

Aus der Klinik für Hals-, Nasen- und Ohrenheilkunde des  
Unfallkrankenhauses Berlin

**DISSERTATION**

**Experimentelle Untersuchung zur Druckresistenz  
humaner Tracheen**

zur Erlangung des akademischen Grades

Doctor medicinae (Dr. med.)

vorgelegt der Medizinischen Fakultät der  
Charité – Universitätsmedizin Berlin

von

Tobias Hannes Sudhoff

aus München

Datum der Promotion: 22.06.2014

**Inhaltsverzeichnis**

1	Abstrakt.....	1
2	Einleitung .....	5
	2.1 Trachearupturen .....	5
	2.2 Trachearupturen infolge endotrachealer Intubation.....	8
	2.3 Ziele und Fragestellung .....	11
3	Material und Methoden .....	13
	3.1 Versuchsablauf.....	13
	3.2 Statistische Verfahren .....	20
4	Ergebnisse .....	22
	4.1 Ort, Art und Zeitpunkt der Läsion .....	22
	4.2 Berstungsdruck.....	23
	4.3 Änderung des Tracheadurchmessers .....	25
	4.4 Einfluss der Tubusgröße auf den Berstungsdruck .....	27
	4.5 Einfluss Körpergröße auf den Berstungsdruck.....	30
	4.6 Einfluss Tubusgröße und Körpergröße auf den Berstungsdruck ...	32
	4.7 Vergleich Alter und Körpergröße .....	35
	4.8 Einfluss Geschlecht auf den Berstungsdruck.....	37
5	Diskussion.....	39
	5.1 Einleitung.....	39
	5.2 Art und Ort der Ruptur .....	46
	5.3 Einflussgrößen auf eine Ruptur .....	48
	5.4 Kritik an der eigenen Untersuchung .....	53
6	Zusammenfassung .....	54
7	Literaturverzeichnis.....	56
8	Abbildungsverzeichnis .....	61
9	Tabellenverzeichnis .....	62

## **Abkürzungsverzeichnis**

CT	<i>Computertomographie</i>
hltP	<i>humane laryngo-tracheale Präparate</i>
ID	<i>innere diametrale Durchmesser</i>
mbar	<i>Millibar</i>
TR	<i>Trachearuptur</i>

## **Anmerkung**

Die in dieser Arbeit verwendeten Angaben der Druckeinheiten (mbar und cmH<sub>2</sub>O) beruhen darauf, dass die Versuchsmessungen mit Millibar-Angaben durchgeführt wurden, in der Literatur jedoch neben Millimeter-Quecksilbersäule zumeist Zentimeter-Wassersäule gebräuchlich ist (1 cmH<sub>2</sub>O entspricht 0,980665 mbar).

# 1 Abstrakt

## Einleitung

Die Trachearuptur (TR) infolge einer endotrachealen Intubation ist eine vergleichsweise seltene Verletzung und tritt mit einer Inzidenz von 0,05%-0,37% aller Intubationen auf. Der genaue Verletzungsmechanismus bleibt meist ungeklärt. Als ursächlich werden in der Literatur u.a. Mehrfachintubation, forcierte Intubation, die Unerfahrenheit des Intubierenden, unsachgemäße Intubation mit einem Führungsstab, Bewegen des Tubus oder Kopfes eines mit einem geblockten Tubus intubierten Patienten, Verwendung zu großer Intubationstuben, Prädisposition des weiblichen Geschlechts, geringer Körpergröße und fortgeschrittenen Alters sowie an vorderster Stelle die Überblockung des Tubuscuffs diskutiert. Hoffmann et al. wiesen 2006 in ihrer Studie nach, dass selbst erfahrene Notfallmediziner durch manuelle Cuffblockung Cuffdrücke insufflieren, welche den empfohlenen oberen Grenzbereich um ein Vielfaches überschreiten. Ziel dieser Dissertation war es, anhand eines experimentellen Versuchsaufbaus zu ermitteln, ob eine Überblockung des Tubuscuffs eine TR hervorruft. Des Weiteren sollten Fragen nach dem benötigten Berstungsdruck, der Art und Lokalisation der Ruptur sowie der jeweilige Einfluss der Tubusgröße, der Körpergröße, des Geschlechts und des Alters geklärt werden.

## Methode

Als Untersuchungsobjekte dienten 28 humane laryngo-tracheale Präparate (hltP) bis spätestens 24 Stunden nach Obduktion im Unfallkrankenhaus Berlin. Bei 14 hltP wurden mittels eines Nomogramms ein zur Körpergröße adäquater Tubus gewählt, bei 13 hltP wurde der nächstgrößere Tubus verwendet. In einem artifiziellen Versuchsaufbau wurde der Cuffdruck des Endotrachealtubus in 100-mbar-Schritten erhöht und die Trachea jeweils in sagittalem und koronarem Durchmesser vermessen, bis eine Perforation der Trachea eintrat. Dabei wurden die Lokalisation der Ruptur sowie der Berstungscuffdruck dokumentiert. Diese Werte wurden mit der Tubusgröße sowie Körpergröße, Geschlecht und Alter des Patienten korreliert.

## **Ergebnisse**

Bei allen untersuchten hltP kam es zu einem longitudinalen Einriss in der Mitte der Tracheahinterwand. Die relative Zunahme des sagittalen und des koronaren Durchmessers entwickelten sich in gleichem Ausmaß. Die absoluten Durchmesser waren annähernd identisch, so dass die Trachea bis zur Berstung konzentrisch gedehnt wurde. Die Ausdehnung der Längsperforation korrespondierte mit der Länge des Cuffs. Der benötigte Berstungsdruck lag zwischen 700 und 1300 mbar. Zu groß gewählte Tuben führten mit einer Signifikanz von  $p=0,001$  zu geringeren Berstungsdrücken, verstärkend wirkte sich dies bei Patienten von kleinerer Körpergröße aus. Alter und Geschlecht hatten keinen signifikanten Einfluss auf das Auftreten einer Perforation.

## **Schlussfolgerung**

Die Tubusgröße hat einen signifikanten Einfluss auf das Auftreten von Perforationen humaner Tracheen bei Intubation. Daher sollte eine Intubation lediglich mit einem zur Körpergröße passendem Tubus erfolgen. Zur Auswahl der Tubusgröße kann das Nomogramm nach Coordes et al. als Hilfsmittel herangezogen werden. Die Cuffblockung sollte standardisiert unter kontrollierter manometrischer Cuffdruckmessung durchgeführt werden. Daneben sind Untersuchungen zum Einfluss der Cuffgeometrie auf eine intubationsbedingte TR notwendig, um das Risiko des Auftretens zukünftig zu minimieren.

## **Abstract**

### **Introduction**

The tracheal rupture caused by endotracheal intubation is a comparably rare injury and goes along with an incidence of 0.05-0.37% of all intubations carried out. The exact mechanism underlying the lesion mostly remains obscure. Factors discussed in medical literature leading to injury are e.g. multiple attempts of intubation, forced intubation, an unexperienced health professional, inappropriate use of the stylet, movement of the tube or head and neck while the patient is intubated, inappropriate size of the tube and predisposition of female sex, small height or patients advanced in years, but most of all the overinflation of the cuff. Hoffmann et al. noted in their study of 2006 that even experienced emergency medicine physicians inflate cuffpressures many times higher than suggested using standard techniques. The aim of this study based on a bench-top model was to clarify, if an overinflation of the tubecuff can cause tracheal rupture. Furthermore, questions on the required cuffpressure, the site and character of the rupture as well as the influence of the tube size, the height, sex and age of the patient should be clarified.

### **Method**

As subject of interest 28 humane laryngo-tracheal preparations (hltp) were used until 24 hours after autopsy at the Emergency Hospital Berlin. In 14 cases a tube size adequate to the patient's height was applied, whereas in 13 cases the next bigger size was chosen by using a nomogram. In an artificial experimental model the pressure of the tubecuff was increased by steps of 100 mbar and coronal and sagittal diameters were measured until perforation of the trachea occurred. The exact localisation of the rupture and the corresponding pressures when tearing occurred were documented and correlated to the size of the tube as well as to the height, sex and age of the patient.

## **Results**

All preparations examined in our study showed a longitudinal rupture in the middle of the posterior wall of the trachea. The relative increases of the coronal and sagittal diameter developed in the same extent. The overall diameters were quite equal and the trachea is stretched in a concentric way till rupturing. The dimension of the tear was equal to the length of the cuff used. The cuffpressure needed to cause tracheal rupturing ranged between 700 and 1300 mbar. When using an oversized tube, significantly less pressure was needed to cause a tear ( $p=0,001$ ), especially concerning people of small height. There was no significant influence of age or sex on the occurrence of tracheal rupture.

## **Conclusion**

The choice of the tube size turned out to be a crucial factor, which causes tracheal perforation within intubation. Therefore intubation should only be performed with a ventilation tube adequate to the patient's height. In this regard the nomogram of Coordes et al. can be recommended as a useful tool for the choice of the right size of a ventilation tube. Intubation should always be followed by standardized measurement of the cuffpressure while blocking the cuff. Further investigation on the design of the tubecuff should be carried out to minimize the risk of tracheal rupture caused by overinflation of the tubecuff in future.

## 2 Einleitung

### 2.1 Trachearupturen

Eine Trachearuptur (TR), das Einreißen der Luftröhre, ist eine seltene Verletzung und üblicherweise Folge eines stumpfen Traumas im Hals- und Thoraxbereich, welches meist im Zusammenhang mit einem Verkehrsunfall steht. Die Inzidenz von TR bei stumpfen Thoraxtraumata beträgt 0,5-1% (Kleber et al. 2012) und geht seit den 1970er Jahren mit einer Mortalität von 9% einher (Kiser et al. 2001). Derartige TR sind in der Regel Hochrasanz- und Dezelerationstraumata, horizontal und unregelmäßig verlaufend, inkomplett oder als kompletter Abriss auftretend und oft die Carina oder den rechten Hauptbronchus miteinschließend (Conti et al. 2006). Insgesamt betrachtet treten singuläre Bronchusrupturen des rechten Hauptbronchus häufiger auf als Trachearupturen und Rupturen des linken Hauptbronchus. Ca. 75% dieser Verletzungen ereignen sich innerhalb eines Abstands von 2 cm zur Carina (Hippargi 2010). Isolierte Einrisse an der Tracheahinterwand können auch durch forcierte Expiration und ansteigenden intrathorakalen Druck bei während des Unfalls geschlossener Glottis entstehen (Kleber et al. 2012). Daneben treten iatrogene TR als Komplikation bei Thorax- oder Halsoperationen, bei Bronchoskopien, bei Anlagen von dilatativen Tracheostomata sowie im Rahmen endotrachealer Intubationen auf.

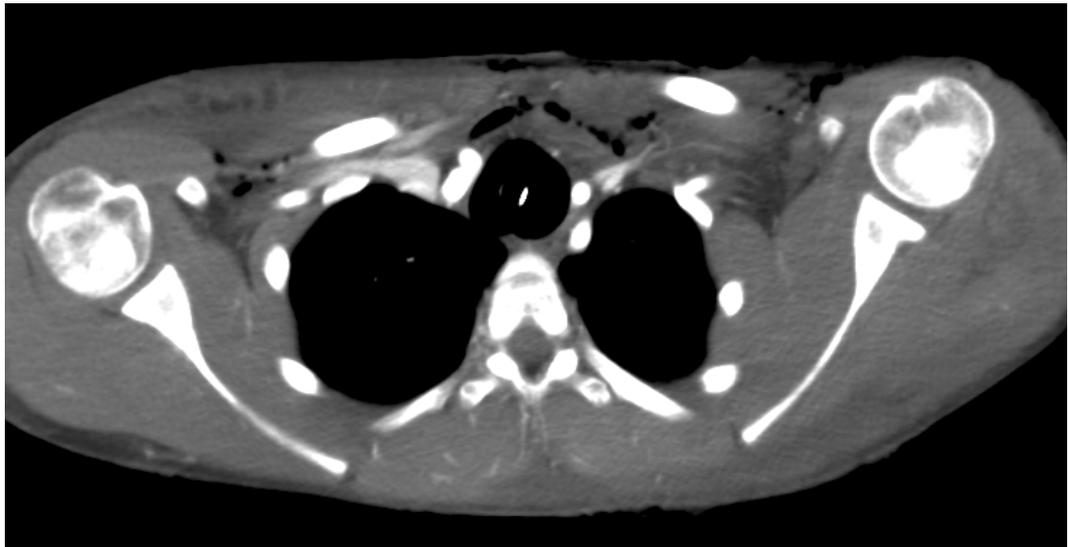
Die translaryngeale Intubation ist eine Routinehandlung, welche in klinischen Alltag zumeist perioperativ und auch in Notfallsituationen angewendet wird. Potentielle Komplikationen der translaryngealen Intubation sind die Ausbildung von Ödemen, Ulzerationen, Larynxfrakturen, Tracheanekrosen (Deslee et al. 2000), Luxationen, vor allem der Aryknorpel, ösophagotracheale Fisteln, das Auftreten von Rekurrensparesen (Otani et al. 1998) sowie laryngeale, tracheale Stenosierung und Trachearupturen (Deslee et al. 2000).

Die am häufigsten durch TR resultierenden Symptome sind eine respiratorische Insuffizienz, ein Pneumothorax, ein mediastinales Emphysem, ein subkutanes Emphysem an Hals und Brust sowie in selteneren Fällen Hämoptysen. Das subkutane Emphysem ist in vielen

Fällen der erste klinische Anhalt für eine Trachearuptur, welche häufig erst Stunden bis Tage nach Entstehung diagnostiziert wird (Medina et al. 2009). Zum diagnostischen Nachweis dient vorwiegend die Bronchoskopie, ergänzend auch die Computertomographie. Nach penetrierendem Trauma oder Verletzung durch Tracheotomie sollte eine Ösophagoskopie zum Ausschluss einer Läsion der Speiseröhre erfolgen.

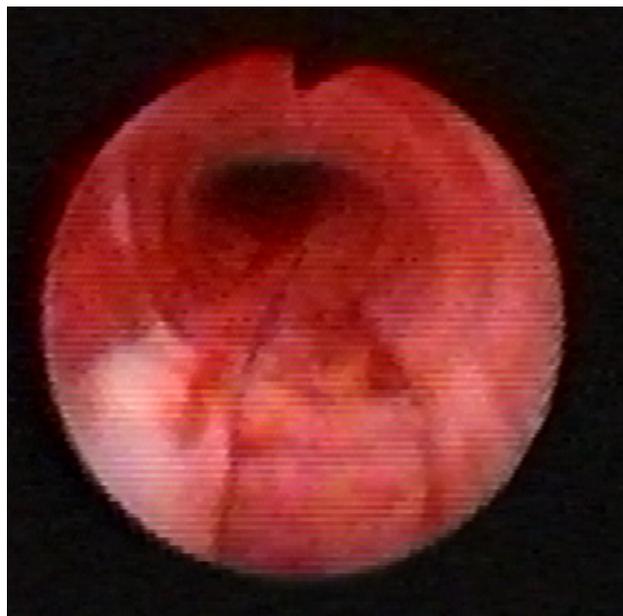
**Abbildung 1: CT bei Trachearuptur mit Emphysem**

Man sieht im CT Thoraxgewebe die eingeschlossene Luft und die deutlich aufgeweitete Trachea, die intubationsbedingt rupturiert ist.



**Abbildung 2: Bronchoskopie bei Trachearuptur**

Sichtbar ist der durch Intubation verursachte Längsdefekt in der Tracheahinterwand.



Als therapeutische Optionen bei suffizienter Ventilation der Lunge, stabilen Vitalparametern und in Abwesenheit einer Infektion wird die endoskopisch

kontrollierte Überbrückung mit einem geblockten Tubus, wenn möglich distal oder oberhalb der vorliegenden Läsion, bei antibiotischer Abschirmung empfohlen. Dies gilt ebenfalls bei Patienten, welche sich für eine Operation bzw. Narkose in einem zu schlechten Allgemeinzustand befinden. Im Falle einer Beteiligung eines Hauptbronchus kann bei einer bronchialen Intubation ein doppellumiger Tubus verwendet werden.

Weiterhin kommen beschichtete Stents zur Anwendung, welche nach Abheilung meist problemlos entfernt werden können und in der Regel keine Langzeitkomplikationen wie Granulationen oder ein Auflösen des Stents mit sich bringen (Creagh-Brown et al. 2008).

Empfehlungen zur operativen Therapie bestehen bei traumatischen horizontal verlaufenden sowie bei longitudinalen Rupturen ab 2-4 cm Länge. In den letzten Jahren erlangte das konservative Vorgehen zunehmend weitere Anerkennung. Auch Läsionen von über 7 cm Länge werden inzwischen auf diese Weise erfolgreich therapiert (Conti et al. 2006, Mullan et al. 2007) und eine Operation mit einer Mortalitätsrate von bis zu 42% (Smith 2002) kann somit umgangen werden. Welter et al. beschrieben 2010 eine neue Operationstechnik mit einem eigens für diese Operation entwickelten 12°-Teleskop, mit welchem sich endoluminal vorgehen lässt. Diese Technik könnte die hohe Mortalitätsrate zukünftig senken. Cardillo et al. teilten 2009 in ihrer Arbeit intubationsbedingte Trachealäsionen in drei Gruppen ein und gaben dezidiere Empfehlungen zur operativen Indikation:

- **Level I** beschreibt dabei eine muköse oder submuköse Läsion ohne mediastinales Emphysem oder einer Ösophagusverletzung.
- **Level II** umschreibt Trachealäsionen, welche bis an die Schichten des Musculus trachealis heranreichen und mit einem subkutanen oder mediastinalen Emphysem und ohne Mediastinitis oder Ösophagusverletzung einhergehen.
- **Level IIIA** bezieht sich auf komplette Rupturen der Tracheahinterwand mit Ausbildung ösophagealer oder mediastinaler Weichteilhernien ohne Mediastinitis oder Ösophagusverletzung.

- **Level IIIB** beschreibt schließlich jegliche Läsion der Trachea einhergehend mit Mediastinitis oder Ösophagusverletzung.

Eine Empfehlung zum umgehenden operativen Vorgehen wird für Level IIIB gegeben. Level-I- und Level-II-Läsionen sollten bei stabiler respiratorischer Situation konservativ behandelt werden. Level-III-A-Verletzungen unterliegen einer relativen Operationsindikation und sollten ausschließlich in ausgewählten Kliniken konservativ behandelt werden.

## **2.2 Trachearupturen infolge endotrachealer Intubation**

TR infolge endotrachealer Intubation sind vergleichsweise selten und treten mit einer Inzidenz von 0,05%-0,37% aller Intubationen auf (Minambres et al. 2009). Dies bedeutet, dass eine intubationsbedingte TR bei 20.000 durchgeführten Intubationen auftritt (Orta et al. 1979, Lampl 2004). Meist betreffen diese das untere Drittel der Trachea (Medina et al. 2009). Eine Beteiligung eines Hauptbronchus ist selten. Die intubationsbedingte TR stellt mit einer Gesamtmortalität von 22% eine potentiell lebensgefährliche Verletzung dar (Minambres et al. 2009). Bei Notfallintubationen und intubationsbedingten TR, welche operativ behandelt werden, beobachtet man höhere Mortalitätsraten.

Intubationsbedingte TR werden bei erschweren Intubationsverhältnissen, bei Mehrfachintubation, unsanfter Intubation, bei unerfahrenen Intubierenden und bei Notfallintubationen beobachtet (Minambres *et al.* 2009; Wagner et al. 1995). Auch bei elektiven Operationen werden TR als Intubationsfolge beschrieben. So berichten Lim et al. 2012 beispielsweise von Patienten, welche ausschließlich elektiven Wirbelsäuleneingriffen zugeführt wurden.

Eine Metaanalyse von Minambres et al. aus dem Jahr 2009 beziffert den Anteil der Frauen unter den betroffenen Patienten auf 86,2%. Durchschnittlich sind diese über 50 Jahre alt. Das weibliche Geschlecht wird teilweise als prädisponierend vermutet (Wagner et al. 1995). Andere Arbeiten legen nahe, dass sich möglicherweise die kleinere Körpergröße der Frauen prädisponierend auswirkt, bzw. Läsionen auf einen zu groß gewählten oder zu weit distal platzierten Tubus zurückzuführen waren (Kaloud et al. 1997, Chen et al. 2001, Lampl 2004).

Auch bei Kindern treten Fälle von intubationsbedingten TR auf. Schedlbauer et al. berichteten 2009 von vier Fällen. Diese vier Kinder waren fünf, sechs, zehn und 15 Jahre alt und wurden alle mit einem geblockten Tubus versorgt.

Weitere Arbeiten stellten in der Vergangenheit einen Zusammenhang zwischen verhältnismäßig zu groß gewähltem Tubus bei Frauen und Kindern und konsekutiv auftretenden iatrogenen Intubationsschäden her (Weiss et al. 2004, Randestad et al. 2000).

Letztlich ist die genaue Ursache für bei Intubation auftretende TR nicht bekannt und lässt sich für den Einzelfall nur retrospektiv vermuten. Als in der Literatur meist vermutete und überwiegend genannte Hypothese wird die Überblockung des Cuffs genannt – oft in Zusammenhang mit der Verwendung eines zu großen Tubus (Marty-Ané et al. 1995, Striebel et al., 1997, Seidl et al. 2002, Stannard et al. 2003, Lim et al. 2012). Hier sind auch multifaktorielle Entstehungsmechanismen, wie etwa das zusätzliche Bewegen des Tubus oder Kopfes des Patienten, die Verwendung von stickstoffhaltigen Narkosegasen oder das forcierte Husten bei bereits überblockten Tubuscuff denkbar.

Folgende Tabelle gibt einen Überblick über die in der in der Literatur genannten Ursachen für eine intubationsbedingte TR:

**Tabelle 1: Übersicht Ursachen einer Trachearuptur durch Intubation**

<b>anatomische/pathophysiologische Ursachen</b>	<b>mechanische Ursachen:</b>
angeborene Fehlbildungen der Trachea	Überblähung des Tubuscuffs
Tracheomalazie	zu groß gewählter Tubus
Schwäche der Tracheahinterwand	doppellumiger Tubus
weibliches Geschlecht	mehrmalige Intubationsversuche / unsanfte Intubation
COPD, andere entzündliche Pathologien im Bereich Tracheo-Bronchialbaums	Unerfahrenheit des Intubierenden
Neoplasien, mediastinale Lymphknoten mit Auslenkung der Trachea	unsachgemäße Verwendung eines Führungsstabes
Kortisoneinnahme	Fehlpositionierung der Tubusspitze, einschließlich Cuffhernie
Diabetes mellitus	Bewegen des geblockten Tubus
vorausgegangene Chemotherapie	Bewegen des Halses / Kopfes bei geblocktem Tubus
vorausgegangene mediastinale Bestrahlung	heftiges Husten des Patienten (bei geblocktem Tubus)
fortgeschrittenes Alter Adipositas	Verwendung von stickstoffhaltigen Narkosegasen

Nahezu alle der in der Literatur beschriebenen Postintubationslazerationen treten an der Hinterwand der Trachea auf. Die in der Praxis auftretenden TR verlaufen meist rechtsseitig longitudinal entlang der Verbindung zu den Enden der Trachealspangen oder auch mittig longitudinal. So beschreiben z.B. Marty-Ané et al. in einer Arbeit von 1995 die fiberoptischen bronchoskopischen Befunde aller ihrer vorgestellten sechs Fallberichte als rechtsseitig an der Paries membranaceus verlaufende Rupturen an der Verbindung zu den knorpeligen Enden der Trachealspangen.

In einer retrospektiven Studie von Sippel et al. aus dem Jahr 2006 wurden 13 Fälle von longitudinal verlaufenden intubationsbedingten Trachearupturen

aufgeführt, die jeweils bronchoskopisch nachgewiesen wurden. In acht dieser Fälle zeigte sich eine rechtsseitige Ruptur, darunter vier an der Verbindung zu den Trachealspangen; in fünf Fällen kam es zu einer Ruptur nahe der Mittellinie der Tracheahinterwand (Sippel et al. 2006).

In den übrigen Fallberichten wird die genaue Lage der Läsionen oft nicht beschrieben. Eine Tendenz zu rechtsseitigen Verletzungen lässt sich jedoch erkennen; daneben werden mittig verlaufende Verletzungen beschrieben. Linksseitige Läsionen stellen eine absolute Ausnahme dar.

In den bildgebenden Verfahren wie Röntgen oder Computertomographie wird das nach rechts Abweichen der Tubusspitze als typisches Zeichen für eine TR beschrieben (Borasio et al. 1997, Rollins und Tocino 1987).

### **2.3 Ziele und Fragestellung**

Wesentliche Voraussetzung bei intubationsbedingten TR scheint bei Durchsicht der bisher vorliegenden Literatur das Vorherrschen zu großer Druckverhältnisse im Tubuscuffs zu sein. In mehreren Arbeiten wird dies auch als alleinig vermutete Ursache einer Trachearuptur angeführt. Dabei sind die Rahmenbedingungen, die für eine Ruptur notwendig sind, noch nicht weiter untersucht.

Wesentliches Ziel der experimentellen Untersuchung war die Überprüfung der Hypothese der Cuffüberblähung als Ursache einer intubationsbedingten TR und weiter, falls diese erreicht wird, die Ermittlung der notwendigen Berstungsdrücke für humane Tracheen. Zusätzlich sollten diese Werte validiert und auf veränderliche und unveränderliche Einflüsse sowie die Art und Lokalisation der auftretenden Perforation untersucht werden. Es galt dabei vor allem folgende Fragen zu klären:

- Ist es möglich, durch die Überblähung eines Tubuscuffs eine Trachearuptur zu erzeugen?
- Welche Berstungsdrücke sind für eine Trachearuptur notwendig?
- An welcher Stelle der Trachea treten Rupturen auf und wie sind diese geartet?

- Welchen Einfluss hat die Tubusgröße auf die Entstehung von Trachearupturen?
- Welchen Einfluss haben Körpergröße, Alter und Geschlecht und deren Kombination auf eine Trachearuptur?

Diese Fragen sollen in einer experimentellen Untersuchung geklärt werden.

### **3 Material und Methoden**

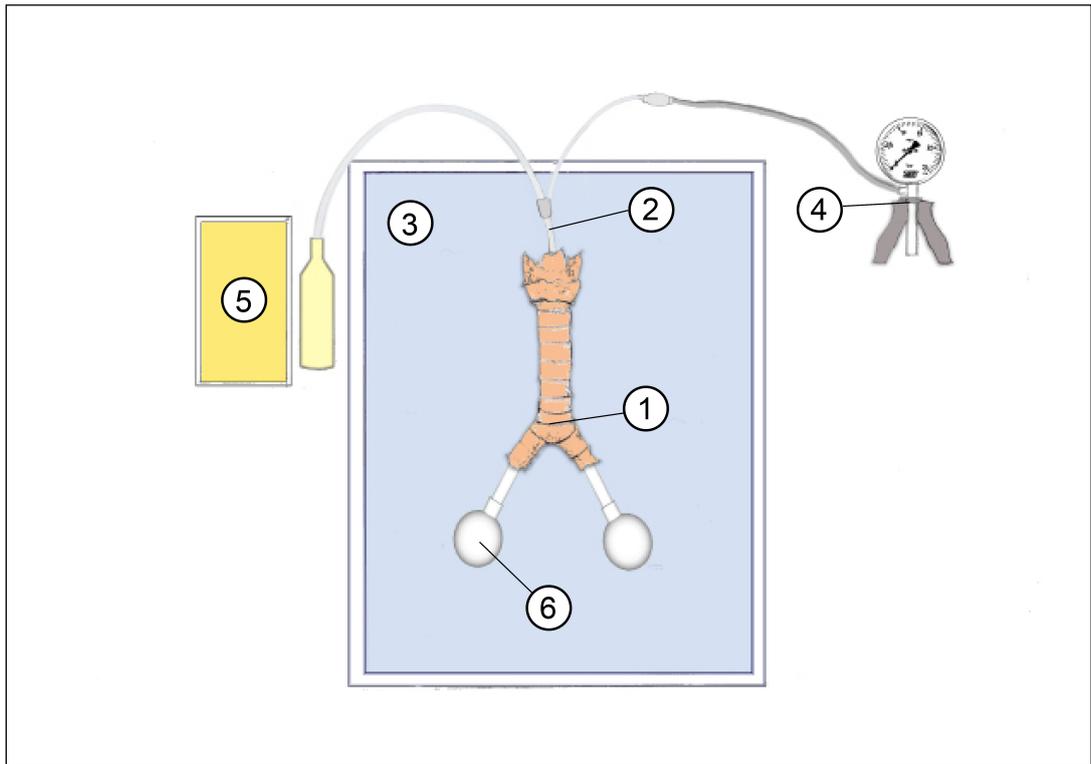
#### **3.1 Versuchsablauf**

Als Untersuchungsobjekte dienten 28 humane laryngo-tracheale Präparate (hltP), die bis spätestens 24 Stunden nach Obduktion für die Versuche genutzt wurden. Die Präparate wurden bis zur Versuchsdurchführung bei 4° C in einem Kühlschrank gelagert und bestanden aus dem kompletten Larynx einschließlich der äußeren Kehlkopfmuskulatur, umliegenden Weichteilgewebe und der Luftröhre. Die Trachea war von den angrenzenden Gewebestrukturen komplett gelöst, um möglichst exakte Messungen der Tracheadurchmesser durchführen zu können. Distal wurde bei der Obduktion entweder an den Hauptbronchien oder an den Lappenbronchien abgesetzt. Dies war von der jeweiligen Anatomie des vorliegenden Präparats abhängig. Die Trachea wurde stets in toto präpariert. Alle untersuchten Präparate wurden zu Lebzeiten nicht tracheotomiert. Der experimentelle Versuchsablauf fand in einem Bassin unter Wasser statt, um ähnliche hydrostatische Verhältnisse herzustellen, wie diese in situ gegeben sind und um auftretende Läsionen möglichst rasch durch austretende Luftblasen zu erkennen.

Ein Endotrachealtubus (Mallinckrodt, Hi-Contour, Covidien, USA) mit einem inneren diametralen Durchmesser (ID) von 5.0-10.0 wurde in korrekter Position in die Trachea platziert und mittels resorbierbarem Nahtmaterial (Vicryl 2.0/3.0) das umliegende Weichteilgewebe des Larynx luftdicht um den Tubus vernäht. Dabei wurde der knorpelige Anteil der Epiglottis mit eingeschlossen, um bessere Zugbedingungen und somit einen luftdichten Abschluss zu erlangen (siehe Abbildung 5).

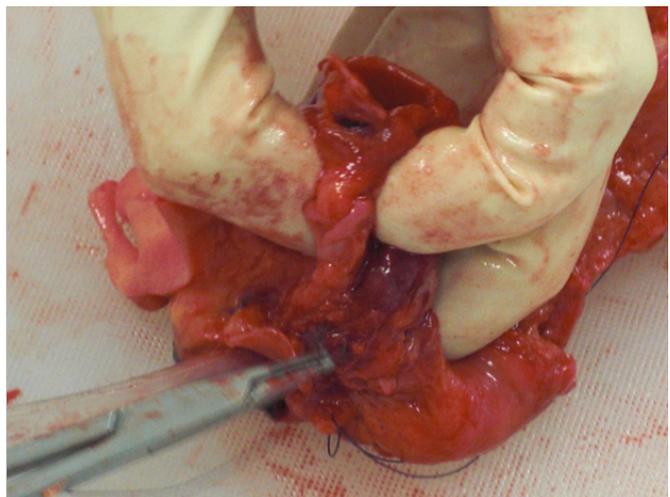
**Abbildung 3: Schematische Darstellung Versuchsaufbau**

1. laryngo-tracheales Präparat 2. Endotrachealtubus 3. Wasserbassin 4. pneumatische Druckpumpe 5. Beatmungsgerät 6. artifizielle Lunge



**Abbildung 4: Präparation des laryngo-trachealen Präparates**

Luftdichtes Vernähen der umliegenden Weichteilstrukturen um die jeweiligen Tuben (links: am Hauptbronchus, rechts: Endotrachealtubus (Epiglottis unterhalb des Nadelhalters sichtbar))



**Abbildung 5: Humanes laryngo-tracheales Präparat**

Das Präparat wurde luftdicht verschlossen, um eine Beatmung zu ermöglichen.

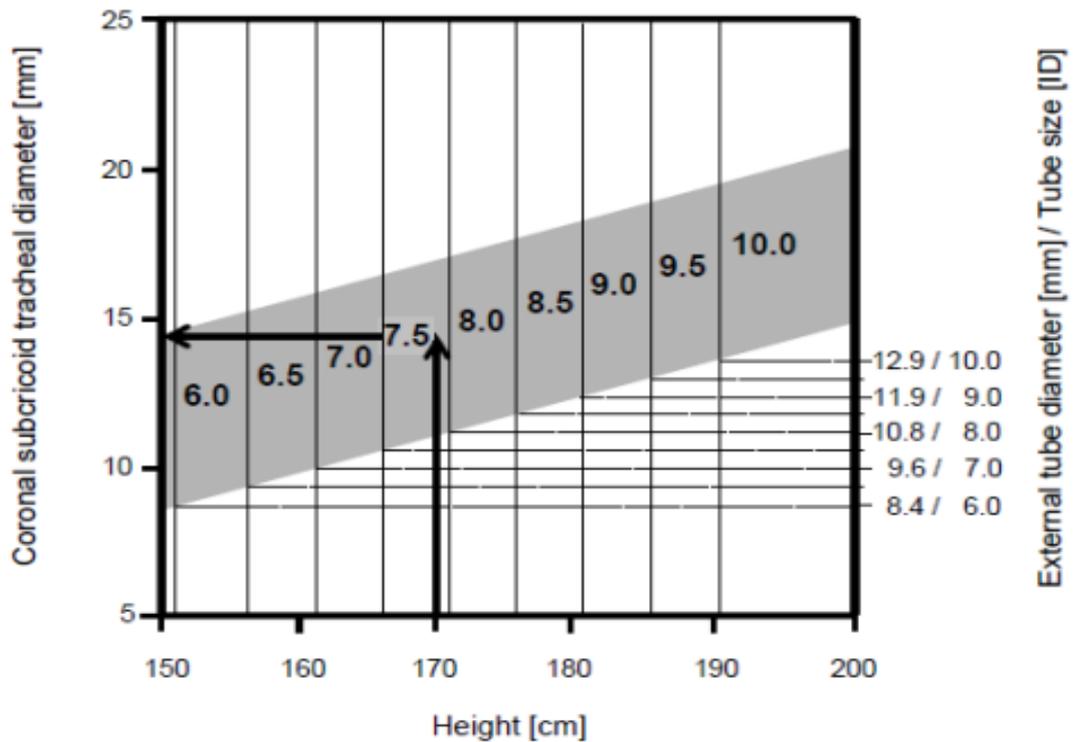


Die Auswahl der endolaryngealen Tuben, die in den Larynx eingesetzt wurden, erfolgte nach einem Nomogramm, mit dessen Hilfe an Hand der Körpergröße der jeweiligen Leiche ein passender Tubus ermittelt wurde. Sollte der Tubus zu groß gewählt worden sein, wurde die nächstgrößere Tubusgröße (ganze Größen) des aus dem Nomogramm resultierenden

Wertes verwendet. Beispielsweise erhielt ein 1,70 m großer Patient einen Tubus der Größe 8.0 anstatt 7.0.

**Abbildung 6: Nomogramm zur Auswahl der Tubusgröße**

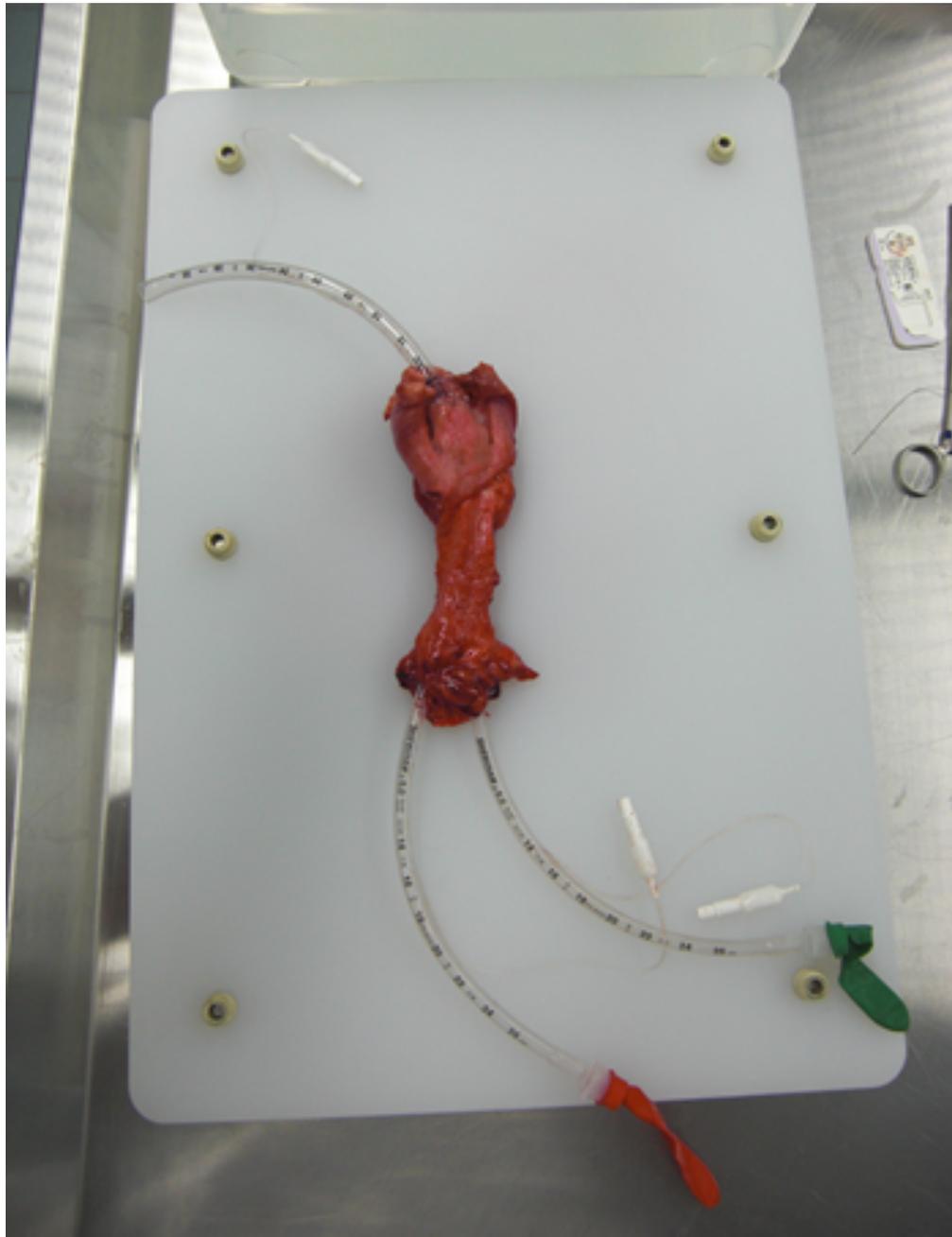
An Hand der Körpergröße der verstorbenen Patienten wurde der passende Tubus ausgewählt [entnommen Coordes *et al.*, Laryngoscope 2011].



Zur bestmöglichen Annäherung an in-vivo-Verhältnisse wurden in die Hauptbronchien Mallinkrodt-Covidien-Tuben der Größe 6.0 mit der Tubusspitze nach proximal als artifizielle Lunge eingebracht und ebenfalls luftdicht mit Vicrylfaden 2.0/3.0 an den verbliebenen Bronchialbäumen vernäht. Dabei wurde jeweils der dorsale membranöse Anteil der Bronchien gerafft, indem an den dorsalen Enden der Knorpelspangen eingestochen wurde und diese aneinandergesetzt wurden. Falls die Abtrennung auf Höhe der Lappenbronchien erfolgte, wurden diese in gleicher Weise mit einem Tubus versehen oder als „Blindsack“ luftdicht vernäht. Am Tubenende wurde ein handelsüblicher Luftballon als Lungenersatz platziert (siehe Abbildung 7).

**Abbildung 7: Präparat vor Beginn der Intervention**

Darstellung des hltP (humanes laryngo-tracheales Präparat) mit dem translaryngealen Tubus oben und unten den als artifizielle Lunge angeschlossenen Intubationstuben.



Das Präparat wurde in ein Wasserbecken gelegt, das aus transparentem Kunststoff bestand und eine Wassertiefe von ca. 10 cm hatte. Dabei wurde darauf geachtet, dass kein Wasser über den translaryngeal platzierten Tubus eintrat. Die Wassertemperatur betrug ca. 25°C.

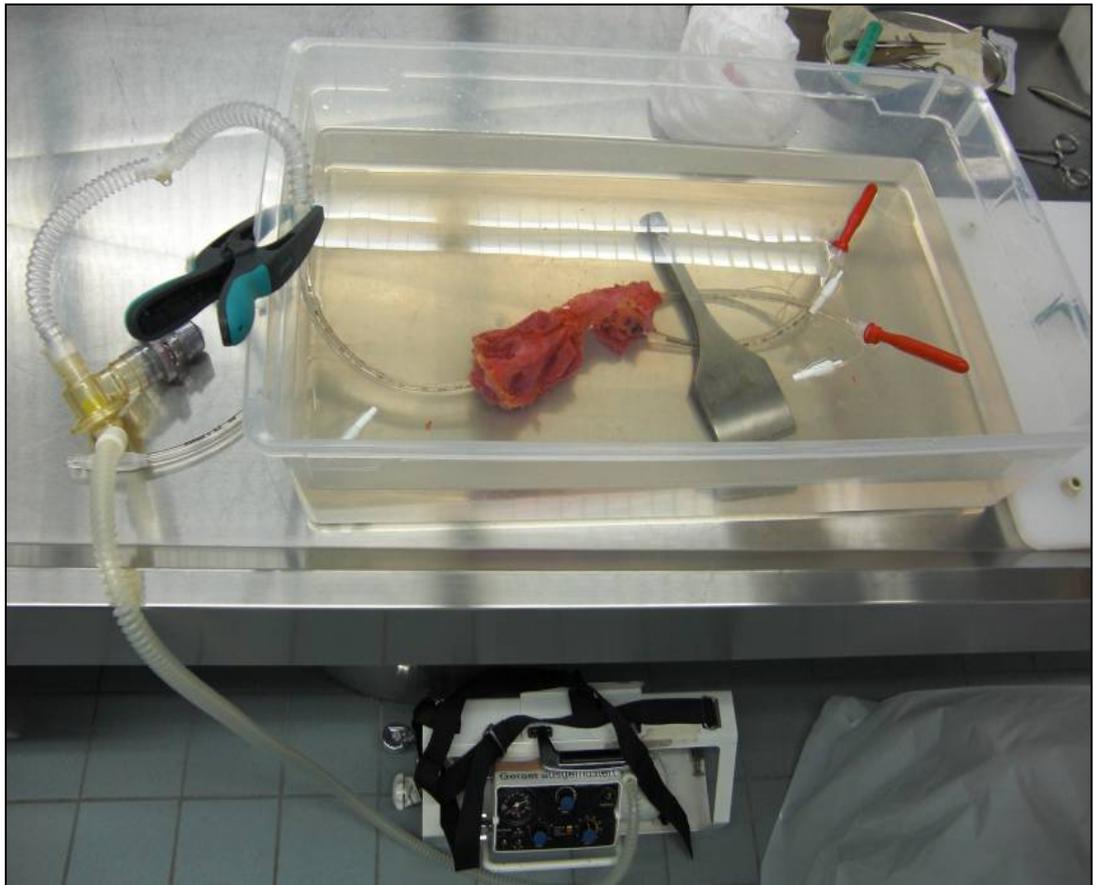
Der translaryngeal platzierte Tubus wurde an ein mobiles Beatmungsgerät (Fa. Dräger) angeschlossen und mit einer Beatmungsfrequenz von 18 Atemzügen und einem Atemminutenvolumen von sieben Litern pro Minute

beatmet, was dem durchschnittlichen Beatmungsmuster während einer Narkose entspricht.

Das laryngo-tracheale Präparat wurde während der Versuche komplett unter Wasser gehalten. Der translaryngeal platzierte Tubus wurde mit einer Klemme am Rand des Wasserbeckens fixiert und zusätzlich ein Metallinstrument zur Beschwerung der luftgefüllten Trachea auf die bronchialen Tuben gelegt wurde. Dabei wurde darauf geachtet, dass das Präparat spannungsfrei und ohne Auslenkung der jeweiligen Tubusspitzen zur Tracheawand, bzw. Wand eines Hauptbronchus, auf dem Boden des Wasserbeckens lag (siehe Abbildung 8).

**Abbildung 8: Experimentalaufbau mit Präparat**

Sichtbar das hltP mit angeschlossener artifizierender Lunge, unter dem Tisch ist das Beatmungsgerät befestigt.



Der Cuff des translaryngeal platzierten Tubus wurde an eine manuell zu bedienende pneumatische Druckpumpe P40.2 (SIKA, Kaufungen, DE) angeschlossen.

**Abbildung 9: Pneumatische Druckpumpe P40.2 (SIKA)**  
Die Drucksteigerung erfolgte in 100 mbar-Schritten.



Vor erstmaliger Cuffinsufflation wurden Sagittal- und Koronardurchmesser der Trachea vermessen. Hierzu wurde eine handelsübliche Schubleere verwendet (siehe Abbildung 10). Die Steigerung der Blockung des Cuffs erfolgte in 100-mbar-Schritten, beginnend bei 100 mbar. Unter Blockung wurde die Trachea auf Höhe des geblockten Cuffs im Sagittal- und Koronardurchmesser nach Änderung des Cuffdrucks vermessen. Die Blockung des Cuffs wurde jeweils für fünf Minuten aufrechterhalten, worauf eine Ruhephase mit entblocktem Tubus von einer Minute folgte. Hier wurde die Trachea visuell auf Läsionen inspiziert. Es wurde auf etwaige Fissuren oder aufsteigende Luftblasen unter der Beatmung geachtet. Die Lagerung der Trachea in einem Wasserbad ließ das Eintreten einer Perforation der

Trachea bei ständiger Beatmung mit einem Beatmungsgerät durch aufsteigende Luftblasen leicht erkennen.

Der Versuch wurde mit der Erkennung einer Tracheaperforation beendet. Der Berstungsdruck zum Zeitpunkt des Einreißen der Trachea wurde an der digitalen Anzeige der Druckpumpe abgelesen und dokumentiert (siehe Abbildung 9).

Nach Beendigung des Versuchsablaufs wurde Larynx und Trachea eröffnet und auf Auffälligkeiten, wie z.B. eine tumorösen Raumforderung, geprüft.

**Abbildung 10: Messung des Tracheadurchmessers**

Gemessen wurde der Tracheadurchmesser sagittal und koronar mittels Schubleere.



### 3.2 Statistische Verfahren

Die Datenerfassung erfolgte in Tabellen (MS Excel 2010). Die Ergebnisse der Experimente wurden entsprechend ihrer Skalierung deskriptiv ausgewertet und grafisch dargestellt. Die statistischen Berechnungen erfolgten mit SPSS 2009.

Unterschiede metrischer, nicht normalverteilter Daten wurden bei zwei Stichproben mit dem Mann-Whitney-U-Test auf Signifikanz überprüft. Ein p-Wert kleiner als 0,05 wurde als statistisch signifikant betrachtet.

Der Einfluss mehrerer Faktoren wurde mittels einer nichtparametrischen Varianzanalyse untersucht, auch unter Einbeziehung metrischer Kovariaten (Verfahren nach Brunner).

Die Berechnung der Berstungswahrscheinlichkeit einschließlich Konfidenzintervalle erfolgte mittels Kaplan-Meier-Analyse; der Vergleich zwischen verschiedenen Gruppen mit log-rank-Test. Alle Ergebnisse sind explorativ zu betrachten.

## 4 Ergebnisse

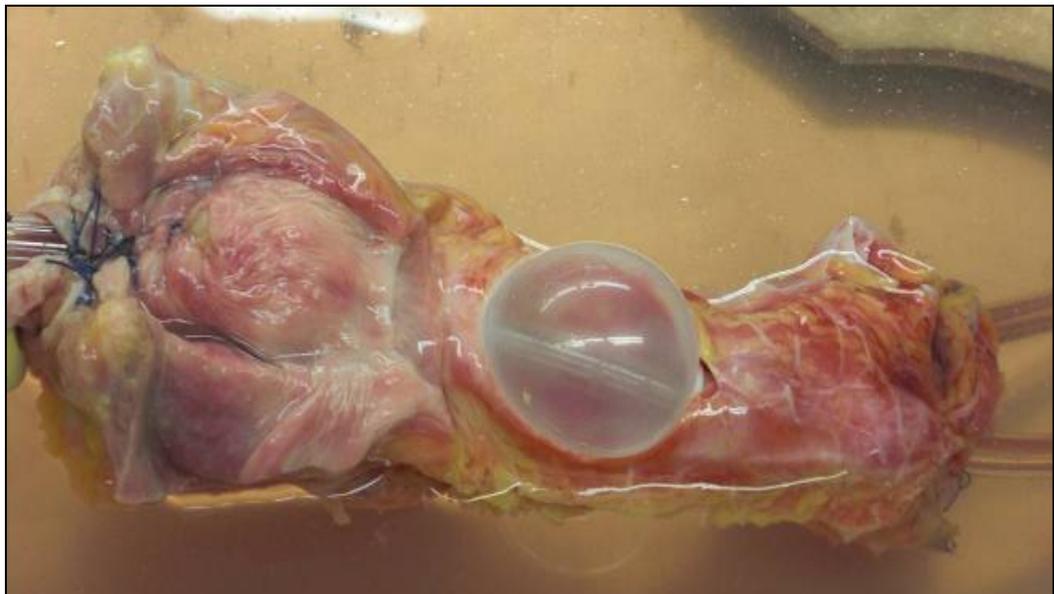
Untersucht wurden 28 hltP von verstorbenen Patienten, die in der Pathologie des Unfallkrankenhauses Berlin einer Obduktion zugeführt wurden. Für die Obduktion bestand eine schriftliche Einwilligung. Die hltP wurden bei der Obduktion von einem medizinischen Präparator entnommen und innerhalb von 24 Stunden nach Obduktion für den Versuch verwendet. Untersucht wurden ausschließlich hltP von Patienten, die vorher nicht einer Tracheotomie unterzogen wurden.

Ein hltP (Nr. 19, siehe Tabelle 2) wurde nicht in die statistische Auswertung einbezogen, da es hier bei einer vorbestehenden Anomalie rechts dorsal einer Knorpelspange zu einem vorzeitigem Einreißen des Cuffs kam.

### 4.1 Ort, Art und Zeitpunkt der Läsion

Bei allen untersuchten Präparaten kam es stets zu einem longitudinalen Einriss in der Mitte der Tracheahinterwand. Die Ausdehnung der Längsperforation entsprach der Cuffgröße. Die Rupturen traten in der Phase des Druckanstiegs oder einige Sekunden nach erfolgtem Druckaufbau auf.

**Abbildung 11: Perforierte Trachea mit sichtbarem Cuff des Tubus**  
Sichtbar ist der Austritt des Tubuscuff durch die Tracheahinterwand



**Abbildung 12: Perforierte Trachea mit sichtbarer Ruptur**

Einriss der Hinterwand in Längsrichtung in Höhe des Cuffs durch alle Wandschichten.



**4.2 Berstungsdruck**

Der Berstungsdruck der untersuchten 28 hltP, welcher zu einer Trachearuptur führte, lag im Bereich zwischen 700 und 1300 mbar. Die Ergebnisse der einzelnen hltP werden in Tabelle 2 aufgeführt:

**Tabelle 2: Versuchsergebnisse Präparate**

KG = Körpergröße, BD = Berstungsdruck

Proband	1	2	3	4	5	6
KG in cm	156	180	155	163	154	152
Alter	80	80	77	70	80	79
Geschlecht	m	m	w	m	w	w
Tubus	8 (zu groß)	9 (passend)	8 (zu groß)	8 (zu groß)	7 (passend)	6 (passend)
BD in mbar	800	1100	800	800	1000	1300

Proband	7	8	9	10	11	12
<b>KG in cm</b>	182	159	177	161	164	174
<b>Alter</b>	72	78	77	85	55	53
<b>Geschlecht</b>	m	w	m	w	m	m
<b>Tubus</b>	10 (zu groß)	8 (zu groß)	9 (zu groß)	7 (passend)	7 (passend)	10 (zu groß)
<b>BD in mbar</b>	1000	700	1200	1000	1200	1200

Proband	13	14	15	16	17	18
<b>KG in cm</b>	148	153	178	174	163	180
<b>Alter</b>	81	81	67	67	70	70
<b>Geschlecht</b>	w	w	m	m	m	m
<b>Tubus</b>	8 (zu groß)	8 (zu groß)	10 (zu groß)	8 (passend)	8 (zu groß)	10 (zu groß)
<b>BD in mbar</b>	700	800	1000	1300	700	800

Proband	19	20	21	22	23	24
<b>KG in cm</b>	167	176	160	176	159	172
<b>Alter</b>	59	37	70	73	72	77
<b>Geschlecht</b>	m	m	w	m	w	m
<b>Tubus</b>	7 (passend)	8 (passend)	6 (passend)	9 (passend)	6 (passend)	9 (passend)
<b>BD in mbar</b>	-----	1200	1300	1300	1200	1000

Proband	25	26	27	28
KG in cm	175	142	148	173
Alter	62	88	92	60
Geschlecht	m	w	w	m
Tubus	9 (zu groß)	5 (passend)	5 (passend)	9 (zu groß)
BD in mbar	1000	700	1300	900

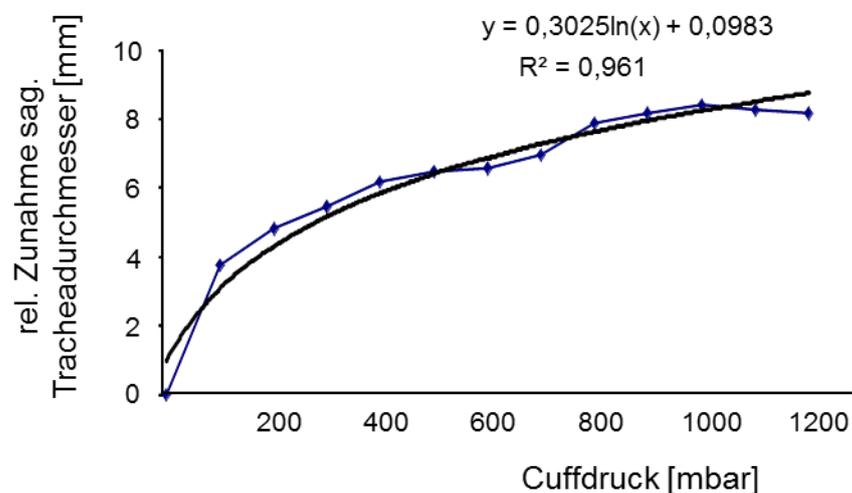
### 4.3 Änderung des Tracheadurchmessers

Sagittaler und koronarer Durchmesser der Trachea wurden während des Versuchsablaufs mit einer handelsüblichen Schubleere vermessen. Zunächst erfolgte eine Messung ohne Blockung des Tubuscuffs, im Anschluss wurde nach jeder weiteren Druckerhöhung von 100 mbar der sagittale und koronare Durchmesser gemessen und so die relative Zunahme in mm ermittelt.

Der gemittelte Verlauf der Änderungen ist in Abbildung 13 und Abbildung 14 dargestellt.

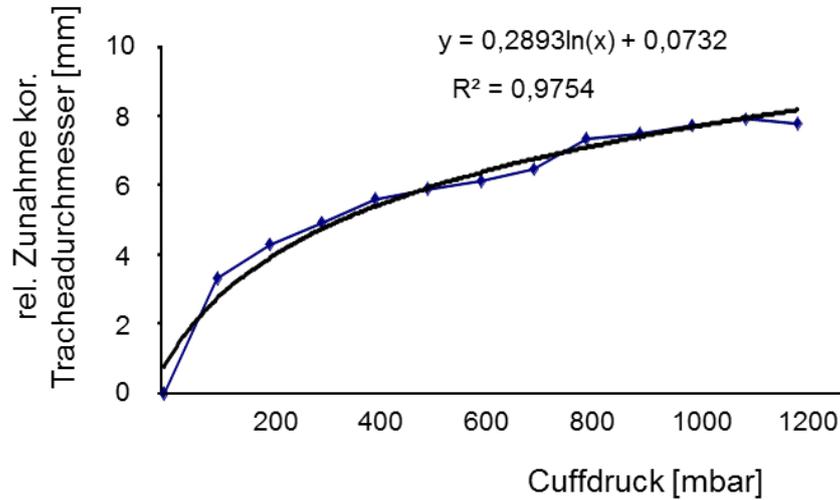
**Abbildung 13: Änderung sagittaler Tracheadurchmesser unter Drucksteigerung**

Dargestellt ist die Änderung des sagittalen Tracheadurchmessers unter steigendem Druck. Die Kurve nähert sich einem Maximum an.



**Abbildung 14: Änderung koronarer Tracheadurchmesser unter Drucksteigerung**

Dargestellt ist die Änderung des koronaren Tracheadurchmessers unter steigendem Druck. Die Kurve nähert sich einem Maximum an.



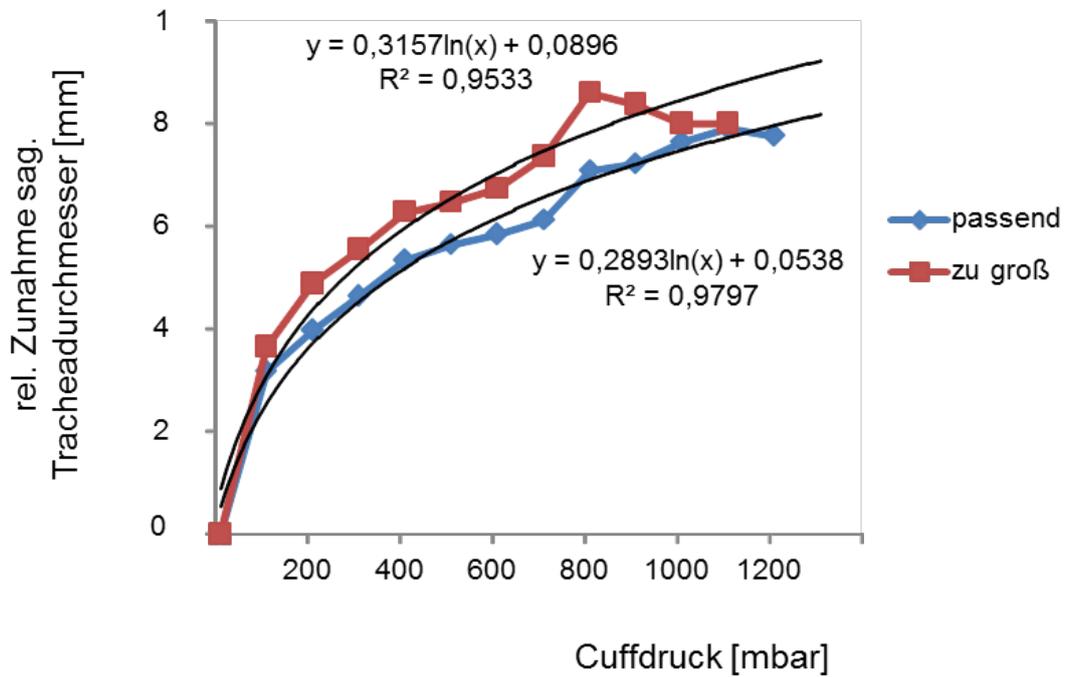
Es zeigt sich, dass die relative Zunahme des sagittalen und des koronaren Durchmessers, gemessen in 100-mbar-Schritten, annähernd gleiche Werte ergeben und kontinuierlich verlaufen. Die Kurve nähert sich dabei einem Maximum an. Der identische Kurvenverlauf zeigt, dass die hltP bis zur Berstung konzentrisch gedehnt werden.

Bei den Untersuchungen zum Vergleich der unterschiedlichen Tubusgrößen wurde im Weiteren nur die relative Zunahme im Sagittaldurchmesser betrachtet, da sich der koronare Durchmesser wie beschrieben gleich verhält (siehe Abbildung 13 und Abbildung 14).

Es zeigt sich, dass bei zu groß gewähltem Tubus die relative Zunahme des sagittalen Durchmessers der Trachea größer ausfällt als bei passend gewählten Tubus, d.h. die hltP werden bei gleichen vorherrschenden Druckverhältnissen bei Verwendung zu großer Tuben mehr gedehnt als bei passend gewählten Tuben (siehe Abbildung 15).

**Abbildung 15: Änderung sagittaler Tracheadurchmesser unterschiedlicher Tuben**

Dargestellt ist die Änderung des sagittalen Durchmessers der Trachea unter steigendem Druck. Der Verlauf der Kurven ist unabhängig von der Größe des Tubus, es kommt aber zu einer größeren Dehnung der Trachea bei zu großen Tuben.



**4.4 Einfluss der Tubusgröße auf den Berstungsdruck**

Um den Einfluss der Tubusgröße auf den Berstungsdruck zu untersuchen, wurden die hltP in zwei Gruppen unterteilt. Bei 14 hltP wurde ein nach Nomogramm (siehe Abbildung 6) adäquat zur Körpergröße gewählter Tubus verwendet; bei 13 hltP wurde der nächstgrößere (ganze Größen) zum nach Nomogramm eigentlich adäquaten Tubus verwendet.

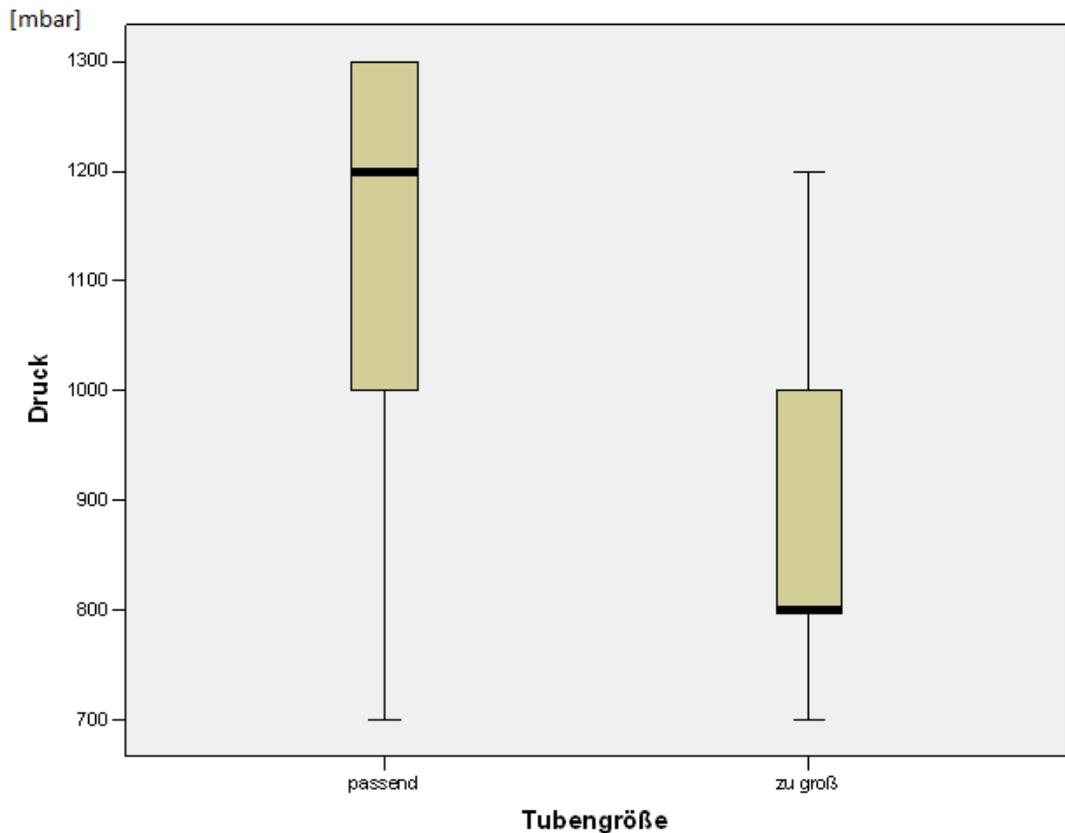
**Tabelle 3: Einfluss Tubusgröße auf Berstungsdruck**

Aufgeführt sind die Ergebnisse für nach Nomogramm passend (n=14) oder zu groß gewählte Tuben (n=13).

1 passend	N	Gültig	14
		Fehlend	0
	Mittelwert		1150,00
	Median		1200,00
	Standardabweichung		174,312
	Minimum		700
	Maximum		1300
	Perzentile	25	1000,00
	50	1200,00	
	75	1300,00	
2 zu groß	N	Gültig	13
		Fehlend	0
	Mittelwert		869,23
	Median		800,00
	Standardabweichung		160,128
	Minimum		700
	Maximum		1200
	Perzentile	25	750,00
	50	800,00	
	75	1000,00	

**Abbildung 16: Einfluss Tubusgröße auf Berstungsdruck**

Der Druck wurde in Millibar gemessen, Die Angaben passend und zu groß beziehen sich auf die Tubusgröße, die an Hand eines Nomogramms (siehe Abbildung 6) ermittelt wurden.



Der linke Boxplot (passend) zeigt die Berstungsdrücke der passend gewählten Tuben (n=14). Im Median liegen diese bei 1200 mbar. Im Boxplot rechts daneben (zu groß) liegen die Berstungsdrücke bei zu groß gewähltem Tubus (n=13) im Median bei 800 mbar (siehe Tabelle 3 und Abbildung 16).

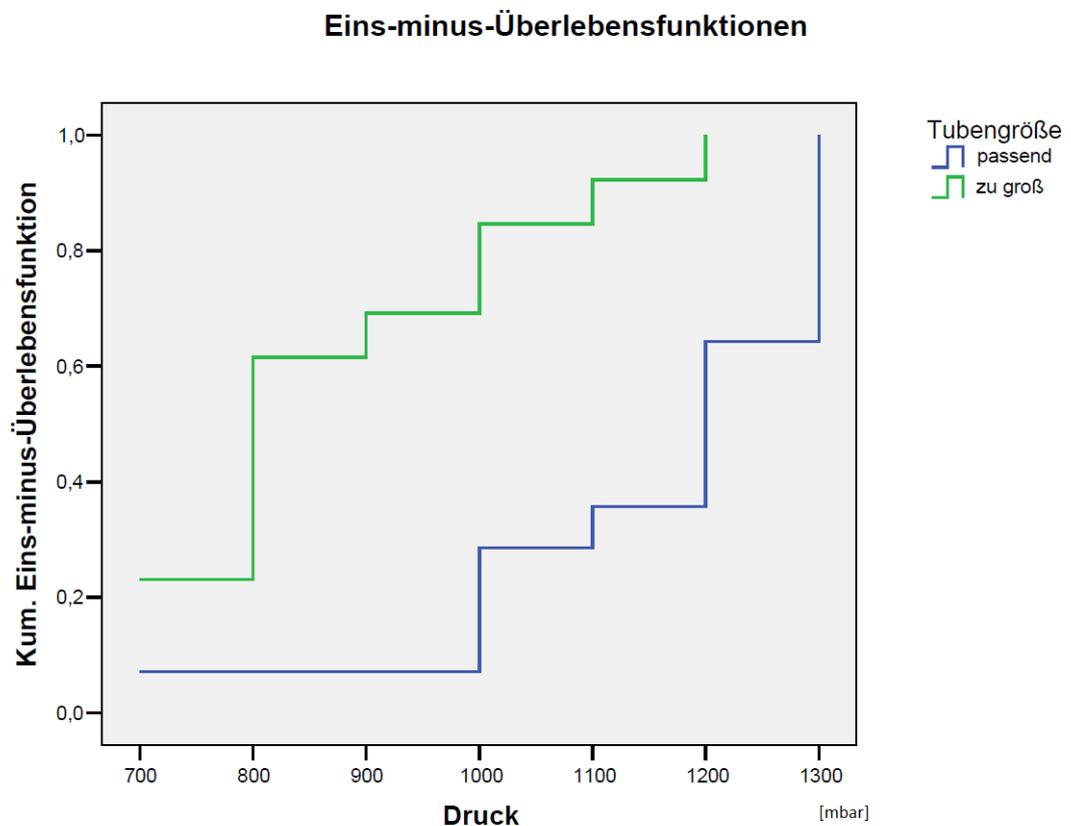
Der Unterschied in den Berstungsdrücken ist signifikant im Mann-Whitney-U-Test ( $p=0,001$ ). Es zeigt sich, dass ein zu großer Tubus bereits bei geringerem Druck zu einem Berstungsereignis führt als ein adäquat zur Körpergröße verwendeter Tubus.

### Wahrscheinlichkeit einer Berstung

Geprüft wurde die Wahrscheinlichkeit eines Berstungsereignisses bei steigendem Druck für passende und zu große Tuben. Die Ergebnisse sind in Abbildung 17 und Tabelle 4 abgebildet.

#### Abbildung 17: Wahrscheinlichkeit Berstung in Abhängigkeit von der Tubusgröße

Der Druck wurde in Millibar gemessen. Die Angaben passend und zu groß beziehen sich auf die Tubusgröße, die an Hand eines Nomogramms (siehe Abbildung 6) ermittelt wurden.



**Tabelle 4: Wahrscheinlichkeit Berstung in Abhängigkeit von der Tubusgröße**

Angegeben sind die Konfidenzintervalle (UG = Unterer Grenzwert, OG = oberer Grenzwert) der kumulierten Wahrscheinlichkeit einer Trachearuptur bei steigendem Druck (in mbar).

TUBENGRÖßE		DRUCK	KUMULIERTE_WAHRSCHEINLICHKEIT	UG	OG
passend	1	700	,07	,00	,21
	1	1000	,29	,05	,52
	1	1100	,36	,11	,61
	1	1200	,64	,39	,89
	1	1300	1,00	.	.
zu groß	2	700	,23	,00	,46
	2	800	,62	,35	,88
	2	900	,69	,44	,94
	2	1000	,85	,65	1,04
	2	1100	,92	,78	1,07
	2	1200	1,00	.	.

Bei 700 mbar beträgt die Wahrscheinlichkeit eines Berstungsereignisses bei passend gewähltem Tubus 0,07 (7%). Für das 95%ige Konfidenzintervall ergibt sich eine Untergrenze von 0,0 und eine Obergrenze von 0,21 (21%). Bei 1000 mbar findet ein Berstungsereignis bei passenden Tuben mit einer Wahrscheinlichkeit von 0,29 (29%) statt.

Bei einem zu groß gewählten Tubus beträgt die Wahrscheinlichkeit eines Berstungsereignisses bei 700 mbar 0,23 (23%). Das untere Konfidenzintervall beträgt 0, das obere 0,46 (46%). Es ist erkennbar, dass es bis 1000 mbar bei zu groß gewählten Tuben mit einer 85%igen Wahrscheinlichkeit zum Bersten der Trachea kommt. Das untere Konfidenzintervall beträgt hier 0,65 (65%), das obere 1 (100%). Der Unterschied zwischen den beiden Kurven wurde mit dem log-rank-Test mit  $p < 0,001$  geprüft und ist signifikant.

#### 4.5 Einfluss Körpergröße auf den Berstungsdruck

Untersucht wird der Einfluss der Körpergröße auf den festgestellten Berstungsdruck. Dabei wurden zwei Gruppen mit großen und kleinen Patienten gebildet. Gruppe 1 (n=13) beinhaltet Patienten ab 164 cm Körpergröße, Gruppe 2 (n=14) bis zu einer Körpergröße von einschließlich 163 cm.

Die Trennlinie zwischen großen und kleinen Patienten wurde bei 163 cm festgelegt, was zwei nahezu gleich großen Gruppen ergab. Diese Einteilung

beruhte auf der Anhäufung der in der Literatur beschriebenen intubationsbedingten TR bis zu einer Körpergröße von 163 cm. Beispielsweise beläuft sich der Anteil von Patienten, welche 163 cm oder kleiner sind, in den von Cardillo et al. geschilderten 30 Fällen auf 70% (=21 Fälle).

**Tabelle 5: Einfluss Körpergröße auf Berstungsdruck**

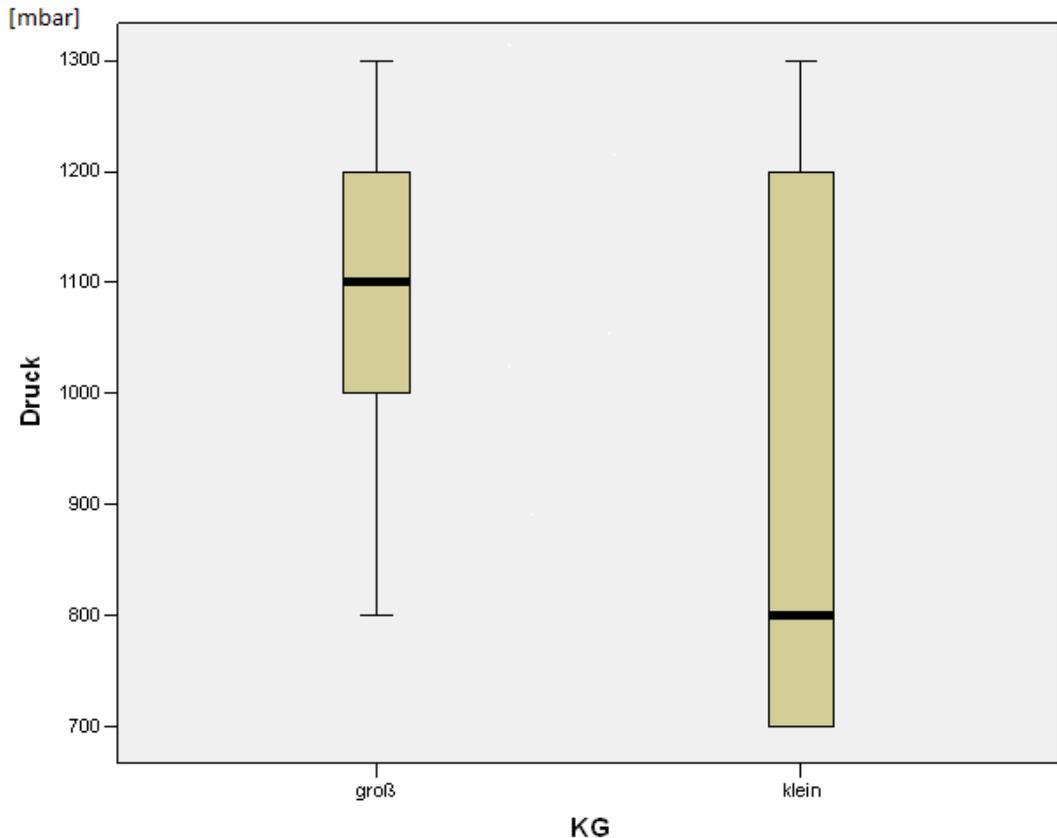
Aufgeführt sind die Werte für die Patientengruppen 1 groß (>163 cm) und 2 klein (<=163 cm).

1 groß	N	Gültig	13
		Fehlend	0
	Mittelwert		1100,00
	Standardabweichung		152,753
	Minimum		800
	Maximum		1300
	Perzentile	25	1000,00
		50	1100,00
		75	1200,00
2 klein	N	Gültig	14
		Fehlend	0
	Mittelwert		935,71
	Standardabweichung		243,712
	Minimum		700
	Maximum		1300
	Perzentile	25	700,00
		50	800,00
		75	1225,00

Oben aufgeführt die Gruppe der hltP „großer Patienten“ (n=13), darunter die die Gruppe der hltP “kleiner Patienten“ (n=14).

**Abbildung 18: Einfluss Körpergröße auf Berstungsdruck**

Der Druck wurde in Millibar gemessen. Die Angaben groß und klein beziehen sich auf die Körpergröße (KG), groß (>163 cm) und klein (<=163 cm).



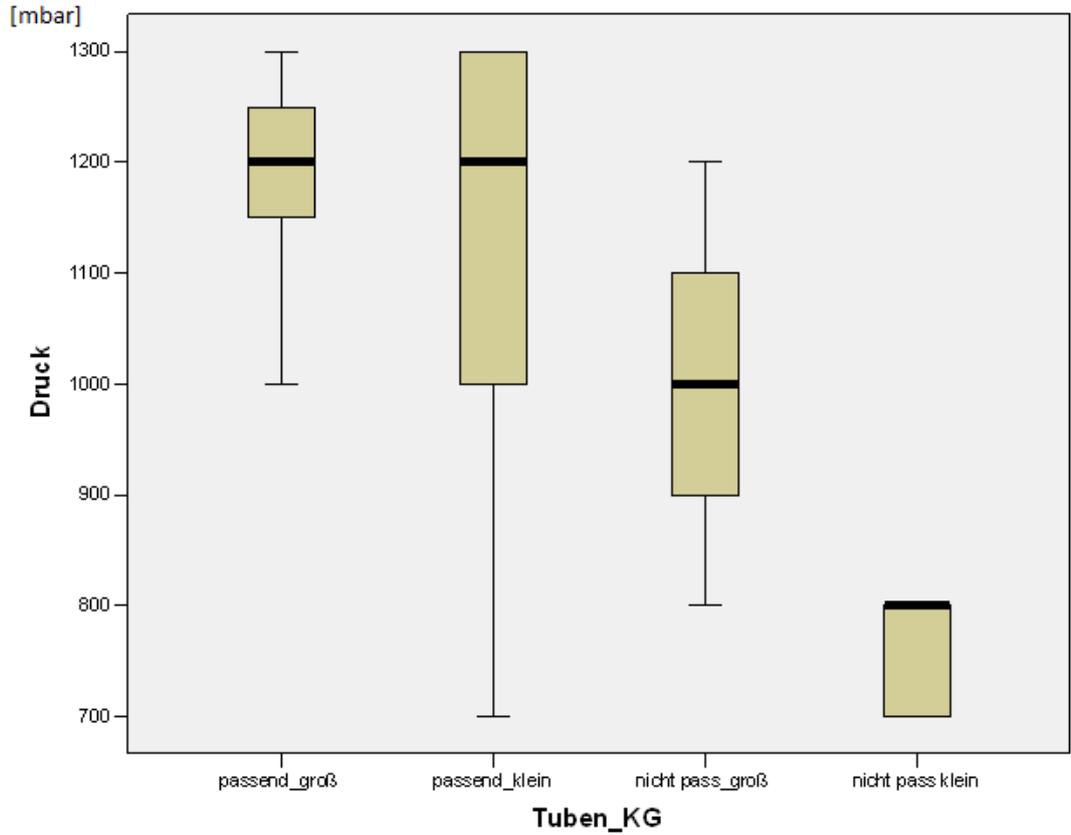
Bei großen Patienten (n=13) kommt es im Median bei 1100 mbar zum Einreißen der Trachea. Bei der Gruppe der kleinen Patienten (n=14) tritt der Einriss im Median bei 800 mbar auf. Der Unterschied in den Gruppen ist nicht signifikant im Mann-Whitney-U-Test ( $p=0,069$ ).

**4.6 Einfluss Tubusgröße und Körpergröße auf den Berstungsdruck**

Für diese Untersuchung des Einflusses der Tubusgröße und Körpergröße auf den Berstungsdruck wurden die Gruppen der großen Patienten und der kleinen Patienten jeweils weiter in nach Nomogramm adäquat und zu groß gewählten Tuben unterteilt. Untersucht werden sollte die Relevanz der Tubusgröße in Abhängigkeit von der Körpergröße. Sprich: Besteht bei kleineren Patienten ein höherer Einfluss eines zu groß gewählten Tubus auf den Berstungsdruck als bei großen Patienten?

**Abbildung 19: Tubusgröße, Körpergröße und Berstungsdruck**

Aufgeführt ist der Druck (in mbar) und die 4 Gruppen unter Tuben, KG, untergliedert nach Tubus- und Körpergröße. Die Angaben passend und nicht passend beziehen sich auf die Tubusgröße, die an Hand eines Nomogramms (siehe Abbildung 6) ermittelt wurden. Groß (>163 cm) und klein (<=163 cm) beziehen sich auf die Körpergröße.



**Tabelle 6: Tubusgröße, Körpergröße und Berstungsdruck**

Aufgeführt sind die Werte für die Gruppen passend sowie nicht passend (nicht pass). Die Angaben „passend“ und „nicht pass“ beziehen sich auf die Tubusgröße, die an Hand eines Nomogramms (siehe Abbildung 6) ermittelt wurden. Werte für die Patientengruppen groß bezeichnen groß (>163 cm) und klein (<=163 cm).

11 passend_groß	N	Gültig	7
		Fehlend	0
	Mittelwert		1185,71
	Standardabweichung		106,904
	Minimum		1000
	Maximum		1300
	Perzentile	25	1100,00
	50	1200,00	
	75	1300,00	
12 passend_klein	N	Gültig	7
		Fehlend	0
	Mittelwert		1114,29
	Standardabweichung		226,779
	Minimum		700
	Maximum		1300
	Perzentile	25	1000,00
	50	1200,00	
	75	1300,00	
21 nicht pass_groß	N	Gültig	6
		Fehlend	0
	Mittelwert		1000,00
	Standardabweichung		141,421
	Minimum		800
	Maximum		1200
	Perzentile	25	875,00
	50	1000,00	
	75	1125,00	
22 nicht pass klein	N	Gültig	7
		Fehlend	0
	Mittelwert		757,14
	Standardabweichung		53,452
	Minimum		700
	Maximum		800
	Perzentile	25	700,00
	50	800,00	
	75	800,00	

Es ergibt sich eine Unterteilung in vier Gruppen (siehe Tabelle 6). Ganz oben aufgeführt die Gruppe der „großen Patienten“, welche mit einem adäquaten Tubus versehen wurden (11, n=7), darunter die Gruppe der „kleinen Patienten, welche mit einem adäquaten Tubus versehen wurde (12, n=7). Ganz unten die Gruppe der „kleinen Patienten“ mit zu großem Tubus (22, n=7), darüber die Gruppe der „großen Patienten“ mit einem zu großen Tubus (21, n=6).

In Abbildung 19 sind die Berstungsdrücke in Abhängigkeit von Körpergröße der verstorbenen Patienten und Verwendung von passenden oder zu großen Tuben dargestellt. Es lässt sich ein höherer Berstungsdruck bei den nach Nomogramm passend gewählten Tubusgrößen ablesen. Der Medianwert liegt bei beiden bei 1200 mbar.

Der rechte äußere Balken gibt den Berstungsdruck bei kleinen Patienten (n=7), welche mit einem zu großem Tubus versorgt wurden, an – im Median bei 800 mbar. Daneben abgebildet die Gruppe der großen Patienten, welche mit einem zu großen Tubus versorgt wurden (n=6). Hier beträgt der Medianwert 1000 mbar.

Es zeigt sich, dass bei zu groß gewähltem Tubus ein geringerer Berstungsdruck notwendig ist, um eine Trachearuptur zu verursachen (vgl. 4.4) und dass dies vor allem für kleinere Patienten gilt. Hier treten mit im Median 800 mbar niedrigere Berstungsdrücke auf als bei größeren Patienten (1000 mbar).

Gleichzeitig zeigt sich, dass bei adäquater Größenwahl der Tuben keine unterschiedlichen Berstungsdrücke bei der Gruppe der „kleinen“ bzw. „großen“ Patienten (Median jeweils bei 1200 mbar) auftreten.

Dieses Ergebnis legt nahe, dass der entscheidende Einfluss für das Auftreten von Trachearupturen die Verwendung zu großer Tuben ist. Dies wirkt sich vor allem bei kleineren Patienten aus, da hier geringere Drücke notwendig sind, um die Trachea zu verletzen.

#### **4.7 Vergleich Alter und Körpergröße**

In einer nichtparametrischen Testung wurde das Alter, als metrischer Wert (tatsächliches Alter, nicht in Gruppen unterteilt), mit den Körpergrößen der in große und kleine eingeteilte verstorbene Patienten verglichen.

**Tabelle 7: Vergleich Alter und Körpergröße**

Groß (>163 cm) und klein (<=163 cm) beziehen sich auf die Körpergröße (Gruppe 1=große Patienten, Gruppe 2=kleine Patienten). In der rechten Spalte sind die Altersangaben aufgeführt.

1 groß	N	Gültig	13
		Fehlend	0
	Mittelwert		65,38
	Median		67,00
	Standardabweichung		11,969
	Minimum		37
	Maximum		80
	Perzentile	25	57,50
		50	67,00
		75	75,00
2 klein	N	Gültig	14
		Fehlend	0
	Mittelwert		78,79
	Median		79,50
	Standardabweichung		6,750
	Minimum		70
	Maximum		92
	Perzentile	25	71,50
		50	79,50
		75	82,00

Es findet sich ein signifikanter Unterschied zwischen den Gruppen im Mann-Whitney-U-Test ( $p=0,002$ ). Es konnte gezeigt werden, dass in der Untersuchung ältere Patienten kleiner waren als jüngere. Daneben sind die verstorbenen Frauen durchschnittlich 80 Jahre alt, die Männer 67 Jahre. Diese Verteilung entspricht der demographischen Verteilung in Deutschland, welche mit einer Abnahme der Körpergröße und Zunahme des weiblichen Geschlechts bei zunehmendem Alter einhergeht.

Im Weiteren wurde versucht, die einzelnen Faktoren auf ihre Gewichtung bei der Entstehung einer Ruptur zu prüfen. Verwendet man Tubusgröße und Körpergröße als unabhängige Faktoren, zeigt sich bei der nonparametrischen Varianzanalyse nach Brunner der Einfluss der Tubengröße mit  $p<0,001$  und der Körpergröße mit  $p=0,0118222$  als signifikant. Unter zusätzlicher Verwendung des Alters als Covariate und der Tubengröße und der Körpergröße als jeweils unabhängige Faktoren ergibt sich eine Signifikanz für die Tubengröße von  $p<0,001$ , während der Einfluss der Körpergröße mit  $p=0,2238278$  keinen signifikanten Wert hat. Für das Alter erhält man hier einen ebenfalls nicht signifikanten Wert von  $p=0,125$ .

Somit ist der wesentliche Faktor für das Auftreten von Trachearupturen die Tubusgröße. Zu groß gewählte Tuben wirken sich durch einen geringeren Berstungsdruck vor allem bei kleineren Patienten aus.

#### 4.8 Einfluss Geschlecht auf den Berstungsdruck

Untersucht wurde, ob das Geschlecht einen Einfluss auf den Berstungsdruck hat. Bei der Einteilung der verstorbenen Patienten nach Geschlecht erhält man für die in Tabelle 8 oben aufgeführte männliche Gruppe n=16 hltP und darunterstehend n=11 hltP der weiblichen Patienten.

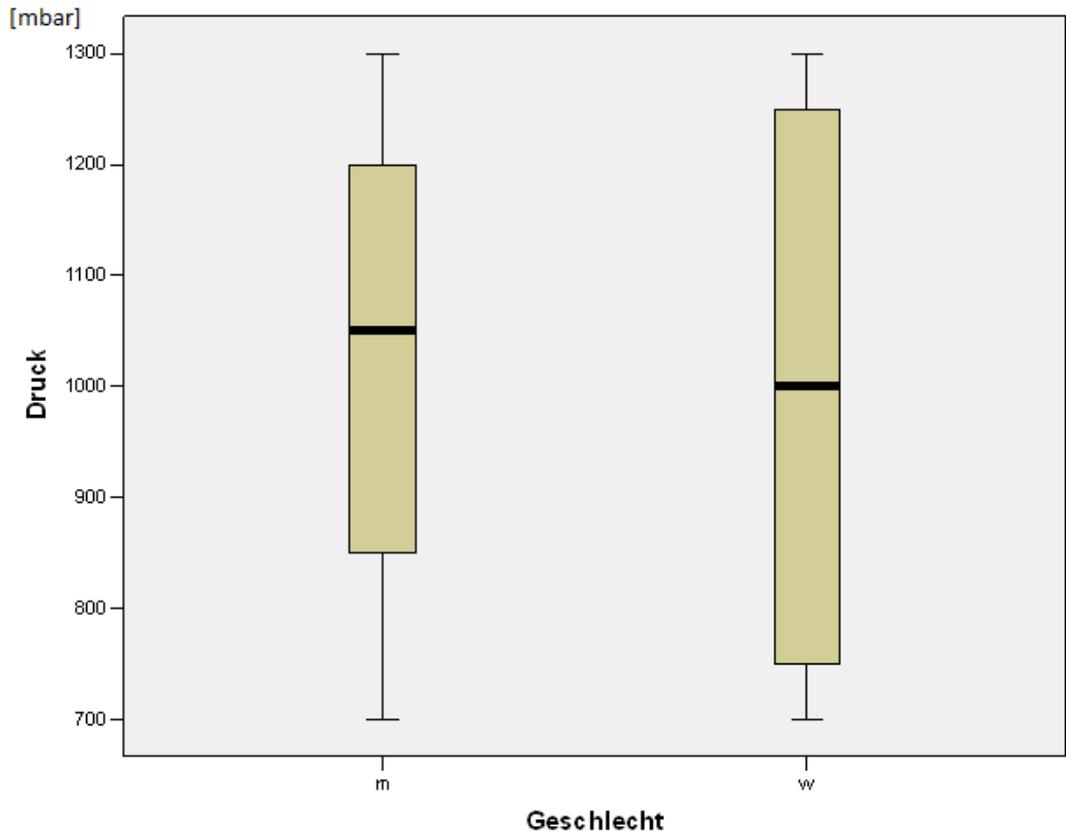
**Tabelle 8: Einfluss Geschlecht auf den Berstungsdruck**

Aufgeführt sind die Werte für den Berstungsdruck in den Gruppen m=männlich und w=weiblich.

1 m	N	Gültig	16
		Fehlend	0
	Mittelwert		1037,50
	Standardabweichung		192,787
	Minimum		700
	Maximum		1300
	Perzentile	25	825,00
	50	1050,00	
	75	1200,00	
2 w	N	Gültig	11
		Fehlend	0
	Mittelwert		981,82
	Standardabweichung		256,196
	Minimum		700
	Maximum		1300
	Perzentile	25	700,00
	50	1000,00	
	75	1300,00	

**Abbildung 20: Einfluss Geschlecht auf den Berstungsdruck**

Der Druck wurde in Millibar gemessen, das Geschlecht mit m=männlich und w=weiblich bezeichnet. Der Unterschied ist nicht signifikant.



Im Mann-Whitney-U-Test lässt sich mit  $p=0,565$  kein signifikanter Unterschied zwischen den Geschlechtern bezüglich des Berstungsdrucks feststellen. Die Medianwerte für beide Geschlechter liegen um 1000 mbar.

Männliche Patienten sind hier überwiegend auch große Patienten (81,3%), während alle weiblichen Patienten klein sind. Der Unterschied der Druckwerte zeigt sich zwischen den Körpergrößen deutlicher als zwischen den Geschlechtern. Das unterstreicht, dass die geringere Körpergröße der Frauen den beeinflussenden Faktor für das in der Praxis vermeintlich gehäufte Auftreten von intubationsbedingten TR beim weiblichen Geschlecht darstellt.

## 5 Diskussion

### 5.1 Einleitung

Trachearupturen infolge von Intubation sind eine seltene, jedoch potentiell lebensbedrohliche Komplikation. Die genaue Ursache einer intubationsbedingten TR bleibt zumeist unklar und wurde bisher in der Literatur größtenteils hypothetisch diskutiert; hier liegen lediglich wenige, meist nur von wenigen Fallzahlen berichtende Case-Reports vor. Auch variieren diese beispielsweise bei der Beschreibung der exakten Lokalisation der Läsionen oder Angaben zu Körpergrößen der betroffenen Patienten. Die größten Fallzahlen mit jeweils 30 Patienten lieferten Conti et al. (2006) und Cardillo et al. (2009). Eine Aussage über eine etwaige Seitenpräferenz wird bei der Beschreibung der Läsionen in beiden Artikeln nicht getroffen.

Eine Einteilung der potentiellen Ursachen kann zwischen anatomischen/pathophysiologischen und mechanischen vorgenommen werden (siehe Tabelle 1). Als anatomischen/pathophysiologische Ursachen intubationsbedingter TR werden angeborene Fehlbildung (Trachea oder Lobus azygos (Grismer und Read 1998)), Tracheomalazie, Neoplasien, einschließlich mediastinaler Lymphknoten, welche zu einer Auslenkung der Trachea führen, COPD und andere entzündliche Erkrankungen der Atemwege, Diabetes, die dauerhafte Einnahme von Kortison, Adipositas, eine vorausgegangene Chemotherapie oder Bestrahlung (Barbetakis et al. 2008) sowie das Alter und Geschlecht des Patienten angeführt (Marty-Ané et al. 1995). Bei einer Literaturübersicht von Chen et al. (2001) waren beispielsweise bei einer Gesamtanzahl von 56 zusammengefassten Fallberichten  $\frac{2}{3}$  der Patienten über 50 Jahre alt. Eine relative Schwäche der Paries membranaceus der Trachea bei Frauen wird ebenfalls häufiger vermutet (u.a. Wagner et al. 1995). Minambres et al. geben 2009 den Anteil der Frauen unter den betroffenen Patienten mit 86,2 % an, durchschnittlich waren diese über 50 Jahre alt. Andere Arbeiten führen das gehäufte Auftreten intubationsbedingter TR bei Frauen jedoch auf den Zusammenhang mit zu distal in der kürzeren Trachea platzierten Tuben und zu großen verwendeten Tuben bei geringerer Körpergröße zurück (Kaloud et

al. 1997, Chen et al. 2001, Lampl 2004). Als mechanische Ursachen werden u.a. die direkte Verletzung der Trachea mit einem über den Tubus hinausragenden Führungsstab oder mit der Tubusspitze vermutet (Wagner et al. 1995). Untersuchungen haben diesen Erklärungsansatz jedoch als unwahrscheinlich beschrieben, da der bei der Intubation in die Trachea eingeführte Tubus lediglich Kontakt zur Vorderwand und zu den Seitenwänden der Trachea haben kann (van Klarenbosch et al. 1994). Weiterhin werden ein zu groß gewählter Tubus, das forcierte Husten oder das Bewegen des Tubus oder des Kopfes des Patienten bei geblocktem Cuff (Marty-Ané et al. 1995), eine Fehlpositionierung der Tubusspitze bis in den rechten Hauptbronchus (Yam et al. 1992) sowie v.a. in Notfallsituationen der mehrmalige Versuch einer Intubation und die Erfahrung bzw. Unerfahrenheit des Intubierenden diskutiert. Eine weitere Fehlpositionierung des Tubus stellt eine zirkulär unvollständige Entfaltung eines Tubuscuffs (Cuffhernie) dar. Die Verwendung eines doppelumigen Endotrachealtubus wird ebenfalls als läsionsgefährdend beschrieben (Fitzmaurice und Brodsky 1999, Barbetakis et al. 2008, Kim et al. 2011).

Generell wird die Überblähung des Tubuscuffs mit konsekutiver Ruptur der Trachea am häufigsten als verursachend für eine intubationsbedingte TR vermutet (Marty-Ané et al. 1995, Striebel et al. 1997, Seidl et al. 2002, Stannard et al. 2003, Lim et al. 2012).

Verwendung von Stickoxiden bei der Narkose kann aufgrund der Permeabilität der Tubuscuffs den Cuffdruck zusätzlich erhöhen (Mosby et al. 1988, Dullenkopf et al. 2004). Außerdem können wie o.g. das Bewegen des Kopfes oder Tubus selbst ohne vorheriges Entblocken des Cuffs oder forciertes Husten des Patienten den Cuffdruck bzw. den Druck auf die Trachea temporär verstärken. Die Verwendung zu großer Tuben scheint im Zusammenhang mit der Cuffüberblockung bei einigen Autoren eine entscheidende Rolle zu spielen (Mullan et al. 2006, Medina et al. 2009, Coordes et al. 2011). Des Weiteren ist völlig unklar, inwieweit die in der Praxis nicht unübliche Handhabung der Tubusblockung mit einer Spritze „von Hand“, ohne verwendete Manometrie, kurzzeitig vorherrschende hohe Druckspitzen erzeugt. Die Verwendung einer manuell zu bedienenden

Druckpumpe in den durchgeführten Untersuchungen ähnelt der Handhabung einer manuellen Cuffblockung mittels einer Spritze und wurde bewusst gewählt, um die Realsituation zu imitieren. In beiden Fällen ist es denkbar, dass ein nicht kontinuierliches Insufflieren des Cuffs „per Hand“ zusätzliche Druckspitzen an den Tracheawänden begünstigt.

Es gibt also eine Reihe von potentiellen Faktoren, welche den Cuffdruck direkt bzw. wie bei der Verwendung zu großer Tuben die Druckverhältnisse an der Trachea erhöhen können, da sich hier die Vergrößerung des Cuffvolumens auswirkt. Ein multifaktorielles Geschehen zweier oder mehrerer der eben genannten Faktoren ist bei der Entstehung einer durch Überblockung des Cuff verursachten TR daher also durchaus vorstellbar und wohl eher kein Einzelfall.

Wesentliche Voraussetzung einer intubationsbedingten TR scheint bei Durchsicht der bisherig vorliegenden Literatur in den meisten Fällen das Vorherrschen zu großer Druckverhältnisse des Tubuscuffs zu sein. In vielen Artikeln wird dies auch als alleinige Ursache einer Trachearuptur angeführt (Marty-Ané et al. 1995, Striebel et al. 1997, Seidl et al. 2002, Stannard et al. 2003, Lim et al. 2012).

Anatomisch besteht die Trachea aus 14 bis 22 Trachealspangen bei einer Länge von 10 bis 13 cm. Bei Frauen sind die hufeisenartigen, nach dorsal offenen Knorpelspangen eher c-förmig, bei Männern eher u-förmig (Mehta und Myat 1984). Die einzelnen Knorpelspangen sind durch Bänder, die Ligg. anulare, miteinander verbunden. Der dorsale Anteil, die Paries membranaceus, besteht aus Bindegewebe und dem Musculus trachealis, welcher in einer inneren Muskelschicht stärker ausgebildete, querverlaufende, die Enden der Trachealspangen verbindende Muskelfasern und in einer äußeren Schicht längs verlaufende Muskelfasern beinhaltet.

Das Ziel einer endotrachealen Intubation, sei es durch oralen oder nasalen Weg oder durch Tracheotomie, ist stets die Herstellung einer sicheren Verbindung zwischen Beatmung (bzw. Respirator) und Patientenlunge. Dabei kommen verschiedene Typen von Endotrachealtuben zum Einsatz.

Ein solcher Tubus besteht normalerweise aus einem dünnen, an beiden Enden geöffneten Schlauch. Kurz oberhalb der unteren Öffnung befindet sich bei Endotrachealtuben für Erwachsene eine Blockmanschette (*Cuff*). Diese Vorrichtung kann über einen dünnen Schlauch, der an der Seite des Tubus verläuft, aufgeblasen werden, dichtet dann die Luftröhre (Trachea) ab und ermöglicht eine Beatmung in einem geschlossenen System und vermindert das Risiko einer Aspiration. Am oberen Ende ist der Endotrachealtubus mit einem normierten Verbindungsstück ausgestattet, das den Anschluss an ein Beatmungsgerät ermöglicht.

Die Cuffs für Endotrachealtuben bestehen aus Silikon, die mit geringem Luftdruck aufgeblasen werden (Niederdruckcuffs). Dadurch wird die Gefahr von druckbedingten Schleimhautschäden im Bereich der Luftröhre vermindert. Aus Gummi gefertigte Hochdruckcuffs werden nur noch selten benutzt. Bei diesen früher verwendeten „high pressure, low volume-cuffed tubes“, welche bei höheren Cuffdrücken und gleichzeitig kleinerem Volumen eine kleinere Auflagefläche zur Trachea im Vergleich zu den heutzutage gängigen „high volume-low pressure-cuffed tubes“ aufwiesen, konnte durch Bronchoskopie 24 Stunden nach Extubation deutliche Anzeichen einer Ischämie am Tracheagewebe festgestellt werden (Honeybourne et al. 1982). Die heutzutage in der Regel verwendeten „high volume-low pressure-Cuffs“ sind entweder zylindrisch oder neuerdings auch konisch geformt. In der Praxis geläufiger ist derzeit noch die zylindrische Version. Die konische Formung soll ein besseres Abdichten des Cuffs an der Trachea gewährleisten und dadurch Sekretfluß nach pulmonal und somit das Auftreten von Pneumonien verhindern sowie gleichzeitig eine suffiziente Überdruckbeatmung ermöglichen (Dave et al. 2010). Inzwischen sind ebenfalls Intubationstuben verfügbar, welche über ein subglottisches Sekretdrainagesystem verfügen, um Sekretfluß weiterhin zu minimieren – diese wurden in Studien jedoch kontrovers beurteilt (Fernandez et al. 2012). Daneben wurden zur Reduktion von Biofilmen neue Materialien wie z.B. Polyurethane entwickelt.

Bei den in den eigenen in-vitro-Versuchen verwendeten Tuben handelt es sich um zylindrisch geformte „high volume-low pressure-Cuffs“, wie sie

heutzutage in der Praxis am häufigsten eingesetzt werden. Die Angaben der maximal zulässigen Empfehlung zur Cuffblockung verschiedener Autoren variiert leicht. Evidenz-basierte Empfehlungen liegen bisher nicht vor. Meist wird für die Blockung der „high volume-low pressure-Cuffs“ ein Druck von etwa 30 mbar oder 30 cmH<sub>2</sub>O als obere Grenze empfohlen, teilweise auch weniger. Während der Blockung des Tubuscuffs sollte mittels Cuffdruckmesser darauf geachtet werden, dass diese Werte nicht überschritten werden. Jedoch kann davon ausgegangen werden, dass es in der Praxis häufig zu einer Überschreitung dieser Empfehlung kommt, vor allem weil Cuffdruckmesser nicht in allen Kliniken standardmäßig zum Einsatz kommen.

Guyton et al. schätzten das Auftreten ischämischer Schleimhautschädigungen der Trachea trotz verwendeter „high volume-low pressure-Cuffs“ auf etwa 10% aller mechanisch beatmeten Patienten (Guyton et al. 1991).

Auch Sengupta et al. wiesen 2004 darauf hin, dass unter fehlender Verwendung eines Cuffdruckmessers bei den von ihnen untersuchten 93 Patienten an drei verschiedenen Kliniken lediglich in 27% der Fälle ein gewünschter Cuffdruck zwischen 20-30 cmH<sub>2</sub>O erreicht wurde. Bei 27% der Patienten überstieg der Cuffdruck 40 cmH<sub>2</sub>O.

Nachgewiesenermaßen führt eine Überschreitung dieses Wertes potenziell ab 30 cmH<sub>2</sub>O zu einer Reduzierung des Blutflusses in der Schleimhaut der Trachea sowie ab 45 cmH<sub>2</sub>O zu einem komplettem Erliegen des Blutflusses (Somri et al. 2002), was Schleimhautverletzungen mit resultierender Tracheastenose nach Abheilung, tracheo-ösophageale Fistelbildung oder Tracheadilatation bis hin zur Tracheaperforation zur Folge haben kann (Guyton et al. 1991).

Eine Studie von Hoffmann et al. untersuchte 2006 die in der Praxis durchaus oft verwendete Handhabung der manuellen Cuffblockung mit einer Spritze ohne Manometer. Probanden waren 41 notfallmedizinisch tätige Ärzte mit einer durchschnittlichen notfallmedizinischen Berufserfahrung von 9,2 Jahren, welche in der Annahme einer adäquaten Cuffblockung in 90% (n=37)

durch ein Manometer nicht mehr messbare Drücke von über 120 cmH<sub>2</sub>O (entspricht 118 mbar) in einen Tubuscuff eines simulierten Tracheamodells insufflierten. Im Durchschnitt lag der angegebene insufflierte Druck bei 93 cmH<sub>2</sub>O, also etwa dreifach höher als maximal empfohlen. Der tatsächliche durchschnittliche Druck dürfte jedoch weitaus höher gelegen haben, da Druckwerte lediglich bis 120 cmH<sub>2</sub>O erfasst werden konnten. Außerdem wurde untersucht, zu welchem Prozentsatz die teilnehmenden Ärzte in der Lage waren, einen überblockten Cuff mittels Palpation des Kontrollballons zu detektieren. Hier wurden lediglich 22% der überblockten Tuben richtig erkannt.

Auch Michlig wies 2013 daraufhin, dass sogar massiv hohe Überblockung des Cuffs durch alleinige Palpation des Kontrollballons auch durch erfahrenes ärztliches Personal nicht erkannt wird. In der von ihm durchgeführten Studie sollten die teilnehmenden Probanden einen Cuffdruck von 120 cmH<sub>2</sub>O ermitteln, also einen etwa viermal höher als zulässigen Cuffdruck. Ärztliche Probanden (Anästhesisten) wurden je nach Erfahrung in drei Gruppen eingeteilt. Als Vergleichsgruppe diente eine Gruppe von Praktikanten des Operationspersonals. Der Cuffdruck sollte lediglich als „in etwa korrekt“, „zu hoch“ oder „zu niedrig“ eingeschätzt werden. Im Ergebnis unterschieden sich die richtigen Angaben der Teilnehmer nicht von solchen, welche durch alleiniges Raten ohne Palpation des Kontrollballons erreicht worden wären. Die Einschätzung erfahrener Fachärzte glich statistisch gesehen der Vergleichsgruppe.

Lim et al. berichten 2012 in ihrer Studie, dass bei den meisten hausinternen Intubationen Cuffdrücke von über 50 cmH<sub>2</sub>O vorlagen, bei einigen sogar über 100 cmH<sub>2</sub>O.

Eine rein manuelle Handhabung der Cuffblockung ist somit nachgewiesenermaßen selbst durch erfahrene Notfallmediziner und Anästhesisten nicht suffizient durchführbar.

Auch weitaus höher liegende Druckwerte sind im Einzelfall bei Betrachtung der Ergebnisse der beiden vorherig genannten Studien nicht auszuschließen. In den durchgeführten eigenen Untersuchungen sollte daher neben dem

Nachweis einer durch Cuffüberblockung erzeugten TR in einem theoretischen Modell eine Annäherung an dafür benötigte Berstungsdrücke erbracht werden.

Eine sichere Positionierung des Tubus bzw. des Cuffs in der Trachea unterhalb der subglottischen Region wird nur durch die unter Sicht durchgeführte direkte Laryngoskopie mit Passieren des Tubus durch die Stimmlippenebene und eine anschließende fiberoptische Lagekontrolle verifizierbar (Salem 2001). In der Praxis wird eine fiberoptische Lagekontrolle jedoch lediglich in Ausnahmefällen durchgeführt. In der Regel werden nach einer erfolgten Intubation indirekte Anzeichen zur Kontrolle der Tubuslage herangezogen, wie v.a. die Auskultation beider Thoraxseiten und des Oberbauchs und Kontrolle der Kohlendioxidsättigung. Weitere Methoden zur Erkennung einer ösophagealen Platzierung eines Tubus, wie durch Ultraschall oder Impedanzmessung, sind ein benötigtes Hilfsmittel zum sicheren objektivierbaren Nachweis eines fehlplatzierten Tubus, bedürfen jedoch noch einer weiteren Entwicklung (Rudraraju und Eisen 2009).

Zur Standardisierung der Intubation müssen auch weitere anatomische Faktoren beachtet werden. Dabei spielt die Größenauswahl des jeweiligen Tubus eine entscheidende Rolle. Obschon weltweit täglich eine große Anzahl von Intubationen durchgeführt wird, gibt es bislang keine offiziellen evidenzbasierten Richtlinien zur Größenauswahl von Endotrachealtuben und deren genaue Platzierung. Eine Empfehlung zur Größenauswahl gab 2011 eine Arbeit von Coordes et al., die mittels radiologischer Messungen von koronaren und sagittalen Durchmessern der Trachea sowie Distanz zwischen unteren Schneidezähnen und Ringknorpel anhand computertomographischer Bildgebung einen linearen Zusammenhang zwischen Körpergröße und Tracheadurchmesser nachwies und daraus ein Nomogramm entwickelte (siehe Abbildung 6). Dieses kann zur passenden Tubenauswahl vor Intubation bei bekannter Körpergröße des Patienten herangezogen werden.

Ein weiteres Kriterium, welches bei intubationsbedingten Trachearupturen eine entscheidende Rolle spielen könnte, ist die unterschiedliche Gestaltung von Cuffs der jeweiligen Hersteller. So beträgt bei einem Innendurchmesser

(ID) von 7,0, bei einer Temperatur von 20°C und einem Cuffdruck von 20 mbar die Cufflänge eines SealGuard-Tubus der Firma Covidien 50 mm (Cuffdurchmesser: 26 mm), die eines Rüscht Malaysia-Tubus der Firma Teleflex 41 mm bei einem Durchmesser von 31 mm. Weiterhin sind beispielsweise bei kleineren Tubengrößen die Cuffs eher rundlich gestaltet, z.B. beträgt bei einem ID von 8,0 die Cufflänge eines Rüscht Malaysia-Tubus – bei gleichem Cuffdurchmesser wie bei ID 7,0 – 46 mm. Die jeweiligen Cuffgeometrien unterscheiden sich somit erheblich. Wie sich verschiedene Cuffdesigns auf die Druckübertragung auf die Trachea auswirkt ist bislang kaum untersucht. Eine Vereinheitlichung unterschiedlicher Tuben und Hersteller auf Grundlage evidenzbasierter Daten gibt es bislang nicht. Darauf verwiesen u.a. Li Bassi et al. in ihrer in vitro-Studie 2013, in der sie nachweisen konnten, dass bei einzelnen der acht untersuchten „high volume-low pressure-Cuffs“ bei Inflation des Cuffs im empfohlenen Bereich bis 30 cmH<sub>2</sub>O die übertragenen Druckwerte auf die Tracheawände 50 cmH<sub>2</sub>O überstiegen.

## **5.2 Art und Ort der Ruptur**

Nahezu alle der in der Literatur beschriebenen Postintubationslazerationen treten an der Hinterwand der Trachea auf. Der Unfallmechanismus der eingangs beschriebenen traumatischen Trachearupturen bei forcierter Expiration und geschlossener Glottis zeigt deutliche Parallelen und unterstreicht die These der Cuffüberblockung für intubationsbedingte TR, da davon auszugehen ist, dass in beiden Fällen die Trachea durch zu hohe Druckverhältnisse an ihrer schwächste Stelle – der Hinterwand – perforiert.

In den eigenen Untersuchungen kam es bei allen untersuchten und auswertbaren Präparaten zu einem longitudinalen Einriss in der Mitte der Tracheahinterwand. Die Ausdehnung der Längsperforation entsprach der Länge des Cuffs. Dies korreliert mit in der Praxis beschriebenen Befunden (Marty-Ané et al. 1995). Über die Cufflänge hinausreichende Rupturen sind a.e. durch zusätzliche Überdruckbeatmung zu erklären oder auch durch Bewegen des Tubus oder Kopfes des Patienten denkbar. Conti et al. geben in ihren Untersuchungen (30 Fälle) ebenfalls eine durchschnittliche

longitudinale Rupturlänge von 4,5 cm an, was in etwa der durchschnittlichen Länge eines Cuffs entspricht (s.o.).

Die Tracheahinterwand oder *Paries membranaceus* besteht aus Bindegewebe und dem *Musculus trachealis*, welcher hauptsächlich in einer inneren Schicht aus quer verlaufenden glatten Muskelfasern besteht und in einem geringeren Anteil auch längsverlaufende Fasern in einer äußeren Schicht beinhaltet. Die auftretenden Rupturen in den untersuchten hltP verlaufen demnach entlang der schwächer ausgebildeten äußeren, longitudinalen Muskelschicht. Dies ist übereinstimmend mit den in der Praxis durch Intubation verursachten Fällen. Die Rupturen treten an der membranösen Tracheahinterwand und nicht an den wesentlich stabileren, durch die hufeisenförmigen Knorpelspangen gestützten vorderen und seitlichen Anteilen auf. Die Trachea weitet sich unter Druckerhöhung des Tubuscuffs bis zum Erreichen des Berstungsdrucks seitlich gegen die stabileren knorpeligen Anteile und nach dorsal in konzentrischer Weise aus. Ein longitudinales Einreißen wird durch das Größenverhältnis zwischen Tubuscuff und Trachea vorgegeben. Eine Druckentlastung mit Ausdehnung und Entweichen des Cuffvolumens kann auf Grund der stabilen knorpeligen Anteile nur in longitudinalem Verlauf stattfinden. Eine horizontal verlaufende Ruptur würde nicht den nötigen Raum zur Entweichung des Cuffvolumens bieten, da alleine die Distanz der Enden der Knorpelspangen von maximal 2,5 cm dies limitiert.

Daneben könnte sich auch die schwächere, quer verlaufende äußere longitudinale Muskelschicht des *Musculus trachealis* auf den Längsverlauf der Ruptur auswirken. Die längsverlaufende Schicht besteht aus wesentlich weniger Muskelfasern als die querverlaufende und wird außerdem, aufgrund der größeren Distanz zum Cuff, stärker gedehnt. Das könnte in der Summe ebenfalls dazu führen, dass bei Erreichen des Berstungsdrucks die longitudinal verlaufenden Muskelfasern zuerst auseinandergerissen werden und so zum longitudinalen Verlauf der Trachearuptur beitragen.

Die Ruptur in der Mitte der Trachea in den vorliegenden Versuchen ist am ehesten auf das Ablösen des Ösophagus von der Trachea in der vorangegangenen Präparation zurückzuführen. Demgegenüber stehen die in

der in-vivo-Situation in der Literatur beschriebenen intubationsbedingten longitudinalen Rupturen, meist an der rechten Seite der Tracheahinterwand (Stannard et al. 2003, Marty-Ané et al. 1995, Sippel et al. 2005).

Anatomisch verläuft der Ösophagus intrathorakal dorsal der Trachea leicht nach links versetzt. Die Trachea wird in ihrem caudalen Verlauf durch den Aortenbogen und den Truncus brachiocephalicus gering nach rechts verlagert. Dies bedeutet, dass die zentral verlaufende Trachea an ihrer Hinterwand lediglich linksseitig komplett vom Ösophagus bedeckt ist. Die in der Praxis auftretenden Rupturen betreffen die rechtsseitige Tracheahinterwand. Es ist davon auszugehen, dass die direkte Nachbarschaft zum Ösophagus zur Stabilisierung der Tracheahinterwand beiträgt. Die Tendenz zu rechtsseitigen Rupturen der Tracheahinterwand lässt sich durch den Ösophagus erklären, der den linken Rand komplett bedeckt und diesen stützt. Nimmt man also an, dass bei einer durch Überblockung verursachten TR die Trachea an ihrer schwächsten Stelle perforiert, so deutet das in der Literatur beschriebene gehäufte Auftreten an der rechten Tracheahinterwand umgekehrt auch auf die Cuffüberblähung als vornehmlichen Faktor in der Genese der intubationsbedingten TR hin. Das erhöhte Risiko für Trachearupturen nach Ösophagotomie oder einer Mobilisation des Ösophagus (Fouroulis et al. 2003) sowie die Korrelation zwischen der Länge der Ruptur mit der Cufflänge stützen zudem diese These.

### **5.3 Einflussgrößen auf eine Ruptur**

Die gemessenen Berstungsdrücke, die zu Rupturen der untersuchten 28 hltP führten, lagen zwischen 700 und 1300 mbar.

Die Verwendung eines zu großen Tubus führte zu signifikant ( $p=0,001$ ) niedrigeren Berstungsdrücken, d.h. bei größerem Tubus genügte ein geringerer Druck, um eine Trachea zu perforieren. Im Median liegen die Berstungsdrücke bei der Gruppe der mit zu großen Tuben versorgten hltP ( $n=13$ ) bei 800 mbar. Bei der Gruppe der mit adäquaten Tuben versorgten hltP lag der Berstungsdruck im Median bei 1200 mbar ( $n=14$ ).

Als anschauliche Darstellung zur deutlich höheren Wahrscheinlichkeit eines Berstungsereignisses bei zu großen Tuben dient die kumulative Eins-Minus-Überlebenswahrscheinlichkeit mittels Kaplan-Meier-Analyse (siehe Abbildung 17). Die Eins-Minus-Überlebenswahrscheinlichkeit in Prozent ergibt sich aus den bis zu einem bestimmten Druck geborstenen Tracheen. So sind dies zum Beispiel bei einem Druck von 1000 mbar für passende Tuben vier Tracheen von 14. Bei 1000 mbar findet somit ein Berstungsereignis bei passenden Tuben mit einer kumulierten Wahrscheinlichkeit von 0,29 (29%) statt ( $^4/_{14}$ ). Bei einem Druckwert von 800 mbar liegt die Berstungswahrscheinlichkeit für zu große Tuben bei 62%, hingegen bei passend gewählten Tuben bei 7%. Der Unterschied zwischen den jeweiligen Kurven wurde mit dem log-rank-Test mit  $p < 0,001$  als signifikant geprüft. Diese Zahlen demonstrieren deutlich das höhere Risiko für TR bei zu groß gewähltem Tubus. Ein zu groß gewählter Tubus erreicht bei gleich großen Druckverhältnissen ein größeres Cuffvolumen als ein passender Tubus und verursacht somit bereits bei geringerem Druckverhältnissen eine TR. Dies wird ebenfalls im Vergleich zwischen passenden und zu großen Tuben durch die größere Zunahme des relativen Sagittaldurchmessers bei zu großen Tuben demonstriert.

Es ist davon auszugehen, dass unterschiedliche Cuffgeometrien Einfluss auf den Berstungsdruck bei intubationsbedingten TR haben. Auf die unterschiedliche Gestaltung der Cuffs durch verschiedene Hersteller wurde bereits hingewiesen. Neben den verschiedenen großen Durchmessern der geblockten Cuffs bei gleicher Tubusgröße könnte auch die Länge des Cuffs von Bedeutung sein. Ein Vergleich verschiedener Cufftypen konnte in der vorliegenden in-vitro-Versuchsreihe nicht geleistet werden. So kann im Folgenden lediglich spekulativ über die Auswirkungen bestimmter Cuffformen diskutiert werden. Ein länger gestalteter Cuff wird durch eine größere Auflagefläche die Elastizität der Tracheahinterwand an den korrespondierenden Stellen mehr einschränken, so dass es bereits bei niedrigeren Cuffdrücken zu Rupturen kommt. Je länger der Cuff gestaltet ist, desto größer auch die Kontaktfläche zur Trachea, was bei zunehmendem Cuffdruck die korrespondierenden Kontaktflächen der Tracheahinterwand

gewissermaßen wie in einem Schraubstock fixiert und eine Ruptur dieses Areals begünstigen könnte. Bei weniger lang konzipierten Cuffs dürfte eine geringere Kontaktfläche zwischen Cuff und Trachea durch den Erhalt der Elastizität der umliegenden Areale der membranösen Tracheahinterwand – hier nach cranial und caudal – eher eine Kompensation hoher Cuffdrücke zulassen.

Bei „high pressure-low volume-cuffed tubes“ konnte in der Vergangenheit bereits eine schädigende Wirkung auf die korrespondierenden Schleimhäute nachgewiesen werden. Die heutzutage verwendeten „high volume-low pressure-cuffed tubes“ sind dahingehend deutlich weniger komplikationsträchtig. Das große Volumen der „high volume-low pressure-cuffed tubes“ soll Sekretfluss von oberhalb des Tubus nach pulmonal und damit das Auftreten von Pneumonien verhindern, was insbesondere bei länger beatmeten Intensivpatienten ein gehäuftes Problem darstellt. Bei existierenden „low volume-low pressure cuffed tubes“ konnten in einer Studie ein verminderter Sekretfluss im Vergleich zu „high volume-low pressure-cuffed tubes“ nachgewiesen werden (Young et al. 2006), da es bei diesen durch longitudinale Faltenbildung am Cuff eher zu Sekretfluss kommen kann.

Die Notwendigkeit von möglichst niedrigen Cuffdruckverhältnissen zum Schutz der Schleimhäute der Trachea bei gleichzeitig gewährleistetem Schutz vor Aspiration und der Möglichkeit der Überdruckbeatmung ist unumstritten. Um dies sicherzustellen scheint ein gewisses Ausmaß des Cuffvolumens vonnöten zu sein.

Bisherige Untersuchungen zur optimalen Versiegelung der Trachea bei Cuffblockung zielten vor allem darauf ab, das Risiko von Pneumonien durch Sekretfluss zu minimieren und gleichzeitig eine Mikroperfusion aufrechtzuerhalten.

Empfehlungen zur genauen Cuffform bezüglich einer Senkung des Risikos für Schleimhautschädigungen bis hin zu Trachearupturen gibt es jedoch bisher nicht und macht daher weitere Untersuchungen zur Cuffgeometrie erforderlich, um auch das Risiko für intubationsbedingte Trachearupturen zu minimieren.

Es ist anzunehmen, dass durch die Verwendung konisch geformter Tubuscuffs, welche zur Verminderung von Sekretfluss entwickelt wurden (Shiotsuka et al. 2012), das Risiko für das Auftreten einer TR vermindert wird, da hier die Kontaktfläche zur Trachea reduziert wird bzw. am distalen Ende des Cuffs deutlich geringerer Druck auf die Trachea ausgeübt werden dürfte.

Betrachtet man den Einfluss der Körpergröße auf den Berstungsdruck, so zeigt sich, dass die Tracheen der Gruppe der großen Probanden erst bei höheren Druckverhältnissen bersten als bei der Gruppe der kleineren Probanden. Bei den großen Probanden (n=13) kommt es im Median bei 1100 mbar zum Einreißen der Trachea. Bei der Gruppe der kleinen Probanden (n=14) reißen die untersuchten hltP im Median bei 800 mbar.

In der nonparametrischen Varianzanalyse nach Brunner stellt sich der Einfluss der Körpergröße mit  $p=0,0118222$  als signifikant dar. Im Mann-Whitney-U-Test lässt sich mit  $p=0,069$  zwar keine Signifikanz nachweisen, eine Tendenz zeichnet sich hier jedoch auch ab.

Bei gleichzeitiger Betrachtung des Einflusses von Körpergröße und Tubusgröße auf den Berstungsdruck zeigt sich, dass der vornehmliche Einfluss auf das Bersten der Trachea die gewählte Tubusgröße darstellt (vgl. hierzu die beiden linken mit den beiden rechten Boxplots von Abbildung 19).

Darüber hinaus wird in Abbildung 19 deutlich, dass sich der Einfluss der Körpergröße vor allem bei zu groß gewähltem Tubus bemerkbar macht: Bei passend gewähltem Tubus nähern sich die beiden Gruppen der großen und kleinen Probanden an (Median jeweils 1200 mbar), wohingegen sich bei zu groß gewählten Tuben die Berstungsdrücke im Median deutlich unterscheiden (800 vs. 1000 mbar).

Beim Vergleich des Alters mit der Körpergröße wurde in einer nichtparametrischen Testung das Alter als metrischer Wert, also das tatsächliche Alter, mit der Körpergröße der verstorbenen Patienten verglichen. Diese wurden dazu entsprechend ihrer Körpergröße in zwei Gruppe eingeteilt. Es zeigt sich, dass ältere Patienten kleiner sind als jüngere. Im Mann-Whitney-U-Test ergibt sich hier eine Signifikanz von

$p=0,002$ . Hier werden lediglich Alter mit Körpergröße der verstorbenen Patienten verglichen. Untersucht man den Einfluss des Alters als Kovariate in der nonparametrischen Varianzanalyse nach Brunner, erhält man mit  $p=0,125$  keinen signifikanten Wert.

Begründet liegt die Verteilung der kleineren älteren Patienten in der natürlichen demographischen Verteilung der Geschlechter im Alter: Frauen werden älter als Männer und sind im Schnitt kleiner als Männer (siehe Mikrozensus des statistischen Bundesamtes von 2009).

Verstärkend wirkt sich hier der mit steigendem Alter zunehmende Größenunterschied zwischen den Geschlechtern aus. So verlieren Frauen im Alter zwischen 30 und 70 Jahren etwa 5 cm an Körpergröße, Männer hingegen lediglich 3 cm. Im Alter von 80 Jahren beläuft sich der Verlust der Körpergröße bei Frauen gar auf 8 cm, bei Männern auf 5 cm (Sorkin et al. 1999).

Bei der Einteilung der verstorbenen Patienten nach Geschlecht erhält man für die männliche Gruppe 16 hltP und 11 hltP der weiblichen verstorbenen Patienten. Im Mann-Whitney-U-Test lässt sich mit  $p=0,565$  kein signifikanter Unterschied zwischen Geschlecht bezüglich des Berstungsdruckes feststellen und damit eine Geschlechterspezifität ausschließen.

Im vorliegenden Patientengut war eine Einteilung nach Geschlecht nicht gleich bedeutend mit einer Einteilung nach Körpergröße, da in der Gruppe der kleinen Probanden drei Männer vertreten waren, die 163 cm oder kleiner waren. Die Gruppe der großen Probanden beinhaltet hingegen keine weiblichen Patienten. Männliche Probanden sind hier also überwiegend auch große Probanden (81,3%), während alle weiblichen klein sind.

Betrachtet man den in der nonparametrischen Varianzanalyse nach Brunner erhaltenen signifikanten p-Wert mit  $p=0,0118222$  für den Einfluss der Körpergröße auf den Berstungsdruck und den nicht-signifikanten p-Wert von  $p=0,565$  aus dem Mann-Whitney-U-Test für den Einfluss des Geschlechts, verdeutlicht dies, dass die in der Literatur beschriebene Häufung des Auftretens der Trachearupturen bei weiblichen Patienten schlicht auf die

unterschiedliche Körpergrößen zwischen den Geschlechtern zurückzuführen ist.

#### **5.4 Kritik an der eigenen Untersuchung**

Bei der vorliegenden Untersuchung handelt es sich um eine post-mortem in-vitro Untersuchung an präpariertem Gewebe, die nur begrenzt auf die tatsächlichen physiologischen Verhältnisse übertragen werden kann. Es kommt bereits kurz nach Eintritt des Todes zu Veränderungen des Gewebes, die direkten Einfluss auf die Stabilität des Gewebes haben. Dabei mussten die Präparate aus dem umliegenden Gewebe ausgelöst werden, das einen erheblichen Einfluss auf die Stabilität der Strukturen wie die Tracheahinterwand hat. Es wurde bereits der Einfluss des Ösophagus diskutiert, der wahrscheinlich einen nicht unerheblichen Einfluss auf den Ort und den Zeitpunkt der Ruptur haben wird.

In der vorliegenden Studie wurde nur eine begrenzte Gruppe von Präparaten untersucht, für eine fundiertere Aussage sollte in Zukunft eine größer Gruppe untersucht werden, dies mit der Trachea in situ, so dass der Einfluss des umliegenden Gewebes besser geprüft werden kann. Unbedingt notwendig ist eine Untersuchung über den Einfluss der Cuffgeometrie auf eine Ruptur. Dieser Aspekt wurde bisher nur hinsichtlich eines Verschlusses gegenüber Sekreten getestet.

## 6 Zusammenfassung

Die intubationsbedingte TR ist eine seltene, jedoch lebensbedrohliche Verletzung der Luftröhre. Als häufig angeführte Ursache steht dabei die Überblockung des Tubuscuffs in Verdacht. Die lediglich manuelle Handhabung der Cuffblockung nach erfolgter Intubation mittels einer Spritze ist bis heute vielerorts eine übliche Methode. Hoffmann et al. wiesen 2006 in ihrer Studie nach, dass selbst erfahrene Notfallmediziner auf diese Weise Cuffdrücke insufflieren, welche den empfohlenen oberen Grenzbereich um ein vielfaches überschreiten.

Ziel dieser in-vitro-Studie war die Eruierung des Berstungsdrucks für eine Trachearuptur sowie die Beschreibung des dabei entstehenden Verletzungsmusters. Zusätzlich sollte der Einfluss der Tubusgröße, des Patientenalters, der Körpergröße und des Geschlecht des Patienten validiert werden.

Es wurden 28 humane laryngo-tracheale Präparate nicht länger als 24 Stunden nach Obduktion untersucht. In einem artifiziiellen Modell wurde der Cuffdruck eines in der Trachea fixierten Endotrachealtubus kontinuierlich erhöht. Um den Einfluss der Tubusgröße zu eruieren, wurde eine Einteilung in zwei Gruppen vorgenommen. Eine Gruppe bildeten hltP mit einem an die Körpergröße angepassten Tubus, eine zweite Gruppe wurde mit einem um eine Einheit zu großen Tubus untersucht. Die Cuffdruckerhöhung erfolgte in 100mbar-Schritten. Nach jeweiliger Druckerhöhung wurden auf Höhe des geblockten Tubus Koronar- und Sagittaldurchmesser der Trachea festgehalten.

Bei nahezu allen in den Versuchen verwendeten hltP konnte ein Druckaufbau des Tubuscuffs bis zu einer Perforation der Trachea durchgeführt werden. Ein hltP wurde nicht in die Auswertung miteinbezogen, da es hier durch eine Läsion an der Trachea zum Einreißen des Tubuscuffs kam.

Bis zum Erreichen des Berstungsdrucks wurde die Trachea konzentrisch gedehnt. Die aufgetretenen Berstungsdrücke erreichten Werte zwischen 700 und 1300 mbar. Stets kam es zu einer zentralen longitudinalen Perforation

der Tracheahinterwand, entsprechend der Länge des Tubuscuffs. Die in der Praxis zu beobachtenden Trachearupturen nach Intubation treten gehäuft longitudinal rechtsseitig an der pars membranacea auf, was am ehesten auf eine stabilisierende Korrespondenz der Trachea mit dem Ösophagus schließen lässt.

Einen maßgeblichen Einflussfaktor für das Auftreten von Perforationen humaner Tracheen bei Intubation in unserem Versuchsaufbau stellte die Wahl der Tubusgröße dar. Zu groß gewählte Tuben führten mit einer Signifikanz von  $p=0,001$  zu geringeren Berstungsdrücken, verstärkend wirkte sich dies bei Probanden von kleiner Körpergröße aus. In der nonparametrischen Varianzanalyse nach Brunner stellte sich der Einfluss der Körpergröße mit  $p=0,0118222$  als signifikant dar.

Alter und Geschlecht hatten keinen signifikant nachweisbaren Einfluss auf eine intubationsbedingte Tracheaperforation. Hier ließen sich in beiden Fällen lediglich direkte und indirekte Zusammenhänge mit der Körpergröße erkennen.

In der Praxis sollte eine Intubation unbedingt mit einem an die Körpergröße angepassten Tubus erfolgen. Als Empfehlung kann hier das Nomogramm nach Coordes et al. herangezogen werden. Nach erfolgter Intubation sollte die Cuffblockung stets standardisiert unter kontrollierter manometrischer Cuffdruckmessung erfolgen. Bei Änderung wie z.B. Umlagerungen und länger andauernder Intubation sind Verlaufskontrollen notwendig.

Daneben sind zukünftig Untersuchungen zum Einfluss der Cuffgeometrie auf eine intubationsbedingte TR notwendig.

## 7 Literaturverzeichnis

1. Kleber C, Becker C, van Scherpenzeel KM, Weidemann H, Deja M, Haas MP. [Coincidence of traumatic tracheal rupture accompanied by ARDS. Illustrated by the example of a 17-year-old patient with multiple injuries]. Unfallchirurg 2012; **115**(6): 546-51.
2. Kiser AC, O'Brien SM, Detterbeck FC. Blunt tracheobronchial injuries: treatment and outcomes. Ann Thorac Surg 2001; **71**(6): 2059-65.
3. Conti M, Pougeoise M, Wurtz A, Porte H, Fourrier F, Ramon P, Marquette CH. Management of postintubation tracheobronchial ruptures. Chest 2006; **130**(2): 412-8.
4. Hippargi SH. Traumatic bronchial rupture: an unusual cause of tension pneumothorax. Int J Emerg Med 2010; **3**(3): 193-5.
5. Deslee G, Brichef A, Lebuffe G, Copin MC, Ramon G, Marquette CH. Obstructive fibrinous tracheal pseudomembrane. A potentially fatal complication of tracheal intubation. Am J Respir Crit Care Med 2000; **162**(3 Pt 1): 1169-71.
6. Otani S, Fujii H, Kurasako N, Ishizu T, Tanaka T, Kousogabe Y, Tokioka H, Namba M. [Recurrent nerve palsy after endotracheal intubation]. Masui 1998; **47**(3): 350-5.
7. Medina CR., Camargo JdeJ, Felicetti JC, Machuca TN, Gomes BdeM, Melo IA. Post-intubation tracheal injury: report of three cases and literature review. J Bras Pneumol 2009; **35**(8): 809-13.
8. Creagh-Brown B, Sheth A, Crerar-Gilbert A, Madden BP. A novel approach to the management of acute tracheal tear. J Laryngol Otol 2008; **122**(12): 1392-3.
9. Mullan GP, Georgalas C, Arora A, Narula A. Conservative management of a major post-intubation tracheal injury and review of current management. Eur Arch Otorhinolaryngol 2007; **264**(6): 685-8.
10. Smith BL. Haemopneumothorax following bougie-assisted tracheal intubation. Anaesthesia 1994; **49**(1): 91.
11. Welter S, Krbek T, Halder R, Stamatis G. A new technique for complete intraluminal repair of iatrogenic posterior tracheal lacerations. Interact Cardiovasc Thorac Surg 2011; **12**(1): 6-9.

12. Cardillo GL, Carbone L, Carleo F, Batzella S, Jacono RD, Lucantoni G, Gallucio G. Tracheal lacerations after endotracheal intubation: a proposed morphological classification to guide non-surgical treatment. Eur J Cardiothorac Surg 2009; **37**(3): 581-7.
13. Minambres E, Buron J, Ballesteros MA, Llorca J, Munoz P, Gonzales-Castro A. Tracheal rupture after endotracheal intubation: a literature systematic review. Eur J Cardiothorac Surg 2009; **35**(6): 1056-62.
14. Orta DA, Cousar JE3rd, Yergin BM, Olsen GN. Tracheal laceration with massive subcutaneous emphysema: a rare complication of endotracheal intubation. Thorax 1979; **34**(5): 665-9.
15. Lampl L. Tracheobronchial injuries. Conservative treatment. Interact Cardiovasc Thorac Surg 2004; **3**(2): 401-5.
16. Wagner A, Roeggla M, Hirschl MM, Roeggla G, Schreiber W, Sterz F. Tracheal rupture after emergency intubation during cardiopulmonary resuscitation. Resuscitation 1995; **30**(3): 263-66.
17. Lim H, Kim HJ, Kim D, Lee J, Son HS, Kim DC, Ko S. Tracheal rupture after endotracheal intubation - A report of three cases. Korean J Anesthesiol 2012; **62**(3): 277-80.
18. Kaloud H, Smolle-Juettner FM, Prause G, List WF. Iatrogenic ruptures of the tracheobronchial tree. Chest 1997; **112**(3): 774-8.
19. Chen EH, Logman ZM, Glass PS, Bilfinger TV. A case of tracheal injury after emergent endotracheal intubation: a review of the literature and causalities. Anesth Analg 2001; **93**(5): 1270-1.
20. Schedlbauer EM, Todt I, Ernst A, Seidl RO. Iatrogenic tracheal rupture in children: A retrospective study." Laryngoscope 2009; **119**(3): 571-5.
21. Weiss M, Dullenkopf A, Gysin C, Dillier CM, Gerber AC. Shortcomings of cuffed paediatric tracheal tubes. Br J Anaesth 2004; **92**(1): 78-88.
22. Randestad A, Lindholm CE, Fabian P. Dimensions of the cricoid cartilage and the trachea. Laryngoscope 2000; **110**(11): 1957-61.
23. Striebel, H. W., L. U. Pinkwart, Karavias T. [Tracheal rupture caused by overinflation of endotracheal tube cuff]. Anaesthesist 1995; **44**(3): 186-8.
24. Seidl, RO, Todt I, Nielitz T, Ernst A. [Tracheal ruptures in endotracheal intubation. Diagnosis and therapy]. HNO 2002; **50**(2): 134-8.

25. Stannard K, Wells J, Cokis C. Tracheal rupture following endotracheal intubation. Anaesth Intensive Care 2003; **31**(5): 588-91.
26. Barbetakis N, Samanidis G, Paliouras D, Tsilikas C. Tracheal laceration following double-lumen intubation during Ivor Lewis esophagogastrectomy. Interact Cardiovasc Thorac Surg 2008; **7**(5): 866-8.
27. Marty-Ané, CH, Picard E, Jonquet O, Mary H. Membranous tracheal rupture after endotracheal intubation. Ann Thorac Surg 1995; **60**(5): 1367-71.
28. Sippel M, Putensen Hirner A, Wolff M. Tracheal rupture after endotracheal intubation: experience with management in 13 cases. Thorac Cardiovasc Surg 2006; **54**(1): 51-6.
29. Borasio P., Ardisson F, Chiampo G. Post-intubation tracheal rupture. A report on ten cases. Eur J Cardiothorac Surg 1997; **12**(1): 98-100.
30. Rollins RJ et Tocino I. Early radiographic signs of tracheal rupture. AJR Am J Roentgenol 1987; **148**(4): 695-8.
31. Coordes A, Rademacher G, Knokpe S, Todt I, Ernst A, Estel B, Seidl RO. Selection and placement of oral ventilation tubes based on tracheal morphometry. Laryngoscope 2011; **121**(6): 1225-30.
32. Grismer JT and Read RC. Does the mediastinal anatomy complementing azygos lobe facilitate endotracheal balloon rupture of the trachea? Surgery 1998; **123**(2): 243-4.
33. Mehta S and Myat HM. The cross-sectional shape and circumference of the human trachea. Ann R Coll Surg Engl 1984; **66**(5): 356-8.
34. Honeybourne D, Costello JC, Barham C. Tracheal damage after endotracheal intubation: comparison of two types of endotracheal tubes. Thorax 1982; **37**(7): 500-2.
35. Dave MH, Frotzler A, Spielmann N, Madjdpou C, Weiss M. Effect of tracheal tube cuff shape on fluid leakage across the cuff: an in vitro study. Br J Anaesth 2010; **105**(4): 538-43.
36. Fernandez JF, Levine SM, Restrepo MI. Technologic advances in endotracheal tubes for prevention of ventilator-associated pneumonia Chest 2012; **142**(1): 231-8.

37. Guyton D, Banner MJ, Kirby RR. High-volume, low-pressure cuffs. Are they always low pressure? Chest 1991; **100**(4): 1076-81.
38. Sengupta P, Sessler DI, Maglinger P, Wels S, Vogt A, Durrani J, Wadhwa A. Endotracheal tube cuff pressure in three hospitals, and the volume required to produce an appropriate cuff pressure. BMC Anesthesiol 2004; **4**(1): 8.
39. Somri M., Fradis M, Malatskey S, Vaida S, Gaitini L. Simple on-line endotracheal cuff pressure relief valve. Ann Otol Rhinol Laryngol 2002; **111**(2): 190-2.
40. Hoffman RJ, Parwani V, Hahn IH. Experienced emergency medicine physicians cannot safely inflate or estimate endotracheal tube cuff pressure using standard techniques. Am J Emerg Med 2006; **24**(2): 139-43.
41. Michlig SA. Anaesthetic staff cannot identify extremely high tracheal tube cuff pressures by palpation of the pilot balloon. Br J Anaesth 2013; **111**(2): 300-1.
42. Salem MR. Verification of endotracheal tube position. Anesthesiol Clin North America 2001; **19**(4): 813-39.
43. Rudraraju P et Eisen LA. Confirmation of endotracheal tube position: a narrative review. J Intensive Care Med 2009; **24**(5): 283-92.
44. Li Bassi G, Ranzani OT, Marti JD, Giunta V, Luque N, Isetta V, Ferrer M, Farre R, Pimentel GL, Torres A. An in vitro study to assess determinant features associated with fluid sealing in the design of endotracheal tube cuffs and exerted tracheal pressures. Crit Care Med 2012; **41**(2): 518-26.
45. van Klarenbosch J, Meyer J, de Lange JJ. Tracheal rupture after tracheal intubation. Br J Anaesth 1994; **73**(4): 550-1.
46. Yam LY, Tai YP, Wong KS, Li MK. Tracheal rupture from incorrect positioning of endotracheal tube. Ann Acad Med Singapore 1992; **21**(6): 823-6.
47. Fitzmaurice BG et Brodsky JB Airway rupture from double-lumen tubes. J Cardiothorac Vasc Anesth 1999; **13**(3): 322-9.
48. Kim J, Lim T, Bahk JH. Tracheal laceration during intubation of a double-lumen tube and intraoperative fiberoptic bronchoscopic evaluation

through an LMA in the lateral position -A case report. Korean J Anesthesiol 2011; **60**(4): 285-9.

49. Mosby EL, Schelkun PM, Vincent SK. Nitrous oxide use and endotracheal tube rupture. Anesth Prog 1988; **35**(1): 14-6.
50. Dullenkopf A, Gerber AC, Weiss M. Nitrous oxide diffusion into tracheal tube cuffs: comparison of five different tracheal tube cuffs. Acta Anaesthesiol Scand 2004; **48**(9): 1180-4.
51. Foroulis CN, Simeoforidou M, Michaloudis D; Hatzitheofiloe K. Pericardial patch repair of an extensive longitudinal iatrogenic rupture of the intrathoracic membranous trachea. Interact Cardiovasc Thorac Surg 2003; **2**(4): 595-7.
52. Young PJ, Pakeerathan S, Blunt MC, Subramanya S. A low-volume, low-pressure tracheal tube cuff reduces pulmonary aspiration. Crit Care Med 2006; **34**(3): 632-9.
53. Shiotsuka J., Lefor AT, Sanui M, Nagata O, Horiguchi A, Sasabuchi Y. A quantitative evaluation of fluid leakage around a polyvinyl chloride tapered endotracheal tube cuff using an in-vitro model. HSR Proc Intensive Care Cardiovasc Anesth 2012; **4**(3): 169-75.
54. Sorkin JD, Muller DC, Andres R. Longitudinal change in height of men and women: implications for interpretation of the body mass index: the Baltimore Longitudinal Study of Aging. Am J Epidemiol 1999; **150**(9): 969-77.

## 8 Abbildungsverzeichnis

Abbildung 1: CT bei Trachearuptur mit Emphysem .....	6
Abbildung 2: Bronchoskopie bei Trachearuptur.....	6
Abbildung 3: Schematische Darstellung Versuchsaufbau .....	14
Abbildung 4: Präparation des laryngo-trachealen Präparates .....	14
Abbildung 5: Humanes laryngo-tracheales Präparat .....	15
Abbildung 6: Nomogramm zur Auswahl der Tubusgröße .....	16
Abbildung 7: Präparat vor Beginn der Intervention .....	17
Abbildung 8: Experimentalaufbau mit Präparat .....	18
Abbildung 9: Pneumatische Druckpumpe P40.2 (SIKA).....	19
Abbildung 10: Messung des Tracheadurchmessers.....	20
Abbildung 11: Perforierte Trachea mit sichtbarem Cuff des Tubus .....	22
Abbildung 12: Perforierte Trachea mit sichtbarer Ruptur.....	23
Abbildung 13: Änderung sagittaler Tracheadurchmesser unter Drucksteigerung.....	25
Abbildung 14: Änderung koronarer Tracheadurchmesser unter Drucksteigerung.....	26
Abbildung 15: Änderung sagittaler Tracheadurchmesser unterschiedlicher Tuben.....	27
Abbildung 16: Einfluss Tubusgröße auf Berstungsdruck.....	28
Abbildung 17: Wahrscheinlichkeit Berstung in Abhängigkeit von der Tubusgröße.....	29
Abbildung 18: Einfluss Körpergröße auf Berstungsdruck .....	32
Abbildung 19: Tubusgröße, Körpergröße und Berstungsdruck .....	33
Abbildung 20: Einfluss Geschlecht auf den Berstungsdruck .....	38

## 9 Tabellenverzeichnis

Tabelle 1: Übersicht Ursachen einer Trachearuptur durch Intubation .....	10
Tabelle 2: Versuchsergebnisse Präparate.....	23
Tabelle 3: Einfluss Tubusgröße auf Berstungsdruck .....	28
Tabelle 4: Wahrscheinlichkeit Berstung in Abhängigkeit von der Tubusgröße30	
Tabelle 5: Einfluss Körpergröße auf Berstungsdruck .....	31
Tabelle 6: Tubusgröße, Körpergröße und Berstungsdruck.....	34
Tabelle 7: Vergleich Alter und Körpergröße.....	36
Tabelle 8: Einfluss Geschlecht auf den Berstungsdruck.....	37

## **Danksagung**

Ich danke Herrn PD Dr. med. Rainer O. Seidl für die Überlassung des Themas und die gute Betreuung.

Ich danke Herrn Prof. Dr. med. Arneborg Ernst für die Möglichkeit diese Promotion an seiner Klinik durchführen zu können sowie für die Unterstützung bei der Planung und Durchführung der Arbeit.

Besonders danke ich meiner ehemaligen Kollegin Dr. med. Annekatriin Coordes für ihre ausgiebige Unterstützung und die gute Zusammenarbeit.

Mein besonderer Dank gilt weiterhin dem Institut für Pathologie am Unfallkrankenhaus Berlin (Direktor Prof. Dr. med. Gerald Niedobitek) und seinen Mitarbeitern, hier besonders Herrn Sulik, für die Unterstützung bei der Erstellung der Präparate und die Möglichkeit, die Untersuchungen in den Räumen des Instituts durchführen zu können.

Mein Dank richtet sich auch an Frau Dr. med. Barbara Estel aus der Klinik für Anästhesie für die Unterstützung bei der Entwicklung eines beatmeten Versuchsmodells.

Großer Dank geht auch an Frau Dr. Gerda Siebert für die Unterstützung auf dem Gebiet der Statistik.

Außerdem danke ich meiner Cousine Hanna Zehetmair für die Erstellung der schematischen Darstellung.

## **Eidesstattliche Versicherung**

„Ich, Tobias Sudhoff, versichere an Eides statt durch meine eigenhändige Unterschrift, dass ich die vorgelegte Dissertation mit dem Thema: „Experimentelle Untersuchung zur Druckresistenz humaner Tracheen“ selbstständig und ohne nicht offengelegte Hilfe Dritter verfasst und keine anderen als die angegebenen Quellen und Hilfsmittel genutzt habe.

Alle Stellen, die wörtlich oder dem Sinne nach auf Publikationen oder Vorträgen anderer Autoren beruhen, sind als solche in korrekter Zitierung (siehe „Uniform Requirements for Manuscripts (URM)“ des ICMJE - [www.icmje.org](http://www.icmje.org)) kenntlich gemacht. Die Abschnitte zu Methodik (insbesondere praktische Arbeiten, Laborbestimmungen, statistische Aufarbeitung) und Resultaten (insbesondere Abbildungen, Graphiken und Tabellen) entsprechen den URM (s.o) und werden von mir verantwortet.

Meine Anteile an etwaigen Publikationen zu dieser Dissertation entsprechen denen, die in der untenstehenden gemeinsamen Erklärung mit dem/der Betreuer/in, angegeben sind. Sämtliche Publikationen, die aus dieser Dissertation hervorgegangen sind und bei denen ich Autor bin, entsprechen den URM (s.o) und werden von mir verantwortet.

Die Bedeutung dieser eidesstattlichen Versicherung und die strafrechtlichen Folgen einer unwahren eidesstattlichen Versicherung (§156,161 des Strafgesetzbuches) sind mir bekannt und bewusst.“

Berlin, den 11.02.2014

## **Lebenslauf**

"Mein Lebenslauf wird aus datenschutzrechtlichen Gründen in der elektronischen Version meiner Arbeit nicht veröffentlicht."