

Aus der Klinik für Anästhesie und Operative Intensivmedizin  
der Universität zu Köln  
Direktorin: Universitätsprofessorin Dr. med. Andrea Steinbicker

**Verbesserung der apnoischen Oxygenierung durch Optimierung des Sauerstoffapplikationsortes und Entwicklung neuer Oxygenierungsspatel**

Inaugural- Dissertation zur Erlangung der Doktorwürde  
der Medizinischen Fakultät  
der Universität zu Köln

vorgelegt von  
Susanne Johanna Herff  
aus Köln

promoviert am 10.Juni 2026



Dekan: Universitätsprofessor Dr.med. G. R. Fink

1. Gutachter: Professor Dr. med. univ. W. Wetsch

2. Gutachter: Privatdozent Dr. med. M. Dück

## Erklärung

Ich erkläre hiermit, dass ich die vorliegende Dissertationsschrift ohne unzulässige Hilfe Dritter und ohne Benutzung anderer als der angegebenen Hilfsmittel angefertigt habe; die aus fremden Quellen direkt oder indirekt übernommenen Gedanken sind als solche kenntlich gemacht.

Bei der Auswahl und Auswertung des Materials sowie bei der Herstellung des Manuskriptes habe ich Unterstützungsleistungen von folgenden Personen erhalten

Herr Professor Dr. med. univ. W. Wetsch

Weitere Personen waren an der Erstellung der vorliegenden Arbeit nicht beteiligt. Insbesondere habe ich nicht die Hilfe einer Promotionsberaterin/eines Promotionsberaters in Anspruch genommen. Dritte haben von mir weder unmittelbar noch mittelbar geldwerte Leistungen für Arbeiten erhalten, die im Zusammenhang mit dem Inhalt der vorgelegten Dissertationsschrift stehen.

Die Dissertationsschrift wurde von mir bisher weder im Inland noch im Ausland in gleicher oder ähnlicher Form einer anderen Prüfungsbehörde vorgelegt.

Ich baute gemeinsam mit Herrn Prof. Wolfgang Wetsch die für die Versuchsreihen notwendigen Oxygenierungsspatel. Hierzu nahm ich gängige Einmal- Laryngoskope aus Kunststoff, an die ich mittels thermoplastischen Klebstoffs Sauerstoffschläuche an unterschiedlichen Positionen befestigte. Im Anschluss entwickelten wir das Studiendesign beziehungsweise den Aufbau der Versuchsreihen. Diese führte ich unter Anleitung von Herrn Prof. Wetsch durch und dokumentierte die Ergebnisse. Die gebauten Oxygenierungsspatel und den Versuchsaufbau hielt ich zusätzlich fotografisch fest. Bei der Auswertung der Versuchsreihen, insbesondere der statistischen Aufarbeitung mit SPSS, half mir Herr Prof. Wetsch.

#### Erklärung zur guten wissenschaftlichen Praxis:

Ich erkläre hiermit, dass ich die Ordnung zur Sicherung guter wissenschaftlicher Praxis und zum Umgang mit wissenschaftlichem Fehlverhalten (Amtliche Mitteilung der Universität zu Köln AM 132/2020) der Universität zu Köln gelesen habe und verpflichte mich hiermit, die dort genannten Vorgaben bei allen wissenschaftlichen Tätigkeiten zu beachten und umzusetzen.

Köln, den 19.12.2025

Unterschrift: .....

#### Hinweis zur Sprachverwendung:

In dieser Arbeit wird zur besseren Lesbarkeit das generische Maskulinum verwendet. Sämtliche Personenbezeichnungen wie „Patient“ beziehen sich gleichermaßen auf alle Geschlechter und sind ausdrücklich geschlechtsneutral zu verstehen

## **Danksagung**

An dieser Stelle möchte ich mich bei all denjenigen bedanken, die mich bei der Erstellung dieser Doktorarbeit unterstützt haben.

Zunächst gilt mein Dank Prof. Wolfgang Wetsch für die Vergabe des Themas und die Begleitung der Versuche sowie die Unterstützung beim Schreiben der Arbeit.

Ein großes Dankeschön geht an Prof. Volker Wenzel, der meine österreichische Promotionsarbeit vor vielen Jahren betreut hat, mich in die Methodik des wissenschaftlichen Arbeitens und Schreibens eingeführt und darin bestärkt hat, noch einmal eine solche Arbeit zu schreiben.

Meiner Praxispartnerin Dr. Margot Wahlers danke ich dafür, dass sie mir durch ihr Einspringen Abwesenheiten in der Praxis ermöglichte um die Versuchsreihen durchzuführen.

Natürlich geht mein Dank an meinen Ehemann, Holger Herff, der den Kontakt zu Prof. Wetsch hergestellt hat, mir zuhause stets den Rücken freigehalten hat und immer ein offenes Ohr hatte.

Des Weiteren danke ich meinen Eltern für die immerwährende Unterstützung und die vielen Stunden, die sie unsere Kinder betreut haben, damit ich schreiben konnte.

Meinen Kindern Clara und Justus danke ich für die Geduld mit mir und das Aushalten der schlechten Laune.

Meinen Kindern Clara und Justus

## **Inhaltsverzeichnis**

|                                                                                       |           |
|---------------------------------------------------------------------------------------|-----------|
| <b>ABKÜRZUNGSVERZEICHNIS</b>                                                          | <b>8</b>  |
| <b>1. ZUSAMMENFASSUNG</b>                                                             | <b>9</b>  |
| <b>2. EINLEITUNG</b>                                                                  | <b>12</b> |
| 2.1. Der schwierige Atemweg und die Bedeutung der Präoxygenierung                     | 12        |
| 2.2. Die apnoische Oxygenierung                                                       | 13        |
| 2.3. Vorarbeiten der Arbeitsgruppe                                                    | 16        |
| 2.4. Fragestellung und Ziel der Arbeit                                                | 18        |
| <b>3. MATERIAL UND METHODEN</b>                                                       | <b>19</b> |
| 3.1. Material- Entwicklung des Laryngoskopspatels                                     | 19        |
| 3.2. Methoden                                                                         | 24        |
| 3.2.1. Erste Versuchsreihe                                                            | 26        |
| 3.2.2. Zweite Versuchsreihe                                                           | 28        |
| 3.3. Durchführung der Versuche                                                        | 30        |
| 3.3.1. Erste Versuchsreihe:                                                           | 30        |
| 3.3.2. Zweite Versuchsreihe:                                                          | 30        |
| 3.4. Statistik                                                                        | 30        |
| <b>4. ERGEBNISSE</b>                                                                  | <b>31</b> |
| 4.1. Erste Versuchsreihe:                                                             | 31        |
| 4.2. Zweite Versuchsreihe:                                                            | 33        |
| <b>5. DISKUSSION</b>                                                                  | <b>35</b> |
| 5.1. Erläuterung des Modells                                                          | 35        |
| 5.2. Einfluss der Platzierungsortes der Sauerstoffsonde                               | 37        |
| 5.3. Einfluss des Designs des Oxygenierungslaryngoskops auf die Sauerstoffapplikation | 38        |

|             |                                                       |           |
|-------------|-------------------------------------------------------|-----------|
| <b>5.4.</b> | <b>Erkenntnis aus beiden Versuchen für die Praxis</b> | <b>40</b> |
| <b>5.5.</b> | <b>Vorhandene vergleichbare Ansätze</b>               | <b>42</b> |
| <b>5.6.</b> | <b>Ausblick</b>                                       | <b>45</b> |
| <b>5.7.</b> | <b>Limitationen</b>                                   | <b>46</b> |
| <b>6.</b>   | <b>LITERATURVERZEICHNIS</b>                           | <b>49</b> |
| <b>7.</b>   | <b>ANHANG</b>                                         | <b>55</b> |
| <b>8.</b>   | <b>VORABVERÖFFENTLICHUNGEN VON ERGEBNISSEN</b>        | <b>58</b> |



## **Abkürzungsverzeichnis**

DGAI Deutsche Gesellschaft für Anästhesiologie und Intensivmedizin

„THRIVE“ transnasal humidified rapid insufflation ventilatory exchange = transnasal befeuchteter Beatmungsaustausch mit schneller Insufflation

FAO<sub>2</sub> alveoläre Sauerstofffraktion

CO<sub>2</sub> Kohlendioxid

pAO<sub>2</sub> alveolärer Sauerstoffpartialdruck

AO apnoische Oxygenierung

# 1. Zusammenfassung

Während einer geplanten oder notfallmäßigen Intubation im Rahmen einer Narkoseeinleitung kommt es aufgrund der Induktionsmedikamente zu einem Atemstillstand. Ist der Patient dann weder mit Maske zu beatmen noch zu intubieren beziehungsweise mit einer Larynxmaske/einem Larynxtubus zu beatmen, sprechen wir von einer sogenannten „cannot ventilate- cannot intubate“ Situation. Der Patient ist dann unmittelbar von akutem Sauerstoffmangel bedroht. Aus diesem Grund ist eine suffiziente Präoxygenierung bei einer geplanten Intubation essentiell. Hierdurch lassen sich die pulmonalen Sauerstoffspeicher füllen und die Zeit bis zum Eintreten einer Hypoxie wird verlängert. Die Deutsche Gesellschaft für Anästhesiologie und Intensivmedizin e.V. (DGAI) empfiehlt ein solches Prozedere in ihrer 2023 erschienenen S1- Leitlinie zum Atemwegsmanagement. Die Apnoezeit nach der Präoxygenierung bis zum Abfall der Sauerstoffsättigung kann durch ein weiteres Sauerstoffangebot zusätzlich entscheidend verlängert werden. Hier kommt das Prinzip der apnoischen Oxygenierung zur Anwendung. Dabei wird im Körper verbrauchter Sauerstoff kontinuierlich durch in die Atemwege insufflierten Sauerstoff ersetzt. Da zeitgleich nur wenig Kohlendioxid in die Lunge diffundiert, entsteht ein pulmonaler Unterdruck, der den im oberen Atemweg angebotenen Sauerstoff in die Lunge saugt.

Die apnoische Oxygenierung ist allerdings technisch nicht trivial, denn jegliches Eindringen von Stickstoff aus der Umgebungsluft vermindert drastisch ihre Effektivität. Während sich nach Präoxygenierung durch eine Beatmungsmaske die apnoische Oxygenierung bei dichtem Sitz der Maske gut aufrechterhalten lässt, bedingt jeder Intubationsversuch mit einem konventionellen Laryngoskop auch ein Eindringen von Raumluft in den Atemweg. Der damit verbundene Einstrom von in der Raumluft befindlichem Stickstoff, welcher in der Lunge akkumuliert, behindert die weitere apnoische Oxygenierung. Daher gilt es, unter apnoischer Oxygenierung das Eindringen von Raumluft in die Atemwege zu verhindern.

Unklar ist derzeit, welche Stelle im menschlichen Atemweg am besten geeignet ist, um Sauerstoff anzubieten, das Eindringen von Stickstoff zu verhindern und so die besten Bedingungen für die apnoische Oxygenierung zu schaffen. In einem weiteren Schritt soll zudem ein modifiziertes Oxygenierungslaryngoskop entwickelt werden, welches diese Stelle möglichst präzise ansteuern kann.

Um den besten Ort für ein optimales Sauerstoffangebot im menschlichen Atemweg zu finden, platzierten wir Sauerstoffkanülen an verschiedenen Stellen des Atemwegs eines Atemwegs-

mulators und stellten im Weiteren eine apnoische Oxygenierung nach. Die Kanülen wurden im Rahmen dieses „proof of principle“ Ansatzes an drei Positionen im Atemweg platziert. Parallel dazu wurde in einer Kontrollgruppe eine apnoische Oxygenierung mit Raumluft simuliert. Somit handelt es sich um eine technische „proof of principle“ Studie im anatomisch korrekten Modell. Unsere formale Hypothese war, dass es keinen Unterschied im Abfall der Sauerstoffkonzentration in einer simulierten Testlunge in Abhängigkeit von den verschiedenen Applikationsorten gibt.

In einer zweiten Versuchsreihe entwickelten wir ein ursprünglich vor Jahren entworfenen Oxygenierungslaryngoskop weiter. Dazu befestigten wir an einem Standard Macintosh Spatel drei unterschiedlich lange Sauerstoffschläuche. Diese drei Spatel untersuchten wir ebenfalls an oben beschriebenem Modell unter der Bedingung einer apnoischen Oxygenierung bezüglich des Abfalls der Sauerstoffkonzentration in der Testlunge. Zum Vergleich führten wir den gleichen Versuch mit einer Kontrollgruppe durch. Der Kontrollgruppe wurde Raumluft angeboten. Auch hier war die formale Hypothese, dass es keinen signifikanten Unterschied zwischen den vier Gruppen gibt.

Bei der ersten Versuchsreihe einer simulierten apnoischen Oxygenierung mittels einer handelsüblichen Sauerstoffkanüle an verschiedenen Positionen im Atemweg einer präoxygenierten Intubationspuppe hielt die Sauerstoffinsufflation am Zungengrund den Sauerstoffanteil auf dem Ausgangswert von 99 %. Dies demonstrierte eine vollständige Blockade der in die Atemwege des Modells einströmenden Umgebungsluft. Die Sauerstoffinsufflation am weichen Gaumen oder die Insufflation auf Höhe des Naseneingangs waren in Bezug auf diesen Effekt deutlich weniger wirksam.

In der zweiten Versuchsreihe mit einem präoxygenierten Atemwegsmanikin konnte durch die Verwendung eines modifizierten Macintosh- Laryngoskopspatels mit einer an der Spitze, in der Mitte oder am oberen Ende angebrachten Sauerstoffleitung eine apnoische Oxygenierung ohne messbaren Abfall des Sauerstoffgehalts über 20 Minuten aufrechterhalten werden. Die proximale Platzierung der Sauerstoffzufuhr zeigte zwar immer noch einen Vorteil gegenüber der Raumluft, verhinderte jedoch nicht vollständig das Eindringen derselben in die Atemwege.

Mit Hilfe der beiden Versuchsreihen konnten wir zeigen, dass der Applikationsort der Sauerstoffinsufflation wesentlich entscheidend ist. Vorangegangene Studien zeigten bereits, dass eine Erhöhung des Sauerstoffflusses nur sehr bedingt zu einer Verbesserung der Oxygenierung führt. In unseren Versuchsreihen konnte man nun deutlich sehen, dass sogar ein recht niedriger Sauerstofffluss von nur 3-4 l/min vollkommen ausreichend ist, eine apnoische Oxygenierung aufrecht zu erhalten, wenn dieser Fluss nur möglichst tief in den Atemweg eingebracht

wird. Entscheidend ist möglicherweise die Verwirbelung mit Raumluft durch den offenstehenden Mund und damit den Venturi-Effekt zu umgehen, der mit dem turbulenten Sauerstoffstrom Stickstoff aus der umgebenden Raumluft mit in den Atemweg saugen kann. Dies erreichten wir, in dem die Sauerstoffzufuhr auf Höhe des Zungengrundes eingebracht wurde. Wie sich in der zweiten Versuchsreihe zeigte, könnten entsprechend konstruierte Oxygenierungsspatel daher geeignete Instrumente sein, den Sauerstoff am korrekten Ort zu insufflieren. Sie könnten bei entsprechender Bewährung in klinischen Studien zukünftig Einzug in die Patientenversorgung erhalten.

## 2. Einleitung

### 2.1. Der schwierige Atemweg und die Bedeutung der Präoxygenierung

Während einer geplanten oder notfallmäßigen Intubation im Rahmen einer Narkoseeinleitung kommt es aufgrund der Induktionsmedikamente zu einem Atemstillstand. Zur Vermeidung negativer gesundheitlicher Einflüsse ist eine Maskenbeatmung mit anschließender endotrachealer Intubation und mechanischer Beatmung notwendig. Stellt sich in einer solchen Situation heraus, dass der Patient weder mit Maske zu beatmen, noch zu intubieren, bzw. mit einer Larynxmaske/einem Larynxtubus zu beatmen ist, sprechen wir von einer sogenannten „cannot ventilate- cannot intubate“ Situation.<sup>1-10</sup> Diese geht mit einem immens erhöhten Risiko einer Hypoxie und folglich auch einer deutlich erhöhten Morbidität und Mortalität einher.<sup>11-17</sup> Dies gilt insbesondere in Schockzuständen. So zeigten Pehböck et al., dass es im akuten Volumenschock schon nach weniger als einer Minute zu einem akuten Abfall der Sauerstoffsättigung kommt.<sup>18</sup> Die American Society of Anaesthesiologists definiert einen schwierigen Atemweg als Situation, in der ein geübter Anästhesist Schwierigkeiten hat sowohl den Patienten zu intubieren als auch mit einer Maske zu beatmen.<sup>3,4</sup>

Eine schwierige Maskenbeatmung wird mit einer Inzidenz von 1,4 bis 7,5% angegeben.<sup>19-23</sup> Die Inzidenz einer schwierigen Intubation liegt zwischen 1 und 8%.<sup>5,24</sup> Somit ist die schwierige Intubation immer noch ein Hauptfaktor für Morbidität und Mortalität während der Narkose.<sup>6</sup> Tatsächlich sind 25- 46% der Anästhesie- bedingten Todesfälle durch eine schwierige Intubation verursacht.<sup>25</sup> Dazu kommt, dass 93% dieser Fälle unerwartet sind.<sup>26,27</sup> Aus diesem Grund ist eine suffiziente Präoxygenierung bei einer geplanten Intubation essentiell, wodurch sich der pulmonale Sauerstoffspeicher füllen und die Zeit bis zur Hypoxie verlängern lässt.

So wird es auch von der Deutschen Gesellschaft für Anästhesiologie und Intensivmedizin e.V. (DGAI) in ihrer 2023 erschienenen S1- Leitlinie zum Atemwegsmanagement empfohlen.<sup>28</sup> Dies kann entscheidende Zeitfenster öffnen, bis beispielsweise in einer oben beschriebenen „cannot intubate- cannot ventilate“ Situation alternative Oxygenierungsmöglichkeiten wie Larynxmasken, Larynxtuben oder im worst case ein chirurgischer Atemweg etabliert werden können. Dabei ist es wichtig, dass die Zeit nach der Präoxygenierung bis zum Abfall der Sauerstoffsättigung durch weiteres Sauerstoffangebot entscheidend verlängert werden kann; dabei kommt das Prinzip der apnoischen Oxygenierung zur Anwendung.<sup>29 30,31</sup> Dies bezeichnet die Aufrechterhaltung der Oxygenierung ohne jegliche Atembewegung, also in tiefer Apnoe. Auch diese wird in der aktuellen Leitlinie der DGAI diskutiert.

## 2.2. Die apnoische Oxygenierung

Wesentliche Grundlage der folgenden Erörterungen sind die Publikationen von Zander und Mertzluft von 1992 beziehungsweise 1994.<sup>32,33</sup> Die Geschichte der sogenannten apnoischen Oxygenierung ist lang. Bereits 1908 zeigte Volhard, dass es gelingen kann, vollständig relaxierte Tiere über bis zu 2 Stunden am Leben zu halten, wenn sie optimal präoxygeniert waren und man ihnen Sauerstoff mit niedrigem Fluss zuführt.<sup>34-36</sup> 1944 beschrieben Draper et al. ähnliche Ergebnisse in Versuchen mit Hunden.<sup>37</sup>

Zander und Mertzluft geben den menschlichen Sauerstoffspeicher unter Raumluft mit etwa 1500ml an. Dieser Wert verteilt sich auf 300ml an Myoglobin gebundenen Sauerstoff, 800ml an Hämoglobin gebundenen Sauerstoff und circa 400ml intrapulmonal im Rahmen der funktionellen Residualkapazität. Letzterer Wert setzt sich aus einem Residualvolumen von 3000ml multipliziert mit dem Faktor 0,135 für die Sauerstofffraktion ( $FAO_2$ ) unter Berücksichtigung der Fraktionen von Kohlendioxid und Wasserdampfpartialdruck zusammen, die mit 0,124 angesetzt werden.

Die intrapulmonale Sauerstoffkapazität lässt sich theoretisch mithilfe einer optimalen Präoxygenierung, also vollständiger Denitrogenisierung, auf 2650ml erhöhen ( $3000\text{ml} \times 0,886 FAO_2$ ; die restliche Gasfraktion besteht dann wieder aus 0,124 Wasserdampf und Kohlendioxid).

Das Prinzip der apnoischen Oxygenierung beruht auf Diffusionseffekten in der optimal präoxygenierten Lunge entlang der Partialdrücke. Sauerstoff diffundiert entlang des Gradienten von der Alveole in das Blut. Hierbei werden rund 200ml Sauerstoff pro Minute benötigt, in 10 Minuten also 2000ml. Umgekehrt diffundiert Stickstoff aus dem gemischtvenösen Blut in die Alveole, welche definitionsgemäß nach optimaler Präoxygenierung zu Beginn denitrogenisiert sein sollte. Hierbei gehen Zander und Mertzluft in ihren Berechnungen von lediglich 200ml Stickstoff aus, welche in 10 Minuten Apnoezeit in die Alveole diffundieren. Zusätzlich diffundiert  $CO_2$  ebenfalls aus dem gemischtvenösen Blut in die Alveole. Hierbei steigt der Kohlendioxidpartialdruck innerhalb der ersten Minute um 13 mmHg, anschließend minütlich weiter um 3mmHg an. In dem angegebenen Intervall von 10 Minuten Apnoe steigt der  $pCO_2$  von 40mmHg also auf 80 mmHg an, was einer Verdopplung der alveolären  $CO_2$ -Konzentration von 5,3% auf 10,6% entspricht. Diese zusätzlichen 5,3% mehr Kohlendioxid im Alveolarraum sind bei einer funktionellen Residualkapazität von 3000ml allerdings nur mit 160ml zu berechnen.

Geht man also von einem Zufluss von 200ml Stickstoff und 160ml Kohlendioxid in den ersten zehn Minuten der Apnoe in die Alveole gegenüber 2000ml Sauerstoffabfluss aus der Alveole ins Blut aus, ergibt sich ein Defizit von 1640ml intraalveolär. Dieses Defizit führt nun zu einem minimalen Unterdruck in der Lunge, der den sogenannten aventilatorischen Massenfluss von

Gas aus dem oberen Atemweg zur Folge hat, welcher auf Höhe der geöffneten Stimmritze messbar ist.<sup>38</sup>

Der errechnete ventilatorische Massenfluss von 1640ml über zehn Minuten wird mit dem Faktor 0,93 multipliziert, dies entspricht erneut dem abfallenden Sauerstoffgehalt durch Sättigung mit Wasserdampf beim Anfeuchten in der Trachea; somit ergibt sich ein reiner Sauerstoffeinfluss von 1540ml in den ersten zehn Minuten der apnoischen Oxygenierung. Bei initial 2650ml Sauerstoff im Alveolarraum, Abfluss von 2000ml in 10 Minuten entlang des Diffusionsgradienten ins Blut und Nachstrom von 1540 ml Sauerstoff über den ventilatorischen Massenfluss stehen nach 10 min also noch 2190ml Sauerstoff in der Alveole zur Verfügung. Dies entspricht einem Sauerstoffpartialdruck von 555mmHg nach 10 Minuten. Somit könnte man mit 100% Sauerstoff nach diesen Berechnungen von Zander und Mertzluft die apnoische Oxygenierung noch mindestens weitere 55 Minuten fortführen.

Anders sieht die Situation bei Einfluss von Raumluft aus. Zander und Mertzluft stellten dar, dass unter Einstrom von Raumluft der Effekt des Stickstoffabflusses in die Alveole unterbrochen wird. Der entsprechende Gradient, der unter optimaler Präoxygenierung, also vollständiger Denitrogenisierung zu einem Einstrom von 200ml Stickstoff aus dem gemischtvenösen Blut in die Alveole führt, wird unter Einstrom von Stickstoffhaltiger Raumluft nicht mehr aufgebaut. Somit ändert sich die oben aufgestellte Rechnung wie folgt: über 10 Minuten Apnoe werden 2000ml Sauerstoff verbraucht und 160 ml Kohlendioxid in die Alveole abgegeben, das macht eine Differenz von 1840ml. Zander und Mertzluft geben den Sauerstoffgehalt in der Einatemluft durch Anfeuchten im Trachealraum mit 19,7% an, dies entspricht bei 1840ml ventilatorisch nachströmender Raumluft 360 ml Sauerstoff. Bei initial 2650 ml Sauerstoff in der Lunge und 2000ml Verbrauch, sowie 360 ml Sauerstoff in der nachströmenden Raumluft ist von 1010ml Restsauerstoff nach 10 min auszugehen, dies entspricht einem  $pAO_2$  von 256 mmHg, der allerdings einem  $pAO_2$  von 673 mmHg nach optimaler Präoxygenierung gegenübersteht. Dies zeigt, dass eine sorgfältige Präoxygenierung ein essentielles Sicherheitsmoment darstellt, da auch ein apnoisches Nachströmen von Raumluft über 10 Minuten theoretisch mit ausreichender Sauerstoffreserve einhergeht. Dies ist allerdings nicht vergleichbar mit apnoischer Oxygenierung mit reinem Sauerstoff.

Der berechnete  $pAO_2$  von 256 mmHg ist sicher ein in der Regel für die Sauerstoffversorgung unter der Apnoe bei einer Intubation ausreichender Wert, welcher allerdings nur erreicht wird, sofern die Präoxygenierung sehr sorgfältig durchgeführt wurde. Zudem kann, wie Pehböck et al. zeigten - insbesondere im Schock - dieser Wert dramatisch abnehmen. Auch können in einer Apnoe- Phase besonders bei hoher alveolärer Sauerstoffkonzentration Atelektasen auftreten, welche über Shuntbildung die Dauer der Aufrechterhaltung einer apnoischen Oxygenierung dramatisch verkürzen können<sup>18,39-43</sup>.

Zudem ist die apnoische Oxygenierung technisch nicht trivial. Während sich nach Präoxygenierung durch eine Beatmungsmaske die apnoische Oxygenierung bei dichtem Sitz der Maske gut aufrechterhalten lässt, bedingt jeder Intubationsversuch mit einem konventionellen Laryngoskop ein Eindringen von Raumluft in den Atemweg. Der damit verbundene Einstrom von Stickstoff in den Atemweg wird somit zum Faktor, der die apnoische Oxygenierung behindert. Einmal eingedrungener Stickstoff lässt sich beim apnoischen Patienten nur durch aktive Beatmung entfernen.

Somit ist ein, wenn nicht der entscheidendste Aspekt in Bezug auf apnoische Oxygenierung das Verhindern des Eindringens von Stickstoff in den Atemweg, beispielsweise bei Intubationsversuchen, wie es auch in der aktuellen S1 Leitlinie der schwierige Atemweg diskutiert wird.<sup>28</sup>



### 2.3. Vorarbeiten der Arbeitsgruppe

Zur Oxygenierung wurden bereits in der Vergangenheit durch unsere Arbeitsgruppe einige Studien publiziert.<sup>44-48</sup> Die ursprüngliche Idee war, mittels eines speziell entwickelten Oxygenierungslaryngoskops das Eindringen von Stickstoff während eines Intubationsversuches in den Atemweg zu verhindern und so die apnoische Oxygenierung optimiert aufrecht zu erhalten. Dies ließ sich in einer „proof of concept“ Studie im Modell auch simulieren.<sup>46</sup> In weiteren Studien wurde der Einfluss modifizierter Guedeltuben mit Oxygenierungsschlauch oder intratracheale Oxygenierung mittels Bronchoskop untersucht. Unabhängig von den Ergebnissen der einzelnen Devices ergaben die Untersuchungen zusammenfassend im Wesentlichen zwei Ergebnisse:

Erstens zeigten auch sehr hohe Sauerstoffflüsse nicht immer einen Vorteil gegenüber niedrigeren Flüssen.<sup>47</sup> Zweitens war aufgrund vieler Versuchsreihen zu vermuten, dass eine tiefere Einbringung des Sauerstoffs vorteilhafter ist im Vergleich zu beispielsweise einer Nasen-sonde.<sup>46,48</sup> Dabei handelt es sich jedoch nur um Beobachtungen, die bisher nicht systematisch untersucht wurden. Während die nasale Gabe einerseits die einfachste Form der Sauerstoffapplikation ist, zeigte sie sich in den Vorstudien auch als die am wenigsten effektive Methode, auch sehr große Sauerstoffflüsse konnten diesen Effekt nicht umkehren.<sup>49</sup>

Theoretisch ist dagegen die intratracheale Sauerstoffgabe die effektivste Möglichkeit; umgekehrt ist sie auch sicherlich die technisch anspruchsvollste Methode und beeinflusst zudem die Sicht für die folgende Intubation und kann diese erschweren. Somit ist unklar, wo die beste Kompromisslösung liegt. An welcher Stelle im menschlichen Atemweg kann die beste Oxygenierungswirkung erzielt werden, ohne die Sicht bei der Intubation zu nehmen?

In einem weiteren Schritt soll ein modifiziertes Oxygenierungslaryngoskop entwickelt werden, welches diese Stelle möglichst präzise ansteuern kann. Das für die Vorversuche entwickelte, nicht kommerzielle Oxygenierungslaryngoskop bestand im Wesentlichen aus zwei aufeinander-gesetzten Standard Macintosh Spateln. Der zwischen den aufeinander-gesetzten Spateln entstandene Spalt wurde als Führung für den Sauerstoff genutzt. Dieser endete am unteren Spatelende (s. Abb 10 bis 12). Die Konstruktion war insgesamt 3 mm breiter und höher als ein Standard Macintosh-Spatel. Diese veränderten Maße - auch wenn sie nur im Millimeterbereich lagen - bargen das Potenzial, eine Intubation zu erschweren. Dies kann insbesondere in Fällen eines ohnehin erschwerten Atemwegsmanagements hochproblematisch werden.

Desweiteren ergaben sich Bedenken bezüglich hygienischer Belange und Kontaminationen, insbesondere im Bereich zwischen den beiden Spateln. Zuletzt war auch die mechanische Stabilität zumindest des Prototypen zweifelhaft. Dies führte dazu, dass der entwickelte Spatel nie zum Einsatz am Patienten weiterentwickelt werden konnte.

Um die Idee eines Oxygenierungsspatels aber fortzuführen, modifizierten wir einen Spatel in Normgröße, indem wir an die Oberseite eines Standard-Einweg-Macintosh-Spatels einen Sauerstoffschlauch befestigten. Der Schlauch an unserem Prototypen endete zunächst am Spatelende. Bei zwei weiteren Spateln ließen wir den Sauerstoffschlauch einmal mittig auf Höhe des Spatels und einmal am proximalen Ende des Laryngoskops enden.

## **2.4. Fragestellung und Ziel der Arbeit**

Diese Arbeit besteht aus zwei Versuchsreihen. Um im ersten Schritt den optimalen Ort für ein bestmögliches Sauerstoffangebot zur apnoischen Oxygenierung im menschlichen Atemweg zu finden, platzierten wir Sauerstoffkanülen an verschiedenen Stellen des Atemwegs einer Intubationspuppe und simulierten im Weiteren eine apnoische Oxygenierung an einer Testlunge. Drei Positionen im Atemweg wurden im Rahmen dieses „proof of principle“ Ansatzes unter Einsatz einer Standard Sauerstoffkanüle angesteuert.

In einer Kontrollgruppe ließen wir Raumluft in den Atemweg einströmen. Dies ist keine klinisch verwendbare Methode. An einem Probanden oder Patienten ließe sich dieser Versuchsaufbau so nicht überprüfen, da man nicht sicherstellen könnte, dass die Sonde an exakt der gewünschten Stelle platziert wird. Somit wählten wir hier eine technische „proof- of- principle“ Studie im anatomisch korrekten Modell. Unsere formale Hypothese war, dass es keinen Unterschied im Abfall der Sauerstoffsättigung in einer simulierten Testlunge in Abhängigkeit von den verschiedenen Applikationsorten oder bei Raumluft gibt.

In einem zweiten Ansatz entwickelten wir das ursprüngliche Oxygenierungslaryngoskop weiter. Dazu befestigten wir wie dargestellt an einem Standard Macintosh Spatel drei unterschiedlich lange Sauerstoffschläuche (Abb. 1- 3).

Diese drei Spatel untersuchten wir ebenfalls an oben beschriebenem Modell unter der Bedingung einer apnoischen Oxygenierung bezüglich des Abfalls der Sauerstoffkonzentration in der Testlunge.

Zum Vergleich führten wir den gleichen Versuch an einer Kontrollgruppe mit Raumluft durch. Auch hier war die formale Hypothese, dass es keinen signifikanten Unterschied zwischen den vier Gruppen gibt.

### **3. Material und Methoden**

Da es sich um eine technische Simulation ohne Teilnahme von Probanden oder Patienten handelt, war keine Genehmigung der Ethikkommission notwendig.

#### **3.1. Material- Entwicklung des Laryngoskopspatels**

Für den Versuchsaufbau beider Versuche bedienten wir uns des Atemwegsensors AirSim Bronchi X (TruCorp, Belfast, Nordirland). Dieses Modell verfügt über anatomisch korrekt dargestellte Atemwege vom Naseneingang, über Mundhöhle und Kehlkopf bis hin zu den Bronchien.

Die erste Versuchsreihe bediente sich einer Standard Sauerstoffkanüle mit festangeschlossener Schaumstoffkomresse, welche zum einen höheren Patientenkomfort bietet, zum anderen die Kanüle im Naseneingang abdichtet (Abb 1). Solche Sauerstoffkanülen werden im klinischen Alltag regelmäßig verwendet.

Für die zweite Versuchsreihe entwickelten wir, wie oben dargestellt, drei Oxygenierungslaryngoskope auf Basis eines Standard Einweg- Macintosh Laryngoskops (KaWe Medizintechnik, Asperg, Deutschland).

Beim ersten Spatel endete der Sauerstoffschlauch am proximalen Ende des Spatels, nahe des Griffs an der Unterseite (Abb. 2), beim zweiten endete der Sauerstoffschlauch auf Höhe der Lichtquelle auf der rechten Seite des Spatels (Abb. 3) und beim dritten Spatel endete der Schlauch am Ende des Spatels (Abb. 4). Dies machte es aus Konstruktionsgründen notwendig, dass der Schlauch auf der linken Seite des Spatels endete. Befestigt wurde der Schlauch mittels Heißkleber. Dieser zeigte sich als zuverlässig haltend und farbneutral.

Das Oxygenierungslaryngoskop kommt mit der Spitze in der epiglottischen Falte zu liegen (s. Anhang Abb. 11 und 12).<sup>44</sup> Dies standardisiert die Position des Spatels im menschlichen Atemweg, sodass auch die unterschiedlich am Spatel endenden Sauerstoffschläuche redundant auf den verschiedenen Höhen im Atemweg platziert werden.



Abb 1. Standard Sauerstoffkanüle mit festangeschlossener Schaumstoffkomresse



Abb 2. Selbst entwickeltes Oxygenierungslaryngoskop 1

Der Sauerstoffschlauch wurde am oberen (proximalen) Ende des Einweg- Laryngoskop befestigt.



Abb.3. Selbst entwickeltes Oxygenierungslaryngoskop 2

Der Sauerstoffschlauch wurde bis zum Ende der Lichtquelle geführt. Dies entspricht dem mittleren Platzierungsort.



Abb 4. Selbst entwickeltes Oxygenierungslaryngoskop 3.

Der Sauerstoffschlauch wurde an der Unterseite des Laryngoskops befestigt um ihn bis zur Spitze des Laryngoskops führen zu können. Dies entspricht dem distalen Platzierungsort.



### **3.2. Methoden**

Diese Arbeit besteht aus zwei Versuchsreihen mit einem ähnlichen Versuchsaufbau. Dieser wird im Folgenden daher einmalig beschrieben.

Für den Versuchsaufbau bedienten wir uns des Atemwegsimulators AirSim Bronchi X (s.o.), dessen Trachea wir mit einer Testlunge mit einem Volumen von 3 Litern verbanden. Dies entspricht dem funktionellen Residualvolumen eines erwachsenen Mannes. Mit dieser Testlunge war ein Oxymeter mit einem minütlichen Abfluss von 200ml verbunden, was ebenfalls dem Sauerstoffverbrauch eines männlichen Erwachsenen während einer apnoischen Oxygenierung entspricht<sup>32,38</sup>. Zunächst wurde die Lunge mit 100%igem Sauerstoff befüllt. Das Modell ist in Abbildung 4 dargestellt.



Abb 5. Versuchsaufbau: Intubationspumpe und Testlunge mit 3 L Volumen. Im Foto ist die Platzierung des Oxygenierungsspatels dargestellt.

### **3.2.1. Aufbau erste Versuchsreihe**

Anschließend wurde im ersten Versuch eine Standard Sauerstoffkanüle an 3 unterschiedlichen Stellen positioniert (Naseneingang (A), weicher Gaumen (B), Zungengrund (C); s. Bild). Über diese Kanüle wurde 100% Sauerstoff mit einem Fluss von 4 L/min insuffliert. Die Kontrollgruppe erhielt keinen Sauerstoff.

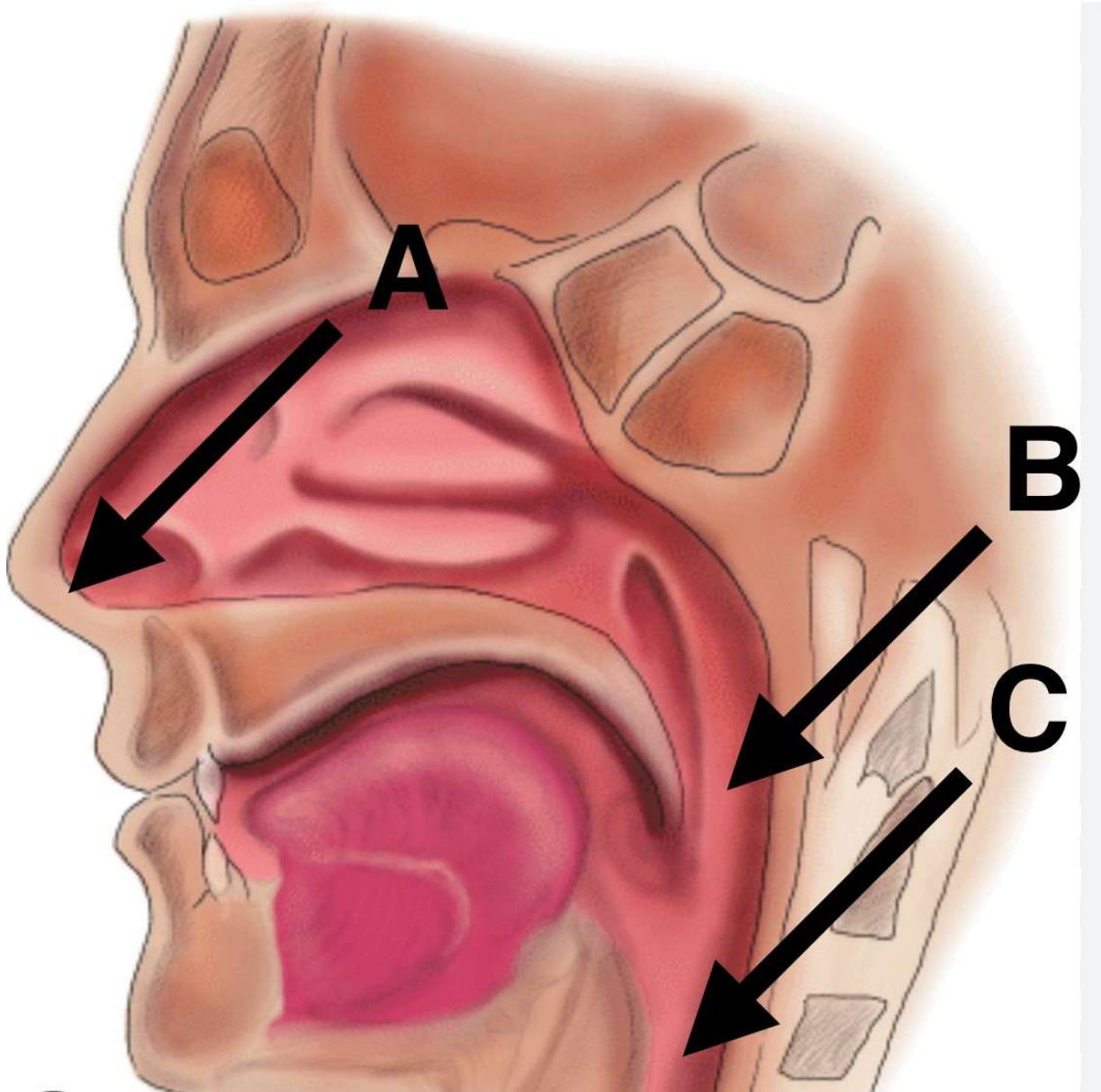


Abb 6. Sauerstoffapplikationsorte mittels Sauerstoffschlauch oder neu entwickeltem Oxygenierungslaryngoskop auf Höhe des Naseneingangs (A), auf Höhe des weichen Gaumens (B) und auf Höhe des Zungengrunds (C)

### **3.2.2. Aufbau zweite Versuchsreihe**

Der Versuchsaufbau erfolgte analog zur ersten Versuchsreihe. Es diente die gleiche oben beschriebene Intubationspuppe, die ebenfalls an eine Testlunge angeschlossen wurde. Wie bei der ersten Versuchsreihe wurden auch hier minütlich 200ml Gas aus der Testlunge über ein Oxymeter abgesaugt.

Statt der im ersten Versuch genutzten Standard Sauerstoffkanülen verwendeten wir für die zweite Versuchsreihe die drei Oxygenierungslaryngoskope mit jeweils unterschiedlich endenden Sauerstoffschläuchen, wie bereits oben beschrieben.

In einer Kontrollgruppe wurde lediglich Raumluft angeboten.



Abb 7. Einsatz des Oxygenierungslaryngoskop 1

### **3.3. Durchführung der Versuche**

#### **3.3.1. Erste Versuchsreihe:**

Vor dem Versuch wurde die Lunge jeweils mit 100% Sauerstoff gefüllt bis die Sauerstoffkonzentration am Monitor über mindestens eine Minute 100% betrug. Anschließend wurden alle 4 Versuchsgruppen (Raumluft, Sonde auf Höhe des Naseneingangs, auf Höhe des weichen Gaumens und auf Höhe des Zungengrunds) in zufälliger Reihenfolge je fünf Mal über eine Zeit von 20 Minuten geprüft. Minütlich wurde die Sauerstoffkonzentration dokumentiert. Der Beobachter wusste nicht, um welche Versuchsreihe es sich handelte, der Versuch war also verblindet.

#### **3.3.2. Zweite Versuchsreihe:**

Auch bei unserem zweiten Versuchsaufbau wurde die Testlunge zunächst präoxygeniert, bis mindestens eine Minute ein 100%iger Sauerstoffgehalt dokumentiert war. Anschließend wurde auch hier in randomisierter Reihenfolge je 3l/min Sauerstoff über die verschiedenen Oxygenierungsspatel insuffliert. Hierfür wurden die Spatel in die für eine Intubation übliche Position gebracht (s. Abb. 7). Die Kontrollgruppe erhielt auch hier keinen Sauerstoff. Es erfolgten hier je fünf Durchläufe über je 20 Minuten, in denen der Abfall der Sauerstoffkonzentration minütlich dokumentiert wurde. Dieser Versuch war ebenfalls verblindet, das heißt, der Beobachter am Monitor wusste nicht, um welche Versuchsreihe es sich handelte.

### **3.4. Statistik**

Die Daten wurden als Mittelwerte mit Standardabweichung dargestellt. Für die statistische Analyse wurde SPSS (IBM SPSS V28; IBM Armonk, NY, USA) verwendet. Nach einer Kolmogorov-Smirnov-Analyse wurde eine post- hoc Analyse der Varianzen zur Bestimmung der allgemeinen statistischen Signifikanz zwischen den Gruppen angeschlossen. Um die Unterschiede zwischen den Gruppen herauszuarbeiten wurde ein Student Newman-Keuls-Test angewendet.  $P < 0,05$  wurde als statistisch signifikant betrachtet. Dieses Verfahren wurde auf beide Versuchsreihen angewendet.

## **4. Ergebnisse**

### **4.1. Erste Versuchsreihe:**

Die Platzierung der Sauerstoffsonde an den verschiedenen Orten im Atemweg war problemlos möglich. Während des 20-minütigen Beobachtungszeitraums fiel die Sauerstoffkonzentration in der Testlunge von initial 100% auf  $53\pm 1\%$  in der Kontrollgruppe, auf  $87\pm 2\%$  in der Gruppe mit dem Sauerstoffschlauch in Höhe des Naseneingangs, auf  $96\pm 2\%$  in der Gruppe mit dem Sauerstoffschlauch auf Höhe des weichen Gaumens und blieb bei  $99\pm 1\%$  in der Gruppe mit dem Sauerstoffschlauch auf Höhe des Zungengrundes ( $p= 0,003$  am weichen Gaumen versus Zungengrund und  $p< 0,001$  für alle anderen Gruppen). Der detaillierte Kurvenverlauf der Sauerstoffkonzentration in der Testlunge ist in Abb 8 dargestellt.



## Sauerstoffkonzentration in der Testlung über die Versuchszeit

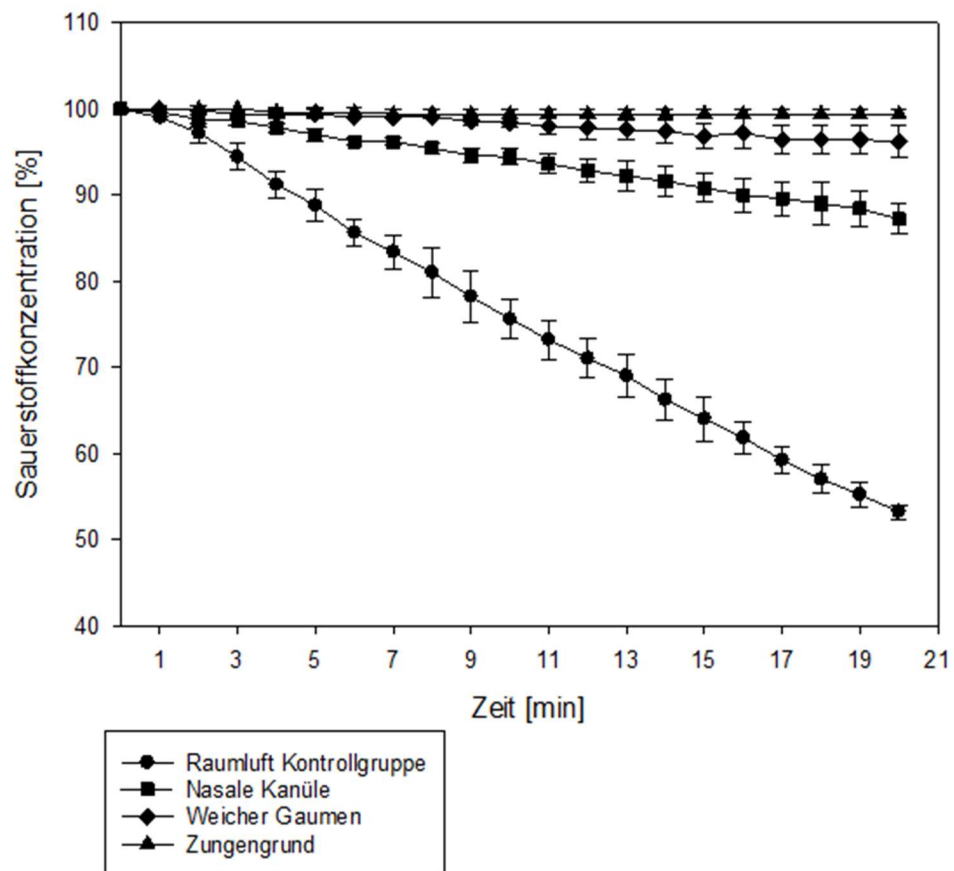


Abb. 8 Versuchsreihe 1: Sauerstoffkonzentration in der Testlung über die Versuchszeit

#### **4.2. Zweite Versuchsreihe:**

Auch hier ließen sich die Spatel problemlos platzieren. In der Kontrollgruppe, welche unter Raumluft apnoisch oxygeniert wurde, fiel die Sauerstoffkonzentration von 100% auf  $53\pm 2\%$  ( $p < 0,0001$  verglichen mit allen anderen Gruppen). In der Versuchsreihe mit dem Spatel mit kurzem Sauerstoffschlauch (Oxygenierungsspatel 1) fiel der Sauerstoffgehalt auf  $74\pm 3\%$ , wohingegen er bei beiden anderen Spateln (mittlerer und langer Sauerstoffschlauch, Oxygenierungsspatel 2 und 3) bei 100% blieb. ( $p=1$  zwischen diesen beiden Gruppen; zwischen allen anderen Gruppen  $p < 0,001$ ; Abb 9)

## Sauerstoffkonzentration in der Testlunge über die Versuchszeit

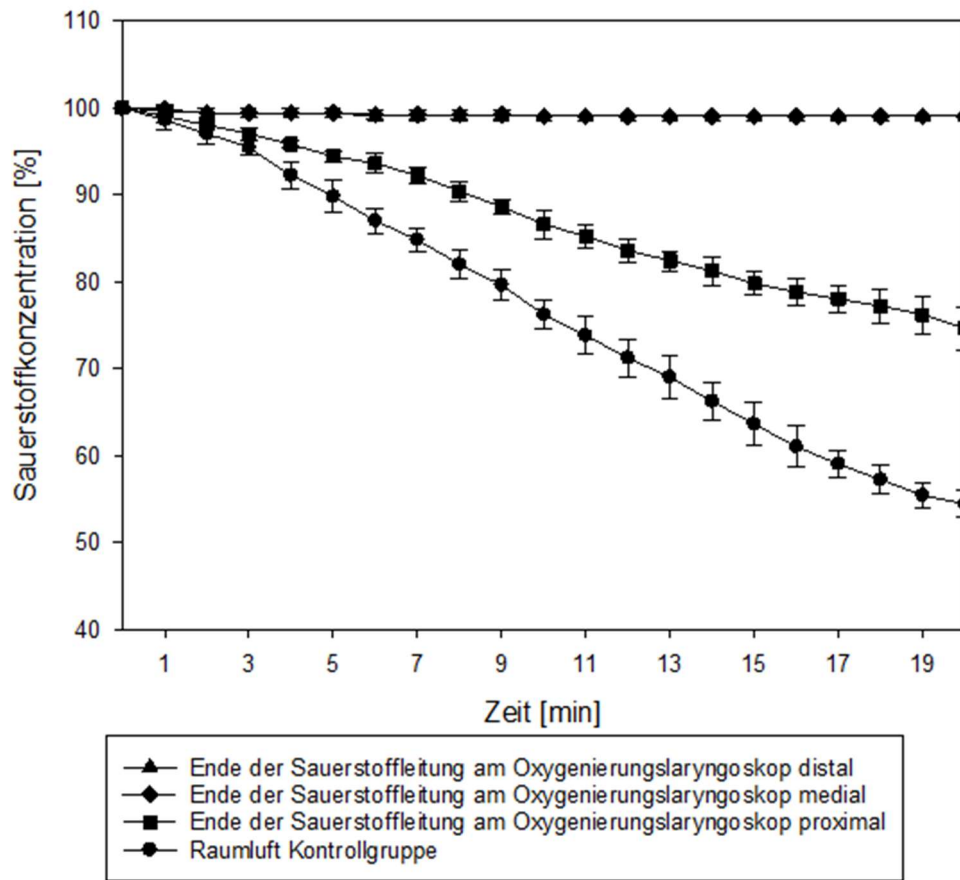


Abb 9. Versuchsreihe 2: Sauerstoffkonzentration in der Testlunge über die Versuchszeit

## 5. Diskussion

In der ersten Versuchsreihe zur apnoischen Oxygenierung war die Applikation des Sauerstoffs auf Höhe des Zungengrunds der auf Höhe des Naseneingangs und des weichen Gaumens überlegen. Offenbar war diese Stelle unterhalb der Mundhöhle am effektivsten darin, die Vermischung des Sauerstoffs mit der Umgebungsluft zu vermeiden.

In der zweiten Versuchsreihe mit den unterschiedlichen Oxygenierungsspateln waren die Spatel mit dem mittleren, bzw. distal angebrachten Sauerstoffschlauch hoch effizient und konnten den Sauerstoffgehalt in der Testlunge mittels apnoischer Oxygenierung bei nahezu 100% halten.

Die proximale Platzierung erwies sich als wesentlich weniger effektiv.

### 5.1. Erläuterung des Modells

Eine rein technische Simulation bringt durch den Versuchsaufbau stets gewisse Limitationen mit sich, insbesondere bezüglich der Simulation der apnoischen Oxygenierung. Nichtsdestotrotz war der bedeutendste Punkt, nämlich die anatomische Form der Puppe, deren Atemweg dem eines Menschen korrekt nachempfunden ist, gegeben. Somit lag der Schwerpunkt des Modells darin, die Position der Sauerstoffapplikation im oberen Atemweg realistisch zu simulieren und so den anatomischen Punkt zu evaluieren, ab dem eine Vermischung mit der Umgebungsluft am geringsten ist.

Das Prinzip der apnoischen Oxygenierung ist hingegen seit Jahrzehnten bekannt und, wie in den Ausführungen von Zander und Mertzlufft eingangs dargestellt wurde, gut berechenbar.<sup>32</sup> In diesem Versuch war es mitunter nicht möglich, die Kohlendioxid Produktion, die Stickstoff-Diffusion aus der Lunge in die Alveole, sowie die Befeuchtung der Ausatemluft zu simulieren. Somit konnten wir nicht simulieren, inwiefern ein ansteigender Kohlendioxidanteil in der Alveole den Sauerstoffanteil reduziert. Auch inwiefern sich der ansteigende Kohlendioxidspiegel im Blut eines Patienten beispielsweise auf den Sauerstofftransport im Blut, auf Zellebene oder bei längerer Dauer auch auf die Sauerstoffaufnahme in die Lungen auswirkt, war in unserem Modell nicht darstellbar.<sup>50-52</sup> Diese Prozesse würden allerdings spät einschränkend wirken, also deutlich nach Ablauf unserer Versuche<sup>32,50</sup>. Der Sauerstoffverbrauch im Organismus und die Aufnahme aus der Testlunge ließen sich in diesem Versuchsaufbau allerdings hervorragend simulieren.

Gleiches gilt für die wichtigste Voraussetzung der apnoischen Oxygenierung, nämlich die adäquate Präoxygenierung der Lunge. Diese ist in unserer technischen Simulation deutlich einfacher zu erreichen als in der menschlichen Lunge.

Zusammenfassend lässt sich sagen, dass unser Versuchsaufbau geeignet sein sollte, die anatomisch optimale Position im menschlichen Atemweg aufzuzeigen, an der die Sauerstoffzufuhr am wenigsten durch einströmende Umgebungsluft beeinträchtigt oder abgeschwächt wird, also den optimalen Sauerstoffapplikationsort für eine apnoische Oxygenierung.

Realistischere Szenarien, beispielsweise Tierversuche, wären bezüglich der anatomischen Gegebenheiten, beispielweise dem fehlenden 90°Knick der oberen menschlichen Atemwege, für unseren Zweck, dem Versuch an der anatomisch korrekten Puppe nicht überlegen gewesen. Studien mit nicht-intubierten menschlichen Probanden sind aufgrund des Gefährdungspotentials in jedem Fall als unethisch zu betrachten.

Einen hybriden Ansatz, in dem die Puppe mit einem Versuchstier zur korrekten Simulation der apnoischen Oxygenierung verbunden wird, sehen wir aus Tierschutzgründen ebenfalls als obsolet an. Die AO wurde wie dargestellt ausreichend beschrieben und durch unseren Ansatz ausreichend simuliert, so dass keine Überlegenheit gegenüber der Simulation durch das Opfern von Versuchstieren erreicht würde. Somit ist der Versuchstiereinsatz in dem Punkt ebenfalls als unethisch anzusehen. Zusammenfassend erscheint unser Simulationsversuchsaufbau als geeignete Methode, um unsere Hypothesen zu überprüfen.

In unserem zweiten Versuch war das Hauptziel zu beurteilen, inwiefern unsere neu entwickelten Oxygenierungslaryngoskope eine apnoische Oxygenierung erleichtern, abhängig von der Position des Sauerstoffschlauchs am Laryngoskop. Hier schienen proximalere Positionen des Schlauchs sowohl einfacher zu bauen als auch einfach in der Handhabung zu sein. Um dies zu beurteilen, benötigten wir erneut ein anatomisch realistisches Modell des menschlichen Atemwegs. Die bereits im ersten Versuch genutzte Puppe schien uns zuverlässig, um diesen Zweck zu erfüllen. Auch in dieser Versuchsreihe entschieden wir uns aus den oben bereits genannten Gründen gegen einen Tierversuch oder einen Probandenversuch.

Darüber hinaus sind unsere Prototypen des Oxygenierungslaryngoskops nicht als Medizinprodukt registriert und bisher nicht am Menschen erprobt und zertifiziert; ein Versuch am Tiernmodell wäre durch die anatomischen Unterschiede eingeschränkt und somit die Ergebnisse nicht 1:1 auf den menschlichen Atemweg übertragbar. Eine kontinuierlichen Denitrogenisierung eines präoxygenierten Atemwegs ist die Voraussetzung für die Aufrechterhaltung einer apnoischen Oxygenierung, dies ist seit vielen Jahren bekannt<sup>32,53</sup>. Unser Ziel in der zweiten Versuchsreihe war es, die Fähigkeiten zu untersuchen, die verschiedene Prototypen von Oxyge-

nierungslaryngoskopen bezüglich des Einströmens von Raumluft in den anatomisch korrekten Atemweg zu verhindern. Dies sollte in einem realistischen Versuch simuliert werden. Unser Aufbau mit der anatomisch korrekten Puppe wurde daher auch hier als geeignet betrachtet, den Sauerstoffverbrauch zu simulieren.

## **5.2. Einfluss der Platzierungsortes der Sauerstoffsonde**

Frühere Studien haben ebenfalls eine Überlegenheit der tiefen Sauerstoffinsufflation festgestellt und diesen Effekt auf die Anatomie der gekrümmten menschlichen Atemwege zurückgeführt: Sauerstoff, der über eine Nasenkanüle eintritt, strömt in die obere Mundhöhle und den oberen Rachenraum, wo er sich wahrscheinlich mit Stickstoff aus der Umgebungsluft vermischt, der durch den Mund der Versuchsperson eintritt.<sup>30,46,48,54,55</sup>

Der sogenannte Venturi-Effekt kann dieses Phänomen noch verstärken, indem Luft in die Atemwege gesaugt wird, insbesondere wenn höhere Sauerstoffflüsse angewendet werden, was zu Gasverwirbelungen führen kann.<sup>56</sup> Unseren Daten zufolge kann dies bis zu einem gewissen Grad auch für Sauerstoff gelten, der in Höhe des weichen Gaumens verabreicht wird. Im Gegensatz zu anderen Studien, die für eine apnoische Oxygenierung eine sehr hohe Sauerstoffzufuhr verwendeten, konnten wir zeigen, dass eine apnoische Oxygenierung bei einer distalen Sauerstoffzufuhr von nur 4 l/min aufrechterhalten werden kann, was mit einer kürzlich veröffentlichten Studie am Menschen übereinstimmt.<sup>57,58</sup> Eine Sauerstoffzufuhr von 4 l/min übersteigt die normale Sauerstoffaufnahme von 200 ml/min, die von der Lunge absorbiert wird (und die in unserer Versuchsanordnung im Modell durch eine entsprechende Gasentnahme simuliert wurde), um das 20-fache. Dadurch kann sich im unteren Rachenraum ein Reservoir bilden, das einen Rückfluss von überschüssigem Sauerstoff in die Mundhöhle erzeugt, der den Eintritt von Umgebungsluft in die Atemwege vollständig verhindert.

Auf der Grundlage der aktuellen Studie kann der Zungengrund als Grenze im Atemweg angesehen werden, ab der eine Sauerstoffinsufflation keine relevante Verwirbelung mit Raumluft mehr zur Folge hat. An dieser Schwelle wird also der Eintritt von Umgebungsluft in die Atemwege in unserem Modell nahezu vollständig verhindert. Die Übertragbarkeit dieser Ergebnisse muss in Zukunft in klinischen Studien untersucht werden.

### **5.3. Einfluss des Designs des Oxygenierungslaryngoskops auf die Sauerstoffapplikation**

Das Hauptergebnis unserer zweiten Versuchsreihe ist, dass für eine optimale Denitrogenisierung eines Atemweges, die Prototypen der Oxygenierungslaryngoskope sowohl mit dem distalen als auch mit dem mittleren Sauerstoffauslass hoch effektiv waren und somit eine Denitrogenisierung als Voraussetzung einer apnoische Oxygenierung aufrechterhalten wurde.

Das Laryngoskop mit dem proximalen Auslass war deutlich unterlegen. Interessanterweise war bei richtiger Platzierung auch in der zweiten Versuchsreihe eine Denitrogenisierung mit noch moderateren Sauerstoffflüssen von 3 l/min möglich. In der Theorie sollten diese recht niedrigen Flüsse mehr als ausreichend sein, da auch ein Sauerstoff Fluss von 3 l/min den Verbrauch von etwa 200 ml/min um den Faktor 15 übertrifft<sup>32</sup>.

Zumindest deckt sich dies mit den Beobachtungen unserer ersten Versuchsreihe. Wie wir schon in vergangenen Studien sehen konnten, hatten höhere Sauerstoffflüsse häufig einen paradoxen, gegenteiligen Effekt.<sup>18,45-48,59,60</sup> Sie führten wohl zu Mischeffekten mit der Raumluft, höchstwahrscheinlich verursacht durch den oben bereits beschriebenen Venturi- Effekt. Dieser führt bei hoher Gas- Flussgeschwindigkeit und einem niedrigen Querschnitt zu Verwirbelungen, welche durch den turbulenten Sauerstofffluss auch Raumluft mit in den Atemweg saugen konnten.<sup>46,48</sup>

Des Weiteren ist bekannt, dass höhere Gasflüsse zu weiteren negativen Effekten führen können. So können sie zu direkten druckbedingten Gewebedefekten und unter anderem durch Dehydratation zu mukosaler Inflammation führen, sowie durch eine Magenüberblähung einen schädigenden Effekt haben.<sup>61-64</sup>

Somit betont auch die zweite Versuchsreihe erneut, dass der optimale Punkt der Sauerstoffinsufflation ein wichtiger Faktor zur Verhinderung von Raumlufteinstrom in den Atemweg und somit zur Aufrechterhaltung der apnoischen Oxygenierung sein könnte. Die mindestens im mittleren Abschnitt zu platzierende Öffnung des Sauerstoffaustritts am Laryngoskop stimmt mit den Ergebnissen der ersten Versuchsreihe überein. Die von uns entwickelten Oxygenierungslaryngoskope scheinen vielversprechend, um diese Erkenntnisse in der Praxis anwendbar zu machen.

Die Möglichkeit, Sauerstoff mittels eines Laryngoskops zu applizieren, ist nicht neu und wurde bereits vorher beschrieben: Die Nutzung eines Miller-Oxygenierungs-Laryngoskops bei Neugeborenen hat gezeigt, dass die Inzidenz schwerer Entsättigungen während neonataler und infantiler Intubationen sank.<sup>65-70</sup> Aus dem, was über die wenigen kommerziell erhältlichen

Oxygenierungslaryngoskope bekannt ist und auf den Bildern der Hersteller basiert, nehmen wir an, dass die Sauerstoffanschlüsse dieser Geräte am mittleren oder proximalen Ende der Laryngoskopspatel enden.<sup>71,72</sup> In diesem Zusammenhang könnte auf der Grundlage unserer Ergebnisse diskutiert werden, ob ein tieferer Punkt der Sauerstoffzufuhr am Spatel auch diese Geräte verbessern könnte und Gegenstand weiterer Studien sein sollte.

Eine distalere Position könnte hilfreich sein, um das Eindringen von Raumluft in die insbesondere kurzen Atemwege der Neonaten zu verhindern. Allerdings ist der Gebrauch von Miller-Laryngoskopen abseits von neonatologischen und pädiatrischen Settings extrem selten. Da der Macintosh-Spatel Standard und bei weitem das meist verbreitete Laryngoskop in Europa ist, entschieden wir uns entsprechend, einen modifizierten Macintosh Spatel zu konstruieren.

Eine proximale Anbringung der Sauerstoffzufuhr kann gemäß unseren Ergebnissen weniger wirksam hinsichtlich des Verhinderns von Eindringen von Raumluft in die Atemwege sein, was die Effizienz der apnoischen Oxygenierung entsprechend verringert. Umgekehrt allerdings könnte sie in Hinblick auf die Sicht auf die Stimmritze besser sein. Dies sollte sicherlich Gegenstand weiterer Manikin- und ggf. klinischer Untersuchungen sein. Diese modifizierte Version des Oxygenierungslaryngoskops könnte in Bezug auf die Handhabung einige theoretische Vorteile gegenüber der Ur-Vorgängerversion (s. Anhang Fig. 9) haben, da die Form und Abmessungen des herkömmlichen Macintosh-Spatels selbst nicht verändert wurden und nur eine Sauerstoffleitung hinzugefügt wurde. Der Sauerstoffanschluss könnte in einer zukünftigen Version in den Spatel integriert werden, so dass die Handhabung unverändert im Vergleich zu einem Standard Spatel ist.

Darüber hinaus hat die Verwendung eines Einweg- Spatels in unseren Experimenten theoretische Vorteile gegenüber dem wiederverwendbaren Prototyp, der in früheren Studien verwendet wurde, da eine Kreuzkontamination infektiöser Pathogene nicht mehr möglich ist. Um diese Annahmen zu überprüfen, könnte es in einem nächsten Schritt vielversprechend sein, die Handhabungsqualität beider Konzepte zu bewerten.



#### 5.4. Erkenntnis aus beiden Versuchen für die Praxis

Entscheidend für das Aufrechterhalten der apnoischen Oxygenierung ist, das Eindringen von Stickstoff in die Atemwege zu verhindern. Einmal eingedrungener Stickstoff kann unter Apnoe nicht mehr eliminiert werden und schränkt die apnoische Oxygenierung stark ein. Anhand der Versuchsreihen wird sehr deutlich, dass das Einbringen des Sauerstoffs in den Atemweg so tief wie möglich erfolgen sollte. Ist eine direkte endotracheale Intubation nicht möglich, konnten wir zeigen, dass die Sauerstoffapplikation auf Höhe des Zungengrundes hinsichtlich der Effizienz der AO derer auf Höhe des Naseneingangs deutlich überlegen ist.

Die Erklärung hierfür ist, dass es bei Einbringung des Sauerstoffs auf Höhe des Naseneingangs noch an dieser Stelle, aber auch in der Mundhöhle zu Luftverwirbelungen und Vermischung mit Raumluft kommt. Auch der Venturi- oder Bernoulli Effekt wirken sich in diesem Fall negativ auf die erreichte Sauerstoffkonzentration in der Lunge aus. Letzterer beschreibt eine Sogwirkung, die durch den Luftstrom durch ein enges Rohr entsteht.<sup>56</sup> Bei einem statischen Luftstrom, wie wir ihn durch die kontinuierliche Insufflation von 100%igem Sauerstoff in den Atemweg simulieren, kommt es an Engstellen zu einer Erhöhung der Strömungsgeschwindigkeit und zu einem Absinken des Drucks.

Dies könnte in unserem Beispiel zu einem vermehrten Einstrom von Raumluft in den Atemweg führen. Umgangen wird dieser Effekt, genauso wie die vorher beschriebene Verwirbelung, in dem der Applikationsort des Sauerstoffs möglichst tief in den Atemwegen liegt.

Des Weiteren konnte gezeigt werden, dass ein verhältnismäßig geringer Sauerstofffluss mit 4 l/min vollkommen ausreichend ist. Vorherige Studien haben bereits gezeigt, dass ein höherer Fluss keinen positiven Effekt auf die Sauerstoffkonzentration in einer Testlunge hatte.<sup>45,47</sup> Getestet wurden Flüsse von bis zu 80l, welche denen von 10l jedoch unterlegen waren.<sup>47</sup> Dies lässt sich nur über Venturi-Effekte erklären.

Zusammenfassend ist also der Applikationsort entscheidender als die Flussrate. Somit ist ein wie von uns entwickeltes Oxygenierungslaryngoskop, welches den Sauerstoffschlauch am Ende angebracht hat (Oxygenierungslaryngoskop 3) sinnvoll, um eine apnoische Oxygenierung, beispielsweise im Falle eines schwierigen Atemwegs, zu verlängern. So kann in den Phasen der Intubationsversuche das Eindringen von Stickstoff in den Atemweg verhindert werden. Zwischen den Intubationsversuchen kann dies durch das Aufsetzen einer Maske verhindert werden. Sollte allerdings auch dies aus anatomischen Gründen erschwert oder nicht möglich sein, kann mithilfe des Oxygenierungslaryngoskops die Zeit der apnoischen Oxygenierung ohne Maskenbeatmung im Unterschied zu einem Standard- Laryngoskop deutlich verlängert werden.

Wir sehen das von uns entwickelte Oxygenierungslaryngoskop insgesamt als potentielle Erleichterung an in Fällen, in denen schon absehbar ist, dass sich die Intubation schwierig gestalten könnte, beziehungsweise schon die Maskenbeatmung erschwert ist. Mit diesem Laryngoskop könnte es möglich sein, auch während der Intubationsversuche die apnoische Oxygenierung aufrechtzuerhalten und sich somit Zeit bis zu einer alternativen Sicherung des Atemwegs, beispielsweise durch Koniotomie, zu sichern.

## 5.5. Vorhandene vergleichbare Ansätze

Die Deutsche Gesellschaft für Anästhesiologie und Intensivmedizin empfiehlt in ihrer aktuellen Leitlinie zum schwierigen Atemweg neben der Präoxygenierung auch die apnoische Oxygenierung bei Hypoxämie- gefährdeten Patienten.<sup>28</sup> Allerdings ist in der Leitlinie von 2023 die sogenannte „THRIVE“ Methode empfohlen.<sup>73,74</sup> THRIVE steht für Transnasal Humidified Rapid- Insuflation Ventilatory Exchange und ist sicherlich der in den letzten Jahren am besten klinisch untersuchte Ansatz zur Aufrechterhaltung der apnoischen Oxygenierung.<sup>75-78</sup> Die Autoren der Leitlinie sehen allerdings bereits einen Nachteil in dieser Methode, wenn eine Zwischenbeatmung mittels Maske durchgeführt werden muss. Hier behindert der Schlauch der Nasenbrille das möglichst dichte Aufsetzen der Maske. Vorteilhaft ist bei Verwendung einer Nasenbrille der freie Atemweg für den Intubationsversuch, allerdings behindert der Schlauch der Nasenbrille die Maskenbeatmung bei einer eventuell notwendigen Zwischenbeatmung. Außerdem ist der Applikationsort der Nasenbrille nach unseren Versuchsergebnissen dem unseres Oxygenierungslaryngoskops unterlegen, selbst bei den empfohlenen hohen Flussraten von 60l/min.

Allerdings zeigten sich auch diesen Studien nicht immer Vorteile möglichst hoher Sauerstoffflüsse. Neben physiologischen Effekten wie Atelektasenbildung könnten diese inkonsistenten Studienergebnisse in Übereinstimmung mit unseren Simulationsstudien stehen, wo Vermischungseffekte den Benefit hoher Flüsse konterkarierten.<sup>79-81</sup>

In diesem Zusammenhang sei auf eine sehr interessante Studie von O’Loughlin et al. verwiesen, die im Gegensatz zum THRIVE Konzept mit niedrigem Gasfluss von maximal einem Liter pro Minute die apnoische Oxygenierung für circa 20 Minuten aufrechterhielten. Allerdings applizierten sie den Sauerstoff dazu aus unserer Sicht optimal direkt in der Trachea.<sup>55</sup> Sicherlich ist THRIVE im Moment klinisch gesehen das Standardvorgehen, das ggf. der Oxygenierung über Gesichtsmaske überlegen ist. In wie weit unser Konzept vergleichbar ist, muss sich klinisch zeigen.

Allerdings spricht auch nichts gegen eine Kombination von THRIVE und Oxygenierungslaryngoskop, da sich das Sauerstoffangebot nach menschlichem Ermessen im unteren Atemweg nicht verschlechtern dürfte und ein solcher Kombinationsansatz vielversprechend sein könnte. Sollte eine Intubation in solch einem Setting nicht sofort möglich sein, kann man immer noch auf Maskenbeatmung zurückfallen, die gleichsam mit einem Oxygenierungslaryngoskop verbunden werden kann. Somit sehen wir das Oxygenierungslaryngoskop nicht als Konkurrenz, sondern als Ergänzung der bestehenden Methoden, welches ggf. helfen könnte, die systemimmanenten Schwächen der Standardansätze auszugleichen.

Auch in der Pädiatrie könnte ein optimiertes Oxygenierungslaryngoskop auf Macintosh Basis aus oben bereits erörterten Gründen wie beim erwachsenen Patienten sinnvoll sein.<sup>82</sup> Intubationen bei Kindern stellen auch innerklinisch eine besondere Herausforderung dar.<sup>81-84</sup> Besonders Neugeborene haben eine geringere funktionelle Residualkapazität und einen höheren Stoffwechselbedarf als ältere Kinder oder Erwachsene.<sup>67</sup> Zudem sind wiederholte Intubationsversuche bei Neugeborenen und Kindern mit einem erhöhten Risiko für Atemwegsverletzungen verbunden.<sup>66,85</sup>

Verschiedene Studien haben in der Vergangenheit bereits gezeigt, dass eine apnoische Oxygenierung während des Intubationsversuchs die Zahl an Intubationsversuchen und die Rate an Komplikationen in dieser Kohorte deutlich senken konnte.<sup>69</sup> Dias et al. verglichen ein bereits existierendes Oxygenierungslaryngoskop auf Basis eines Miller-Spatels (Oxiport Miller) und es zeigte sich eine signifikant verringerte Inzidenz schwerer Entsättigungen während Intubationsversuchen.<sup>65</sup> Miller Spatel sind bei uns in Europa wesentlich weniger im Einsatz als in den Vereinigten Staaten von Amerika und wie oben beschrieben stellen Kinder eine besondere Populationsgruppe dar. Das Oxiport System wurde bisher nicht für Erwachsene weiterentwickelt und erprobt.<sup>86</sup>

Dennoch bestätigt uns diese Studie von Dias in der Überzeugung, dass ein Oxygenierungslaryngoskop, wie es von uns auf Basis eines Macintosh Spatels entwickelt wurde, in weiteren Studien erprobt werden sollte.

Riva et al. verglichen 2023 in einer im Lancet veröffentlichten Studie die Anzahl der benötigten Intubationsversuche und die Inzidenz von Hypoxämien bei Intubationsversuchen bei Neugeborenen mit herkömmlichem Spatel und Sauerstoffzufluss gegen Videolaryngoskop mit Sauerstoffzufluss.<sup>68</sup> Letzteres zeigte einen Vorteil bei der Zahl der Intubationsversuche, Hypoxämien zeigten sich in beiden Gruppen gleich selten.

Eine Studie von Steiner et al. zeigte bereits, dass eine laryngeale Sauerstoff Insufflation die Zeit bis zu einer einprozentigen Entsättigung verlängern und die Endsättigung während einer Laryngoskopie bei Kindern im Allgemeinen reduzieren kann.<sup>69</sup> Steiner et al. verwendeten jedoch einen Standard-Laryngoskopspatel, an den ein Trachealtubus mit sterilem Verband geklebt wurde. Leider enthält ihr Manuskript weder Fotos noch eine genaue Beschreibung, wo die Spitze platziert wurde, so dass die Vergleichbarkeit ihrer Experimente und der Vergleich mit unseren Ergebnissen eingeschränkt ist. Zudem wäre die Verwendung einer solchen selbstgebauten Vorrichtung in den meisten Ländern aus rechtlichen Gründen flächendeckend nicht zulässig. Windpassinger et al. verwendeten in einem ähnlichen Ansatz einen Airtraq und plat-

zierten einen Trachealtubus in den Tubusführungs kanal, der entweder für die Zufuhr von Sauerstoffsauerstoff verwendet wurde oder in einer Kontrollgruppe eben nicht.<sup>70</sup>

Sie fanden heraus, dass die Zufuhr von Sauerstoff die Zeit bis zur Entsättigung verlängerte. Auch hier gilt, dass die Studie an Säuglingen und Kleinkindern durchgeführt wurde und die Position der Spitze nicht standardisiert war, so dass möglicherweise verschiedene Positionen, an denen der Tubus endete, einbezogen wurden und die optimale Position unklar bleibt.

So sehen wir uns in Anbetracht der Vielzahl an Studien zur Präoxygenierung bei Kindern darin bestätigt, dass die Weiterentwicklung unseres Oxygenierungslaryngoskops auch im Bereich der Pädiatrie sinnvoll sein könnte.

Ein mögliches weiteres Schwerpunkt-Einsatzgebiet für ein solches Oxygenierungslaryngoskop wäre aus unserer Sicht die Notfallmedizin. Aufgrund der äußeren Bedingungen einer Intubation während eines Rettungseinsatzes im Vergleich zum Operationssaal, das heißt beispielsweise Intubation in einem engen Raum oder ein schlecht gelagerter Patient entsprechen für uns immer einer per se schwierigen Intubation.<sup>17,87-91</sup>

Des Weiteren sind im Rettungsdienst auch ärztliche Kollegen anderer Fachgebiete als der Anästhesie und Intensivmedizin tätig, die gegebenenfalls weniger geübt im Bereich der Intubation sind.<sup>92</sup> Unter all diesen Bedingungen könnte unser Oxygenierungslaryngoskop, wenn es denn keine erschwerte Handhabung mit sich bringt, hilfreich sein, um die Zeit der apnoischen Oxygenierung bis zur Intubation zu verlängern.

Eine weitere Risikogruppe für schwierige Intubationen stellen adipöse Patienten dar. Aufgrund eines geringeren Residualvolumens und eines höheren Sauerstoffbedarfs kommt es schneller zu einem Abfall der Sauerstoffsättigung.<sup>93-100</sup> Gegebenenfalls könnte hier die Oxygenierungslaryngoskopie auch eine Verbesserung bringen. Dies muss sicher Grundlage klinischer Studien sein, da aufgrund der anatomischen Besonderheiten mit geringem Residualvolumen und der Neigung, schneller Atelektasen auszubilden, Shunt-Phänomene in der Praxis auch bei ausreichendem Sauerstoffangebot bei apnoischer Oxygenierung in dieser Personengruppe eine Sauerstoffaufnahme verkomplizieren können.

Zu guter Letzt ist die Anästhesie im Kreißsaal zu erwähnen, wo Atemwegskomplikationen bis heute einen nicht unerheblichen Teil der maternalen Mortalität darstellen. Schwangere bieten aufgrund des erhöhten BMI, einer möglichen Präeklampsie und Wehen ein erhöhtes Hypoxämie-Risiko.<sup>96,101-103</sup> Nicht umsonst empfehlen die britischen Leitlinien die Verwendung eines „Bulk of Oxygen“ um Entsättigung in der Einleitungsphase zu verhindern.<sup>104</sup> Auch hier könnte gezielte Sauerstoffgabe über Oxygenierungsspatel helfen, zukünftig hypoxämische Phasen bei der Narkoseeinleitung zu verhindern.

## 5.6. Ausblick

Ein dem von uns entwickelten Oxygenierungslaryngoskop ähnliches Produkt für alle Altersklassen auf Basis eines Standard-MacIntosh-Spatels ist bisher nicht auf dem Markt erhältlich. Eine Patentierung unseres Laryngoskops wurde seitens der Patentprüfungsstelle (Provendis) des Landes Nordrhein-Westfalen vier Monate geprüft. Letztlich stellte sich heraus, dass in der Ukraine ein ähnliches Produkt bereits vor zehn Jahren patentiert wurde (UA94277U). Da eine Patentierung des Oxygenierungs-Laryngoskops in Deutschland nach dieser Einschätzung leider nicht mehr möglich schien, wurde der Arbeitsgruppe die wissenschaftliche Auswertung und Publikation der Ergebnisse freigegeben. Somit wäre einer Zusammenarbeit mit einem Industriepartner zur Weiterentwicklung des Prototypen zur möglichen Serienreife zwar möglich, jedoch mit bestehender markenschutzrechtlicher Problematik. Kooperationen in die Ukraine dürften sich aufgrund des anhaltenden Kriegszustandes im Land derzeit leider maximal schwierig gestalten. Akutes Interesse besteht zum Beginn des Jahres 2025 von Arbeitsgruppen aus den USA; in wie weit die rechtliche Problematik besteht und eine Zusammenarbeit möglich ist, bleibt derzeit auszuloten. Ziel bleibt jedoch weiter eine Prototypenentwicklung und CE- Zertifizierung, um weitere Versuche, insbesondere mit Probanden an Puppen und in weiterer Folge auch Patienten, durchführen zu können.

Untersuchungsziel weiterer Versuche müsste insbesondere eine Überprüfung der Handhabung sein. Ist beispielsweise der Sauerstoffschlauch störend? Bei dem Oxygenierungslaryngoskop 2, bei dem der Sauerstoffschlauch auf Höhe des weichen Gaumens endet, verläuft der Sauerstoffschlauch im Bereich der Führungsrille für den Tubus. Hier müsste am Modell, aber natürlich im weiteren Verlauf auch an Probanden, beziehungsweise Patienten überprüft werden, inwiefern der einliegende Sauerstoffschlauch das Einführen des Tubus stört. Beim Oxygenierungslaryngoskop 3 verläuft der Sauerstoffschlauch auf der unteren Seite des Spatels. Dies war aus technischen Gründen nicht anders umsetzbar, weil man den Schlauch sonst nicht an der Spitze des Laryngoskops befestigen konnte. Hier wird er also höchstwahrscheinlich nicht störend sein beim Einführen des Tubus, allerdings eventuell die Sicht auf die Stimmritze behindern. Insofern sind weitere Versuche unabdingbar. Sollten sich oben beschriebene Schwierigkeiten in der Handhabung zeigen, müssten gegebenenfalls andere technische Lösungen gefunden werden.

Eine weitere Überlegung, die man bei der Weiterentwicklung des Oxygenierungslaryngoskops untersuchen müsste, wäre die Übertragung der Technik auf ein Mehrweg-Laryngoskop. Im Sinne der Nachhaltigkeit wäre dies sicher wünschenswert. Hier stellt sich dann aber die Frage, wie gut ein solches Oxygenierungslaryngoskop mit angebrachtem Sauerstoffschlauch zu reinigen wäre und welche anderen hygienischen Aspekte zu beachten wären.

## 5.7. Limitationen

Eine technische Simulation ist immer eine Einschränkung, insbesondere wie schon dargestellt bei der Simulation der apnoischen Oxygenierung.

Bei dieser Studie sind mehrere Einschränkungen zu beachten.

Erstens handelt es sich um einen selbstgebauten, modifizierten Macintosh-Laryngoskopspatel und nicht um ein registriertes und zugelassenes Medizinprodukt. Die Gesetzgebung in der Europäischen Union verbietet damit die Verwendung an Menschen, weshalb die Studie als Simulationsversuch an einer Airway-Übungspuppe durchgeführt werden musste. Wie bereits oben beschrieben halten wir den Versuchsaufbau dennoch für geeignet, um unsere Fragestellungen zu beantworten.

Zweitens wurde mit diesem Modell die Sauerstoffkonzentration in der Testlunge gemessen, dies entspricht natürlich nicht einer Sauerstoffsättigung im Blut. Somit liegt hier nur ein indirekter Messwert vor, der einen Abfall der Sauerstoffkonzentration in der Testlunge als Voraussetzung der apnoischen Oxygenierung nur unmittelbar zeigt. Die Sauerstoffsättigung ist im Falle eines Patienten oder Probanden noch von diversen weiteren Faktoren abhängig, wie beispielsweise A- oder Dystelektasen oder einem Emphysem, welche den Gasaustausch aus der Alveole ins Blut hemmen.

Drittens haben wir nicht untersucht, wie sich unser neu entwickeltes Oxygenierungslaryngoskop beispielsweise im Falle eines schwierigen Atemwegs verhält. Hier können verschiedene komplizierende Faktoren denkbar sein: ein fliehendes Kinn, ein adipöser Patient, schwierige Zahnverhältnisse oder eine Schleimhautschwellung im Mund- und Rachenraum.

Viertens war es nicht möglich, in unserem Modell die Kohlendioxidproduktion zu simulieren, ebenso wie die Befeuchtung der Ausatemluft. Somit können wir nicht sicher sagen, inwiefern sich der ansteigende Kohlendioxidspiegel im Blut eines Patienten beispielsweise auf den Sauerstofftransport im Blut, auf Zellebene oder bei längerer Dauer auch auf die Sauerstoffaufnahme in die Lungen auswirkt und somit letztendlich analog zu den Dalton'schen Gesetzen die apnoische Oxygenierung einschränkt. Vermutlich würden diese Prozesse allerdings erst nach Stunden einschränkend wirken, also deutlich nach Ablauf unserer Versuche.

Fünftens ersetzt die Verwendung von Oxygenierungslaryngoskopen als Hilfsmittel für die apnoische Oxygenierung nicht die Beatmung mit einer Maske zwischen den Intubationsversuchen. Unser Versuch legt nahe, dass über einen Zeitraum von 10 Minuten kein Nachteil im

Vergleich zu einer Maskenbeatmung entsteht, allerdings wurde dies nicht explizit verglichen. Wahrscheinlich ist das Oxygenierungs-Laryngoskop jedoch einem normalen Laryngoskop überlegen.



## **5.8. Schlussfolgerung**

Mit Hilfe der beiden Versuchsreihen konnten wir zeigen, dass der Applikationsort der Sauerstoffinsufflation wesentlich entscheidend für die Aufrechterhaltung der Denitrogenisierung eines Atemwegs ist. Vorangegangene Studien zeigten bereits, dass eine Erhöhung des Sauerstoffflusses nur sehr bedingt zu einer Verbesserung der Oxygenierung führt. In unseren Versuchsreihen konnte man nun deutlich sehen, dass sogar ein recht niedriger Sauerstofffluss von nur 3- 4 l/min vollkommen ausreichend ist, eine apnoische Oxygenierung aufrecht zu erhalten, wenn dieser Fluss nur möglichst tief in den Atemweg eingebracht wird. Entscheidend war, die Verwirbelung mit Raumluft durch den offenstehenden Mund und somit den Venturi Effekt zu verhindern, in dem die Sauerstoffzufuhr auf Höhe des Zungengrundes eingebracht wird. Entsprechend konstruierte Oxygenierungsspatel können daher Instrumente sein, den Sauerstoff am korrekten Ort zu insufflieren. Sie könnten bei entsprechender Bewährung in klinischen Studien zukünftig Einzug in die Patientenversorgung erhalten.

## 6. Literaturverzeichnis

1. Russo SG, Zink W, Herff H, Wiese CH. [Death due to (no) airway. Adverse events by out-of-hospital airway management?]. *Anaesthetist* 2010; **59**(10): 929-39.
2. Chen H, Zheng Y, Fu Q, Li P. A review of the current status and progress in difficult airway assessment research. *Eur J Med Res* 2024; **29**(1): 172.
3. Apfelbaum JL, Hagberg CA, Caplan RA, et al. Practice guidelines for management of the difficult airway: an updated report by the American Society of Anesthesiologists Task Force on Management of the Difficult Airway. *Anesthesiology* 2013; **118**(2): 251-70.
4. Apfelbaum JL, Hagberg CA, Connis RT, et al. 2022 American Society of Anesthesiologists Practice Guidelines for Management of the Difficult Airway. *Anesthesiology* 2022; **136**(1): 31-81.
5. Peterson GN, Domino KB, Caplan RA, Posner KL, Lee LA, Cheney FW. Management of the difficult airway: a closed claims analysis. *Anesthesiology* 2005; **103**(1): 33-9.
6. Joffe AM, Aziz MF, Posner KL, Duggan LV, Mincer SL, Domino KB. Management of Difficult Tracheal Intubation: A Closed Claims Analysis. *Anesthesiology* 2019; **131**(4): 818-29.
7. Galway U, Wang M, Deeby M, Zura A, Riter Q, Abdelmalak B. Recognition and management of the difficult airway—a narrative review and update on the latest guidelines. *Journal of Oral and Maxillofacial Anesthesia* 2023; **2**.
8. Cheney FW, Posner KL, Caplan RA. Adverse respiratory events infrequently leading to malpractice suits. A closed claims analysis. *Anesthesiology* 1991; **75**(6): 932-9.
9. Schulz CM, Burden A, Posner KL, et al. Frequency and Type of Situational Awareness Errors Contributing to Death and Brain Damage: A Closed Claims Analysis. *Anesthesiology* 2017; **127**(2): 326-37.
10. White LD, Melhuish TM, White LK, Wallace LA. Apnoeic oxygenation during intubation: a systematic review and meta-analysis. *Anaesth Intensive Care* 2017; **45**(1): 21-7.
11. Dörge V, Bein B. Klinisches Management des schwierigen Atemwegs. *Anästhesiol Intensivmed Notfallmed Schmerzther* 2006; **41**(09): 564-75.
12. Nørskov AK. Preoperative airway assessment - experience gained from a multicentre cluster randomised trial and the Danish Anaesthesia Database. *Dan Med J* 2016; **63**(5).
13. Kusza K, Owczarek M. [Difficult airways--why do we need algorithms]. *Anestezjol Intens Ter* 2009; **41**(3): 176-9.
14. Cook TM, Oglesby F, Kane AD, Armstrong RA, Kursumovic E, Soar J. Airway and respiratory complications during anaesthesia and associated with peri-operative cardiac arrest as reported to the 7th National Audit Project of the Royal College of Anaesthetists. *Anaesthesia* 2024; **79**(4): 368-79.
15. Russotto V, Cortegiani A, Raineri SM, Gregoretti C, Giarratano A. Respiratory support techniques to avoid desaturation in critically ill patients requiring endotracheal intubation: A systematic review and meta-analysis. *J Crit Care* 2017; **41**: 98-106.
16. Cao L, Zheng H, Xie Y, Liu S, Liu K. [Effect of preoxygenation and apnoeic oxygenation during intubation in the critically ill patients: a network Meta-analysis]. *Zhonghua Wei Zhong Bing Ji Jiu Yi Xue* 2019; **31**(10): 1236-41.
17. Barbosa A, Mosier JM. Preoxygenation and Apneic Oxygenation in Emergency Airway Management. *Clin Exp Emerg Med* 2024.
18. Pehböck D, Wenzel V, Voelckel W, et al. Effects of preoxygenation on desaturation time during hemorrhagic shock in pigs. *Anesthesiology* 2010; **113**(3): 593-9.
19. Shah PN, Sundaram V. Incidence and predictors of difficult mask ventilation and intubation. *J Anaesthesiol Clin Pharmacol* 2012; **28**(4): 451-5.
20. Kheterpal S, Martin L, Shanks AM, Tremper KK. Prediction and outcomes of impossible mask ventilation: a review of 50,000 anesthetics. *Anesthesiology* 2009; **110**(4): 891-7.

21. Langeron O, Masso E, Huraux C, et al. Prediction of Difficult Mask Ventilation. *Anesthesiology* 2000; **92**(5): 1229-36.
22. Lundstrøm LH, Nørskov AK, Kjeldgaard LD, Wetterslev J, Rosenstock CV. Implementation of video laryngoscopes and the development in airway management strategy and prevalence of difficult tracheal intubation: A national cohort study. *Acta Anaesthesiol Scand* 2023; **67**(2): 159-68.
23. Lundstrøm LH, Rosenstock CV, Wetterslev J, Nørskov AK. The DIFFMASK score for predicting difficult facemask ventilation: a cohort study of 46,804 patients. *Anaesthesia* 2019; **74**(10): 1267-76.
24. Seo SH, Lee JG, Yu SB, Kim DS, Ryu SJ, Kim KH. Predictors of difficult intubation defined by the intubation difficulty scale (IDS): predictive value of 7 airway assessment factors. *Korean J Anesthesiol* 2012; **63**(6): 491-7.
25. Cook TM, MacDougall-Davis SR. Complications and failure of airway management. *Br J Anaesth* 2012; **109** Suppl 1: i68-i85.
26. Pratt M, Miller AB. Apneic Oxygenation: A Method to Prolong the Period of Safe Apnea. *Aana j* 2016; **84**(5): 322-8.
27. Nimmagadda U, Salem MR, Crystal GJ. Preoxygenation: Physiologic Basis, Benefits, and Potential Risks. *Anesth Analg* 2017; **124**(2): 507-17.
28. (DGA) DGfAuleV. S1- Leitlinie Atemwegsmanagement. 2023. [https://register.awmf.org/assets/guidelines/001-028l\\_S1\\_Atemwegsmanagement\\_2023-09.pdf](https://register.awmf.org/assets/guidelines/001-028l_S1_Atemwegsmanagement_2023-09.pdf).
29. Wong DT, Yee AJ, Leong SM, Chung F. The effectiveness of apneic oxygenation during tracheal intubation in various clinical settings: a narrative review. *Can J Anaesth* 2017; **64**(4): 416-27.
30. Lyons C, Callaghan M. Uses and mechanisms of apnoeic oxygenation: a narrative review. *Anaesthesia* 2019; **74**(4): 497-507.
31. Simon M, Wachs C, Braune S, de Heer G, Frings D, Kluge S. High-Flow Nasal Cannula Versus Bag-Valve-Mask for Preoxygenation Before Intubation in Subjects With Hypoxemic Respiratory Failure. *Respir Care* 2016; **61**(9): 1160-7.
32. Zander R, Mertzlufft F. Clinical use of oxygen stores: pre-oxygenation and apneic oxygenation. *Adv Exp Med Biol* 1992; **317**: 413-20.
33. Mertzlufft F, Zander R. Optimal pre-oxygenation: the NasOral-System. *Adv Exp Med Biol* 1994; **345**: 45-50.
34. Volhard F. Über kunstliche Atmung durch Ventilation der Trachea und eine einfache Vorrichtung zur rhythmischen kunstlichen Atmung. *Munch med Wochensh* 1908: 209-11.
35. Lehnert BE, Oberdörster G, Slutsky AS. Constant-flow ventilation of apneic dogs. *J Appl Physiol Respir Environ Exerc Physiol* 1982; **53**(2): 483-9.
36. Webster P, Menon AS, Slutsky AS. Constant-flow ventilation in pigs. *Journal of applied physiology* 1986; **61**(6): 2238-42.
37. Draper WB WR. Diffusion respiration in the dog anesthetized by penthotal sodium. *Anesthesiology* 5:262-273 1944: 5:262-73.
38. Rudlof B, Faldum A, Brandt L. [Aventilatory mass flow during apnea : investigations on quantification]. *Anaesthesist* 2010; **59**(5): 401-9.
39. Edmark L, Kostova-Aherdan K, Enlund M, Hedenstierna G. Optimal oxygen concentration during induction of general anesthesia. *Anesthesiology* 2003; **98**(1): 28-33.
40. Hedenstierna G, Edmark L. Mechanisms of atelectasis in the perioperative period. *Best Pract Res Clin Anaesthesiol* 2010; **24**(2): 157-69.
41. Acosta CM, Lopez Vargas MP, Oropel F, et al. Prevention of atelectasis by continuous positive airway pressure in anaesthetised children: A randomised controlled study. *Eur J Anaesthesiol* 2021; **38**(1): 41-8.
42. Neumann P, Rothen HU, Berglund JE, Valtysson J, Magnusson A, Hedenstierna G. Positive end-expiratory pressure prevents atelectasis during general anaesthesia even in the presence of a high inspired oxygen concentration. *Acta Anaesthesiol Scand* 1999; **43**(3): 295-301.

43. Herff H, Raedler C, Zander R, et al. Use of an inspiratory impedance threshold valve during chest compressions without assisted ventilation may result in hypoxaemia. *Resuscitation* 2007; **72**(3): 466-76.
44. Mitterlechner T, Herff H, Hammel CW, et al. A dual-use laryngoscope to facilitate apneic oxygenation. *J Emerg Med* 2015; **48**(1): 103-7.
45. Wetsch WA, Schroeder DC, Finke SR, et al. A special oropharyngeal oxygenation device to facilitate apneic oxygenation in comparison to high flow oxygenation devices. *Med Gas Res* 2022; **12**(1): 28-31.
46. Herff H, Wetsch WA, Finke S, et al. Oxygenation laryngoscope vs. nasal standard and nasal high flow oxygenation in a technical simulation of apnoeic oxygenation. *BMC Emerg Med* 2021; **21**(1): 12.
47. Wetsch WA, Herff H, Schroeder DC, Sander D, Böttiger BW, Finke SR. Efficiency of different flows for apneic oxygenation when using high flow nasal oxygen application - a technical simulation. *BMC Anesthesiol* 2021; **21**(1): 239.
48. Schroeder DC, Wetsch WA, Finke SR, Dusse F, Böttiger BW, Herff H. Apneic laryngeal oxygenation during elective fiberoptic intubation - a technical simulation. *BMC Anesthesiol* 2020; **20**(1): 300.
49. Riva T, Greif R, Kaiser H, et al. Carbon Dioxide Changes during High-flow Nasal Oxygenation in Apneic Patients: A Single-center Randomized Controlled Noninferiority Trial. *Anesthesiology* 2022; **136**(1): 82-92.
50. Silbernagl S. DA, Draguhn A,. Taschenatlas der Physiologie. 9. Auflage ed: Georg Thieme Verlag; 2018.
51. Pape H-C KA, Silbernagl S. Physiologie. 10. Auflage ed: Georg Thieme Verlag; 2023.
52. Speckmann E-J HJ, Köhling R. Physiologie: Das Lehrbuch. 8. Auflage ed: Urban & Fischer Verlag/Elsevier GmbH; 2024.
53. Zander R. [Pulmonal oxygen reservoir-physiology and clinical benefit]. *Anesthesiol Intensivmed Notfallmed Schmerzther* 2002; **37**(1): 34-8.
54. Patel A, El-Boghdady K. Apnoeic oxygenation and ventilation: go with the flow. *Anaesthesia* 2020; **75**(8): 1002-5.
55. O'Loughlin CJ, Phyland DJ, Vallance NA, et al. Low-flow apnoeic oxygenation for laryngeal surgery: a prospective observational study. *Anaesthesia* 2020; **75**(8): 1070-5.
56. tec-schience. 14.06.2020 2020. <https://www.tec-science.com/de/mechanik/gase-und-fluessigkeiten/hydrodynamisches-paradoxon-druck-als-energie/>.
57. Mir F, Patel A, Iqbal R, Cecconi M, Nouraei SA. A randomised controlled trial comparing transnasal humidified rapid insufflation ventilatory exchange (THRIVE) pre-oxygenation with facemask pre-oxygenation in patients undergoing rapid sequence induction of anaesthesia. *Anaesthesia* 2017; **72**(4): 439-43.
58. Lodenius Å, Piehl J, Östlund A, Ullman J, Jonsson Fagerlund M. Transnasal humidified rapid-insufflation ventilatory exchange (THRIVE) vs. facemask breathing pre-oxygenation for rapid sequence induction in adults: a prospective randomised non-blinded clinical trial. *Anaesthesia* 2018; **73**(5): 564-71.
59. Wetsch WA, Schroeder DC, Herff SJ, Böttiger BW, Wenzel V, Herff H. Identification of the Optimal Position of a Nasal Oxygen Cannula for Apneic Oxygenation: A Technical Simulation. *Journal of Clinical Medicine* 2022; **11**(22): 6809.
60. Wetsch WA, Schroeder DC, Herff SJ, Böttiger BW, Wenzel V, Herff H. The efficacy of apneic oxygenation during intubation using a prototype of an oxygenation laryngoscope - a technical simulation. *BMC Anesthesiology* 2023; **23**(1).
61. Paal P, Neurauter A, Loedl M, et al. Effects of stomach inflation on haemodynamic and pulmonary function during spontaneous circulation in pigs. *Resuscitation* 2009; **80**(4): 470-7.
62. Paal P, Schmid S, Herff H, von Goedecke A, Mitterlechner T, Wenzel V. Excessive stomach inflation causing gut ischaemia. *Resuscitation* 2009; **80**(1): 142.
63. Chidekel A, Zhu Y, Wang J, Mosko JJ, Rodriguez E, Shaffer TH. The effects of gas humidification with high-flow nasal cannula on cultured human airway epithelial cells. *Pulm Med* 2012; **2012**: 380686.

64. Kubicka ZJ, Limauro J, Darnall RA. Heated, humidified high-flow nasal cannula therapy: yet another way to deliver continuous positive airway pressure? *Pediatrics* 2008; **121**(1): 82-8.
65. Dias R, Dave N, Chhabria R, Shah H, Garasia M. A randomised comparative study of Miller laryngoscope blade versus Oxiport(®) Miller laryngoscope blade for neonatal and infant intubations. *Indian J Anaesth* 2017; **61**(5): 404-9.
66. Hatch LD, Grubb PH, Lea AS, et al. Endotracheal Intubation in Neonates: A Prospective Study of Adverse Safety Events in 162 Infants. *J Pediatr* 2016; **168**: 62-6.e6.
67. Hodgson KA, Owen LS, Kamlin COF, et al. Nasal High-Flow Therapy during Neonatal Endotracheal Intubation. *N Engl J Med* 2022; **386**(17): 1627-37.
68. Riva T, Engelhardt T, Basciani R, et al. Direct versus video laryngoscopy with standard blades for neonatal and infant tracheal intubation with supplemental oxygen: a multicentre, non-inferiority, randomised controlled trial. *Lancet Child Adolesc Health* 2023; **7**(2): 101-11.
69. Steiner JW, Sessler DI, Makarova N, et al. Use of deep laryngeal oxygen insufflation during laryngoscopy in children: a randomized clinical trial. *Br J Anaesth* 2016; **117**(3): 350-7.
70. Windpassinger M, Plattner O, Gemeiner J, et al. Pharyngeal Oxygen Insufflation During AirTraq Laryngoscopy Slows Arterial Desaturation in Infants and Small Children. *Anesth Analg* 2016; **122**(4): 1153-7.
71. Inc. AA. 2024. <https://www.ainca.com/product-page/00-361-miller-port-with-o2-suction-port-conventional-laryngoscope-blades>.
72. Deutschland VM. APA Oxy blade. [https://www.vennermedical.de/wp-content/uploads/2017/09/Oxy\\_Blade\\_Flyer\\_FINAL\\_07092017-1.pdf](https://www.vennermedical.de/wp-content/uploads/2017/09/Oxy_Blade_Flyer_FINAL_07092017-1.pdf).
73. Zheng D, Yao Y, Luo C, et al. Effectiveness of trans-nasal humidified rapid insufflation ventilatory exchange compared with standard facemask oxygenation for pre- and apneic oxygenation during anesthesia induction: A meta-analysis based on randomized controlled trials. *PLoS One* 2024; **19**(4): e0302626.
74. Deng CJ, Nie S, Mai JX, et al. Narrative Review and Consensus Recommendations for the Use of Transnasal Humidified Rapid-Insufflation Ventilatory Exchange in Modified Electroconvulsive Therapy. *Alpha Psychiatry* 2024; **25**(2): 282-9.
75. Patel A, Nouraei SA. Transnasal Humidified Rapid-Insufflation Ventilatory Exchange (THRIVE): a physiological method of increasing apnoea time in patients with difficult airways. *Anaesthesia* 2015; **70**(3): 323-9.
76. Huang L, Dharmawardana N, Badenoch A, Ooi EH. A review of the use of transnasal humidified rapid insufflation ventilatory exchange for patients undergoing surgery in the shared airway setting. *J Anesth* 2020; **34**(1): 134-43.
77. Yang ZM, Loh TH, Ross J, Dalal K, Meiler SE, Postma GN. Transnasal Humidified Rapid Insufflation Ventilatory Exchange in Endoscopic Esophageal Surgery. *Ann Otol Rhinol Laryngol* 2024; **133**(3): 325-9.
78. Cai Q, Ma W, Wu C, Liu H, Wang S, Zhang G. [Is pre-oxygenation with high-flow nasal oxygen safe? randomized control trial of 56 cases of elderly patients during induction of general anesthesia with endotracheal intubation]. *Nan Fang Yi Ke Da Xue Xue Bao* 2022; **42**(7): 1069-74.
79. Ciril MF, Akarca M, Unal Akoglu E, Cimilli Ozturk T, Onur Ö. High-Flow Nasal Cannula versus Bag Valve Mask for Preoxygenation during Rapid Sequence Intubation in the Emergency Department: A Single-Center, Prospective, Randomized Controlled Trial. *Prehosp Disaster Med* 2024; **39**(1): 45-51.
80. Chua MT, Ng WM, Lu Q, et al. Pre- and apnoeic high-flow oxygenation for rapid sequence intubation in the emergency department (the Pre-AeRATE trial): A multicentre randomised controlled trial. *Ann Acad Med Singap* 2022; **51**(3): 149-60.
81. Fuchs A, Koepp G, Huber M, et al. Apnoeic oxygenation during paediatric tracheal intubation: a systematic review and meta-analysis. *Br J Anaesth* 2024; **132**(2): 392-406.
82. Eich C, Roessler M, Nemeth M, Russo SG, Heuer JF, Timmermann A. Characteristics and outcome of prehospital paediatric tracheal intubation attended by anaesthesia-trained emergency physicians. *Resuscitation* 2009; **80**(12): 1371-7.
83. Kleine-Brueggeney M, Grosshauser M, Greif R. Apneic oxygenation in pediatric anesthesia. *Curr Opin Anaesthesiol* 2022; **35**(3): 361-6.

84. Disma N, Asai T, Cools E, et al. Airway management in neonates and infants: European Society of Anaesthesiology and Intensive Care and British Journal of Anaesthesia joint guidelines. *Eur J Anaesthesiol* 2024; **41**(1): 3-23.
85. Gomes Cordeiro AM, Fernandes JC, Troster EJ. Possible risk factors associated with moderate or severe airway injuries in children who underwent endotracheal intubation. *Pediatr Crit Care Med* 2004; **5**(4): 364-8.
86. <https://www.hullanesthesia.com/p/819/laryngoscope-blade-fiber-optic-miller-oxyport>
87. Luckscheiter A, Lohs T, Fischer M, Zink W. [Airway management in preclinical emergency anesthesia with respect to specialty and education]. *Anaesthesist* 2020; **69**(3): 170-82.
88. Timmermann A, Eich C, Russo SG, et al. Prehospital airway management: a prospective evaluation of anaesthesia trained emergency physicians. *Resuscitation* 2006; **70**(2): 179-85.
89. Timmermann A, Russo SG, Rosenblatt WH, et al. Intubating laryngeal mask airway for difficult out-of-hospital airway management: a prospective evaluation. *Br J Anaesth* 2007; **99**(2): 286-91.
90. Levitan RM, Rosenblatt B, Meiner EM, Reilly PM, Hollander JE. Alternating day emergency medicine and anesthesia resident responsibility for management of the trauma airway: a study of laryngoscopy performance and intubation success. *Ann Emerg Med* 2004; **43**(1): 48-53.
91. Pavlov I, Medrano S, Weingart S. Apneic oxygenation reduces the incidence of hypoxemia during emergency intubation: A systematic review and meta-analysis. *Am J Emerg Med* 2017; **35**(8): 1184-9.
92. Luckscheiter A, Fischer M, Zink W. [Different levels of experience with anesthetic agents of German emergency physicians : Results of an online survey]. *Anaesthesist* 2018; **67**(1): 9-17.
93. Moon TS, Tai K, Kim A, et al. Apneic Oxygenation During Prolonged Laryngoscopy in Obese Patients: a Randomized, Double-Blinded, Controlled Trial of Nasal Cannula Oxygen Administration. *Obes Surg* 2019; **29**(12): 3992-9.
94. Hamp T, Prager G, Baron-Stefaniak J, Müller J, Bichler C, Plöchl W. Duration of safe apnea in patients with morbid obesity during passive oxygenation using high-flow nasal insufflation versus regular flow nasal insufflation, a randomized trial. *Surg Obes Relat Dis* 2021; **17**(2): 347-55.
95. Hu B, Tian T, Xue FS. Comparing performance of apneic oxygenation methods in patients with morbid obesity. *Surg Obes Relat Dis* 2021; **17**(8): 1521-2.
96. Wong DT, Dallaire A, Singh KP, et al. High-Flow Nasal Oxygen Improves Safe Apnea Time in Morbidly Obese Patients Undergoing General Anesthesia: A Randomized Controlled Trial. *Anesth Analg* 2019; **129**(4): 1130-6.
97. Gaszyński T. [Pre-oxygenation in morbidly obese patients]. *Anestezjol Intens Ter* 2010; **42**(3): 133-6.
98. Baraka AS, Taha SK, Siddik-Sayyid SM, et al. Supplementation of pre-oxygenation in morbidly obese patients using nasopharyngeal oxygen insufflation. *Anaesthesia* 2007; **62**(8): 769-73.
99. Sekhar P, Thiruvankatarajan V, Sekhar V, van Wijk R, Barker T. Effectiveness of high-flow nasal cannula oxygen in apneic oxygenation during intubation in high-risk surgical patients: a systematic review protocol. *JBI Evid Synth* 2023; **21**(9): 1896-902.
100. Bright MR, Harley WA, Velli G, Zahir SF, Eley V. High-Flow Nasal Cannula for Apneic Oxygenation in Obese Patients for Elective Surgery: A Systematic Review and Meta-Analysis. *Anesth Analg* 2023; **136**(3): 483-93.
101. Sjöblom A, Hedberg M, Johansson S, et al. Pre-oxygenation using high-flow nasal oxygen in parturients undergoing caesarean section in general anaesthesia: A prospective, multi-centre, pilot study. *Acta Anaesthesiol Scand* 2023; **67**(8): 1028-36.
102. Zhou S, Zhou Y, Cao X, et al. The efficacy of high flow nasal oxygenation for maintaining maternal oxygenation during rapid sequence induction in pregnancy: A prospective randomised clinical trial. *Eur J Anaesthesiol* 2021; **38**(10): 1052-8.
103. Biro P. Difficult intubation in pregnancy. *Curr Opin Anaesthesiol* 2011; **24**(3): 249-54.

104. Mushambi MC, Kinsella SM, Popat M, et al. Obstetric Anaesthetists' Association and Difficult Airway Society guidelines for the management of difficult and failed tracheal intubation in obstetrics. *Anaesthesia* 2015; **70**(11): 1286-306.

## 7. Anhang

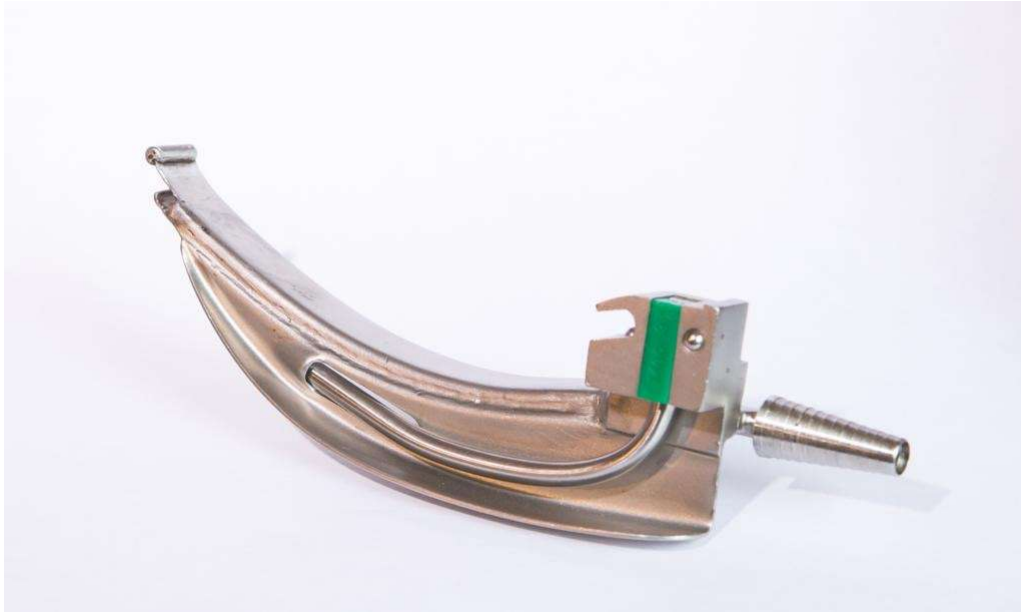


Abb 10. Prototyp eines Oxygenierungslaryngoskops aus früheren Versuchen der Arbeitsgruppe. Ein Standard Mehrweg Laryngoskop, welches im Inneren einen Leerkanal zur Insuf-



flation von Sauerstoff vorweist. Mithilfe dieses Laryngoskops wurde Sauerstoff auf Höhe des Zungengrundes appliziert. <sup>46</sup>

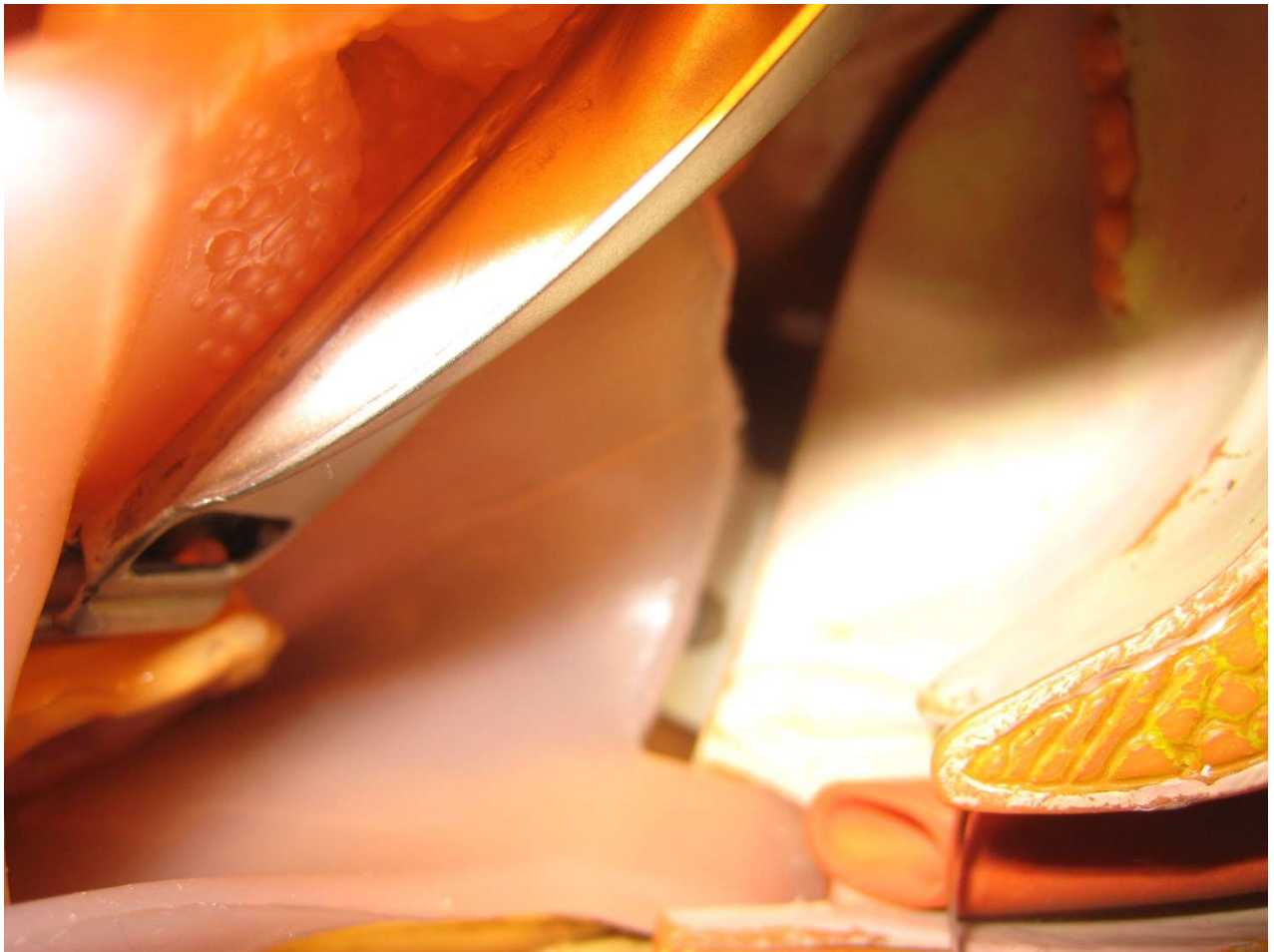


Abb 11. Anwendung des Prototypen des Mehrweg Oxygenierungslaryngoskops an einem Phantom mit seitlichem Einblick. Gut erkennbar ist der Abstand eines Wendl-Tubus an der Rachenhinterwand zu dem Laryngoskop am Zungengrund.

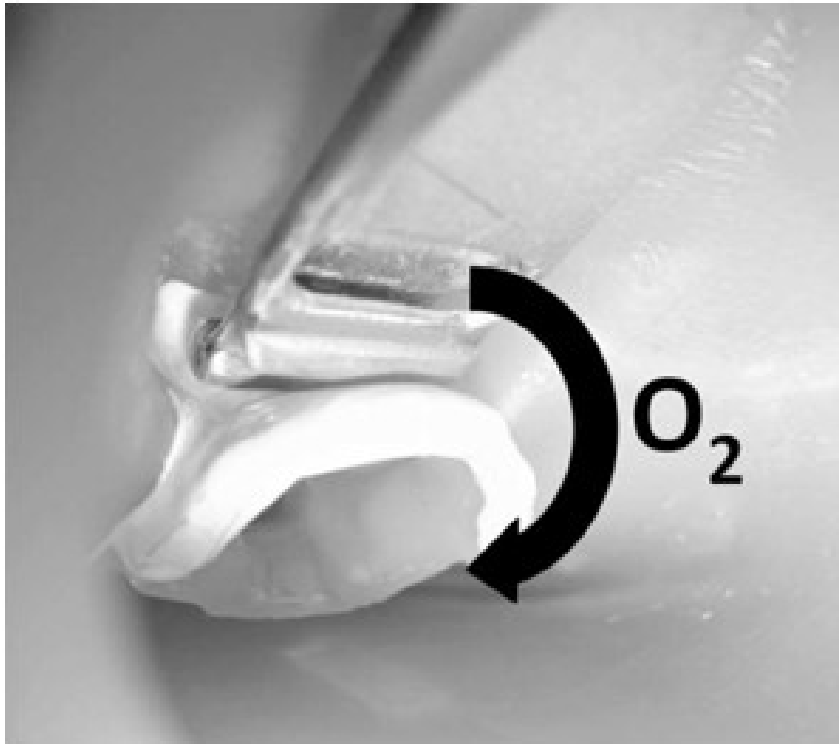


Abb. 12 Durch die Platzierung des Oxygenierungslaryngoskops kann Sauerstoff direkt in den tiefen Atemweg insuffliert werden. Dies verhinderte in der Studie von Mitterlechner et. al. vollständig das Eindringen von Raumluft in den Atemweg. (Mit freundlicher Genehmigung von Thomas Mitterlechner)

## 8. Vorabveröffentlichungen von Ergebnissen

1. Wetsch WA, Schroeder DC, Herff SJ, Böttiger BW, Wenzel V, Herff H. Identification of the Optimal Position of a Nasal Oxygen Cannula for Apneic Oxygenation: A Technical Simulation. *Journal of Clinical Medicine* 2022; **11**(22): 6809. IF 3,0
2. Wetsch WA, Schroeder DC, Herff SJ, Böttiger BW, Wenzel V, Herff H. The efficacy of apneic oxygenation during intubation using a prototype of an oxygenation laryngoscope - a technical simulation. *BMC Anesthesiology* 2023; **23**(1). IF 2,6