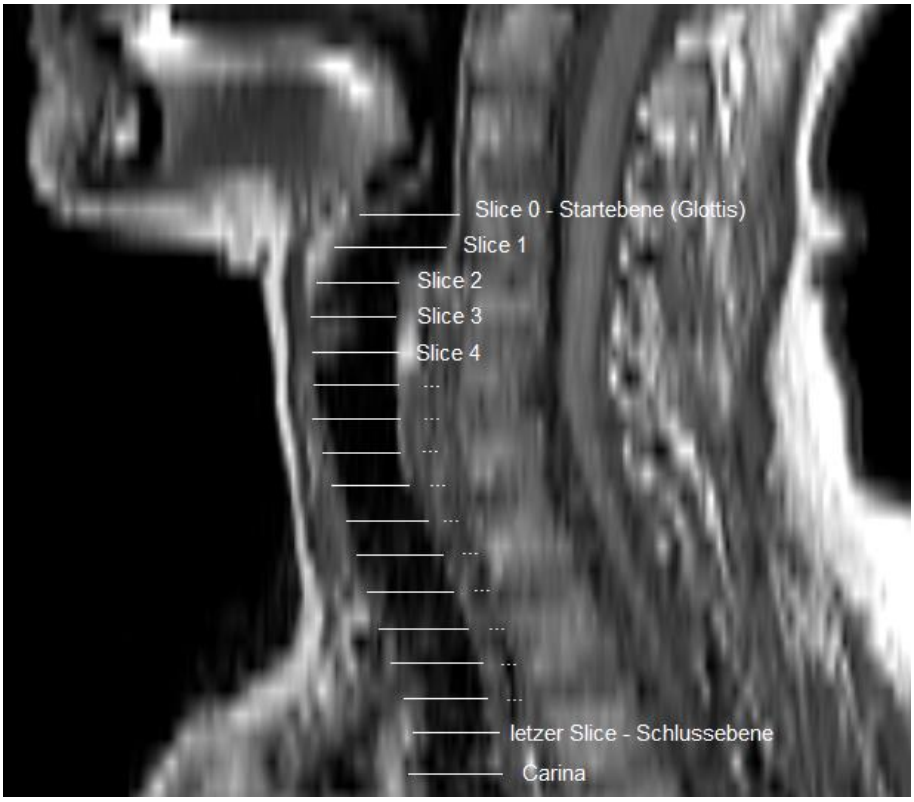


Abb. 2: Darstellung der ausgemessenen Ebenen in der MRT

Startebene der Messungen

Die Glottis wurde als kraniales Ende der Messungen bestimmt (Slice 0). Definiert wurde sie in der Ebene, in welcher der maximale transversale Durchmesser (Kapitel 2.5.1.2) als minimal gemessen wurde und die beiden lateralen Lumenbegrenzungen als nahezu gleichschenkliges Dreieck aufeinander zulaufen (Abb.3).

Abb. 3: Beispiel Glottis

Schlussebene der Messungen

Das kaudale Ende einer Messung wurde entweder durch den kaudalsten abgebildeten Slice oder einen Slice kranial vor sicherer Darstellung der Carina festgelegt. Dabei wurde die letzte Schichtebene, in welcher beide Hauptbronchien ein gemeinsames Lumen bildeten, als letzte Messebene betrachtet (Abb. 4).

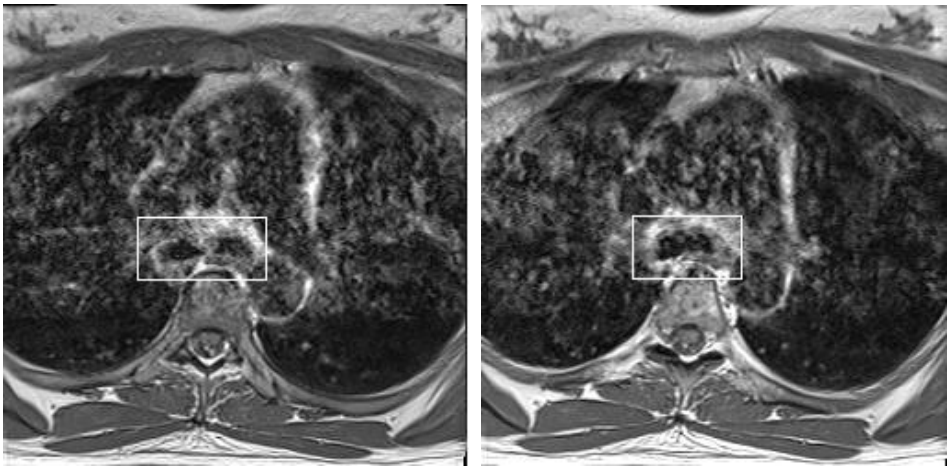


Abb. 4: Beispiel Carina - Links: Darstellung beider Hauptbronchien (weiße Markierung) mit Trennung durch die Carina; Rechts: Ein Slice kranial der Carina, welches dem kaudalsten ausgemessenen Lumen entspricht (weiße Markierung)

2.5.1.1 Maximaler anterior-posteriore Durchmesser

Pro Slice wurde der maximale anterior-posteriore Durchmesser (APmax) bestimmt. Dieser Parameter war so festgelegt, dass er den maximalen Durchmesser angibt, welcher vom anterioren bis zum posterioren Rand des Innenlumens der Trachea und des LTÜGs reichte (Abb. 5).

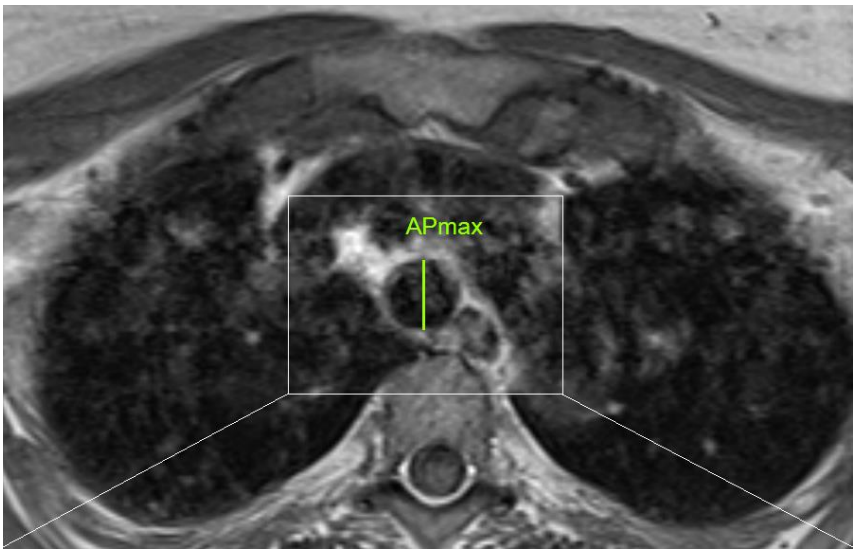


Abb. 5: Maximaler anterior-posteriore Durchmesser

Ziel war eine möglichst mediane Positionierung des Parameters bei ggf. irregulärer Form der Trachea und des LTÜGs zu gewährleisten. Daher wurde APmax von den Autoren so definiert, dass er ≥ 5,0 ± 0,2 mm zur jeweils lateralen Lumenbegrenzung der Trachea und des LTÜGs lag, sofern der maximale transversale Durchmesser LLmax ≥ 10,0 mm war (Abb. 6). War LLmax < 10,0 mm, so konnte APmax unabhängig einer Distanz zur Randmarkierung gewählt werden.

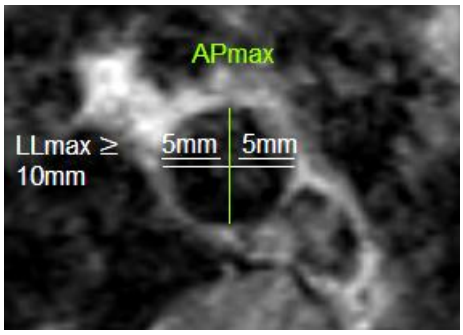


Abb. 6: APmax mit jeweils 5 mm Distanz zur lateralen Lumenbegrenzung

2.5.1.2 Maximaler transversaler Durchmesser

Ebenso wurde der maximale transversale Durchmesser (LLmax) auf jedem zu messenden Slice bestimmt. Er war so definiert, dass er den maximalen Durchmesser angibt, welcher vom linken zum rechten Rand des Innenlumens der Trachea und des LTÜGs verläuft (Abb. 7).

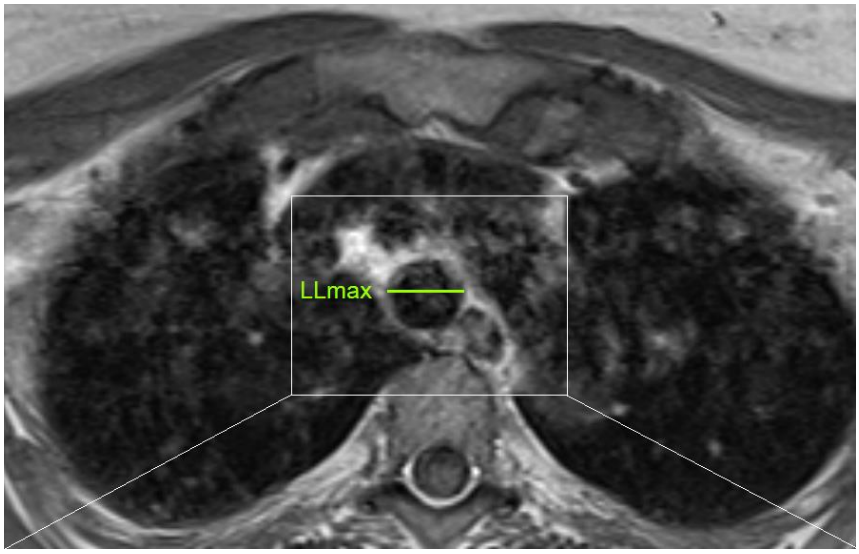


Abb. 7: Maximaler transversaler Durchmesser

Dieser Parameter sollte möglichst median positioniert sein bei ggf. irregulärer Form der Trachea und des LTÜGs. Die Autoren legten daher fest, dass dieser Durchmesser eine Distanz von ≥ 5,0 ± 0,2 mm vom anterioren bzw. posterioren Rand des Innenlumens der Trachea haben sollte, wenn APmax ≥ 10,0 mm war (Abb. 8). War APmax < 10,0 mm, so konnte LLmax variabel ohne eine festgelegte Distanz zur Begrenzung des Lumens gewählt werden.

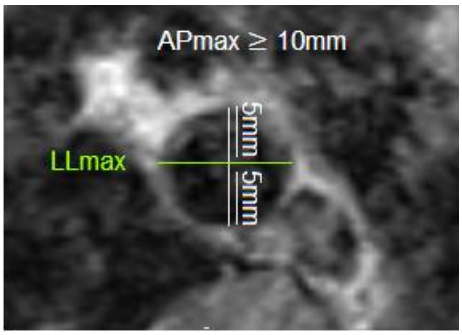


Abb. 8: LLmax mit jeweils 5 mm Distanz zur anterioren und posterioren Lumenbegrenzung

2.5.1.3 Minimaler anterior-posteriore Durchmesser

Der minimale anterior-posteriore Durchmesser (APmin) wurde bei 100 Probanden auf jedem abgebildeten Slice nach kaudal ab der Glottis bestimmt. APmin (Abb. 9, grüne Markierung) war so definiert, dass der anterior-posteriore Durchmesser jeweils lateral davon zunahm (Abb. 9, weiße Markierungen).

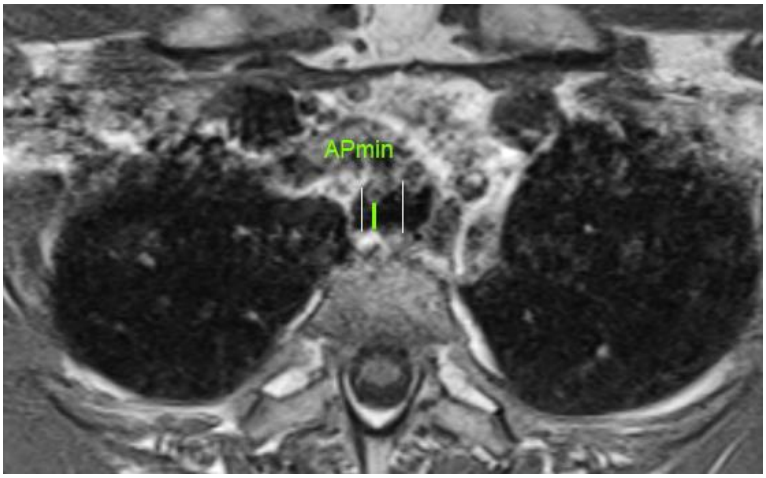


Abb. 9: Minimaler anterior-posteriore Durchmesser

2.5.1.4 Minimaler transversaler Durchmesser

Ebenso wurde bei 100 Probanden der minimale transversale Durchmesser (LLmin) auf jeder Ebene kaudal ab der Glottis ausgemessen. LLmin (Abb. 10, grüne Markierung) wurde so festgelegt, dass der transversale Durchmesser nach ventral und dorsal wieder zunehmen sollte (Abb. 10, weiße Markierungen).

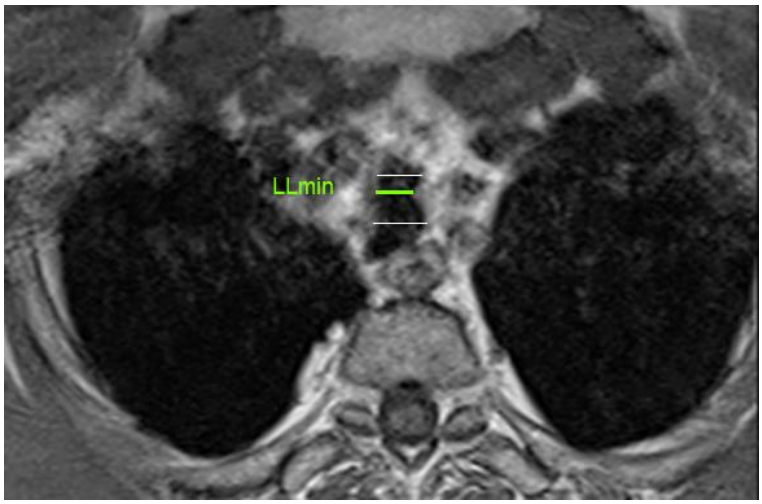


Abb. 10: Minimaler transversaler Durchmesser

2.5.1.5 Transversaler Durchmesser 4 mm von anterior

Ein weiterer Parameter war der transversale Durchmesser, welcher 4,0 ± 0,2 mm dorsal des anteriorsten Punktes des Tracheallumens und des Lumens des LTÜGs entfernt lag (Abb. 11). Dieser Parameter wurde ebenfalls auf jedem zu messenden Slice kaudal der Glottis ausgemessen und dient als zusätzlicher Referenzwert.

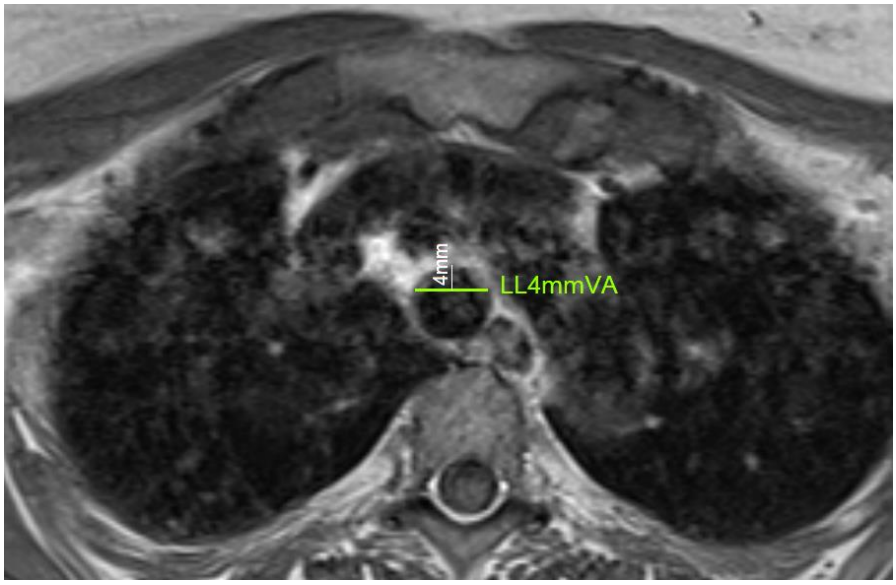


Abb. 11: Transversaler Durchmesser 4 mm von anterior

2.5.1.6 Volumen

Das Volumen (Vol) der Atemwege wurde bei jenen Datensätzen bestimmt, bei denen die Darstellung in der MRT von der Glottis bis zur Carina reichte, also die gesamte Trachea inkl. des LTÜGs abgebildet war. Dabei wurden folgende Prinzipien stets eingehalten:

- Das Lumen der Atemwege wurde von der Glottis als Anfangspunkt bis ein Slice kranial der Carina gemessen.
- Die Abgrenzung des Innenlumens der Trachea zum Übergang auf die darauf folgende Schleimhaut wurde als letzten, eindeutig mit Luft beinhaltender Voxel definiert und entsprechend markiert.
- Mukosa und anliegender Schleim wurden nicht mit gemessen.
- Einzelne dünne in das Lumen hineinragende Schleimfäden wurden mitgemessen und die Grenze an entsprechend anliegender Mukosa oder prominenter Schleimschicht gezogen.

Nach diesem Verfahren wurde das gesamte Innenlumen der Trachea und des LTÜGs ausgemessen. Dieses Lumen wurde pro Slice bestimmt und durch MevisLab [104] das Volumen der gesamten Trachea inkl. LTÜG in ml errechnet. In Abb. 12 ist die Markierungslinie des Innenlumens zur Bestimmung von Vol (grüne Markierung) sowie dünne Schleimfäden, welche mitgemessen wurden (weiße Markierungen), abgebildet.

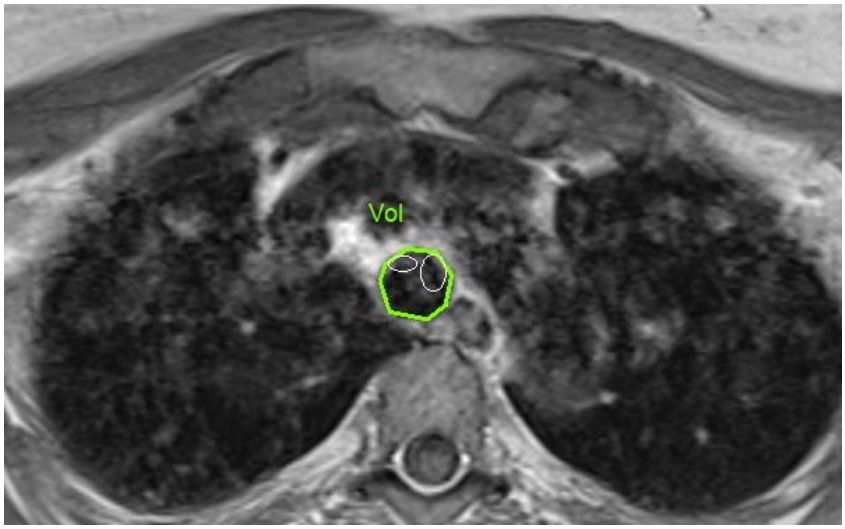


Abb. 12: Volumen

2.5.2 Teil 2: Parameter zum Ringknorpel

Messebene des Ringknorpels

Mittels coronarer, sagittaler und axialer Darstellung wurde der Ringknorpel auf Ebene des Ringknorpelbogens aufgesucht und das Lumen in der axialen Darstellung ausgemessen (Abb. 13). Erstreckte sich der Arcus cricoideus über zwei Slices, so wurde der kranialere Slice gewählt, da nach Lakhal et al. 2007 [95] der cephale Anteil schmaler ist als der kaudale. War der Arcus cricoideus über mehrere Slices dargestellt, so wurde der mittlere Slice ausgemessen.

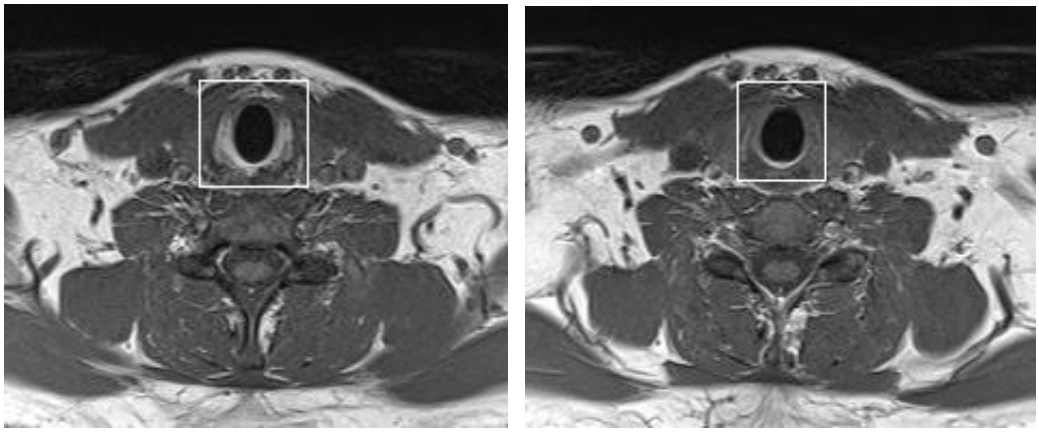


Abb. 13: Beispiel Cricoid (weiße Markierung) - Links: kranialer Slice, auf welchem das Cricoid ausgemessen wurde; Rechts: kaudaler Slice des Cricoids

2.5.2.1 Zusammenfassung der Durchmesser

Auf Ebene des Arcus cricoideus wurden jeweils der maximale anterior-posteriore Durchmessser, der maximale transversale Durchmessser sowie der transversale Durchmesser 4mm von anterior bestimmt (Abb. 14; Kapitel 2.5.1).

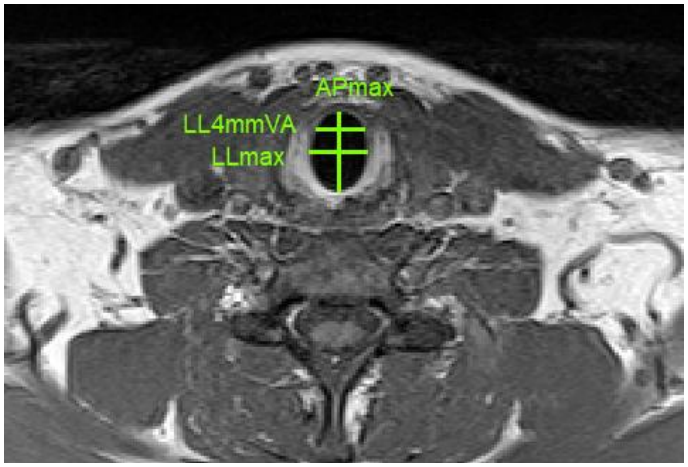


Abb. 14: Gesamtdarstellung von APmax, LLmax und LL4mmVA

2.5.2.2 Querschnittsfläche

*A*uf Höhe des Arcus cricoideus wurde zudem die Querschnittsfläche (CSA) bestimmt. Die Durchführung der Messung war die gleiche wie bei der Ausmessung des Volumens (Kapitel 2.5.1.6), allerdings fand die Messung nur auf einer Ebene statt (Abb. 15).

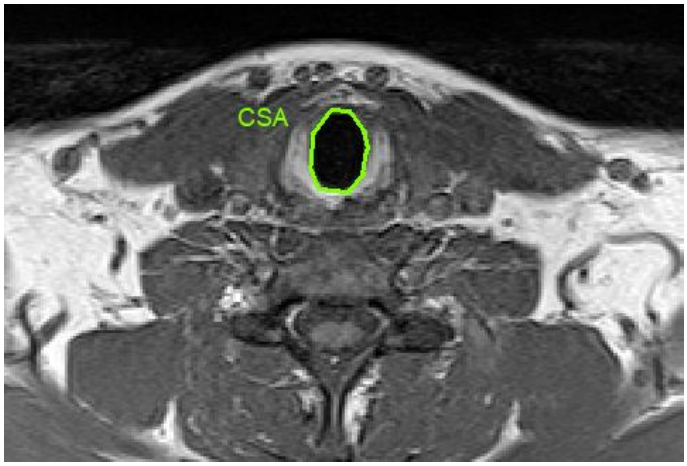


Abb. 15: Querschnittsfläche

Gesamtdarstellung der Messparameter innerhalb von MeVisLab

Abb. 16 zeigt die erhobenen Parameter wie sie im Original in MeVisLab [104] angezeigt wurden. Beispielhaft ist eine Ebene der Trachea gezeigt. Links ist die Markierungslinie dargestellt, welche zur Bestimmung von Vol und CSA genutzt wurde. Rechts werden APmax, LLmax und LL4mmVA gezeigt. Für die Lage der erfassten Durchmesser zueinander galt, dass APmax orthogonal zu LLmax und LL4mmVA stand, sowie LLmax und LL4mmVA parallel zueinander waren.

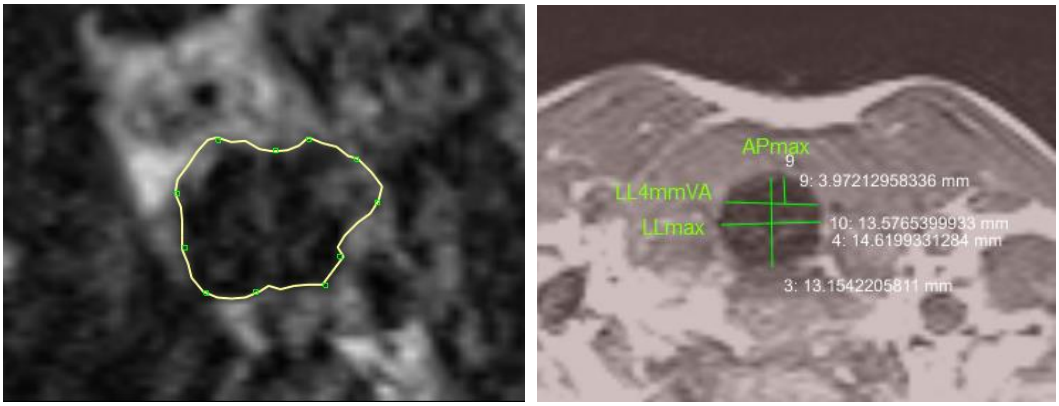


Abb. 16: Darstellung der Parameter in MeVisLab

2.6 Statistische Auswertung

Die statistische Auswertung erfolgte mittels des Programmes IBM SPSS Statistics, Version 22.0 (statistische Beratung durch Mitarbeiter des Instituts für Community Medicine, Greifswald).

2.6.1 Reliabilitätsanalyse

Zu Beginn der vorliegenden Arbeit wurde die Zuverlässigkeit der geplanten Messverfahren der Trachea und des LTÜGs in den MRT-Bildern durch eine Reliabilitätsanalyse überprüft. Dafür wurden für die jeweiligen Messwertepaare Bland-Altman-Plots erstellt sowie der Mittelwert (Mw) mit Standardabweichung (Std) der Abweichung der beiden Messungen berechnet. Nach Völzke et al. 2011 [102] wurde dabei eine mittlere Abweichung der Intra-Reader Variabilität von 5 % (bei einer doppelten Std von 25 %) als gute Qualität bewertet. Als weiteres Beurteilungskriterium für die Validität der Messverfahren wurde der Intraklassen-Korrelationskoeffizient (ICC) mit 95 % - Konfidenzintervallen (95%-KI) berechnet sowie die Korrelation nach Spearman der Parameter zwischen der ersten und zweiten Messung bestimmt.

2.6.2 Deskriptive Analyse

In der deskriptiven Analyse wurden jeweils die Verteilungen aller erhobenen (demografische und anamnestische) Einflussparameter bzw. gemessenen Parameter analysiert. Diese Verteilungen wurden für stetige Daten zusammenfassend mit Angabe von Fallzahl (n), Mw, Std, Minimum (Min), Maximum (Max) und 95%-KI dargestellt. Für dichotome bzw. ordinale Parameter wurden Klassen erstellt sowie Kontingenztafeln mit Angabe der absoluten und relativen Häufigkeiten. Alle Angaben zu den geprüften Einflussfaktoren wurden dabei vom Institut für Community Medicine, Greifswald, angefordert. Zusätzlich wurden die vorhandenen Bilddateien auf das Vorhandensein einer Carina überprüft und entsprechend markiert, um für Folgestudien einfacher identifiziert werden zu können.

2.6.3 Statistische Analyse

Im Rahmen der statistischen Analyse wurden für die Daten in Teil 1 der Einfluss von Geschlecht und Alter auf die Messparameter APmax, LLmax, LL4mmVA und Volumen der Trachea inkl. des LTÜGs untersucht.

Für die Daten in Teil 2 wurde diese Analyse erweitert und der Einfluss von Geschlecht, Alter, Körpergewicht, Körpergröße, einer diagnostizierten Schilddrüsenerkrankung (DS) sowie einer durchgemachten Radiojodtherapie (RJT) auf die Messparameter APmax, LLmax, LL4mmVA und CSA des Ringknorpels analysiert, wobei eine DS sowie eine RJT nicht näher spezifiziert waren - in die Vergleiche zwischen den Gruppen gingen ausschließlich Probanden mit Angaben (ja oder nein) ein. Die Ergebnisse wurden tabellarisch mit Angabe von n, Mw, Std, Min, Max und 95%-KI sowie graphisch mittels Mw und 95%-KI zusammengefasst.

Die Vergleiche erfolgten für zwei Gruppen, entsprechend dichotome und ordinale Parameter, bei beiden Teilen dieser Arbeit mit dem Mann-Whitney-U-Test (Geschlecht, dichotomisierte Altersklassen, DS und RJT). Bei mehr als zwei Gruppen wurden die Vergleiche für stetige Parameter mit dem Kruskal-Wallis-Test durchgeführt (Altersklassen, Gewichtsklassen, Größenklassen).

Weiterhin wurde der Zusammenhang zwischen dem BMI sowie Schilddrüsenvolumen und den Dimensionen des Ringknorpels mit dem Korrelationskoeffizienten nach Spearman bestimmt. Über lineare Regressionsanalysen wurde zusätzlich der Einfluss von Geschlecht, Alter, Körpergewicht und Körpergröße auf die Parameter des Ringknorpels überprüft.

Alle Tests erfolgten zweiseitig zum Signifikanzniveau $\alpha = 0{,}05$. Die Ergebnisse dieser explorativen Analysen, vor allem die erhobenen p-Werte, sind rein deskriptiv und haben ausschließlich Hypothesen-generierenden Charakter.

2.6.4 Prävalenzen

Sowohl für das Vorliegen einer bildmorphologischen Trachealstenose als auch einer Trachealaffektion durch die Schilddrüse wurden jeweils Prävalenzen bestimmt. Als Trachealstenose galt dabei eine Einschräkung des Lumens im

Verlauf der Trachea um > 50 % (mindestens Grad-II-Stenose, Kapitel 1.3.1). Eine Trachealaffektion durch die Schilddrüse wurde wie folgt definiert: das Tracheallumen wird nicht von der thorakalen Mittellinie tangiert, oder ist soweit komprimiert, dass die Trachea eine Sichelform annimmt. Ursache dafür sind pathologische Veränderungen der Schilddrüse in Form einer ausgeprägten Vergrößerung einer oder beider Seiten oder einer Knotenbildung. Die Validierung der genannten Pathologien in den MRT-Bildern erfolgte durch einen Oberarzt aus dem Fachbereich für Hals-, Nasen-, Ohrenheilkunde.

3 Ergebnisse

3.1 Messmethodik und Reliabilitätsanalyse

Für die standardisierte Beurteilung der MRT-Daten wurde eine Standard Operating Procedure (SOP) entwickelt, in der das methodische Vorgehen für die Ausmessung der Trachea und des LTÜGs hinsichtlich Schnittebene, Start- und Schlussebene sowie Messpunkte genau festgelegt wurde. Für diese definierten Angaben erfolgten dann das Untersuchertraining, die Zertifizierung des Readers sowie die Reliabilitätsanalyse. Bei nicht eindeutiger Abgrenzung des Lumens oder Unsicherheiten der Darstellung der Glottis, der Carina oder Messebene des Arcus cricoideus, wurde dies mit einem Oberarzt der Klinik für Hals-, Nasen-, Ohrenheilkunde besprochen und festgelegt. Der Zeitaufwand zu Beginn der Messungen lag bei ca. 50 Minuten pro Proband und Trachea inkl. LTÜG. Im Verlauf konnte eine Optimierung auf ca. 30 Minuten erzielt werden. Für die Ausmessungen des Ringknorpels war pro Proband ein zeitlicher Aufwand von ca. 4 Minuten notwendig.

Untersuchertraining

Zur Vermessung der Trachea und des LTÜGs im MRT-Bild wurden sowohl die Parameter APmax, LLmax, APmin, LLmin und LL4mmVA, als auch das Volumen als Messpunkte festgelegt (Kapitel 2.5.1). Zum ersten Training des Readers wurden 12 Probanden aus den Prä-Testdaten ausgewählt und die Trachea von der Glottis nach kaudal bis zum letzten abgebildeten Slice, bzw. bis zur Carina, falls dies vorhanden war, vermessen.

Zertifizierung des Readers

Nachfolgend wurde zur Qualitätssicherung die Zuverlässigkeit der entwickelten Messverfahren anhand einer Reliabilitätsanalyse bestimmt. Dazu wurde aus dem vorliegenden Datensatz der Population von SHIP-2 und SHIP-TREND-0 eine Referenzstichprobe mit 100 Probanden randomisiert gezogen und die Parameter APmax, LLmax, APmin, LLmin, LL4mmVA und Vol im Abstand von einer Woche je

einmal mit der oben beschriebenen Methodik (Kapitel 2.5.1) ausgemessen. 10 von diesen 100 MRT-Datensätzen sollten eine Carina beinhalten.
Zusätzlich wurde der Parameter CSA bei 25 Probanden aus dem vorliegenden Datensatz von SHIP-2 und SHIP-TREND-0 randomisiert ausgewählt und jeweils im Abstand von einer Woche einmal ausgemessen wie in Kapitel 2.5.2 beschrieben.
Die Beurteilung der Reliabilität aller Parameter erfolgte mittels der in Kapitel 2.6.1 genannten Kriterien.

Ergebnisse der Erstzertifizierung - Reliabilitätsanalyse

Innerhalb der 100 für die Zuverlässigkeitsprüfung randomisiert ausgewählten Datensätze wurden die Parameter APmax, LLmax, APmin, LLmin und LL4mmVA auf insgesamt 2.123 Slices der Trachea und des LTÜGs gemessen, das Volumen wurde pro Datensatz je einmal bestimmt. Die nach der Bland-Altman-Methode bestimmte mittlere Streuung der Differenzen der einzelnen Messwertepaare lag für die Parameter APmax, LLmax, LL4mmVA und Volumen zwischen -1,22 ± 2,96 % und -2,17 ± 17,52 % in einem akzeptablen Bereich. Für APmin und LLmin dagegen wurden erhebliche Abweichungen festgestellt (15,17 ± 79,70 % und 7,69 ± 55,6 %). CSA wurde jeweils bei 25 Datensätzen bestimmt und hatte ebenfalls eine geringe Abweichung mit 1,0 ± 2,63 %. Zur Illustration des Vergleichs eines reliablen und eines unzureichend reliablen Parameters sind beispielhaft in Abb. 17 die Bland-Altman-Plots von APmax (links) und APmin (rechts) angegeben.

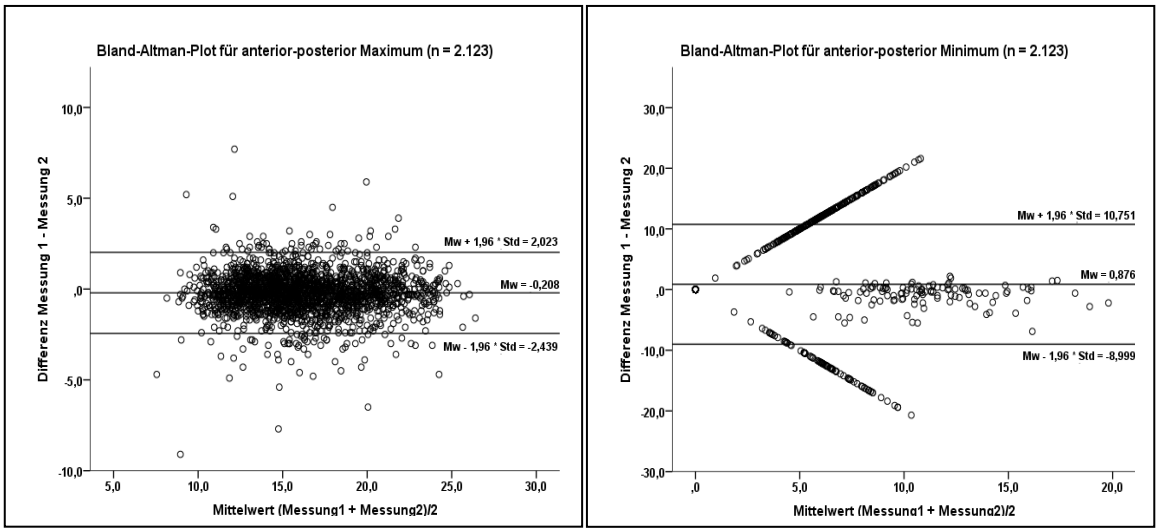


Abb. 17: Bland-Altman-Plot von APmax (links) und APmin (rechts)

Die weitere Analyse der Reliabilität umfasste die Bestimmung des Intraklassen-Korrelationskoeffizienten (ICC) sowie des Korrelationskoeffizienten nach Spearman ($r_{Spearman}$). Die Ergebnisse sind in Tab. 3 angegeben. Beide Kennzahlen lieferten für APmax, LLmax, LL4mmVA, das Volumen und CSA sehr gute Übereinstimmungen zwischen der ersten und zweiten Messung. Die Messparameter APmin und LLmin erwiesen sich als nicht ausreichend reliabel und wurden daher aus den weiteren Messungen ausgeschlossen.

Tab. 3: Intraklassen-Korrelationskoeffizient mit 95%-Konfidenzintervall und Spearman Korrelationskoeffizient der Messparameter

Parameter	ICC	95%-KI	$r_{Spearman}$
APmax	0,942	0,935 – 0,949	0,945
LLmax	0,958	0,951 – 0,964	0,951
APmin	0,258	0,216 – 0,299	0,305
LLmin	0,215	0,173 – 0,255	0,238
LL4mmVA	0,851	0,839 – 0,863	0,673
Volumen	0,994	0,987 – 0,996	0,920
CSA	0,996	0,989 – 0,998	0,996

Beim Bland-Altman-Plot von APmax und LLmax ergab sich nur eine geringe Streuung um die Mittellinie mit wenigen moderarten und einzelnen starken Abweichungen (Abb. 18).

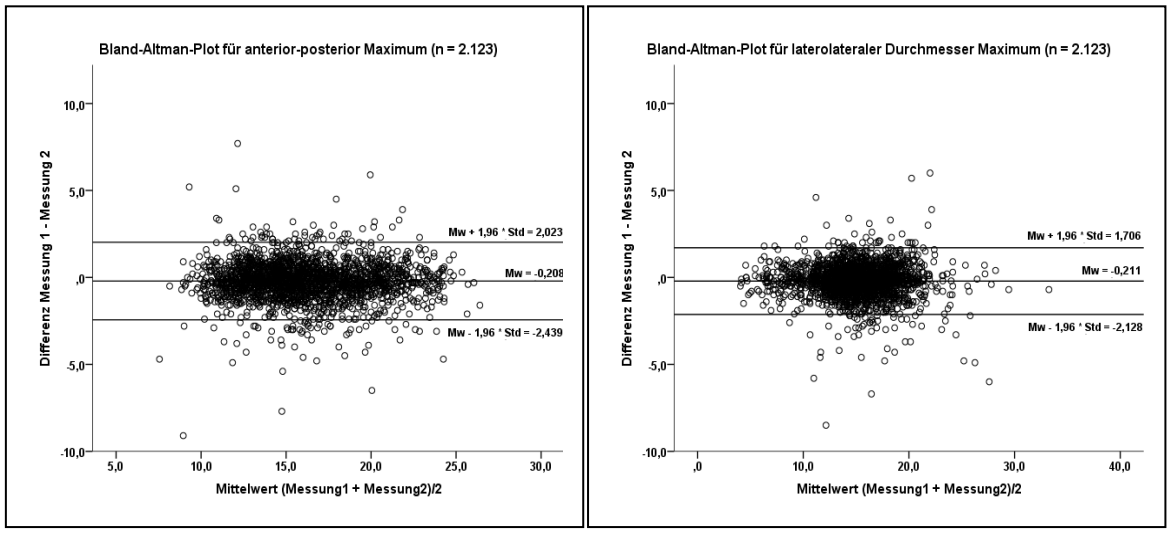


Abb. 18: Bland-Altman-Plot von APmax (links) und LLmax (rechts)

Die Messparameter APmin und LLmin zeigten im Bland-Altman-Plot hingegen starke Streuungen und Abweichungen zwischen der ersten und zweiten Messreihe und wurden aus den weiteren Messungen ausgeschlossen (Abb. 19).

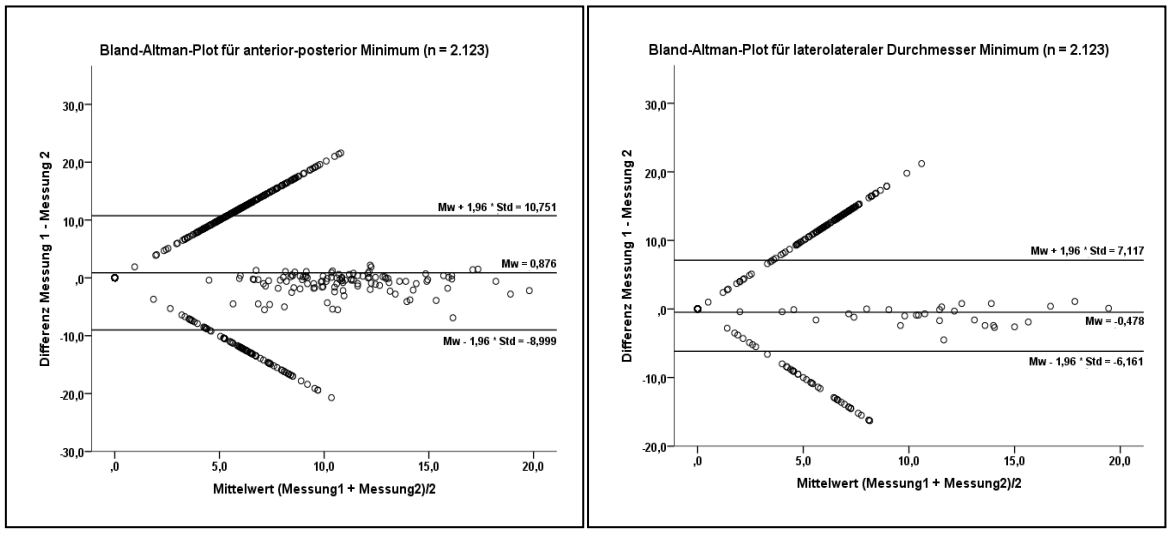


Abb. 19: Bland-Altman-Plot von APmin (links) und LLmin (rechts)

Im Bland-Altman-Plot von LL4mmVA lag eine geringe Streuung um die Mittellinie vor. Das Volumen zeigte eine starke Anhäufung um die Mittellinie mit einem Wert außerhalb der Grenzen (Abb. 20).

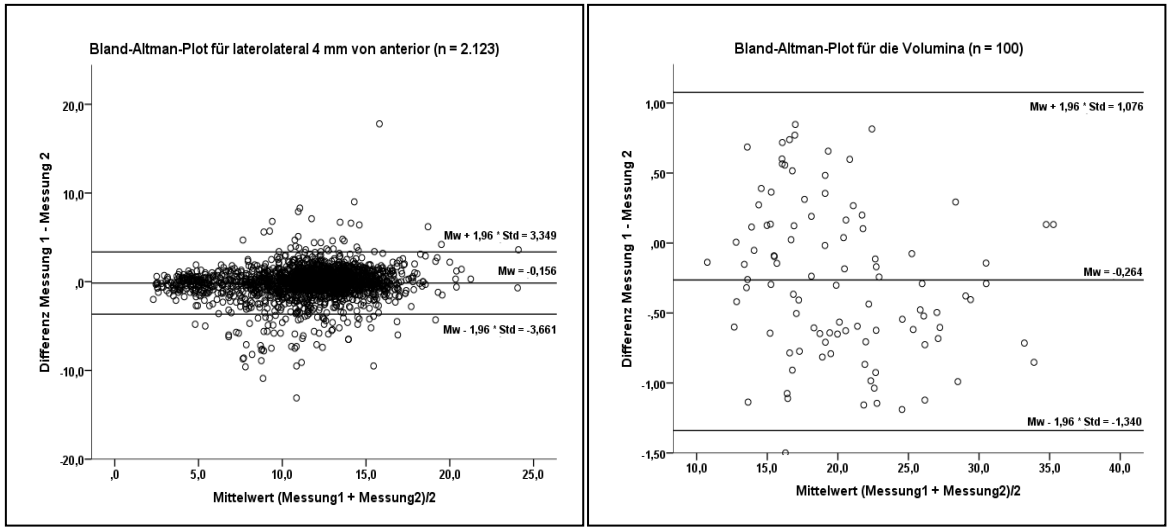


Abb. 20: Bland-Altman-Plot von LL4mmVA (links) und Volumen (rechts)

Im Bland-Altman-Plot von CSA lag eine geringe Streuung um die Mittellinie vor. Ein Wert befand sich außerhalb der Grenzen (Abb. 21).

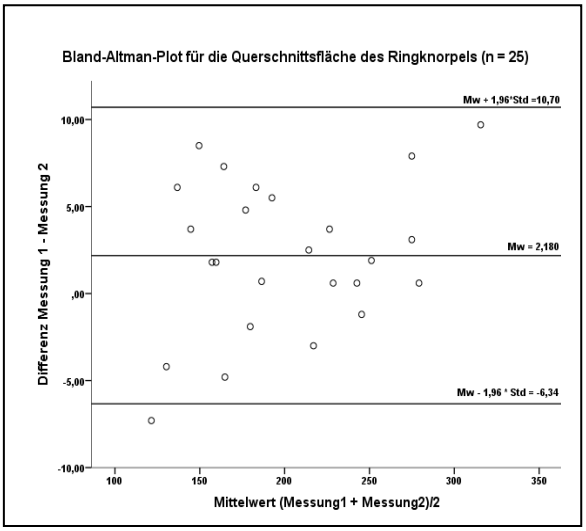


Abb. 21: Bland-Altman-Plot von CSA

3.2 Teil 1: Parameter zur Trachea und dem laryngotrachealen Übergang

3.2.1 Deskriptive Analyse Teil 1

3.2.1.1 Charakterisierung der Population Teil 1

Für die Durchführung der Messungen der Trachea und des LTÜGs wurden die Bilder von 801 Probanden aus den Populationen von SHIP-2 und SHIP-TREND-0 randomisiert ausgewählt. Von diesen Bildern wurden n = 9 aufgrund von Pathologien (Trachealstenose oder Trachealaffektion durch die Schilddrüse) aus der Auswertung ausgeschlossen. Insgesamt wurden somit die MRT-Datensätze von n = 792 Probanden in Teil 1 untersucht.

Geschlecht

Von den 792 Probanden waren 383 Männer (48,4 %) und 409 Frauen (51,6 %, Abb. 22).

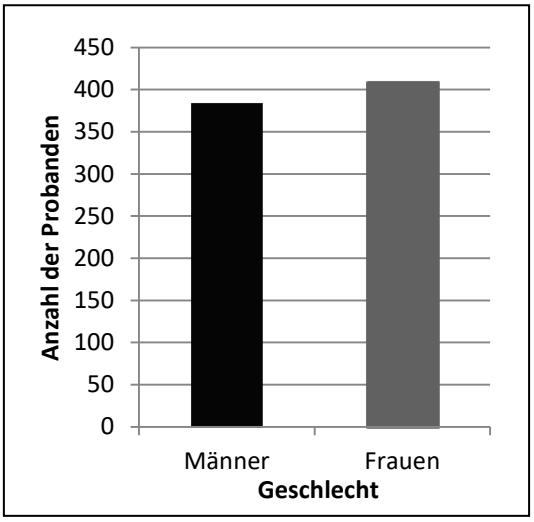


Abb. 22: Geschlechterverteilung von Population 1

Alter

Das Alter der Probanden am Untersuchungstag lag zwischen 21 und 88 Jahren, das durchschnittliche Alter betrug 51,7 ± 14,0 Jahre (95%-KI: 50,7 - 52,7 Jahre). Männer waren im Durchschnitt 51,5 ± 14,8 Jahre alt, Frauen 51,9 ± 13,2 Jahre. Zur weiteren Analyse des Einflusses der Alters auf die MRT-Messparameter wurde das Alter nach Breatnach et al. 1984 [80] in folgende Altersklassen unterteilt (Abb. 23):

Alters-klassen [Jahre]	Anzahl der Probanden (%)
≤ 29	54 (6,8)
30 - 39	108 (13,6)
40 - 49	194 (24,5)
50 - 59	191 (24,1)
60 - 69	161 (20,3)
≥ 70	84 (10,6)

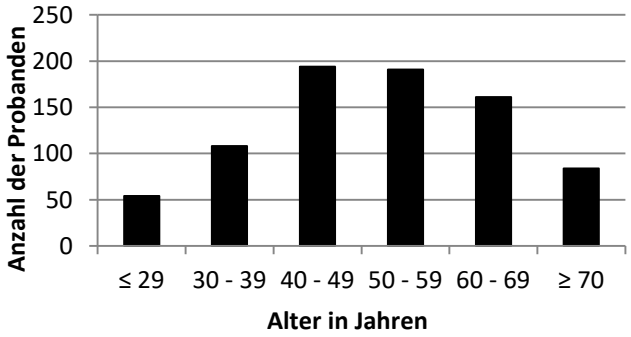
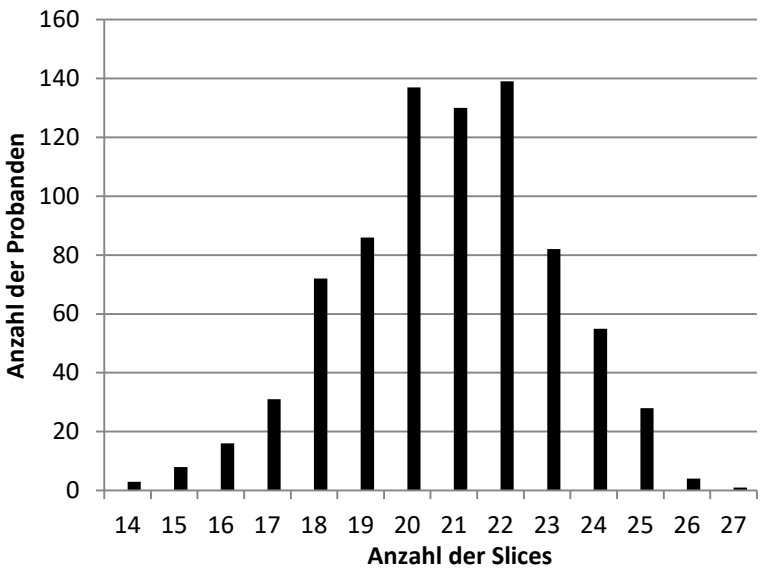


Abb. 23: Altersklassen und deren Verteilung von Population 1

3.2.1.2 MRT-Auswertung Teil 1

Für alle MRT-Bilder wurde die Verteilung der Sliceanzahl geprüft, die sich pro Proband beginnend von der Glottis nach kaudal verlaufend bis zum letzten gemessenen Slice erstreckte (Abb. 24). Da die Glottis auf Slice 0 lag, entspricht die Anzahl der Slices pro Proband deren "Schlussebene + 1".



Anzahl der Slices	Anzahl der Probanden (%)
14	3 (0,4)
15	8 (1,0)
16	16 (2,0)
17	31 (3,9)
18	72 (9,1)
19	86 (10,9)
20	137 (17,3)
21	130 (16,4)
22	139 (17,6)
23	82 (10,4)
24	55 (6,9)
25	28 (3,5)
26	4 (0,5)
27	1 (0,1)

Abb. 24: Verteilung der Slices pro Proband zur Darstellung der Trachea und des LTÜGs

Da in den Ergebnissen die Dimensionen der Trachea in Abhängigkeit der subglottischen Distanz in mm angegeben werden, ist in Tab. 4 die Umrechnung von Sliceanzahl in den jeweiligen Abstand zur Glottis in mm dargestellt.

Die Umrechung wurde folgendermaßen durchgeführt:

$$Distanz\ zur\ Glottis\ in\ mm = Sliceanzahl * 4\ mm\ (Schichtdicke\ in\ der\ MRT\ )$$

Tab. 4: Umrechnung von Sliceanzahl in Distanz zur Glottis in mm

Slice	Distanz zur Glottis [mm]	Slice	Distanz zur Glottis [mm]	Slice	Distanz zur Glottis [mm]
0	0	**9**	36	**18**	72
1	4	**10**	40	**19**	76
2	8	**11**	44	**20**	80
3	12	**12**	48	**21**	84
4	16	**13**	52	**22**	88
5	20	**14**	56	**23**	92
6	24	**15**	60	**24**	96
7	28	**16**	64	**25**	100
8	32	**17**	68	**26**	104

3.2.1.3 Maximaler anterior-posteriore Durchmesser

Der Mittelwert des maximalen anterior-posterioren Durchmessers über die gesamte ausgemessene Trachea inkl. LTÜG lag bei 16,5 ± 2,7 mm. Männer hatten mit 18,9 ± 1,3 mm im Schnitt einen größeren Durchmesser als Frauen mit 14,1 ± 1,0 mm.

Ab der Glottis nach kaudal verlaufend nahm der Durchmesser zu, das Maximum wurde bei beiden Geschlechtern 8 mm kaudal der Glottis erreicht. Männer wiesen an dieser Stelle einen durchschnittlichen Wert von 20,9 ± 1,7 mm, Frauen von 16,3 ± 1,4 mm auf. Im weiteren Verlauf der Trachea nahm der Wert dieses Parameters wieder ab und erreichte bei beiden Geschlechtern ein Minimum 24 mm kaudal der Glottis. Männer besaßen an jener Stelle ein durchschnittliches Minimum von 16,9 ± 2,4 mm, Frauen von 12,4 ± 1,8 mm. Folgend stieg APmax wieder mit geringen Schwankungen über die distale Hälfte der Trachea an (Abb. 25). Eine Übersicht der genauen Messwerte von APmax in Abhängigkeit von der subglottischen Distanz bei Männern und Frauen ist im Anhang angegeben.

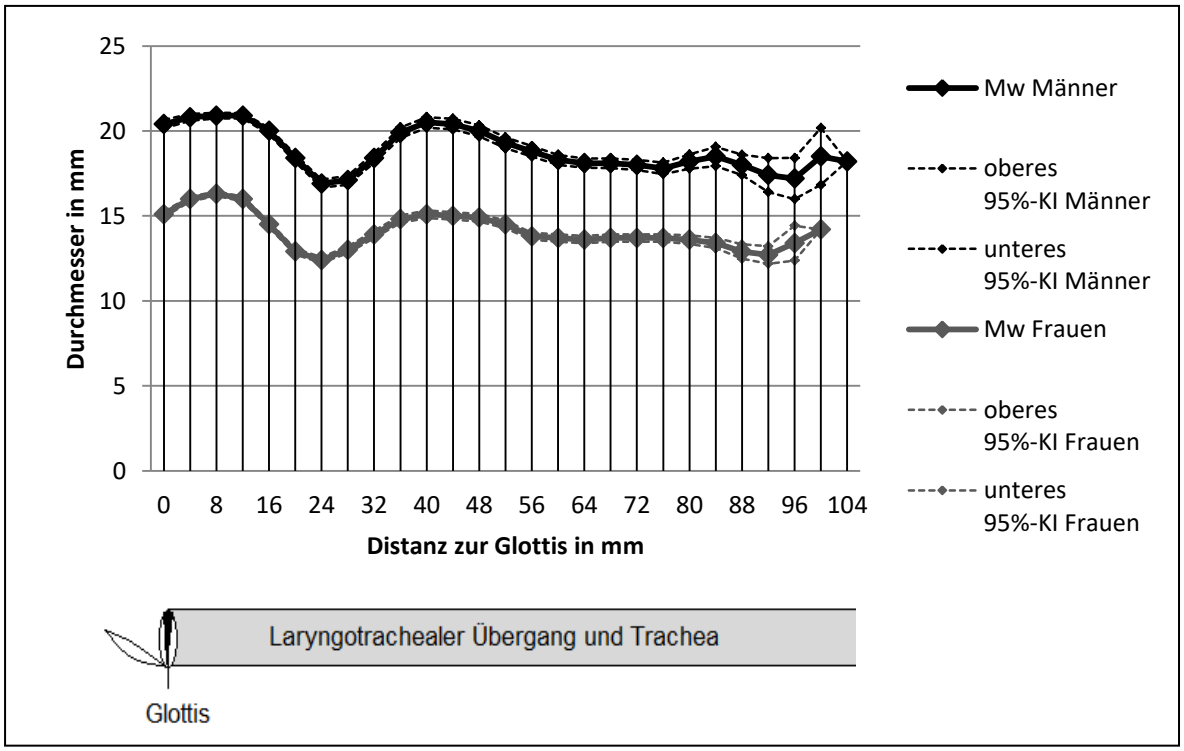


Abb. 25: APmax der Trachea und des LTÜGs in Abhängigkeit von der subglottischen Distanz bei Männern und Frauen

3.2.1.4 Maximaler transversaler Durchmesser

Der Mittelwert dieses Parameters über die ausgemessene Trachea und den LTÜG lag bei 16,7 ± 3,2 mm. Bei Männern war der durschnittliche Wert von LLmax mit 18,4 ± 3,0 mm größer als bei Frauen mit 15,0 ± 2,5 mm.

Bei beiden Geschlechtern lag auf Ebene der Glottis ein Minimum vor mit 9,4 ± 2,0 mm bei Männern und 7,5 ± 1,7 mm bei Frauen. Von der Glottis nach kaudal verlaufend nahm der Durchmesser bei beiden Geschlechtern zu. Männer erreichten 20 mm unterhalb der Stimmbandebene einen Durchmesser von 18,7 ± 1,7 mm. Frauen hatten im Abstand von 16 mm einen Mittelwert von 14,4 ± 1,3 mm. Im mittleren Drittel der Trachea lagen geringe Schwankungen vor. Ab einer Distanz von 84 mm kaudal der Glottis wurde LLmax bei beiden Geschlechtern nochmals größer. Das durchschnittliche Maximum lag bei Männern 100 mm kaudal der Glottis mit einem Wert von 24,1 ± 4,7 mm. Bei den Frauen war ein Maximum 96 mm unterhalb der Stimmritze festzustellen mit einem mittleren Durchmesser von 19,0 ± 4,0 mm (Abb. 26). Im Anhang findet sich eine tabellarische Übersicht der Messwerte von LLmax in Abhängigkeit von der subglottischen Distanz bei Männern und Frauen.

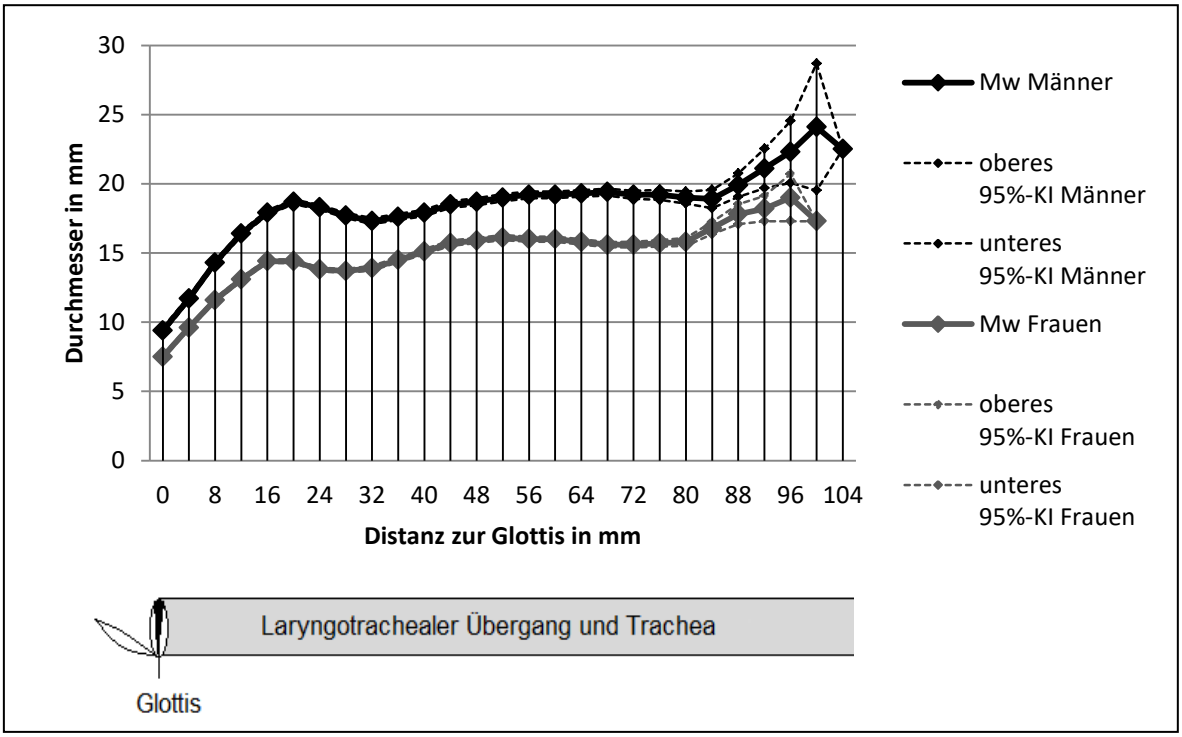
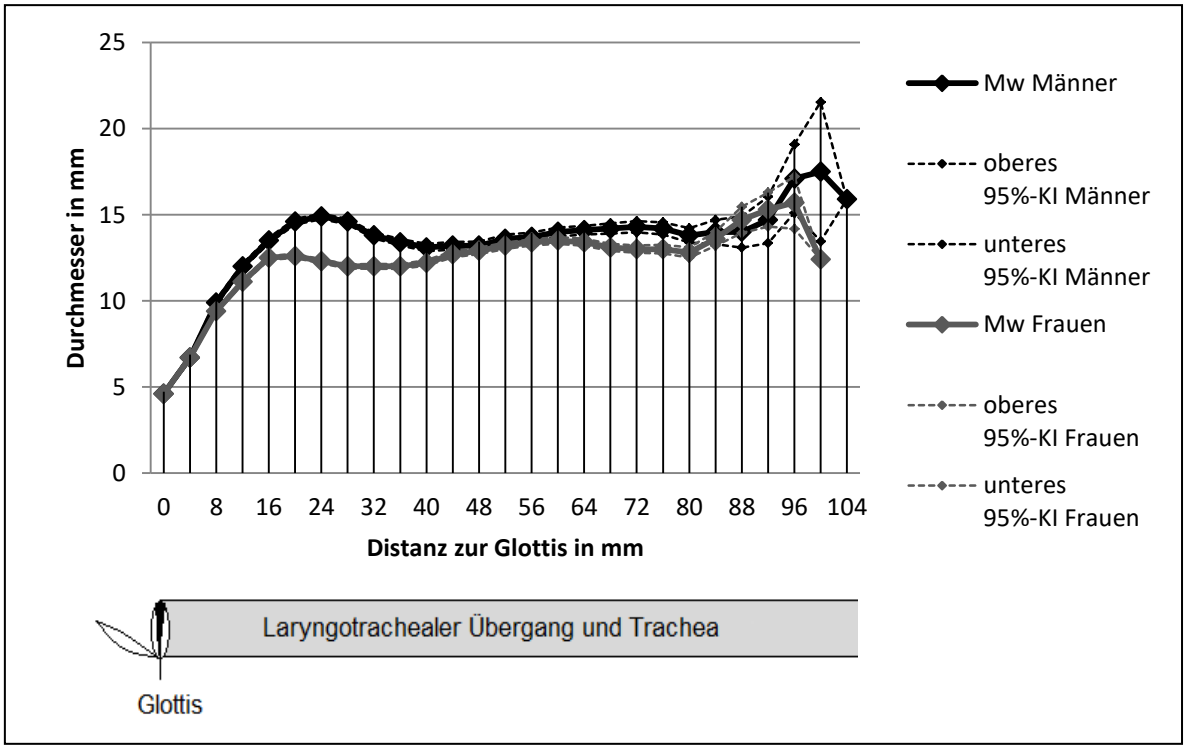


Abb. 26: LLmax der Trachea und des LTÜGs in Abhängigkeit von der subglottischen Distanz bei Männern und Frauen

3.2.1.5 Transversaler Durchmesser 4 mm von anterior

Der durchschnittliche Wert dieses Parameters lag bei 12,9 ± 2,5 mm. Über die ausgemessene Trachea und den LTÜG war bei Männern im Mittel ein größerer Durchmesser mit 13,4 ± 2,7 mm feststellbar als bei Frauen mit 12,3 ± 2,3 mm.

Auf der Ebene der Glottis lag bei beiden Geschlechtern ein Minimum von jeweils 4,6 ± 1,1 mm vor. LL4mmVA nahm folgend bei beiden Geschlechtern ab der Glottis nach kaudal verlaufend zu. Bei Männern erreichte der Durchmesser 24 mm unterhalb der Stimmritze einen Wert von 14,9 ± 1,6 mm, bei Frauen lag LL4mmVA im Abstand von 16 mm kaudal der Glottis bei 12,5 ± 1,2 mm. Im weiteren Verlauf nach distal waren im mittleren Drittel der Trachea bei beiden Geschlechtern nur geringe Schwankungen festzustellen. Im distalen Drittel der Trachea stieg der durchschnittliche Wert dieses Parameters bei beiden Geschlechtern nochmals an und erreichte bei Männern ein Maximum von 17,5 ± 4,1 mm im Abstand von 100 mm unterhalb der Glottis. Frauen trugen das Maximum 96 mm kaudal der Stimmbandebene mit einem Durchmesser von 15,7 ± 3,6 mm (Abb. 27). Eine Tabelle mit den genauen Messwerten von diesem Parameter in Abhängigkeit von der subglottischen Distanz bei Männern und Frauen findet sich im Anhang.



3.2.1.6 Volumen

Bei 35 der 792 ausgewählten Probanden (4,4 %) lag im MRT-Datensatz die Glottis bis zur Carina vor, welches der Darstellung der vollständigen Trachea inkl. LTÜG entspricht. Bei diesen Datensätzen wurde zusätzlich das Volumen in ml bestimmt. Der Mittelwert lag bei 18,0 ± 4,4 ml. Männer hatten durchschnittlich ein größeres Volumen als Frauen (26,8 ± 4,6 ml vs. 16,9 ± 2,9 ml, Abb. 28).

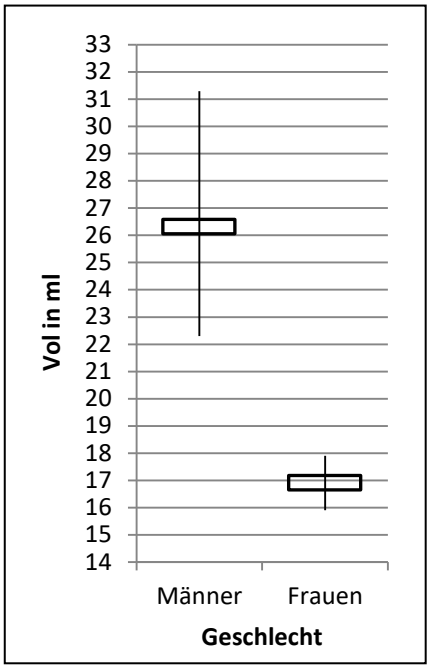


Abb. 28: Volumen in Abhängigkeit vom Geschlecht

Nachfolgend ist eine tabellarische Übersicht über die Werte des Trachealvolumens bei Männern und Frauen angegeben (Tab. 5).

Tab. 5: Volumen in Abhängigkeit vom Geschlecht

Geschlecht	n	Mw [ml]	Std [ml]	Min [ml]	Max [ml]	95%-KI [ml]
Männlich	4	26,8	4,6	21,7	31,8	22,3 - 31,3
Weiblich	31	16,9	2,9	12,5	23,1	15,9 - 17,9

3.2.2 Statistische Analyse Teil 1

3.2.2.1 Einfluss von Geschlecht und Alter

Für alle gemessenen Durchmesser der Trachea inkl. LTÜG sowie für das Volumen wurde der Einfluss von Geschlecht und Alter analysiert. Beim Vergleich von APmax, LLmax, LL4mmVA und Volumen ergab sich je ein auffälliger Unterschied ($p < 0{,}001$) zwischen den Geschlechtern, wobei Männer durchschnittlich größere Werte hatten als Frauen.

Bei der Prüfung des Einflusses durch das Alter mittels Altersklassen auf die erhobenen Parameter ergab sich dagegen keine Signifikanz. Der p-Wert lag zwischen 0,168 bei LL4mmVA und 0,967 bei APmax. LLmax und das Volumen hatten jeweils p-Werte dazwischen.

Die genauen Mittelwerte der jeweiligen Parameter in Abhängigkeit vom Geschlecht und der Altersklassen pro Parameter sind in Tab. 6 festgehalten.

Tab. 6: Vergleich der Parameter zwischen den Geschlechtern und Altersklassen

Parameter	Einflussfaktor	Ausprägung	Mw ± Std	p-Wert
APmax	**Geschlecht**	Männlich	18,9 ± 1,3	< 0,001*
		Weiblich	14,1 ± 1,0	
	Alterklassen	≤ 29 Jahre	16,5 ± 3,0	0,967**
		30 – 39 Jahre	16,5 ± 2,8	
		40 – 49 Jahre	16,8 ± 2,9	
		50 – 59 Jahre	16,6 ± 2,8	
		60 – 69 Jahre	16,6 ± 3,0	
		≥ 70 Jahre	16,9 ± 3,1	
LLmax	**Geschlecht**	Männlich	18,4 ± 3,0	< 0,001*
		Weiblich	15,0 ± 2,5	
	Alterklassen	≤ 29 Jahre	15,6 ± 1,9	0,432**
		30 – 39 Jahre	15,7 ± 1,9	
		40 – 49 Jahre	15,9 ± 2,0	
		50 – 59 Jahre	15,8 ± 1,9	
		60 – 69 Jahre	15,9 ± 2,0	
		≥ 70 Jahre	16,3 ± 2,3	
LL4mmVA	**Geschlecht**	Männlich	13,4 ± 2,7	< 0,001*
		Weiblich	12,3 ± 2,3	
	Alterklassen	≤ 29 Jahre	12,5 ± 1,0	0,168**
		30 – 39 Jahre	12,4 ± 0,9	
		40 – 49 Jahre	12,4 ± 1,0	
		50 – 59 Jahre	12,2 ± 0,9	
		60 – 69 Jahre	12,2 ± 1,0	
		≥ 70 Jahre	12,3 ± 1,1	

Parameter	Einflussfaktor	Ausprägung	Mw ± Std	p-Wert
Volumen	**Geschlecht**	Männlich	26,8 ± 4,6	< 0,001*
		Weiblich	16,9 ± 2,9	
	Alterklassen	≤ 29 Jahre	14,8 ± 2,6	0,224**
		30 – 39 Jahre	22,8 ± 7,3	
		40 – 49 Jahre	18,5 ± 2,6	
		50 – 59 Jahre	18,0 ± 4,0	
		60 – 69 Jahre	15,7 ± 1,7	
		≥ 70 Jahre	16,2 ± 5,2	

* Mann-Whitney-U-Test, ** Kruskal-Wallis-Test

3.2.2.2 Korrelationen zwischen dem Alter und den Parametern

Der Zusammenhang zwischen dem Alter und den erhobenen Durchmessern wurde zusätzlich auf verschiedenen Ebenen der Trachea überprüft. Dafür wurde die Ebene der Glottis als Startpunkt sowie die Ebene 24 mm unterhalb der Glottis ausgewählt. Letztere stellt ein Minimum des APmax dar. Weiterhin wurde die Ebene 40 mm kaudal der Glottis gewählt, da diese laut Prasanna Kumar et al. 2014 [107] als klinisch relevante Engstelle beschrieben wird. Als vierte und letzte Ebene wurde der Bereich 52 mm unterhalb der Stimmbandebene gewählt, da dies der kaudalste Slice ist, auf welcher die Trachea aller ausgemessenen Probanden stets vorhanden war. Auf diesen vier Ebenen wurden jeweils die Korrelation mittels Spearman's Korrelationskoeffizient zwischen dem Alter und den Parametern APmax, LLmax und LL4mmVA analysiert.

Insgesamt konnte nur eine sehr geringe Korrelation zwischen dem Alter und LL4mmVA auf Ebene der Glottis mit $r_{Spearman}$ = -0,117 gezeigt werden. Zwischen dem maximalen anterior-posterioren sowie maximalen transversalen Durchmesser auf den untersuchten Ebenen und dem Alter wurde kein linearer Zusammenhang festgestellt (Tab. 7).

Tab. 7: Zusammenhang zwischen dem Alter und den Durchmessern auf unterschiedlichen Ebenen der Trachea und des LTÜGs

Korrelation $r_{Spearman}$	Ebene der Trachea und des LTÜGs			
	Glottis	**24 mm kaudal der Glottis**	**40 mm kaudal der Glottis**	**52 mm kaudal der Glottis**
APmax vs. Alter	-0,065	0,009	0,030	-0,039
LLmax vs. Alter	-0,082	0,069	0,064	0,025
LL4mmVA vs. Alter	-0,117	0,055	-0,031	-0,035

Zusätzlich wurde der Zusammenhang zwischen dem Volumen der Trachea inkl. des laryngotrachealen Übergangs und dem Alter bei den 35 Probanden geprüft, bei welchen in der MRT die Darstellung von der Glottis bis zur Carina reichte. Dabei zeigte sich, dass das Volumen nur sehr gering mit dem Alter korrelierte, der Korrelationskoeffizient lag bei $r_{Spearman} = -0{,}124$.

3.3 Teil 2: Parameter zum Ringknorpel

3.3.1 Deskriptive Analyse Teil 2

3.3.1.1 Charakterisierung der Population Teil 2

Für die Messungen des Ringknorpels lagen 3.226 Hals-MRT-Datensätze aus SHIP-2 und SHIP-TREND vor. Insgesamt mussten n = 37 Datensätze aufgrund einer Pathologie (Trachealstenose oder Trachealaffektion durch die Schilddrüse) aus der Auswertung ausgeschlossen werden. Weiterhin konnten folgende MRT-Bilder nicht verwendet werten: n = 22 Datensätze aufgrund von schlechter Bildqualität, n = 1 Datensatz mit ausgeprägter Schrägaufnahme und n = 1 leere Datei. Demnach standen für die Ausmessung des Ringknorpels auf der Höhe des Arcus cricoideus die MRT-Bilder von 3.165 Probanden zur Verfügung.

Geschlecht

Von den 3.165 untersuchten Probanden waren 1.540 Männer (48,7 %) und 1.625 Frauen (51,3 %, Abb. 29).

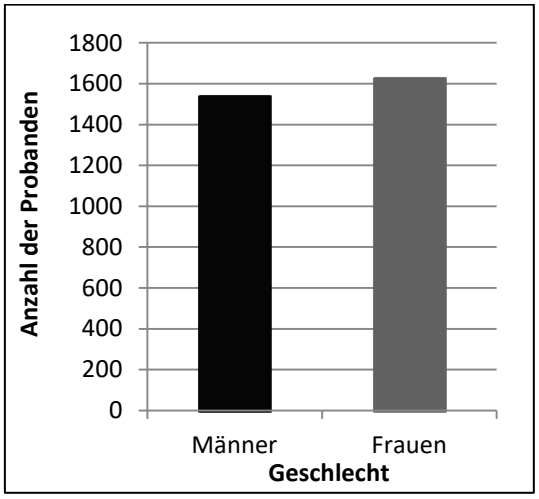


Abb. 29: Geschlechterverteilung von Population 2

Alter

Das Alter der Probanden am Untersuchungstag lag zwischen 21 und 89 Jahren, das durchschnittliche Alter betrug 52,5 ± 13,8 Jahre (95%-KI: 52,0 – 53,0 Jahre). Männer waren im Durchschnitt 52,6 ± 14,3 Jahre alt, Frauen 52,4 ± 13,3 Jahre. Die Klasseneinteilung des Alters orientierte sich nach Breatnach et al. 1984 [80], die Altersklassen und deren Verteilung sind in Abb. 30 angegeben.

Alters-klassen [Jahre]	Anzahl der Probanden (%)
≤ 29	161 (5,1)
30 - 39	423 (13,4)
40 - 49	786 (24,8)
50 - 59	749 (23,7)
60 - 69	661 (20,9)
≥ 70	385 (12,2)

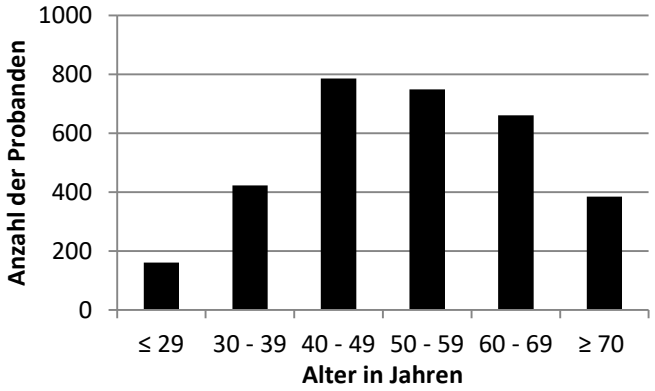


Abb. 30: Altersklassen und deren Verteilung von Population 2

Körpergewicht

Das mittlere Körpergewicht lag bei 80,0 ± 15,1 kg (Min: 41,5 kg, Max: 142,7 kg, 95%-KI: 79,5 - 80,5 kg). Um eine ausgeglichene Fallzahl in den Gruppen zu erreichen, wurde das Gewicht in folgende Klassen eingeteilt (Abb. 31):

Gewichts-klassen [kg]	Anzahl der Probanden (%)
≤ 69	796 (25,2)
70 - 89	1.518 (48,0)
90 - 109	747 (23,6)
≥ 110	104 (3,3)

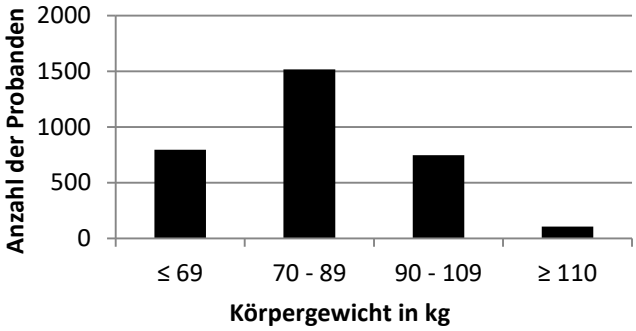


Abb. 31: Gewichtsklassen und deren Verteilung von Population 2

Körpergröße

Die Körpergröße betrug im Mittel 170,1 ± 9,3 cm (Min: 137,0 cm, Max: 202,0 cm, 95%-KI: 169,8 - 170,4 cm). Die Körpergröße wurde in folgende Klassen untergliedert, um eine gleichmäßige Verteilung zu erhalten (Abb. 32):

Größen-klassen [cm]	Anzahl der Probanden (%)
≤ 159	431 (13,6)
160 - 169	1.066 (33,7)
170 - 179	1.112 (35,1)
≥ 180	556 (17,6)

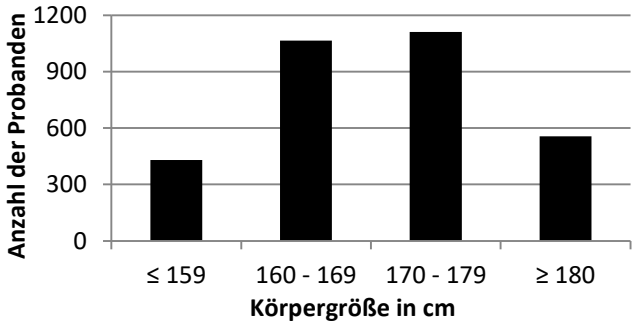


Abb. 32: Größenklassen und deren Verteilung von Population 2

BMI

Der BMI betrug durchschnittlich 27,6 ± 4,4 kg/m² mit einem 95%-KI von 27,5 - 27,8 kg/m² (Abb. 33). Weitere Messwerte waren:
Min: 17,3 kg/m², Max: 48,0 kg/m².

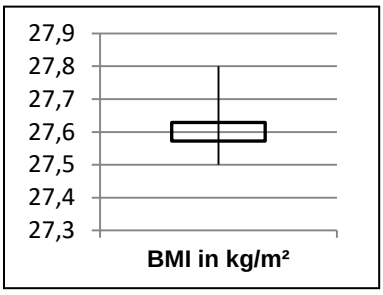


Abb. 33: Boxplot des BMI's mit Grenzen des 95%-KI

Schilddrüsenvolumen

Bei 3.158 (99,8 %) der in dieser Arbeit untersuchten 3.165 Probanden lag das Schilddrüsenvolumen vor. Dieses betrug im Mittel 19,4 ± 8,4 ml mit einem 95%-KI von 19,1 - 19,7 ml (Abb. 34). Folgend weitere Messwerte: Min: 0,3 ml, Max: 94,1 ml.

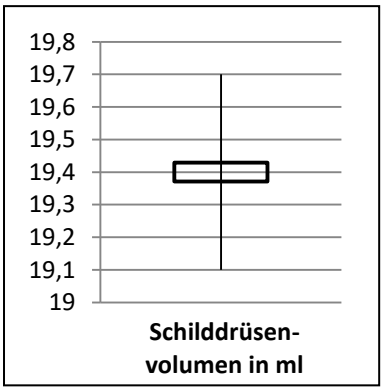


Abb. 34: Boxplot des Schilddrüsenvolumens mit Grenzen des 95%-KI

Angabe einer diagnostizierten Schilddrüsenerkrankung

Von den 3.165 untersuchten Probanden gaben 640 (20,2 %) an, die Diagnose Schilddrüsenerkrankung erhalten zu haben, 2.518 Probanden (79,6 %) verneinten dies. 7 Probanden (0,2 %) machten hierzu keine Angabe (Abb. 35) und wurden in der statistischen Analyse nicht weiter berücksichtigt (Kapitel 2.6.3).

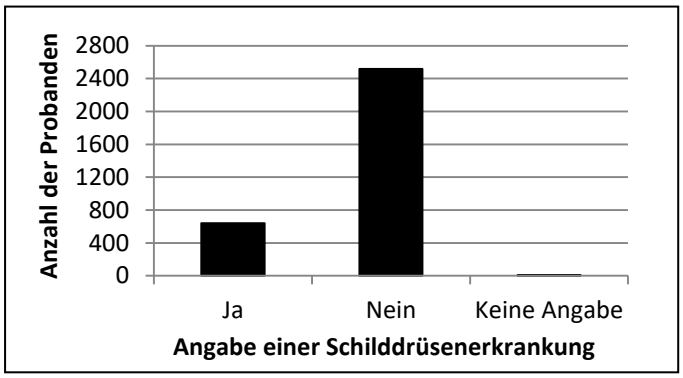


Abb. 35: Verteilung zu den Angaben einer Schilddrüsenerkrankung

Angabe einer durchgemachten Radiojodtherapie

Insgesamt gaben von den 3.165 Probanden 79 Probanden (2,5 %) an, eine Radiojodtherapie durchgemacht zu haben, 561 Probanden (17,7 %) verneinten eine solche Therapie. 2.525 Probanden (79,8 %) machten keine Angabe (Abb. 36). In der statistischen Analyse erfolgte keine weitere Berücksichtung der Probanden ohne Angabe (Kapitel 2.6.3).

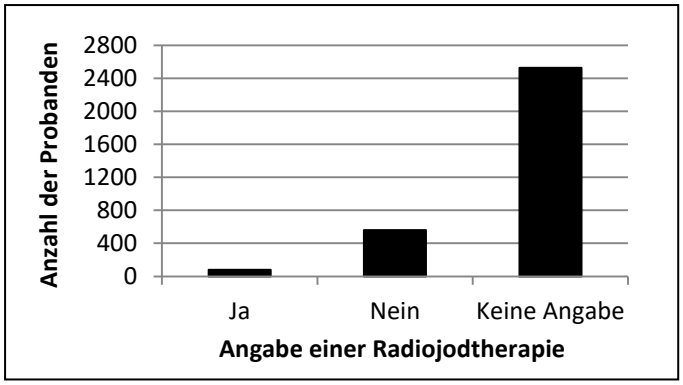


Abb. 36: Verteilung zu den Angaben einer Radiojodtherpie

3.3.1.2 MRT-Auswertung Teil 2

Vorhandene Abbildung der Carina in der MRT

Von den 3.165 ausgewerteten Probanden war bei 167 Probanden (5,3 %) die Carina im MRT-Datensatz abgebildet, bei den übrigen 2.998 Probanden (94,7 %) konnte keine Carina auf den Hals-MRT-Bildern detektiert werden (Abb. 37).

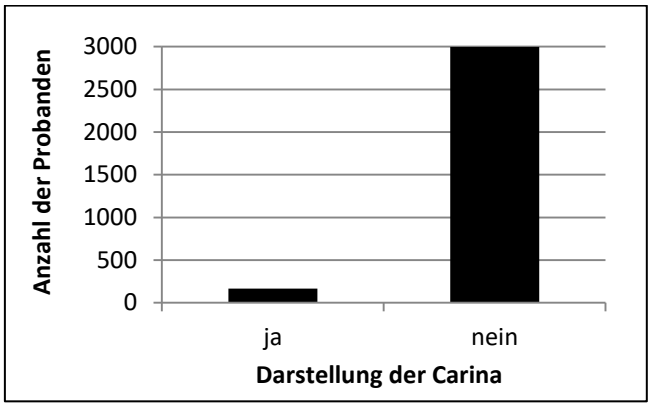


Abb. 37: Verteilung zur Abbildung einer Carina in der MRT

3.3.1.3 Deskription der Parameter zum Ringknorpel

Bei den 3.165 in die Auswertung eingeschlossenen Probanden wurden die im Methodikteil (Kapitel 2.5.2) beschriebenen Parameter des Ringknorpels ausgemessen. Es zeigten sich für die einzelnen Parameter folgende Werte (Tab. 8):

Tab. 8: Deskription der erhobenen Messwerte zu den Parametern des Ringknorpels

Parameter	n	Mw	Std	Min	Max	95%-KI
APmax [mm]	3.165	18,1	2,7	5,1	26,3	18,0 - 18,2
LLmax [mm]	3.165	14,8	2,5	7,8	22,5	14,7 - 14,9
LL4mmVA [mm]	3.165	11,9	1,6	1,6	18,6	11,8 - 12,0
CSA [mm^2]	3.165	212,0	63,2	83,6	412,6	209,8 - 214,2

3.3.2 Statistische Analyse Teil 2

Um weitere Erkenntnisse und Einflussfaktoren auf die Dimensionen des Ringknorpels festzustellen, wurde im Rahmen der explorativen statistischen Analyse (Kapitel 2.6.3) der Zusammenhang zwischen den Messparametern und dem Geschlecht, dem Alter, dem Körpergewicht sowie der Körpergröße analysiert. Weiterhin wurde der Einfluss durch eine diagnostizierte Schilddrüsenerkrankung und eine durchgemachte Radiojodtherapie geprüft, wobei nur Probanden mit einer Angabe (ja oder nein) in der statistischen Analyse berücksichtigt wurden.

3.3.2.1 Einflussfaktoren auf den maximalen anterior-posterioren Durchmesser

Geschlecht

Das Geschlecht zeigte mit $p < 0{,}001$ einen signifikanten Einfluss, wobei Männer im Mittel einen größeren Durchmesser mit 20,4 ± 1,7 mm hatten als Frauen mit 15,9 ± 1,4 mm (Abb. 38, Tab. 9).

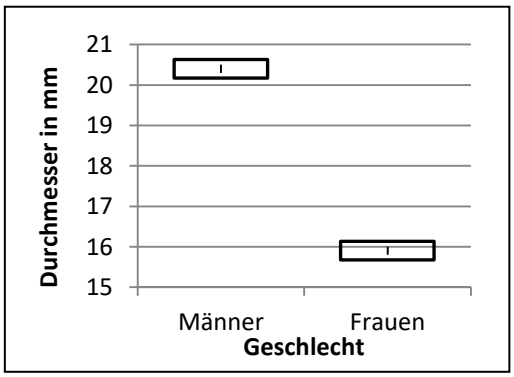


Abb. 38: APmax in Abhängigkeit vom Geschlecht

Tab. 9: APmax in Abhängigkeit vom Geschlecht

Geschlecht	n	Mw [mm]	Std [mm]	Min [mm]	Max [mm]	95%-KI [mm]
Männlich	1.540	20,4	1,7	14,1	26,3	20,3 - 20,5
Weiblich	1.625	15,9	1,4	5,1	20,2	15,8 - 16,0

Alter

Das Alter hatte ebenfalls einen signifikanten Einfluss mit p = 0,007. Der Durchmesser nahm bis zur Altersklasse von 30 - 39 Jahren bis auf 18,4 ± 2,8 mm zu. Ab dieser Altersklasse bis zu einem Alter von 60 - 69 Jahren wurde der Durchmesser kleiner bis auf 17,8 ± 2,8 mm. Bei den Probanden ≥ 70 Jahren stieg APmax nochmals an (Abb. 39, Tab. 10).

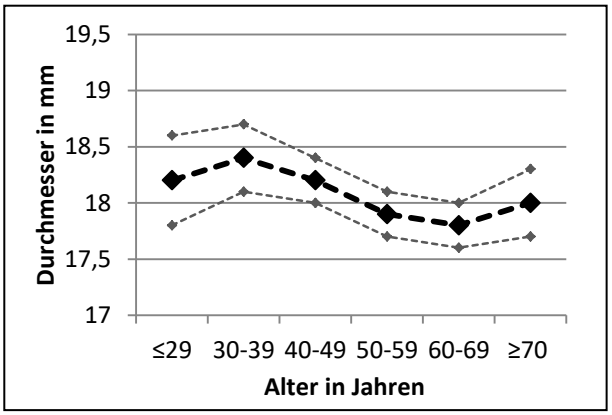


Abb. 39: APmax in Abhängigkeit vom Alter

Tab. 10: APmax in Abhängigkeit vom Alter

Alter [Jahre]	n	Mw [mm]	Std [mm]	Min [mm]	Max [mm]	95%-KI [mm]
≤ 29	161	18,2	2,8	12,6	23,7	17,8 – 18,6
30 - 39	423	18,4	2,8	12,6	25,5	18,1 – 18,7
40 - 49	786	18,2	2,7	12,3	24,9	18,0 – 18,4
50 - 59	749	17,9	2,8	5,1	25,2	17,7 – 18,1
60 - 69	661	17,8	2,8	11,6	26,3	17,6 – 18,0
≥ 70	385	18,0	2,7	12,4	26,3	17,7 – 18,3

Zusätzlich wurde das Alter dichotomisiert, um ggf. einen Cut-Off festzustellen. Bei einer Klasseneinteilung mit Probanden < 50 Jahren und ≥ 50 Jahren zeigte sich, dass Probanden < 50 Jahren mit 18,3 ± 2,7 mm einen signifikant größeren maximalen anterior-posterioren Durchmesser hatten als Probanden ≥ 50 Jahren mit 17,9 ± 2,7 mm und p < 0,001 (Tab. 11).

Tab. 11: APmax in den dichotomisierten Altersgruppen

Alter [Jahre]	n	Mw [mm]	Std [mm]	Min [mm]	Max [mm]	95%-KI [mm]
< 50	1.370	18,3	2,7	12,3	25,5	18,2 – 18,4
≥ 50	1.795	17,9	2,7	5,1	26,3	17,8 – 18,0

Körpergewicht

Das Körpergewicht hatte mit $p < 0{,}001$ einen signifikanten Einfluss auf APmax. Der Parameter stieg mit zunehmendem Gewicht an. Probanden, welche ≤ 69 kg wogen, besaßen mit 16,3 ± 1,8 mm den kleinsten Durchmesser. Am größten war APmax bei Probanden ≥ 110 kg mit 20,5 ± 2,4 mm (Abb. 40, Tab. 12).

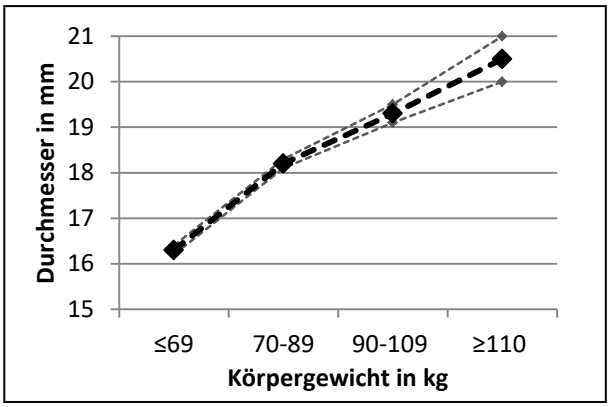


Abb. 40: APmax in Abhängigkeit vom Körpergewicht

Tab. 12: APmax in Abhängigkeit vom Körpergewicht

Körpergewicht [kg]	n	Mw [mm]	Std [mm]	Min [mm]	Max [mm]	95%-KI [mm]
≤ 69	796	16,3	1,8	5,1	23,9	16,2 – 16,4
70 - 89	1.518	18,2	2,7	7,3	26,3	18,1 – 18,3
90 - 109	747	19,3	2,5	12,8	26,3	19,1 – 19,5
≥ 110	104	20,5	2,4	13,4	24,9	20,0 – 21,0

Körpergröße

Der Einfluss der Körpergröße auf APmax war mit $p < 0{,}001$ signifikant. Mit Zunahme der Körpergröße wurde APmax größer. Der kleinste Durchmesser mit 15,6 ± 1,4 mm lag bei einer Größe ≤ 159 cm vor, am größten war APmax mit 20,7 ± 1,9 mm bei Probanden, welche ≥ 180 cm groß waren (Abb. 41, Tab. 13).

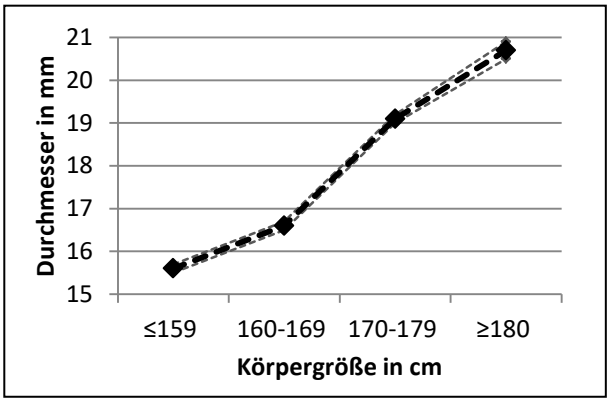


Abb. 41: APmax in Abhängigkeit von der Körpergröße

Tab. 13: APmax in Abhängigkeit von der Körpergröße

Körpergröße [cm]	n	Mw [mm]	Std [mm]	Min [mm]	Max [mm]	95%-KI [mm]
≤ 159	431	15,6	1,4	11,1	21,3	15,5 – 15,7
160 - 169	1.066	16,6	2,0	5,1	23,6	16,5 – 16,7
170 - 179	1.112	19,1	2,4	7,3	26,3	19,0 – 19,2
≥ 180	556	20,7	1,9	14,4	25,5	20,5 – 20,9

Diagnostizierte Schilddrüsenerkrankung

Der Durchmesser war bei Vorliegen einer diagnostizierten Schilddrüsen-erkrankung (DS) signifikant kleiner als bei Probanden, die dies verneinten ($p < 0{,}001$). Probanden mit einer DS hatten im Mittel einen Durchmesser von 16,8 ± 2,2 mm, ohne Diagnose lag der Wert bei 18,4 ± 2,8 mm (Abb. 42, Tab. 14).

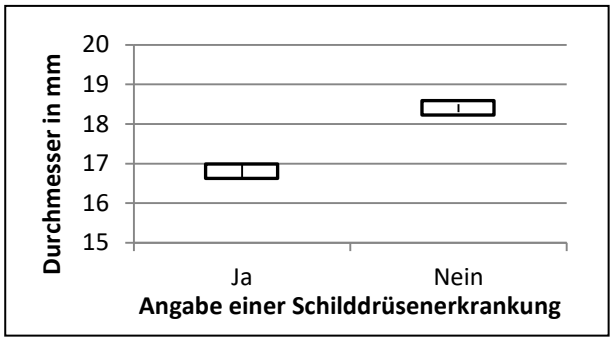


Abb. 42: APmax in Abhängigkeit von einer Schilddrüsenerkrankung

Tab. 14: APmax in Abhängigkeit von einer Schilddrüsenerkrankung

Schilddrüsen-erkrankung	n	Mw [mm]	Std [mm]	Min [mm]	Max [mm]	95%-KI [mm]
Ja	640	16,8	2,2	12,2	24,3	16,6 – 17,0
Nein	2.518	18,4	2,8	5,1	26,3	18,3 – 18,5
Keine Angabe	7	18,4	2,7	14,0	22,0	16,4 – 20,4

Durchgemachte Radiojodtherapie

Eine durchgemachte Radiojod-therapie (RJT) hatte mit $p = 0{,}368$ keinen signifikanten Einfluss auf APmax. Probanden, welche eine RJT hinter sich hatten, besaßen einen Durchmesser von 17,1 ± 2,5 mm. Probanden, die eine solche Therapie verneinten hatten einen mittleren APmax von 16,8 ± 2,2 mm (Abb. 43, Tab. 15).

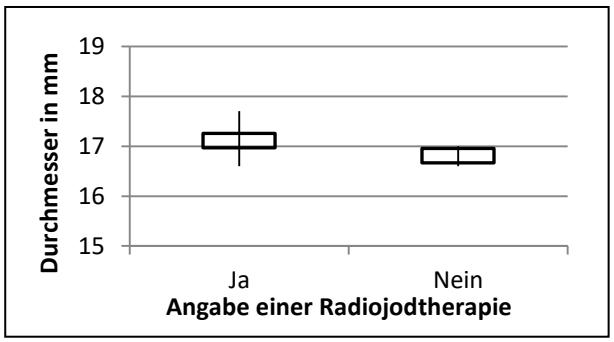


Abb. 43: APmax in Abhängigkeit von einer Radiojodtherapie

Tab. 15: APmax in Abhängigkeit von einer Radiojodtherpie

Radiojod-therapie	n	Mw [mm]	Std [mm]	Min [mm]	Max [mm]	95%-KI [mm]
Ja	79	17,1	2,5	12,9	23,9	16,7 – 17,7
Nein	561	16,8	2,2	12,2	24,3	16,6 – 17,0
Keine Angabe	2.525	18,4	2,8	5,1	26,3	18,3 – 18,5

3.3.2.2 Einflussfaktoren auf den maximalen transversalen Durchmesser

Geschlecht

Der Unterschied zwischen Männern und Frauen war mit p < 0,001 signifikant, wobei Männer mit 16,9 ± 1,7 mm durchschnittlich einen größeren Durchmesser hatten als Frauen mit 12,9 ± 1,4 mm. Folgend ist eine Übersicht der Messwerte in Abhängigkeit vom Geschlecht gezeigt (Abb. 44, Tab. 16).

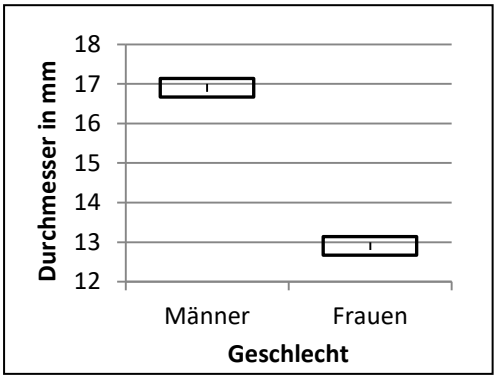


Abb. 44: LLmax in Abhängigkeit vom Geschlecht

Tab. 16: LLmax in Abhängigkeit vom Geschlecht

Geschlecht	n	Mw [mm]	Std [mm]	Min [mm]	Max [mm]	95%-KI [mm]
Männlich	1.540	16,9	1,7	10,8	22,5	16,8 – 17,0
Weiblich	1.625	12,9	1,3	7,8	17,5	12,8 – 13,0

Alter

Das Alter hatte keinen signifikanten Einfluss auf LLmax (p = 0,186). Den geringsten Durchmesser hatten Probanden ≤ 29 Jahren mit 14,5 ± 2,2 mm. Mit zunehmendem Alter stieg LLmax nur leicht an, wobei ≥ 70- Jährige den größten Durchmesser hatten mit 15,0 ± 2,5 mm (Abb. 45, Tab. 17).

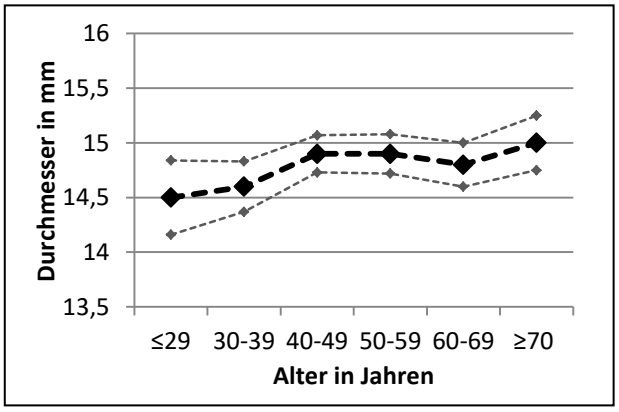


Abb. 45: LLmax in Abhängigkeit vom Alter

Tab. 17: LLmax in Abhängigkeit vom Alter

Alter [Jahre]	n	Mw [mm]	Std [mm]	Min [mm]	Max [mm]	95%-KI [mm]
≤ 29	161	14,5	2,2	9,6	18,8	14,2 – 14,8
30 - 39	423	14,6	2,4	9,2	22,5	14,4 – 14,8
40 - 49	786	14,9	2,5	8,3	21,7	14,7 – 15,1
50 - 59	749	14,9	2,5	9,1	21,7	14,7 – 15,1
60 - 69	661	14,8	2,6	8,6	21,5	14,6 – 15,0
≥ 70	385	15,0	2,5	7,8	21,6	14,8 – 15,3

Körpergewicht

LLmax wurde durch das Körpergewicht signifikant beeinflusst mit p < 0,001. Mit zunehmendem Gewicht wurde der Parameter größer. Am kleinsten war LLmax mit 13,2 ± 1,7 mm bei Probanden, welche ≤ 69 kg wogen, den größten Durchmesser mit 16,5 ± 2,1 mm hatten Probanden ≥ 110 kg (Abb. 46, Tab. 18).

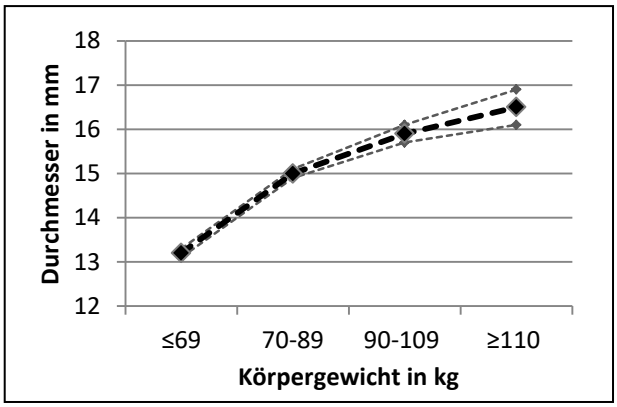


Abb. 46: LLmax in Abhängigkeit vom Körpergewicht

Tab. 18: LLmax in Abhängigkeit vom Körpergewicht

Körpergewicht [kg]	n	Mw [mm]	Std [mm]	Min [mm]	Max [mm]	95%-KI [mm]
≤ 69	796	13,2	1,7	7,8	19,9	13,1 – 13,3
70 - 89	1.518	15,0	2,5	8,6	21,7	14,9 – 15,1
90 - 109	747	15,9	2,3	9,7	22,5	15,7 – 16,1
≥ 110	104	16,5	2,1	9,8	21,2	16,1 – 16,9

Körpergröße

Die Körpergröße beeinflusste diesen Parameter ebenfalls signifikant (p < 0,001). Der Durchmesser stieg mit zunehmender Körpergröße. Den kleinsten LLmax von 12,6 ± 1,4 mm hatten Probanden mit einer Größe ≤ 159 cm. Bei Probanden ≥ 180 cm war der mittlere LLmax am größten mit 17,1 ± 1,8 mm (Abb. 47, Tab. 19).

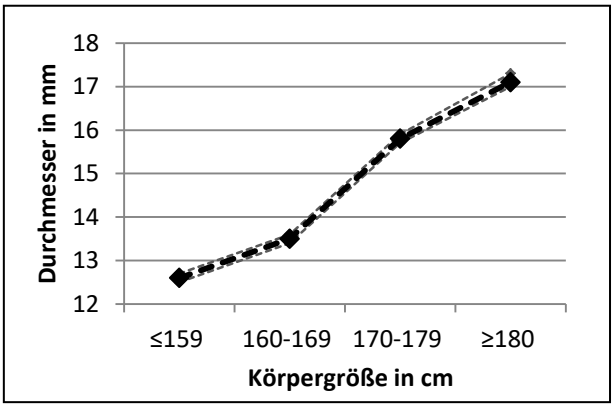


Abb. 47: LLmax in Abhängigkeit von der Körpergröße

Tab. 19: LLmax in Abhängigkeit von der Körpergröße

Körpergröße [cm]	n	Mw [mm]	Std [mm]	Min [mm]	Max [mm]	95%-KI [mm]
≤ 159	431	12,6	1,4	7,8	17,6	12,5 – 12,7
160 - 169	1.066	13,5	1,9	8,6	20,7	13,4 – 13,6
170 - 179	1.112	15,8	2,3	9,8	21,7	15,7 – 15,9
≥ 180	556	17,1	1,8	10,1	22,5	17,0 – 17,3

Diagnostizierte Schilddrüsenerkrankung

Eine DS hatte einen signifikanten Einfluss auf LLmax mit $p < 0{,}001$. Probanden, welche eine positive Diagnose angaben, hatten kleinere Durchmesser mit einem Mittelwert von 13,7 ± 2,2 mm als Probanden, welche dies verneinten mit 15,1 ± 2,5 mm (Abb. 48, Tab. 20).

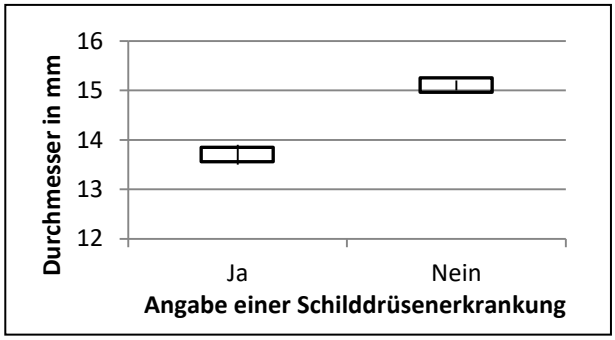


Abb. 48: LLmax in Abhängigkeit von einer Schilddrüsenerkrankung

Tab. 20: LLmax in Abhängigkeit von einer Schilddrüseerkrankung

Schilddrüsen-erkrankung	n	Mw [mm]	Std [mm]	Min [mm]	Max [mm]	95%-KI [mm]
Ja	640	13,7	2,2	8,6	20,9	13,5 – 13,9
Nein	2.518	15,1	2,5	7,8	22,5	15,0 – 15,2
Keine Angabe	7	15,4	2,6	11,6	18,5	13,5 – 17,3

Durchgemachte Radiojodtherapie

Bei einer durchgemachten Radiojod-therapie zeigte sich kein signifikanter Einfluss mit $p = 0{,}622$. Probanden, welche eine RJT durchgemacht haben, hatten im Mittel einen Durchmesser von 13,8 ± 2,3 mm. Ohne RJT lag LLmax bei 13,7 ± 2,2 mm (Abb. 49, Tab. 21).

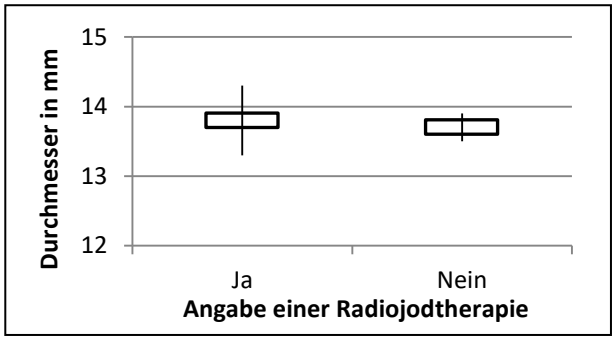


Abb. 49: LLmax in Abhängigkeit von einer Radiojodtherapie

Tab. 21: LLmax in Abhängigkeit von einer Radiojodtherapie

Radiojod-therapie	n	Mw [mm]	Std [mm]	Min [mm]	Max [mm]	95%-KI [mm]
Ja	79	13,8	2,3	9,8	19,0	13,3 – 14,3
Nein	561	13,7	2,2	8,6	20,9	13,5 – 13,9
Keine Angabe	2.525	15,1	2,5	7,8	22,5	15,0 – 15,2

3.3.2.3 Einflussfaktoren auf den transversalen Durchmesser 4 mm von anterior

Geschlecht

Zwischen den Geschlechtern war ein signifikanter Unterschied mit $p < 0{,}001$ feststellbar. Der mittlere Durchmesser der Männer war größer mit 12,9 ± 1,5 mm als der Durchmesser der Frauen mit 11,1 ± 1,2 mm (Abb. 50, Tab. 22).

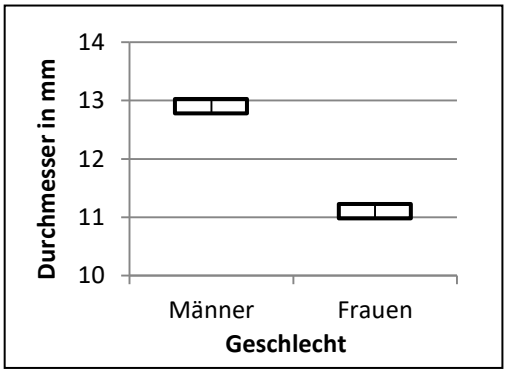


Abb. 50: LL4mmVA in Abhängigkeit vom Geschlecht

Tab. 22: LL4mmVA in Abhängigkeit vom Geschlecht

Geschlecht	n	Mw [mm]	Std [mm]	Min [mm]	Max [mm]	95%-KI [mm]
Männlich	1.540	12,9	1,5	1,6	18,6	12,8 – 13,0
Weiblich	1.625	11,1	1,2	7,2	16,0	11,0 – 11,2

Alter

Das Alter hatte keinen signifikanten Einfluss ($p = 0{,}256$) und nur geringe Schwankungen zwischen den Altersklassen. Während LL4mmVA bei Probanden von 30 - 39 und 60 - 69 Jahren je am kleinsten war mit 11,8 mm, war LL4mmVA bei ≤ 29-, 50 - 59- und ≥ 70- Jährigen am größten mit 12,0 mm. Die Std lag dabei zwischen ± 1,5 und ± 1,7 mm (Abb. 51, Tab. 23).

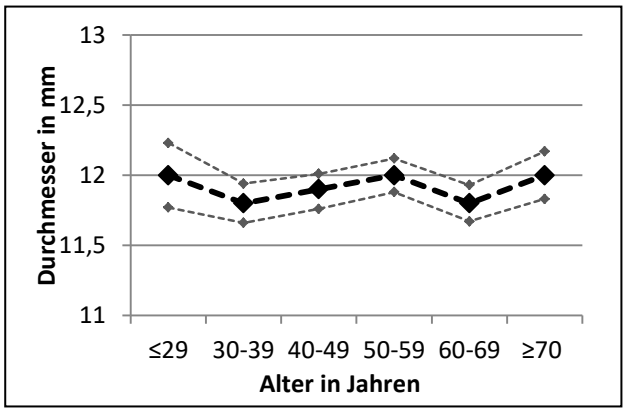


Abb. 51: LL4mmVA in Abhängigkeit vom Alter

Tab. 23: LL4mmVA in Abhängigkeit vom Alter

Alter [Jahre]	n	Mw [mm]	Std [mm]	Min [mm]	Max [mm]	95%-KI [mm]
≤ 29	161	12,0	1,5	8,8	15,1	11,8 – 12,2
30 - 39	423	11,8	1,5	8,0	16,4	11,7 – 11,9
40 - 49	786	11,9	1,6	7,6	17,1	11,8 – 12,0
50 - 59	749	12,0	1,7	7,2	18,0	11,9 – 12,1
60 - 69	661	11,8	1,7	1,6	18,6	11,7 – 11,9
≥ 70	385	12,0	1,7	7,3	17,6	11,8 – 12,2

Körpergewicht

Das Körpergewicht hatte einen signifikanten Einfluss auf LL4mmVA ($p < 0{,}001$), wobei der Parameter mit Zunahme des Gewichts größer wurde. Bei Probanden ≤ 69 kg war LL4mmVA am kleinsten mit 11,3 ± 1,3 mm, während der Durchmesser bei Probanden ≥ 110 kg am größten war mit 12,6 ± 1,7 mm (Abb. 52, Tab. 24).

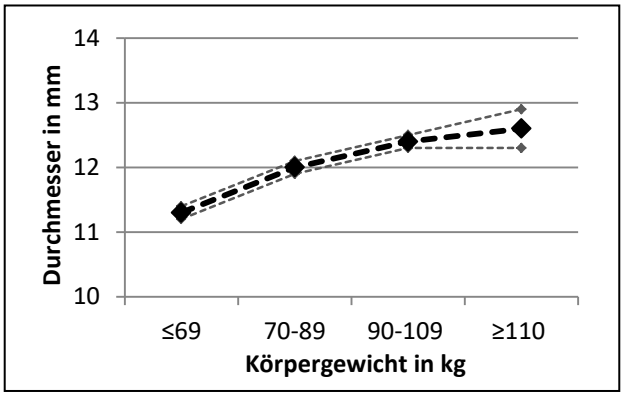


Abb. 52: LL4mmVA in Abhängigkeit vom Körpergewicht

Tab. 24: LL4mmVA in Abhängigkeit vom Körpergewicht

Körpergewicht [kg]	n	Mw [mm]	Std [mm]	Min [mm]	Max [mm]	95%-KI [mm]
≤ 69	796	11,3	1,3	7,2	15,6	11,2 – 11,4
70 - 89	1.518	12,0	1,7	1,6	18,6	11,9 – 12,1
90 - 109	747	12,4	1,6	7,9	17,0	12,3 – 12,5
≥ 110	104	12,6	1,7	8,5	15,7	12,3 – 12,9

Körpergröße

Die Körpergröße beeinflusste diesen Parameter mit $p < 0{,}001$ ebenfalls signifikant. Bei Größenzunahme stieg der durchschnittliche Wert von LL4mmVA. Bei Probanden, welche ≤ 159 cm groß waren, war der kleinste Durchmesser mit 10,9 ± 1,3 mm feststellbar, während LL4mmVA bei Probanden ≥ 180 cm den im Mittel größten Wert erreichte mit 13,0 ± 1,5 mm (Abb. 53, Tab. 25).

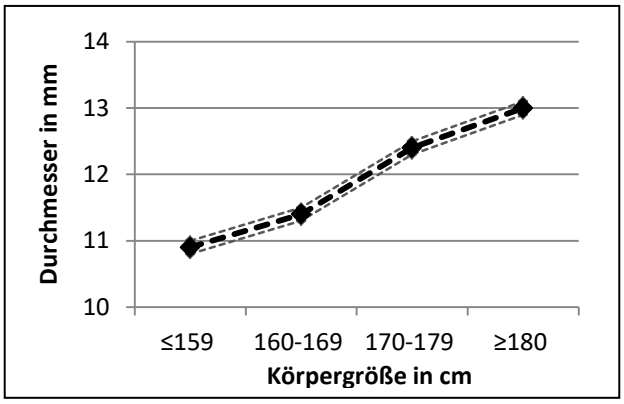


Abb. 53: LL4mmVA in Abhängigkeit von der Körpergröße

Tab. 25: LL4mmVA in Abhängigkeit von der Körpergröße

Körpergröße [cm]	n	Mw [mm]	Std [mm]	Min [mm]	Max [mm]	95%-KI [mm]
≤ 159	431	10,9	1,3	7,2	14,6	10,8 – 11,0
160 - 169	1.066	11,4	1,4	7,2	16,5	11,3 – 11,5
170 - 179	1.112	12,4	1,6	1,6	17,6	12,3 – 12,5
≥ 180	556	13,0	1,5	8,8	18,6	12,9 – 13,1

Diagnostizierte Schilddrüsenerkrankung

Es wurde ein signifikanter Einfluss einer DS auf LL4mmVA festgestellt mit p < 0,001. Der Durchmesser war bei Angabe einer positiven Diagnose kleiner mit 11,4 ± 1,6 mm, als wenn eine diagnostizierte Schilddrüsenerkrankung verneint wurde mit 12,1 ± 1,6 mm (Abb. 54, Tab. 26).

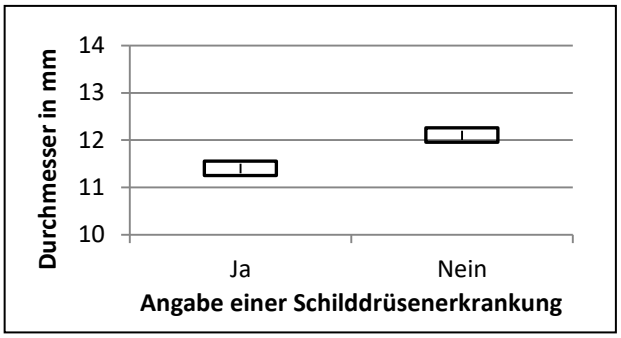


Abb. 54: LL4mmVA in Abhängigkeit von einer Schilddrüsenerkrankung

Tab. 26: LL4mmVA in Abhängigkeit von einer Schilddrüsenerkrankung

Schilddrüsen-erkrankung	n	Mw [mm]	Std [mm]	Min [mm]	Max [mm]	95%-KI [mm]
Ja	640	11,4	1,6	1,6	16,9	11,3 – 11,5
Nein	2.518	12,1	1,6	7,2	18,6	12,0 – 12,2
Keine Angabe	7	12,3	1,4	10,7	14,8	11,3 – 13,3

Durchgemachte Radiojodtherapie

Durch eine Radiojodtherapie zeigte sich kein auffälliger Einfluss auf diesen Parameter (p = 0,186). Wurde eine Radiojodtherapie durchgeführt, lag der Durchmesser bei 11,5 ± 2,0 mm, wurde eine solche Therapie verneint, betrug LL4mmVA 11,4 ± 1,5 mm (Abb. 55, Tab. 27).

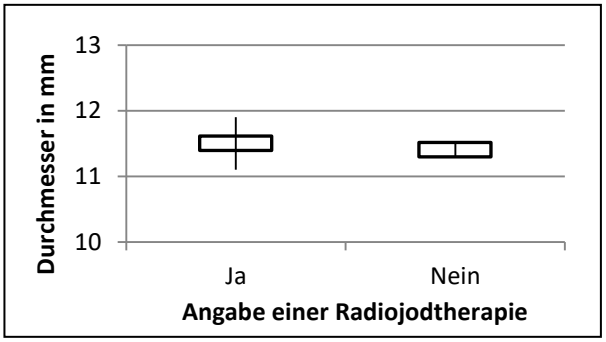


Abb. 55: LL4mmVA in Abhängigkeit von einer Radiojodtherapie

Tab. 27: LL4mmVA in Abhängigkeit von einer Radiojodtherapie

Radiojod-therapie	n	Mw [mm]	Std [mm]	Min [mm]	Max [mm]	95%-KI [mm]
Ja	79	11,5	2,0	1,6	15,9	11,1 – 11,9
Nein	561	11,4	1,5	7,7	16,9	11,3 – 11,5
Keine Angabe	2.525	12,1	1,6	7,2	18,6	12,0 – 12,2

3.3.2.4 Einflussfaktoren auf die Querschnittsfläche

Geschlecht

Beim Geschlecht lag ein signifikanter Unterschied mit p < 0,001 vor. Der Mittelwert war bei Männern im Schnitt größer mit 267,7 ± 39,4 mm² als bei Frauen mit 159,1 ± 24,0 mm². Folgend ist die Querschnittsfläche des Ringknorpels in Abhängigkeit vom Geschlecht gezeigt (Abb. 56, Tab. 28).

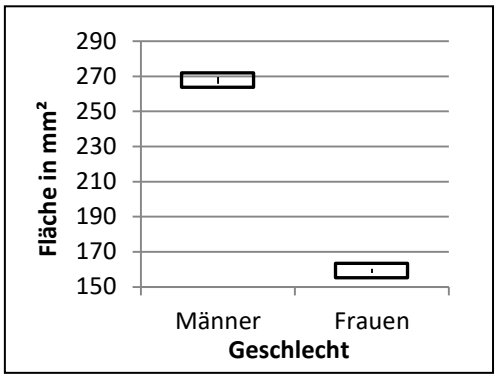


Abb. 56: CSA in Abhängigkeit vom Geschlecht

Tab. 28: CSA in Abhängigkeit vom Geschlecht

Geschlecht	n	Mw [mm²]	Std [mm²]	Min [mm²]	Max [mm²]	95%-KI [mm²]
Männlich	1.540	267,7	39,4	154,4	412,6	265,7 – 269,7
Weiblich	1.625	159,1	24,0	83,6	253,3	157,9 – 160,3

Alter

Das Alter hatte keinen signifikanten Einfluss auf CSA (p = 0,265). Es lagen nur geringe Schwankungen zwischen den Altersklassen vor. Bis 40 - 49 Jahren stieg CSA an bis auf 215,1 ± 63,6 mm². In den folgenden Altersklassen nahm CSA ab und war bei 60 - 69- Jährigen am kleinsten mit 207,8 ± 65,0 mm². Bei ≥ 70- Jährigen nahm CSA nochmals zu auf 213,6 ± 61,5 mm² (Abb. 57, Tab. 29).

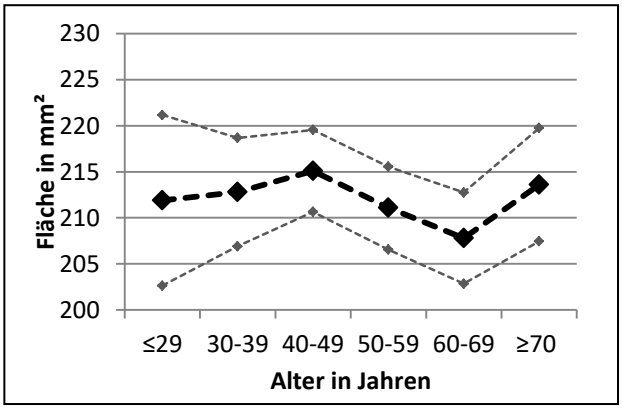


Abb. 57: CSA in Abhängigkeit vom Alter

Tab. 29: CSA in Abhängigkeit vom Alter

Alter [Jahre]	n	Mw [mm²]	Std [mm²]	Min [mm²]	Max [mm²]	95%-KI [mm²]
≤ 29	161	211,9	60,0	105,6	342,4	221,2 – 202,6
30 - 39	423	212,8	61,7	108,6	377,2	206,9 – 218,7
40 - 49	786	215,1	63,6	84,2	412,6	210,7 – 219,6
50 - 59	749	211,1	63,6	83,6	377,2	206,6 – 215,7
60 - 69	661	207,8	65,0	97,0	403,4	202,9 – 212,8
≥ 70	385	213,6	61,5	94,0	364,4	207,5 – 219,8

Körpergewicht

Es zeigte sich ein signifikanter Einfluss durch das Körpergewicht auf CSA mit $p < 0{,}001$. Mit zunehmendem Gewicht wurde dieser Parameter größer. Die durchschnittlich kleinste Fläche mit 169,5 ± 38,7 mm² lag bei Probanden mit einem Gewicht ≤ 69 kg vor. Bei Probanden, welche ≥ 110 kg wogen, war die Fläche am größten mit im Mittel 260,5 ± 55,3 mm² (Abb. 58, Tab. 30).

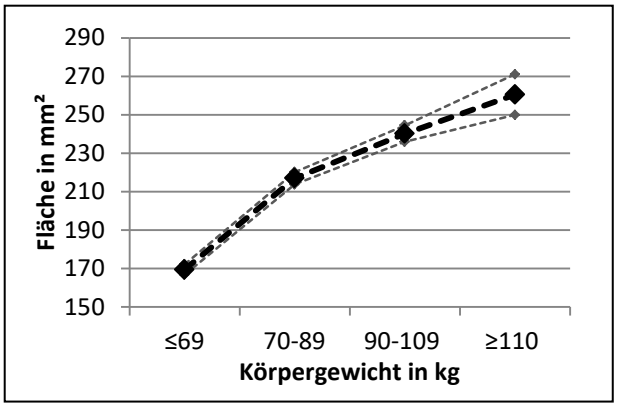


Abb. 58: CSA in Abhängigkeit vom Körpergewicht

Tab. 30: CSA in Abhängigkeit vom Körpergewicht

Körpergewicht [kg]	n	Mw [mm²]	Std [mm²]	Min [mm²]	Max [mm²]	95%-KI [mm²]
≤ 69	796	169,5	38,7	84,2	324,1	166,8 – 172,2
70 - 89	1.518	217,0	63,6	83,6	391,2	213,8 – 220,2
90 - 109	747	240,2	60,1	101,3	412,6	235,9 – 244,5
≥ 110	104	260,5	55,3	114,1	380,9	249,9 – 271,1

Körpergröße

Es lag mit $p < 0{,}001$ ein signifikanter Einfluss der Körpergröße vor. Stieg diese an, so nahm auch CSA zu. Die kleinste Fläche mit 153,2 ± 25,4 mm² war bei Probanden, welche ≤ 159 cm groß waren, vorliegend und hatte bei Probanden mit einer Größe ≥ 180 cm den im Mittel größten Wert mit 275,9 ± 43,2 mm² (Abb. 59, Tab. 31).

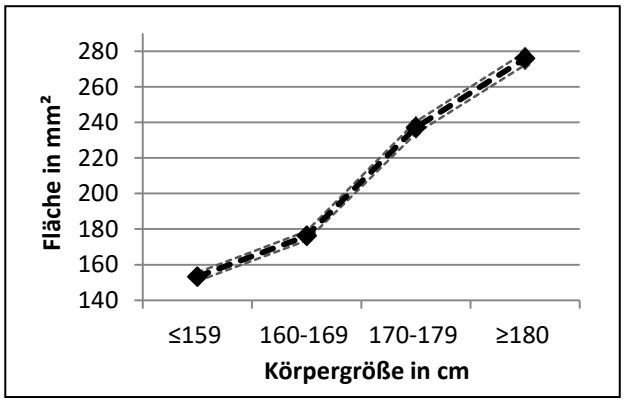


Abb. 59: CSA in Abhängigkeit von der Körpergröße

Tab. 31: CSA in Abhängigkeit von der Körpergröße

Körpergröße [cm]	n	Mw [mm²]	Std [mm²]	Min [mm²]	Max [mm²]	95%-KI [mm²]
≤ 159cm	431	153,2	25,4	83,6	264,3	150,8 – 155,6
160 - 169cm	1.066	176,2	43,5	96,4	362,5	173,6 – 178,8
170 - 179cm	1.112	237,1	56,1	114,1	391,2	233,8 – 240,4
≥ 180cm	556	275,9	43,2	131,2	412,6	272,3 – 279,5

Diagnostizierte Schilddrüsenerkrankung

Bei Vorliegen einer DS war die Querschnittsfläche signifikant beeinflusst mit $p < 0{,}001$. Dabei war CSA bei einer positiven Schilddrüsendiagnose auffällig kleiner mit 180,6 ± 50,8 mm² als bei Probanden ohne Diagnose mit einer Fläche von 219,9 ± 63,3 mm² (Abb. 60, Tab. 32).

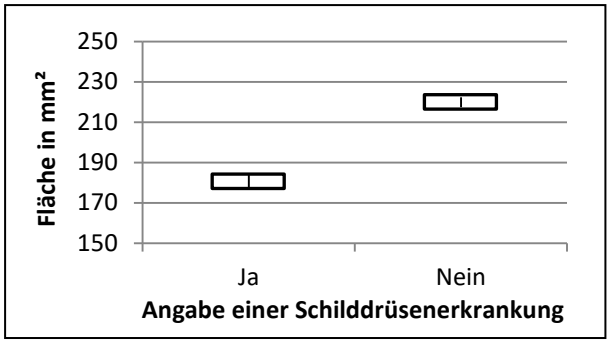


Abb. 60: CSA in Abhängigkeit von einer Schilddrüsenerkrankung

Tab. 32: CSA in Abhängigkeit von einer Schilddrüsenerkrankung

Schilddrüsen-erkrankung	n	Mw [mm²]	Std [mm²]	Min [mm²]	Max [mm²]	95%-KI [mm²]
Ja	640	180,6	50,8	94,0	373,5	176,7 – 184,5
Nein	2.518	219,9	63,6	83,6	412,6	217,4 – 222,4
Keine Angabe	7	218,1	54,7	125,7	271,1	177,6 – 258,6

Durchgemachte Radiojodtherapie

Es war mit $p = 0{,}527$ kein signifikanter Einfluss einer durchgemachten RJT auf CSA festzustellen. CSA lag bei Probanden, welche eine solche Therapie durchgemacht haben im Mittel bei 186,0 ± 55,0 mm². Probanden ohne eine solche Therapie hatten durchschnittlich eine Fläche von 179,8 ± 50,2 mm² (Abb. 61, Tab. 33).

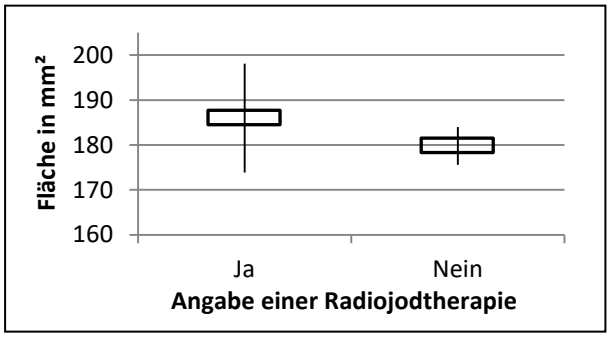


Abb. 61: CSA in Abhängigkeit von einer Radiojodtherapie

Tab. 33: CSA in Abhängigkeit von einer Radiojodtherapie

Radiojod-therapie	n	Mw [mm²]	Std [mm²]	Min [mm²]	Max [mm²]	95%-KI [mm²]
Ja	79	186,0	55,0	117,8	329,6	173,9 – 198,1
Nein	561	179,8	50,2	94,0	373,5	175,6 – 184,0
Keine Angabe	2.525	219,9	63,6	83,6	412,6	217,4 – 222,4

3.3.2.5 Korrelationen

Alter, Körpergewicht, Körpergröße, BMI und Schilddrüsenvolumen

Zur Prüfung der Bedeutsamkeit einzelner demographischer Faktoren wie Alter, Körpergewicht, Körpergröße, BMI und Schilddrüsenvolumen wurde mittels Spearman's Korrelationskoeffizient deren Einfluss auf die Dimensionen des Ringknorpels analysiert. Die Ergebnisse sind in Tab. 34 angegeben.

Die Körpergröße zeigte mit einer mittleren Korrelation den stärksten linearen Zusammenhang zu den untersuchten Parametern. Darunter lag die höchste Korrelation zwischen CSA und der Körpergröße vor mit $r_{Spearman}$ = 0,697. Das Körpergewicht und das Schilddrüsenvolumen korrelierten nur gering mit den Parametern, wobei darunter die höchste Korrelation zwischen dem Körpergewicht und APmax mit $r_{Spearman}$ = 0,457 gezeigt werden konnte. Kein linearer Zusammenhang wurde hingegen zwischen dem BMI sowie dem Alter und den erhobenen Parametern des Ringknorpels festgestellt.

Tab. 34: Korrelationen zwischen den Parametern und den demographischen Angaben

Korrelation $r_{Spearman}$	Alter	Körpergewicht	Körpergröße	BMI	Schilddrüsen-volumen
APmax	-0,059	0,457	0,684	0,096	0,400
LLmax	0,035	0,436	0,650	0,089	0,362
LL4mmVA	0,018	0,277	0,478	0,012	0,246
CSA	-0,024	0,443	0,697	0,068	0,390

3.3.2.6 Multivariate Regressionsanalyse

Zur Analyse des gleichzeitigen Einflusses von Geschlecht, Alter, Körpergewicht und Körpergröße auf die Dimensionen des Ringknorpels, wurde eine multivariate Regressionsanalyse durchgeführt und die jeweiligen Einflüsse der unabhängigen Variablen durch Prüfung der p-Werte sowie Schätzer-Werte und deren 95 % - Konfidenzintervalle untersucht.

Einflussfaktoren auf APmax

Das Geschlecht und die Körpergröße hatten je einen signifikanten Einfluss auf APmax ($p < 0{,}001$). Dabei zeigten diese beiden Faktoren auch den größten Einfluss auf diesen Parameter mit den höchsten Schätzer-Werten (Tab. 35)

Tab. 35: Regressionsanalyse zu Einflussfaktoren auf APmax

Abhängige Variable	Unabhängige Variable	Schätzer	95%-KI	p-Wert
APmax	Geschlecht (männlich)	-3,851	-4,004 – -3,699	< 0,001
	Alter	-0,002	-0,006 – 0,002	0,388
	Körpergewicht	0,0	-0,005 – 0,004	0,883
	Körpergröße	0,053	0,044 – 0,063	< 0,001

Regressionsgleichung:

$$APmax = -3{,}851 * \text{Geschlecht} - 0{,}002 * \text{Alter} + 0{,}053 * \text{Körpergröße} + 14{,}927$$

Einflussfaktoren auf LLmax

Einen signifikanten Einfluss auf diesen Parameter hatten alle unabhängigen Variablen, wobei das Geschlecht und die Körpergröße den größten Schätzer zeigten (Tab.36).

Tab. 36: Regressionsanalyse zu Einflussfaktoren auf LLmax

Abhängige Variable	Unabhängige Variable	Schätzer	95%-KI	p-Wert
LLmax	Geschlecht (männlich)	-3,339	-3,490 – -3,188	< 0,001
	Alter	0,019	0,014 – 0,023	< 0,001
	Körpergewicht	-0,007	-0,011 – -0,003	0,001
	Körpergröße	0,060	0,050 – 0,069	< 0,001

Regressionsgleichung:

$$LLmax = -3{,}339 * \text{Geschlecht} + 0{,}019 * \text{Alter} + 0{,}060 * \text{Körpergröße} - 0{,}007 * \text{Körpergewicht} + 9{,}306$$

Einflussfaktoren auf LL4mmVA

Alle unabhängigen Variablen hatten einen signifikanten Einfluss auf die Dimension von LL4mmVA (p < 0,001). Das Geschlecht und die Körpergröße zeigten dabei den stärksten Effekt (Tab. 37).

Tab. 37: Regressionsanalyse zu Einflussfaktoren auf LL4mmVA

Abhängige Variable	Unabhängige Variable	Schätzer	95%-KI	p-Wert
LL4mmVA	Geschlecht (männlich)	-1,451	-1,586 – -1,315	< 0,001
	Alter	0,010	0,007 – 0,014	< 0,001
	Körpergewicht	-0,010	-0,013 – -0,006	< 0,001
	Körpergröße	0,039	0,031 – 0,047	< 0,001

Regressionsgleichung:

$$LL4mmVA = -1{,}451 * \text{Geschlecht} + 0{,}010 * \text{Alter} + 0{,}039 * \text{Körpergröße} - 0{,}010 * \text{Körpergewicht} + 7{,}765$$

Einflussfaktoren auf CSA

Alle unabhängigen Variablen hatten einen signifikanten Einfluss auf die Querschnittsfläche (p < 0,001), wobei vor allem das Geschlecht und die Körpergröße einen relevanten Einfluss auf CSA zeigten (Tab. 38).

Tab. 38: Regressionsanalyse zu Einflussfaktoren auf CSA

Abhängige Variable	Unabhängige Variable	Schätzer	95%-KI	p-Wert
CSA	Geschlecht (männlich)	-92,525	-95,709 – -89,340	< 0,001
	Alter	0,201	0,112 – 0,289	< 0,001
	Körpergewicht	-0,213	-0,303 – -0,123	< 0,001
	Körpergröße	1,495	1,302 – 1,688	< 0,001

Regressionsgleichung:

$$CSA = -92{,}525 * \text{Geschlecht} + 0{,}201 * \text{Alter} + 1{,}495 * \text{Körpergröße} - 0{,}213 * \text{Körpergewicht} + 104{,}248$$

3.4 Prävalenzen

Um neue Erkenntnisse über die Prävalenz von Pathologien zu erlangen, wurden nach Ausschluss der nicht auswertbaren MRT-Bilder (n = 22 Probanden aufgrund schlechter Bildqualität, n = 1 Schrägaufnahme, n = 1 leere Datei) 3.202 Probanden auf das Vorliegen einer Trachealstenose oder einer Trachealaffektion durch die Schilddrüse überprüft (Kapitel 2.6.4). Man orientierte sich an der Klassifikation von Cotton/Myer von 1994 [21], bei welcher eine Trachealstenose als mindestens Grad-II-Stenose vorliegt, wenn das Lumen der Trachea um mehr als 50 % reduziert ist (Kapitel 1.3.1). So wurden in dieser Arbeit jene MRT-Bilder der Probanden als Trachealstenose klassifiziert, bei welchen das Tracheallumen im Verlauf um mehr als 50 % abnahm. Bei Vorliegen einer Trachealaffektion durch die Schilddrüse sollte die Trachea aufgrund einer veränderten Schilddrüse eine Sichelform annehmen oder aus der thorakalen Mittellinie verdrängt sein.

Von den 3.202 analysierten Probanden hatten n = 3.165 Probanden (98,8 %) keine der aufgeführten Pathologien. Bei n = 13 Probanden (0,4 %) war eine Trachealstenose feststellbar. N = 24 Probanden (0,7 %) zeigten eine Trachealaffektion durch die Schilddrüse (Abb. 62).

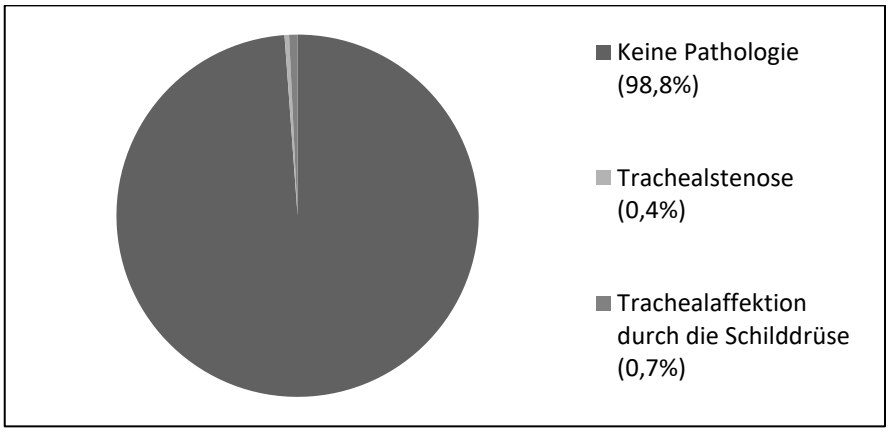


Abb. 62: Prävalenzen der Trachealstenose und Trachealaffektion durch die Schilddrüse

In der folgenden Graphik sind bildmorphologische Trachealstenosen dargestellt. Die Trachea ist jeweils sehr komprimiert abgebildet und weist ein geringes Lumen auf (Abb. 63, weiße Markierungen).

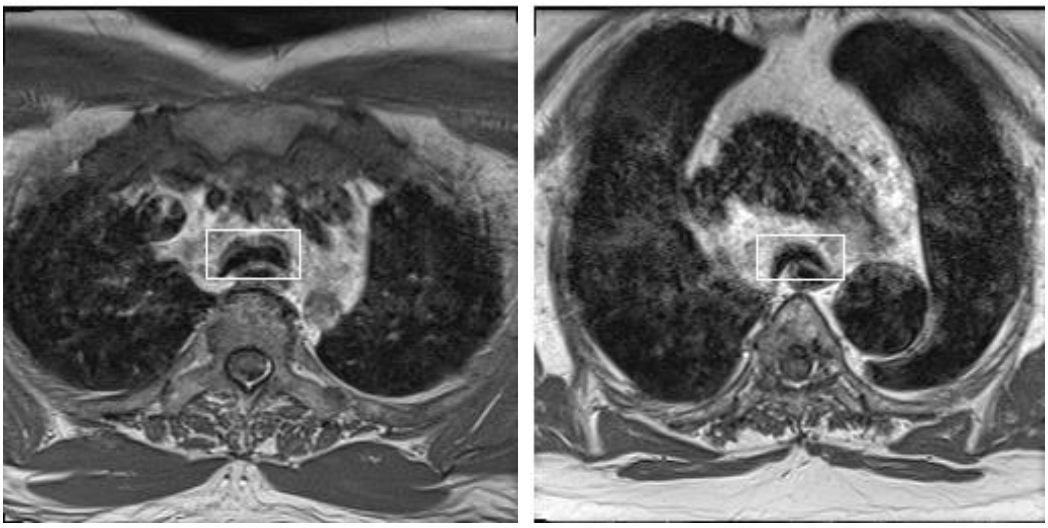


Abb. 63: Bildmorphologische Darstellung von Trachealstenosen

In den nachstehenden Bildern ist eine Trachealaffektion dargestellt, welche durch eine Raumforderung der Schilddrüse verursacht wurde. Dabei ist erkennbar, dass die Trachea (Abb. 64, weiße Markierungen) jeweils nach links verschoben ist und außerhalb der thorakalen Mittellinie liegt (Abb. 64, gelbe Linien). Das linke Bild zeigt eine ausgeprägte Vergrößerung des rechten Schilddrüsenlappens. Im rechten Bild ist in der Mitte der Schilddrüse ein hyperintenser Knoten erkennbar.

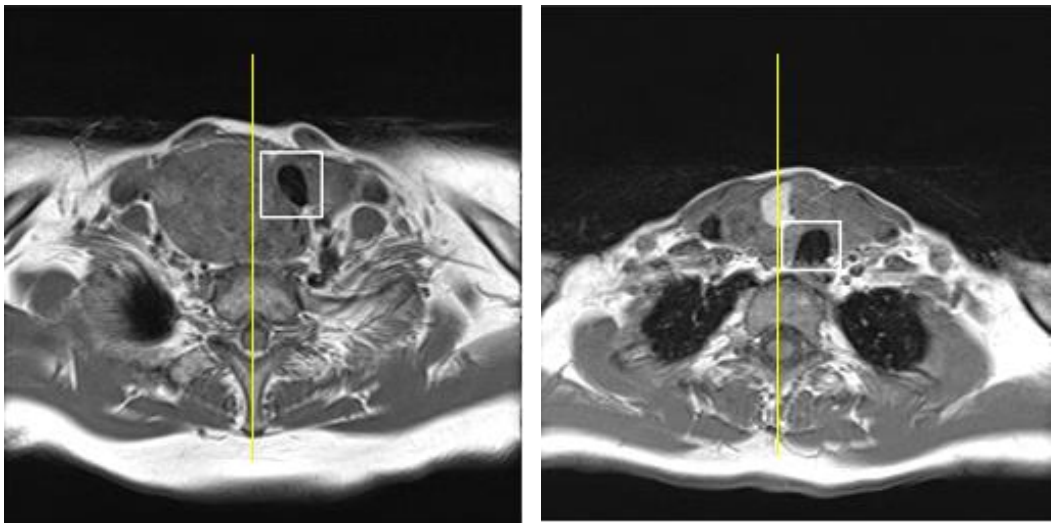


Abb. 64: Bildmorphologische Darstellung von Trachealaffektionen durch die Schilddrüse

4 Diskussion

4.1 Methodik

In der vorliegenden Arbeit wurden die Dimensionen der Trachea und des LTÜGs an MRT-Bildern innerhalb einer epidemiologisch repräsentativen Kohorte untersucht.

4.1.1 Population

In dieser Datenerhebung wurden Probanden mit einer Trachealstenose und einer Trachealaffektion durch die Schilddrüse ausgeschlossen. Fraglich operierte oder früher einmal intubierte Probanden wurden dabei mit ausgemessen, was zur Messung von kleineren Parametern geführt haben kann, jedoch die Übertragbarkeit auf eine durchschnittliche norddeutsche Bevölkerung sehr wahrheitsgetreu wiedergibt.

4.1.2 MRT

Die MRT wird als Goldstandard zur Beurteilung des Kehlkopfes betrachtet [95], ist jedoch eine zeitaufwendige Diagnostik. Die durchschnittliche Untersuchungszeit lag bei 2:02 min. Da die Hals-MRT-Bilder laut Protokoll ohne spezielle Atemtechnik aufgenommen wurden [103], kann es zu einer Atemverschieblichkeit mit Projektion von unscharfen Bildern gekommen sein. Dies machte die Ausmessungen aufgrund schlechterer Bildqualität teils schwierig. Mit der MRT konnte jedoch Schleim und die Mukosa gut abgebildet werden. Vor allem da die Mukosa durch Verletzungen und Kompression zu Schwellung und Ödem neigt [37,38], ist es relevant das definitive Innenlumen der Trachea und des LTÜGs zu bestimmen und eine klare Grenze des luftleitenden Lumens zur Mukosa festzustellen, weshalb sich die MRT sehr gut für die Fragestellung dieser Arbeit eignete.

Zusätzlich wurde versucht den Ringknorpel möglichst mittig auszumessen. Bei einer Darstellung des Ringknorpels über mehrere Ebenen wurde der kranialere bzw. der mittlere Slice ausgemessen. Durch die vorliegende Schichtdicke von 4

mm konnte jedoch nicht bei allen Probanden exakt die gleiche Messebene gewählt werden, weshalb Variationen in den Messergebnissen möglich sind.

Insgesamt zeigte sich, dass nur bei 5,3 % der Datensätze (167/ 3.165 Probanden) die komplette Trachea samt Carina abgebildet war. Nach der Literaturrecherche ergibt sich eine durchschnittliche Länge der Trachea, gemessen von der Glottis bis zur Carina, von 13,1 - 13,4 cm für Männer und 11,2 - 12,0 cm für Frauen [108,109]. In dieser Arbeit war die längste Trachea inkl. LTÜG mit 26 Slices, entsprechend 10,4 cm, abgebildet, welches wesentlich unter dem Durchschnitt lag und daher eine Selektion kurzer Tracheae zu vermuten ist. Vorteilhaft für einen weiteren Erkenntnisgewinn wäre sicherlich künftig Bildaufnahmen im MRT weiter nach kaudal zu schichten, um die gesamte Trachea abbilden zu können. Vor allem aber jene 167 Probanden, bei welchen eine Carina abgebildet war, könnten zur genaueren Beurteilung der gesamten Trachea weiter untersucht werden.

4.1.3 Reliabilität der Messparameter

Zur Qualitätssicherung wurde die Intra-Reader Variabilität der einzelnen Parameter erhoben. Dabei erwiesen sich von den insgesamt 7 Parametern 2 als nicht hinreichend reliabel. Diese Parameter waren die jeweiligen Minima: APmin und LLmin (Kapitel 2.5.1.3 und 2.5.1.4). Da das Lumen der Atemwege in seinen Dimensionen teils sehr variabel ist [8,80,81], ist zu vermuten, dass die genannten Minima ungenügend definiert waren und es aufgrund der Schwankungen des Lumens zu einer unzureichenden Übereinstimmung der ersten und zweiten Messreihe kam. Die Verlässlichkeit der 5 reliablen Parameter wird im jeweiligen Kapitel der Diskussion näher erläutert.

Um offensichtliche Fehlmessungen bei asymmetrischer oder atypischer Trachea sowie bei einer hohen Variabilität des Lumens und ausgeprägter Schleimabbildung in den Atemwegen zu vermeiden, wurden die Parameter APmax und LLmax sehr genau mit einem Mindestabstand von 5 mm zur angrenzenden Mukosa festgelegt (Kapitel 2.5.1.1 und 2.5.1.2). Dies sollte zudem zu einer möglichst mittigen Positionierung der Durchmesser führen und die Reproduzierbarkeit verlässlicher machen. Mit der hier vorgestellten Messmethodik

steht damit ein Messprotokoll zur Verfügung, um die Trachea und den LTÜG im MRT auch im epidemiologischen Kontext verlässlich zu untersuchen.

4.1.4 Software

Ein wesentlicher Vorteil des Messprogrammes MeVisLab [104], mit welchem in dieser Arbeit gemessen wurde, ist dass die Durchmesser mittels fester gerader Linien bestimmt werden konnten und andererseits die Begrenzungslinie zur Bestimmung von Vol und CSA mittels eigenständig, manuellen und individuellen Mouseclicks gesetzt werden konnte. Dadurch bestand die Möglichkeit bei Variationen des Lumens individuell eine genaue Begrenzung durch nahes Aneinandersetzen der Markierungen zu bestimmen und mittels gerader Linien die Durchmesser möglichst präzise festzulegen. Jedoch mussten die erhobenen Messwerte der einzelnen Parameter manuell in eine Tabelle eingetragen werden, was zu Übertragungsfehlern geführt haben kann. Eine Optimierung des Programmes wäre die Messwerte ohne manuelle Übertragung direkt speichern zu können.

4.2 Teil 1: Einflussfaktoren auf die Parameter zur Trachea und dem laryngotrachealen Übergang

Die einzelnen Parameter der Trachea und des LTÜGs wurden bei 792 Probanden augemessen und auf den Einfluss durch das Geschlecht und das Alter überprüft. Anhand dieser Faktoren sollten Rückschlüsse auf bevölkerungsrepräsentative Dimensionen der subglottischen großen Atemwege eruiert werden. Vor allem durch jene Einflussfaktoren sollen für die rekonstruktive Chirurgie der Atemwege, wie sie z.B. bei Trachealstenosen oder Stenosen des LTÜGs angewendet wird, weitere Hinweise zur Optimierung gewonnen werden.

4.2.1 Maximaler anterior-posteriore und maximaler transversaler Durchmesser

Die Wichtigkeit der Durchmesser der Atemwege wurde schon durch Mi et al. 2015 [84] beschrieben, da durch deren Wissen die Rekonstruktion der Atemwege optimiert werden kann und sie eine Hilfestellung für die Zielsetzung der notwendigen Dimensionen des luftleitenden Lumens darstellen.

Der maximale anterior-posteriore Durchmesser betrug durchschnittlich 16,5 ± 2,7 mm, der maximale transversale Durchmesser 16,7 ± 3,2 mm. Der ICC zeigte bei beiden Parametern eine exzellente Reliabilität. Einzelne Ausreißer lagen in den Bland-Altman-Plots unterhalb der Grenze, was durch Messabweichungen der ersten zur zweiten Messung durch unklare Grenzen der Mukosa zur Luft aufgrund von Schleimabbildung und Variabilität des Lumens begründet sein kann. Im Verlauf der Trachea nach distal vergrößerten sich die Standardabweichung und die 95 % - Konfidenzintervalle, was mit einer abnehmenden Probandenzahl bei zunehmender Sliceanzahl zusammenhängen kann und eine höhere Variabilität wahrscheinlich macht. Beim Verlauf der Durchmesser von der Glottis nach distal fällt auf, dass APmax bei beiden Geschlechtern ein Minimum in einem Abstand 24 mm kaudal der Glottis hatte. LLmax hatte das erste Minimum auf Ebene der Glottis, welche als Engstelle bei Erwachsenen bekannt ist [110]. Ein zweites Minimum zeigte sich bei Männern 32 mm und bei Frauen 28 mm unterhalb der Stimmritze. Eine erste Vermutung war, dass in jenen Abständen der Ringknorpel

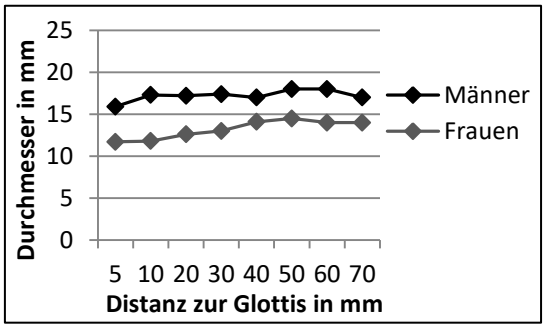
lokalisiert ist. Dies bestätigte sich nach einer ersten Analyse nicht, da laut Literatur der Arcus cricoideus im Mittel einen Abstand von 15,2 ± 4,4 mm zur Glottis hat [111].

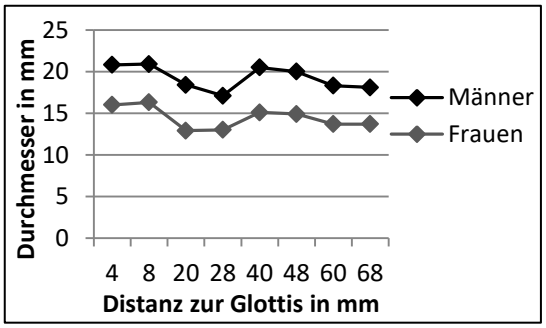
In der Vergleichsstudie von Prasanna Kumar et al. 2014 [107] zur Ausmessung der Trachea auf mehreren Ebenen lag das Minimum beider maximaler Durchmesser bei Männern 40 mm kaudal der Glottis. Bei Frauen lag nur ein Minimum des transversalen Durchmessers im Abstand von 30 mm zur Stimmritze vor. Prasanna Kumar et al. beurteilten die Trachea bei 48 Probanden (18 Männer, 30 Frauen) mittels CT und maßen die Innendurchmesser auf acht Ebenen aus. Die Aufnahmen wurden in tiefer Inspiration durchgeführt [107]. Tab. 39 und Tab. 40 zeigen den Vergleich der Messergebnisse von Prasanna Kumar et al. [107] zu jenen dieser Arbeit in mm, wobei die Distanzen zur Glottis in dieser Arbeit aufgrund einer Schichtdicke der MRT-Bilder von 4 mm leicht abweichen.

Tab. 39: Vergleichsstudie zu APmax in Abhängigkeit von der subglottischen Distanz

Prasanna Kumar et al. 2014 [107]		
Distanz zur Glottis [mm]	**Männer**	**Frauen**
5	15,9 ± 4,4	11,7 ± 3,6
10	17,3 ± 3,6	11,8 ± 2,9
20	17,2 ± 3,0	12,6 ± 2,0
30	17,4 ± 3,1	13,0 ± 1,9
40	17,0 ± 3,5	14,1 ± 1,7
50	18,0 ± 4,0	14,5 ± 2,0
60	18,0 ± 3,9	14,0 ± 2,2
70	17,0 ± 2,9	14,1 ± 2,6

Diese Studie, 2018		
Distanz zur Glottis [mm]	**Männer**	**Frauen**
4	20,8 ± 1,9	16,0 ± 1,5
8	20,9 ± 1,7	16,3 ± 1,4
20	18,4 ± 2,2	12,9 ± 1,8
28	17,1 ± 2,6	13,0 ± 2,0
40	20,5 ± 3,1	15,1 ± 2,3
48	20,0 ± 3,3	14,9 ± 2,4
60	18,3 ± 2,9	13,7 ± 2,2
68	18,1 ± 2,6	13,7 ± 2,2



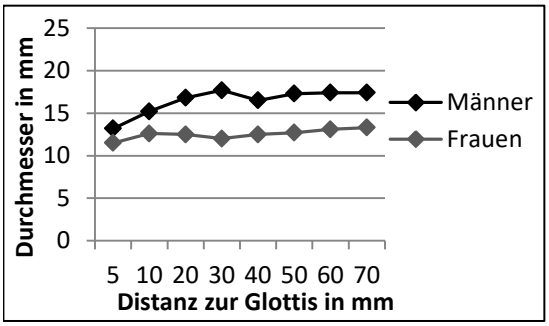


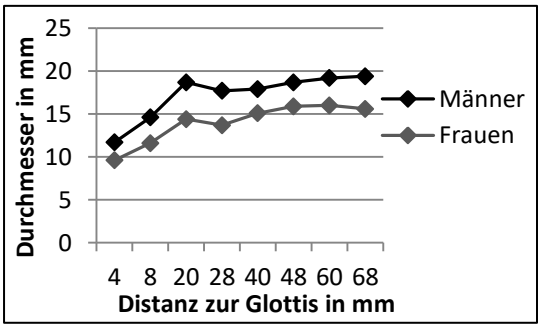
Quelle: Prasanna Kumar et al. 2014 [107]

Tab. 40: Vergleichsstudie zu LLmax in Abhängigkeit von der subglottischen Distanz

Prasanna Kumar et al. 2014 [107]		
Distanz zur Glottis [mm]	**Männer**	**Frauen**
5	13,2 ± 2,3	11,5 ± 2,0
10	15,2 ± 2,1	12,6 ± 1,6
20	16,8 ± 1,5	12,5 ± 2,5
30	17,7 ± 2,6	12,1 ± 1,8
40	16,5 ± 2,5	12,5 ± 1,7
50	17,3 ± 2,3	12,7 ± 2,6
60	17,4 ± 2,3	13,1 ± 3,4
70	17,4 ± 3,0	13,3 ± 2,9

Diese Studie, 2018		
Distanz zur Glottis [mm]	**Männer**	**Frauen**
4	11,7 ± 1,7	9,6 ± 1,3
8	14,3 ± 1,7	11,6 ± 1,3
20	18,7 ± 1,7	14,4 ± 1,4
28	17,7 ± 1,9	13,7 ± 1,4
40	17,9 ± 2,3	15,1 ± 1,9
48	18,7 ± 2,5	15,9 ± 1,9
60	19,2 ± 2,4	16,0 ± 1,9
68	19,4 ± 2,4	15,6 ± 2,0





Quelle: Prasanna Kumar et al. 2014 [107]

Relevant sind Engstellen der Atemwege, da sie mögliche Hindernisse während der Intubation oder von endotracheal eingeführten Instrumenten darstellen. Weiterhin geben sie Rückschlüsse auf strukturelle Veränderungen und äußere Einflüsse auf das Tracheallumen. Die Engstellen 30 und 40 mm unterhalb der Glottis beschrieben Prasanna Kumar et al. als Eingang in den Thorax, weshalb dort vor allem durch die Inspiration ein erhöter Druck herrscht und eine Verengung des Lumens verursacht [107]. Andernfalls kann eine Lumenreduktion nach den Ergebnissen dieser Arbeit aufgrund des Übergangs vom Larynx in die Trachea begründet werden. Von der vorderen Kommissur des Schildknorpels, welche in etwa der Stimmbandebene entspricht, bis zum 1. Trachealring wird eine Distanz von 26,8 ± 4,3 mm (Männer 27,3 ± 4,5 mm, Frauen 25,1 ± 3,2 mm) beschrieben [112], was in etwa den Minima dieser Studie entspricht. Um die optimale Rekonstruktion bei Vorliegen einer Stenose planen zu können, ist die Kenntnis des Übergangs vom Kehlkopf in die Trachea relevant [112], da Trachealstenosen eher mittels Resektion und End-zu-End Anastomose vernäht werden [73,112] und subglottische Stenosen durch partielle Cricoidresektion erweitert werden können [70]. Ein weiterer Erklärungsansatz der Minima ist die anatomische Nähe zur

Schilddrüse, da der Schilddrüsenisthmus die Trachea etwa auf Ebene der 2. bis 3. Knorpelspange kreuzt [113]. Die definitive Ursache der Minima in dieser Arbeit kann zum aktuellen Zeitpunkt nicht sicher festgemacht werden, wobei aufgrund der angegebenen Distanz von der Glottis bis zum 1. Trachealring der Übergang vom Larynx in die Trachea am wahrscheinlichsten ist.

Im Verlauf der Trachea zeigten sich bei Prasanna Kumar et al. [107] abweichende anterior-posteriore Durchmesser im Vergleich zu dieser Arbeit (Tab. 39). Der transversale Durchmesser war bei Prasanna Kumar et al. [107] ab einer Distanz von 20 mm kaudal der Glottis bei beiden Geschlechtern kleiner (Tab. 40). Die unterschiedlichen Verläufe der Durchmesser in Abhängigkeit der subglottischen Distanz könnten durch die unterschiedlichen Aufnahmetechniken (tiefe Inspiration vs. normale Atmung) entstanden sein. Zudem erfolgten die Messungen auf nicht exakt den gleichen Ebenen, was ebenfalls zu leicht unterschiedlichen Ergebnissen beigetragen haben kann. Männer hatten bei Prasanna Kumar et al. [107] größere tracheale Durchmesser als Frauen, wie es auch in dieser Arbeit festgestellt wurde.

Einfluss des Geschlechts

Zur Ausmessung der Trachea sowie den Unterschieden zwischen Männern und Frauen wurden bereits mehrere Arbeiten publiziert. In Tab. 41 sind weitere Vergleichsstudien dargestellt, welche den anterior-posterioren und transversalen Durchmesser der Trachea in mm in Abhängigkeit vom Geschlecht bestimmten.

Tab. 41: Vergleichsstudien zu APmax und LLmax der Trachea und des LTÜGs

	Mi et al. 2015 [84]	**Mi et al. 2015 [84]**	**D'Anza et al. 2014 [34]**	**Karmakar et al. 2015 [114]**	**Kamel et al. 2009 [81]**	**Eberle et al. 1999 [115]**	**Diese Studie, 2018**
Ebene	Kranial der Fossa supracla-vicularis	Mitte der Trachea	1. Tracheal-ring	2 cm kaudal des Cricoids	Direkt kranial der Carina	1 cm kranial der Carina	Mw aller Slices
APmax-Männer	19,9 ± 2,4	19,0 ± 2,3	22,1 ± 4,0	24,3 ± 4,4	22,6 ± 2,9	16,0 ± 3,0	18,9 ± 1,3
APmax-Frauen	15,0 ± 2,0	14,9 ± 2,1	18,8 ± 4,4	18,8 ± 3,7	19,2 ± 2,6		14,1 ± 1,0
LLmax-Männer	16,8 ± 2,1	17,1 ± 2,6	18,3 ± 3,6	18,0 ± 3,7	27,1 ± 3,4	16,0 ± 2,0	18,4 ± 3,0
LLmax-Frauen	14,6 ± 1,7	14,9 ± 2,0	15,6 ± 2,8	16,1 ± 2,0	22,9 ± 2,6		15,0 ± 2,5

Auffällig ist, dass die Messungen der jeweiligen Studien häufig auf unterschiedlichen Ebenen durchgeführt wurden. Dies kann möglicherweise zu weiteren Variabilitäten der Messergebnisse geführt haben, wobei die Varianz der Trachea bekannt ist [80,81]. Zum Vergleich wurden die Mittelwerte der Parameter dieser Arbeit verwendet, welche durch die Ausmessung der abgebildeten Trachea inkl. LTÜG bestimmt wurden. In dieser Studie hatten Männer einen anterior-posterioren Durchmesser von 18,9 ± 1,3 mm, Frauen von 14,1 ± 1,0 mm. Der maximale transversale Durchmesser betrug bei Männern 18,4 ± 3,0 mm und bei Frauen 15,0 ± 2,5 mm. Auch in den genannten Vergleichsstudien wurden bei Männern größere Durchmesser festgestellt als bei Frauen (Tab. 41).

Beide Durchmesser sind am ehesten mit den Messergebnissen von Eberle et al. 1999 [115] zu vergleichen, welche mittels CT 49 Probanden (31 Männer, 18 Frauen) 1 cm oberhalb der Carina untersuchten. Auch die Ergebnisse von Mi et al. 2015 [84] kommen den Ergebnissen dieser Arbeit sehr nahe, wobei dort die CT-Bilder von 2.500 Probanden (1.336 Männer, 1.164 Frauen) auf der Ebene kranial der Fossa supraclavicularis und in der Mitte der Trachea ausgemessen wurden.

Ableitung einer optimalen Stentgröße

Um das Risiko von Ödem und Restenose sowie die Bildung von Granulationsgewebe zu reduzieren, ist es notwendig die optimale Stentgröße nach einer chirurgischen Rekonstruktion der Atemwege zu wählen [116]. Gerade aber die hohe Variabilität der Durchmesser lassen Rückschlüsse auf die Schwierigkeit zu, den optimalen Stent zu wählen [8] und zu entwickeln, wobei möglicherweise auch die genaue Lokalisation der Trachea und des LTÜGs beachtet werden sollte. In dieser Arbeit zeigte sich eine Zunahme des transversalen Durchmessers im distalen Drittel der Trachea bei beiden Geschlechtern. Kamel et al. 2009 [81] bestimmten bei 60 Probanden (40 Männer, 20 Frauen) mit Hilfe der CT direkt kranial der Carina wesentlich größere Durchmesser im Vergleich zu den in der vorliegenden Arbeit erhobenen Mittelwerte der maximalen Durchmesser (Tab. 41). Eine mögliche Erklärung für diese Unterschiede könnte darin begründet sein, dass die Durchmesser im distalen Bereich der Trachea größer sind als im proximalen Bereich. Diese Vermutung wird durch die Arbeit von Boiselle et al. 2009 [117] gestützt. Bei jener Untersuchung war im unteren Drittel der Trachea der

transversale Durchmesser in Inspiration (18,2 ± 2,4 mm) sowie in Exspiration (13,2 ± 4,2 mm) größer als im oberen Drittel (Inspiration: 17,3 ± 2,3 mm; Exspiration: 12,0 ± 2,4 mm). Dies zeigt erneut die Variabilität der Durchmesser des Lumens, welche möglicherweise in Abhängigkeit von der Lokalisation der Trachea bei einer chirurgischen Rekonstruktion berücksichtigt werden sollte. Eine Herausforderung besteht zudem darin, einen Stent so zu wählen, dass er die anliegende Mukosa nicht komprimiert, zum anderen aber groß genug ist, um die Stenose zu überbrücken [118]. Weitere Anforderungen an den idealen Stent sind u.a. Anpassungsfähigkeit an das Lumen, Verfügbarkeit in allen Größen und Standhaftigkeit gegen Kompressionen von außen, wobei der ideale Stent noch nicht verfügbar ist [119].

Mit den Ergebnissen der vorliegenden Arbeit könnte somit unter anderem die Entwicklung eines individuell-idealen Stents, welcher z.B. mittels 3D-Drucker produziert werden könnte [120], unterstützt werden, da für den jeweiligen Patienten eine Zielgröße in Abhängigkeit von Geschlecht und Distanz zur Glottis benannt werden kann.

Einfluss einer Intubation

In dieser Arbeit wurden Probanden mit Trachealstenosen und Veränderungen der Trachea durch eine pathologische Schilddrüse ausgeschlossen. Die Bilder von Probanden mit weiteren pulmonalen Erkrankungen oder durchgemachter Intubation wurden mit ausgemessen. Da diese beiden Faktoren als Risikofaktoren für eine Verengung der Atemwege gelten [18], führte der Einfluss dieser Probanden potenziell zu kleineren Durchmessern.
Möglicherweise wurden von Karmakar et al. 2015 [114] aufgrund des Ausschlusses jener Probanden größere anterior-posteriore Durchmesser im Vergleich zu dieser Arbeit angegeben (Tab. 41). Die Ergebnisse zum transversalen Durchmesser waren in beiden Arbeiten jedoch vergleichbar. Auch bleibt die Messebene 2 cm unterhalb des Cricoids als Ursache der abweichenden Messergebnisse zu diskutieren. Nach wie vor bleibt das Risiko einer iatrogenen Trachealstenose oder Stenose des LTÜGs nach Intubation oder Tracheostomie bestehen [1,25–27]. Die Inzidenz liegt aktuell immer noch bei 0,06 - 7 % [30–32]. Besonders übergewichtige Patienten scheinen ein erhöhtes Risiko zur Entstehung

von Trachealstenosen zu haben, wenn eine Tubusgröße mit einem Innendurchmesser (ID) > 6,0 mm bei einer Tracheostoma-Anlage genutzt wird [121].

Einfluss des Body-Mass-Index'

D'Anza et al. 2014 [34] beschäftigte sich mit dem Einfluss des BMI‘s (mittlerer BMI: 32,4 ± 11,8 kg/m²) auf die trachealen Durchmesser auf Ebene des 1. Trachealringes. Dabei wurden 123 Probanden (76 Männer, 47 Frauen), welche eine Tracheostomie hinter sicht hatten, mittels CT untersucht. Interessanterweise wurden wesentlich größere Durchmesser festgestellt als in der vorliegenden Arbeit (Tab. 41), obwohl die Tracheostomie als Risikofaktor für Ödeme und Stenosen gilt [1,25–27]. Mit Zunahme des BMI‘s um 1 kg/m² beschrieben D'Anza et al. [34] eine, wenn auch sehr geringe, Abnahme des transversalen Durchmessers um je 0,05 mm. Die Diskrepanz zwischen diesen publizierten Werten und den Ergebnissen dieser Arbeit bleibt derzeit ungeklärt. Eine weitere Prüfung des Einflusses von Körpergewicht und Körpergröße auf die trachealen Durchmesser wären daher empfehlenswert.

Maximaler anterior-posteriore Durchmesser vs. maximaler transversaler Durchmesser

Gerade um Verletzungen der Atemwege bei einer Intervention zu vermeiden, ist es notwendig den kleinsten Durchmesser zu kennen, da dieser die Größe von eingeführten Tuben [8,45] oder Instrumenten begrenzt [8]. Bei der Mehrzahl der genannten Vergleichsstudien ist der anterior-posteriore Durchmesser größer als der transversale Durchmesser. Bei Eberle et al. [115] waren beide Durchmesser sehr ähnlich, bei Kamel et al. [81] war der transversale Durchmesser größer als der anterior-posteriore Durchmesser. In der vorliegenden Arbeit hatten Männer einen größeren anterior-posterioren, Frauen einen größeren transversalen Durchmesser (Tab. 41). Dies verdeutlicht erneut die Variabilität der Atemwege. Als mögliche weitere Ursachen sollten u.a. der Einfluss der unterschiedlichen Messebenen näher untersucht werden sowie die Bedeutung unterschiedlicher Druckeinwirkungen in Abhängigkeit von der trachealen Lokalisation. Diskutiert und beschrieben wurde bereits, dass im oberen Bereich der Trachea der

Atmosphärendruck einwirkt, während im unteren Bereich der pleurale Druck auf die Atemwege ausschlaggebend ist [18,122], was zu unterschiedlichen Dimensionen führen kann [122].

Durch die hohe Variabilität des Tracheallumens aufgrund unterschiedlicher Einflüsse, wie das Geschlecht, die Messebene und die Einwirkung unterschiedlicher Drücke [18,122], wird erneut die Schwierigkeit deutlich, einheitliche Stents, Endotrachealtuben oder chirurgische Rekonstruktionsziele zu optimieren.

Die Bestimmung der maximalen Durchmesser der Trachea in Abhängigkeit von der Distanz zur Glottis bei Männern und Frauen soll weitere Hinweise zur Orientierung für mögliche Rekonstruktionsziele bei Vorliegen einer Trachealstenose in Abhängigkeit der Lokalisation liefern. Darüber hinaus sollen mit diesen Daten Rückschlüsse auf die optimale Größe eines eingeführten Stents oder Tubus ermöglicht werden.

4.2.2 Transversaler Durchmesser 4 mm von anterior

Der LL4mmVA beträgt im Mittel 12,9 ± 2,5 mm. Die Reliabilität des Messverfahrens war mit einem ICC von 0,851 sehr gut, im dazu gehörigen Bland-Altman-Plot zeigten sich nur wenige Ausreißer. Diese lagen überwiegend unterhalb der Grenze, welche durch eine unklare Abgrenzung der Luft zur Mukosa durch vermehrte Schleimablagerungen im Lumen erklärbar ist. Der transversale Durchmesser 4 mm von anterior wurde bisher nicht in der Literatur beschrieben und soll als zusätzlicher Referenzwert dienen. Gerade aufgrund der hohen Variabilität der Trachea sollte dieser Parameter dazu genutzt werden, das Lumen der Trachea weiter zu spezifizieren, Hinweise zur Form geben und eine weitere Orientierung zur Optimierung bei einer chirurgischen Rekonstruktion darstellen.

Im Verlauf der Trachea nach distal ist das erste Minimum auf Ebene der Glottis festzustellen. Die Glottis ist als Engstelle bei Erwachsenen bekannt [110]. In der vorliegenden Untersuchung erreichte dieser Parameter im Verlauf nach distal, wie auch LLmax, ein Minimum bei Männern 28 mm und bei Frauen 32 mm kaudal der Glottis. Diese Stelle könnte analog zu APmax und LLmax den Übergang vom Larynx in die Trachea beschreiben [112]. Alternativ könnten jene Engstellen durch

die Lage der Schilddrüse erklärbar sein [113] oder die Thoraxeingangsebene darstellen [107]. Dieser Sachverhalt sollte in weiteren Studien untersucht werden.

Einfluss des Geschlechts

LL4mmVA zeigte zwischen den Geschlechtern einen auffälligen Unterschied, wobei Männer im Mittel größere Durchmesser hatten als Frauen. Insgesamt wurde für diesen Parameter von der Glottis nach distal ein ähnlicher Verlauf zwischen den Geschlechtern erwartet, wie bei LLmax, da beides transversale Durchmesser sind. Dem entgegen zeigte sich, dass sich bei LL4mmVA im Gegensatz zu LLmax die Kurvenverläufe bei Männern und Frauen stark annäherten (Kapitel 3.2.1.5). Gerade aufgrund der hohen trachealen Variabilität kann dieser Parameter weitere Hinweise zur trachealen Form geben und zur Weiterentwicklung eines Stents genutzt werden.

4.2.3 Volumen

Das Volumen wurde, wie von Chong et al. 2006 [109] beschrieben, von der Glottis bis zur Carina ausgemessen. Da bei einer Beatmung der Tubus in diesem Bereich zu liegen kommt [1,109] und iatrogene Stenosen verursachen kann [1], sollte diese Region besser objektiviert und bestimmt werden. Zur Bestimmung des Volumens wurde die Cavalieri Methode angewendet, bei welcher mittels Flächen dreidimensionale Körper dargestellt werden [123,124]. Diese Technik ist etabliert und wurde bereits mehrfach zur Dimensionierung anatomischer Strukturen genutzt [125,126].

Im Rahmen der vorliegenden Untersuchung wurde das tracheale Volumen bei 35 Probanden bestimmt und lag im Mittel bei 18,0 ± 4,4 ml. Die Verlässlichkeit dieses Parameters hatte eine sehr gute Reliabilität, im Bland-Altman-Plot lag kein Wert außerhalb der Grenzen.

Einfluss des Geschlechts

Von den 35 in dieser Studie vollständig abgebildeten und ausgemessenen Tracheae stammten 88,6 % von weiblichen Probanden (31/ 35 Probanden). Als

Grund wird vermutet, dass Frauen im Schnitt eine kürzere Trachea haben als Männer [108,109] und daher bei MRT-Aufnahmen des Halses von Frauen eher ein vollständiges MRT-Bild der Trachea zu erhalten ist. Insgesamt wurde bei 21 % der Probanden (35/ 167 Probanden), bei welchen eine Carina im MRT abgebildet war, die Ausmessung der gesamten Trachea durchgeführt. In einer nachfolgenden Analyse könnte in den MRT-Datensätzen mit Abbildung der Carina die in der vorliegenden Arbeit ermittelte Geschlechterverteilung überprüft werden. Trotz der geringen Probandenanzahl war ein auffälliger Einfluss des Geschlechts festzustellen. Wie auch in anderen Studien gezeigt wurde, hatten Männer ein größeres Volumen als Frauen (Tab. 42).

Tab. 42: Vergleichsstudien zum Volumen

	Kamel et al. 2009 [81]	**Leader et al. 2004 [127]**	**Griscom und Wohl 1986 [128]**	**Yamashiro et al. 2011 [88]**	**Diese Studie, 2018**
Männer	35,6 ± 6,8 cm³	27,5 ± 5,8 cm³	30,3 ± 5,9 cm³	Inspiration: 24,6 ± 6,8 ml	26,8 ± 4,6 ml
Frauen	24,7 ± 6,1 cm³	16,4 ± 4,6 cm³	-	Exspiration: 19,5 ± 6,1 ml	16,9 ± 2,9 ml

In der Studie von Leader et al. 2004 [127] wurden sehr ähnliche Messwerte erhoben, obwohl hier mit dem Bereich von Höhe der ersten Rippe bis 30 mm kranial der Carina ein kürzerer Teil der Trachea ausgemessen worden war. Zusätzlich unterschieden sich die 43 Probanden (19 Frauen, 24 Männer) dadurch, dass sie ein Lungenemphysem hatten, wobei zum Vergleich in der Studie die Aufnhamen vor der operativen Versorgung genutzt wurden. Yamashiro et al. 2011 [88] zeigte bei 85 Rauchern (45 Männer, 50 Frauen, Pack years: 48,4 ± 32,9) ein größeres tracheales Volumen sowohl in Inspiration als auch in Exspiration, obwohl hier der Messbereich - festgelegt von der Ebene des Lungenapex bis zur Carina - ebenfalls kürzer war. Bei beiden Studien wurden die Untersuchungen mittels CT durchgeführt [88,127]. Möglich sind die verhältnismäßig größeren Messergebnisse trotz kürzeren Messbereichs dieser beiden Arbeitsgruppen aufgrund des Lungenemphysems bzw. einer möglichen Erkrankung der Raucher an einer COPD oder einem Lungenemphysem. Beides kann mit einem erhöhten Trachealvolumen einhergehen [88].

Interdisziplinärer Zusammenhang des Trachealvolumens

Zwischen dem Trachealvolumen und dem Lungenvolumen sowie der Lungenfunktion wurde bereits eine Korrelation beschrieben [88]. Trotz seiner interdisziplinären Bedeutung für Anästhesisten, Pulmologen oder Thoraxchirurgen ist das Trachealvolumen zum aktuellen Zeitpunkt jedoch nur wenig erforscht. Bisher wurden vor allem Einflüsse auf die Trachealänge geprüft, dabei gilt die Körpergröße als mögliche Einflussgröße [84,114]. Weiterhin wurde eine Korrelation zwischen dem Trachealvolumen und der Körpergröße bei Frauen festgestellt [81]. Zu überlegen ist jedoch, ob die 7 erwachsenen Männer (18 - 20 Jahre) der ingesamt 130 untersuchten Probanden (0 – 20 Jahre) in der Arbeit von Griscom und Wohl 1986 [128] aufgrund einer längeren Trachea ein höheres Trachealvolumen besitzen als in dieser Studie (Tab. 42). Die von Griscom und Wohl [128] angegebene Trachealänge lag bei den genannten Probanden bei 13,1 ± 0,9 cm, gemessen von der Glottis bis zur Carina, während in dieser Arbeit die längste Trachea 10,4 cm lang war (Kapitel 3.2.1.2). Ein möglicher Zusammenhang zwischen der Trachealänge und dem Trachealvolumen könnte in Folgestudien genauer untersucht werden.

Ein anderes Messverfahren wurde von Kamel et al. 2009 [81] verwendet, hier wurde vom Unterrand des Cricoids bis zur Carina gemessen. Die durchschnittliche Länge lag bei 10,3 cm [81]. Dennoch wurde in der Arbeit von Kamel et al. [81] ein wesentlich größeres Trachealvolumen bei Männern und Frauen angegeben als in dieser Untersuchung (Tab. 42). Da in dieser Studie die längste abgebildete Trachea inkl. LTÜG eine ähnliche Länge besitzt (10,4 cm) wie die durchschnittliche Trachea in der Studie von Kamel et al. [81] ohne LTÜG, ist weiterhin zu vermuten, dass in der vorliegenden Untersuchung vor allem kurze Tracheae selektiert wurden mit einem potenziell damit verbundenem geringen Trachealvolumen. Zudem besteht die Vermutung, dass der subglottische Bereich ein wesentlich kleineres Volumen besitzt als die Trachea, was in weiteren Studien genauer untersucht werden könnte.

Das Trachealvolumen stellt zudem einen Teil des Totraumvolumens dar, was für die Einstellung einer invasiven Beatmung bedeutsam ist [129]. Mit den erhobenen Messwerten des Trachealvolumens könnten so auch weitere interessante Zusammenhänge zu relevanten Themen anderer Fachbereiche untersucht werden.

4.2.4 Einfluss des Alters auf die Parameter zur Trachea und dem laryngotrachealen Übergang

In der vorliegenden Untersuchung konnte für keinen der gemessenen Parameter der Trachea inkl. LTÜG ein auffälliger Einfluss durch das Alter gezeigt werden. Zudem zeigte sich lediglich eine sehr geringe Korrelation zwischen dem Alter und LL4mmVA auf Ebene der Glottis, zu den maximalen Durchmessern konnte kein linearer Zusammenhang festgestellt werden. Dieses Ergebnis wird durch die Angaben anderer Autoren gestützt, welche ebenfalls keine Korrelation zwischen dem Alter und dem anterior-posterioren [107] sowie transversalen Durchmesser zeigen konnten [107,130]. Mi et al. 2015 [84] hingegen beschrieben eine mittlere Korrelation mit r = 0,629 zwischen dem anterior-posterioren Durchmesser kranial der Fossa supraclavicularis und dem Alter (18 – 90 Jahre) in Kombination mit der Körpergröße. Da beide Faktoren in die Kalkulation einbezogen wurden, bleibt der Zusammenhang des Durchmessers isoliert mit dem Alter zu diskutieren. Nach Mi et al. schreitet bei zunehmendem Alter eine mukosale Atrophie voran, wodurch die Durchmesser der Trachea größer werden [84]. Zwischen dem Alter und dem Volumen wurde in der vorliegenden Arbeit nur eine sehr geringe Korrelation festgestellt, Kamel et al. konnten 2009 [81] keinen Zusammenhang zeigen.

Insgesamt scheinen sich die Dimensionen der Trachea vor allem in der kindlichen Entwicklung [128] und nachfolgend bis zum 30. Lebensjahr zu verändern [80]. Laut der Untersuchung von Griscom und Wohl 1986 [128] an 0 - 20- jährigen Probanden zeigte sich ein relevanter Unterschied der trachealen Dimensionen zwischen den Geschlechtern von 16 - 19 Jahren. Beide Durchmesser sowie das tracheale Volumen erreichten bei Frauen ab dem 16. Lebensjahr ein Plateau, während diese Parameter bei Männern weiter anstiegen [128]. Von Breatnach et al. 1984 [80] wurde ein Wachstum beider Durchmesser bei Männern (n = 430) im Alter von 10 - 29 Jahren und bei Frauen (n = 378) von 10 - 39 Jahren beschrieben.

Durch die Analyse des Alters sollte ein weiterer relevanter Einflussfaktor auf die Dimensionen der Trachea indentifiziert werden. Offensichtlich scheint der Einfluss des Alters aber nur bei Kindern und jungen Erwachsenen eine größere Rolle zu spielen. Daher sollte dieser Faktor bei jüngeren Patienten möglicherweise bei der Wahl der optimalen Stent- oder Tubusgröße berücksichtigt werden.

4.3 Teil 2: Einflussfaktoren auf die Parameter zum Ringknorpel

In der vorliegenden Arbeit wurde der Ringknorpel bei 3.165 Probanden ausgemessen und auf unterschiedliche Einflussfaktoren wie Geschlecht, Alter, Körpergewicht und Körpergröße sowie Angaben zu einer Schilddrüsenerkrankung und Radiojodtherapie geprüft. In Abhängigkeit der genannten Faktoren sollten bevölkerungsrepräsentative Dimensionen des Ringknorpels erfasst werden, um die rekonstruktive Chirurgie bei Vorliegen einer Stenose des laryngotrachealen Übergangs weiter individualisieren und optimieren zu können.

4.3.1 Maximaler anterior-posteriore und maximaler transversaler Durchmesser

Der Kehlkopf ist ein sehr komplexes Gebilde des menschlichen Körpers [9], wobei früher vor allem Leichenpräparate zu einer dreidimensionalen Darstellung genutzt wurden. Eckel et al. publizierten 1994 [82] eine mit 95 Parametern angegebene sehr dataillierte Vermessung des gesamten Kehlkopfes. Auch Ajmani et al. 1990 [131] und Randestad et al. 2000 [8] bestimmten die Dimensionen des Cricoids an Leichen. Ab ca. 2000 wurde das Cricoid vermehrt mittels moderner Techniken, wie z.B. die CT, die MRT oder dem Ultraschall ausgemessen [95,132,133].

Der maximale anterior-posteriore Durchmesser betrug in dieser Arbeit im Mittel 18,1 ± 2,7 mm. In der Analyse fielen jedoch die Minima von 5,1 mm sowie von 7,3 mm auf. Nach Einschätzung der Messwerte sind Messergebnisse von APmax < 10 mm auf der Ebene des Arcus cricoideus kritisch zu hinterfragen, weshalb die genannten Minima ggf. auf Schleimabbildung im Lumen zurückzuführen sind. Ein weiterer Grund könnte hier auch eine verminderte Qualität der MRT-Bilder sein.

Der maximale transversale Durchmesser betrug 14,8 ± 2,5 mm. Die Verlässlichkeit von APmax und LLmax wurde in Teil 1 der Diskussion besprochen. Beide Durchmesser des Cricoids wurden schon von mehreren Autoren bestimmt und beschreiben eine große Varianz [8,131]. Dadurch kann die Verwendung einheitlicher Stents eingeschränkt sein [8]. Eine weitere Problematik besteht darin, für den individuellen Patienten den geeignetsten Endotrachealtubus [8,44,45] oder Endoskop [8] bei einer Intervention zu nutzen. Durch Hu et al. 2011 [134] konnte

gezeigt werden, dass durch die Kenntnis der Durchmesser der Atemwege eine bessere Orientierung bei der Stentauswahl ermöglicht wird sowie eine geringere Komplikationsrate erzielt werden kann.

Einfluss des Geschlechts

Nach den Ergebnissen der vorliegenden Arbeit hatten Männer im Schnitt, wie auch einige andere Studien zeigten [45,82,131,135], größere Durchmesser als Frauen. In der Regressionsanalyse zeigte sich das Geschlecht als stärkster Einflussfaktor auf diese Parameter des Cricoids. Tab. 43 stellt eine Übersicht der Ergebnisse unterschiedlicher Studien dar, in denen die anterior-posterioren und transversalen Durchmesser in mm bei Männern und Frauen bestimmt wurden.

Tab. 43: Vergleichsstudien zu APmax und LLmax des Ringknorpels

	Coordes et al. 2011 [45]	**Eckel et al. 1994 [82]**	**Anand et al. 2018 [135]**	**Lakhal et al. 2007 [95]**	**Ajmani et al. 1990 [131]**	**Or et al. 2013 [132]**	**Zaghi et al. 2016 [133]**	**Diese Studie, 2018**
APmax-Männer	18,3 ± 2,0	21,6 ± 3,6	14.1 ± 2.6	19 ± 3	28,8 ± 4,1	17,8 ± 2,7	-	20,4 ± 1,7
APmax-Frauen	14,6 ± 1,7	17,4 ± 1,9	12.7 ± 0.5		24,1 ± 2,5		18,1 ± 2,7	15,9 ± 1,4
LLmax-Männer	16,6 ± 2,9	15,3 ± 1,9	17,5 ± 2,6	15 ± 2	29,8 ± 6,1	13,8 ± 2,1	-	16,9 ± 1,7
LLmax-Frauen	13,1 ± 2,3	12,0 ± 1,2	15,1 ± 1,0		25,8 ± 3,5		13,7 ± 2,2	12,9 ± 1,4

Die Messergebnisse ohne Aufteilung der Geschlechter sind im anterior-posterioren und transversalen Durchmesser des Cricoids in dieser Arbeit am ehesten mit denen von Lakhal et al. 2007 [95] und Or et al. 2013 [132] zu vergleichen. In beiden Arbeiten wurde der Ringknorpel mittels MRT beurteilt. Methodisch sind diese Studien ein guter Vergleich zu den Ergebnissen dieser Arbeit, da die Untersuchungen ebenfalls mit einer Schichtdicke von 4 mm durchgeführt wurden und den kranialeren Teil des Ringknorpels beurteilten [95,132]. Sowohl bei Lakhal et al. [95] (19 Probanden) als auch bei Or et al. [132] (11 Probanden) wurde jedoch eine vergleichsweise geringe Probandenzahl analysiert, daher ist die Übertragbarkeit auf eine große Population fraglich. Or et al. führten die Messungen zusätzlich mit dem 3D-Ultraschall durch und konnten dabei feststellen, dass sich der Ultraschall gut eignet, um die oberen Atemwege darzustellen und mögliche Engstellen der Atemwege schnell zu objektivieren [132].

Größere Durchmesser bei Männern im Vergleich zu Frauen wurden auch von Coordes et al. 2011 [45] erhoben, wobei sie ebenfalls zu sehr ähnlichen Messergebnissen kamen (Tab. 43). Die Durchmesser wurden bei 159 Probanden (109 Männer, 50 Frauen) mittels CT auf der Ebene der laryngotrachealen Engstelle bestimmt, welche als subcricoidal beschrieben wurde [45]. Diese Stelle wird aufgrund der direkten anatomischen Nähe mit den maximalen Durchmessern des Ringknorpels dieser Arbeit verglichen.

Variabilität des Kehlkopfes

Gerade durch den komplexen Aufbau des Kehlkopfes ist seine Rekonstruktion eine große Herausforderung [74]. Und obwohl inzwischen unterschiedliche Stents entwickelt wurden, welche möglichst realitätsgetreu der laryngealen Anatomie sein sollten [119], gibt es nach wie vor Komplikationen wie z.B. die Bildung von Granulationsgewebe [22,78,119,136] oder Verlegung durch Schleimansammlung [119,136]. Auch ist der kraniale Teil des Ringknorpels schmaler als der kaudale [95], was die breite Variabilität des Cricoids je nach Ebene weiter untermauert. Dies wurde auch von Eckel et al. 1994 [82] bei der Untersuchung des Kehlkopfes von 53 Probanden (28 Männer, 25 Frauen) gezeigt. Während der transversale Innendurchmesser des Cricoids bei beiden Geschlechtern am unteren Rand größer war als am kranialen Rand, nahm der anterior-posteriore Durchmesser von kranial nach kaudal ab. Die Ergebnisse von Eckel et al. [82] sind bei beiden Geschlechtern am kranialen Cricoidrand gut vergleichbar mit den Ergebnissen dieser Arbeit. Zudem legen diese Messergebnisse die Vermutung nahe, dass von Anand et al. 2018 [135] an 31 Leichen (19 Männer, 12 Frauen) eine kaudalere Messebene bestimmt wurde, da bei beiden Geschlechtern ein größerer transversaler Durchmesser vorlag, während der anterior-posteriore Durchmesser kleiner war als in dieser Arbeit. Auch Zaghi et al. 2016 [133] bestimmte aufgrund größerer Durchmesser möglicherweise eine kaudalere Messebene.

Gerade idiopathische subglottische Stenosen sind auf der Ebene des Ringknorpels sowie dem 1. und 2. Trachealring lokalisiert [133], weshalb in jenem Bereich das Lumen in Bezug auf die notwendige Erweiterung, auch mittels Stenteinlage, bekannt sein sollte. Es konnte gezeigt werden, dass nach einer

totalen Cricoidektomie die membranöse Hinterwand der Trachea aufgrund von fehlender Stabilität des Ringknorpels zum Kollaps neigt und dadurch eine Dekanülierung erschwert sein bzw. nicht ermöglicht werden kann [137]. Dies macht erneut die Notwendigkeit der Kenntnis über die genaue Anatomie des Kehlkopfes mit einem möglichen Erhalt des Ringknorpels bei einer Rekonstruktion deutlich.

Einfluss der ethnischen Herkunft

Schon mehrmals wurde die ethnische Herkunft als Einflussfaktor auf die Dimensionen des Ringknorpels diskutiert [44,82,85]. Daraus lässt sich schließen, dass in Abhängigkeit von der Herkunft unterschiedliche Instrumente und Stentgrößen genutzt werden sollten. Ajmani et al. 1990 [131] fanden bei 40 afrikanischen Leichen (28 Männer, 12 Frauen) wesentlich größere Durchmesser des Ringknorpels im Vergleich zu den Ergebnissen dieser Arbeit und den anderen genannten Vergleichsstudien (Tab. 43). Bei der Untersuchung wurden Muskeln und Bänder von den Präparaten entfernt [131], was ebenfalls größere Innendurchmesser erklären kann. Dennoch ist der Einfluss unterschiedlicher Ethnien weiterhin denkbar. Zwischen Kaukasiern (59 Männer, 41 Frauen) und Chinesen (55 Männer, 45 Frauen) konnte Tai et al. 2016 [138] bei beiden Geschlechtern keinen Unterschied des direkt subcricoidalen transversalen Durchmessers feststellen. Im Hinblick auf einen internationalen Vergleich und den Einfluss durch die Herkunft wären weitere Studien interessant.

Maximaler anterior-posteriore Durchmesser vs. maximaler transversaler Durchmesser

Die Abschätzung, ob der transversale oder anterior-posteriore Durchmesser kleiner ist, trägt entscheidend zur Begrenzung eines eingeführten Endotrachealtubus [8,45] oder Instruments bei und sollte auch bei einer Stenteinlage [8] oder Rekonstruktion des Larynx beachtet werden. Festzustellen ist, dass bei Anand et al. [135] und Ajmani et al. [131] der transversale Durchmesser bei beiden Geschlechtern größer war als der anterior-posteriore Durchmesser. Bei allen anderen genannten Autoren war der transversale

Durchmesser kleiner [45,82,95,132,133], wie es auch in dieser Arbeit festgestellt wurde (Tab. 43). Da in Abhängigkeit von der Ebene die Durchmesser jedoch unterschiedliche Dimensionen haben können [82], lässt sich hierzu nur schwer eine verallgemeinernde Aussage treffen und weitere Forschungen zur Objektivierung des Ringknorpels sollten angestrebt werden. Da das Geschlecht als bedeutendster Einflussfaktor auf die Dimensionen des Ringknorpels gilt, sollte dies für die anzustrebenden Zielgrößen einer Rekonstruktion der Atemwege bei einer SGS entscheidend sein.

Einfluss des Alters

In dieser Studie zeigte sich ein auffälliger Einfluss des Alters auf APmax, wobei ≥ 50- Jährige einen kleineren Durchmesser hatten als Probanden < 50 Jahren. Bisher konnte keine Studie gefunden werden, welche einen auffälligen Einfluss durch das Alter in einer erwachsenen Population auf diesen Parameter beschreibt. Dennoch zeigte sich keine Korrelation zwischen dem Alter und APmax. Ein Einfluss durch das Alter auf den transversalen Durchmesser konnte nicht festgestellt werden, was sich mit den Ergebnissen von Tai et al. 2016 deckt [138].

Eine bedeutendere Rolle scheint das Alter im Hinblick auf die Dimensionen des Ringknorpels bei Kindern zu haben. So zeigte Wani et al. 2016 [83], dass der transversale und anterior-posteriore Durchmesser bei Kindern (1 Monat - 10 Jahre) mit zunehmendem Alter größer wurde, wobei es zu einer breiten Variation der Verhältnisse beider Durchmesser zueinander zwischen den Altersgruppen kam [83]. Bedingt durch die kleineren Atemwege bei Kindern besteht in dieser Patientengruppe eine besondere Herausforderung in der chirurgischen Rekonstruktion [139].

Vor allem bei der Nutzung von zu großen Tubusgrößen kann es zu Schädigungen der Atemwege kommen [8,34]. Da nach Erkenntnissen dieser Arbeit APmax bei ≥ 50- Jährigen auffällig kleiner ist als bei jüngeren Probanden, ist dies ein wichtiger Hinweis, bei dieser Patientengruppe potentiell kleinere Endotrachealtuben sowie Stentgrößen, zu verwenden.

Einfluss des Körpergewichts und der Körpergröße

Bislang wurden nur wenige Arbeiten zum Einfluss des Körpergewichts und der Körpergröße auf den Ringknorpel publiziert. Dies ist nach Erkenntnis der Autoren die erste Arbeit, die innerhalb der einzelnen Gewichts- und Größenklassen die Dimensionen des Ringknorpels beschreibt.

Die Ergebnisse zeigten, dass sowohl APmax als auch LLmax mit zunehmendem Körpergewicht und Körpergröße anstiegen. Beide Faktoren zeigten in der univariaten Analyse einen auffälligen Einfluss auf diese Parameter. Trotzdessen hatten das Körpergewicht und beide Durchmesser nur eine geringe Korrelation zueinander. Randestad et al. 2000 [8], welche die cricoidalen Durchmesser bei 61 Leichen (34 Männer, 27 Frauen) bestimmten, konnten keinen linearen Zusammenhang zwischen dem Körpergewicht und beiden Durchmessern feststellen, ebenso wenig wie Coordes et al. 2011 [45] im Hinblick auf den transversalen Durchmesser. Insgesamt war das Körpergewicht in der multivariaten Regressionsanalyse der am wenigsten bedeutende Einflussfaktor und scheint daher zur Orientierung bei einer Stentauswahl oder einer chirurgischen Rekonstruktion eher vernachlässigbar zu sein.

Die Körpergröße hingegen hatte eine mittlere Korrelation zu beiden maximalen Durchmessern und zeigte sich auch in der multivariaten Regressionsanalyse direkt nach dem Geschlecht als zweitwichtigste Einflussgröße auf diese Durchmesser. Auch Jain et al. 2008 [85], welche den Ringknorpel von 40 Leichen (20 Männer, 20 Frauen) beurteilte und Coordes et al. [45] stellten eine mittlere Korrelation zum transversalen Durchmesser fest (Tab. 44). Randestad et al. [8] konnte einen linearen Zusammenhang zwischen den Durchmessern und der Körpergröße nicht bestätigen.

Tab. 44: Vergleichsstudien zu den Korrelationen zwischen der Körpergröße und LLmax

Korrelation	Jain et al. 2008 [85]		Coordes et al. 2011 [45]	Diese Studie, 2018
	Männer	Frauen	Beide Geschlechter	Beide Geschlechter
LLmax vs. Körpergröße	0,576	0,752	0,51*	0,650**

* Korrelation nach Pearson, ** Korrelation nach Spearman

Da in dieser Arbeit die einzelnen Gewichts- und Größenklassen nicht auf eine Geschlechterverteilung analysiert wurden, wäre dies ein weiterer Aspekt zur

näheren Spezifizierung des Ringknorpels zwischen Männern und Frauen, zudem gezeigt wurde, dass Frauen trotz gleicher Körpergröße wie Männer einen 3,5 mm kleineren Durchmesser haben können [140].

Relevanz der untersuchten Einflussfaktoren

Nach Beurteilung der multivariaten Regressionsanalyse gilt die Körpergröße nach dem Geschlecht als zweitrelevantester prädiktiver Marker zur Abschätzung des anterior-posterioren und transversalen Durchmessers des Cricoids, weshalb vor allem diese beiden Einflussfaktoren zur Größenwahl von endotracheal eingeführten Instrumenten und Tuben berücksichtigt werden sollten. Das Körpergewicht und das Alter scheinen einen vernachlässigbaren Einfluss auf die maximalen Durchmesser zu haben, wobei Tai et al. 2016 [138] im Hinblick auf den transversalen Durchmesser zu der gleichen Schlussfolgerung kam (Tab. 45).

Tab. 45: Vergleichstudie zur Regressionsanalyse zu Einflussfaktoren auf LLmax

		Tai et al. 2016 [138]			Diese Studie, 2018		
Abhängige Variable	**Unabhängige Variable**	**Schätzer**	**95%-KI**	**p-Wert**	**Schätzer**	**95%-KI**	**p-Wert**
LLmax	Geschlecht	weiblich 2,24	1,6 - 2,88	<0,001	männlich -3,339	-3,490 - -3,188	<0,001
	Alter	0,01	0,0 - 0,03	0,11	0,019	0,014 - 0,023	<0,001
	Körpergewicht	-0,01	-0,03 - 0,01	0,58	-0,007	-0,011 - -0,003	0,001
	Körpergröße	0,13	0,09 - 0,17	<0,001	0,060	0,050 - 0,069	<0,001

4.3.2 Transversaler Durchmesser 4 mm von anterior

LL4mmVA hatte im Mittel einen Wert von 11,9 ± 1,6 mm. Der ICC zeigte eine gute Reliabiliät und wurde in Teil 1 diskutiert. Insgesamt sind hier Messwerte < 5 mm kritisch zu betrachten, können jedoch ggf., analog zur Messung des APmax, auf Störungen im MRT-Bild zurückgeführt werden. Dieser Parameter wurde bisher nicht in der Literatur beschrieben und wird als weiterer Referenzwert verwendet. Gerade aufgrund der hohen Varibilität des cricoidalen Lumens sollte ein zusätzlicher Parameter die Dimensionen näher spezifizieren, um in Abhängigkeit weiterer Einflussfaktoren die individualisierte rekonstruktive Chirurige zu

optimieren. Diese Spezifizierung lässt zudem weitere Hinweise über die Form des Ringknorpels zu, die bereits untersucht wurde [44].

Einfluss des Geschlechts

Männer hatten einen auffällig größeren Durchmesser mit 13,4 ± 2,7 mm als Frauen mit 12,3 ± 2,3 mm. Auch wenn für den transversalen Durchmesser 4 mm von anterior kleinere Messwerte als für den maximalen transversalen Durchmesser erwartet wurden, war der Unterschied des LL4mmVA zwischen Männern und Frauen doch geringer als angenommen. So scheinen Männer und Frauen sich in ihren transversalen Durchmessern im anterioren Bereich des Cricoids stark anzunähern. In der multivariaten Regressionsanalyse zeigte das Geschlecht den bedeutendsten Einfluss auf LL4mmVA.

Einfluss des Alters

Es wurde zwischen den Altersklassen zunächst ein ähnlicher Verlauf wie bei LLmax erwartet. Während LLmax jedoch stetig anstieg, kam es bei LL4mmVA zu Schwankungen im Verlauf der Altersklassen. Es zeigte sich, dass das Alter nur einen geringen Einfluss auf diesen Parameter hatte, ein linearer Zusammenhang zwischen diesem Parameter und dem Alter konnte nicht gezeigt werden. Ebenfalls lieferte die Regressionsanalyse für das Alter nur einen geringen Einfluss mit einem vernachlässigbaren Schätzer-Wert (0,010).

Einfluss des Körpergewichts und der Körpergröße

Sowohl das Körpergewicht als auch die Körpergröße zeigten einen signifikanten Einfluss auf LL4mmVA. Bei zunehmendem Gewicht sowie zunehmender Körpergröße wurde der Durchmesser jeweils größer. Zwischen dem Körpergewicht und diesem Parameter ergab sich jedoch nur eine geringe Korrelation, während zur Körpergröße ein mittlerer linearer Zusammenhang gezeigt wurde. Erwartungsgemäß hatte dieser Parameter zwischen den Gewichts- und Größenklassen einen ähnlichen Verlauf wie LLmax. In der multivariaten Regressionsanalyse zeigte sich, dass vor allem die Körpergröße einen

bedeutenden Einfluss auf LL4mmVA hatte. Das Körpergewicht scheint weniger relevant für eine Vorhersage dieses Durchmessers zu sein.

4.3.3 Querschnittsfläche

Die Querschnittsfläche hatte einen Mittelwert von 212,0 mm² ± 63,2 mm². Der ICC zeigte eine sehr gute Übereinstimmung zwischen der ersten und der zweiten Messreihe. Im Bland-Altman-Plot lag lediglich ein Wert außerhalb der Grenzen. Diese geringe Abweichung kann dadurch begründet sein, dass auf Ebene des Arcus cricoideus durch geringe Schleimablagerung und einer rundlichen Form des Ringknorpels eine gute Abgrenzung des luftleitenden Lumens zur Mukosa dargestellt werden konnte.

Einfluss des Geschlechts

Männer hatten mit einer Querschnittsfläche von 267,7 ± 39,4 mm² wesentlich größere Dimensionen als Frauen mit 159,1 ± 24,0 mm², wobei das Geschlecht in der Regressionsanalyse derjenige prädiktive Faktor zur Vorhersage der cricoidalen Fläche mit dem größten Schätzer-Wert war (-92,525).

Zaghi et al. 2016 [133] beschrieben in ihrer Arbeit, dass eine abnehmende Querschnittfsfläche eine idiopathische subglottische Stenose kennzeichnet. Auch in der Klassifikation von Cotton/Myer [21] trägt dieser Parameter bei der Analyse der Querschnittfsfläche aufgrund der Abnahme des Lumens zur Beurteilung einer Trachealstenose bei. Diese Klassifikation orientiert sich an der Tubusgröße, welche in der Regel mittels Innendurchmeser angegeben wird. Da jedoch je nach Hersteller unterschiedliche Außendurchmesser vorliegen können, kann eine Vereinheitlichung schwierig sein [45]. Durch die Ermittlung der cricoidalen Fläche einer bevölkerungsrepräsentativen Population sollten standardisierte Werte bestimmt werden, die eine weitere Orientierung zur Einschätzung des Stenosegrades liefern.

Da vor allem Frauen an idiopathischen subglottischen Stenosen leiden, verglichen Zaghi et al. 2016 [133] mittels CT die cricoidale Querschnittsfläche zwischen gesunden Probandinnen und Patientinnen mit idiopatischer SGS, wobei Erkrankte

eine signifikant kleinere Fläche hatten als Gesunde. Zum Vergleich zu den Ergebnissen der vorliegenden Arbeit wurden von Zaghi et al. [133] die 30 gesunden Probandinnen gewählt, wobei diese wesentlich größere Querschnittsflächen besaßen als die Probandinnen dieser Untersuchung (Tab. 46). Denkbar wäre daher, dass bei Zaghi et al. [133] eine kaudalere Messebene im Vergleich zu dieser Studie beurteilt wurde. Aufgrund des häufigeren Auftretens von SGS bei Frauen wurde ein hormoneller Einfluss vermutet [141]. Nach weiterer Untersuchung konnte dabei gezeigt werden, dass Patientinnen mit einer subglottichen Stenose eine höhere Konzentration an Progesteron- und Östrogen-alpha – Rezeptoren aufweisen [142]. Weitere Untersuchungen zur Bestimmung eines hormonellen Einflusses auf SGS wären sicher interessant.

Auch bei Leboulanger et al. 2016 [143], welche mittels akustischer Reflexionsmethode [144] die Querschnittsfläche der Atemwege bei 50 Schwangeren bestimmten, konnte im Verlauf der Schwangerschaft (1., 2. und 3. Trimester sowie 0-48 Stunden post partum und 1 Monat post partum) kein auffälliger Unterschied der subglottischen Querschnittfsfläche festgestellt werden. Allerdings wurde in der Studie ein zunehmendes Ödem des Pharynx im Verlauf der Schwangerschaft beschrieben, was die Sicht und damit die Intubation erschweren kann [143]. Die von Leboulanger et al. [143] angegebenen Messwerte für die Querschnittsfläche im 1. Trimester lagen wesentlich höher als die Werte in der vorliegenden Arbeit (Tab. 46), wobei eine genaue Messebene der subglottischen Fläche nicht weiter festgelegt wurde.

Tab. 46: Vergleichsstudien zu CSA

	Zaghi et al. 2016 [133]	**Leboulanger et al. 2016 [143]**	**Diese Studie, 2018**
Männer	-	-	267,7 ± 39,4 mm²
Frauen	193 ± 55 mm²	Schwangere 1. Trimester: 223 ± 37 mm²	159,1 ± 24,0 mm²

Bei der Literaturrecherche konnte keine Vergleichsstudie gefunden werden, in der die Querschnittsfläche bei Männern bestimmt worden war. In dieser Arbeit zeigte sich jedoch das Geschlecht als der relevanteste Einflussfaktor auf die CSA des Ringknorpels.

Einfluss des Alters

Das Alter hatte nur einen geringen Einfluss auf die cricoidale Fläche, wobei keine Korrelation zwischen dem Alter und diesem Parameter vorlag. Insgesamt scheint dieser Einflussfaktor zur Abschätzung der CSA des Ringknorpels vernachlässigbar zu sein. Jedoch hat das Alter wohl vor allem in der kindlichen Entwicklung eine Bedeutung für die Dimensionen des Ringknorpels, zudem Kinder im Vergleich zu Erwachsenen eine kleinere Querschnittfsfläche der Atemwege haben und es somit durch eine geringer Abnahme des Innenlumens bereits zur Beschwerden kommen kann [13].

Einfluss des Körpergewichts und der Körpergröße

Sowohl das Körpergewicht als auch die Körpergröße hatten einen auffälligen Einfluss auf die CSA des Ringknorpels, wobei diese mit Zunahme der genannten Einflussfaktoren größer wurde. Das Körpergewicht hatte jedoch nur eine geringe Korrelation zur Querschnittfsläche und auch in der multivariaten Regressions-analyse wurde dieses zusammen mit dem Alter als zu vernachlässigende Einflussfaktoren auf die Größe der cricoidalen Fläche betrachtet. Die Körpergröße zeigte hingegen einen mittleren linearen Zusammenhang zur CSA und war, nach dem Geschlecht, der zweitwichtigste Einflussfaktor.

Verengungen der Atemwege, vor allem im subglottischen Bereich, können zu turbulenten Strömungen führen, welche die Scherkräfte auf die Trachealwand erhöhen. Dies kann bei Trachealstenosen und Stenosen des LTÜGs zu einer weiteren Reizung der Trachea führen [145]. Vor diesem Hintergrund ist eine Erweiterung des stenosierten Lumens mittels Rekonstruktion oder Stent-Einlage auf physiologische und bevölkerungsrepräsentative Normwerte wünschenswert, wobei auch die Querschnittsfläche ein Marker der anzustrebenden Zielgröße sein kann. Mit Berücksichtigung der Körpergröße in Kombination mit dem Geschlecht könnten so weitere Hinweise für die optimale Tubus- oder Stentgröße und das zu erweiternde Lumen ermittelt werden.

4.3.4 Einfluss einer diagnostizierten Schilddrüsenerkrankung

In der untersuchten Population lag bei 640 Probanden (19,6 %) eine Schilddrüsenerkrankung vor, 2.518 Probanden (79,6 %) verneinten eine solche Erkrankung. Daten zur Art und Therapie lagen nicht vor. Bei der Analyse der Bedeutung einer diagnostizierten Schilddrüsenerkrankung ergab sich ein auffälliger Einfluss auf alle gemessenen Parameter des Ringknorpels. Bekannt ist, dass bei einer Vergrößerung der Schilddrüse die Atemwege komprimiert oder verdrängt werden können [46–48]. Mögliche Ursachen können Struma oder Knoten sein [48]. Auch in dieser Arbeit zeigte sich dementsprechend, dass Probanden mit einer diagnostizierten Schilddrüsenerkrankung signifikant kleinere Dimensionen des Ringknorpels hatten als Probanden, welche eine Erkrankung der Schilddrüse verneinten.

Interessant ist jedoch, dass sich zwischen dem Schilddrüsenvolumen und den Dimensionen des Ringknorpels der vorliegenden Arbeit nur eine geringe und zudem positive Korrelation zeigte. Erwartet wurde eher eine negative Korrelation, aufgrund einer möglichen Einengung der Atemwege durch eine vergößerte Schilddrüse [46–48]. Die Daten zum Schilddrüsenvolumen wurden dabei vom Institut für Community Medicine, Greifswald, angefordert. Unklar ist, welchen Ausschlusskriterien die ausgemessenen Schilddrüsenvolumina unterlagen. In dieser Arbeit wurden diejenigen Probanden ausgeschlossen, bei denen bildmorphologisch eine schilddrüsenbedingte Deviation oder Kompression der Trachea vorlag, wobei dies in den meisten Fällen mit einer vergleichsweise großen Schilddrüse einherging. In der Literatur wurde weiterhin beschrieben, dass Probanden trotz großem Schilddrüsenvolumen (304 cm^3) keine Beschwerden hatten, während bei Probanden mit einem niedrigen Volumen (40,4 cm^3) Hinweise auf eine obere Atemwegsobstruktion auftraten [146]. Dies unterstreicht die variablen Auswirkungen einer vergrößerten Schilddrüse auf die Atemwege und sollte in weiteren Studien genauer untersucht werden.

4.3.5 Einfluss einer durchgemachten Radiojodtherapie

Der Einfluss einer Strahlentherapie, wie z.B. bei einer Radiojodtherapie, wurde bereits als Ursache für Stenosen der Atemwege beschrieben [4,57], wobei in dieser Arbeit kein auffälliger Einfluss durch eine Radiojodtherapie auf die Dimensionen des Ringknorpels festgestellt werden konnte. Erklärbar wäre dieses Ergebnis durch die sehr geringe Anzahl an Probanden (n = 79), welche einer durchgemachte RJT angaben. Im Gegensatz dazu verneinten 561 Probanden eine durchgemachte RJT. Für ein vaildes Ergebnis zu dieser Fragestellung sind weitere Untersuchungen mit höheren Fallzahlen erforderlich.

4.4 Prävalenzen

Mit der vorliegenden Arbeit wird erstmals anhand von 3.202 Probanden eine Angabe zur Prävalenz von Trachealstenosen in einer norddeutschen Bevölkerung beschrieben, die eine Übertragung auf die Allgemeinbevölkerung ermöglicht. Insgesamt war die Häufigkeit einer Trachealstenose mit 0,4 % (13/ 3.202 Probanden) der Probanden gering, überschreitet jedoch die Häufigkeit bei Vorliegen einer seltenen Erkrankung (bis 5 Erkrankte/ 10.000 Menschen) [147]. Patienten mit TS leiden in der Regel unter Atemnot und chronischem Husten. Eine Flachlagerung, wie sie zur Bildgebung mittels MRT notwendig ist, kann diese Symptomatik verschlimmern [57], weshalb eine Abbildung von Probanden mit Trachealstenose im MRT erstaunlich ist. Entsprechend ist ein negativer Selektionseffekt zu erwarten und die berichtete Prävalenz dürfte das Krankheitsbild tendenziell unterschätzen. Allerdings können mittels Bildgebung durch die MRT Veränderungen durch Atemvariationen nicht ausgeschlossen werden und fraglich ist, ob durch Exspiration während der Bildaufnahme eine Veränderung mit Kollaps des luftleitenden Lumens abgebildet wurde [117].

Über die Ursachen der abgebildeten Trachealstenosen lassen sich zum aktuellen Stand nur Vermutungen anstellen. Die häufigste Ursache einer Trachealstenose wird jedoch als iatrogen beschrieben [1,4,25–27]. Ein besonderes Risiko tragen Patienten, welche an einer überschießenden Narbenbildung (Keloid) leiden, welche eine Stenose fördert und meist zu schweren Stenosegraden (Cotton/Myer-Klassifikation Grad III und IV) führt [30]. Weiterhin wurde um 1970 für die Narkose

u.a. Lachgas verwendet. Da das Gas in den Balloncuff diffundieren konnte, kam es teilweise zu hohen Cuffdrücken, wobei Drücke im Bereich von 100 mmHg gemessen wurden [148]. Empfohlen wurde, einen Cuffdruck zwischen 20 – 30 cmH_2O (15 - 22 mmHg) anzustreben [149]. Ein Rückgang der Inzidenz von Post-Intubations-Stenosen konnte durch regelmäßige Cuffdruckkontrollen sowie die Entwicklung verbesserter Materialien erzielt werden [30].

Um die Ätiologie der festgestellten Trachealstenosen weiter zu ergründen, sind weitere Angaben zu möglichen Autoimmunerkrankungen (z.B. Wegener Granulomatose), pulmonalen Erkrankungen und Intubationen oder Trauma [18] sowie einer bekannten Keloid-Bildung [30] notwendig. Da die Trachealstenosen aktuell nur bildmorphologisch beschrieben wurden, wären weitere Untersuchungen mittels Bodyplethysmographie sinnvoll, um die Diagnose zu sichern [150].

Weiterhin wurde die Prävalenz einer verschobenen Trachea außerhalb der thorakalen Mittellinie oder einer sichelförmigen Kompression des Lumens bei einer vorliegenden pathologischen Veränderung der Schilddrüse bestimmt. In dieser Arbeit zeigte sich bei 0,7 % (24/ 3.202 Probanden) der untersuchten Population eine Trachealaffektion durch die Schilddrüse. Diese Patienten haben ein hohes Komplikationsrisiko bei medizinischen Interventionen. Aufgrund des bereits eingeengten oder verdrängten Lumens kann es bei einer Intubation zu unerwartet schwerer Atemwegssicherung [151] oder bei Trauma durch Blutung oder Schwellung zu einer raschen Verlegung des Restlumens kommen [152].

5 Zusammenfassung

In dieser Arbeit wurden die Dimensionen der Trachea inklusive des laryngotrachealen Übergangs (LTÜG) sowie speziell des Ringknorpels, einer klinischen Engstelle, anhand von MRT-Bildern der SHIP-Studie erhoben und der Einfluss von demographischen und anamnestischen Faktoren auf die bestimmten Parameter geprüft. Das Ziel war die Erhebung bevölkerungsrepräsentativer Normwerte der Trachea und des LTÜGs vorzuschlagen. Weiterhin sollten anhand der Analyse spezifischer Einflussfaktoren zusätzliche Hinweise für die Orientierung bei der chirurgischen Rekonstruktion einer Trachealstenose oder subglottischen Stenose erhalten werden. Darüber hinaus können etablierte Normwerte eine Hilfestellung bei der Wahl der optimalen Stent- oder Tubusgröße sein.

Als Parameter wurden der maximale anterior-posteriore Durchmesser (APmax), der maximale transversale Durchmesser (LLmax), der transversale Durchmesser 4 mm von anterior (LL4mmVA), das Trachealvolumen (Vol) und die Querschnittsfläche (CSA) des Ringknorpels bestimmt. Im Rahmen der statistischen Analyse wurde der Einfluss von Geschlecht und Alter auf die trachealen Dimensionen sowie zusätzlich der Einfluss von Körpergewicht, Körpergröße, BMI, Schilddrüsenvolumen, einer diagnostizierten Schilddrüsenerkrankung (DS) und einer diagnostizierten Radiojodtherapie (RJT) auf die Parameter des Ringknorpels untersucht. Zusätzlich wurden Daten zur Prävalenz einer Trachealstenose und einer Trachealaffektion durch die Schilddrüse erhoben.

Die Trachea inklusive dem LTÜG wurde anhand von MRT-Bildern bei 792 Probanden (383 Männer, 409 Frauen) ausgemessen. APmax betrug im Mittel 16,5 ± 2,7 mm, LLmax hatten einen durchschnittlichen Messwert von 16,7 ± 3,2 mm. LL4mmVA, welcher bisher nicht in der Literatur beschrieben wurde, sollte als zusätzlicher Referenzwert dienen und betrug im Mittel 12,9 ± 2,5 mm. Das Volumen der Trachea inklusive des LTÜGs lag bei 18,0 ± 4,4 ml. Bei allen Parametern der Trachea und des LTÜGs wurden bei Männern signifikant größere Messwerte festgestellt als bei Frauen ($p < 0,001$). Das Alter zeigte hingegen keinen signifikanten Einfluss auf die erhobenen Parameter.

Zur weiteren Analyse wurde der Ringknorpel auf Ebene des Arcus cricoideus anhand von MRT-Bildern bei 3.165 Probanden (1.540 Männer, 1.625 Frauen) untersucht. APmax betrug auf dieser Ebene durchschnittlich 18,1 ± 2,7 mm, LLmax 14,8 ± 2,5 mm. Der Mittelwert von LL4mmVA lag bei 11,9 ± 1,6 mm und der mittlere CSA betrug 212,0 ± 63,2 mm². In der univariaten Analyse zeigten das Geschlecht, das Körpergewicht und die Körpergröße einen signifikanten Einfluss auf alle untersuchten Parameter (je $p < 0,001$), während das Alter nur APmax signifikant beeinflusste. Probanden mit einer DS hatten bedeutend kleinere Messwerte des Cricoids als Probanden ohne eine solche Diagnose ($p < 0,001$). Den insgesamt größten Einfluss auf die Dimensionen des Ringknorpels zeigten nach multivariater Regressionsanalyse jedoch das Geschlecht und die Körpergröße. Daher sollten diese beiden Faktoren entscheidend sein für die Vorhersage der anzustrebenden Zielgrößen bei der Rekonstruktion der Atemwege oder bei der Wahl eines einzusetzenden Stents oder Tubus. Die anderen untersuchten Einflussfaktoren hatten einen geringeren Einfluss auf die Parameter des Ringknorpels.

Zusätzlich wurde erstmals anhand einer norddeutschen Population die Prävalenz einer Trachealstenose bestimmt, welche bei 0,4 % lag. Bei 0,7 % der untersuchten Probanden wurde eine Trachealaffektion durch die Schilddrüse festgestellt.

Die Therapie der Trachealstenose und vor allem von Stenosen des LTÜGs stellt immer noch einen anspruchsvollen Eingriff dar, der mit bestehenden Komplikationen verbunden ist. Vor allem durch die hohe Varianz der Atemwege ist es schwer, die optimale Stent- oder Tubusgröße zu wählen. Durch die Etablierung epidemiologisch repräsentativer Normwerte der Trachea und des LTÜGs erhoffen sich die Autoren eine Untersützung und Orientierung bei der chirurgischen Rekonstruktion der Atemwege zu liefern.

Literaturverzeichnis

1. Zias N, Chroneou A, Tabba MK, Gonzalez AV, Gray AW, Lamb CR, et al. Post tracheostomy and post intubation tracheal stenosis: report of 31 cases and review of the literature. BMC Pulm Med. 2008;8;Published 2008 Sep 21.
2. Naunheim MR, Paddle PM, Husain I, Wangchalabovorn P, Rosario D, Franco RA, JR. Quality-of-Life Metrics Correlate With Disease Severity in Idiopathic Subglottic Stenosis. Laryngoscope. 2018;10.1002/lary26930;Published online ahead of print, 2018 Mar 7.
3. Bibas BJ, Cardoso PFG, Salati M, et al. Health-related quality of life evaluation in patients with non-surgical benign tracheal stenosis. J Thorac Dis. 2018;10:p.4782–4788.
4. D'Andrilli A, Venuta F, Rendina EA. Subglottic tracheal stenosis. J Thorac Dis. 2016;8:p.140–147.
5. Williamson JP, James AL, Phillips MJ, Sampson DD, Hillman DR, Eastwood PR. Quantifying tracheobronchial tree dimensions: methods, limitations and emerging techniques. Eur Respir J. 2009;34:p.42–55.
6. Duncker H-R, Kummer W: Kapitel 6.3: Untere Atemwege. In: Benninghoff A, Drenckhahn D (eds). Anatomie: Makroskopische Anatomie, Histologie, Embryologie, Zellbiologie. 17th ed. Bd. 1: Zelle, Gewebe, Entwicklung, Skelett- und Muskelsystem, Atemsystem, Verdauungssystem, Harn- und Genitalsystem. München: Elsevier Urban & Fischer; 2008:p.547-580.
7. Macchiarini P, Verhoye JP, Chapelier A, Fadel E, Dartevelle P. Partial cricoidectomy with primary thyrotracheal anastomosis for postintubation subglottic stenosis. J Thorac Cardiovasc Surg. 2001;121:p.68–76.
8. Randestad A, Lindholm CE, Fabian P. Dimensions of the cricoid cartilage and the trachea. Laryngoscope. 2000;110:p.1957–1961.
9. Iro H, Waldfahrer F. Kapitel 17: Larynx und Trachea. In: Probst R, Grevers G, Iro H (eds). Hals-Nasen-Ohren-Heilkunde. 3rd ed. Stuttgart: Thieme; 2008:p.305-349.
10. Bribriesco A, Patterson GA. Cricothyroid Approach for Emergency Access to the Airway. Thorac Surg Clin. 2018;28:p.435–440.

11. Graham DB, Eastman AL, Aldy KN, et al. Outcomes and long term follow-up after emergent cricothyroidotomy: is routine conversion to tracheostomy necessary?. Am Surg. 2011;77:p.1707–1711.
12. Gillespie MB, Eisele DW. Outcomes of emergency surgical airway procedures in a hospital-wide setting. Laryngoscope. 1999;109:p.1766–1769.
13. Monnier P. Pediatric Airway Surgery: Management of Laryngotracheal Stenosis in Infants and Children. Kapitel 2: Applied Surgical Anatomy of the Larynx and Trachea. Berlin, Heidelberg: Springer; 2011;p.7-29.
14. Teixido MT, Leonetti JP. Recurrent laryngeal nerve paralysis associated with thoracic aortic aneurysm. Otolaryngol Head Neck Surg. 1990;102:p.140–144.
15. Chen W, Lei J, You J, Lei Y, Li Z, Gong R, et al. Predictive factors and prognosis for recurrent laryngeal nerve invasion in papillary thyroid carcinoma. OncoTargets Ther. 2017;10:p.4485–4491.
16. Falase B, Ogadinma M, Majekodunmi A, Nimasahun B, Adeyeye O. The role of cervical mediastinoscopy in Nigerian thoracic surgical practice. Pan Afr Med J. 2016;24;Published 2016 Jun 10.
17. Lee C, Stack BC[J]. Intraoperative neuromonitoring during thyroidectomy. Expert Rev Anticancer Ther. 2011;11:p.1417–1427.
18. Ludwig F, Becke H.F. Kapitel 6: Erkrankungen der oberen Atemwege und der Trachea. In: Matthys H., Seeger W. (eds). Klinische Pneumologie. 4th ed. Heidelberg: Springer; 2008:p.217-227.
19. Tipler PA, Mosca G. Physik für Wissenschaftler und Ingenieure. Kapitel 13: Fluide. 6th ed. Heidelberg: Spektrum Akad. Verl.; 2009;p.493-530.
20. Steuer-Vogt MK, Strutz J: Kapitel 12.2: Trachea. In: Strutz J, Mann W (eds). Praxis der HNO-Heilkunde, Kopf- und Halschirurgie. 1st ed. Stuttgart: Thieme; 2001:p.518-526.
21. Myer CM, O'Connor DM, Cotton RT. Proposed grading system for subglottic stenosis based on endotracheal tube sizes. Ann Otol Rhinol Laryngol. 1994;103:p.319–323.
22. Bitar MA, Al Barazi R, Barakeh R. Airway reconstruction: review of an approach to the advanced-stage laryngotracheal stenosis. Braz J Otorhinolaryngol. 2017;83:p.299–312.

23. Ozkul Y, Songu M, Ozturkcan S, Arslanoglu S, Ates D, Dundar R, et al. Tracheal Resection with primary anastomosis. J Craniofac Surg. 2015;26:p.1933-1935.
24. Raman T, Chatterjee K, Alzghoul BN, Innabi AA, Tulunay O, Bartter T, et al. A bronchoscopic approach to benign subglottic stenosis. SAGE Open Med Case Rep. 2017;5;2050313X17713151;Published 2017 Jun 6.
25. Lorenz RR. Adult laryngotracheal stenosis: etiology and surgical management. Curr Opin Otolaryngol Head Neck Surg. 2003;11:p.467–472.
26. Wain JC. Postintubation tracheal stenosis. Chest Surg Clin N Am. 2003;13:p.231–246.
27. Peña J, Cicero R, Marín J, Ramírez M, Cruz S, Navarro F. Laryngotracheal reconstruction in subglottic stenosis: an ancient problem still present. Otolaryngol Head Neck Surg. 2001;125:p.397–400.
28. Kastanos N, Estopá Miró R, Marín Perez A, Xaubet Mir A, Agustí-Vidal A. Laryngotracheal injury due to endotracheal intubation: incidence, evolution, and predisposing factors. A prospective long-term study. Crit Care Med. 1983;11:p.362–367.
29. Stauffer JL, Olson DE, Petty TL. Complications and consequences of endotracheal intubation and tracheotomy. A prospective study of 150 critically ill adult patients. Am J Med. 1981;70:p.65–76.
30. Chang E, Wu L, Masters J, Lu J, Zhou S, Zhao W, et al. Iatrogenic subglottic tracheal stenosis after tracheostomy and endotracheal intubation: A cohort observational study of more severity in keloid phenotype. Acta Anaesthesiol Scand. 2019;63:p.905-912.
31. Planells F, Villalba D, Viviana F, Leiva V, Scrigna M, Distéfano E, et al. Prevalence and Characteristics of Tracheal Lesions Observed in Tracheostomized Patients. J Bronchology Interv Pulmonol. 2019;26:p.119-123.
32. Farzanegan R, Farzanegan B, Zangi M, Golestani Eraghi M, Noorbakhsh S, Doozandeh Tabarestani N, et al. Incidence Rate of Post-Intubation Tracheal Stenosis in Patients Admitted to Five Intensive Care Units in Iran. Iran Red Crescent Med J. 2016;18:e37574;Published 2016 Aug 2.
33. Zaunbauer W. Kapitel 9: Infrahyoidaler Hals, Tabelle 9.2: Läsionen des Larynx. In: Burgener FA, Herzog C, Meyers S, Zaunbauer W (eds).

Differenzialdiagnosen in der Computertomografie. 2nd ed. Stuttgart: Thieme; 2013:p.400.

34. D'Anza B, Knight J, Greene JS. Does body mass index predict tracheal airway size?. Laryngoscope. 2015;125:p.1093–1097.
35. Grillo HC, Cooper JD, Geffin B, Pontoppidan H. A low-pressure cuff for tracheostomy tubes to minimize tracheal injury. A comparative clinical trial. J Thorac Cardiovasc Surg. 1971;62:p.898–907.
36. Seegobin RD, van Hasselt GL. Endotracheal cuff pressure and tracheal mucosal blood flow: endoscopic study of effects of four large volume cuffs. Br Med J (Clin Res Ed). 1984;288:p.965-968.
37. Benjamin B. Prolonged Intubation Injuries of the Larynx: Endoscopic Diagnosis, Classification, And Treatment. Ann Otol Rhinol Laryngol. 2018;127:p.492–507.
38. Benjamin B, Holinger LD. Laryngeal Complications of Endotracheal Intubation. Ann Otol Rhinol Laryngol. 2008;117:Suppl 200: p.1-20.
39. Esteller-Moré E, Ibañez J, Matiñó E, Ademà JM, Nolla M, Quer IM. Prognostic factors in laryngotracheal injury following intubation and/or tracheotomy in ICU patients. Eur Arch Otorhinolaryngol. 2005;262:p.880–883.
40. Colice GL, Stukel TA, Dain B. Laryngeal complications of prolonged intubation. Chest. 1989;96:p.877–884.
41. Torres A, Gatell JM, Aznar E, el-Ebiary M, La Puig de Bellacasa J, González J, et al. Re-intubation increases the risk of nosocomial pneumonia in patients needing mechanical ventilation. Am J Respir Crit Care Med. 1995;152:p.137–141.
42. De La Garza Ramos, Rafael, Passias PG, Schwab F, Bydon A, Lafage V, Sciubba DM. Incidence, Risk Factors, and Mortality of Reintubation in Adult Spinal Deformity Surgery. Clin Spine Surg. 2017;30:p.896-900.
43. Karamanos E, Schmoekel N, Blyden D, Falvo A, Rubinfeld I. Association of Unplanned Reintubation with Higher Mortality in Old, Frail Patients: A National Surgical Quality-Improvement Program Analysis. Perm J. 2016;20:p.16-20.
44. Joshi M, Joshi S, Joshi S. Morphometric study of cricoid cartilages in Western India. Australas Med J. 2011;4:p.542–547.

45. Coordes A, Rademacher G, Knopke S, Todt I, Ernst A, Estel B, et al. Selection and placement of oral ventilation tubes based on tracheal morphometry. Laryngoscope. 2011;121:p.1225–1230.
46. Torchio R, Gulotta C, Perboni A, Ciacco C, Guglielmo M, Orlandi F, et al. Orthopnea and tidal expiratory flow limitation in patients with euthyroid goiter. Chest. 2003;124:p.133–140.
47. Dias T, Santos A, Mesquita C, Santos RM. Acute airway obstruction due to benign multinodular goitre. BMJ Case Rep. 2019;12:e228095;Published 2019 Apr 16.
48. Bartsch DK, Luster M, Buhr HJ, Lorenz D, Germer C-T, Goretzki PE. Indications for the Surgical Management of Benign Goiter in Adults. Dtsch Arztebl Int. 2018;115:p.1–7.
49. Anders HJ. Compression syndromes caused by substernal goitres. Postgrad Med J. 1998;74:p.327–329.
50. Agarwal A, Mishra AK, Gupta SK, Arshad F, Agarwal A, Tripathi M, et al. High incidence of tracheomalacia in longstanding goiters: experience from an endemic goiter region. World J Surg. 2007;31:p.832–837.
51. Leshnower BG, Morris RJ, Pechet TT. Management of an anterior mediastinal pheochromocytoma causing tracheomalacia. Ann Thorac Surg. 2007;84:p.2088–2090.
52. Sudre-Levillain I, Roman S, Nicollas R, Triglia JM. Tracheomalacia and tracheal dyskinesias. Arch Pediatr. 2001;8:p.757–762.
53. Jin S, Bao W. Huge thyroid adenoma with tracheomalacia. Clin Case Rep. 2018;6:p.1635–1636.
54. Succo G, Crosetti E, Pecorari GC, Nadalin J, Ragona R, Donadio PP, et al. Complications of tracheostomy in critically ill patients: comparison of dilation and surgical techniques - Abstract. Acta Otorhinolaryngol Ital. 2002;22(4 Suppl 71):p.1–11.
55. McNamara VM, Crabbe DCG. Tracheomalacia. Paediatr Respir Rev. 2004;5:p.147–154.
56. Stang MT, Armstrong MJ, Ogilvie JB, Yip L, McCoy KL, Faber CN, et al. Positional dyspnea and tracheal compression as indications for goiter resection. Arch Surg. 2012;147:p.621–626.

57. Scherer H. Kapitel 7: Trachea und Bronchien. In: Naumann HH, Scherer H (eds). Mit Beiträgen von Martin F und Schorn K. Differentialdiagnostik in der Hals-Nasen-Ohren-Heilkunde: Symptome - Syndrome - Grenzgebiete; 192 Tabellen. 2nd ed. Stuttgart: Thieme; 1998:p.401-412.
58. Kleinsasser N. Kapitel 6.7: Trauma to the Laryngeal and Tracheal. In: Anniko M, Bernal-Sprekelsen M, Bonkowsky V, Bradley P, Iurato S (eds). Otorhinolaryngology, Head and Neck Surgery. Springer Berlin Heidelberg; 2010:p.503-505.
59. Ciccone AM, Giacomo T de, Venuta F, Ibrahim M, Diso D, Coloni GF, et al. Operative and non-operative treatment of benign subglottic laryngotracheal stenosis. Eur J Cardiothorac Surg. 2004;26:p.818–822.
60. Bibas BJ, Terra RM, Oliveira Junior AL, Tamagno MFL, Minamoto H, Cardoso PFG, et al. Predictors for postoperative complications after tracheal resection. Ann Thorac Surg. 2014;98:p.277–282.
61. Elsayed H, Mostafa AM, Soliman S, Shoukry T, El-Nori AA, El-Bawab HY. First-line tracheal resection and primary anastomosis for postintubation tracheal stenosis. Ann R Coll Surg Engl. 2016;98:p.425–430.
62. Hentze M, Schytte S, Pilegaard H, Klug TE. Single-stage tracheal and cricotracheal segmental resection with end-to-end anastomosis: Outcome, complications, and risk factors. Auris Nasus Larynx. 2019;46:p.122–128.
63. Wright CD, Grillo HC, Wain JC, Wong DR, Donahue DM, Gaissert HA, et al. Anastomotic complications after tracheal resection: prognostic factors and management. J Thorac Cardiovasc Surg. 2004;128:p.731–739.
64. Marulli G, Rizzardi G, Bortolotti L, Loy M, Breda C, Hamad A-M, et al. Single-staged laryngotracheal resection and reconstruction for benign strictures in adults. Interact Cardiovasc Thorac Surg. 2008;7:p.227-230.
65. D'Andrilli A, Ciccone AM, Venuta F, Ibrahim M, Andreetti C, Massullo D, et al. Long-term results of laryngotracheal resection for benign stenosis. Eur J Cardiothorac Surg. 2008;33:p.440–443.
66. Conley JJ. Reconstruction of the subglottic air passage. Ann Otol Rhinol Laryngol. 1953;62:p.477–495.
67. Rethi A. An operation for cicatricial stenosis of the larynx. J Laryngol Otol. 1956;70:p.283–293.

68. Aboulker P, Lissac J, Saint-Paul O. On several respiratory accidents due to stricture of the laryngotracheal lumen following tracheotomy. Acta Chir Belg. 1960;59:p.553–562.
69. McDonald I.H., Stocks J.G. Prolonged nasotracheal intubation: a review of its development in a paediatric hospital. Br J Anaesth. 1965;37:p.161–173.
70. Pearson FG, Cooper JD, Nelems JM, van Nostrand AW. Primary tracheal anastomosis after resection of the cricoid cartilage with preservation of recurrent laryngeal nerves. J Thorac Cardiovasc Surg. 1975;70:p.806–816.
71. Sittel C, Blum S, Streckfuss A, Plinkert PK. Cricotracheal resection in nontracheotomized adults: a prospective case series. Ann Otol Rhinol Laryngol. 2008;117:p.288-294.
72. Hasan W, Gullane P. Laryngeal Split and Rib Cartilage Interpositional Grafting: Treatment Option for Glottic and Subglottic Stenosis in Adults. Thorac Surg Clin. 2018;28:p.189–197.
73. Grillo HC. Tracheal reconstruction. Indications and techniques. Arch Otolaryngol. 1972;96:p.31–39.
74. Timman ST, Schoemaker C, Li WWL, Marres HAM, Honings J, Morshuis WJ, et al. Functional outcome after (laryngo)tracheal resection and reconstruction for acquired benign (laryngo)tracheal stenosis. Ann Cardiothorac Surg. 2018;7:p.227–236.
75. Mohsen T, Abou Zeid A, Abdelfattah I, Mosleh M, Adel W, Helal A. Outcome after long-segment tracheal resection: study of 52 cases. Eur J Cardiothorac Surg. 2018;53:p.1186–1191.
76. Costantino CL, Mathisen DJ. Idiopathic laryngotracheal stenosis. J Thorac Dis. 2016;8:p.204-209.
77. Grillo HC, Donahue DM, Mathisen DJ, Wain JC, Wright CD. Postintubation tracheal stenosis: treatment and results. J Thorac Cardiovasc Surg. 1995;109:p.486–493.
78. Smith DF, Alarcon A de, Jefferson ND, Tabangin ME, Rutter MJ, Cotton RT, et al. Short- versus Long-term Stenting in Children with Subglottic Stenosis Undergoing Laryngotracheal Reconstruction. Otolaryngol Head Neck Surg. 2018;158:p.375–380.
79. Monnier P. Pediatric Airway Surgery: Management of Laryngotracheal Stenosis in Infants and Children. Kapitel 17: Preoperative Assessment,

Indications for Surgery and Parental Counselling. Berlin, Heidelberg: Springer; 2011;p.231-240.

80. Breatnach E, Abbott GC, Fraser RG. Dimensions of the normal human trachea. AJR Am J Roentgenol. 1984;142:p.903–906.
81. Kamel KS, Lau G, Stringer MD. In vivo and in vitro morphometry of the human trachea. Clin Anat. 2009;22:p.571–579.
82. Eckel HE, Sittel C, Zorowka P, Jerke A. Dimensions of the laryngeal framework in adults. Surg Radiol Anat. 1994;16:p.31–36.
83. Wani TM, Rafiq M, Terkawi R, Moore-Clingenpeel M, AlSohaibani M, Tobias JD. Cricoid and left bronchial diameter in the pediatric population. Paediatr Anaesth. 2016;26:p.608–612.
84. Mi W, Zhang C, Wang H, Cao J, Li C, Yang L, et al. Measurement and analysis of the tracheobronchial tree in Chinese population using computed tomography: [published autors correction appears in PLoS One. 2015;10;e0130239:Zhang C, Wang H, Cao J, Li C, Mi W, Yang L, Guo F, Wang X, Yang T]. PLoS One. 2015;10:e0123177;Published 2015 Apr 20.
85. Jain M, Dhall U. Morphometry Of The Thyroid And Cricoid Cartilages In Adults. J Anat Soc India. 2008;57:p.119-123.
86. Li XH, Su ZQ, Li JY, Liu Q, Zeng QS, Li SY. Measurement and analysis of tracheal inner diameter in Chinese adults using multi-slice spiral CT, multi-planar reconstruction and special window technique. Chinese journal of tuberculosis and respiratory diseases 2017;40:p.284–288.
87. Too-Chung MA, Green JR. The rate of growth of the cricoid cartilage. J Laryngol Otol. 1974;88:p.65–70.
88. Yamashiro T, San José Estépar R, Matsuoka S, Bartholmai BJ, Ross JC, Diaz A, et al. Intrathoracic tracheal volume and collapsibility on inspiratory and end-expiratory ct scans correlations with lung volume and pulmonary function in 85 smokers. Acad Radiol. 2011;18:p.299–305.
89. King GG, Müller NL, Whittall KP, Xiang QS, Paré PD. An analysis algorithm for measuring airway lumen and wall areas from high-resolution computed tomographic data. Am J Respir Crit Care Med. 2000;161:p.574–580.
90. Nakano Y, Muro S, Sakai H, Hirai T, et al. Computed tomographic measurements of airway dimensions and emphysema in smokers:

Correlation with lung function. Am J Respir Crit Care Med. 2000;162:p.1102-1108.

91. Loewenhardt B. Bildgebende Diagnostik: Technik, Anatomie, Pathologie; physikalisch-technische Grundlagen bildgebender Verfahren in der radiologischen Diagnostik. Kapitel 11: Computertomographie (CT) und Kapitel 12: Magnetresonanztomographie (MRT). 3rd ed. Fulda: Loewenhardt; 2006;p.96-133.
92. Senéterre E, Paganin F, Bruel JM, Michel FB, Bousquet J. Measurement of the internal size of bronchi using high resolution computed tomography (HRCT). Eur Respir J. 1994;7:p.596–600.
93. Morshed K, Trojanowska A, Szymański M, Trojanowski P, Szymańska A, Smoleń A, et al. Evaluation of tracheal stenosis: comparison between computed tomography virtual tracheobronchoscopy with multiplanar reformatting, flexible tracheofiberoscopy and intra-operative findings. Eur Arch Otorhinolaryngol. 2011;268:p.591–597.
94. Adhikari S, Zeger W, Schmier C, Crum T, Craven A, Frrokaj I, et al. Pilot study to determine the utility of point-of-care ultrasound in the assessment of difficult laryngoscopy. Acad Emerg Med. 2011;18:p.754–758.
95. Lakhal K, Delplace X, Cottier J-P, Tranquart F, Sauvagnac X, Mercier C, et al. The feasibility of ultrasound to assess subglottic diameter. Anesth Analg. 2007;104:p.611–614.
96. Callanan V, Gillmore K, Field S, Beaumont A. The use of magnetic resonance imaging to assess tracheal stenosis following percutaneous dilatational tracheostomy. J Laryngol Otol. 1997;111:p.953–957.
97. Führer D, Bockisch A, Schmid KW. Euthyroid goiter with and without nodules - diagnosis and treatment. Dtsch Arztebl Int. 2012;109:p.506-515.
98. Simoneaux SF, Bank ER, Webber JB, Parks WJ. MR imaging of the pediatric airway. Radiographics. 1995;15:p.287-298.
99. McInnis MC, Weisbrod G, Schmidt H. Advanced Technologies for Imaging and Visualization of the Tracheobronchial Tree: From Computed Tomography and MRI to Virtual Endoscopy. Thorac Surg Clin. 2018;28:p.127–137.
100. John U, Greiner B, Hensel E, Ludemann J, Piek M, Sauer S, et al. Study of Health in Pomerania (SHIP): a health examination survey in an east

German region: objectives and design. Soz Praventivmed. 2001;46:p.186–194.

101. Völzke H. Study of Health in Pomerania (SHIP). Konzept, Kohortendesign und ausgewählte Ergebnisse. Bundesgesundheitsblatt, Gesundheitsforschung, Gesundheitsschutz. 2012;55:p.790–794.

102. Völzke H, Alte D, Schmidt CO, Radke D, Lorbeer R, Friedrich N, et al. Cohort profile: the study of health in Pomerania. Int J Epidemiol. 2011;40:p.294–307.

103. Hegenscheid K, Kühn JP, Völzke H, Biffar R, Hosten N, Puls R. Whole-body magnetic resonance imaging of healthy volunteers: pilot study results from the population-based SHIP study. Rofo. 2009;181:p.748–759.

104. https://www.mevislab.de/ (accessed 12. Januar 2019).

105. http://www.agitos.de/zufallsgenerator/ (accessed 15. Juni 2018).

106. Ivanovska T, Dietrich P, Schmidt C, Völzke H, Beule A, Wörgötter F. Effiziente Segmentierung trachealer Strukturen in MRI-Aufnahmen. In: Maier A, Deserno TM, Handels H, Maier-Hein KH, Palm C, Tolxdorff T (eds). Bildverarbeitung für die Medizin 2018: Algorithmen - Systeme - Anwendungen. Proceedings des Workshops vom 11. bis 13. März 2018 in Erlangen. 1st ed. Informatik aktuell. Berlin: Springer Berlin; 2018:p.194–199.

107. Prasanna Kumar S, Ravikumar A. Biometric study of the internal dimensions of subglottis and upper trachea in adult Indian population. Indian J Otolaryngol Head Neck Surg. 2014;66:p.261–266.

108. Cherng CH, Wong CS, Hsu CH, Ho ST. Airway length in adults: estimation of the optimal endotracheal tube length for orotracheal intubation. J Clin Anesth. 2002;14:p.271–274.

109. Chong DYC, Greenland KB, Tan ST, Irwin MG, Hung CT. The clinical implication of the vocal cords-carina distance in anaesthetized Chinese adults during orotracheal intubation. Br J Anaesth. 2006;97:p.489–495.

110. Striebel HW. Anästhesie Intensivmedizin Notfallmedizin: Für Studium und Ausbildung. Kapitel 1.12.3: Anatomie des Kehlkopfes. 8th ed. Stuttgart: Schattauer; 2013;p.89.

111. Jang YE, Kim EH, Song IK, Lee JH, Ryu HG, Kim HS, et al. Prediction of the mid-tracheal level using surface anatomical landmarks in adults: Clinical

implication of endotracheal tube insertion depth. Medicine (Baltimore). 2017;96:e6319.

112. Bakhshaee M, Khadivi E, Movahed R, Naserisadr M. Evaluation of the distance between anterior commissure of true vocal folds and the first tracheal ring and related laryngeal indices in 40 human cadavers. J Voice. 2016;30:p.158–160.

113. Groscurth P: Kapitel 11.2: Schilddrüse. In: Benninghoff A, Drenckhahn D (eds). Anatomie: Makroskopische Anatomie, Histologie, Embryologie, Zellbiologie. 16th ed. Anatomie. Bd. 2: Herz-Kreislauf-System, lymphatisches System, endokrines System, Nervensystem, Sinnesorgane, Haut. München: Elsevier Urban & Fischer; 2004:p.197-202.

114. Karmakar A, Pate MB, Solowski NL, Postma GN, Weinberger PM. Tracheal size variability is associated with sex: implications for endotracheal tube selection. Ann Otol Rhinol Laryngol. 2015;124:p.132–136.

115. Eberle B, Weiler N, Vogel N, Kauczor HU, Heinrichs W. Computed tomography-based tracheobronchial image reconstruction allows selection of the individually appropriate double-lumen tube size. J Cardiothorac Vasc Anesth. 1999;13:p.532–537.

116. Goode RL, Shinn JB. Long-term stenting in the treatment of subglottic stenosis. Ann Otol Rhinol Laryngol. 1977;86:p.795–798.

117. Boiselle PM, O'Donnell CR, Bankier AA, Ernst A, Millet ME, Potemkin A, et al. Tracheal collapsibility in healthy volunteers during forced expiration: assessment with multidetector CT. Radiology. 2009;252:p.255–262.

118. Pinho R, Huysmans T, Vos W, Sijbers J. Tracheal stent prediction using statistical deformable models of tubular shapes. In: Reinhardt JM, Pluim JPW (eds). Medical Imaging 2008: Image Processing. SPIE Proceedings. SPIE; 2008:69144O.

119. Folch E, Keyes C. Airway stents. Ann Cardiothorac Surg. 2018;7:p.273–283.

120. Cheng GZ, San Jose Estepar R, Folch E, Onieva J, Gangadharan S, Majid A. Three-dimensional printing and 3D slicer: powerful tools in understanding and treating structural lung disease. Chest. 2016;149:p.1136–1142.

121. Li M, Yiu Y, Merrill T, Yildiz V, deSilva B, Matrka L. Risk Factors for Posttracheostomy Tracheal Stenosis. Otolaryngol Head Neck Surg. 2018;159:p.698–704.

122. Chunder R, Nandi S, Guha R, Satyanarayana N. A morphometric study of human trachea and principal bronchi in different age groups in both sexes and its clinical implications. Nepal Med Coll J. 2010;12:p.207–214.

123. Gundersen HJ, Bendtsen TF, Korbo L, Marcussen N, Møller A, Nielsen K, et al. Some new, simple and efficient stereological methods and their use in pathological research and diagnosis. APMIS. 1988;96:p.379–394.

124. Gundersen HJ, Jensen EB. The efficiency of systematic sampling in stereology and its prediction. J Microsc. 1987;147:p.229–263.

125. Acar N, Karakasli A, Karaarslan A, Mas NN, Hapa O. The reliability of Cavalier's principle of stereological method in determining volumes of enchondromas using the computerized tomography tools. J Orthop Surg (Hong Kong). 2017;25:2309499016684503.

126. Turhan B, Kervancioglu P, Yalcin ED. The radiological evaluation of the nasal cavity, conchae and nasal septum volumes by stereological method: A retrospective cone-beam computed tomography study [published online ahead of print, 2019 Apr 13]. Adv Clin Exp Med. 2019;10.17219/acem/98960.

127. Leader JK, Rogers RM, Fuhrman CR, Sciurba FC, Zheng B, Thompson PF, et al. Size and morphology of the trachea before and after lung volume reduction surgery. AJR Am J Roentgenol. 2004;183:p.315–321.

128. Griscom NT, Wohl ME. Dimensions of the growing trachea related to age and gender. AJR Am J Roentgenol. 1986;146:p.233–237.

129. Striebel HW. Anästhesie Intensivmedizin Notfallmedizin: Für Studium und Ausbildung. Kapitel 7.2.6: Langzeitbeatmung. 8th ed. Stuttgart: Schattauer; 2013;p.378-406.

130. Brodsky JB, Malott K, Angst M, Fitzmaurice BG, Kee SP, Logan L. The relationship between tracheal width and left bronchial width: Implications for left-sided double-lumen tube selection. J Cardiothorac Vasc Anesth. 2001;15:p.216–217.

131. Ajmani, M.L. A metrical study of the laryngeal skeleton in adult Nigerians. J Anat. 1990;171:p.187–191.

132. Or DYL, Karmakar MK, Lam GCS, Hui JWY, Li JW, Chen PP. Multiplanar 3D ultrasound imaging to assess the anatomy of the upper airway and measure the subglottic and tracheal diameters in adults. Br J Radiol. 2013;86:20130253.
133. Zaghi S, Alonso J, Orestes M, Kadin N, Hsu W, Berke G. Idiopathic subglottic stenosis: a comparison of tracheal size. Ann Otol Rhinol Laryngol. 2016;125:p.622–626.
134. Hu HC, Liu YH, Wu YC, Hsieh MJ, Chao YK, Wu CY, et al. Granulation tissue formation following Dumon airway stenting: the influence of stent diameter. Thorac Cardiovasc Surg. 2011;59:p.163–168.
135. Anand V, Sharma H, Sethi A, Sahoo S. Morphometric analysis of human cricoid cartilage: a cadaveric study. Int J Otorhinolaryngol Head Neck Surg. 2018;4:p.63-67.
136. Fortin M, Lacasse Y, Elharrar X, Tazi-Mezalek R, Laroumagne S, Guinde J, et al. Safety and efficacy of a fully covered self-expandable metallic stent in benign airway stenosis. Respiration. 2017;93:p.430-435.
137. Vincentiis M de, Greco A, Fusconi M, Pagliuca G, Martellucci S, Gallo A. Total cricoidectomy in the treatment of laryngeal chondrosarcomas. Laryngoscope. 2011;121:p.2375–2380.
138. Tai A, Corke C, Joynt GM, Griffith J, Lunn D, Tong PWY. A comparative study of tracheal diameter in Caucasian and Chinese patients. Anaesth Intensive Care. 2016;44:p.719-723.
139. Monnier P. Pediatric Airway Surgery: Management of Laryngotracheal Stenosis in Infants and Children. Kapitel 23: Revision Surgery. Berlin, Heidelberg: Springer; 2011;p.349-357.
140. Seymour AH, Prakash N. A cadaver study to measure the adult glottis and subglottis: defining a problem associated with the use of double-lumen tubes. J Cardiothorac Vasc Anesth. 2002;16:p.196–198.
141. Dedo HH, Catten MD. Idiopathic progressive subglottic stenosis: findings and treatment in 52 patients. Ann Otol Rhinol Laryngol. 2001;110:p.305–311.
142. Fiz I, Bittar Z, Piazza C, Koelmel JC, Gatto F, Ferone D, et al. Hormone receptors analysis in idiopathic progressive subglottic stenosis. Laryngoscope. 2018;128:p.72-77.

143. Leboulanger N, Louvet N, Rigouzzo A, Mesmay M de, Louis B, Farrugia M, et al. Pregnancy is associated with a decrease in pharyngeal but not tracheal or laryngeal cross-sectional area: a pilot study using the acoustic reflection method. Int J Obstet Anesth. 2014;23:p.35–39.
144. Fredberg JJ, Wohl ME, Glass GM, Dorkin HL. Airway area by acoustic reflections measured at the mouth. J Appl Physiol Respir Exerc Physiol. 1980;48:p.749–758.
145. Lin CL, Tawhai MH, McLennan G, Hoffman EA. Characteristics of the turbulent laryngeal jet and its effect on airflow in the human intra-thoracic airways. Respir Physiol Neurobiol. 2007;157:p.295-309.
146. Menon SK, Jagtap VS, Sarathi V, Lila AR, Bandgar TR, Menon PS, et al. Prevalence of upper airway obstruction in patients with apparently asymptomatic euthyroid multi nodular goitre. Indian J Endocrinol Metab. 2011;15:p.127-131.
147. https://www.bundesgesundheitsministerium.de/themen/praevention/ge-sundheitsgefahren/seltene-erkrankungen (accessed 03. Juli 2019).
148. Stanley TH, Kawamura R, Graves C. Effects of nitrous oxide on volume and pressure of endotracheal tube cuffs. Anesthesiology. 1974;41:p.256–262.
149. Jaillette E, Martin-Loeches I, Artigas A, Nseir S. Optimal care and design of the tracheal cuff in the critically ill patient. Ann Intensive Care. 2014;4:Published 2014 Feb 27.
150. Jamaati HR, Shadmehr MB, Aloosh O, Radmand G, Mohajerani SA, Hashemian SM. Evaluation of plethysmography for diagnosis of postintubation tracheal stenosis. Asian Cardiovasc Thorac Ann. 2012;21:p.181–186.
151. Mallat J, Robin E, Pironkov A, Lebuffe G, Tavernier B. Goitre and difficulty of tracheal intubation. Ann Fr Anesth Reanim. 2010;29:p.436–439.
152. Fairwather NL. Cricoid Pressure: beware the patient with a goitre. Anaesth Intensive Care. 2003;31:p.451-454.

Anhang

In Tab. 47 ist eine Übersicht über die Messwerte von APmax in mm in Abhängigkeit der subglottischen Distanz bei Männern und Frauen zusammengefasst.

Tab. 47: APmax der Trachea und des LTÜGs in Abhängigkeit von der subglottischen Distanz bei Männern und Frauen

Distanz zur Glottis	Männer						Frauen					
	n	Mw	Std	Min	Max	95%-KI	n	Mw	Std	Min	Max	95%-KI
0	383	20,4	2,5	13,2	28,5	20,2-20,7	409	15,1	1,7	10,0	20,3	14,9-15,3
4	383	20,8	1,9	14,3	27,5	20,6-21,0	409	16,0	1,5	11,5	20,8	15,7-16,1
8	383	20,9	1,7	15,9	27,0	20,7-21,1	409	16,3	1,4	12,6	20,9	16,2-16,4
12	383	20,9	1,6	15,9	26,3	20,7-21,1	409	16,0	1,4	12,0	20,2	15,9-16,1
16	383	20,0	1,8	13,1	25,9	19,8-20,2	409	14,5	1,8	9,4	19,7	14,3-14,7
20	383	18,4	2,2	11,9	26,3	18,2-18,6	409	12,9	1,8	6,1	17,9	12,7-13,1
24	383	16,9	2,4	11,5	26,7	16,7-17,1	409	12,4	1,8	7,1	18,3	12,2-12,6
28	383	17,1	2,6	11,2	27,7	16,8-17,4	409	13,0	2,0	7,0	20,0	12,8-13,2
32	383	18,4	2,9	11,4	27,5	18,1-18,7	409	13,9	2,2	8,4	21,8	13,7-14,1
36	383	19,9	3,1	13,2	30,3	19,6-20,2	409	14,8	2,2	8,2	23,9	14,6-15,0
40	383	20,5	3,1	11,1	29,5	20,2-20,8	409	15,1	2,3	8,9	22,5	14,9-15,3
44	383	20,4	3,2	10,2	30,3	20,1-20,7	409	15,0	2,3	9,5	22,2	14,8-15,2
48	383	20,0	3,3	10,1	30,7	19,7-20,3	409	14,9	2,4	8,7	21,9	14,7-15,1
52	383	19,3	3,3	9,7	28,8	19,0-19,6	409	14,5	2,4	8,6	22,0	14,3-14,7
56	380	18,8	3,0	10,2	29,2	18,5-19,1	409	13,8	2,2	7,5	19,7	13,6-14,0
60	373	18,3	2,9	9,8	27,9	18,0-18,6	408	13,7	2,2	7,3	20,5	13,5-13,9
64	359	18,1	2,7	9,8	25,4	17,8-18,4	406	13,6	2,2	7,6	19,6	13,4-13,8
68	334	18,1	2,6	9,8	27,0	17,8-18,4	400	13,7	2,2	8,1	19,8	13,5-13,9
72	277	18,0	2,5	8,5	25,4	17,7-18,3	385	13,7	2,2	7,4	20,2	13,5-13,9
76	209	17,8	2,5	12,2	24,8	17,5-18,1	367	13,7	2,2	7,9	22,0	13,5-13,9
80	137	18,2	2,5	12,9	24,6	17,8-18,6	302	13,6	2,2	8,1	22,2	13,4-13,9
84	77	18,5	2,5	12,1	25,3	17,9-19,1	232	13,4	2,4	8,3	22,8	13,1-13,7
88	44	18,0	2,0	13,7	23,3	17,4-18,6	126	12,9	2,4	7,7	21,3	12,5-13,3
92	23	17,4	2,4	13,0	21,3	16,4-18,4	65	12,7	2,1	9,0	18,9	12,2-13,2
96	12	17,2	2,1	13,9	20,7	16,0-18,4	21	13,4	2,4	10,6	18,1	12,4-14,4
100	4	18,5	1,7	16,1	19,9	16,8-20,2	1	14,2	0,0	14,2	14,2	14,2-14,2
104	1	18,2	0,0	18,2	18,2	18,2-18,2	0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0

In der folgenden Tabelle sind die Messwerte des maximalen transversalen Durchmessers in mm in Abhängigkeit der Distanz zur Glottis bei Männern und Frauen dargestellt (Tab. 48).

Tab. 48: LLmax der Trachea und des LTÜGs in Abhängigkeit von der subglottischen Distanz bei Männern und Frauen

Distanz zur Glottis	Männer						Frauen					
	n	Mw	Std	Min	Max	95%-KI	n	Mw	Std	Min	Max	95%-KI
0	383	9,4	2,0	4,4	16,2	9,2-9,6	409	7,5	1,7	2,9	12,7	7,3-7,7
4	383	11,7	1,7	7,8	16,4	11,5-11,9	409	9,6	1,3	6,2	14,2	9,5-9,7
8	383	14,3	1,7	9,8	21,0	14,1-14,5	409	11,6	1,3	8,1	15,7	11,5-11,7
12	383	16,4	1,7	11,8	20,8	16,2-16,6	409	13,1	1,4	9,2	16,8	13,0-13,2
16	383	17,9	1,7	13,1	22,8	17,7-18,1	409	14,4	1,3	10,2	18,0	14,3-14,5
20	383	18,7	1,7	13,9	24,5	18,5-18,9	409	14,4	1,4	9,1	19,1	14,3-14,5
24	383	18,3	1,8	13,5	24,6	18,1-18,5	409	13,8	1,4	10,3	17,6	13,7-13,9
28	383	17,7	1,9	13,0	24,1	17,5-17,9	409	13,7	1,4	9,4	18,7	13,6-13,8
32	383	17,3	2,1	10,4	24,8	17,1-17,5	409	13,9	1,7	9,8	21,0	13,7-14,1
36	383	17,6	2,2	9,4	24,8	17,4-17,8	409	14,5	1,8	9,7	20,5	14,3-14,7
40	383	17,9	2,3	10,6	25,2	17,7-18,1	409	15,1	1,9	10,3	22,3	14,9-15,3
44	383	18,5	2,4	10,0	26,6	18,3-18,7	409	15,7	2,0	11,0	24,2	15,5-15,9
48	383	18,7	2,5	11,1	26,0	18,5-19,0	409	15,9	1,9	10,7	22,9	15,7-16,1
52	383	19,0	2,7	9,9	26,6	18,7-19,3	409	16,1	1,9	11,2	22,9	15,9-16,3
56	380	19,2	2,4	11,6	27,3	19,0-19,5	409	16,0	1,9	9,7	22,6	15,8-16,2
60	373	19,2	2,4	11,0	25,1	19,0-19,5	408	16,0	1,9	10,6	22,2	15,8-16,2
64	359	19,3	2,2	12,1	26,0	19,1-19,5	406	15,8	2,0	8,6	22,2	15,6-16,0
68	334	19,4	2,4	11,9	25,4	19,1-19,7	400	15,6	2,0	8,8	21,8	15,4-15,8
72	277	19,2	2,5	12,1	26,3	18,9-19,5	385	15,6	2,0	9,9	22,6	15,4-15,8
76	209	19,2	2,7	10,8	26,7	18,8-19,6	367	15,7	2,3	8,9	23,1	15,5-15,9
80	137	19,0	2,6	9,7	26,1	18,6-19,4	302	15,8	2,6	9,6	27,9	15,5-16,1
84	77	18,9	3,0	12,1	26,7	18,2-19,6	232	16,8	3,4	10,4	40,2	16,4-17,2
88	44	19,9	2,9	14,4	28,2	19,1-20,7	126	17,8	4,2	10,1	32,6	17,1-18,5
92	23	21,1	3,5	16,5	28,9	19,7-22,5	65	18,2	3,7	11,8	26,9	17,3-19,1
96	12	22,3	4,0	18,0	29,0	20,1-24,5	21	19,0	4,0	14,1	28,3	17,3-20,7
100	4	24,1	4,7	19,9	30,1	19,5-28,7	1	17,3	0,0	17,3	17,3	17,3-17,3
104	1	22,5	0,0	22,5	22,5	22,5-22,5	0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0

Folgend sind die Messwerte des transversalen Durchmessers 4 mm von anterior in mm in Abhängigkeit der subglottischen Distanz bei Männern und Frauen tabellarisch dargestellt (Tab. 49).

Tab. 49: LL4mmVA der Trachea und des LTÜGs in Abhängigkeit von der subglottischen Distanz bei Männern und Frauen

Distanz zur Glottis	Männer						Frauen					
	n	Mw	Std	Min	Max	95%-KI	n	Mw	Std	Min	Max	95%-KI
0	383	4,6	1,1	1,8	7,8	4,5-4,7	409	4,6	1,1	2,2	8,5	4,5-4,7
4	383	6,7	1,7	3,1	13,1	6,5-6,9	409	6,7	1,4	2,6	10,6	6,6-6,8
8	383	9,9	1,7	3,9	14,4	9,7-10,1	409	9,4	1,2	5,8	13,3	9,3-9,5
12	383	12,0	1,5	8,2	17,5	11,9-12,2	409	11,1	1,2	7,9	14,9	11,0-11,2
16	383	13,5	1,6	8,8	18,2	13,3-13,7	409	12,5	1,2	9,0	16,6	12,4-12,6
20	383	14,6	1,7	10,3	19,8	14,4-14,8	409	12,6	1,2	8,8	15,8	12,5-12,7
24	383	14,9	1,6	9,4	18,8	14,7-15,1	409	12,3	1,2	7,8	16,3	12,2-12,4
28	383	14,6	1,6	8,9	19,1	14,4-14,8	409	12,0	1,2	8,3	17,0	11,9-12,1
32	383	13,8	1,7	7,3	18,4	13,6-14,0	409	12,0	1,4	7,8	17,7	11,9-12,1
36	383	13,4	1,9	7,8	18,5	13,2-13,6	409	12,0	1,5	7,6	17,7	11,9-12,2
40	383	13,1	2,1	6,2	21,7	12,9-13,3	409	12,2	1,6	8,4	16,5	12,1-12,4
44	383	13,2	2,2	7,7	18,7	13,0-13,4	409	12,7	1,8	6,8	19,3	12,5-12,9
48	383	13,2	2,4	6,8	20,1	13,0-13,4	409	12,9	1,9	6,4	19,2	12,7-13,1
52	383	13,6	2,5	5,7	21,0	13,4-13,9	409	13,2	1,9	8,0	18,8	13,0-13,4
56	380	13,7	2,6	6,8	22,5	13,4-14,0	409	13,4	1,8	7,5	18,3	13,2-13,6
60	373	14,0	2,6	6,8	21,4	13,7-14,3	408	13,5	2,0	8,0	18,5	13,3-13,7
64	359	14,1	2,4	6,8	20,6	13,9-14,4	406	13,4	2,1	7,7	20,8	13,2-13,6
68	334	14,2	2,8	7,2	22,2	13,9-14,5	400	13,1	2,1	5,5	19,4	12,9-13,3
72	277	14,3	2,7	5,7	22,4	14,0-14,6	385	13,0	2,1	7,7	18,1	12,8-13,2
76	209	14,2	2,7	5,6	22,2	13,8-14,6	367	13,0	2,4	7,2	21,7	12,8-13,3
80	137	13,8	2,5	8,8	21,8	13,4-14,2	302	12,8	2,6	6,0	27,2	12,5-13,1
84	77	14,0	3,2	6,9	26,1	13,3-14,7	232	13,6	3,2	7,0	33,3	13,2-14,0
88	44	14,0	3,1	8,2	21,9	13,1-14,9	126	14,7	4,4	6,4	31,0	13,9-15,5
92	23	14,7	3,3	7,3	21,0	13,4-16,1	65	15,3	4,1	7,9	26,4	14,3-16,3
96	12	17,1	3,5	13,0	23,8	15,1-19,1	21	15,7	3,6	11,4	24,0	14,2-17,2
100	4	17,5	4,1	13,3	23,0	13,5-21,6	1	12,4	0,0	12,4	12,4	12,4-12,4
104	1	15,9	0,0	15,9	15,9	15,9-15,9	0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0

Danksagung

Ich bedanke mich bei Herrn Prof. Dr. W. Hosemann für die Möglichkeit der Berarbeitung dieses interessanten Themas.

Zudem bedanke ich mich bei meinem Betreuer PD Dr. A. Beule, welcher mir trotz eines Ortswechsels stetige Unterstützung und Anregungen bot und eine wichtige Hilfestellung während der gesamten Arbeit war.

Auch bei Dr. T. Ivanovska möchte ich mich bedanken für die Unterstützung und Programmierung des Bearbeitungsprogrammes MeVisLab, sowie der zustäzlichen Installation des Plugins. Ebenfalls unterstützte sie trotz eines Ortswechels das Voranschreiten der Arbeit stetig weiter.

Mein weiterer Dank geht an Prof. Dr. H. Völzke sowie an alle beteiligte MitarbeiterInnen, welche die SHIP-Studie betreuten. Auch gegenüber den Probanden, welche an der SHIP-Studie teilnahmen möchte ich meinen Dank aussprechen.

Zudem bedanke ich mich bei Dr. T. Ittermann für die statistische Beratung.

Nicht zuletzt gilt mein herzlicher Dank meinen Eltern und meinem Zwillingsbruder, welche mir stetigen Zuspruch gaben, mich motivierten und immer ein offenes Ohr für mich hatten. Auch bei meinen Freunden (vor allem Imma) möchte ich mich für die Untersützung und Hilfestellung bedanken.