

März 2023



Rekrutierungsmanöver bei anästhesie- bedingten Funktionseinschränkungen der Lunge

Diplomarbeit
zur diplomierten Expertin Anästhesiepflege NDS HF

Seraina Weibel
Kurs 21H A

XUND Bildungszentrum Gesundheit Zentralschweiz

Abstract

Störungen des pulmonalen Gasaustauschs unter Allgemeinanästhesie werden auch bei Personen ohne vorbestehende Lungenerkrankung beobachtet und zählen zu den häufigsten ursächlichen Faktoren der perioperativen Gasaustauschstörungen. Die Induktion einer Allgemeinanästhesie führt durch eine Tonusänderung der inspiratorischen Muskulatur und einer Verschiebung des Diaphragmas nach kranial zu einer Reduktion der funktionellen Residualkapazität (FRC). Folglich kommt es zu einer Abnahme der pulmonalen Compliance sowie einer Minderventilation in den abhängigen Lungenbezirken, sodass es in diesen Arealen zur Ausbildung von Atelektasen kommt, die einen erhöhten Rechts-Links-Shunt verursachen und zu Gasaustauschstörungen führen.

Das methodische Vorgehen richtet den Blickwinkel im Rahmen einer Literaturrecherche auf unterschiedliche Studien und Fachartikel und geht der Frage nach, wie anästhesiebedingte Funktionseinschränkungen der Lunge durch Rekrutierungsmanöver optimiert werden können. Lachmann gilt mit seinem „Open-Lung-Konzept“ als Pionier und schaffte die Grundpfeiler der Lungenrekrutierung. Basierend auf den Erkenntnissen von Lachmann haben sich im Laufe der letzten Jahre hauptsächlich zwei unterschiedliche Formen der alveolären Rekrutierung etabliert: Das „continuous positive airway pressure“-Manöver (CPAP-Manöver) und die alveoläre Rekrutierungsstrategie (ARS). Danach gilt es, die rekrutierten Lungenareale mit einem ausreichend hohen positiv endexpiratorischen Druck (PEEP) offen zu halten. In Bezug auf den Rekrutierungseffekt bestehen keine Unterschiede zwischen den beiden Wiederöffnungsstrategien. Jedoch weist die ARS dem CPAP-Manöver gegenüber einige Vorteile auf. Durch PEEP wird im Anschluss an ein Rekrutierungsmanöver der transpulmonale Druck aufrecht erhalten, kollapsgefährdete Lungenkompartimente offen gehalten, die FRC vergrößert und der Rechts-Links-Shunt minimiert. Die Ermittlung des „Best-PEEP“ kann sich an festen oder individuellen PEEP-Strategien orientieren, wobei individuelle PEEP-Ansätze noch ein junges Forschungsgebiet darstellen.

Inhaltsverzeichnis

1 Einleitung	5
1.1 Motivation	5
1.2 Fragestellung	6
1.3 Ziele	6
1.4 Eingrenzung	6
1.5 Methodik	6
2 Anästhesiebedingte pulmonale Veränderungen	8
2.1 FRC	8
2.1.1 Tonusänderung der Atemmuskulatur	8
2.1.2 Veränderungen der Lungenmechanik	9
2.1.3 Umverteilung des Blutvolumens	9
2.2 Atelektasen	10
2.3 Intrapulmonaler Rechts-Links-Shunt	11
2.4 Hypoxisch pulmonale Vasokonstriktion	12
3 Therapeutische Massnahmen	14
3.1 Prävention	14
3.2 Rekrutierungsmanöver	15
3.2.1 CPAP-Manöver	15
3.2.2 Alveoläre Rekrutierungsstrategie (Cycling-Manöver)	16
3.3 (Kontra-)indikationen	17
3.4 PEEP	18
4 Diskussion	21
5 Schlussfolgerungen	24
6 Reflexion	27
7 Danksagung	29
8 Literaturverzeichnis	30
9 Abbildungsverzeichnis	32
10 Selbstdeklaration	33
11 Anhang	34
11.1 Pulmonaler Gasaustausch	34
11.2 Atemmechanik	35

11.3 Lungendehnbarkeit (Compliance)	36
11.4 Lungenvolumina	36

1 Einleitung

In den folgenden Abschnitten erläutert die Verfasserin ihre persönliche Motivation zum Thema. Weiter werden die zentrale Fragestellung und die daraus resultierenden Ziele aufgeführt. Innerhalb der Eingrenzung werden die inhaltlichen Schwerpunkte festgelegt. Im methodischen Vorgehen wird der Leserschaft erläutert, mit welcher Methode die Fragestellung bearbeitet wurde.

1.1 Motivation

Der klinische Anästhesiealltag beinhaltet täglich die Einleitung und Aufrechterhaltung von Allgemeinanästhesien. Die Basis für eine Allgemeinanästhesie stellt die tracheale Intubation und mechanische Beatmung dar. Die Anlage und Aufrechterhaltung eines solchen künstlichen Atemwegs setzt die Ausschaltung des Bewusstseins, die Muskelrelaxierung und eine ausreichende Analgesie voraus. Hypnotika, Muskelrelaxantien und Analgetika führen zum Verlust der Spontanatmung und verändern das physiologische Gleichgewicht der Lunge. Bereits 1963 konnte nachgewiesen werden, dass eine Vollnarkose unter maschineller Beatmung bei Patientinnen und Patienten mit normaler präoperativer Lungenfunktion eine Verschlechterung der intraoperativen Oxygenierung und Compliance mit sich bringt. Eine Allgemeinanästhesie führt somit zu deutlichen Einschränkungen bestimmter Lungenfunktionen und verursacht pulmonale Gasaustauschstörungen, die auf Ventilations-/Perfusions- (V/Q) Störungen zurückzuführen sind. Diese anästhesiebedingten pulmonalen Veränderungen fördern die Ausbildung von Atelektasen und führen somit zu einer verminderten Gasaustauschfläche und -leistung. Zu den therapeutischen Ansatzpunkten zur Wiedereröffnung solcher Atelektasen gehören unter anderem die Applikation eines ausreichend hohen PEEP und Rekrutierungsmanöver kollabierter Alveolen, die auf eine Optimierung der Gasaustauschfläche und somit auf eine verbesserte Oxygenation abzielen (Bendixen, Hedley-Whyte & Laver, 1963 zitiert in Zeng, Lagier, Lee & Vidal Melo, 2022).

Auch ich erinnere mich gut an Szenarien, in welchen wir nach erfolgreicher Intubation mit einem rasanten Abfall der Sauerstoffsättigung konfrontiert waren. Als ich diese Situation zum ersten Mal erlebte, mein Auge und mein Gehör die sinkende Sauerstoffsättigung registrierten, verspürte ich innere Nervosität. Mein damals zuständiger Oberarzt liess sich nicht aus der Ruhe bringen und nutzte die Situation, mir mit entsprechenden Gedankenanstössen selbst die Pathophysiologie der sinkenden Sauerstoffsättigung herzuleiten. Wir hatten es genau mit dem oben beschriebenen Phänomen, den Atelektasen, welche letztlich einen Rechts-Links-Shunt verursachten, zu tun. Um dieser Shunt-Problematik entgegenzuwirken und eine ausreichende Oxygenation zu gewährleisten, führten wir ein Rekrutierungsmanöver zur Wiedereröffnung der kollabierten Lungenareale durch. Den dadurch erzeugten Anstieg des pulmonalen Drucks mit anschliessender PEEP-Erhöhung ermöglichte bessere Ventilati-

ons- und somit Oxygenationsverhältnisse. Kurze Zeit später befand sich die Sauerstoffsättigung unseres Patienten wieder im Normbereich.

Die Pathophysiologie von Atelektasen und insbesondere die anästhesiebedingten pulmonalen Veränderungen faszinieren mich. Wie verändert sich die FRC und Compliance unter Allgemeinanästhesie? Was passiert mit dem Diaphragma und inwiefern beeinflusst dies den pulmonalen Gasaustausch? Welche Grenzen und Möglichkeiten beinhalten unterschiedliche Strategien zur Wiedereröffnung kollabierter Lungenareale? Genau mit diesen Fragen möchte ich mich im Rahmen dieser Diplomarbeit auseinandersetzen, mögliche Antworten dazu liefern und diese diskutieren. Ich bin überzeugt, dadurch wertvolle Erkenntnisse für den praktischen Alltag zu gewinnen und in meine weiterführende Tätigkeit als Expertin Anästhesiepflege NDS HF einfließen zu lassen.

1.2 Fragestellung

Wie können die Auswirkungen einer Allgemeinanästhesie auf das respiratorische System durch Rekrutierungsmanöver optimiert werden?

1.3 Ziele

1. Anhand der Literaturrecherche werden die Grundlagen des pulmonalen Gasaustauschs aufgezeigt sowie anästhesiebedingte Funktionseinschränkungen der Lunge abgebildet.
2. Die Wirksamkeit unterschiedlicher Rekrutierungsmanöver auf den pulmonalen Gasaustausch wird beschrieben sowie Grenzen und Limitationen in der Umsetzung dieser Massnahmen erläutert.

1.4 Eingrenzung

Die Diplomarbeit beschränkt sich auf erwachsene lungengesunde Personen im Rahmen eines elektiven Eingriffs (Rückenlage) in Allgemeinanästhesie während der intraoperativen Phase. Der Fokus der Arbeit liegt auf anästhesiebedingten Funktionseinschränkungen der Lunge, insbesondere Veränderungen der Atemmechanik, der Lungenvolumina und des pulmonalen Gasaustauschs. Innerhalb der therapeutischen Massnahmen wird im Rahmen des „Open-Lung-Konzepts“ auf unterschiedliche Rekrutierungsmanöver und den Einfluss des PEEP eingegangen. Angrenzende Themen, wie die Bedeutung der inspiratorischen Sauerstofffraktion (FiO_2) werden fürs Grundlagenverständnis am Rande angeschnitten.

1.5 Methodik

Es handelt sich bei dieser Diplomarbeit um eine Theoriearbeit. Der methodische Schwerpunkt liegt dabei in der Literaturrecherche von deutsch- und englischsprachigen Arbeiten und Studien, wobei Studienergebnisse aus verschiedener Fachliteratur entnommen, verglichen und zusammengetragen werden. Die Fachliteratur besteht aus Arbeiten und Studien, die

nach evidenzbasierten Kriterien gesucht werden. Vorwiegend wird auf den Literaturdatenbanken Pubmed und Google Scholar recherchiert.

2 Anästhesiebedingte pulmonale Veränderungen

Im Anhang (Kapitel 11) erhält die Leserschaft einen groben Überblick zur Lungenphysiologie, welche für das weiterführende Verständnis vorausgesetzt wird. Aufbauend auf die Kapitel zur Lungenphysiologie beschäftigen sich die kommenden Abschnitte mit den durch eine Allgemeinanästhesie bedingten pulmonalen Veränderungen.

Die Einleitung einer Allgemeinanästhesie unter kontrollierter Beatmung und Muskelrelaxierung verändert das physiologische Gleichgewicht der Lunge. Weitgehend unabhängig vom gewählten Narkoseverfahren kommt es bereits innerhalb weniger Sekunden zu einer Minderbelüftung und zum Kollaps von Alveolen. Lungenareale mit atelektatischen Anteilen werden zwar perfundiert, beteiligen sich jedoch nicht am Gasaustausch, da sie aufgrund ihres Kollapses nicht oder nur bedingt ventiliert werden. Bereits nach wenigen Minuten stellt sich ein neuer Gleichgewichtszustand mit verringerter Gasaustauschfläche ein. Die Bildung von Atelektasen stellt bei lungengesunden Patientinnen und Patienten eine relevante Ursache dar, die Störungen des V/Q-Verhältnisses zur Folge haben und letztlich den pulmonalen Gasaustausch beeinträchtigen kann (Böhm & Bangert, 2000).

2.1 FRC

Während einer Allgemeinanästhesie in Rückenlage reduziert sich die FRC um etwa 20% gegenüber einer wachen Person in Spontanatmung. Bereits wenige Minuten nach der Narkoseeinleitung ist diese Veränderung spürbar und in computertomographischen Untersuchungen wiederholt nachgewiesen worden. Die Reduktion der FRC zeigt im perioperativen Verlauf keine weitere Zunahme und zeigt sich manchmal erst Stunden nach Beendigung der Narkose wieder im physiologischen Bereich. Die verminderte FRC ist weitgehend unabhängig vom gewählten Anästhetikum (intravenös oder inhalativ) und Muskelrelaxantium. Ausschliesslich der Einsatz von Ketamin verhindert eine Reduktion der FRC, möglicherweise bedingt durch die Tonuserhaltung der Atemmuskulatur (Max & Dembinski, 2000).

In der Literatur werden überwiegend drei verschiedene ursächliche Mechanismen für eine reduzierte FRC beschrieben, welche in den folgenden Unterkapiteln behandelt werden.

2.1.1 Tonusänderung der Atemmuskulatur

Bereits 1985 und 1989 konnte anhand von computertomographischen Studien an anästhesierten lungengesunden Personen eine Verschiebung des Diaphragmas nach kranial beobachtet werden. Der Vergleich der FRC vor und nach Narkoseeinleitung zeigte unter Allgemeinanästhesie mit etwa 500ml oder 17% eine deutliche Reduktion der FRC (Hedenstierna, Strandberg, Brismar, Lundquist, Svensso & Tokics, 1985; Krayer, Rehder, Vettermann, Didier & Ritman, 1989).

Als Auslöser für die Abnahme des elastischen Rückstelleffekts der Thoraxwand wird ein Tonusverlust der Intercostalmuskulatur und des Diaphragmas angenommen. Mehrere Autoren haben nach Einleitung einer Allgemeinanästhesie in Rückenlage eine Verschiebung des Diaphragmas nach kranial bestätigt, was auf den anästhesiebedingten Verlust der endexpiratorischen Muskelaktivität zurückgeführt werden kann. Zusammenfassend lässt sich sagen, dass eine Allgemeinanästhesie zu einem Tonusverlust der respiratorischen Muskulatur führt und die Hauptursache für die Reduktion der FRC darstellt (Max & Dembinski, 2000).

2.1.2 Veränderungen der Lungenmechanik

Aus mehreren Studien geht hervor, dass die Veränderung der Compliance nicht Ursache, sondern Folge der FRC-Verminderung ist. Als Folge der FRC-Verminderung kommt es nach Einleitung einer Allgemeinanästhesie zu einer Abnahme der pulmonalen und thorakalen Compliance, da die Retraktionskräfte des Thorax vermindert sind. Da der Thorax in seinem Durchmesser verkleinert und in seiner Konfiguration abgeflacht ist, steigt der für eine Volumenzunahme aufzuwendende Druck. Des Weiteren kommt es zu einer Erhöhung der intraalveolären Oberflächenspannung, da inhalative Anästhetika und Sekretretention das pulmonale Surfactantsystem stören. Diese Veränderungen erzeugen eine Zunahme der Atemarbeit. Inwiefern das ausgewählte Narkoseverfahren, insbesondere der Gebrauch von Opioiden, die eine zusätzliche Thoraxrigidität auslösen können, die Lungenmechanik beeinflusst, ist in der Literatur unklar (Oczenski, 2017).

2.1.3 Umverteilung des Blutvolumens

Nebst den Veränderungen der Thoraxwand und der Lungenmechanik kann auch eine Zunahme des intraabdominellen Volumens oder Drucks eine Verlagerung des Diaphragmas nach kranial bewirken. Abbildung 2 stellt skizzenhaft dar, wie sich die Position des Diaphragmas nach Einleitung einer Narkose unter kontrollierter Beatmung verschiebt und wie sich der thorakale Durchmesser reduziert. Daraus resultieren eine Umverteilung des intrathorakalen Blutvolumens und eine Abnahme der FRC (Max & Dembinski, 2000).

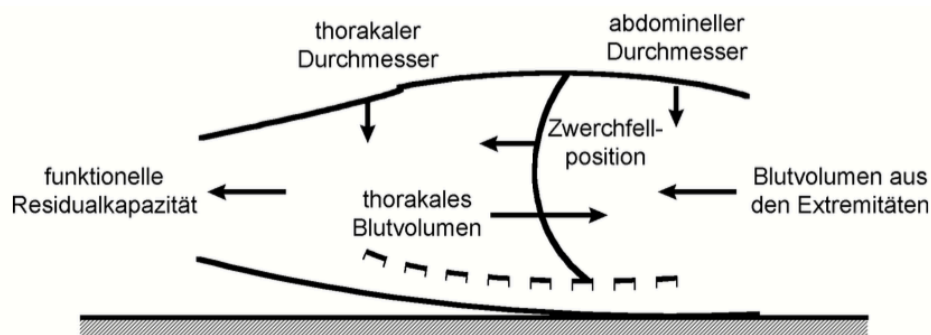


Abbildung 2. Verschiebung von intrathorakalen und intraabdominellen Blut- und Gasvolumina während Allgemeinanästhesie

Die Veränderung der Diaphragmaposition verändert den abdominellen Durchmesser nur minimal, da eine Umverteilung aus dem Thorax und den Extremitäten eine Zunahme des intra-abdominellen Blutvolumens bewirkt (Max & Dembinski, 2000).

2.2 Atelektasen

Durch die Reduktion der FRC und die daraus resultierende Abnahme der Compliance während einer Allgemeinanästhesie kommt es, einhergehend mit einer Änderung der Gasvolumenverteilung der Lunge, zu einem erhöhten Pleuradruckgradienten beziehungsweise (bzw.) zu einer Erniedrigung des transpulmonalen Druckgradienten, wodurch die Ausbildung von Atelektasen in abhängigen Lungenabschnitten begünstigt wird (Rutkowski, 2008).

Eine Abnahme der FRC führt vor allem mit steigendem Lebensalter zu einer erhöhten Kollapsneigung der peripheren Atemwege. Folge davon ist eine Zunahme des Verschlussvolumens (Closing Volume) und der Verschlusskapazität (Closing Capacity). Unter dem Closing Volume versteht man jenes Lungenvolumen oberhalb des Residualvolumens, bei dem es während der Expiration zum Verschluss der kleinen Atemwege (Bronchiolen) kommt. Die Closing Capacity definiert die Summe aus Closing Volume und Residualvolumen. Solange die Verschlusskapazität kleiner ist als die FRC, kommt es bei normaler Atemmittellage zu keinem Verschluss der kleinen Atemwege. Hat die FRC den kritischen Wert der Closing Capacity unterschritten, kommt es durch Abnahme des transpulmonalen Drucks zum intermittierenden oder permanenten Verschluss der kleinen Atemwege meist in den abhängigen, dorsobasalen Lungenabschnitten. Unter Allgemeinanästhesie kommt es zusätzlich zu einer erhöhten Sekretretention, was wiederum zur Verlegung und zum Verschluss der kleinen Atemwege führt. Distal der verschlossenen kleinen Atemwege, in den Alveolen, kommt es zum Einschluss von Atemgas (Air Trapping). Nach vollständiger Absorption dieses Atemgases kommt es zur Ausbildung von Resorptions- bzw. Obturationsatelektasen (Oczenski, 2017).

Die anästhesiebedingte Verlagerung des Diaphragmas nach kranial und die Herabsetzung des Diaphragmatonus fördert die Kompression dorsobasaler Lungenareale. In der Folge nimmt der transpulmonale Druckgradient ab und führt zur Ausbildung von sogenannten Kompressionsatelektasen (Hedenstierna & Edmark, 2010). Bereits 1985 zeigten computertomographische Aufnahmen an 24 lungengesunden Personen vor und nach Narkoseeinleitung bei den wachen und spontanatmenden Probandinnen und Probanden keine pulmonalen Veränderungen. Hingegen kam es nach Einleitung der Allgemeinanästhesie und unter maschineller Beatmung bereits kurze Zeit später zu einer Verschiebung des Diaphragmas nach kranial und zur Ausbildung halbmondförmiger Verdichtungen in den abhängigen Lungenabschnitten, die als Atelektasen interpretiert wurden. Brismar et al. nahmen als Ursache für die Atelektasenbildung eine Kompression der abhängigen Alveolarbezirke an, da eine

fehlende Abhängigkeit der applizierten FiO_2 -Konzentration bestand (Brismar, Hedenstierna, Lundquist, Strandberg, Svensson & Tokics, 1985). Das Auftreten solcher dorsobasaler Kompressionsatelektasen konnte in weiteren Studien auch Jahre später mittels computertomografischen Untersuchungen vor und nach Narkoseeinleitung belegt werden (Hedenstierna & Edmark, 2010).

Ein weiterer Entstehungsmechanismus für Atelektasen stellen hohe FiO_2 -Konzentrationen in der prä- und perioperativen Anästhesieführung dar. Die Denitrogenisierung der Alveolen durch Präoxygenieren begünstigt die Ausbildung von Resorptionsatelektasen (Bein & Reber, 1999). Die Entstehung von Resorptionsatelektasen beruht auf einer Erhöhung der alveoloarteriellen Sauerstoffpartialdruckdifferenz. Die Löslichkeit von Sauerstoff (O_2) im Blut ist höher als die von Stickstoff. Stickstoff trägt die Funktion des alveolären Füllgases, da er langsamer in den Alveolen absorbiert wird und so zur alveolären Oberflächenspannung beiträgt. Durch die Verabreichung von hohen FiO_2 -Konzentrationen wird der Sauerstoffpartialdruck (PaO_2) in den Alveolen erhöht und der Stickstoffgehalt eliminiert. Folglich diffundieren die Atemgase schneller ins Blut. Somit kommt es durch einen Anstieg der Sauerstoffaufnahme infolge eines erhöhten Partialdruckgradienten zwischen Alveole und Kapillare zur Resorptionsatelektasenbildung, da der O_2 -Gasfluss in das Blut den eingeatmeten Gasfluss übersteigt (Rutkowski, 2008).

2.3 Intrapulmonaler Rechts-Links-Shunt

Alveolarbezirke mit ausreichender Perfusion und ungenügender Ventilation führen zu Gasaustauschstörungen. Wird eine Alveole normal perfundiert, aber nicht ausreichend ventiliert, so wird das an den nicht belüfteten Alveolen vorbeiströmende Blut nicht oxygeniert, wie in Abbildung 3 dargestellt. Die fehlende Oxygenation in der Lunge führt dazu, dass desoxygeniertes Blut in den grossen Kreislauf und somit zum Herzminutenvolumen (HMV) beigemischt wird. Man spricht vom intrapulmonalen Rechts-Links-Shunt und definiert diesen als Verhältnis von geshuntetem HMV zum totalen HMV. Es resultiert ein V/Q-Missverhältnis mit einem tiefen V/Q-Quotienten. Das heisst, dass die Ventilation im Verhältnis zur Perfusion schlechter ist (Oczenski, 2017).

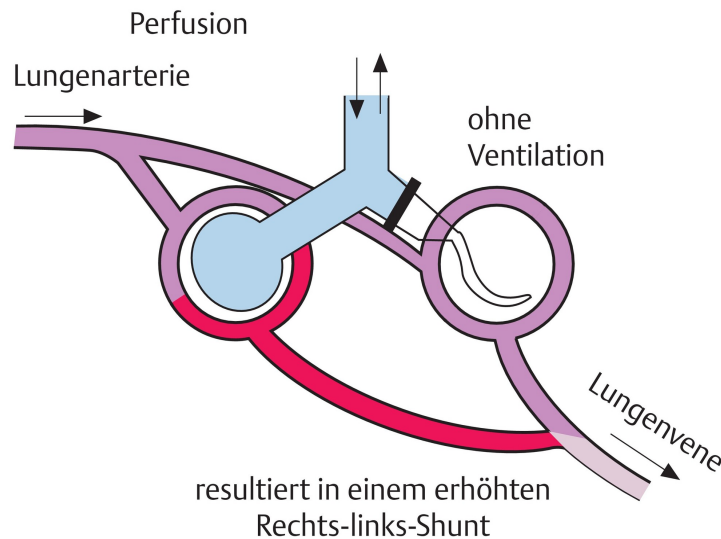


Abbildung 3. Intrapulmonaler Rechts-Links-Shunt.

Auch unter physiologischen Bedingungen existiert ein gewisser Rechts-Links-Shunt. Der physiologische Shunt beträgt bei einer gesunden, spontanatmenden Person ungefähr 1-2% des HMV und stellt keine Relevanz für die Beeinflussung des pulmonalen Gasaustauschs dar (Max & Dembinski, 2000).

Jede einzelne atelektatische Alveole verursacht durch relative Überperfusion einen Rechts-Links-Shunt. Während einer Allgemeinanästhesie kommt es durch die Zunahme atelektatischer Lungenareale zu einem Anstieg der pulmonalen Shuntfraktion. Mehrere Untersucher konnten nach Einleitung einer Allgemeinanästhesie einen Anstieg der venösen Beimischung auf zirka 10% ermitteln (Max & Dembinski, 2000). Eine Studie aus dem Jahr 1991 konnte einen direkten Zusammenhang zwischen der Grösse der durch Kompression entstandenen atelektatischen Lungenarealen und des Ausmasses der pulmonalen Shuntmenge herstellen (Gunnarsson, Tokics, Gustavsson & Hedenstierna, 1991). Der zunehmende intrapulmonale Rechts-Links-Shunt führt zum Abfall des arteriellen PaO_2 durch den erhöhten Anteil gemischtvenösen Blutes im grossen Kreislauf. Bei vergrössertem intrapulmonalen Rechts-Links-Shunt enthält das arterielle Blut nicht mehr genug Sauerstoff und kann eine arterielle Hypoxämie verursachen. Das Ausmass der Hypoxämie korreliert mit der Höhe der Shuntfraktion. Diese wiederum hängt massgeblich von der Effektivität der hypoxisch pulmonalen Vasokonstriktion ab. Die Shunt-Problematik stellt eine der häufigsten Ursachen für eine arterielle Hypoxämie dar. Im klinischen Anästhesiealltag ist diese vor allem durch eine sinkende Sauerstoffsättigung der Pulsoxymetrie zu erkennen. Daneben gibt der PaO_2 in der arteriellen Blutgasanalyse detailliertere Auskunft über das Ausmass der Hypoxämie (Oczenski, 2017).

2.4 Hypoxisch pulmonale Vasokonstriktion

Die hypoxisch pulmonale Vasokonstriktion, auch Euler-Liljestrand-Mechanismus genannt, ist ein reflektorischer Kompensationsmechanismus zur Optimierung der V/Q-Verhältnisse in den

minderventilierten Lungenabschnitten. Durch die reflektorische Vasokonstriktion der pulmonalarteriellen Gefäße zu den minderventilierten Bezirken werden Ventilation und Perfusion wieder aufeinander abgestimmt. Dadurch steigt der PaO_2 an und die venöse Beimischung nimmt ab, da weniger desoxygeniertes Blut in den grossen Kreislauf gelangt. Volatile Anästhetika in normal gebräuchlichen Konzentrationen hemmen den Effekt der hypoxisch pulmonalen Vasokonstriktion um 25-30% und führen zu einem Anstieg des pulmonalen Rechts-Links-Shunts (Max & Dembinski, 2000).

3 Therapeutische Massnahmen

Der anästhesiebedingte Lungenkollaps ist ein pathologischer Zustand und sollte deshalb therapiert werden. Die folgenden Abschnitte verschaffen einen Überblick über unterschiedliche präventive und therapeutische Massnahmen, die letztlich zur Wiedereröffnung kollabierter Lungenareale beitragen.

Lungenrekrutierungsmanöver sind Beatmungsstrategien, deren Hauptziel darin besteht, kollabierte und dadurch ausgeschaltete Bereiche der Lunge wieder zu reaktivieren. In den frühen 1990er-Jahren schaffte Lachmann mit dem sogenannten „Lachmann-Manöver“ die Grundlagen der Lungenrekrutierung und präsentierte erstmals eine geeignete Therapie zur Beseitigung oder Verminderung intraoperativer Atelektasen (Tusman & Böhm, 2010). Bei diesem „Open-Lung-Konzept“ nach Lachmann handelt es sich um ein Rekrutierungsmanöver bei dem der Atemwegsspitzenruck erhöht wird, um atelektatische Alveolen wieder zu eröffnen und einer nachfolgenden PEEP-Applikation, um wieder eröffnete Alveolen offen zu halten. Lachmann propagierte seinen Ansatz mit den Worten „open up the lung and keep the lung open“. Er stützte sich dabei auf das Gesetz von Laplace ($p = 2T / r$), welches das Verhältnis zwischen Innendruck, Durchmesser und Oberflächenspannung der Alveolen beschreibt. Das Laplace-Gesetz besagt, dass der Druck (P) in einer Alveole direkt proportional zur Oberflächenspannung (T) und indirekt proportional zum Radius (r) der Alveole ist (Oczenski, 2017). Dies lässt sich am einfachsten am Beispiel eines Luftballons veranschaulichen. Wenn der Luftballon leer ist, bedarf es einer hohen Druckaufwendung, um den Ballon aufzublasen. Sobald der Luftballon etwas gefüllt ist, benötigt es einen deutlich geringeren Druck um ihn weiter aufzublasen. Auf die Beatmung bezogen bedeutet dies, dass entsprechend dem Laplace-Gesetz bei atelektatischen Alveolen ein wesentlich höherer Alveolareröffnungsdruck erforderlich ist, um sie wieder zu eröffnen. Der Eröffnungsdruck einer Alveole ist höher als der Verschlussdruck (Rutkowski, 2008). Das „Open-Lung-Konzept“ nach Lachmann beinhaltet vier aufeinanderfolgende Schritte: Zuerst werden die Öffnungsdrücke der Lunge identifiziert und anschliessend der Punkt des beginnenden Alveolarverschlusses ermittelt. Nachdem die Öffnungs- und Verschlussdrücke identifiziert wurden, wird die Lunge durch eine kurzfristige Druckerhöhung auf das Öffnungsniveau wieder vollständig entfaltet. Danach gilt es die rekrutierten Alveolen durch Anwendung eines ausreichend hohen PEEP offen zu halten (Böhm & Bangert, 2000).

3.1 Prävention

Einem Lungenkollaps kann teilweise durch zwei Hauptstrategien vorgebeugt werden: Eine davon ist die Anwendung von kontinuierlichem positivem Atemwegsdruck während der Anästhesieeinleitung, also der Einsatz von CPAP während dem Präoxygenieren. Der Hauptme-

chanismus der CPAP-Therapie besteht darin, einen Abfall der FRC zu verhindern, indem der Atemwegsdruck höher gehalten wird als der Verschlussdruck der Lunge. Es konnte nachgewiesen werden, dass das Auftreten von Atelektasen geringer ausfällt, wenn CPAP während der Narkoseeinleitung angewendet wurde. Die zweite Strategie zur Vermeidung von Atelektasen ist die Verringerung des FiO_2 während der Präoxygenation. Es ist bekannt, dass niedrigere FiO_2 -Konzentrationen die Ausbildung von Resorptionsatelektasen verringern. Allerdings um den Preis, dass die zeitlichen Reserven für die Sicherstellung des künstlichen Atemwegs während der Apnoephase reduziert werden. Diese beiden präventiven Strategien können eine synergistische, wenn auch partielle Wirkung auf die Entstehung eines Lungenkollapses haben (Tusman & Belda, 2010).

3.2 Rekrutierungsmanöver

Basierend auf den Grundlagen und Erkenntnissen von Lachmann haben sich im Laufe der letzten Jahre hauptsächlich zwei unterschiedliche Formen der alveolären Rekrutierung etabliert: Das CPAP-Manöver und die ARS (Tusman & Belda, 2010).

3.2.1 CPAP - Manöver

Beim CPAP-Manöver handelt es sich um eine einstufige Rekrutierung, auch Blähmanöver genannt, bei dem der Atemwegsdruck für eine definierte Zeit erhöht und gehalten wird. Der Beatmungsdruck sollte dabei dem Eröffnungsdruck der kollabierten Lungenareale gleichkommen. Die einstufige Rekrutierung wird üblicherweise manuell vorgenommen und erfolgt im manuell-spontanen Beatmungsmodus. Das APL-Ventil wird auf den gewünschten Eröffnungsdruck eingestellt und der Handbeatmungsbeutel für die gewünschte Dauer gedrückt. Die Literatur besagt, dass sich dieser Eröffnungsdruck bei normalgewichtigen Personen bei 40-60mbar befindet. Das Rekrutierungsmanöver muss den Alveolen ausreichend Zeit bieten, sich zu öffnen. Diese Dauer variiert je nach Literatur zwischen 5-30 Sekunden. Damit der erneuten Bildung von Atelektasen vorgebeugt werden kann, erfolgt im Anschluss an das Blähmanöver eine adäquate PEEP-Einstellung bzw. Erhöhung (Oczenski, 2017).

Ein Review bestehend aus sechs randomisierten kontrollierten Studien verglich das Outcome unter Anwendung eines Rekrutierungsmanövers bzw. ohne die Durchführung eines Rekrutierungsmanövers mittels Interventions- und Kontrollgruppen an lungengesunden Erwachsenen. Bei zwei dieser sechs Studien war das gewählte Rekrutierungsverfahren ein CPAP-Manöver. Sowohl Almarakbi et al. als auch Pang et al. nutzten für die manuelle Lungenrekrutierung einen Inspirationsdruck von $40\text{cmH}_2\text{O}$. Almarakbi et al. führten einzelne und wiederholte (10-minütlich) anhaltende manuelle Inflationen für 15 Sekunden mit einer anschließenden PEEP-Applikation von $10\text{cmH}_2\text{O}$ durch. Bei den wiederholt durchgeführten Rekrutierungsmanövern zeigte sich die grösste Verbesserung des intraoperativen PaO_2 , der pulmonalen Compliance und des postoperativen PaO_2 . Die Interventionsgruppe mit wiederholten

Rekrutierungsmanövern und anschliessendem PEEP hatte im Vergleich zur Kontrollgruppe den kürzesten Spitalaufenthalt, gefolgt von der Gruppe mit einem einmaligen Rekrutierungsmanöver. Pang et al. führten unmittelbar nach Intubation 10 anhaltende Inflationen über eine Minute durch, gefolgt von einer PEEP-Applikation mit 5cmH₂O. Bei der Interventionsgruppe resultierte eine Verbesserung des intraoperativen PaO₂. Es bestanden keine Unterschiede in Bezug auf die Compliance oder Spitalaufenthaltsdauer zwischen der Interventions- und Kontrollgruppe (Almarakbi, Fawzi & Alhashemi, 2009; Pang, Yap & Chen, 2003 zitiert in Hartland, Newell & Damico, 2015).

Das klassische CPAP-Manöver über den manuellen Beatmungsbeutel ist eine sehr weit verbreitete Form der Lungenrekrutierung. Obwohl es sehr effektiv ist und schnell angewendet werden kann, sind die konstant hohen Spitzendruckwerte nicht unkritisch zu sehen und können ein Risiko für fatale hämodynamische und pulmonale Nebenwirkungen bergen (Drägerwerk AG & Co. KGaA, n.d.).

3.2.2 Alveoläre Rekrutierungsstrategie (Cycling-Manöver)

Die ARS ist eine Art zyklisches Manöver, das auf dem ursprünglichen Konzept von Lachmann zur Behebung von Atelektasen in der intraoperativen Phase basiert. Hierbei werden sowohl der Inspirationsdruck als auch der PEEP unter Beibehaltung eines konstanten Driving Pressures (Differenz zwischen Plateaudruck und PEEP) stufenweise angehoben, gehalten und anschliessend wieder schrittweise abgesenkt. Der Unterschied zum Lachmann-Manöver besteht darin, dass auf die individualisierte Titration der Atemwegsdrücke verzichtet wird und stattdessen feste Druckwerte angewendet werden. Aus mehreren Studien geht hervor, dass der anästhesiebedingte Lungenkollaps an lungengesunden Freiwilligen erst mit Atemwegsspitzen drücken von 40cmH₂O vollständig behoben werden konnte (Böhm & Bangert, 2000). Die ARS besteht aus drei klar definierten Phasen im druckkontrollierten Beatmungsmodus: Hämodynamische Präkonditionierung, Rekrutierung und PEEP-Titration. Ein Hauptproblem der positiven Überdruckbeatmung ist die potenzielle hämodynamische Instabilität insbesondere bei hypovolämen Patientinnen und Patienten. Ein hoher Atemwegsdruck verringert bei hypovolämen Personen den Preload des rechten und linken Ventrikels und führt zur Abnahme des HMV und des arteriellen Blutdrucks. Aus diesem Grund wird zu Beginn der ARS die hämodynamische Präkonditionierung durchgeführt. Unter Anwendung von 10 und/oder 15cmH₂O PEEP wird die hämodynamische Reaktion überwacht. Das Manöver wird unterbrochen, wenn eine manifeste Hypovolämie besteht und der mittlere arterielle Druck (MAP) um mehr als 15-20% gegenüber dem Ausgangswert sinkt, bzw. der MAP unter 55mmHg abfällt. Der PEEP sollte dann sofort auf ein sicheres Niveau reduziert und die Hypovolämie entsprechend therapiert werden bevor das Manöver wieder aufgenommen wird. Nachdem die Hämodynamik getestet und gegebenenfalls stabilisiert wurde, besteht die Rek-

rutierungsphase aus einer inkrementellen Erhöhung sowohl des Driving Pressures auf 20cmH₂O als auch des PEEP auf 20cmH₂O, um den Öffnungsdruck von 40cmH₂O zu erreichen. Nach 10 Atemzügen erreicht man bei lungengesunden Personen eine vollständige Eröffnung der kollabierten Alveolen. Ein dekrementeller PEEP-Versuch im Anschluss an die Rekrutierungsphase ermittelt den PEEP-Wert der erforderlich ist, um einen erneuten Kollaps der Lunge zu verhindern. Während der PEEP-Titrationsphase wird der PEEP schrittweise um 2cmH₂O reduziert, um den alveolären Verschlussdruck zu bestimmen. Parameter, die Aussagen zu diesem alveolären Verschlussdruck machen, können unter anderem sein:

↓ FRC, ↓ Compliance, ↓ Sauerstoffsättigung, ↓ PaO₂, Computertomographie, Magnetresonanztomographie und Lungensonographie. Sobald dieser Druck bestimmt wurde, wird ein weiteres Rekrutierungsmanöver durchgeführt, um potenziell entstandene Atelektasen während der PEEP-Titration wieder zu eröffnen. Anschliessend wird die Basisbeatmung wieder aufgenommen mit einem PEEP, der 2cmH₂O über dem Verschlussdruck liegt. Sofern keine „Echtzeitüberwachung“ der oben aufgeführten Parameter für den alveolären Verschlussdruck vorliegen, kann man sich bei der PEEP-Einstellung an Zielwerten orientieren, die aus physiologischen Studien an anästhesierten Personen abgeleitet wurden. Der alveoläre Verschlussdruck liegt je nach klinischen Umständen zwischen 5 und 15cmH₂O (Tusman & Belda, 2010; Tusman & Böhm, 2010).

Im Review von Hartland et al. (2015) wurden drei Studien miteinander verglichen, bei welchen das Cycling-Manöver Anwendung fand. Die Interventionsgruppen, bei denen ein Cycling-Manöver durchgeführt wurde, zeigten einen signifikanten Anstieg des intraoperativen PaO₂ im Vergleich zur Kontrollgruppe. Bei allen drei Studien kam es bei der Interventionsgruppe zu einer Verbesserung der intraoperativen Compliance.

3.3 (Kontra-)indikationen

Bei mehr als 90% aller Personen, die sich einer Allgemeinanästhesie unterziehen, kommt es zur Ausbildung von Atelektasen. Das Ausmass solcher anästhesiebedingten Atelektasen fällt bei jungen, gesunden und schlanken Personen, die sich kleineren ambulanten Operationen, die weder den Thorax noch das Abdomen betreffen, geringer aus. Der anästhesiebedingte Lungenkollaps stellt jedoch in jedem Fall, auch bei lungengesunden Personen, einen pathologischen Zustand dar. Daher wird postuliert, dass dieser unter Berücksichtigung der Kontraindikationen therapiert werden sollte (Tusman & Böhm, 2010).

In der systematischen Metaanalyse von Hartland et al. (2015) geht hervor, dass bereits ein einmaliges Rekrutierungsmanöver unmittelbar nach Intubation bei Lungengesunden zu einer verbesserten intraoperativen Oxygenation und Compliance beiträgt. Wiederholte Rekrutierungsmanöver in einem Intervall von 30-60 Minuten weisen nochmals auf eine deutliche Verbesserung des pulmonalen Gasaustauschs hin. Im Vergleich mit der Kontrollgruppe wa-

ren alle Arten von Rekrutierungsmanöver (CPAP- oder Cycling-Manöver) in der intraoperativen Phase vorteilhaft. Im Allgemeinen ist ein intraoperatives Rekrutierungsmanöver bei lungengesunden Personen in folgenden klinischen Situationen indiziert: Unmittelbar nach Intubation, nach Diskonnektion und endotrachealer Absaugung, wenn eine intraoperative Beatmung mit hohem FiO_2 erforderlich ist sowie bei Anzeichen einer reduzierten pulmonalen Gasaustauschleistung (Oczenski, 2017). Rekrutierungsmanöver sind kontraindiziert bei: Hämodynamischer Instabilität (bis eine Stabilisierung erreicht ist), Patientinnen und Patienten ohne ausreichende Narkosetiefe, Bronchospasmus, Pneumothorax, Lungenemphysem (Gefahr der Emphysemruptur mit konsekutivem Pneumothorax), erhöhtem intrakraniell Druck (Steigerung des Hirndrucks), Rechtsherzinsuffizienz (Gefahr Rechtsherzversagen) und wenn die Veränderung des Gasaustauschs durch andere Mechanismen als einen Lungenkollaps verursacht wird (Tusman & Böhm, 2010; Oczenski, 2017).

3.4 PEEP

Unter PEEP versteht man den unter maschineller Beatmung am Ende der Expiration in den Atemwegen vorherrschenden positiven Druck. Durch entsprechende Einstellungen am Respirator wird das endexpiratorische Druckniveau auf einen Wert > 0 angehoben. Der dadurch aufrechterhaltene positive transpulmonale Druck führt dazu, die V/Q-Verhältnisse zu verbessern, den endexpiratorischen Alveolarkollaps zu vermeiden, kollapsgefährdete Lungenkompartimente offen zu halten, die FRC zu vergrößern und den intrapulmonalen Rechts-Links-Shunt zu minimieren. Atelektasen während einer Allgemeinanästhesie können durch PEEP verhindert, die Oxygenierung und der Gasaustausch verbessert werden. Dies geschieht entweder durch die bloße Anwendung von PEEP oder wenn PEEP auf ein Rekrutierungsmanöver folgt. Aus atemphysiologischen Überlegungen sollte bei jeder beatmeten Person, auch bei gesunder Lunge, zur Aufrechterhaltung der FRC ein PEEP via Respirator appliziert werden. Der optimale PEEP (Best-PEEP) muss individuell und patientenadaptiert ermittelt werden. Die PEEP-Optimierung kann nach Kriterien wie Sauerstofftransportkapazität, Gasaustausch, Atemmechanik, FRC, transpulmonaler Druck und Stress-Index erfolgen. Die PEEP-Optimierung kann in zwei Verfahren unterschieden werden: Aufsteigende PEEP-Reihe oder absteigende PEEP-Reihe. Bei der aufsteigenden PEEP-Reihe wird ausgehend von einem niedrigen PEEP-Niveau in 2 bis 3-mbar-Stufen das PEEP-Niveau erhöht. Die absteigende PEEP-Reihe erniedrigt den PEEP in 2-mbar-Stufen ausgehend von einem hohen PEEP-Niveau (>20 mbar). Beide Verfahren zielen darauf ab, den unteren Inflektionspunkt bzw. den kritischen Alveolarverschlussdruck der Druck-Volumen-Schleife zu ermitteln und daraus den besten Gasaustausch und die beste Compliance des respiratorischen Systems abzuleiten (Oczenski, 2017).

Im Folgenden wird lediglich der Best-PEEP nach atemmechanischen Kriterien näher thematisiert. Nach aufsteigender PEEP-Reihe wird der PEEP in 2- bis 3-mbar-Schritten in regelmässigen Zeitintervallen erhöht und bei jeder PEEP-Stufe die Compliance des respiratorischen Systems berechnet. Wie in Abbildung 4 auf der Druck-Volumen-Kurve abgebildet, liegt der optimalste PEEP bei etwa 2 bis 4 mbar über dem unteren Inflektionspunkt im steilen Abschnitt. Dieser PEEP-Wert geht mit der höchsten Compliance des respiratorischen Systems einher (Oczenski, 2017).

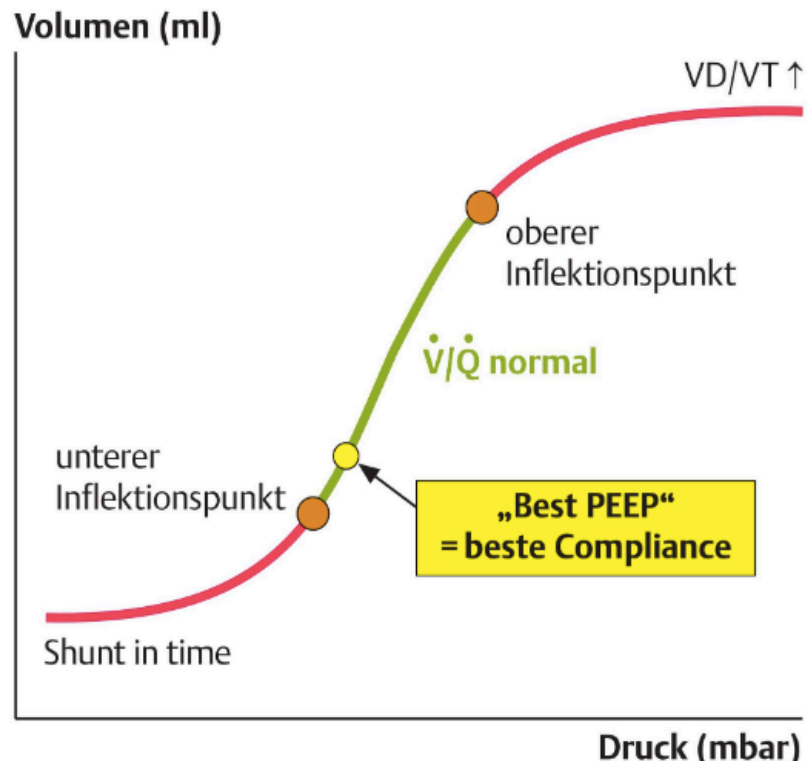


Abbildung 4. Compliance und „Best-PEEP“.

Aus einem aktuellen Review geht hervor, dass moderate PEEP-Werte (5 bis 8cmH₂O) im Vergleich zu niedrigerem bis gar keinem oder zu hohem PEEP für bessere postoperative pulmonale Resultate sorgen. Eine PEEP-Anwendung über diesen moderaten Werten führt zu einer Reduktion der intraoperativen Atelektasen, bringt jedoch keine zusätzliche Verbesserung auf die postoperativen pulmonalen Ergebnisse. Grosse randomisierte kontrollierte Studien (n = 900, n = 2013, n = 1012), in denen hohe PEEP-Werte verwendet wurden (12cmH₂O), zeigen eine verbesserte intraoperative Oxygenierung und Compliance, während die postoperativen pulmonalen Ergebnisse auf keine Verbesserung hindeuten. Aus den drei Studien resultiert, dass hohe PEEP-Werte die Patientinnen und Patienten einem übermässigen Alveolardruck aussetzen und eine erhöhte Inzidenz für Hypotonien, Bradykardien und der Notwendigkeit von vasoaktiven Substanzen besteht. In den jüngsten Empfehlungen wird vorgeschlagen, einen PEEP von 0cmH₂O zu vermeiden und den intraoperativen PEEP auf

festen niedrigen Werten (2 bis 5 cmH₂O) zu begrenzen. Strategien mit hoher PEEP-Applikation sollten auf klinische Szenarien beschränkt werden, die signifikant auf Atelektasen hindeuten (beispielsweise bei einer beeinträchtigten Oxygenierung oder Compliance) oder mit einem hohen Risiko für Atelektasen einhergehen (Body-Mass-Index > 50, Adipositas + Pneumoperitoneum oder Trendelenburg-Lagerung). Neueste physiologische Studien zeigen, dass individuelle PEEP-Einstellungen im Vergleich zu festen PEEP-Strategien zu besseren transpulmonalen Drücken führen, eine verbesserte intraoperative Lungenexpansion aufweisen und letztlich einen positiven Effekt auf die postoperative Lungenbelüftung haben. Die Anforderungen an eine individuelle PEEP-Einstellung weisen eine beträchtliche Variabilität auf und sind von Patientinnen- und Patientenmerkmalen und/oder chirurgischen Faktoren abhängig (Lagier, Zeng, Fernandez-Bustamante & Vidal Melo, 2022).

4 Diskussion

Aus der Literatur wird ersichtlich, dass Störungen des pulmonalen Gasaustauschs unter Allgemeinanästhesie auch bei Patientinnen und Patienten ohne vorbestehende Lungenschädigung beobachtet werden. Brismar et al. (1985) zeigten bei narkotisierten Personen in Rückenlage mittels computertomographischen Untersuchungen atelektatische Lungenanteile in den zwerchfellnahen Arealen. Bei diesen lungengesunden Probandinnen und Probanden wurde prompt nach Narkoseeinleitung der Anteil des kollabierten Lungenparenchyms an der gesamten Lunge mit 8-10% bestimmt. Reber, Engberg, Wegenius & Hedenstierna (1996) wiesen nach, dass sich minderbelüftete Lungenanteile während der Allgemeinanästhesie innerhalb von 60 Minuten in Atelektasen umwandeln. Neuere Untersuchungen von Hedenstierna & Edmark (2010) belegten die Ausbildung von Atelektasen innerhalb von wenigen Sekunden nach Narkoseeinleitung. Hedenstierna et al. (1985) und Gunnarsson et al. (1991) stellten ausserdem fest, dass die Höhe der intrapulmonalen Shuntfraktion gut mit der Menge des atelektatischen Lungengewebes korreliert. Während Max & Dembinski (2000) beim anästhesierten Menschen einen Anstieg des Shuntanteils um etwa 10% beobachteten, zeigten aktuellere Daten von Tusman & Böhm (2010) eine Zunahme des Rechts-Links-Shunts bis zu 20%. Die Folge davon können klinisch relevante V/Q-Störungen mit bedeutsamen arteriellen Hypoxämien sein. Wie in Kapitel 2.4 beschrieben, greift unter physiologischen Bedingungen die hypoxisch pulmonale Vasokonstriktion, um die V/Q-Verhältnisse zu optimieren. Inhalative Anästhetika hemmen diesen Effekt um 25-30% und führen zu einer Zunahme des Rechts-Links-Shunts. Bei lungengesunden Patientinnen und Patienten kommt es trotz der reduzierten Vasokonstriktion aber zu keinem Abfall des PaO₂ ohne nennenswerte klinische Relevanz auf die unter Narkose zu beobachtende arterielle Hypoxämie (Max & Dembinski, 2000).

Die Anwendung von CPAP während dem Präoxygenieren vor Narkoseeinleitung kann präventiv zur Vermeidung von Kompressionsatelektasen beitragen. Es wird argumentiert, dass CPAP einen Abfall der FRC verhindert, der typischerweise während der Narkoseeinleitung auftritt, indem ein ausreichender positiver Druck in den Atemwegen und Alveolen am Ende der Expiration aufrechterhalten wird. Tusman & Böhm (2010) zeigten in ihrem Review auf, dass 6cmH₂O CPAP während der Narkoseeinleitung von normalgewichtigen Personen die Bildung von Atelektasen im Vergleich zur Kontrollgruppe, die ohne CPAP präoxygeniert wurde, erheblich reduzierte. Eine weitere präventive Strategie ist die Verwendung eines niedrigeren FiO₂ bei der Anästhesieeinleitung. Es wird argumentiert, dass auf diese Weise die Entstehung von Resorptionsatelektasen deutlich reduziert werden kann. In der Metaanalyse von Tusman & Böhm (2010) wurde bestätigt, dass ein FiO₂ von 100% während der Narkoseeinleitung zu vergrösserten Atelektasenflächen (8cm²) im Computertomographie-Scan führten, im Vergleich zu einem FiO₂ von 30% mit nur minimaler Atelektasenbildung (0,2cm²)

und überhaupt keinen Atelektasen, wenn keine Präoxygenierung durchgeführt wurde. Aus dem Review geht weiter hervor, dass eine Präoxygenierung mit 80% FiO₂ mit 0,8% Atelektasen verbunden war, verglichen mit 6,5% bei einem FiO₂ von 100%. Keine dieser beiden präventiven Methoden zur Vorbeugung eines Lungenkollapses sind vollkommen wirksam. Trotz der potenziell vorteilhaften Wirkungen verringern beide Methoden die Patientensicherheit während der Narkoseeinleitung. Einerseits hält die CPAP-Anwendung die FRC aufrecht und verlängert damit den Zeitraum der sicheren Apnoe. Andererseits erhöht es auch den Mageninnendruck und stellt eine Gefahr für Regurgitation und Erbrechen dar. Ausserdem besteht eine weitere Limitation, da Atelektasen schnell auftreten können, wenn die CPAP-Therapie während der Laryngoskopie abgesetzt wird. Eine Senkung des FiO₂ verringert zeitliche Sicherheitsreserven, die für die Intubation zur Verfügung stehen. Schwierigkeiten bei der Intubation und/oder Beatmung können während der Narkoseeinleitung zu potenziell lebensbedrohlichen Komplikationen führen und sind manchmal schwer vorherzusagen. Daher empfehlen Tusman & Böhm (2010) weder die Senkung des FiO₂ noch die Anwendung von CPAP als Standardverfahren während der Narkoseeinleitung, da die damit verbundenen Risiken den teilweisen Nutzen dieser Präventivmassnahmen bei weitem übersteigen.

In den letzten Jahren sind verschiedene therapeutische Strategien zur Verhinderung bzw. Auflösung von Atelektasen oder zur Kompensation deren negativer Effekte propagiert worden. In Bezug auf den Rekrutierungseffekt bestehen keine Unterschiede zwischen CPAP- und Cycling-Manövern. Hartland et al. (2015) verglich die Ergebnisse sechs randomisierter Studien und kamen zum Schluss, dass alle Interventionsgruppen, bei welchen ein CPAP- oder Cycling-Manöver durchgeführt wurde, von einem höheren intraoperativen PaO₂ mit verbesserter Lungencompliance profitierten. Jedoch weist die ARS einige Vorteile gegenüber CPAP-Manövern auf: Die hämodynamische Präkonditionierungsphase testet vor der eigentlichen Lungenrekrutierung die hämodynamische Stabilität. Die anfänglich schrittweise Erhöhung des PEEP gibt der Hämodynamik des Patienten Zeit, sich den höheren intrathorakalen Druckverhältnissen anzupassen und hilft dem Anästhesiepersonal, einen unerkannten hypovolämen Zustand zu diagnostizieren und zu behandeln. Weiter ist die Belastung auf das Lungengewebe geringer als bei CPAP-Manövern, da sich die schrittweise Erhöhung des intrathorakalen Drucks im Laufe des Manövers auf immer mehr rekrutiertes Lungengewebe ausbreitet. Die PEEP-Titrationsphase hilft dabei, den alveolären Verschlussdruck zu ermitteln. Nur ein PEEP-Niveau, das über diesem alveolären Verschlussdruck liegt ist in der Lage, die Alveolen mechanisch offen zu halten. Anders verhält es sich bei CPAP-Manövern: Der grosse und abrupte Anstieg des intrathorakalen Drucks erzeugt eine hohe Rate an hämodynamischer Instabilität (Tusman & Böhm, 2010). Bei Almarakbi et al. (2009) und Pang et al. (2003) schien das Auftreten von Komplikationen im Zusammenhang mit dem CPAP-Manöver

minimal bis gar nicht vorhanden zu sein. Neuste Untersuchungen aus der Metaanalyse von Lagier et al. (2022) wiesen sowohl beim CPAP- als auch beim Cycling-Manöver vermehrt Hypotensionen und den Einsatz vasoaktiver Substanzen, bedingt durch das Rekrutierungsmanöver, auf. Sie empfehlen deshalb, Rekrutierungsmanöver mit dem Beatmungsgerät statt manuell, mit dem niedrigsten Druck, während der kürzesten wirksamen Zeit und mit einer kontinuierlichen hämodynamischen Überwachung durchzuführen.

In der Literatur herrscht noch kein allgemeiner Konsens darüber, wie hoch der PEEP im Einzelfall (Best-PEEP) einzustellen ist. Brismar et al. (1985) konnten sowohl eine Reduktion von computertomographisch sichtbaren Atelektasenbezirken als auch eine Zunahme der FRC und Compliance unter einem PEEP von 10mbar belegen. Wobei die PEEP-Beatmung keinerlei Wirkung auf den intrapulmonalen Shunt und damit keinen positiven Effekt auf den PaO₂ zeigte. Nach Bein & Reber (1999) ist daher die Applikation eines PEEP > 5mbar, insbesondere bei normalgewichtigen lungengesunden Personen nicht sinnvoll anzusehen, da sich bei längerdauernder weiterer Erhöhung des PEEP lediglich unerwünschte Nebenwirkungen wie Kreislaufinstabilität und Reduktion der Nierenfunktion ergeben können. Aus neusten Erkenntnissen von Lagier et al. (2022) geht hervor, dass moderate PEEP-Werte von 5 bis 8cmH₂O intraoperativ eine Zunahme der FRC und Compliance bewirkten und postoperativ bessere pulmonale Ergebnisse erzielten. PEEP-Einstellungen über diesen moderaten Werten führten zwar zu einer Reduktion der intraoperativen Atelektasen, zeigten jedoch keinen Benefit auf die postoperative pulmonale Situation. Ausserdem resultierten bei hohen PEEP-Werten vermehrt Hypotonien, welche mit vasoaktiven Substanzen therapiert werden mussten.

In der systematischen Metaanalyse von Lagier et al. (2022) kommt ebenfalls zum Ausdruck, dass individuelle PEEP-Strategien im Vergleich zu festen PEEP-Strategien intra- und postoperativ ein besseres pulmonales Outcome aufwiesen. Die individuelle, optimale PEEP-Einstellung ist von einer Vielzahl an chirurgischen Faktoren und Personenmerkmalen abhängig und weist deshalb eine beträchtliche Varianz auf. Lagier et al. (2022) sind der Ansicht, dass es weitere Untersuchungen benötigt, um die Vorteile individualisierter PEEP-Ansätze eindeutig zu belegen.

5 Schlussfolgerungen

In dieser Diplomarbeit wurden die Auswirkungen einer Allgemeinanästhesie auf das respiratorische System erarbeitet. Es stellte sich die Frage, wie das veränderte pulmonale Gleichgewicht in Allgemeinanästhesie durch Rekrutierungsmanöver optimiert werden kann. Aus den gewonnenen Erkenntnissen der bearbeiteten Studien kann abschliessend gesagt werden, dass die Induktion einer Allgemeinanästhesie bei lungengesunden Personen in Rückenlage den Tonus der inspiratorischen Muskulatur verändert, das Diaphragma nach kranial verlagert und die FRC reduziert. Folglich kommt es zu einer Abnahme der Lungencompliance sowie einer Minderventilation der abhängigen Lungenareale, sodass es in diesen Bezirken zur Ausbildung von Atelektasen und Störungen des Gasaustauschs durch Zunahme des intrapulmonalen Rechts-Links-Shunts kommt (Reber et al., 1996; Max & Dembinski, 2000; Hedenstierna et al., 2010, Tusman & Böhm, 2010; Lagier et al., 2022).

Anästhesiebedingte Atelektasen bilden in jedem Fall einen pathologischen Zustand ab und können mittels Rekrutierungsmanövern therapiert und optimiert werden. Der Einsatz präventiver Massnahmen wie das Präoxygenieren unter CPAP-Anwendung oder die Senkung des FiO_2 zeigen sich im klinischen Setting wenig praktikabel, da sich das Risiko-Nutzen-Verhältnis in einem Ungleichgewicht befindet. Die damit verbundenen Risiken wie Regurgitation, Emesis und verminderte zeitliche Sicherheitsreserven für die Intubation sind höher zu gewichten als der effektive Nutzen daraus. Aus diesen Gründen wird die Anwendung dieser beiden Verfahren im praktischen Anästhesiealltag während einer Narkoseeinleitung nicht empfohlen (Tusman & Böhm, 2010).

Der Effekt eines Rekrutierungsmanövers hängt unabhängig von der gewählten Technik (CPAP-Manöver oder ARS) vom Rekrutierungspotenzial der Lunge, respektive vom Ausmass der Atelektasen, ab. Eine effektive alveoläre Rekrutierung führt intraoperativ zu einer Verbesserung der Oxygenierung, Verbesserung der alveolären Ventilation, Abnahme des intrapulmonalen Rechts-Links-Shunts, Verbesserung der Compliance, Zunahme der FRC und Abnahme der atelektatischen Verschattungen im Computertomographie-Scan (Oczenski, 2017). Hartland et al. (2015) zeigten auf, dass bereits ein einmaliges Rekrutierungsmanöver unmittelbar nach Intubation zu einer verbesserten intraoperativen Oxygenation und Compliance beitrug. Wiederholte Rekrutierungsmanöver in zeitlichen Abständen von 30-60 Minuten verbesserten den pulmonalen Gasaustausch nochmals beträchtlich. Für den klinischen Anästhesiealltag wird empfohlen, standardmässig nach Intubation, nach Diskonnektion und endotrachealer Absaugung, wenn eine intraoperative Beatmung mit hohem FiO_2 indiziert ist sowie bei Anzeichen einer verminderten Gasaustauschleistung ein Rekrutierungsmanöver durchzuführen (Oczenski, 2017).

Auf lungengesunde Personen treffen für die Durchführung eines Rekrutierungsmanövers kaum Kontraindikationen zu, sofern der Volumenstatus stabil ist. Aus diesem Grund wird zu Beginn der ARS die hämodynamische Präkonditionierung durchgeführt und so eine mögliche Hypovolämie detektiert. Um eine manifeste Hypovolämie genau zu erfassen, braucht es hauptsächlich ein invasives Monitoring, das eine „Echtzeitüberwachung“ liefert, damit hämodynamische Instabilitäten möglichst gering gehalten werden können. Die klinische Erfahrung zeigt hingegen, dass lungengesunde Personen im intraoperativen Setting oftmals nicht mit einer kontinuierlichen invasiven Blutdruckmessung ausgestattet sind und deshalb die korrekte Umsetzung der ARS an ihre Grenzen stösst. Zur Einschätzung des Volumenstatus und zum Detektieren einer Hypovolämie können jedoch auch andere, nichtinvasive Parameter beigezogen werden. So können einem klinische Anzeichen wie die Füllung der Halsvenen, Hautturgor, enorale Inspektion, nichtinvasiver Blutdruck, Herzfrequenz, Rekapillarierungszeit oder der „passive-leg-raising“-Test wichtige Hinweise zum Volumenstatus liefern. Daraus ergibt sich eine Art modifizierte Durchführung der hämodynamischen Präkonditionierung, wodurch die ARS auch bei Lungengesunden ohne invasives Kreislaufmonitoring anwendbar ist.

Aus den jüngsten Erkenntnissen von Lagier et al. (2022) geht hervor, sich in Anbetracht von Aufwand und Ertrag bei lungengesunden Personen in Rückenlage auf niedrige PEEP-Werte zu beschränken und eine feste PEEP-Strategie zu verfolgen. Für den klinischen Alltag wird vorgeschlagen, einen PEEP von 0cmH₂O zu vermeiden und den intraoperativen PEEP auf feste niedrige Werte (2-8cmH₂O) zu begrenzen. Denn mehrere Untersuchungen zeigten, dass moderate PEEP-Einstellungen intraoperativ zu einer Zunahme der FRC und Compliance führten, den Gasaustausch positiv beeinflussten, die geringsten unerwünschten Nebenwirkungen zeigten und postoperativ bessere pulmonale Ergebnisse erzielten.

Die Datenlage individueller PEEP-Strategien ist noch ein sehr junges Forschungsgebiet und benötigt weitere Untersuchungen für eine eindeutige Studienlage. Lagier et al. (2022) bildeten in ihrem Review erste Ergebnisse individueller PEEP-Strategien ab, welche im Vergleich zu festen PEEP-Einstellungen zu besseren transpulmonalen Drücken führten und ein besseres Outcome auf die postoperative Lungenbelüftung aufwiesen. Die Anforderungen an individuelle PEEP-Einstellungen umfassen eine beträchtliche Variabilität und sind von zahlreichen Personenmerkmalen und chirurgischen Faktoren abhängig. Gerade deshalb scheinen individuelle PEEP-Ansätze hauptsächlich bei Personen mit vorbestehender reduzierter Gasaustauschleistung, unter speziellen chirurgischen Gegebenheiten und Lagerungen einen besonders grossen Vorteil zu haben, da man den PEEP individuell den Bedingungen für die optimalste Oxygenation anpassen kann.

Diese Diplomarbeit liefert wichtige Grundlagen und Erkenntnisse bezüglich anästhesiebedingten Atelektasen und Lungenrekrutierung. In einem weiterführenden Vorgehen empfiehlt es sich, vertieft den Einfluss des FiO_2 zu untersuchen, lungenpathophysiologische Mechanismen und chirurgische Faktoren einzubeziehen und die Auswirkungen der Lungenrekrutierung auf die postoperative Situation detaillierter zu beleuchten.

6 Reflexion

Durch die Auseinandersetzung mit der Fachliteratur und der Suche nach evidenzbasierten Antworten auf meine Fragestellung, wie die Auswirkungen einer Allgemeinanästhesie auf das respiratorische System durch Rekrutierungsmanöver optimiert werden können, wurde mir erst recht bewusst, wie komplex und facettenreich das Thema ist.

Die Studienlage zeigt, dass sich das pulmonale Gleichgewicht unmittelbar nach Narkoseeinleitung verändert und sich ein Zustand mit weniger zur Verfügung stehender Gasaustauschfläche einstellt. Mir wurde erst nach Bearbeitung unterschiedlicher Fachliteratur bewusst, dass sich dieser pathophysiologische Zustand genauso bei lungengesunden Personen unmittelbar nach Narkoseeinleitung manifestiert und relevante Gasaustauschstörungen mit intraoperativen Hypoxämien resultieren können. Eine Abnahme der Sauerstoffsättigung und eine verminderte pulmonale Compliance sind klassische Anzeichen für Atelektasen und die daraus resultierenden V/Q-Störungen. Die vertiefte Auseinandersetzung mit der Fachliteratur zeigte, dass Lachmann in den 90er-Jahren mit viel Pioniergeist den therapeutischen Grundstein dieser anästhesiebedingten Atelektasen legte. Basierend auf den Grundlagen von Lachmann und seinem Konzept „open up the lung and keep the lung open“ etablierten sich im Laufe der Jahre hauptsächlich zwei Rekrutierungsstrategien: Das CPAP-Manöver und die ARS. Ich war erstaunt darüber, dass der Rekrutierungseffekt bei beiden Rekrutierungsmanövern identisch ausfällt. Sowohl das CPAP-Manöver als auch die ARS führen zu einer verbesserten intraoperativen Compliance, zu einer vergrößerten FRC und optimieren die perioperative Gasaustauschleistung. Da jedoch die ARS gegenüber des CPAP-Manövers einige Vorteile aufweist, bin ich bestrebt, in meiner weiterführenden Tätigkeit als angehende Expertin Anästhesiepflege die ARS anzuwenden. Der Hauptvorteil der ARS besteht sicherlich in ihrer besseren hämodynamischen Toleranz, da der intrathorakale Druck schrittweise angehoben wird. Mir ist jedoch auch deutlich bewusst, dass die ARS im klinischen Alltag gerade bei lungengesunden Personen nicht immer identisch umgesetzt werden kann, wie es in der Literatur empfohlen wird. Ich bin der Überzeugung, dass die Grundpfeiler der ARS auch auf Lungengesunde problemlos übertrag- und anwendbar sind, auch ohne invasives hämodynamisches Monitoring. In Zukunft möchte ich mein Behandlungsteam und mich darauf sensibilisieren, nach jeder Intubation und Diskonnektion vom Beatmungsgerät atelektatisches Lungenwebe zu rekrutieren – nicht erst, wenn sich die Sauerstoffsättigung im Sinkflug befindet.

Als präventive Massnahme kenne ich aus eigener Erfahrung vor allem bei adipösen Personen eine Präoxygenation mit CPAP. Die Vertiefung der Fachliteratur hat mir jedoch gezeigt, dass Atelektasen unmittelbar auftreten, wenn die CPAP-Therapie während der Laryngosko-

pie abgesetzt wird. Da die Risiken den partiellen Nutzen der präventiven Massnahmen bei weitem übersteigen, werde auch ich in Zukunft keine der vorgeschlagenen Präventionen in den klinischen Anästhesiealltag integrieren.

Basierend auf dem Lachmann-Konzept wird propagiert, das rekrutierte Lungengewebe mit einem ausreichend hohen PEEP offen zu halten. In Bezug auf den Best-PEEP habe ich, was die Studienlage betrifft, den Wald vor lauter Bäumen nicht mehr gesehen. Da sich die Meinungen und Datenlagen der unterschiedlichen Autoren spalten, fiel mir dieses Kapitel besonders schwer. Nach intensiv investierter Zeit ziehe ich nun das Fazit, dass feste moderate PEEP-Einstellungen im Bereich 2 bis 8cmH₂O bei Lungengesunden reichen, um über dem unteren Inflektionspunkt zu liegen. Als Kontrolle dient mir im klinischen Alltag die dynamische Compliance am Perseus Respiator. Eine PEEP-Optimierung nach individuellen PEEP-Ansätzen würde jedoch bei pulmonal vorerkrankten Personen sicherlich Sinn ergeben.

Abschliessend kann ich sagen, dass ich die formulierte Fragestellung nach wie vor als passend bewerte und sie mir eine wegweisende Orientierungshilfe geboten hat. Es ist eine Frage, mit der sich das Anästhesiefachpersonal schon vor Jahren beschäftigte und sie wird sicherlich im Laufe der Jahre ein wichtiger Bestandteil im Bereich der Anästhesie sein und bleiben. Meine gesetzten Ziele wurden durch die erarbeitete Literatur fortlaufend erreicht. Mir gelang ein grosser Wissenszuwachs durch eine fundierte Auseinandersetzung mit der breiten Fachliteratur. Das Schreiben dieser Diplomarbeit war ein intensiver, nicht immer effizienter Prozess und erforderte mehr Zeit als ursprünglich eingeplant. Vor allem die Anfangsphase kostete mich einige Nerven, da mir der rote Faden nicht von Anfang an deutlich erschien. Je länger ich mich jedoch mit der Thematik auseinandersetzte, desto besser fand ich in einen Schreib-Flow. Hürden gehören zum Schreibprozess dazu und ich bin stolz, diese gemeistert zu haben. Der Schreibprozess und das Endprodukt dieser Diplomarbeit stellen für mich eine wertvolle persönliche und fachliche Bereicherung für meine weiterführende Tätigkeit dar.

7 Danksagung

An dieser Stelle bedanke ich mich bei allen Personen, die mich bei der Verwirklichung dieser Diplomarbeit unterstützt haben:

Ein riesiger Dank geht an mein privates und berufliches Umfeld, welches mir während dieser intensiven Zeit stets den Rücken freihielt, mich unterstützte und motivierte. Besonders möchte ich mich bei Brigitte Abegg, Lehrerin Pflege/Praxis für den wertvollen Austausch, die konstruktiven Feedbacks und das Gegenlesen dieser Arbeit bedanken. Ein weiterer herzlicher Dank geht an Karin Müller, Studiengangsleiterin Anästhesiepflege NDS HF, welche mich durch den Prozess dieser Diplomarbeit stets tatkräftig, mit viel Elan und Fachexpertise begleitet und unterstützt hat.

8 Literaturverzeichnis

- Bein, T. & Reber, A. (1999). Atelektasen während Anästhesie und Intensivbehandlung – Entstehungsmechanismen und Therapiemöglichkeiten. *Anästhesiologie & Intensivmedizin*, 477-486.
- Böhm, S. & Bangert, K. (2000). Prävention und Therapie anästhesiebedingter Atelektasen. *Anaesthetist*, 345-348.
- Brismar, B., Hedenstierna, G., Lundquist, H., Strandberg, A., Svensson, L. & Tokics, L. (1985). Pulmonary Densities during Anesthesia with Muscular Relaxation – A proposal of Atelectasis. *Anesthesiology*, 422-428.
- Drägerwerk AG & Co. KGaA. *Intraoperative recruitment maneuvers*. (n.d.). Abgefragt am 22. Januar 2023, von <https://www.draeger.com/Library/Content/recruitment-210x260-wp-9105177-en-us-1712-1-K1.pdf>.
- Gunnarsson, L., Tokics, L., Gustavsson, H. & Hedenstierna, G. (1991). Influence of age on atelectasis formation and gas exchange impairment during general anaesthesia. *British Journal of Anaesthesia*, 423-432.
- Hartland, B., Newell, T. & Damico, N. (2015). Alveolar Recruitment Maneuvers Under General Anesthesia: A Systematic Review of the Literature. *Respiratory Care*, 609-620.
- Hedenstierna, G. & Edmark, L. (2010). Mechanisms of atelectasis in the perioperative period. *Best Practice & Research Clinical Anaesthesiology*, 157-169.
- Hedenstierna, G., Strandberg, A., Brismar, B., Lundquist, H., Svensson, L. & Tokics, L. (1985). Functional Residual Capacity, Thoracoabdominal Dimensions and Central Blood Volume during General Anesthesia with Muscle Paralysis and Mechanical Ventilation. *Anesthesiology*, 247-254.
- Krayer, S., Rehder, K., Vettermann, J., Didier, E. & Ritman, E. (1989). Position and Motion of the Human Diaphragm during Anesthesia-paralysis. *Anesthesiology*, 891-898.
- Lagier, D., Zeng, C., Fernandez-Bustamante, A. & Vidal Melo, M. (2022). Perioperative Pulmonary Atelectasis: Part II. Clinical Implications. *Anesthesiology*, 206-236.
- Larsen, R., Fink, T. & Müller-Wolff, T. (2021). *Larsens Anästhesie und Intensivmedizin für die Fachpflege* (10. Ausg.). Hamburg: Springer.
- Max, M. & Dembinski, R. (2000). Pulmonaler Gasaustausch in Narkose. *Anaesthetist*, 771-783.
- Oczenski, W. (2017). *Atmen – Atemhilfen* (10. Ausg.). Stuttgart: Thieme.
- Rathgeber, J. (2010). *Grundlagen der maschinellen Beatmung* (2. Ausg.). Stuttgart: Thieme.

- Reber, A., Engberg, G., Wegenius, G. & Hedenstierna, G. (1996). Lung aeration. The effect of pre-oxygenation and hyperoxygenation during total intravenous anaesthesia. *Anaesthesia*, 733-737.
- Roewer, N. & Thiel, H. (2013). *Taschenatlas Anästhesie*. Stuttgart: Thieme.
- Rutkowski, T. (2008). *Verhalten der funktionellen Residualkapazität (FRC) bei Manövern zur Rekrutierung von kollabierten Lungenbezirken in Narkose – Untersuchung mittels eines Sauerstoffeinwasch- und -auswaschverfahrens*. Dissertation. Hamburg: Klinik für Anästhesiologie des Universitätsklinikum Hamburg-Eppendorf.
- Tusman, G. & Belda, J. (2010). Treatment of anesthesia-induced lung collapse with lung recruitment maneuvers. *Current Anaesthesia & Critical Care*, 244-249.
- Tusman, G. & Böhm, S. (2010). Prevention and reversal of lung collapse during the intraoperative period. *Best Practice & Research Clinical Anaesthesiology*, 183-197.
- Zeng, C., Lagier, D., Lee, J.-W. & Vidal Melo, M. (2022). Perioperative Pulmonary Atelectasis: Part I. Biology and Mechanisms. *Anesthesiology*, 181-205.

9 Abbildungsverzeichnis

- Abbildung 1. Titelbild*, abgerufen am 30.11.2022 unter <https://www.vecteezy.com/vector-art/1904696-continuous-line-drawing-icon-hot-air-balloon-happy-holiday-with-air-balloon> S. 1
- Abbildung 2. Verschiebung von intrathorakalen und intraabdominellen Blut- und Gasvolumina während Allgemeinanästhesie*, nach Max & Dembinski (2000) S. 9
- Abbildung 3. Intrapulmonaler Rechts-Links-Shunt*, nach Oczenski (2017) S. 12
- Abbildung 4. Compliance und „Best-PEEP“*, nach Oczenski (2017) S. 19
- Abbildung 5. Komponenten des Gasaustauschs*, nach Oczenski (2017) S. 34
- Abbildung 6. 3-Zonen-Modell*, nach Rathgeber (2010) S. 35
- Abbildung 7. Statische Lungenvolumina*, nach Oczenski (2017) S. 37

10 Selbstdeklaration

Ich bestätige,

dass ich die vorliegende Diplomarbeit selbstständig verfasst habe und dass fremde Quellen, welche in der Arbeit enthalten sind, deutlich gekennzeichnet sind.

dass alle wörtlichen Zitate als solche gekennzeichnet sind.

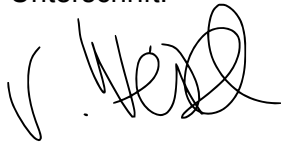
dass ich die Bereichsleitung Weiterbildung vorgängig informiere, wenn die Arbeit als Ganzes oder Teile davon veröffentlicht werden.

Ich nehme zur Kenntnis, dass das Bildungszentrum Xund über die Aufnahme der Diplomarbeit in der Bibliothek, einer Aufschaltung auf der Homepage des Bildungszentrums Xund oder auf Homepages von Fachgesellschaften entscheidet. Sie kann ebenso zu Schulungszwecken für den Unterricht in den NDS Studien AIN verwendet werden.

Luzern, 27.02.2023

Seraina Weibel

Unterschrift:

A handwritten signature in black ink, appearing to read 'S. Weibel', with a large, stylized flourish at the end.

11 Anhang

Die folgenden Kapitel zeigen einzelne relevante Punkte der Lungenphysiologie auf, welche für das Verständnis der pulmonalen Veränderungen während einer Allgemeinanästhesie vorausgesetzt werden.

11.1 Pulmonaler Gasaustausch

Die wesentliche Aufgabe der Lunge ist die Oxygenierung des Hämoglobins und die Elimination von Kohlendioxid (CO_2). Mit der Inspiration von Frischluft in die Alveolen beginnt der pulmonale Gasaustausch. O_2 aus der Alveolarluft diffundiert in die Lungenkapillaren und CO_2 aus dem Lungenkapillarblut in die Alveolarluft. Die Diffusion von O_2 und CO_2 in verschiedene Richtungen stützt sich auf unterschiedliche Partialdrücke entlang eines Partialdruckgefälles. Der Sauerstoffpartialdruck ist in der Alveolarluft höher als in der Lungenkapillare. Im Blut hingegen ist der CO_2 -Partialdruck grösser als in der Alveolarluft (siehe Abbildung 5). Ein intakter pulmonaler Gasaustausch ist von drei Teilprozessen abhängig: Ventilation, Diffusion und Perfusion (Oczenski, 2017).

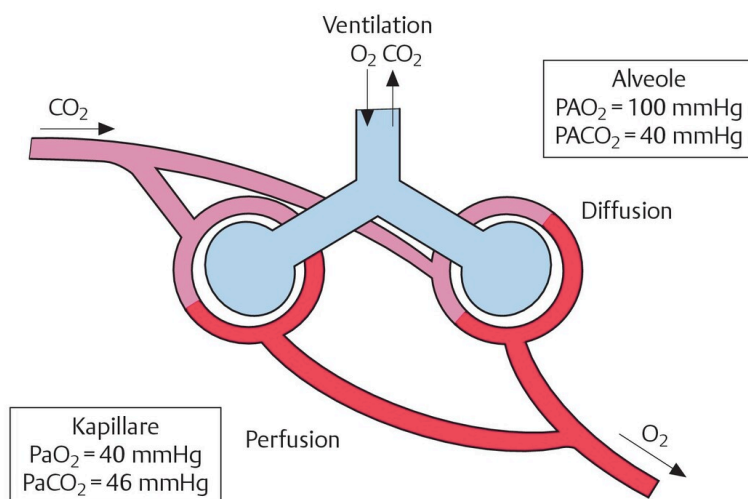


Abbildung 5. Komponenten des Gasaustauschs

Die Ventilation transportiert über die Inspiration sauerstoffreiche Luft zu den Alveolen und eliminiert über die Expiration das anfallende kohlendioxidreiche alveoläre Gasgemisch aus den Alveolen. Mittels Diffusion findet der eigentliche Gasaustausch zwischen dem Alveolarraum und den Blutkapillaren durch die alveolokapilläre Membran statt. Diese Membran besteht aus dem Alveolarepithel, der epithelialen Basalmembran und dem Kapillarendothel. Das Alveolarepithel, bestehend aus Typ-II-Alveolarzellen, produziert den Surfactant. Der Surfactant trägt die Funktion, die Oberflächenspannung an der Grenzfläche zwischen Alveolargewebe und Luft herabzusetzen, wodurch ein endexpiratorischer Alveolarkollaps verhindert wird (Larsen, Fink & Müller-Wolff, 2021).

Die Perfusion der Lunge ist gravitationsbedingt regional unterschiedlich, in der Lungenbasis deutlich stärker als in der Lungenspitze. Auch die Ventilation weist einen solchen (allerdings weniger stark ausgeprägten) Gradienten auf. Daraus ergibt sich eine physiologische Inhomogenität im V/Q-Verhältnis. Das bedeutet apikale Anteile werden besser ventilert als perfundiert, basale Anteile werden besser perfundiert als ventilert. Dies lässt sich in Abbildung 6 am „3-Zonenmodell nach West“ veranschaulichen: In den Lungenspitzen (Zone I) ist die Differenz zwischen pulmonal-arteriellem und pulmonal-venösem Druck kleiner als der alveoläre Luftdruck. Dadurch werden die Kapillaren von aussen komprimiert, die Gefäßdurchblutung sistiert und es kommt zur Totraumventilation. In Zone II (Lungenmitte) halten sich Alveolar- und Kapillardruck in der Waage, das V/Q-Verhältnis ist ausgeglichen. In den basalen Abschnitten (Zone III) überwiegt gravitationsbedingt der Kapillardruck. Die Perfusion überwiegt die Ventilation. Die Perfusion der Lunge kann sich aufgrund der hypoxisch pulmonalen Vasokonstriktion den lokal vorherrschenden Ventilationsverhältnisse anpassen und somit die Oxygenierung des in den linken Vorhof einströmenden pulmonalvenösen Blutes beeinflussen (Larsen et al., 2021).

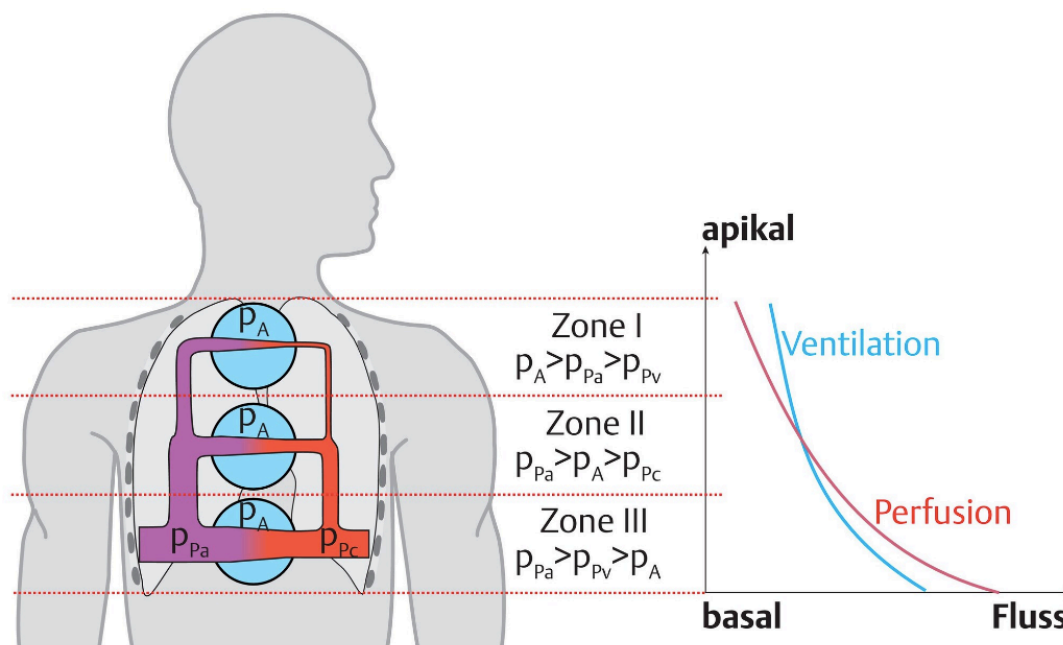


Abbildung 6. 3-Zonen-Modell

Eine Beeinträchtigung einer dieser drei Teilprozesse kann ein V/Q-Missverhältnis verursachen und letztlich pulmonale Gasaustauschstörungen mit Hypoxämie und Hyperkapnie zur Folge haben (Larsen et al., 2021).

11.2 Atemmechanik

Die Atemmechanik beschreibt die Bewegung der Atemluft zwischen der Umgebung und den Alveolen. Sie ist abhängig von Druck, Volumen und Atemgasfluss während eines Atemzyk-

lus. Der Druckgradient zwischen den Alveolen und der Atmosphäre ist für die Ventilation während der In- und Expiration verantwortlich. Bei der Inspiration entsteht ein negativer Druck (Sog), da der intrapulmonale Druck niedriger als der atmosphärische Druck ist. Die Expiration läuft entlang eines umgekehrt gerichteten Druckgradienten ab, das Ausströmen der Atemgase erfolgt über positiven Druck (Oczenski, 2017).

Ein weiterer wichtiger Parameter der Atemmechanik stellt das Diaphragma dar. Unter physiologischer Atmung ist das Diaphragma der Hauptmuskel der Inspiration. Die Kontraktion des Diaphragmas führt zu einer Vergrößerung des Thoraxvolumens, wodurch der intrapulmonale Druck unter den Umgebungsdruck sinkt. Die Luft kann entlang dieses Druckgradienten in die Lunge einströmen (Inspiration). Die Expiration läuft passiv ab, indem das Diaphragma erschlafft, die Lunge komprimiert wird und die Luft herausströmt (Larsen et al., 2021).

11.3 Lungendehnbarkeit (Compliance)

Die Compliance wird als Dehnbarkeit des elastischen Lungen- und Thoraxgewebes definiert. Sie zeichnet sich durch einen Volumenzuwachs der Lunge pro Einheit des Druckanstiegs in den Alveolen aus. Unter physiologischen Bedingungen beträgt die Compliance von Lunge und Thorax zusammen 0,13 Liter/cmH₂O. Wenn somit der alveoläre Druck (Δp) um 1 cmH₂O ansteigt, nimmt das Lungenvolumen (ΔV) um 130ml zu. Die Compliance kann unter bestimmten pathophysiologischen Veränderungen vermindert sein und erfordert dadurch grössere Druckwirkungen, um den gleichen Volumenzuwachs in der Lunge zu erreichen (Larsen et al., 2021).

$$\text{Compliance } C = \frac{\text{Volumenänderung } \Delta V}{\text{Druckänderung } \Delta p}$$

11.4 Lungenvolumina

Wie in Abbildung 7 ersichtlich, sind Lungenvolumina anatomische Messgrößen, die von der jeweiligen Körpergröße, vom Körperbau und von der Körperlage abhängen und nichts über die Lungenfunktion aussagen. Veränderungen der Lungenvolumina können jedoch Hinweise auf pulmonalen Funktionseinschränkungen geben und somit zur Beurteilung herangezogen werden (Oczenski, 2017).

Die FRC ist im klinischen Anästhesiealltag von besonderer Wichtigkeit. Unter der FRC versteht man das Atemgasvolumen, das nach einer normalen Expiration in der Lunge verbleibt und nicht mobilisierbar ist. Man spricht auch vom endexpiratorischen Lungenvolumen (EELV). Dies entspricht bei einer 70kg schweren Person ungefähr 3 Liter. Das in der Lunge verbleibende EELV bewirkt, dass zwischen den einzelnen Atemzyklen weiterhin Luft in den

Alveolen für den pulmonalen Gasaustausch verfügbar bleibt (Larsen et al., 2021). „Die FRC kann als Mass für die endexpiratorische Gasaustauschfläche angesehen werden [...] und verhindert grössere Veränderungen des PaO₂ während der Expiration“ (Oczenski, 2017, S. 97).

Das zur Narkoseeinleitung praktizierte Präoxygenieren über eine dicht sitzende Gesichtsmaske mit einem FiO₂ von 100% zielt darauf ab, die FRC vollständig mit Sauerstoff aufzusättigen und dadurch die Apnoetoleranz eines lungengesunden Erwachsenen auf bis zu zehn Minuten zu verlängern (Roewer & Thiel, 2013).

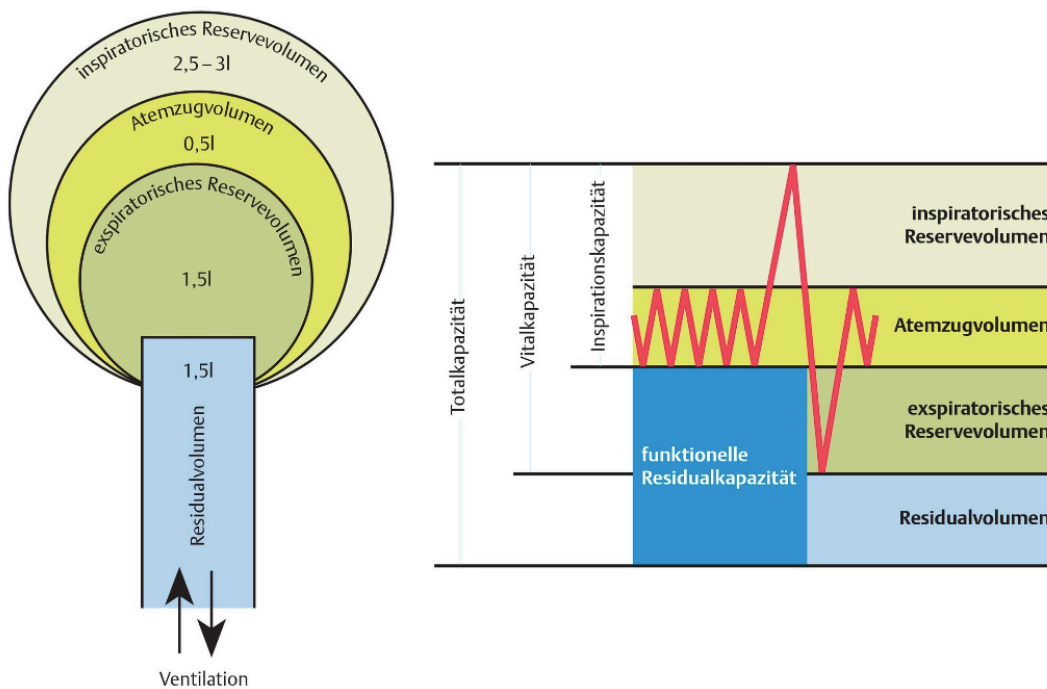


Abbildung 7. Statische Lungenvolumina