

Aus der Klinik für Anästhesiologie und Operative Intensivmedizin
der Universität zu Köln
Direktor: Universitätsprofessor Dr. med. B. W. Böttiger

Grad der praktischen Umsetzung lungenprotektiver Beatmungsstrategien im Vergleich verschiedener Intensivstationen innerhalb eines Universitätsklinikums

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

vorgelegt von
Joana Plessow
aus München

promoviert am 05. Dezember 2022

Gedruckt mit Genehmigung der Medizinischen Fakultät der Universität zu Köln
2023

Dekan: Universitätsprofessor Dr. med. G. R. Fink
1. Gutachter: Professor Dr. med. J. Hinkelbein
2. Gutachter: Privatdozent Dr. med. K. Frank

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 Prof. Dr. med. Jochen Hinkelbein
Herr PD Dr. med. Andreas Hohn

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.

Der dieser Arbeit zugrunde liegende Datensatz wurde mit Hilfe von Mitarbeitern der Klinik für Anästhesiologie und Operative Intensivmedizin ermittelt. Die statistische Auswertung wurde von mir selbst nach Beratung von Frau Dipl.-Stat. Christina Samel mit SPSS durchgeführt.

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 18.05.2021

Unterschrift: 

Danksagung

Ich möchte mich besonders bei Herrn Prof. Dr. med. Jochen Hinkelbein für die Überlassung dieses Themas, die großartige Betreuung und unermüdliche Unterstützung bedanken.

Außerdem danke ich herzlich Herrn PD Dr. med. Andreas Hohn für die wertvolle Hilfe bei der Erhebung der Daten und der Beantwortung aller aufkommenden Fragen, sowie für die konstruktive Kritik und Hilfestellung bei der Auswertung und Erstellung dieser Arbeit.

In diesem Zuge möchte ich mich auch bei allen Ärztinnen und Ärzten der drei Intensivstationen bedanken, die sich bei Fragen zu den Patienten immer für mich Zeit genommen haben und mir bei der Erfassung aller notwendigen Daten geholfen haben.

Frau Dipl.-Stat. Christina Samel vom Institut für medizinische Statistik, Informatik und Epidemiologie Köln danke ich für die erhellende Zusammenarbeit bei der Auswahl der statistischen Methoden für diese Arbeit und die freundliche, geduldige Beratung während des Erlernens dieser Methoden.

Zuletzt gilt mein besonderer Dank meinen Eltern, die mich nicht nur immens bei dieser Arbeit unterstützt haben, sondern mich auch auf meinem beruflichen Weg begleiten und stets ein offenes Ohr für meine Sorgen haben.

Inhaltsverzeichnis

ABKÜRZUNGSVERZEICHNIS	7
1. ZUSAMMENFASSUNG	9
2. EINLEITUNG	11
2.1 Historie der mechanischen Beatmung	11
2.2 Aktuelle Beatmungsstrategien	11
2.3 Fragestellungen und Ziel der Arbeit	12
3. MATERIAL UND METHODEN	14
3.1 Definitionen	14
3.1.1. Lungenprotektive Beatmung	14
3.1.2. BMI und Normalgewicht	15
3.2 VENTILA-Studie	15
3.2.1. Allgemeine Informationen und Ziele der Studie	15
3.2.2. Rekrutierung der Intensivstationen	16
3.3 Rekrutierung der Patienten	16
3.4 Studienprotokoll	17
3.4.1. Bestimmung der Beatmungs- und Aufenthaltsdauer	17
3.5 Dokumentation der Daten	18
3.5.1. Erfassung der allgemeinen Informationen	18
3.5.2. Definitionen der primären Gründe für die invasive Beatmung	18
3.5.3. Arterielle Blutgasanalyse und Beatmungsparameter	19
3.5.4. Komplikationen und Organversagen im Verlauf der Beatmung	20
3.5.5. Beatmungsentwöhnung und Extubation	20
3.5.6. Outcome	21
3.5.7. Nicht-invasive Beatmung (NIV)	21
3.5.8. Ethische Grundsätze	23
3.6 Definition der Fragestellung	23
3.7 Statistische Auswertung	24

3.7.1.	Datenbankerstellung	24
3.7.2.	Deskriptive Auswertung	24
3.7.3.	Univariable statistische Analyse	24
3.7.4.	Berechnung der Beatmungsparameter und Erstellung der Grenzwerte	25
3.7.5.	Kaplan-Meier-Schätzer	26
4.	ERGEBNISSE	28
4.1	Rekrutierung	28
4.2	Patientenkollektiv	28
4.3	Beatmungsparameter	32
4.4	Vergleich postoperativer und nicht-postoperativer Patienten	39
4.5	Nicht-invasive Beatmung	40
4.6	Organversagen und weitere Komplikationen	41
4.7	Leber- und Niereninsuffizienz	42
4.8	Behandlungsergebnis	44
5.	DISKUSSION	49
5.1	Tidalvolumen	49
5.2	Plateaudruck	51
5.3	PEEP	51
5.4	PaCO ₂	54
5.5	Vergleich postoperativer und nicht-postoperativer Patienten	55
5.6	Nicht-invasive Beatmung	56
5.7	Organversagen und weitere Komplikationen	57
5.8	Leber- und Niereninsuffizienz	58
5.9	Behandlungsergebnis	59
5.10	Limitationen	62

5.11	Schlussfolgerungen	63
6.	LITERATURVERZEICHNIS	64
7.	ANHANG	73
7.1	Abbildungsverzeichnis	73
7.2	Tabellenverzeichnis	74

Abkürzungsverzeichnis

AECC	American-European Consensus Conference
ALI	Acute Lung Injury
ARDS	Acute Respiratory Distress Syndrome
AWMF	Arbeitsgemeinschaft der Wissenschaftlichen Medizinischen Fachgesellschaften
BGA	Blutgasanalyse
BIPAP	Biphasic Positive Airway Pressure
BMI	Body-Mass-Index
bzw.	beziehungsweise
ca.	circa
COPD	Chronic Obstructive Pulmonary Disease (Chronic obstructive Lungenerkrankung)
CPAP	Continuous Positive Airway Pressure
CPP	Cerebral Perfusion Pressure (Zerebraler Perfusionsdruck)
CT	Computertomographie
dl	Deziliter
EPAP	Expiratory Positive Airway Pressure (Positiver expiratorischer Atemwegsdruck)
FiO ₂	Fraction of Inspired Oxygen (Inspiratorische Sauerstofffraktion)
ICP	Intracranial Pressure (Intrakranieller Druck)
ICU	Intensive Care Unit (Intensivstation)
ICUAW	ICU-acquired Weakness
IPAP	Inspiratory Positive Airway Pressure (Positiver inspiratorischer Atemwegsdruck)
kg	Kilogramm
KG	Körpergewicht
KI	Konfidenzintervall
mg	Milligramm
NIV	Non-invasive Ventilation (Nicht-invasive Beatmung)
ÖGARI	Österreichische Gesellschaft für Anaesthesiologie, Reanimation und Intensivmedizin
PaCO ₂	Arterieller Kohlenstoffdioxidpartialdruck
PaO ₂	Arterieller Sauerstoffpartialdruck
PEEP	Positive EndExpiratory Pressure (Positiver endexpiratorischer Druck)
Pmax	Spitzendruck
Pplat	Plateaudruck

PRVC	Pressure Regulated Volume Controlled
PSV	Pressure Support Ventilation
RASS	Richmond Agitation Sedation Scale
SAPS II	Simplified Acute Physiology Score II
SIRS	Systemic Inflammatory Response Syndrome
SaO ₂	Arterielle Sauerstoffsättigung
SpO ₂	Pulsoxymetrisch gemessene Sauerstoffsättigung
Tab.	Tabelle
Vt	Tidalvolumen
z.B.	zum Beispiel
ZEEP	Zero-PEEP

1. Zusammenfassung

Im Rahmen der vorliegenden Arbeit wurde die lungenprotektive Beatmung intensivpflichtiger Patienten, die bestimmten Kriterien entsprechen muss, untersucht. Zu diesen Kriterien zählten niedrige Tidalvolumina zwischen 6 und 8 ml/kg Normalgewicht, die Begrenzung des Plateaudruckes und die Anwendung eines optimalen PEEP. Diese drei Parameter, die im Rahmen der ARDS-Network-Studie untersucht¹ und als Kriterien für lungenprotektive Beatmung festgelegt wurden, stellten den Schwerpunkt der Auswertung dar.

Insgesamt wurden drei Intensivstationen untersucht. Die Patienten wurden über einen Zeitraum von maximal 28 Tagen anhand eines standardisierten Fragebogens beobachtet. Bei den drei Intensivstationen handelte es sich um zwei chirurgische und eine neurochirurgische Intensivstation. Insgesamt wurden die Daten von 51 Patienten erhoben.

Bei den 48 invasiv beatmeten Patienten lagen die Tidalvolumina im Mittel zu 65,8% zwischen 6 und 8 ml/kg Normalgewicht und darunter. Dieser Anteil an niedrigen Tidalvolumina sprach für eine zuverlässige Umsetzung bei diesem Aspekt der lungenprotektiven Beatmungsstrategie.

Als nächster Parameter wurde der Plateaudruck ausgewertet. Dieser lag bei allen Stationen zu 96,4% unter dem Grenzwert von 30 cmH₂O. Der Mittelwert des Plateaudruckes lag für alle Stationen bei 18,9 cmH₂O. Die Mittelwerte der verwendeten PEEP lagen im Durchschnitt bei 8,17 cmH₂O. Zudem wurde das FiO₂:PEEP-Verhältnis anhand der Tabelle des ARDS-Networks untersucht. Dieses wich im Mittel um 1,5 cmH₂O PEEP von dem empfohlenen Verhältnis ab. Damit wurde nur in 42,6%, die empfohlene PEEP-Höhe im Verhältnis zum FiO₂ eingehalten. In mehr als der Hälfte entsprach der PEEP nicht dem laut Tabelle erforderlichen PEEP, sondern lag zu 91,2% der Fälle über diesem Wert.

Um alle drei Parameter unter dem Aspekt der lungenprotektiven Beatmung als Ganzes zu beurteilen, wurde zusätzlich ausgewertet, in wieviel Prozent der Fälle alle drei Kriterien erfüllt wurden. 37,3% der Beatmungswerte erfüllten die Vorgabe sowohl der niedrigen Tidalvolumina als auch des Plateaudruckes unter 30 cmH₂O und die Einhaltung des empfohlenen FiO₂:PEEP-Verhältnisses.

Daraus ließ sich ableiten, dass die Verwendung von niedrigen Tidalvolumina und eine Begrenzung des Plateaudruckes auf den drei untersuchten Intensivstationen in 62,8% der Fälle gut umgesetzt wurde. Im Gegensatz dazu wich der PEEP häufig von den empfohlenen Werten ab und es wurden oft höhere PEEP-Werte zur Beatmung der Patienten verwendet. Allerdings muss hierbei berücksichtigt werden, dass zwei FiO₂:PEEP-Tabellen des ARDS-Networks zur Verfügung standen. In dieser Auswertung wurde die FiO₂:PEEP-Tabelle verwendet, die zur Einstellung niedriger PEEP-Werte dient. Dadurch relativierten sich die erhöhten PEEP-Werte und es war insgesamt als positiv anzusehen, dass im Gegensatz zu vielen anderen Studien hier der Einsatz von adäquat hohen PEEP-Werten gezeigt werden konnte. Dabei war

außerdem zu beachten, dass sich die retrospektive Beurteilung des optimalen PEEP sehr schwierig gestaltete und die Tabelle des ARDS-Networks lediglich zur Annäherung dienen konnte.

Außerdem kritisch zu sehen, war die lediglich einmal tägliche Erfassung der Parameter. So wurde zum Beispiel bei Brunkhorst et al. eine kontinuierliche Auswertung der Tidalvolumina vorgenommen und nur die schlechtesten Werte mit einbezogen². Andererseits ließ sich durch die tägliche Dokumentation über einen längeren Zeitraum zumindest ein guter Überblick über die verwendeten Beatmungsparameter gewinnen.

Für die weiteren erfassten Parameter, die zum Beispiel die Organfunktionen oder das Überleben betreffen, konnten aufgrund der geringen Patientenzahl keine signifikanten Unterschiede aufgezeigt werden. Daher sollten in Zukunft ähnliche Studien, die die Beatmungsqualität untersuchen, auf ein größeres Patientenkollektiv zurückgreifen, damit die gefundenen Beatmungsunterschiede in Zusammenhang mit den Organfunktionen und dem Überleben gebracht werden können.

2. Einleitung

2.1 Historie der mechanischen Beatmung

Die mechanische Beatmung spielt seit der Polioepidemie 1952 in Kopenhagen eine große Rolle bei der Behandlung von kritisch kranken Patienten mit respiratorischer Insuffizienz, da während dieser Epidemie nachweislich eine dramatische Reduktion der Mortalität durch die Beatmung erzielt werden konnte³. Auch nach der Epidemie konnte die mechanische Beatmung das Outcome aller Intensivpatienten bewiesenermaßen verbessern, da sich die Beatmung auf den Intensivstationen seit 1952 stark verändert und weiterentwickelt hat⁴. Ursprünglich wurde mit hohen Tidalvolumina von 10-15 ml/kg Körpergewicht (KG) beatmet⁵. Dieser Ansatz stammte aus der Beatmung bei chirurgischen Interventionen, bei der eine adäquate Oxygenierung und die Vermeidung von Atelektasen im Vordergrund stand⁶.

Die Weiterentwicklung der Computertomographie (CT) hat in den 1980ern einen entscheidenden Beitrag zum Verständnis des Acute Respiratory Stress Syndrome (ARDS) beigetragen, da sie zeigte, dass die Lunge nicht wie angenommen eine homogene Struktur aufweist. Stattdessen waren beim ARDS nur Teile der Lunge belüftet. Diese Entdeckung wurde „baby lung concept“ genannt⁷. Dieses Baby-Lungen-Konzept ist allerdings eher ein funktionelles als ein anatomisches Konzept, da der Anteil der Baby-Lunge mit Hilfe des positiven endexpiratorischen Druckes (PEEP) und der Bauchlage ihre Größe und Lage verändert⁸. Außerdem konnte widerlegt werden, dass es sich bei einer durch ARDS geschädigten Lunge um eine steife Lunge handelt. Es wurde gezeigt, dass nur die belüfteten Anteile kleiner sind und die Lunge eine fast normale intrinsische Elastizität besitzt⁹.

Zusätzlich zu diesen Erkenntnissen über die funktionellen Veränderungen der Lunge im ARDS wurde 1992 durch Lachmanns Artikel „open up the lung and keep the lung open“¹⁰ die Rekrutierung und Offenhaltung der Lunge als wichtige Bestandteile in die Beatmungstherapie integriert¹¹. Zu diesem „open lung concept“ zählt unter anderem die alveoläre Rekrutierung mit hohen Spitzendrücken, welche anhand eines festgelegten Protokolls durchgeführt wird¹². Dadurch bleibt die funktionelle Residualkapazität erhalten und größere Anteile der Lunge können am Gasaustausch teilnehmen¹³. Allerdings gibt es nur wenig Evidenz für die positive Auswirkung dieser Beatmungsstrategie auf die Beatmungsdauer oder die Mortalität¹⁴.

2.2 Aktuelle Beatmungsstrategien

In den letzten Jahren haben sich die Beatmungskonzepte hin zu einer sogenannten lungenprotektiven Strategie gewandelt¹⁵. Im Rahmen dieser Strategie werden niedrigere Tidalvolumina von 6-8 ml/kg Normalgewicht und eine Plateaudruckbegrenzung verwendet. Außerdem spielt die Einstellung des optimalen PEEP eine wichtige Rolle bei der lungenprotektiven Beatmung^{1,16}.

Viele Studien haben die Umsetzung der Beatmungsstrategien in der intensivmedizinischen Praxis und die Entwicklung der mechanischen Beatmung dokumentiert und ausgewertet⁹. Zu diesen Studien zählen auch jene der sog. VENTILA-Group. Diese Studiengruppe führt seit 1998 alle sechs Jahre eine weltweite Untersuchung zur mechanischen Beatmung durch. Die Studien der Jahre 1998, 2004 und 2010 zeigen, ob die in randomisierten Studien untersuchten Beatmungstechniken auch in der Praxis Anwendung finden. So wurden im Jahr 2004 niedrigere Tidalvolumina und höhere PEEP-Werte angewendet als noch 1998. Dieser Trend setzte sich im Jahr 2010 fort und erstmals konnte ein signifikant höheres Überleben der Patienten festgestellt werden¹⁷⁻¹⁹. Die vorliegende Arbeit ist ein Teil der aktuellen Studie der VENTILA-Group von 2016 und die erhobenen Daten stellen eine Subgruppe dieser weltweiten Studie dar. Auch diese aktuellen Daten von 2016 zeigen eine signifikant niedrigere 28-Tage Mortalität als in den Jahren zuvor²⁰.

Es gibt viele Studien, die die aktuelle Beatmungspraxis im nationalen und internationalen Vergleich untersuchen. Zu diesen zählt unter anderem die Studie von Brunkhorst et al., die zudem untersucht hat, inwieweit die Vorstellung der zuständigen Ärzte, dass lungenprotektive Beatmung praktiziert wurde, auch der Realität entspricht². Sie hat gezeigt, dass häufig eine deutliche Diskrepanz zwischen der Theorie und der wirklich praktizierten Beatmung besteht. Die befragten Ärzte gaben zu 79,9% an, dass auf ihrer Station lungenprotektive Beatmung gängige Praxis wäre. Allerdings lagen 80,3% der Tidalvolumina-Werte über 8 ml/kg KG und zeigten somit das genaue Gegenteil². Daher ist es umso wichtiger, regelmäßig die tatsächlich angewendeten Beatmungsstrategien zu erfassen, auszuwerten und die Behandlungstechniken auf ihre Aktualität hin zu überprüfen.

Inzwischen gibt es weitere klinische Studien, die die evidenzbasierte Strategie der lungenprotektiven Beatmung bei ARDS-Patienten auch auf andere intensivmedizinische Patientenkollektive übertragen haben. Allerdings konnte hier keine Evidenz für die Verkürzung der Beatmungsdauer bei der Anwendung niedriger Tidalvolumina vs. mittlere Tidalvolumina gefunden werden²¹. Dennoch wurde die Empfehlung zur Verwendung von niedrigen Tidalvolumina bei Nicht-ARDS-Patienten in die aktuelle S3-Leitlinie der Arbeitsgemeinschaft der Wissenschaftlichen Medizinischen Fachgesellschaften (AWMF) aufgenommen²².

2.3 Fragestellungen und Ziel der Arbeit

Das Ziel der vorliegenden Arbeit ist es aufzuzeigen, welche mechanischen Beatmungstechniken momentan auf drei operativen Intensivstationen an der untersuchten Uniklinik etabliert sind und ob die verschiedenen Säulen der lungenprotektiven Beatmung umgesetzt werden. Außerdem wird an einem Vergleich der einzelnen Stationen gezeigt, ob verschiedene Schwerpunkte einen Einfluss auf die Beatmungstherapie haben. Zu diesen Schwerpunkten zählen zum Beispiel die Fokussierung auf die korrekte PaCO₂ Einstellung bei

neurochirurgischen Patienten, vorherige intraoperative Beatmung bei postoperativen Patienten und die mit Einbeziehung der Erkrankungsschwere anhand des Organversagens. Zusätzlich stellt sich die Frage, ob diese Schwerpunkte mit den unterschiedlichen Fachrichtungen der Stationen korrelieren. Des Weiteren soll der Effekt möglicher Unterschiede auf das Outcome der Patienten untersucht werden und mögliche Ursachen für die Diskrepanzen eruiert werden.

Da sich die mechanische Beatmung durch die Etablierung der lungenprotektiven Beatmung stark gewandelt hat, wird auch dies einen Schwerpunkt der Auswertung und Diskussion darstellen. Dabei soll untersucht werden, wie hoch der Anteil an Patienten war, die die Kriterien einer lungenprotektiven Beatmung erfüllten. Sollte dies nicht so gewesen sein, so sollen mögliche Gründe hierfür untersucht werden. Diese Auswertung basiert vor allem auf den Parametern Tidalvolumen, FiO_2 :PEEP-Relation und dem Plateaudruck.

Da die lungenprotektive Beatmung seit mehreren Jahren als gängige Beatmungstechnik angesehen wird, soll die vorliegende Arbeit die Hypothese (H_0) prüfen, dass die Beatmung auch bei den Patienten auf den untersuchten Intensivstationen leitliniengerecht durchgeführt wird [22]. Folgende Parameter der Leitlinie werden zur Überprüfung der Hypothese verwendet: niedrige Tidalvolumina, Einstellung des optimalen PEEP und Begrenzung des Plateaudrucks. Außerdem wird zusätzlich analysiert, wie häufig alle drei Parameter bei der Beatmung der Patienten umgesetzt wurden. Die Hypothese (H_0) soll für das gesamte Patientenkollektiv und für Untergruppen geprüft werden.

3. Material und Methoden

3.1 Definitionen

3.1.1. Lungenprotektive Beatmung

Bei der Behandlung von Patienten mit akutem Lungenversagen ist es von großer Bedeutung, auf eine gute Einstellung der Beatmungsparameter zu achten. Die Berlin-Definition des ARDS wird dabei als gemeinsame Grundlage für Forschungen genommen. Demnach ist das ARDS definiert als ^{23,24}:

- Akutes Auftreten, innerhalb einer Woche,
- Respiratorische Insuffizienz nach einem klinischen Insult, die durch Herzinsuffizienz oder Flüssigkeitseinlagerungen nicht vollständig erklärbar ist,
- Ein Oxygenierungsindex ($\text{PaO}_2:\text{FiO}_2$) < 200 bei einem PEEP ≥ 5 cm H₂O und
- Beidseitige Verschattungen in der Röntgen-Thoraxaufnahme.

Die groß angelegte ARDS-Netzwerk-Studie aus dem Jahr 2000 konnte zeigen, dass die Anwendung eines Tidalvolumen (Vt) von 6 ml/kg KG im Vergleich zu 12 ml/kg KG die Mortalität von 39,8% auf 31% reduzierte und die Beatmungsdauer verkürzte ¹.

Die Autoren der Studie bezogen dieses Ergebnis nicht nur auf ARDS, sondern auch auf Acute Lung Injury (ALI). ALI wurde durch die American-European Consensus Conference (AECC) definiert als plötzliches Lungenversagen mit einem Oxygenierungsindex ≤ 300 mmHg ²⁵. Eigentlich sollte ALI als weiter gefasster Oberbegriff verwendet werden, diese Definition wurde jedoch häufig missverstanden. Daher wurde ALI in der Berlin-Definition durch drei Grade des ARDS ersetzt ²³:

- Mild: $\text{PaO}_2/\text{FiO}_2$ 201-300 mmHg,
- Moderat: $\text{PaO}_2/\text{FiO}_2$ 101-200 mmHg und
- Schwer: $\text{PaO}_2/\text{FiO}_2 \leq 100$ mmHg.

Aufgrund der ARDS-Netzwerk-Studie wird als lungenprotektive Beatmung ein Tidalvolumen von 6-8 ml/kg Normalgewicht empfohlen. Bei der mechanischen Beatmung wird die Lunge durch das wiederholte Öffnen und Schließen der Alveolen und der zunehmenden Dysfunktion des Surfactants dem sogenannten Scherstress ausgesetzt. Mit Hilfe der lungenprotektiven Beatmung sollen die entzündlichen Reaktionen durch die Beatmung beim ARDS abgemildert werden und somit die Sterblichkeit gesenkt werden ²⁶. Zusätzlich führen hohe Tidalvolumina oft zu Überblähungen und dadurch zur Zerstörung der Alveolarstruktur ²⁷.

Außerdem sind im Rahmen der lungenprotektiven Beatmung hohe Plateaudrücke ($\text{Pplat} > 30$ cmH₂O) zu vermeiden ²⁸. Zusätzlich sollte der PEEP optimal auf den Patienten eingestellt werden. Die PEEP-Optimierung ist durch verschiedene Verfahren zu erreichen. Zum einen kann der optimale Gasaustausch durch einen hohen PaO_2 bei gleichzeitig niedrigem PaCO_2 als Parameter genutzt werden. Zum anderen können der transpulmonale Druck und die

Compliance zu Rate gezogen werden. Hierfür wird mit Hilfe eines PEEP-Trials der PEEP schrittweise um 2-3 cmH₂O erhöht oder erniedrigt, bis der gewünschte Effekt erreicht wurde. Eine weitere gängige Methode zur Bestimmung des optimalen PEEP stellt die FiO₂:PEEP-Tabelle des ARDS-Networks dar ²⁹.

3.1.2. BMI und Normalgewicht

Um die Patientenkollektive der Stationen vergleichen zu können, wurde der Body-Mass-Index berechnet. Außerdem wurde das Normalgewicht bestimmt, welches in Beziehung zu den Tidalvolumina genutzt wurde.

Berechnung des Body-Mass-Index ³⁰:

$$\text{BMI} = \text{Gewicht} / \text{Größe}^2$$

BMI: Body-Mass-Index [kg/m²]

Gewicht: Körpergewicht [kg]

Größe: Körpergröße [m]

Berechnung des Normalgewichts ¹:

$$\text{Männer: } 50 + 0,91 \times (\text{Größe} - 152,4)$$

$$\text{Frauen: } 45,5 + 0,91 \times (\text{Größe} - 152,4)$$

Größe: Körpergröße [cm]

Im Folgenden ist bei der Erwähnung des Körpergewichts (KG) in Bezug auf das Tidalvolumen das Normalgewicht gemeint.

3.2 VENTILA-Studie

3.2.1. Allgemeine Informationen und Ziele der Studie

Die Daten, die in dieser Arbeit näher untersucht und ausgewertet wurden, wurden im Rahmen der VENTILA-Studie erhoben. Dabei handelte es sich um die Patientendaten dreier verschiedener operativer Intensivstationen (A, B und C) innerhalb einer Uniklinik.

Die der Arbeit zu Grunde liegende Studie ist die vierte Studie der VENTILA-Group. Diese wurde 6 Jahre nach der dritten Studie aus dem Jahr 2010 begonnen. Auch die drei vorherigen Studien waren im Abstand von sechs Jahren entstanden, nämlich 1998, 2004 und 2010. Es wurde jedes Mal eine identische Methodik angewandt und auch die Form der Studie blieb gleich. Somit handelte es sich wieder um eine prospektive, internationale, nicht interventionelle, nicht randomisierte Multicenter-Kohortenstudie.

Die Koordination wurde, wie auch schon bei den drei vorherigen Studien, von der Universitario de Getafe in Madrid, Spanien, übernommen.

Insgesamt nahmen 46 Länder weltweit an der Studie teil. Einen Monat lang konnten Patienten, die länger als 12 Stunden beatmet wurden, in die Studie eingeschlossen werden. Für eine Dauer von maximal 29 Tagen wurden dann täglich festgelegte Parameter erhoben. Das Hauptziel der Studie war es, die klinische Praxis der Beatmung auf Intensivstationen zu erheben.

Da das Studienprotokoll aus den Voruntersuchungen bereits bekannt war, war ein Großteil der teilnehmenden Studienzentren mit dem Ablauf vertraut und konnten im Erhebungszeitraum von einem Monat effektiv Patienten rekrutieren.

3.2.2. Rekrutierung der Intensivstationen

Teilnahmebedingungen für die Intensivstationen in der VENTILA-Studie waren eine Mindestbettenanzahl von sechs Betten und im Mittel mussten in den vergangenen zwölf Monaten mehr als 30% der Patienten beatmet gewesen sein. Außerdem war es Voraussetzung für die Intensivstationen, dass die dort arbeitenden Ärzte Intensivmediziner sind oder die Patienten zumindest von Intensivmedizinern visitiert werden. Alternativ mussten die behandelnden Ärzte mehr als fünf Jahre Erfahrung in der Intensivmedizin haben, um die Station in die Studie einschließen zu können. Ausgeschlossen waren pädiatrische Intensivstationen und postoperative Aufwachräume.

Für die ausgesuchte Uniklinik traf diese Vorgabe auf drei Intensivstationen zu, die im folgenden Teil näher untersucht wurden.

3.3 Rekrutierung der Patienten

In die Studie eingeschlossen wurden alle Patienten, die die folgenden Einschlusskriterien im Zeitraum vom 01.06.2016 (0:00 Uhr) bis 30.06.2016 (23:59 Uhr) erfüllt haben. Patienten, die schon vor dem 01.06.2016 beatmet worden sind, wurden nicht eingeschlossen.

Die Einschlusskriterien umfassten:

- Patienten, die auf einer Intensivstation lagen und länger als 12 Stunden invasiv beatmet wurden,
- Patienten, die auf einer Intensivstation lagen und länger als eine Stunde nicht-invasiv beatmet wurden und
- Patienten, die schon vor der Aufnahme auf die Intensivstation beatmet wurden und dann auf diese verlegt wurden.

Außerdem wurden keine Patienten unter 18 Jahren eingeschlossen, genauso wie Patienten nach einer elektiven Operation, die weniger als 12 Stunden beatmet waren.

3.4 Studienprotokoll

Lediglich der zuständige Forschungskordinator der jeweiligen Intensivstation war mit den genauen Zielen der Studie und ihrem zeitlichen Ablauf vertraut. So wurde verhindert, dass es zu Modifikationen der Beatmung im Zeitraum der Studie kam.

Die Daten der Patienten wurden 29 Tage lang dokumentiert, außer wenn die Patienten vor Ablauf dieser 29 Tage aus dem Krankenhaus entlassen wurden oder verstorben waren. Beispielsweise wurden Patienten, die am 30.6.2016 in die Studie eingeschlossen wurden, bis zum 28.07.2016 nachbeobachtet. Wenn ein Patient aus dem Krankenhaus entlassen wurde und kurz danach wieder auf die Intensivstation aufgenommen und beatmet wurde, konnte dieser Patient nicht als neuer Patient gezählt werden, sondern die Zählung der Tage wurde über den gesamten Zeitraum fortgeführt. Das Gleiche galt für Patienten, die zwischenzeitlich von der Intensivstation auf eine Normalstation und wieder zurückverlegt wurden.

Die erfassten Parameter wurden täglich in einen standardisierten Studienbogen eingetragen.

3.4.1. Bestimmung der Beatmungs- und Aufenthaltsdauer

Die Beatmungsdauer wurde vom ersten Tag der Beatmung bis maximal 29 Tage dokumentiert. Daher wurde der erste Tag der Beatmung als Baseline gewertet. Die 29 Tage beinhalteten den Tag 0 als Start der Beatmung und die darauffolgenden 28 Tage. Wenn Patienten schon vor Ablauf der 29 Tage verstorben waren oder nicht mehr beatmet wurden, verkürzte sich die Beatmungsdauer entsprechend.

Eine Besonderheit trat bei Patienten auf, die erst extubiert und danach wieder re-intubiert wurden. Bei diesen Patienten wurde die Extubationsphase nicht mitgezählt. Die Tage nach der Re-intubation wurden dann mit den Beatmungstagen vor der Extubation zusammengezählt und ergaben als Ganzes die Beatmungsdauer.

Als Aufenthaltsdauer wurde sowohl die Aufenthaltsdauer auf der Intensivstation als auch die Gesamtaufenthaltsdauer im Krankenhaus ausgewertet. Hierbei wurde jedoch nicht der erste Tag auf der Intensivstation oder im Krankenhaus als Startpunkt gewertet, sondern der Beatmungsbeginn. Dadurch spiegelte die Aufenthaltsdauer der Patienten nur den Zeitraum wider, der mit der Beatmung assoziiert war. Mögliche vorherige Komplikationen anderer Ursache, die zu langen Aufenthalten vor Beginn der Studie führten, konnten somit nicht berücksichtigt werden.

3.5 Dokumentation der Daten

3.5.1. Erfassung der allgemeinen Informationen

Zunächst wurden die Strukturdaten des teilnehmenden Krankenhauses erfasst. Um das Krankenhaus näher zu beschreiben, konnte zwischen den Arten städtisches Krankenhaus, Lehrkrankenhaus oder Universitätskrankenhaus ausgewählt werden.

Auch die Intensivstationen wurden näher klassifiziert:

- Internistische Intensivstationen,
- Chirurgische Intensivstationen,
- Neurologische Intensivstationen,
- Kardiologische oder herzchirurgische Intensivstationen und
- Gemischte Intensivstationen.

Außerdem wurde für die jeweilige Intensivstation die Anzahl der Betten erfasst.

Um das Studienkollektiv näher zu beschreiben, wurden gewisse Grundparameter erhoben, dazu zählten Alter, Geschlecht, Größe und Gewicht, sowie das Aufnahmedatum ins Krankenhaus bzw. auf die Intensivstation. Zusätzlich wurde bei der Aufnahme auf die Intensivstation der Simplified Acute Physiology Score II (SAPS II) ermittelt. Dabei werden 16 verschiedene Parameter überprüft und mit einem Punktesystem ausgewertet. Hierfür werden die schlechtesten Werte dieser Parameter in einem 24 Stunden Zeitraum seit der Aufnahme dokumentiert.

Des Weiteren konnte angegeben werden, ob die Patienten schon zu Hause die nicht-invasive Beatmung (NIV) genutzt haben und wenn ja, ob dies im Continuous Positive Airway Pressure Modus (CPAP) oder Biphasic Positive Airway Pressure Modus (BIPAP) geschah. Auch eine Verwendung der NIV in der Notaufnahme oder auf der Station, von der der Patient auf die Intensivstation verlegt wurde, sowie eine vorangegangene Tracheotomie konnten dokumentiert werden.

Danach wurde entweder der Fragebogen der invasiven Beatmung oder der NIV-Teil ausgefüllt.

3.5.2. Definitionen der primären Gründe für die invasive Beatmung

Zu Beginn der Dokumentation eines jeden Patienten musste der primäre Grund für die invasive Beatmung aus den vier Gruppen akute Exazerbation einer chronischen Lungenerkrankung, akute respiratorische Insuffizienz, Koma und neuromuskuläre Erkrankungen ausgewählt werden.

Die erste Gruppe beinhaltet die COPD-Exazerbation, den Asthmaanfall und andere chronisch respiratorische Erkrankungen wie zum Beispiel die pulmonale Fibrose.

In die zweite Gruppe wurden Patienten eingeschlossen, die an moderatem oder schwerem ARDS leiden. ARDS wurde nach den Kriterien der schon erwähnten Berlin-Definition

diagnostiziert ²³. Außerdem wurden Patienten mit kongestiver Herzinsuffizienz zu dieser Gruppe gezählt. Diese Patienten hatten entweder akute kardiale Lungenödeme, schwere Dyspnoe oder einen kardiogenen Schock. Als weiterer Grund konnte Sepsis angegeben werden, die als Systemic Inflammatory Response Syndrome (SIRS) nach einer Infektion laut der alten Leitlinie von 2010 definiert wurde. Zwei der SIRS Kriterien Hypo-/Hyperthermie, Tachykardie, Tachypnoe und Leukozytose/-penie mussten hierfür erfüllt sein.

Zu der zweiten Gruppe zählten sowohl die ambulant erworbene als auch die nosokomiale Pneumonie. Kriterien für die Diagnosestellung waren neue oder größer gewordene Lungeninfiltrate bei gleichzeitigem Fieber oder Hypothermie und Leukozytose oder -penie. Weitere Ursachen für den Einschluss in diese Gruppe waren das Alter oder die geringe Belastbarkeit von postoperativen Patienten, die aus diesen Gründen nicht schnell ins Weaning überführt werden konnten. Auch Polytrauma, Aspiration, Herzstillstand und andere Ursachen, die nicht explizit erwähnt wurden, fielen in diese Kategorie.

Zur dritten Gruppe gehörten metabolische Ursachen, wie zum Beispiel die hepatische Enzephalopathie, un-/freiwillige Intoxikationen und Überdosierungen, das Schädel-Hirn-Trauma und der ischämische oder hämorrhagische Apoplex.

Die vierte und letzte Gruppe der neuromuskulären Erkrankungen war definiert als respiratorische Insuffizienz, die primär durch das periphere Nervensystem, die Muskulatur oder die motorische Endplatte entstanden war.

3.5.3. Arterielle Blutgasanalyse und Beatmungsparameter

Von Tag 0 an wurde an jedem Tag neben den Beatmungsparametern auch die arterielle Blutgasanalyse dokumentiert. Tag 0 startete mit Beatmungsbeginn und endete um 8:00 Uhr am nächsten Tag. Dieser Tag war dann Tag 1 usw.. Die Daten der Patienten wurden täglich um 8:00 Uhr erfasst.

Die Blutgasanalyse (BGA) sollte zusätzlich direkt vor dem Beatmungsbeginn und danach, wenn möglich, innerhalb der ersten Stunde nach Start der Beatmung an Tag 0 abgenommen werden. Die BGA beinhaltet u.a. die Parameter pH, PaO₂ [mmHg], PaCO₂ [mmHg], FiO₂ und SpO₂ [%].

Die Beatmungsparameter und der Beatmungsmodus wurden innerhalb der ersten Stunde nach der Intubation und täglich zeitgleich mit der BGA dokumentiert bzw. wenn dies nicht möglich war, um 8:00 Uhr.

Am Anfang der Beatmung wurde für jeden Patienten Typ und Hersteller des Beatmungsgerätes dokumentiert. Zusätzlich wurde der Beatmungsmodus dokumentiert. Es konnte zwischen zehn verschiedenen Beatmungsmodi ausgewählt werden, wobei neun vorgegeben waren und einer variabel wählbar war.

Weitere erfasste Beatmungsparameter waren:

- Atemfrequenz [min^{-1}] aufgeteilt in totale Atemfrequenz und im Beatmungsgerät eingestellte Atemfrequenz,
- Tidalvolumen [ml],
- Pmax [cmH_2O],
- Pplat [cmH_2O] und
- PEEP [cmH_2O].

3.5.4. Komplikationen und Organversagen im Verlauf der Beatmung

Während des Erhebungszeitraumes wurden kritische Ereignisse oder Komplikationen (auch beatmungsassoziierte) erfasst. Als erstes konnte ein Barotrauma im Rahmen der maschinellen Beatmung angegeben werden, welches als Luftaustritt im Rahmen eines Pneumothorax, Pneumomediastinums, Pneumoperikardiums oder subkutanen Emphysems aufgetreten war. Barotraumatata im Rahmen eines Thoraxtraumas oder Pneumothoraces nach Anlage von zentralen Venenkathetern wurden nicht mitgezählt.

Außerdem konnte die Diagnose „beatmungsassoziierte Pneumonie“ notiert werden, wenn diese von dem behandelnden Arzt gestellt wurde oder der Patient eine spezifische antimikrobielle Therapie für diese Erkrankung bekam.

Sepsis und ARDS konnten nach den oben genannten Kriterien erfasst werden.

Eine auf der Intensivstation erworbene Schwäche (ICU-acquired weakness, ICUAW) musste folgende Kriterien erfüllen, um dokumentiert zu werden:

- Neue, diffuse, schlaffe und symmetrische Schwäche mit einem MRC Score <48 in allen untersuchten Extremitäten,
- Klarer Beginn nach einer schweren Erkrankung und
- Hirnnervenfunktion weiterhin intakt.

Des Weiteren wurde der Bilirubinwert [mg/dl] erhoben. Zur Einschätzung der Nierenfunktion wurden der Kreatininwert [mg/dl], der Einsatz eines Nierenersatzverfahrens und die Urinausscheidung < 500 ml/Tag erfasst.

3.5.5. Beatmungsentwöhnung und Extubation

Die Entwöhnung von der Beatmung, das sog. Weaning, wurde sowohl im ersten als auch bei Versagen im zweiten Versuch erfasst und bei jedem Versuch die jeweils gewählte Entwöhnungsstrategie dokumentiert. Zum einen wurde die angewandte Strategie des Spontanatemversuches dokumentiert mit der Wahl zwischen:

- T-Stück,
- CPAP und

- Druckunterstützung $< 7 \text{ cmH}_2\text{O}$.

Zum anderen wurde die Methode für die allmähliche Reduzierung der Atemhilfe, zum Beispiel Druckunterstützung, SIMV-PSV oder PSV erfasst. Außerdem wurde beim Weaning-Versagen die zugrundeliegende Ursache aufgeführt. Folgende Möglichkeiten standen zur Auswahl:

- Verstärkte Atemarbeit mit Einsatz der Atemhilfsmuskulatur, paradoxe Abdomenbewegungen und schnelle, flache Atmung,
- Hypoxie bei einem $\text{SaO}_2 < 90\%$ und einem $\text{FiO}_2 > 0,5$,
- Respiratorische Azidose bei einem $\text{pH} < 7,3$ und einem $\text{PaCO}_2 > 50 \text{ mmHg}$,
- Eingetrübtes Bewusstsein,
- Hämodynamische Probleme wie Hyper-, Hypotension oder Arrhythmien und
- Andere Gründe.

Der Zeitpunkt der Extubation wurde dokumentiert und zusätzlich wurde eine Aussage darüber getroffen, ob die Extubation geplant oder ungeplant war. Wenn im Verlauf eine erneute Intubation notwendig war, konnten verschiedene Gründe als Ursache angegeben werden:

- Obere Atemwegsobstruktion, erkennbar durch inspiratorischen Stridor bei respiratorischem Stress oder einem Glottisödem,
- Vermehrtes Bronchialsekret,
- Verstärkte Atemarbeit,
- Kongestive Herzinsuffizienz und
- Eingetrübtes Bewusstsein.

Außerdem wurde erhoben, ob eine Tracheotomie im Verlauf perkutan oder offen chirurgisch durchgeführt wurde.

3.5.6. Outcome

Für das Outcome war zum einen das Überleben der Patienten entscheidend und ihr Entlassungsdatum von der Intensivstation und aus dem Krankenhaus. Zum anderen wurde erfasst, wohin die Patienten entlassen wurden. Dazu gab es die Möglichkeit nach Hause, Rehabilitation, Pflegeheim oder andere periphere Krankenhäuser auszuwählen.

Eine Therapiezieländerung mit Abbruch der Intensivtherapie wurde mit Entscheidungsdatum ebenfalls dokumentiert.

3.5.7. Nicht-invasive Beatmung (NIV)

Bei der Dokumentation der NIV wurde der primäre Grund erfasst. Dabei konnte man wieder aus fünf verschiedenen Gruppen auswählen:

- Hyperkapnie,
- Hypoxämie,

- neurologische oder neuromuskuläre Erkrankungen und
- Patientenverfügungen, die keine Intubation mehr zulassen.

Die ersten beiden Gruppen beinhalteten die gleichen Ursachen, wie die Gruppen 1 und 2 der invasiven Beatmung. Bei Hyperkapnie sind das die akute Exazerbation der COPD, ein Asthmaanfall oder eine andere chronische Lungenerkrankung. Die Hypoxämie beinhaltet postoperative Patienten, Polytrauma, Sepsis, Aspiration, Pneumonie, ARDS, kongestive Herzinsuffizienz, Herzstillstand und weitere nicht aufgeführte Gründe. Die dritte Gruppe kombiniert die Ursachen der Gruppen 3 und 4. Damit schließt sie sowohl das Koma mit den jeweiligen Ursachen als auch die neuromuskulären Erkrankungen mit ein.

Bei jedem Patienten wurden Typ und Hersteller des Beatmungsgerätes erfasst, und ebenso die Form der verwendeten Atemmaske (Mund-und-Nasen-Maske, Gesichtsmaske, Nasenmaske oder Helm).

Die BGA und die Beatmungsparameter der NIV-Patienten wurden nach jedem Wechsel der Beatmungseinstellungen erfasst und dokumentiert. Zusätzlich wurde, wenn möglich, die BGA auch vor Beginn der NIV-Therapie notiert. Die BGA enthielt, wie auch bei der invasiven Beatmung, den pH, PaO₂ [mmHg], PaCO₂ [mmHg], SaO₂ [%] und FiO₂. Zusätzlich wurde bei der NIV noch der Base Excess [mmol/l] erfasst. Im Gegensatz zur invasiven Beatmung, konnte die BGA sowohl über einen arteriellen, als auch über einen venösen Zugang gewonnen werden.

Die zu erfassenden Beatmungsparameter waren:

- Beatmungsmodus,
- Positiver inspiratorischer Atemwegsdruck (IPAP),
- Positiver expiratorischer Atemwegsdruck (EPAP/PEEP),
- Tidalvolumen [ml] und
- Atemfrequenz [min⁻¹].

Außerdem wurde festgehalten, ob die Patienten vorher intubiert waren oder ob sie primär mit NIV beatmet wurden. Des Weiteren wurde der Erfolg der NIV erfasst, bzw. ein Versagen der NIV-Therapie dokumentiert. In diesem Fall wurden folgende Parameter zum Zeitpunkt des Versagens festgehalten: IPAP, EPAP/PEEP, Atemfrequenz [min⁻¹], Tidalvolumen [ml], Herzfrequenz [min⁻¹], arterieller Blutdruck [mmHg] und der Richmond Agitation Sedation Scale (RASS)-Score.

Außerdem wurde die Ursache für das Versagen aus folgenden Gründen ausgewählt:

- Hyperkapnie,
- Hypoxämie,
- Vermehrtes Bronchialsekret,
- Verstärkte Atemarbeit,
- Enzephalopathie oder Koma,

- Herzstillstand,
- Hypotension oder Schock und
- Schlechte Patientenmitarbeit oder Intoleranz der NIV.

Wenn das NIV-Versagen eingetreten war, musste zusätzlich noch angegeben werden, ob es infolgedessen zur Intubation kam und wenn ja, zu welchem Zeitpunkt. Zudem erfasste die Studie, ob die NIV als Prävention oder zur Behandlung von respiratorischem Stress nach der Extubation eingesetzt wurde.

3.5.8. Ethische Grundsätze

Die Ethikkommission der medizinischen Fakultät der Universität zu Köln stimmte dem Antrag für die Studie mit der Nummer 16-178 zu.

Die Pseudonymisierung der Patienten wurde folgendermaßen gewährleistet: Zum einen wurde sie durch das Studiendesign und die Nutzung anonymer Umfragebögen gewahrt. Zum anderen bekam jeder Patient einen eigenen Studiencode, der nicht auf den Patienten zurückzuführen war.

Durch das angewandte Studiendesign wurden die Beatmungsstrategien der einzelnen Intensivstationen nicht verändert. Daher kam es auch nicht zu studienbezogenen Komplikationen. Zudem konnte durch den kurzen Zeitrahmen schnell und zuverlässig mit der Auswertung der Daten begonnen werden. Aus diesem Grund kann diese Studie viel schneller über mögliche Defizite in der Beatmungspraxis informieren, als es bei einer randomisierten, klinischen Studie möglich gewesen wäre.

3.6 Definition der Fragestellung

Die vorliegende Analyse hat als primären Zielparameter die lungenprotektive Beatmung mit den drei Unterparametern niedrige Tidalvolumina, adäquate PEEP-Werte und Plateaudrücke unter 30 cmH₂O. Daraus ergibt sich die Frage ob dieser Zielparameter im Gesamtkollektiv und im Stationsvergleich erfolgreich umgesetzt wurde, oder ob die Patienten mit zu hohen Tidalvolumina und nicht optimalen Beatmungsdrücken beatmet wurden.

Ein weiterer Teil dieser Arbeit stellt die Korrelation der lungenprotektiven Beatmung mit dem Outcome und möglichen Komplikationen dar. Hierbei werden die Stationen miteinander verglichen und hinsichtlich ihrer Komplikationsrate und dem Überleben der Patienten ausgewertet. Dies wird in Bezug zu den angewandten Beatmungstechniken auf den Stationen gesetzt und somit untersucht ob sich ein Zusammenhang zwischen lungenprotektiver Beatmung und dem Outcome finden lässt.

3.7 Statistische Auswertung

3.7.1. Datenbankerstellung

Die statistische Auswertung wurde mit Hilfe von IBM SPSS Statistics 24.0 (Chicago, USA) erstellt.

Die Daten der einzelnen Patienten wurden in Microsoft Excel Office 365 ProPlus (Redmond, USA) zusammengetragen und anschließend nach SPSS übertragen. Dabei wurden Variablenlabels und Werte in SPSS definiert.

Nach Abschluss des Erhebungszeitraumes erfolgte eine Prüfung des Datensatzes auf Vollständigkeit vor allem auch hinsichtlich der Aufenthaltsdauer im Krankenhaus.

Wenn es bei den Patienten zu gewissen Punkten keine Daten gab, wurden diese als fehlende Werte nicht in die Auswertung eingeschlossen. Dann wurden auch keine entsprechenden Daten im Datensatz dokumentiert. Die Werte wurden auf inhaltliche Plausibilität geprüft und wenn die Werte nicht den sinnhaften Dimensionen entsprachen, wurden sie nicht in die Berechnung mit einbezogen. Dies gilt auch für die Angabe des Datums. Die logische Reihenfolge der Stationsaufnahme, des Beatmungsbeginns und der Stationsentlassung musste gegeben sein, um die Daten verwenden zu können.

3.7.2. Deskriptive Auswertung

Um die einzelnen Stationen miteinander zu vergleichen wurden die verschiedenen Parameter tabellarisch ausgewertet. Diese Parameter beinhalteten die Stammdaten der Patientenkollektive, Beatmungsparameter und Angaben zu Komplikationen und dem Behandlungsergebnis. So konnte ein erster Überblick über die Daten gewonnen werden.

Die Werte wurden entweder als Gesamtanzahl (n) mit der prozentualen Verteilung aufgeführt oder es wurde der durchschnittliche Wert angegeben. Dies geschah mit Hilfe von Mittelwertberechnungen, wobei zusätzlich immer der Median errechnet wurde. Dadurch ließ sich ein erster Blick auf die Symmetrie der Daten ermöglichen. Eine mögliche Normalverteilung der Werte wurde außerdem durch die Verteilung der Daten im Histogramm beurteilt.

Für die mittlere Aufenthaltsdauer auf der Intensivstation und im Krankenhaus sowie für die Beatmungsdauer wurde zusätzlich zum Mittelwert noch das 95%-Konfidenzintervall angegeben.

3.7.3. Univariable statistische Analyse

Um die einzelnen Parameter statistisch zu vergleichen, wurde für jede Variable eine univariable Analyse durchgeführt. Für kategorielle Variablen wurde der Chi²-Test verwendet und für quantitative Variablen eine einfaktorielle Varianzanalyse. Es handelte sich jeweils um zweiseitige statistische Tests.

Die Nullhypothesen wurden dann abgelehnt, wenn das Signifikanzniveau bei $p < 0,05$ lag.

3.7.4. Berechnung der Beatmungsparameter und Erstellung der Grenzwerte Überschreitung des Tidalvolumens

Für die Beurteilung der verwendeten Tidalvolumina wurden diese auf das für jeden Patienten errechnete Normalgewicht genormt. Dadurch ergaben sich vergleichbare Werte für jeden Beatmungstag. Als Grenze wurden zum einen 8 ml/kg KG und zum anderen 6 ml/kg KG gewählt. So konnte untersucht werden, ob die Grenzen der lungenprotektiven Beatmung von 6-8 ml/kg KG bei Nicht-ARDS Patienten überschritten wurden und eine differenzierte Aussage zu allen drei Bereichen (<6 ml/kg KG, 6-8 ml/kg KG und >8 ml/kg KG) getroffen werden.

Zunächst wurde für jeden Beatmungstag bestimmt, ob die jeweiligen Grenzen überschritten wurden oder nicht. Daraus ergab sich pro Bereich eine kategoriale Einschätzung der Überschreitung.

Zusätzlich wurde noch die Höhe der Überschreitungen in die Berechnungen mit einbezogen. Dafür wurde für jeden Patienten die Summe der Überschreitungen ausgerechnet. Diese Summe wurde dann durch die Anzahl der Beatmungstage geteilt. Dadurch wurden die Überschreitungen auf die gesamte Beatmungsdauer umgelegt. Das Ergebnis war somit eine Zahl, die beschrieb, um wie viel das Tidalvolumen/Normalgewicht jeden Tag überschritten wurde. Große Werte zeigten demnach eine größere Überschreitung der festgelegten Grenzen von 6 bzw. 8 ml/kg KG.

Dieser Wert machte es möglich, die einzelnen Patienten der verschiedenen Intensivstationen zu vergleichen. Im Gegensatz dazu, wurde durch den Ansatz der kategorialen Überschreitung jeder einzelne Beatmungstag unabhängig vom Patienten erfasst und gab so einen ersten Überblick über die Überschreitungen.

FiO₂:PEEP

Zu der optimalen Einstellung des PEEP im Rahmen der lungenprotektiven Beatmung gibt es viele Studien mit unterschiedlichen Ergebnissen. Um sowohl Studien, die höhere PEEP favorisieren, als auch Studien mit niedrigeren PEEP einzubeziehen, ist ein erster Überblick über die verwendeten PEEP wichtig. Dafür wurde die Verteilung der erfassten PEEP-Werte dargestellt.

Eine weitere Möglichkeit der PEEP-Einstellung ergibt sich aus der Studie von Brower et al.³¹. Diese hat unterschiedlich hohe PEEP bei den Patienten angewendet und diese in Korrelation zum FiO₂ gesetzt. Daraus ergab sich folgende Tabelle:

Tab. 1: Empfehlung des ARDS Network zur Einstellung des PEEP anhand der erforderlichen FiO₂ ³¹

FiO ₂	0,3	0,4	0,4	0,5	0,5	0,6	0,7	0,7	0,7	0,8	0,9	0,9	0,9	1,0
PEEP [cmH ₂ O]	5	5	8	8	10	10	10	12	14	14	14	16	18	20- 24

Diese Tabelle diente als Grundlage zur Auswertung des FiO₂:PEEP-Verhältnisses. So wurde für jeden FiO₂-Wert untersucht, ob adäquate PEEP-Werte genutzt wurden. Wenn mehrere PEEP-Werte laut Tabelle für den FiO₂-Wert in Betracht kamen, wurde die gesamte Spanne der PEEP-Werte als adäquat gewertet. So wurden zum Beispiel bei einer FiO₂ von 0,4 alle PEEP-Werte zwischen 5 cmH₂O und 8 cmH₂O als keine Abweichung notiert. Abweichungen des PEEP oberhalb des in der Tabelle vorgeschriebenen Wertes wurden mit positiven Werten und Abweichungen des PEEP nach unten mit negativen Werten dokumentiert.

Dadurch ergab sich eine Verteilung der FiO₂:PEEP-Abweichungen von der Tabelle und der Mittelwert sowie der Median dieser Abweichungen konnte berechnet werden.

Bilirubin und Kreatinin

Neben den Parametern der Beatmung wurden die Laborparameter Bilirubin und Kreatinin erhoben, um eine Einschätzung der Nieren- und Leberfunktion zu erhalten. Um die Bilirubin- und Kreatininwerte auszuwerten, wurden die entsprechenden Normalwerte des Zentrallabors der untersuchten Uniklinik als Einteilung zu Grunde gelegt. So wurde eine Überschreitung der jeweiligen Grenzwerte erfasst und für jede Station ausgewertet.

Bei Bilirubin lag dieser Grenzwert bei >1,2 mg/dl. Das heißt, dass alle Werte über 1,2 mg/dl als pathologisch gewertet wurden und in die Auswertung eingerechnet wurden.

Die Kreatininingrenzwerte sind geschlechterspezifisch. Bei den Männern gilt ein Wert >1,1 mg/dl und bei den Frauen >0,9 mg/dl als pathologisch. Dementsprechend wurden je nach Geschlecht andere Grenzwerte bei der Auswertung benutzt und die Anzahl der Überschreitungen dann als Gesamtanzahl pro Station angegeben.

Um eine weitere Subgruppenanalyse durchzuführen und den Einfluss der Bilirubin- und Kreatininwerten auf die Beatmung zu untersuchen, wurden die nicht-neurochirurgischen Patienten in zwei Gruppen aufgeteilt. Zu der ersten Gruppe gehörten diejenigen Patienten, die erhöhte Bilirubin- oder Kreatininwerte hatten oder eine verminderte Urinausscheidung unter 500 ml pro Tag hatten bzw. bei denen ein Nierenersatzverfahren angewendet wurde. Die zweite Gruppe umfasste alle anderen nicht-neurochirurgischen Patienten.

3.7.5. Kaplan-Meier-Schätzer

Um verschiedene Werte mit time-to-event Charakter auszuwerten, wurden die Überlebenszeitanalysen nach Kaplan Meier verwendet.

Um das Überleben der Patienten darzustellen, wurde als Ereignis das Versterben der Patienten definiert. Dadurch wurde zusätzlich die mittlere Überlebensdauer bestimmt.

Für die erfolgreiche Entlassung der Patienten wurde zum einen die Entlassung von der Intensivstation und zum anderen die Entlassung aus dem Krankenhaus berücksichtigt. Dafür wurde als Zeit die Aufenthaltsdauer auf der Intensivstation bzw. im Krankenhaus genommen. Die Entlassung war demnach das erforderliche Ereignis. Durch den Kaplan-Meier-Schätzer ließ sich die mittlere Aufenthaltsdauer der Patienten auf der Intensivstation und im Krankenhaus bestimmen.

Zur Darstellung der erfolgreichen Beatmungsbeendigung wurde die Beatmungsdauer als Variable mit time-to-event Charakter gewählt. Die erfolgreiche Beatmung war definiert als Beendigung der Beatmung bei gleichzeitigem Überleben des Patienten. Dadurch konnte die mittlere Beatmungsdauer der Patienten bestimmt werden.

Bei allen Überlebenszeitanalysen konnten neben den mittleren Überlebens-, Aufenthalts- und Beatmungsdauern auch jeweils das zugehörige 95% - Konfidenzintervall erstellt werden.

4. Ergebnisse

4.1 Rekrutierung

Die drei in der Uniklinik untersuchten Intensivstationen (A, B und C) entsprachen den zuvor definierten Kriterien für die Studienteilnahme. Die Stationen B und C waren Intensivstationen mit einem überwiegend gemischt chirurgischen Patientenkollektiv, während es sich bei Station A um eine neurochirurgische Intensivstation handelte. Die Stationen A und B hatten jeweils 14 Betten, die Station C hatte zum Zeitpunkt der Datenerhebung zehn Betten. Daher war das Kriterium der Mindestanzahl von sechs Betten erfüllt. Insgesamt ergab sich eine Bettenanzahl von 38 Betten.

4.2 Patientenkollektiv

Über den Zeitraum vom 01.06.2016 bis 30.06.2016 wurden insgesamt 210 Patienten aufgenommen. Auf der Station A waren dies 76 Patienten, auf der Station B lagen 75 Patienten und auf der Station C wurden in diesem Zeitraum 59 Patienten behandelt.

Von diesen 210 Patienten erfüllten 51 (24,3%) die Kriterien zum Einschluss in die Studie. Elf Patienten lagen auf der Station A (21,6%), 17 (33,3%) auf der Station B und 23 (45,1%) auf der Station C. Von diesen 51 Patienten wurden sieben Patienten nicht-invasiv beatmet. Drei dieser Patienten wurden auch im Verlauf nicht-invasiv beatmet, während die vier anderen vor oder nach der NIV-Therapie invasiv beatmet wurden. Somit bleiben 48 Patienten, die invasiv beatmet wurden.

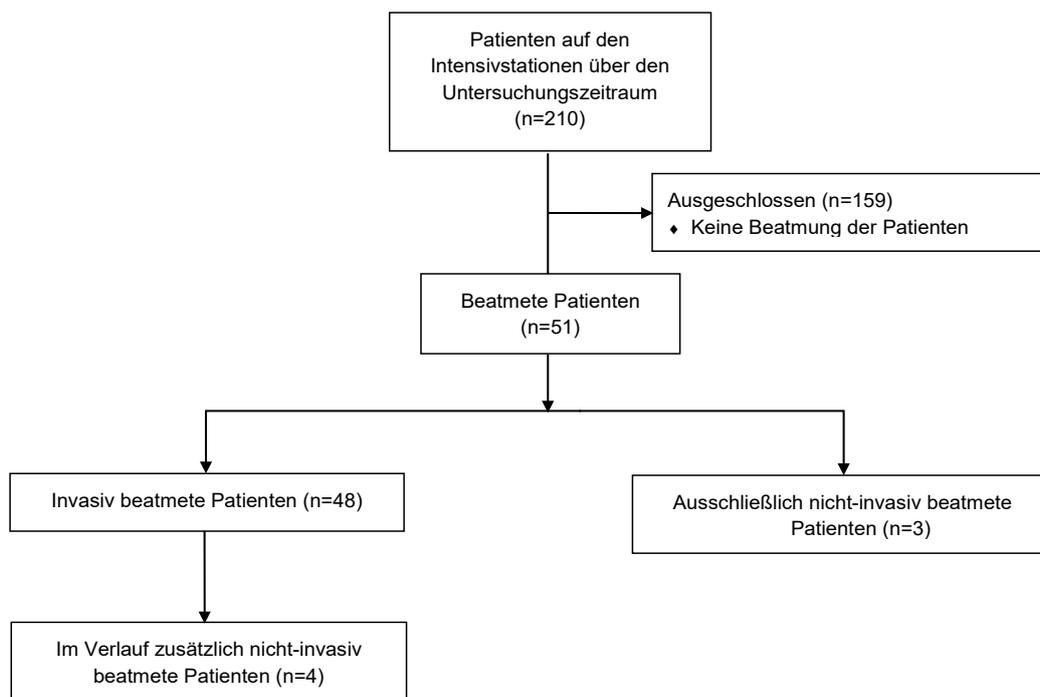


Abb. 1: Flussdiagramm nach CONSORT zur Darstellung der Stichprobengröße

Die Patienten der drei Stationen unterschieden sich in ihren demografischen Merkmalen (Tab. 2) nicht signifikant. Von den 51 Patienten waren 31 männlich (60,8%) und 20 weiblich (39,2%). Während das Geschlechterverhältnis auf der Station A ausgeglichen war, waren es auf der Station C mit 65,2% mehr Männer als Frauen.

Das mittlere Alter der Patienten betrug 62,9 Jahre. Auf der Station A waren die Patienten im Mittel 67,5 Jahre und damit älter als auf der Station C mit 58,9 Jahren. Dies zeigt auch der Median, der bei der Station A 74 Jahre betrug.

Auch der SAPS II zeigte Unterschiede zwischen den jeweiligen Stationen. Der mittlere SAPS II lag bei 44,2 Punkte. Damit entsprach er in etwa dem Score der Stationen B und C. Auf der Station A hingegen war der SAPS II mit 52,2 Punkten höher. Der ermittelte BMI zeigte bei den Stationen am wenigsten Schwankungen. Der Mittelwert des BMI aller Patienten lag bei 27,7 kg/m².

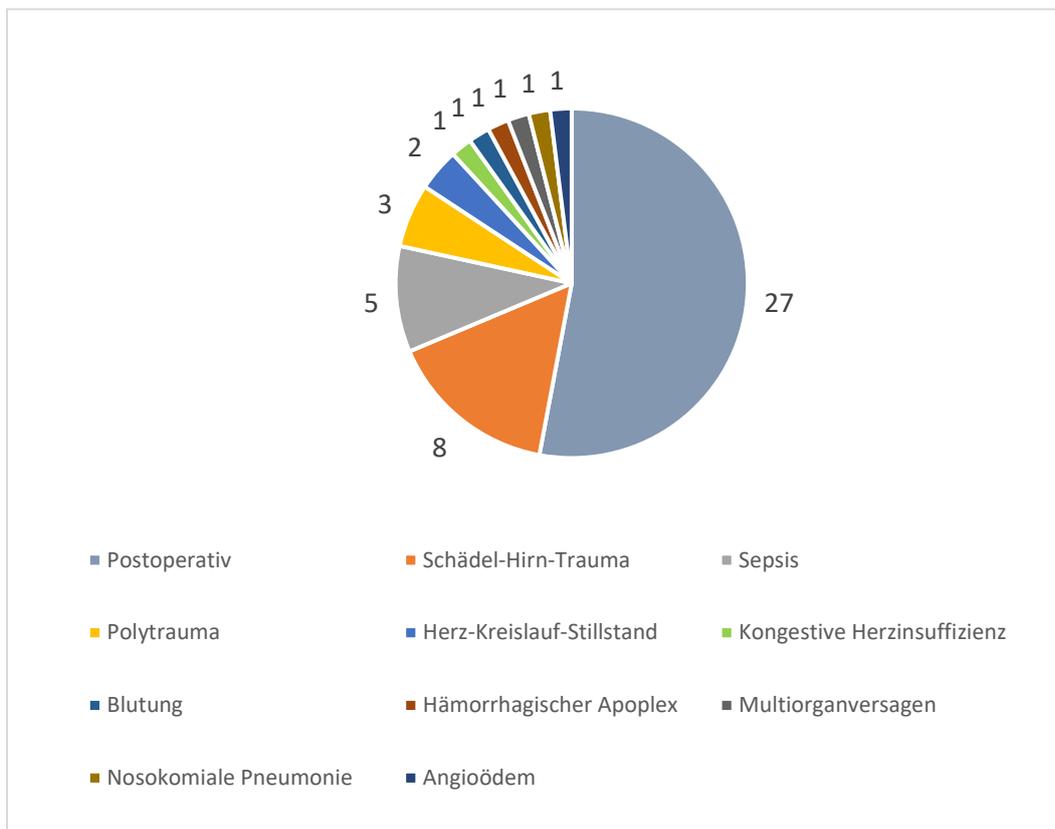


Abb. 2: Verteilung der Gründe für die Beatmung aller drei Stationen (n=51)

Wie in der Abbildung 2 dargestellt, bildeten die postoperativen Patienten mit 52,9% die größte Untergruppe. Insgesamt war dies die größte Kohorte mit 65% der Patienten auf den Stationen B und C, jedoch nur einem einzigen Patienten auf der Station A.

Umgekehrt betraf das Schädel-Hirn-Trauma 63,6% der Patienten der Station A, während auf der Station B nur ein Patient und auf der Station C kein Patient zu dieser Gruppe zählte. Mit acht von 51 Patienten handelte es sich dennoch um die zweitgrößte Patientengruppe.

Fünf der 51 Patienten (9,8%) wurden aufgrund einer Sepsis invasiv beatmet. Die Verteilung war mit einem Patienten auf der Station A und jeweils zwei auf den Stationen B und C ausgeglichen.

5,9% der Patienten wurden als Polytrauma eingeliefert und beatmet und 3,9% hatten einen Herz-Kreislauf-Stillstand erlitten. Nur jeweils einen Patienten auf der Station C betraf eine schwere Blutung, Multiorganversagen, eine nosokomiale Pneumonie oder ein Angioödem.

Auf der Station B befand sich noch ein Patient mit einer kongestiven Herzinsuffizienz als Grund der Beatmung und auf der Station A ein Patient mit einem hämorrhagischen Apoplex.

Keiner der Patienten wurde schon zuhause, in der Notaufnahme oder auf der Normalstation mit NIV behandelt. Insgesamt waren sechs Patienten schon tracheotomiert auf die Intensivstation gekommen. Davon war ein Patient der Station A zugehörig, zwei der Station B und drei Patienten der Station C.

Tab. 2: Demografische Patientenmerkmale

	Gesamt	Station A	Station B	Station C	p-Wert
Patientenanzahl <i>n</i> (%)	51 (100%)	11 (100%)	17 (100%)	23 (100%)	
Geschlecht männlich/weiblich <i>Mittelwert {Median}</i>	31 (60,8%) / 20 (39,2%)	6 (54,6%) / 5 (45,5%)	10 (58,8%) / 7 (41,2%)	15 (65,2%) / 8 (34,8%)	0,82 ^x
Alter, Jahre <i>Mittelwert {Median}</i>	62,9 / {65}	67,5 / {74}	65,3 / {69}	58,9 / {58}	0,215 [*]
SAPS II Punkte <i>Mittelwert {Median}</i>	44,2 / {43}	52,2 / {53}	41,8 / {38}	42,2 / {35}	0,31 [*]
BMI, kg/m ² <i>Mittelwert {Median}</i>	27,7 / {26,0}	26,1 / {24,1}	26,1 / {24,2}	29,6 / {27,7}	0,214 [*]
Grund für die Beatmung					0,776 [*]
Postoperativ <i>n</i> (%)	27 (52,9%)	1 (9,1%)	11 (64,7%)	15 (65,2%)	
Schädel-Hirn-Trauma <i>n</i> (%)	8 (15,7%)	7 (63,6%)	1 (5,9%)	0 (0%)	
Sepsis <i>n</i> (%)	5 (9,8%)	1 (9,1%)	2 (11,8%)	2 (8,7%)	
Polytrauma <i>n</i> (%)	3 (5,9%)	0 (0%)	1 (5,9%)	2 (8,7%)	
Herz-Kreislauf- Stillstand <i>n</i> (%)	2 (3,9%)	1 (9,1%)	1 (5,9%)	0 (0%)	
Kongestive Herzinsuffizienz <i>n</i> (%)	1 (1,9%)	0 (0%)	1 (5,9%)	0 (0%)	
Blutung <i>n</i> (%)	1 (1,9%)	0 (0%)	0 (0%)	1 (4,4%)	
Hämorrhagischer Apoplex <i>n</i> (%)	1 (1,9%)	1 (9,1%)	0 (0%)	0 (0%)	
Multiorganversagen <i>n</i> (%)	1 (1,9%)	0 (0%)	0 (0%)	1 (4,4%)	
Nosokomiale Pneumonie <i>n</i> (%)	1 (1,9%)	0 (0%)	0 (0%)	1 (4,4%)	
Angioödem <i>n</i> (%)	1 (1,9%)	0 (0%)	0 (0%)	1 (4,4%)	
Vorherige Tracheotomie <i>n</i> (%)	6 (11,8%)	1 (9,1%)	2 (11,8%)	3 (13,0%)	0,949 [*]

^x Chi² Test

^{*} Einfaktorielle Varianzanalyse

4.3 Beatmungsparameter

Von 51 Patienten wurden 48 (94,1%) invasiv beatmet. Diese Patienten wurden über einen Beatmungszeitraum von bis zu maximal 29 Tagen beobachtet. So ergab sich für die Beatmungsparameter eine Gesamtzahl von 524 Beobachtungszeitpunkten. Dabei entfielen 187 auf die Station A, 125 auf die Station B und 212 auf die Station C (Tab. 3).

Alle Patienten wurden mit einem Beatmungsgerät von Dräger (Lübeck, Deutschland) beatmet. Dabei wurde bei 34 Patienten das Modell Evita 4 und bei 17 Patienten Evita XL benutzt. Während auf der Station A alle Patienten mit Evita 4 beatmet wurden, war der Gebrauch der zwei Gerätetypen auf der Station B ausgeglichen.

Während auf den Stationen B und C ausschließlich Biphasic Positive Airway Pressure (BIPAP) und Continuous Positive Airway Pressure (CPAP) eingesetzt wurden, zeigte sich auf der Station A, dass zwei zusätzliche Beatmungsmodi zum Einsatz kamen. Zwei Patienten der Station A wurden zwischendurch mit Pressure Regulated Volume Controlled (PRVC) beatmet und ein Patient mit Pressure Support Ventilation (PSV). Insgesamt wurde zu 62% BIPAP und zu 35,1% CPAP verwendet. Dabei wurde jeder Beatmungstag einzeln gewertet, so dass Patienten die sowohl mit BIPAP als auch mit CPAP beatmet wurde, in beiden Gruppen repräsentiert sind.

Das Tidalvolumen wurde durch zwei verschiedene Auswertungen dargestellt.

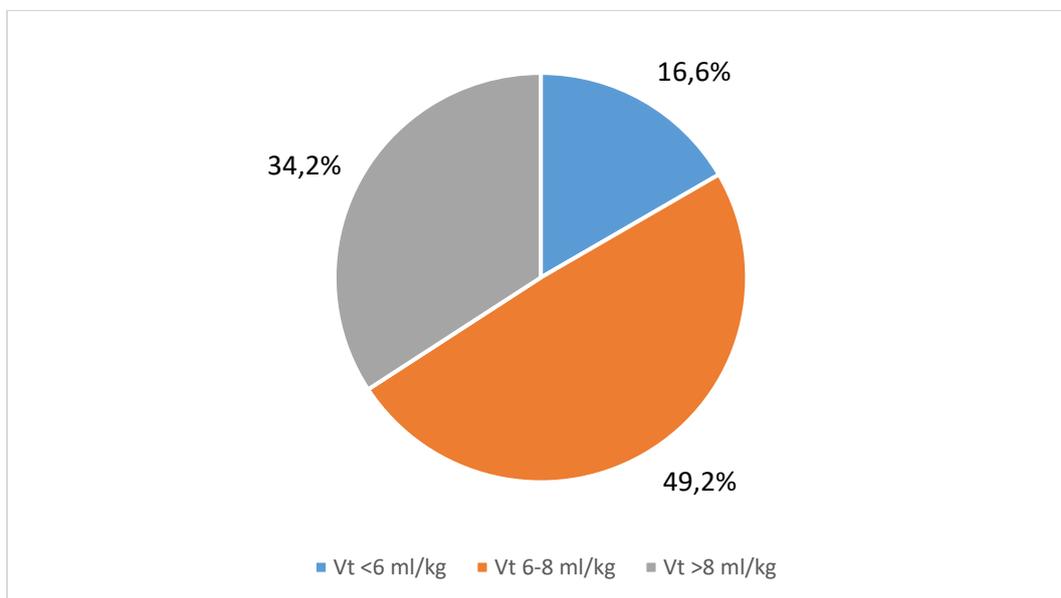


Abb. 3: Verteilung der Tidalvolumina (Vt) aller beatmeten Patienten auf den Intensivstationen

Zum einen wurde für jede Station ermittelt, wie viele der 524 Tidalvolumina unter 6 ml/kg KG lagen. Dabei zeigten sich statistisch signifikante Unterschiede zwischen den drei Stationen. Auf den Stationen B und C war dies bei jeweils 16,8% und 25,9% der Fall, während dies bei

der Station A nur auf 5,9% zutraf. Daraus ergab sich eine Gesamtprozentzahl von 16,6%. Der Großteil der Tidalvolumina der Station A (54,5%) lag über 8 ml/kg KG ($p < 0,001$). Auf den Stationen B und C war dies nur bei 25,6% bzw. 21,2% der Fall. Werte zwischen 6 und 8 ml/kg KG bildeten mit 49,2% den Durchschnitt, wobei hier die Station A mit 39,6% die wenigsten Werte in diesem Bereich hatte ($p = 0,003$).

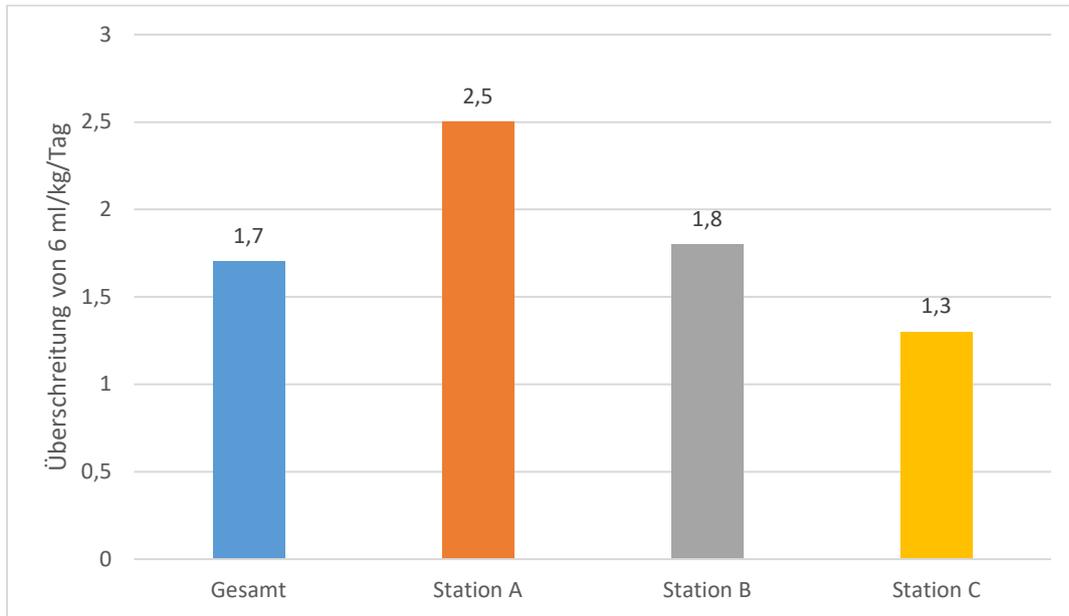


Abb. 4: Mittelwerte der Überschreitungen von 6 ml/kg KG der Tidalvolumina über die gesamte Beatmungsdauer aller beatmeten Patienten

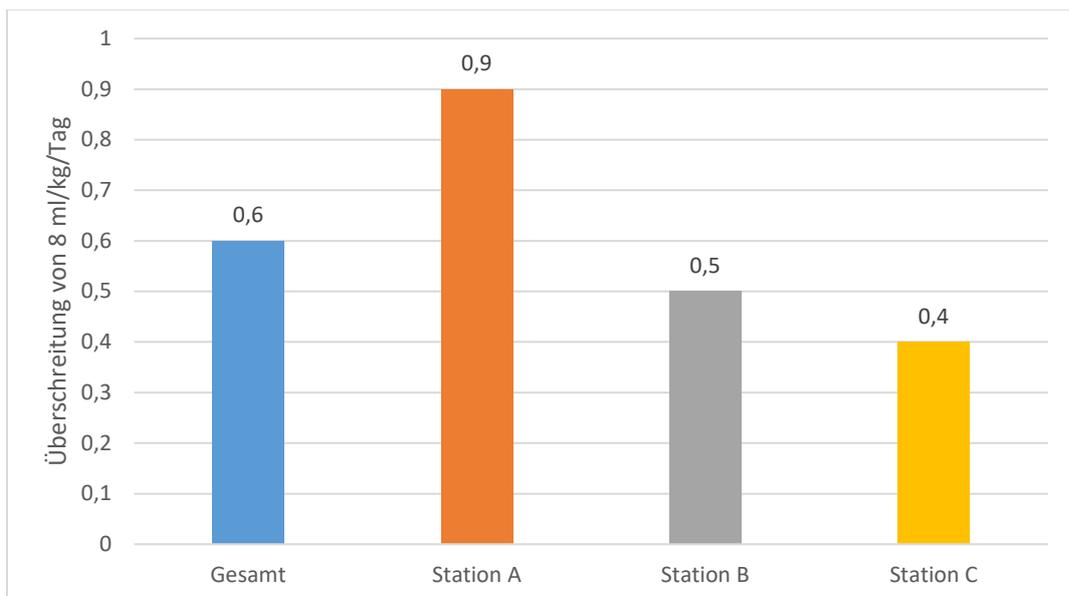


Abb. 5: Mittelwerte der Überschreitungen von 8 ml/kg KG der Tidalvolumina über die gesamte Beatmungsdauer aller beatmeten Patienten

Zum anderen zeigten auch die Überschreitungen pro Patient statistisch signifikante Unterschiede. Die durchschnittliche Überschreitung von 6 ml/kg pro Beatmungsdauer lag bei 1,7 ml/kg/Tag ($p=0,005$), während die von 8 ml/kg pro Beatmungsdauer bei 0,6 ml/kg/Tag lag ($p=0,048$). Im Vergleich der einzelnen Stationen fiel auf, dass die Station A mit 2,5 ml/kg/Tag bzw. 0,9 ml/kg/Tag beides Mal höhere Überschreitungen hatte als die Stationen B oder C.

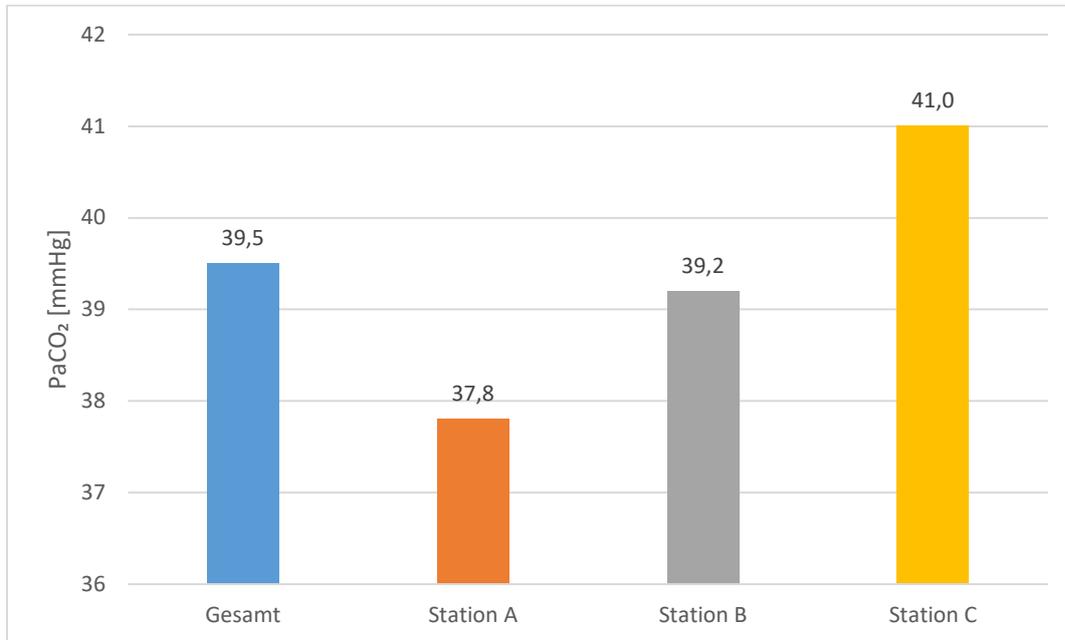


Abb. 6: Verteilung der PaCO₂-Mittelwerte aller beatmeten Patienten [mmHg]

Der PaCO₂ lag im Mittel bei 39,5 mmHg. Die Patienten der Station A hatten mit 37,8 mmHg einen statistisch signifikant niedrigeren PaCO₂ als die Stationen B (39,2 mmHg) oder C (41,0 mmHg) ($p<0,001$).

Der Mittelwert des PEEP lag bei 8,2 cmH₂O, wobei die Station C mit 9,1 cmH₂O über dem Mittel lag. Allerdings lag der Median der Station C bei 8,0 cmH₂O, was dem Median der gesamten PEEP-Werte entsprach ($p<0,001$).

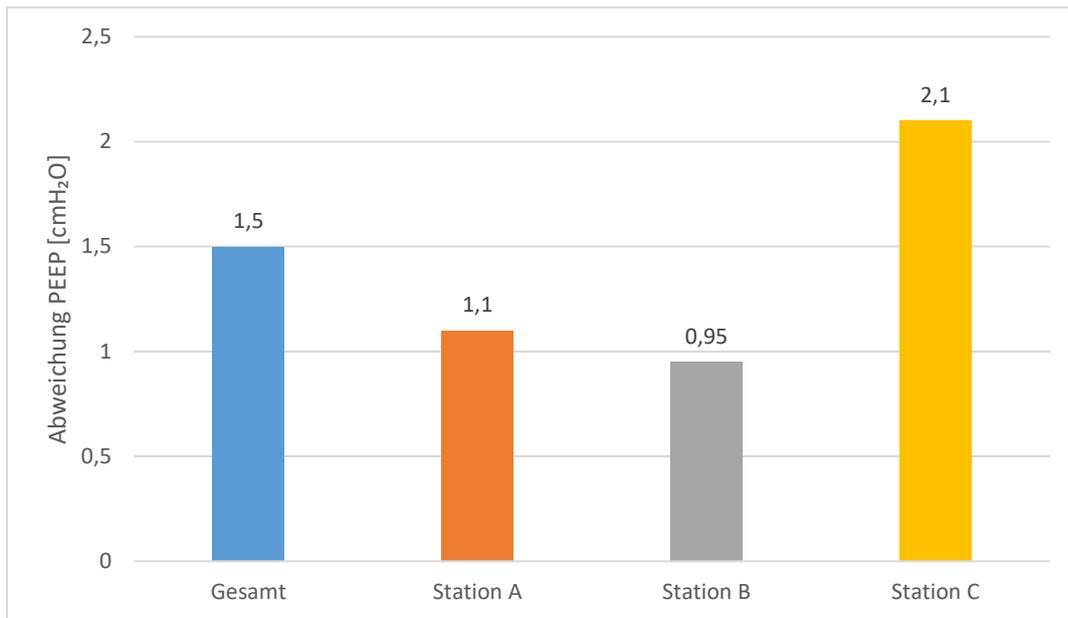


Abb. 7: Abweichungen der PEEP-Werte von dem optimalen FiO₂:PEEP-Verhältnis laut der Tabelle des ARDS-Networks

Außerdem wurde der PEEP anhand der Tabelle des ARDS-Networks in Relation zur FiO₂ gesetzt (Abb. 7). Bei den Abweichungen des PEEP von dem adäquaten PEEP laut Tabelle wurden sowohl negative als auch positive Werte berücksichtigt. Dies ergab im Mittel eine Gesamtabweichung von 1,5 cmH₂O, wobei auch hier die Station C mit 2,1 cmH₂O über diesem Wert lag. Dies bedeutete, dass insgesamt die PEEP-Werte 1,5 cmH₂O über dem optimalen PEEP lagen. Die Stationen A und B hatten mit 1,1 cmH₂O und 0,9 cmH₂O sehr ähnliche Abweichungen. Die Einhaltung des empfohlenen FiO₂:PEEP-Verhältnisses traf auf 42,6% zu, wobei davon nur 29,6% der Werte auf der Station C betroffen waren (p<0,001). Im Falle einer Abweichung wurde in 91,2% der Fälle ein höherer PEEP als empfohlen gewählt (p=0,424). Bei den verwendeten Plateaudrücken (Pplat), lagen die Stationen nah beieinander. Der mittlere Plateaudruck betrug 18,9 cmH₂O. Der Plateaudruck lag insgesamt zu 96,4% unter dem Grenzwert von 30 cmH₂O. Die Station C hatte mit 16 Fällen die meisten Grenzwertüberschreitungen (p<0,001).

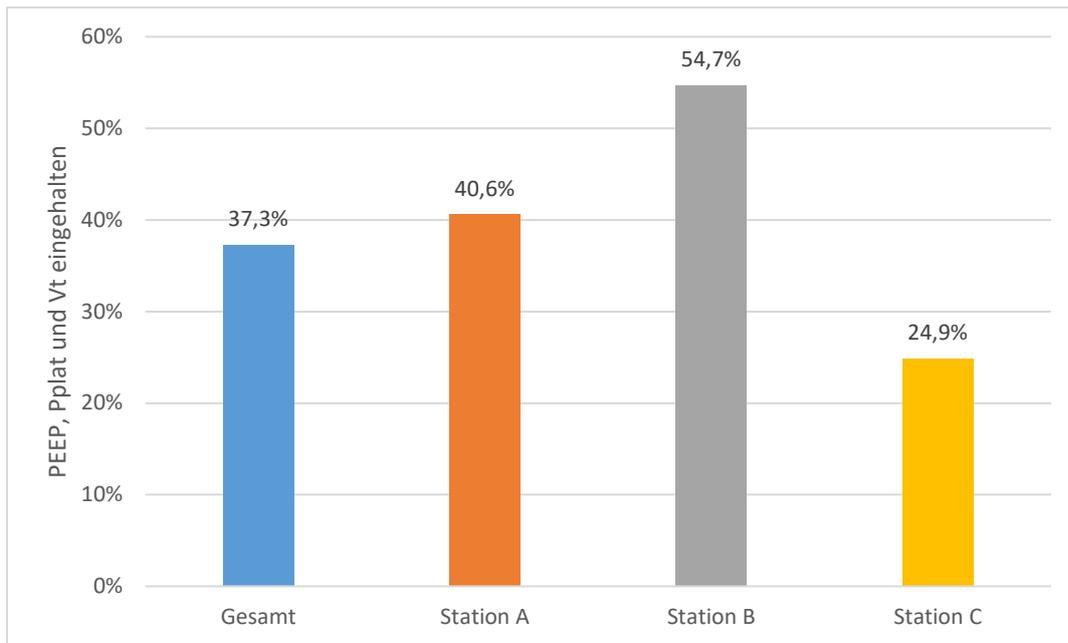


Abb. 8: Anteil der Patienten bei denen die Einhaltung des korrekten PEEP, Tidalvolumens und Plateaudruckes erreicht wurde

Das Säulendiagramm zeigt, dass alle drei Kriterien der lungenprotektiven Beatmung (niedriges Tidalvolumen, Pplat <30 cmH₂O und empfohlenes FiO₂:PEEP-Verhältnis) zu 37,3% erfüllt wurden, wobei dies auf der Station B mit 54,7% statistisch signifikant häufiger als auf der Station C mit 24,9% der Fall war (p<0,001).

Die mittlere Beatmungsdauer aller Patienten betrug 10,9 Tage, wobei der Median bei 6,5 Tagen lag. Auf der Station A war die Beatmungsdauer mit durchschnittlich 17,0 Tagen länger und auf den Stationen B und C mit 8,3 bzw. 9,6 Tagen statistisch signifikant kürzer (p=0,026).

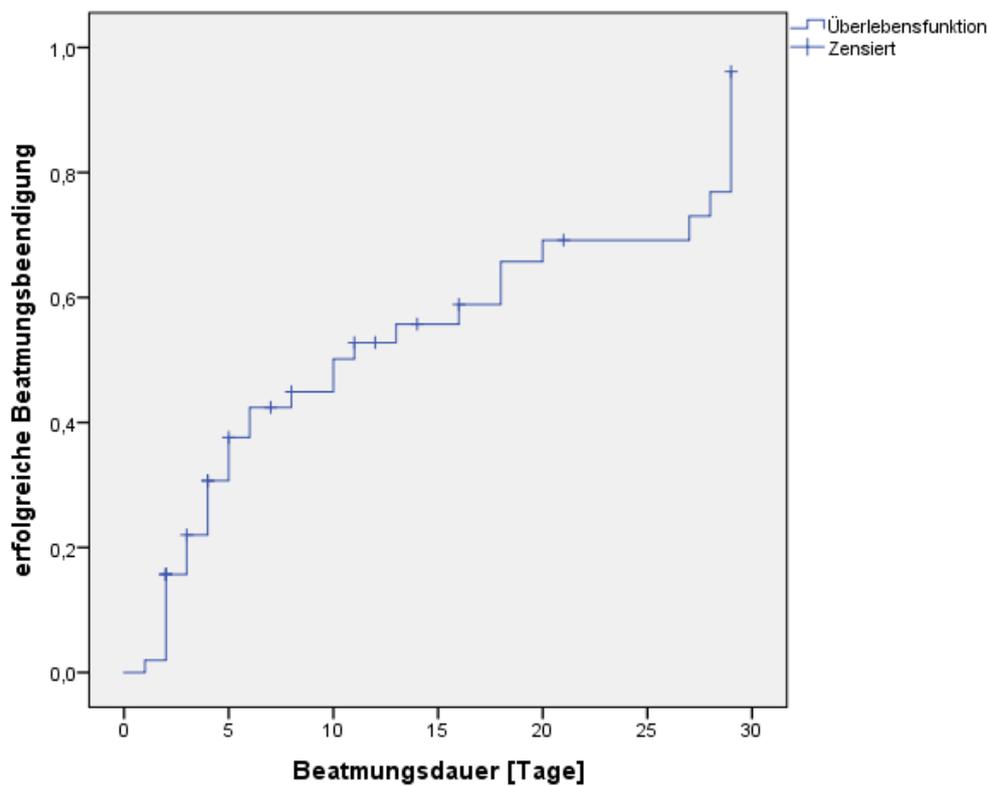


Abb. 9: mittlere Beatmungsdauer [Tage] bei erfolgreicher Beatmungsbeendigung

Mit Hilfe des Kaplan-Meier-Schätzers wurde die mittlere Beatmungsdauer bei Patienten berechnet, die erfolgreich entwöhnt werden konnten. Die erfolgreiche Beatmung war definiert als Beendigung der Beatmung bei gleichzeitigem Überleben des Patienten. Diese betrug auf alle Stationen gerechnet 14,1 Tage [KI: 10,8-17,4]. Eine statistisch signifikante Abweichung zeigte die Station A mit einer mittleren Beatmungsdauer von 20,7 Tage [KI: 14,2-27,1] ($p=0,016$).

Tab. 3: Beatmungsparameter (Vt, PaCO₂, PEEP, Pmax, Pplat, Beatmungsdauer)

	Gesamt	Station A	Station B	Station C	p-Wert
Werteanzahl <i>n</i> (%)	524 (100%)	187 (100%)	125 (100%)	212 (100%)	
Vt <6 ml/kg <i>n</i> (%)	87 (16,6%)	11 (5,9%)	21 (16,8%)	55 (25,9%)	<0,001*
Vt 6 ml/kg – 8 ml/kg <i>n</i> (%)	258 (49,2%)	74 (39,6%)	72 (57,6%)	112 (52,8%)	0,003*
Vt >8 ml/kg <i>n</i> (%)	179 (34,2%)	102 (54,5%)	32 (25,6%)	45 (21,2%)	<0,001*
PEEP [cmH ₂ O] <i>Mittelwert {Median}</i>	8,2 {8,0}	7,9 {7,0}	6,8 {6,0}	9,1 {8,0}	<0,001*
Anteil der Patienten ohne Abweichung des FiO ₂ :PEEP [cmH ₂ O] Verhältnis <i>n</i> (%)	220 (42,0%)	90 (48,1%)	67 (57,3%)	63 (29,7%)	<0,001*
PEEP Abweichung oberhalb des Grenzwertes laut ARDS-Tabelle <i>n</i> (%)	271 (91,2%)	86 (88,7%)	45 (90,0%)	140 (93,3%)	0,424*
Pplat [cmH ₂ O] <i>Mittelwert {Median}</i>	18,9 {19}	17,6 {18}	18,4 {18}	20,2 {20}	0,001*
Pplat < 30 cmH ₂ O <i>n</i> (%)	505 (96,4%)	186 (99,5%)	123 (98,4%)	196 (92,5%)	<0,001*
Mittlere Beatmungsdauer [Tage] <i>Mittelwert {Median}</i>	10,9 {6,5}	17,0 {18,0}	8,27 {5,0}	9,64 {5,0}	0,026*
Mittlere Beatmungsdauer bei erfolgreicher Beatmungsbeendigung [Tage] <i>Mittelwert [KI]</i>	14,1 [KI: 10,8- 17,4]	20,7 [KI: 14,2- 27,1]	10,7 [KI: 5,5- 15,9]	13,3 [KI: 8,2- 18,3]	0,016*

* Einfaktorielle Varianzanalyse

4.4 Vergleich postoperativer und nicht-postoperativer Patienten

Ein weiterer Vergleich der Beatmungsparameter ergab sich aus der Unterteilung in postoperativ und nicht-postoperativ. Dadurch ließen sich unabhängig von der Station noch einmal zwei große Gruppen genauer betrachten (Tab. 4).

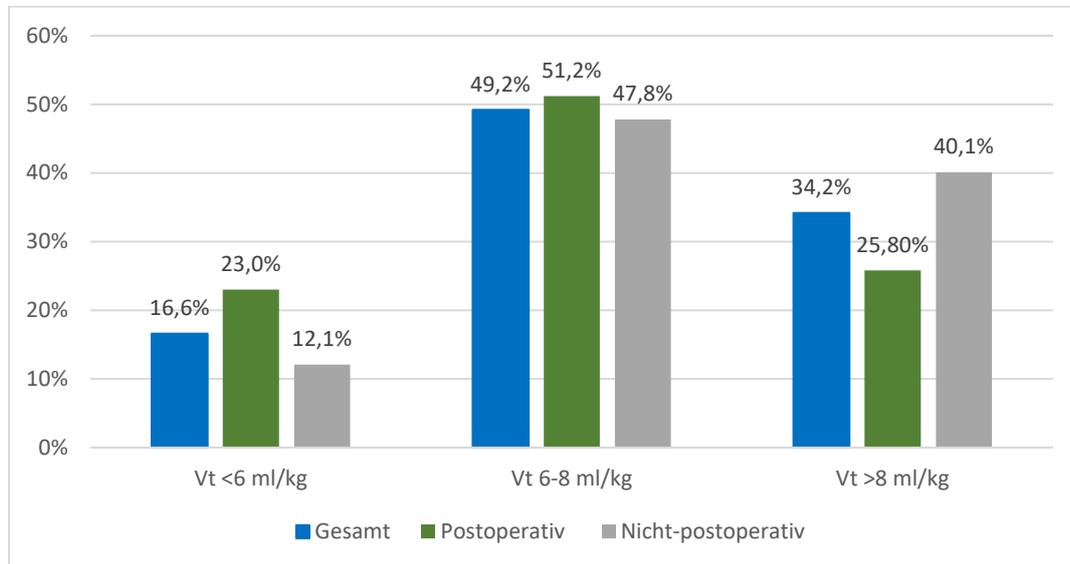


Abb. 10: Verteilung der Tidalvolumina bei postoperativen und nicht-postoperativen Patienten

Bei der postoperativen Gruppe sind 23% mit einem Tidalvolumen unter 6 ml/kg KG ventilert worden ($p=0,001$), 51,2% lagen zwischen 6 und 8 ml/kg KG ($p=0,462$) und 25,8% über 8 ml/kg KG ($p=0,001$).

Im Vergleich dazu lag die Rate der nicht-postoperativen Patienten bei 12,1% für ein Tidalvolumen unter 6 ml/kg KG ($p=0,001$), 47,8% für 6-8 ml/kg KG ($p=0,462$) und 40,1% für über 8 ml/kg KG ($p=0,001$). Die Unterschiede bei der Verwendung von Tidalvolumina unter 6 ml/kg KG und über 8 ml/kg KG waren somit statistisch signifikant.

Die Überschreitungen von 6 ml/kg/Tag und von 8 ml/kg/Tag zeigten den gleichen Trend. Auch hier hatte die nicht-postoperative Gruppe höhere Werte als die der postoperativen Patienten. Die mittlere Beatmungsdauer war bei der nicht-postoperativen Gruppe mit 13,4 Tagen höher als bei der postoperativen Gruppe mit 8,6 Tagen ($p=0,228$). Bei beiden Gruppen war der Median kleiner als der jeweilige Mittelwert.

Tab. 4: Beatmungsparameter und -dauer der postoperativen und nicht-postoperativen Patienten

	Gesamt	Postoperativ	Nicht-postoperativ	p-Wert
Werteanzahl <i>n</i> (%)	524 (100%)	217 (100%)	307 (100%)	
Überschreitung der Vt von 6 ml/kg pro Tag <i>Mittelwert {Median}</i>	1,7 {1,6}	1,6 {1,6}	1,9 {1,4}	0,298*
Überschreitung der Vt von 8 ml/kg pro Tag <i>Mittelwert {Median}</i>	0,6 {0,4}	0,4 {0,4}	0,7 {0,3}	0,201*
Mittlere Beatmungsdauer [Tage] <i>Mittelwert {Median}</i>	10,9 {6,5}	8,6 {4,0}	13,4 {10,0}	0,228*

* Einfaktorielle Varianzanalyse

4.5 Nicht-invasive Beatmung

Von den 51 Patienten wurden über den Beobachtungszeitraum sieben Patienten nicht-invasiv beatmet (Tab. 5). Davon war ein Patient auf der Station A und jeweils drei auf den Stationen B und C ($p=0,816$).

Vier dieser Patienten waren vorher oder nachher intubiert und bei zwei der Patienten wurde erst nach der Extubation eine NIV angewendet, während drei Patienten ausschließlich nicht-invasiv beatmet wurden. Bei zwei Patienten der Station C kam es zum Versagen der nicht-invasiven Beatmung, wobei bei dem einen vermehrtes Bronchialsekret und bei dem anderen Patienten verstärkte Atemarbeit die Ursache war.

Zum Versagen der NIV mit Intubationsfolge kam es bei zwei Patienten, die beide auf der Station C lagen ($p=0,218$).

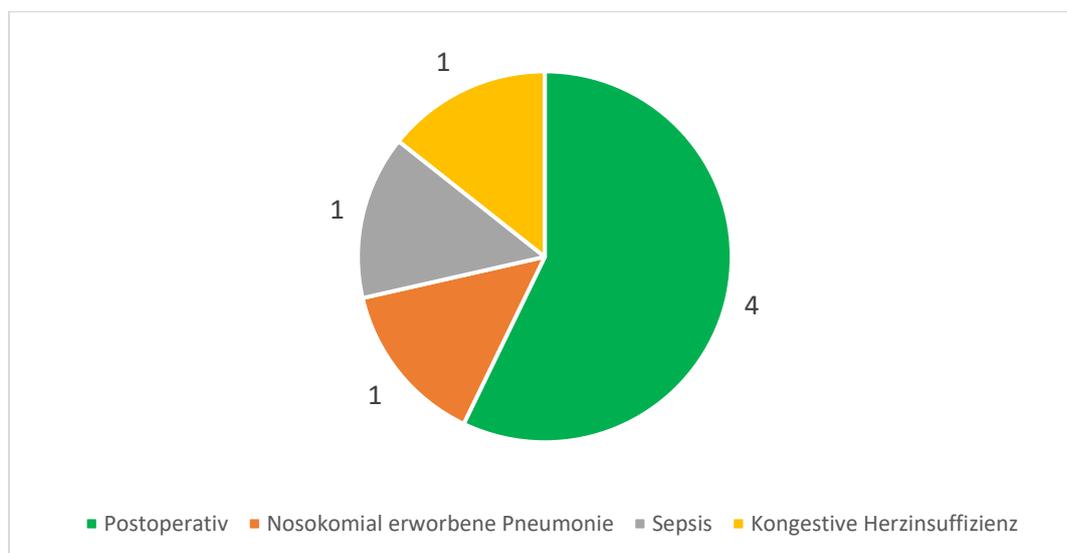


Abb. 11: Ursachen für die nicht-invasive Beatmung (n=7)

Der größte Anteil der Patienten ist aufgrund einer Operation nicht-invasiv beatmet worden (Abb. 11). Dies waren jeweils zwei Patienten auf den Stationen B und C also insgesamt 57,1% der Patienten bei denen NIV verwendet wurde ($p=0,377$). Jeweils ein Patient hatte als Ursache für die NIV-Therapie eine Sepsis (A), eine nosokomial erworbene Pneumonie (C) oder eine kongestive Herzinsuffizienz (B).

Von den sieben Patienten, die die NIV genutzt haben, sind vier mit dem Beatmungsgerät Evita XL und drei mit Evita 4 beatmet worden. Alle Patienten wurden mit Hilfe einer Mund-und-Nasen-Maske und im CPAP Modus nicht-invasiv beatmet.

Bei zwei Patienten konnte nur eine venöse Blutgasanalyse (BGA) durchgeführt werden, die anderen Patienten hatten noch einen arteriellen Zugang. Die Patienten hatten einen mittleren positiven inspiratorischen Atemwegsdruck (IPAP) von 8,6 cmH₂O, bei einem mittleren positiven expiratorischen Atemwegsdruck (EPAP) von 6,8 cmH₂O. Unter diesen Drücken lag die mittlere Atemfrequenz bei 19,4/min. Der erhobene RASS-Score der Patienten lag bei 0 oder -1 mit Ausnahme eines Patienten der Station C, der einen RASS-Score von -4 hatte.

4.6 Organversagen und weitere Komplikationen

Wie schon im Abschnitt Beatmungsparameter erklärt wurde, lagen insgesamt von den 48 invasiv beatmeten Patienten Daten von 524 Messzeitpunkten über den Beatmungszeitraum vor.

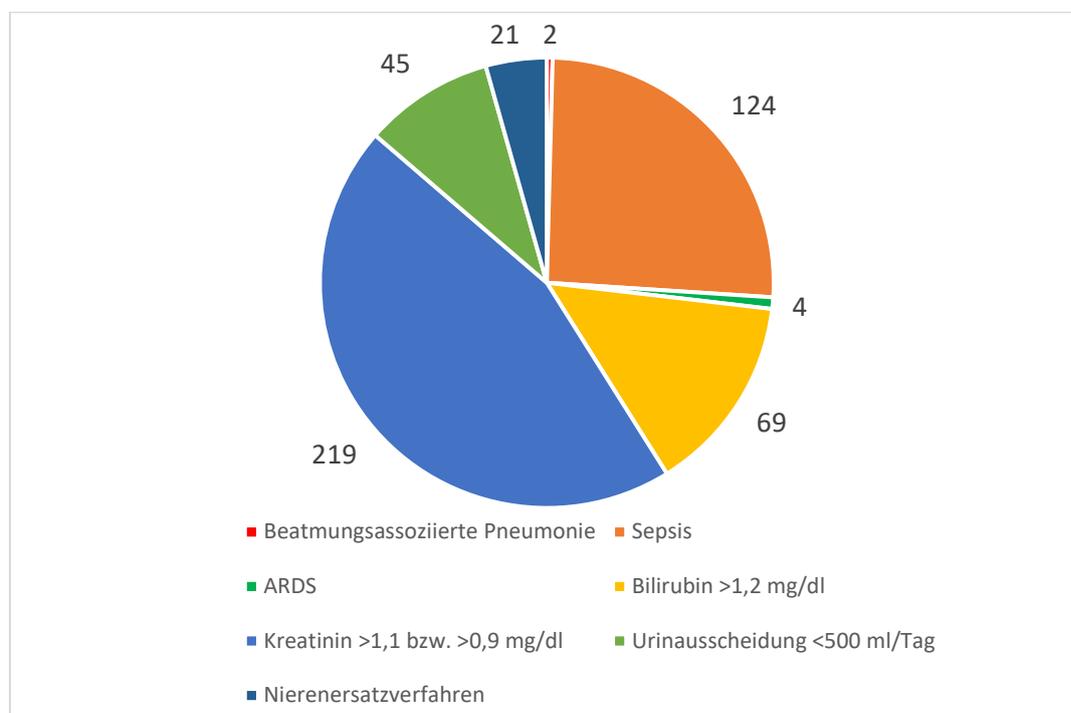


Abb. 12: Anzahl und Verteilung der Ereignisse und Komplikationen im Verlauf im gesamten Patientenkollektiv

Im Verlauf des beobachteten Monats wurde bei keinem Patienten ein Barotrauma oder eine auf der Intensivstation erworbene Muskelschwäche festgestellt (Tab. 6).

Im Gegensatz dazu wurde in zwei Fällen eine beatmungsassoziierte Pneumonie diagnostiziert, wobei einer davon der Station A und einer der Station C zugeteilt werden konnten ($p=0,728$) (Abb. 12). Noch höhere Zahlen erreichte die Erfassung der Sepsis. Hier zeigt sich, dass 124 Werte von 524 einer Sepsis entsprachen. Dabei gab es nur vier positive Messungen auf der Station A, während dies jeweils auf ca. 35% der Stationen B und C zutraf und daher statistisch signifikante Unterschiede zwischen den drei Stationen bestanden ($p<0,001$).

Ein Acute Respiratory Distress Syndrome (ARDS) hingegen zeigte sich viermal auf der Station C und in keinem Fall auf den Stationen A und B ($p=0,052$).

Tab. 5: Organversagen und weitere Komplikationen

	Gesamt	Station A	Station B	Station C	p-Wert
Werteanzahl <i>n</i> (%)	524 (100%)	187 (100%)	125 (100%)	212 (100%)	
Barotrauma <i>n</i> (%)	0 (0%)	0 (0%)	0 (0%)	0 (0%)	
Beatmungs- assoziierte Pneumonie <i>n</i> (%)	2 (0,4%)	1 (0,5%)	0 (0%)	1 (0,5%)	0,728*
Sepsis <i>n</i> (%)	124 (23,7%)	4 (2,1%)	43 (34,4%)	77 (36,3%)	<0,001*
ARDS <i>n</i> (%)	4 (0,8%)	0 (0%)	0 (0%)	4 (1,9%)	0,052*
ICUAW <i>n</i> (%)	0 (0%)	0 (0%)	0 (0%)	0 (0%)	
Bilirubin >1,2 mg/dl <i>n</i> (%)	69 (13,2%)	0 (0%)	20 (16,0%)	49 (23,1%)	0,001*
Kreatinin >1,1 bzw. 0,9 mg/dl <i>n</i> (%)	219 (41,8%)	13 (7,0%)	35 (28,0%)	171 (80,67%)	<0,001*
Urinausscheidung <500 ml/Tag <i>n</i> (%)	45 (8,6%)	0 (0%)	14 (11,2%)	31 (14,6%)	<0,001*
Nierenersatz-verfahren <i>n</i> (%)	21 (4,0%)	0 (0%)	0 (0%)	21 (9,9%)	<0,001*

* Einfaktorielle Varianzanalyse

4.7 Leber- und Niereninsuffizienz

Um die Bilirubin- und Kreatininwerte näher zu untersuchen wurden alle nicht-neurochirurgischen Patienten in zwei Gruppen eingeteilt und diese Subgruppen hinsichtlich der verwendeten Tidalvolumina verglichen (Abb. 13). Dabei wurden nur nicht-neurochirurgische Patienten gewählt, da die neurochirurgischen Patienten zwar zumeist keine Leber- oder Niereninsuffizienz hatten, aber durch die neurologische Komplikation andere Gründe für hohe Tidalvolumina vorwiesen.

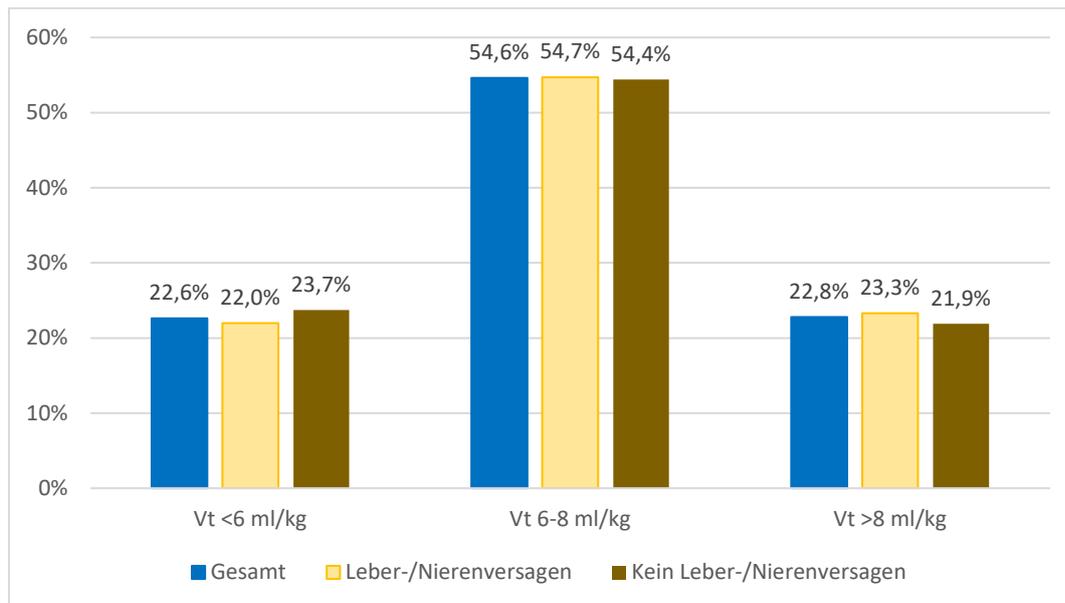


Abb. 13: Verteilung der Tidalvolumina bei nicht-neurochirurgischen Patienten mit Nieren- oder Leberversagen und Patienten ohne Nieren- oder Leberversagen

Die verwendeten Tidalvolumina lagen sowohl im Durchschnitt als auch bezogen auf die Überschreitungen von 6 bzw. 8 ml/kg pro Tag in beiden Gruppen sehr nah beieinander. Daher konnten auch keine statistisch signifikanten Unterschiede in dieser Subanalyse festgestellt werden (Tab. 6).

Einzig die Beatmungsdauer war bei den Patienten ohne Leber- oder Nierenversagen mit 5,9 Tagen geringer als bei den Patienten mit Leber- bzw. Nierenversagen mit 11,5 Tagen ($p=0,051$).

Tab. 6: Beatmungsparameter und -dauer der nicht-neurochirurgischen Patienten mit Nieren- oder Leberversagen und Patienten ohne Nieren- oder Leberversagen

	Gesamt	Leber-/ Nierenversagen	Kein Leber-/ Nierenversagen	p-Wert
Werteanzahl <i>n</i> (%)	337 (100%)	223 (100%)	114 (100%)	
Vt <6 ml/kg <i>n</i> (%)	76 (22,6%)	49 (22,0%)	27 (23,7%)	0,723*
Vt 6 ml/kg – 8 ml/kg <i>n</i> (%)	184 (54,6%)	122 (54,7%)	62 (54,4%)	0,955*
Vt >8 ml/kg <i>n</i> (%)	77 (22,8%)	52 (23,3%)	25 (21,9%)	0,775*
Überschreitung von 6 ml/kg pro Tag <i>Mittelwert {Median}</i>	1,5 {1,3}	1,4 {1,4}	1,7 {1,5}	0,268*
Überschreitung von 8 ml/kg pro Tag <i>Mittelwert {Median}</i>	0,4 {0,3}	0,4 {0,3}	0,5 {0,3}	0,313*
Mittlere Beatmungsdauer [Tage] <i>Mittelwert {Median}</i>	9,1 {5,0}	11,5 {10,0}	5,9 {4,0}	0,051*

* Einfaktorielle Varianzanalyse

4.8 Behandlungsergebnis

Die mittlere Aufenthaltsdauer aller Patienten auf der Intensivstation betrug 18,4 Tage [KI: 13,9-22,8] (Tab. 7). Die Aufenthaltsdauer der Stationen B und C lagen mit ca. 15 Tagen unter diesem Wert, während die Station A mit 27,7 Tagen [KI: 18,5-36,8] darüber lag ($p=0,870$). Die mittlere Aufenthaltsdauer im Krankenhaus zeigte mit 32,5 Tagen [KI: 26,9-38,0] keine signifikanten Unterschiede zwischen den drei Stationen ($p=0,665$).

Acht Patienten mussten nach erfolgreicher Extubation wieder re-intubiert werden. Dies betraf 9,1% der Patienten auf der Station A, 23,5% auf der B und 13,0% auf der Station C ($p=0,545$). Insgesamt wurden 14 Patienten tracheotomiert. Dies traf auf jeweils vier Patienten der Station A, auf drei der Station B und auf sieben der Station C zu. Von diesen 14 Patienten wurden zehn Patienten dilatativ tracheotomiert und vier Patienten einer offenen chirurgischen Tracheotomie unterzogen. Von diesen vier Patienten waren jeweils einer den Stationen A und B und zwei der Station C zuzuordnen ($p=0,522$).

Bei fünf Patienten kam es im Verlauf zu einem Abbruch des Weanings, was als sogenanntes „Weaning-Versagen“ definiert wurde. Dies zeigte sich bei einem Patienten der Station A und bei vier Patienten der Station C ($p=0,196$).

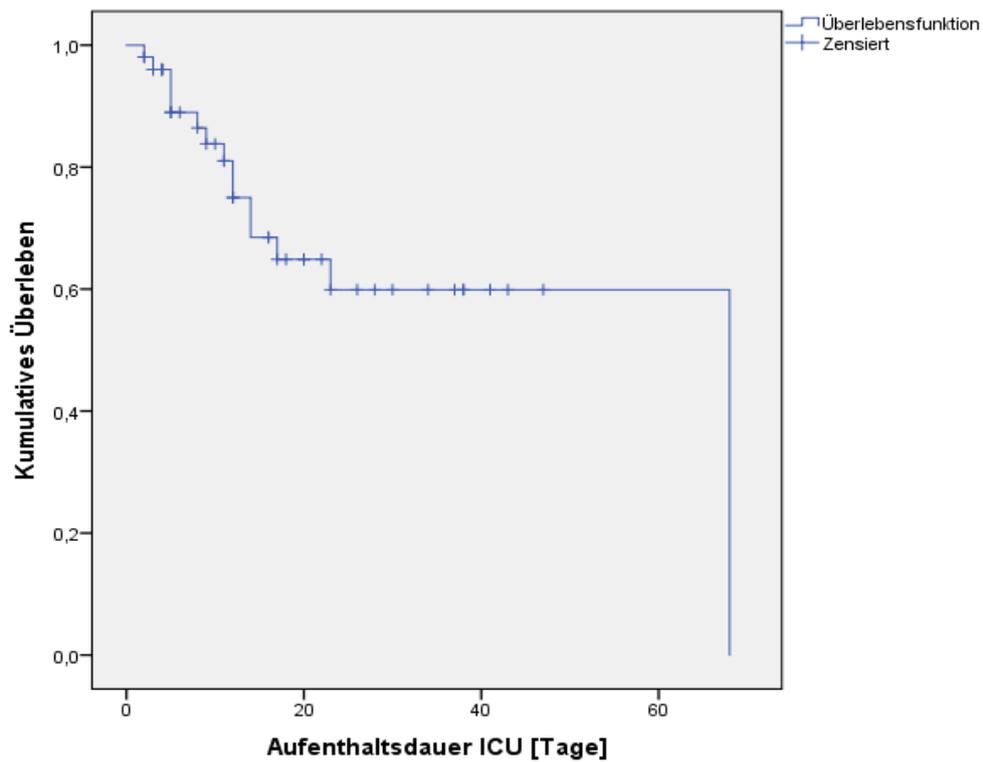


Abb. 14: Kumulatives Überleben der Patienten

Mit Hilfe des Kaplan-Meier-Schätzers wurde das kumulative Überleben der Patienten dargestellt, wobei die Aufenthaltsdauer auf der Intensivstation als Zeitachse verwendet wurde. 36 der 51 Patienten überlebten den Beobachtungszeitraum. Auf der Station A waren dies mit neun von elf Patienten der Großteil. Auf der Station B überlebten 64,7% und auf der Station C 69,6% ($p=0,633$).

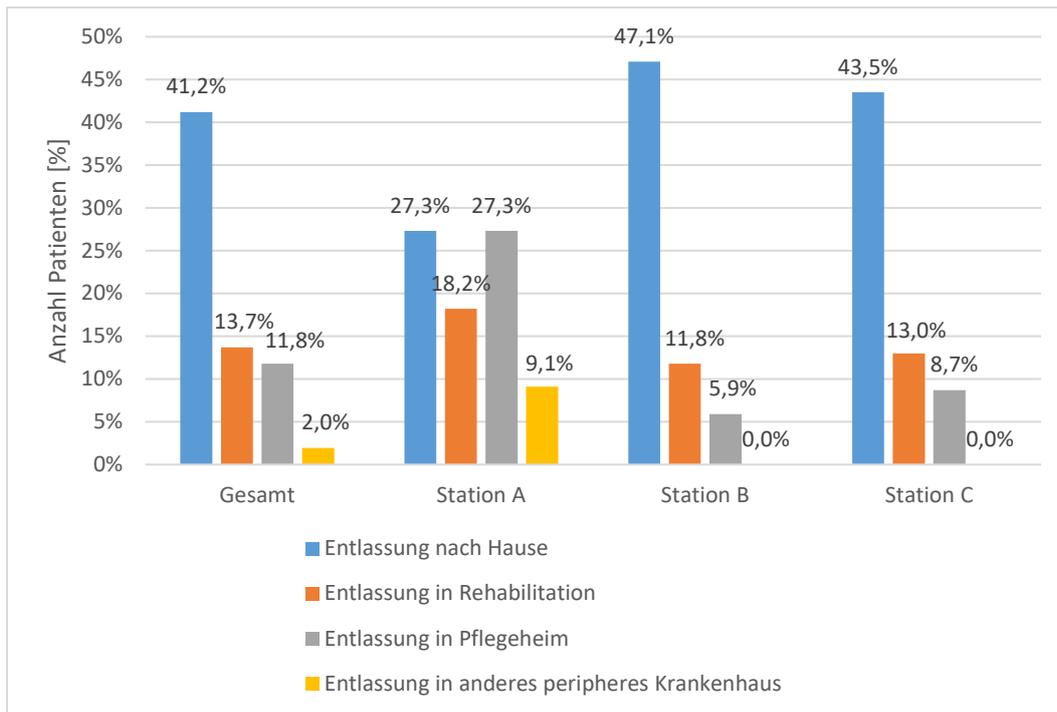


Abb. 15: Entlassungsort der Patienten auf den drei Intensivstationen

Für die Patienten, die überlebten, wurde dokumentiert, wohin diese entlassen wurden (Abb. 15). Es zeigten sich keine statistisch signifikanten Unterschiede für den Entlassungsort auf den drei Stationen.

Tab. 7: Behandlungsergebnis

	Gesamt	Station A	Station B	Station C	p-Wert
Patientenanzahl <i>n</i> (%)	51 (100%)	11 (100%)	17 (100%)	23 (100%)	
Mittlere Aufenthaltsdauer ICU [Tage] <i>Mittelwert [KI]</i>	18,4 [KI: 13,9- 22,8]	27,7 [KI: 18,5- 36,8]	14,2 [KI: 9,3- 19,1]	15,9 [KI: 8,6- 23,1]	0,870*
Mittlere Aufenthaltsdauer Krankenhaus [Tage] <i>Mittelwert [KI]</i>	32,5 [KI: 26,9- 38,0]	33,4 [KI: 23,3- 43,6]	31,2 [KI: 18,4- 44,0]	32,9 [KI: 25,7- 40,1]	0,665*
Re-intubation <i>n</i> (%)	8 (15,7%)	1 (9,1%)	4 (23,5%)	3 (13,0%)	0,545*
Tracheotomie <i>n</i> (%)	14 (27,5%)	4 (36,4%)	3 (17,7%)	7 (30,4%)	0,522*
Weaning-Versagen <i>n</i> (%)	5 (9,8%)	1 (9,1%)	0 (0%)	4 (17,4%)	0,196*
Überleben <i>n</i> (%)	36 (70,6%)	9 (81,8%)	11 (64,7%)	16 (69,6%)	0,633*
Entlassung nach Hause <i>n</i> (%)	21 (41,2%)	3 (27,3%)	8 (47,1%)	10 (43,5%)	0,168*
Entlassung in Rehabilitation <i>n</i> (%)	7 (13,7%)	2 (18,2%)	2 (11,8%)	3 (13,0%)	0,977*
Entlassung in Pflegeheim <i>n</i> (%)	6 (11,8%)	3 (27,3%)	1 (5,9%)	2 (8,7%)	0,334*
Entlassung in anderes peripheres Krankenhaus <i>n</i> (%)	1 (1,9%)	1 (9,1%)	0 (0%)	0 (0%)	0,242*

* Einfaktorielle Varianzanalyse

Das Weaning wurde sowohl im ersten als auch im zweiten Versuch bei allen Patienten mit CPAP als Spontanatemversuch durchgeführt, wobei die Reduzierung der Beatmungsunterstützung über die Druckunterstützung geregelt wurde. Von den fünf Patienten, bei denen es zu einem Versagen des Weanings kam, war bei drei Patienten eine Hypoxie die Hauptursache für den Abbruch des Weanings. Bei jeweils einem Patienten kam es zum Abbruch wegen eingetrübten Bewusstseins beziehungsweise hämodynamischer Instabilität.

Keine der Extubationen geschah ungeplant. Von den acht Patienten, die re-intubiert werden mussten, war diese bei vier Patienten durch verstärkte Atemarbeit bedingt. Ein Patient wurde re-intubiert, da es zu einer oberen Atemwegsobstruktion kam. Die anderen drei Patienten mussten aufgrund eines eingetrübten Bewusstseins, einer kongestiven Herzinsuffizienz oder in Folge einer Operation re-intubiert werden.

In zwei Fällen wurde nach der Extubation die nicht-invasive Beatmung angewendet. Dies geschah auf den Stationen B und C und wurde beides Mal als Präventionsmaßnahme zur Vermeidung von respiratorischem Stress nach der Extubation eingesetzt.

Bei drei Patienten wurde die Entscheidung getroffen, die Behandlung nicht weiter fortzuführen. Dies traf auf jeweils einen Patienten der drei Stationen zu. Diese Entscheidung wurde auf der Station A zwei Tage vor, auf der Station B einen Tag vor und auf der Station C am selben Tag der Einstellung der Therapie getroffen.

5. Diskussion

Ziel der vorliegenden Arbeit ist die Datenerhebung und Auswertung der lungenprotektiven Beatmung auf Intensivstationen. Insbesondere die Beatmungswerte zeigen signifikante Unterschiede zwischen den einzelnen Intensivstationen und nachfolgend werden mögliche Gründe hierfür diskutiert. Da im Rahmen der lungenprotektiven Beatmung niedrige Tidalvolumina zwischen 6 und 8 ml/kg KG eine zentrale Rolle spielen, stellen diese auch den Schwerpunkt der Auswertung dar.

5.1 Tidalvolumen

Die ARDS-Network-Studie konnte zeigen, dass durch die Anwendung von 6 ml/kg KG an Stelle von 12 ml/kg KG die 28 Tage Mortalität stark sinkt, so dass die Studie sogar vorzeitig beendet werden konnte¹. Dieser Effekt ließ sich auf die bessere Oxygenierung der Lunge zurückführen. Allerdings kritisierten einige Forscher, dass der Effekt der ARDS-Network-Studie besonders durch den Einsatz von hohen Tidalvolumina in der Kontrollgruppe so eindrucksvoll erschien. Diese waren höher als die in der Realität verwendeten Werte³². Außerdem ist nicht ausreichend belegt, ob niedrige Tidalvolumina auch einen Einfluss auf die schwere des ARDS haben³³. Die Umsetzung der niedrigen Tidalvolumina ist in den letzten Jahren auch in der Praxis etabliert worden³⁴ und die Tidalvolumina sind seit 1998 von im Durchschnitt 8,8 ml/kg KG auf 6,9 ml/kg KG im Jahr 2010 gesunken^{18,19}.

Auch wenn es im Laufe der Jahre immer wieder Studien gab, die das Absinken der Mortalität bei niedrigen Tidalvolumina nicht reproduzieren konnten^{35,36}, so wurden in den letzten Jahren dennoch nur wenig neue Studien finanziert, da niedrige Tidalvolumina inzwischen als Standard festgelegt sind³⁷. Dadurch resultiert das Problem, dass es nur wenige Studien gibt, die zeigen, ob die Mortalität nach 28 Tagen weiter signifikant erniedrigt ist³⁸. Dennoch sprechen sich Experten für den Einsatz niedriger Tidalvolumina aus³⁹ und weitere Studien konnten die Ergebnisse der ARDS-Network-Studie reproduzieren^{40,41}.

Auch in den aktuellen Sepsis-Guidelines wurde die Beatmung der ARDS-Patienten angesprochen, mit der Empfehlung eine lungenprotektive Beatmung bei diesen Patienten anzuwenden. Darüber hinaus wurde auch bei Nicht-ARDS-Patienten vorgeschlagen, niedrige Tidalvolumina zu verwenden, um die Mortalität zu senken⁴². Dies ist sinnvoll, da diese möglicherweise auch bei Patienten ohne Lungenverletzung zur Ausschüttung von weniger inflammatorischen Mediatoren führen⁴³. Die gleichen Vorgaben stehen auch in den aktuellen Leitlinien AWMF und der Österreichischen Gesellschaft für Anaesthesiologie, Reanimation und Intensivmedizin (ÖGARI), in denen bei ARDS-Patienten ein Tidalvolumen unter 6 ml/kg KG und bei Nicht-ARDS-Patienten ein Tidalvolumen zwischen 6 und 8 ml/kg KG empfohlen wird^{22,29}.

In der vorliegenden Arbeit wurde untersucht, ob bei den intensivpflichtigen Patienten lungenprotektive Beatmung durchgeführt wurde, selbst wenn das Vorkommen von ARDS nur bei einem Patienten festgestellt werden konnte. Hierbei ist auffällig, dass auf den chirurgischen Stationen B und C deutlich niedrigere Tidalvolumina verwendet wurden, als auf der neurochirurgischen Station A. Dies kann im Zusammenhang mit einem höheren Stellenwert des PaCO₂ auf der Station A stehen. Dennoch sieht man insgesamt über alle drei Stationen, dass die Tidalvolumina zu 65,8% zwischen 6 und 8 ml/kg KG oder darunter lagen. Dies war ein hoher Anteil an niedrigen Tidalvolumina, der zeigte, dass dieses Kriterium der lungenprotektiven Beatmung auf den Stationen gut etabliert war.

Bei der Überschreitung der Grenzwerte der Tidalvolumina bezogen auf die Beatmungsdauer zeigte sich der gleiche Trend. Hierbei wurde jeder einzelne Patient als Ganzes gewertet. Dabei war es wichtig, nicht die absoluten Werte als Grundlage zu nehmen, sondern die einzelnen Stationen miteinander zu vergleichen. Bei dieser Auswertung zeigte sich wieder, dass die Station A mit 2,5 Überschreitung von 6 ml/kg KG pro Beatmungsdauer deutlich über dem Durchschnitt aller Stationen von 1,7 Überschreitung lag. Die Station C hingegen hatte mit 1,3 Überschreitung besonders niedrige Werte und damit wenig Tidalvoluminawerte, die über den Grenzwerten lagen.

Die Überschreitungen repräsentierten Werte, die auch hohe Tidalvoluminawerte erfassen, was bei der Erstellung der Mittelwerte nicht gegeben war. Das Ergebnis war somit eine Zahl, die beschrieb, um wie viel das Tidalvolumen/Normalgewicht jeden Tag überschritten wurde. Große Werte zeigten demnach eine größere Überschreitung der Grenzen von 6 oder 8 ml/kg KG. Dieser Wert machte es zum einen möglich, die einzelnen Patienten der verschiedenen Stationen zu vergleichen und zum anderen konnten mit dieser Auswertung besonders hohe Tidalvoluminawerte erfasst werden und gehen nicht im Mittelwert unter.

Dies bedeutete für den deutlich höheren Wert der Station A, dass die Tidalvolumina nicht nur im Mittel den Grenzwert überschritten, sondern dass auch die Höhe der Überschreitung von 6 ml/kg KG signifikant über denen der anderen Stationen lag. Außerdem ließ sich aus diesen Berechnungen ablesen, dass der Grenzwert von 8 ml/kg KG deutlich seltener überschritten wurde. Auch hier zeigte die Station A die häufigsten und höchsten Abweichungen.

Wichtig beim Beurteilen der Tidalvolumina war die korrekte Bezugnahme auf das Normalgewicht und nicht auf das Körpergewicht. Diese beiden Bezugsgrößen können nämlich besonders bei Frauen große Unterschiede zeigen und somit zu fehlerhaften Einschätzungen des richtigen Tidalvolumens führen⁴⁴. Dies trifft im Besonderen auch auf stark adipöse Patienten zu^{45,46}, bei denen die Verwendung niedriger Tidalvolumina eine wichtige Rolle spielt⁴⁷.

Bei der stetigen Bemühung die Grenzwerte von 6-8 ml/kg KG nicht zu überschreiten, sollte dennoch auch auf ein ausreichend hohes Tidalvolumen geachtet werden²¹. So können die

Anwendung zu niedriger Tidalvolumina sogar zu selbstverursachten Lungenverletzungen durch kompensatorische inspiratorische Spontanatmung bei zu wenig sedierten Patienten führen⁴⁸ und das Risiko eines Delirs steigt an⁴⁹.

5.2 Plateaudruck

Die Begrenzung des Plateaudruckes zählt zu einem der wichtigsten Parameter der lungenprotektiven Beatmung. Der Plateaudruck ist ein Wert mit hoher Vorhersagewahrscheinlichkeit für die Mortalität des Patienten. Wenn dieser Beatmungsparameter erhöht ist, steigt auch die Mortalität an¹⁷. Dies ist auch darin begründet, dass der Plateaudruck einen Ausdruck der Schwere der Erkrankung darstellt³⁴.

Einige Autoren gehen sogar noch einen Schritt weiter und messen dem niedrigen Plateaudruck einen höheren Stellenwert bei, als den niedrigen Tidalvolumina⁵⁰. Sie führen den Effekt der ARDS-Network-Studie auf die Begrenzung des Plateaudruckes zurück⁵¹.

Der Versuch, eine optimale obere Grenze des Plateaudruckes zu definieren, gestaltet sich schwierig⁵². Es gibt einige Studien, die sogar einen Plateaudruck von unter 26 cmH₂O fordern^{50,53}. Dies zeigt auch die Metaanalyse von Yasuda et al., bei der untersucht wurde, in welcher Höhe der optimale Plateaudruck liegen sollte, um Lungenschäden zu vermeiden⁵³.

Die aktuellen Leitlinien empfehlen jedoch nur eine Begrenzung des Plateaudruckes auf 30 cmH₂O^{29,42}. Dementsprechend wurde auch in der vorliegenden Arbeit von einem Grenzwert von 30 cmH₂O ausgegangen. Dieser Grenzwert wurde zu 96,4% eingehalten. Dies bedeutet das insgesamt nur 24 Mal der Plateaudruck über 30 cmH₂O lag.

Diesen Trend zeigte auch der Mittelwert des Plateaudruckes, der mit 18,9 cmH₂O deutlich unter diesem Grenzwert lag. Somit wurde offensichtlich stets darauf geachtet, dieses Kriterium der lungenprotektiven Beatmung korrekt anzuwenden. Auch ein Vergleich der drei Stationen zeigte, dass die Stationen A und B nahe an dem Mittelwert lagen und nur Station C mit 20,2 cmH₂O eine geringe Abweichung nach oben aufwies. Da aber auch dieser Wert noch weit von dem Grenzwert von 30 cmH₂O entfernt lag, ließ sich zusammenfassend sagen, dass die Begrenzung des Plateaudruckes auf allen drei Stationen zur alltäglichen Routine gehörte und selbstverständlich angewendet wurde.

5.3 PEEP

Die optimale Einstellung des PEEP nimmt eine zentrale Rolle in der Umsetzung der lungenprotektiven Beatmung ein und wird kontrovers diskutiert. Früher wurden die Patienten häufig mit Zero-PEEP (ZEEP) beatmet. Das hat jedoch zu einer erhöhten Mortalität geführt⁵⁴. Dies erklärt sich durch die Tatsache, dass der PEEP wesentlich an der Offenhaltung der Alveolen und damit an der Lungenrekrutierung beteiligt ist⁵⁵.

Seit der Etablierung des PEEP gibt es eine rege Diskussion zwischen den Forschern, welche PEEP-Werte am besten für den Patienten sind und als lungenprotektiv bezeichnet werden können⁶. Während einige Studien keinen Unterschied im Outcome der Patienten feststellen konnten^{16,31,56}, zeigen viele Studien klare Tendenzen zu höheren bzw. niedrigeren PEEP-Werten.

Vor allem bei ARDS-Patienten konnten einige Studien zeigen, dass ein höherer PEEP zu einer kürzeren Beatmungsdauer, einer besseren Lungenfunktion und einem selteneren Organversagen führt⁵⁷. Auch bei höheren PEEP-Werten ist die Inzidenz der Barotraumata gleich der bei niedrigeren Werten^{28,58}.

Die Metaanalyse von Serpa Neto et al. favorisiert einen höheren PEEP sogar bei Patienten ohne ARDS⁵⁹. Die Beatmungsdauer war unter der Anwendung von höheren PEEP-Werten kürzer, Hypoxie und ARDS traten seltener auf und die Mortalität dieser Patienten war geringer. Außerdem profitierten diese Patienten von einem höheren PaO₂:FiO₂-Verhältnis. Die Autoren kritisieren allerdings die Ergebnisse ihrer Metastudie, da ein moderater PEEP in vielen Studien keine Anwendung fand⁵⁹.

Es liegen allerdings auch Studien vor, die zeigen, dass bei Patienten ohne ARDS die Einstellung hoher PEEP-Werte zu vermehrten Lungenschädigungen führt⁶⁰. Außerdem ist bei ARDS-Patienten bei höherem PEEP eine erhöhte Mortalitätsrate feststellbar⁶¹. Dieses Ergebnis spiegelt sich auch in der aktuellen Studie von Cavalcanti et al. wieder, die zeigt, dass das Outcome von Patienten, die mit niedrigem PEEP beatmet werden besser ist als das von Patienten, die laut der aktuellen Praxis mit angepasstem PEEP und Lungenrekrutierung ventilert werden⁶².

Niedrige PEEP-Werte (5 cmH₂O anstatt 15 cmH₂O) könnten sogar besser zur Reduzierung von Stress geeignet sein als niedrige Tidalvolumina, da dieses alleine nicht immer den Stress auf die Lunge verhindert und häufig mit hohen PEEP-Werten einhergeht⁶³. Außerdem konnte eine Nichtunterlegenheit für die Verwendung niedriger PEEP-Werte bei ARDS-Patienten bezogen auf die Beatmungsdauer gezeigt werden⁶⁴. Bei der Wahl niedriger oder hoher PEEP-Werte sollten insbesondere auch individuelle Patientenfaktoren mit einbezogen werden^{65,66}.

Cressoni et al. fassen die PEEP-Diskussion zusammen, indem sie erklären, dass anfangs Studien mit niedrigen Tidalvolumina und hohem PEEP durchgeführt wurden, da dies in der Theorie die lungenprotektivste Beatmung darstellte⁶⁷. Allerdings hat sich im Laufe der Zeit durch neue Studien gezeigt, dass das bessere Outcome auf das niedrige Tidalvolumen zurückzuführen ist und bei isolierten höheren PEEP-Werten das Outcome nicht besser als bei niedrigem PEEP war. Dies liegt darin begründet, dass PEEP-Werte von 15 cmH₂O nicht ausreichen, um den theoretischen Effekt des hohen PEEP auszunutzen. Bei diesen mittelhohen PEEP werden die nicht belüfteten Lungenanteile lediglich nach unten bzw. beim liegenden Patienten nach vertebral verschoben und die Lunge ist inhomogen belüftet⁶⁷.

Die aktuelle S3-Leitlinie empfiehlt die Anwendung eines höheren PEEP bei ARDS-Patienten und die Verwendung der ARDS-Network-Tabelle zur orientierenden Einstellung der richtigen PEEP-Werte ²². Aus diesem Grund wurden auch für die vorliegende Arbeit die PEEP-Werte anhand der FiO₂:PEEP-Tabelle des ARDS-Network ausgewertet.

Allerdings ist dies teilweise kritisch zu sehen, da diese nur als Orientierung gelten soll und in der Praxis der optimale PEEP an die individuelle Patientensituation angepasst werden sollte. In Ermangelung einer anderen Möglichkeit, die PEEP-Werte retrospektiv auszuwerten, stellt diese Tabelle dennoch die beste Möglichkeit dar, um die Angemessenheit der Höhe der PEEP-Werte zu beurteilen.

Auf den drei untersuchten Intensivstationen lagen die PEEP-Werte bezogen auf die ARDS-Network-Tabelle ungefähr zur Hälfte über den empfohlenen Richtwerten. Die Tabelle stellte nur eine Annäherung an den optimalen PEEP dar, trotzdem ließ sich anhand der Daten sagen, dass der PEEP auf den Intensivstationen überwiegend adäquat eingestellt wurde.

Neben der Betrachtung der einzelnen Beatmungsparameter ist es unerlässlich, auch das Zusammenspiel dieser zu untersuchen. Dieses Ziel hat auch die Metaanalyse von Guo et al. ⁶⁸, die erforscht hat, welches die beste Beatmungsstrategie bei Patienten ohne ARDS ist. Dabei wurden vier unterschiedliche Ansätze miteinander verglichen:

- A: niedriges Tidalvolumen und hoher PEEP
- B: höheres Tidalvolumen und niedriger PEEP
- C: niedriges Tidalvolumen und niedriger PEEP
- D: niedriges Tidalvolumen und ZEEP.

Das Ergebnis dieser Studie zeigt, dass Gruppe A das höchste PaO₂/FiO₂-Verhältnis hat, Gruppe B die höchste pulmonale Compliance und Gruppe C die kürzeste Aufenthaltsdauer auf der Intensivstation ⁶⁸. Der Ansatz der Gruppe C ist übertragbar auf die Referenzwerte der vorliegenden Studie. Allerdings erfüllten nur 37,3% der Beatmungswerte sowohl das Kriterium der niedrigen Tidalvolumina, als auch die Einhaltung des PEEP. Da 91,2% der abweichenden PEEP-Werte höher waren als der Referenzwert, entsprechen diese Wertekonstellationen eher Gruppe A. Wie schon zuvor diskutiert, ist es schwierig, den individuell optimalen PEEP zu finden und für den einzelnen Patienten einzustellen.

Der Vergleich von niedrigen Tidalvolumina und dem Open Lung Approach (niedriges Tidalvolumen, hoher PEEP und Recruitment-Manöver) zeigte keinen signifikanten Unterschied bezüglich der Mortalität ⁶⁹. Andererseits zeigte sich beim Verwenden der Rekrutierung, dass eine bessere Lungenfunktion erreicht werden konnte ⁷⁰.

Die schon in der Einleitung erwähnte Studie von Brunkhorst et al. lässt einen guten Vergleich der in der Praxis etablierten Beatmungsstrategien mit den drei untersuchten Intensivstationen zu ². Die Studie zeigt, dass nur 2,6% der Patienten mit einem Tidalvolumen von unter 6 ml/kg KG beatmet wurden, während dies auf den Stationen A, B und C bei 16,6% der Patienten der

Fall war. Ein ähnliches Bild zeigt sich bei den Tidalvolumina zwischen 6 und 8 ml/kg KG. Dies wurde bei Brunkhorst et al. zu 17,1% erreicht und auf den hier untersuchten Intensivstationen zu 49,2%². Allerdings wurden die hier vorliegenden Werte jeden Tag zu derselben Uhrzeit dokumentiert, während bei Brunkhorst et al. jeweils der höchste Wert in den letzten 24 Stunden verwendet wurde. Daher ist der Vergleich nur eingeschränkt beurteilbar.

5.4 PaCO₂

Der PaCO₂ spielt eine Rolle bei verschiedenen Aspekten der Beatmung. Zum einen ist der optimale PEEP eines Patienten erreicht, wenn der PaCO₂ möglichst niedrig ist, bei gleichzeitig hohem PaO₂. Diese Konstellation zeigt eine gesteigerte funktionelle Totraumventilation an²⁹. Zum anderen wird bei der permissiven Hyperkapnie ein hoher PaCO₂ zugunsten einer lungenprotektiven Beatmung mit niedrigen Tidalvolumina und einer kleinen Beatmungsdruckamplitude in Kauf genommen⁷¹⁻⁷³. Die permissive Hyperkapnie wird dabei bis zu einem PaCO₂ von 50-60 mmHg toleriert, wenn die Niere die respiratorische Azidose metabolisch kompensieren kann und dabei ein pH >7,2 besteht²².

Die Prämisse, dass die Lungenprotektion eine größere Bedeutung als die CO₂-Elimination hat, lässt sich nur bedingt auf neurochirurgische Patienten anwenden. Die permissive Hyperkapnie kann zu einer zerebralen Vasodilatation führen, die zusammen mit Recruitmentmännovern einen höheren intrakraniellen Druck (ICP) bedingt²⁹. Dies jedoch will man bei neurochirurgischen Patienten unter allen Umständen vermeiden, da es durch eine Steigerung des ICP zu einer Abnahme des zerebralen Perfusionsdruckes (CPP) kommt und somit das Gehirn schlechter durchblutet ist. Daher ist die Anwendung einer lungenprotektiven Beatmung bei diesen Patienten oft eine Einzelfallentscheidung und hängt von dem behandelnden Ärzteteam ab⁷⁴.

Es wird angenommen, dass die lungenprotektive Beatmung auch bei neurochirurgischen Patienten von Vorteil ist, da diese zu einer besseren Gehirnfunktion führt und vor weiteren Hirnschäden schützt⁷⁴. Außerdem hat der PEEP nur einen Einfluss auf den ICP und CPP, wenn dieser krankheitsbedingt >10 cmH₂O ist - ansonsten ist der PEEP auch bei Patienten der Neurochirurgie sicher anzuwenden⁷⁵. Zudem treten bei diesen Patienten häufiger als sonst pulmonale Komplikationen auf, so dass gerade diese von einer lungenprotektiven Beatmung profitieren könnten und ein besseres Outcome hätten⁷⁴.

Andererseits empfehlen Forscher die lungenprotektive Beatmung nur bei ARDS-Patienten einzusetzen und ansonsten lieber mit höheren Tidalvolumina zu arbeiten, um den PaCO₂ zu senken. Vor allem bei Patienten mit refraktär hohem ICP ist die Balance zwischen niedrigen Tidalvolumina und möglichst niedrigem PaCO₂ noch nicht gut erforscht⁷⁶.

Die weit verbreitete Therapie des hohen ICP durch Hyperventilation und die dadurch erreichte Hypokapnie ($\text{PaCO}_2 < 25 \text{ mmHg}$), sollte nicht mehr zum Einsatz kommen, da hierunter keine lungenprotektive Beatmung möglich ist und es zu pulmonalen Komplikationen kommen kann⁷⁶.

Der PaCO_2 der untersuchten Intensivstationen lag im Mittel bei 39,5 mmHg, wobei die neurochirurgische Station A mit 37,8 mmHg leicht unter den Mittelwerten der Station B und C lag. Dies könnte ein Hinweis sein, dass auch auf der Station A vermehrt auf eine Begrenzung des PaCO_2 geachtet wurde, um einen Anstieg des ICP zu vermeiden. Im Gegensatz dazu lagen die Mittelwerte auf den Stationen B und C mit 39,2 mmHg und 41,0 mmHg über dem Wert der Station A. Jedoch lagen diese Werte weit unter den Grenzwerten der permissiven Hyperkapnie von 50 bis 60 mmHg.

Unter der Annahme, dass auf der Station A die Einhaltung eines niedrigen PaCO_2 bei einigen Patienten wichtiger war als die lungenprotektive Beatmung, ließ sich auch die Verteilung der Tidalvolumina neu bewerten. So wurden auf der Station A höhere Tidalvolumina verwendet als auf den Stationen B und C und im Vergleich seltener Tidalvolumina von $< 6 \text{ ml/kg KG}$. Dadurch zeigte sich der höhere Stellenwert der Begrenzung des PaCO_2 im Vergleich zu der Verwendung von lungenprotektiver Beatmung bei Patienten der Neurochirurgie.

Der PEEP hingegen lag auf der Station A nahe dem Mittelwert aller Stationen. Somit zeigte sich, dass die Anwendung eines angepassten PEEP auch auf der neurochirurgischen Station etabliert war. Dies entspricht auch der aktuellen Studienlage⁷⁵.

5.5 Vergleich postoperativer und nicht-postoperativer Patienten

Zusätzlich zu der Zuteilung der Patienten zu den einzelnen Intensivstationen erfolgte auch noch eine Aufteilung der Patienten in postoperative und nicht-postoperative Patienten. Dies geschah in der Annahme, dass postoperative Patienten häufig einen weniger schweren Verlauf haben, da sie nicht mit schweren Krankheitsbildern wie der Sepsis zu kämpfen haben. Diese Annahme ließ sich durch den Vergleich der mittleren Beatmungsdauer bestätigen. Während die postoperativen Patienten im Mittel 8,6 Tage beatmet wurden, war die mittlere Beatmungsdauer bei den nicht-postoperativen Patienten mit 13,4 Tagen deutlich länger.

Da bei den postoperativen Patienten ein weniger schwerer Krankheitsverlauf angenommen wurde, sollte bei diesen Patienten die lungenprotektive Beatmung gut umsetzbar gewesen sein. Bei nicht-postoperativen Patienten wurde aufgrund der Grunderkrankung eventuell mehr Augenmerk auf diese gerichtet als auf die optimale Beatmung der Patienten. Dies ließ sich bei Betrachtung der Verteilung der Tidalvolumina bestätigen. Während die postoperative Gruppe zu 74,2% mit einem Tidalvolumen unter 8 ml/kg KG ventilert wurde, traf dies bei den nicht-postoperativen Patienten nur auf 59,9% zu. Diesen Trend zeigte auch die Betrachtung der

Überschreitung von 6 ml/kg KG pro Beatmungsdauer, da auch hier die postoperative Gruppe mit 1,6 Überschreitungen einen kleineren Wert als die nicht-postoperative Gruppe mit 1,9 Überschreitungen hatte.

Wie bereits bei der Betrachtung der Tidalvolumina erwähnt, ist es wichtig, diesen Wert als relative Zahl anzusehen und die Größe der Zahlen miteinander zu vergleichen. Bei dieser Berechnung spielten besonders hohe Tidalvolumina eine große Rolle, da die Höhe jeder einzelnen Überschreitung miteingerechnet wurde. Dies bedeutet, dass die postoperative Gruppe nicht nur im Mittel, sondern auch über das gesamte Spektrum der Tidalvoluminawerte geringere Überschreitungen der Grenzwerte zeigte.

Zusätzlich zu der Beatmung auf den Intensivstationen kommt bei den postoperativen Patienten auch die intraoperative Beatmung dazu. Dabei konnte gezeigt werden, dass bei diesen Patienten eine intraoperativ lungenprotektive Beatmung vor pulmonalen Komplikationen im Verlauf schützt ⁷⁷. Außerdem hat die Doppelblindstudie von Futier et al. gezeigt, dass Patienten, bei denen schon während der Operation niedrige Tidalvolumina angewendet wurden, hinterher weniger häufig nicht-invasiv oder invasiv beatmet wurden und 2,5 Tage kürzer im Krankenhaus bleiben mussten als die Kontrollgruppe ⁷⁸.

5.6 Nicht-invasive Beatmung

Die nicht-invasive Beatmung (NIV) stellt eine gute Alternative zur invasiven Beatmung bei der Behandlung von Patienten mit respiratorischer Insuffizienz dar ¹⁵. Sie reduziert die Aufenthaltsdauer der Patienten auf der Intensivstation und im Krankenhaus. Allerdings müssen die Kontraindikationen fehlende Spontanatmung, Schnappatmung, fixierte oder funktionelle Verlegung der Atemwege, gastrointestinale Blutungen oder ein Ileus und ein nicht-hyperkapnisches Koma unbedingt vor Verwendung der NIV ausgeschlossen werden ⁷⁹. Mit der Anwendung der nicht-invasiven Beatmung kamen drei Patienten aus. Vier weitere Patienten wurden davor oder im Anschluss invasiv beatmet.

Zur Durchführung der NIV sollte initial eine Nasen-/Mundmaske verwendet werden. Dies fand auch auf den drei Intensivstationen statt, wobei bei einem Patienten im Verlauf ein Beatmungshelm zum Einsatz kam. Im Zusammenhang mit der NIV

haben viele Patienten Schlafstörungen, was zu NIV-Versagen und einem symptomatischen Delir führen kann ⁸⁰. Daher ist eine leichte Sedierung der Patienten mit einem Ziel-RASS-Score von 0 bis 1 zu favorisieren ⁷⁹. Diese Werte wurden auf den untersuchten Stationen nur bedingt eingehalten, denn die Patienten zeigten zumeist einen RASS-Score von 0 oder -1 und ein Patient sogar von -4. Zur weiteren Überwachung der Patienten sollten regelmäßige BGA-Kontrollen sowie ein Monitoring der Sauerstoffsättigung über 24 Stunden erfolgen ⁷⁹.

In der aktuellen S3-Leitlinie wird NIV bei akuter hypoxämischer respiratorischer Insuffizienz nach chirurgischen Eingriffen empfohlen ²². Der postoperative Behandlungsgrund mit NIV war

auch auf den untersuchten Intensivstationen mit 57,1% der häufigste. Dabei ist auch intraoperativ bereits entscheidend, ob lungenprotektive Beatmung verwendet wird oder nicht. Ist dies der Fall, muss danach nur bei 5% der Patienten NIV oder eine invasive Beatmung als Unterstützung eingesetzt werden, während dies bei der nicht-lungenprotektiven Gruppe auf 17% zutraf⁷⁸. Den besten Einfluss auf PaO₂, SpO₂ sowie das Tidalvolumen hat hierbei der Einsatz von low-flow-CPAP⁸¹. Dies wurde auch bei den Patienten auf den untersuchten Intensivstationen eingesetzt.

Ein weiterer Grund für die Verwendung der nicht-invasiven Beatmung ist die Vermeidung einer Re-Intubation nach der Beendigung der invasiven Beatmung⁸². Jedoch musste ein Patient trotz der Verwendung der NIV re-intubiert werden. Bei einem weiteren Patienten kam es ebenfalls zum NIV-Versagen, dieser war zuvor jedoch nicht invasiv beatmet worden.

Die Angabe der weiteren Gründe zur Verwendung der NIV zeigte, dass diese Patienten aufgrund ihrer Grunderkrankung eine Atemhilfe benötigten, jedoch auf eine invasive Beatmung verzichtet werden konnte. Bei diesen drei Beatmungsgründen handelte es sich um je einen Patienten mit einer Sepsis, einer nosokomial erworbenen Pneumonie und einer kongestiven Herzinsuffizienz.

Der Einsatz von NIV hat sich erst in den letzten Jahren flächendeckend etabliert. Die VENTILA-Studien von Esteban et al. zeigen diesen Trend deutlich, da im Jahr 2004 bereits häufiger NIV benutzt wurde als noch 1998, als sie nur bei 5% der Patienten Anwendung fand¹⁸. Dieser Trend verstärkte sich bis 2010 noch einmal mit 14% der nicht-invasiv beatmeten Patienten¹⁹. Diese Zahlen konnten allerdings von Frutos-Vivar et al. nicht bestätigt werden und sie nannten eine deutlich niedrigere NIV-Rate⁶. Dies lässt sich jedoch durch regionale und saisonale Unterschiede erklären. Besonders die exazerbierte COPD unterliegt diesen saisonalen Schwankungen⁶. Die regionalen Unterschiede zeigen insbesondere ein Nord-Süd-Gefälle, mit einer höheren NIV-Rate in Nordeuropa⁸³. Die in der vorliegenden Arbeit untersuchten Intensivstationen spiegeln mit 13,7% die NIV-Rate von Esteban et al. aus dem Jahr 2010 wider. Dabei wurde nur ein Patient der Station A mit NIV behandelt. Allerdings ließ sich durch die niedrige Gesamtpatientenanzahl von elf Patienten auf der Station A keine weitere Schlussfolgerung aus diesem Umstand ziehen.

5.7 Organversagen und weitere Komplikationen

Um den Organstatus auszuwerten, wurden die Patienten täglich auf bestimmte Krankheitsbilder untersucht. Zu diesen zählte unter anderem die beatmungsassoziierte Pneumonie. Pelosi et al. konnten zeigen, dass diese besonders häufig bei Patienten auftritt, die aufgrund eines neurologischen Problems beatmet wurden⁸⁴. Diese Annahme geben die hier untersuchten Daten nur bedingt wieder. Zwar trat auf der chirurgischen Station B keine einzige beatmungsassoziierte Pneumonie auf. Aber die chirurgische Station C und die

neurochirurgische Station A wiesen jeweils einen Fall einer beatmungsassoziierten Pneumonie auf.

Auch die Häufigkeit einer Sepsis wurde dokumentiert und die Patienten täglich auf die oben genannten Kriterien hin geprüft. Dabei trat auf der neurochirurgischen Station A nur bei 2,1% eine Sepsis auf. Dies lag weit unter den Werten der Stationen B und C mit 34,4% bzw. 36,3%. Allerdings muss hierbei mit einbezogen werden, dass jeweils zwei Patienten der Stationen B und C schon initial an einer Sepsis erkrankt waren und dies der primäre Grund für die invasive Beatmung war. Dies war auf der Station A nur bei einem Patienten der Fall. In der aktuellen Sepsis-Leitlinie wird die invasive Beatmung thematisiert und wie oben bereits erwähnt, nimmt bei diesen Patienten die lungenprotektive Beatmung mit niedrigen Tidalvolumina eine zentrale Rolle in der Behandlung ein.

Generell konnte bei dem Vergleich von nicht-neurologischen und neurologischen Patienten festgestellt werden, dass letztere zwar eine höhere Mortalitätsrate haben, dafür aber weniger extrazerebrale Organversagen⁸⁴.

Das Auftreten des ARDS wurde bei einem einzigen Patienten festgestellt. Dieser Patient erfüllte bereits am Tag des Beginns der invasiven Beatmung die erforderlichen Kriterien des ARDS. Bei dem Patienten, der nach vier Tagen verstorben ist, handelte es sich um ein Polytrauma. Da gerade bei den ARDS-Patienten die Leitlinien zur lungenprotektiven Beatmung eindeutig sind und Tidalvolumina über 8 ml/kg KG strikt zu vermeiden sind, sollen die Werte dieses Patienten näher beleuchtet werden. Initial wurde der Patient mit einem Tidalvolumen von 8,86 ml/kg KG beatmet. Im Folgenden lagen die Werte bei 7,84 ml/kg KG, 6,02 ml/kg KG und 4,55 ml/kg KG. Hieraus ist ersichtlich, dass an Tag 0 der Beatmung zu hohe Tidalvolumina verwendet wurden, diese wurden jedoch im Verlauf gut gesenkt und sogar unter die Grenze von 6 ml/kg KG gebracht.

5.8 Leber- und Niereninsuffizienz

Des Weiteren wurde bei allen Patienten das Auftreten eines Leber- oder Nierenversagens dokumentiert. Dies geschah mit Hilfe des Bilirubin- und Kreatininwertes, sowie der Urinausscheidung und der Anwendung von Nierenersatzverfahren.

Die Erhöhung des Bilirubinwertes im Rahmen der mechanischen Beatmung lässt sich eventuell auf eine Kompression intrahepatischer Gallengänge zurückführen⁸⁵. Eine Studie von Brochard et al. mit 116 Patienten konnte beim Vergleich der lungenprotektiven Beatmung und der Kontrollgruppe keine Verbesserung in Bezug auf Multiorganversagen feststellen³⁸. Allerdings konnten Forscher zeigen, dass die Lunge mit den distalen Organen über ein komplexes System aus neuronalen, inflammatorischen, immunologischen und neuroendokrinen Wegen verbunden ist. Da die mechanische Beatmung diese Wege

beeinflussen kann, ist die lungenprotektive Beatmung ein wichtiger Faktor, um ungünstige Einflüsse auf dieses System zu mildern und damit Multiorganversagen zu verhindern ⁸⁶.

Die genauere Betrachtung des Kreatininwertes lässt Rückschlüsse auf ein Versagen der Niere zu ⁸⁷. Die häufige Beeinträchtigung der Niere lässt sich auf direkte Verbindungen zwischen der Lunge und der Niere zurückführen, die schädliche Auswirkungen auf die Lunge haben können und auch das hohe Organversagen bei ARDS-Patienten erklären ⁸⁸.

Wernly et al. konnten außerdem zeigen, dass die gleichzeitige Erhöhung des Bilirubin- und Kreatininwertes mit einer erhöhten Mortalität assoziiert ist ⁸⁹.

In der vorliegenden Arbeit wurden nur die nicht-neurochirurgischen Patienten in die Subgruppen mit und ohne Leber- bzw. Nierenversagen eingeteilt. Dies lag daran, dass neurochirurgische Patienten meist mit höheren Tidalvolumina beatmet wurden, dieser Umstand aber auf ihr neurologisches Problem und nicht auf eine Leber oder Nierenkomplikation zurück zu führen war.

Überraschenderweise zeigte ein Vergleich der vermeintlich schwerkranken Patienten mit Leber- oder Niereninsuffizienz und den Patienten ohne Organversagen, dass es nahezu keine Unterschiede bei den verwendeten Tidalvolumina gab. Daraus lässt sich die Aussage ableiten, dass die Tidalvolumina eher nicht von der Erkrankungsschwere der Patienten determiniert werden.

Im Gegensatz dazu trugen die Leber- oder Niereninsuffizienz deutlich zu einer verlängerten Beatmungsdauer bei. Diese war bei Patienten mit Leber- bzw. Nierenversagen im Durchschnitt 5,6 Tage länger.

5.9 Behandlungsergebnis

Um die Patienten von der Beatmung zu entwöhnen, wird das so genannte Weaning eingesetzt. Häufig wird dieses Weaning anhand von bestimmten Protokollen durchgeführt ^{42,82}. Diese helfen dabei, die Beatmungsdauer sowie die Aufenthaltsdauer zu verringern ⁹⁰. Im Gegensatz dazu kann bei einer Kurzzeitbeatmung von weniger als 48 Stunden, z.B. bei postoperativen Patienten, auf ein Weaning-Protokoll verzichtet werden ⁸⁵. Auch bei neurochirurgischen Patienten besteht ein geringerer Benefit bei der Verwendung von Protokollen als bei anderen Patienten ⁹⁰.

Von besonderer Wichtigkeit ist bei allen Patienten das tägliche Überprüfen der Notwendigkeit der Beatmung und der rasche Beginn des Weanings ⁹¹. Zu dieser Überprüfung zählt auch der tägliche Spontanatemversuch, für den die Sedierung möglichst niedrig sein sollte, um ein gutes Ergebnis zu erzielen ⁹². Prolongiertes Weaning wird durch mehr als drei Spontanatemversuche oder ein Weaning, das länger als sieben Tage dauert, definiert ⁸⁵. Beim prolongierten Weaning steigt die Mortalitätsrate auf 12,1% an, daher ist ein rascher Weaning-Verlauf besonders wichtig ⁹³. Es ist als sehr positiv zu bewerten, dass das Weaning über die

Jahre effektiver geworden ist ⁹⁴. Das prolongierte Weaning wird durch die Beatmungsdauer, chronische Lungenerkrankungen oder Pneumonien beeinflusst ⁹³.

Das erfolgreiche Weaning ist bei Patienten erreicht, die seit mindestens 48 Stunden keine maschinelle Atemhilfe mehr brauchen und hierbei keine Anzeichen einer respiratorischen Erschöpfung zeigen ⁸⁵. Dies traf auf die Mehrheit der Patienten auf den drei Intensivstationen zu. Allerdings wurde auch bei fünf der Patienten ein Weaning-Versagen festgestellt, wobei vier dieser Patienten auf der Station C lagen. Bei diesen Patienten konnte das Weaning laut Protokoll nicht weiter fortgeführt werden, da die Patienten mehr Unterstützung brauchten.

Damit die Patienten optimal von dem Beatmungsgerät entwöhnt werden können, sollten möglichst Beatmungsmodi eingesetzt werden, die auch Spontanatmung zulassen ⁹⁵. Außerdem konnten mehrere Studien zeigen, dass druck- und volumenregulierte Beatmung die Mortalität der Patienten senken ^{77,96,97}.

In Deutschland wird vor allem der Beatmungsmodus BIPAP eingesetzt ⁹⁸. Dies war auch auf den drei untersuchten Intensivstationen der Fall, die in 62% der Fälle den BIPAP-Modus verwendeten und zu 35,1% den CPAP-Modus. Außerdem wurden noch zwei weitere Beatmungsmodi auf der Station A in Form der Pressure Regulated Volume Controlled (PRVC) Beatmung und der Pressure Support Ventilation (PSV) verwendet.

Ein erfolgreiches Weaning der Patienten mündet in eine Extubation und ermöglicht damit die Einstellung der maschinellen Beatmung. Die Extubation wird von vielen Patienten als große Erleichterung empfunden, jedoch müssen im Mittel rund 20% dieser Patienten wieder re-intubiert werden ⁹⁹. Auf den drei Intensivstationen lag die Re-Intubationsrate im Mittel bei 15,7%, wobei die Station A mit 9,1% deutlich unter diesem Wert und die Station B mit 23,5% deutlich über diesem Wert lag. Dennoch lag die gesamte Re-Intubationsrate mit 15,7% unter dem Durchschnitt von 20%.

Bei Patienten, bei denen von einer längeren Beatmungsdauer auszugehen ist, wird häufig über eine Tracheotomie nachgedacht. Diese sollte möglichst innerhalb von vier Tagen stattfinden, da dies zu einer geringeren 30-Tage-Mortalität führt ¹⁰⁰. Beim Vergleich nicht-neurochirurgischer und neurochirurgischer Patienten zeigt sich, dass neurochirurgische Patienten häufiger tracheotomiert werden ⁸⁴. Dies spiegelt sich auch auf den untersuchten Intensivstationen wider, bei denen die neurochirurgische Station A mit einer Tracheotomie-Rate von 36,4% deutlich über der Gesamtrate von 27,5% lag.

Ob die lungenprotektive Beatmung einen Einfluss auf die Beatmungsdauer hat, lässt sich nicht sicher sagen ¹⁰¹. Allerdings ist auch hierbei das Zulassen einer Spontanatmung sehr wichtig, da diese die Beatmungsdauer reduzieren kann ¹⁰². Die mittlere Beatmungsdauer unterschied sich auf den drei Intensivstationen sehr stark und die Station A lag mit 17,0 Tagen deutlich über dem Gesamtdurchschnitt von 10,9 Tagen. Diese Tendenz zeigte sich auch in der mittleren Beatmungsdauer bei erfolgreicher Beatmungsbeendigung, da auch hier die Station

A mit 20,7 Tagen über dem Mittelwert aller Stationen mit 14,1 Tagen lag. In diesem Fall, wurden nur die Patienten berücksichtigt, die am Ende des Intensiv Aufenthaltes noch lebten. Dies erklärte auch die deutlich längere Beatmungsdauer der Patienten dieser Station, da die zwischenzeitlich verstorbenen Patienten mit einer verkürzten Beatmungsdauer nicht in der Auswertung erfasst wurden.

Auch die Länge der Aufenthaltsdauer auf der Intensivstation zeigte eindeutige Unterschiede. Erneut zeigte die Station A mit 27,7 Tagen eine deutlich höhere mittlere Aufenthaltsdauer als die Stationen B und C. Allerdings lagen die drei Stationen sehr nah beieinander, wenn man die mittlere Krankenhausaufenthaltsdauer beobachtet. Dies bedeutete, dass die Patienten im Endeffekt gleich lang im Krankenhaus stationär waren, auch wenn die neurochirurgischen Patienten eine längere Zeit auf der Intensivstation verbrachten. Hierbei spielte auch die lungenprotektive Beatmung eine Rolle, da diese den Krankenhausaufenthalt um bis zu 2,5 Tage verkürzen kann ⁷⁸.

Ein weiterer Untersuchungspunkt war das Outcome der Patienten. Dieses wurde im Rahmen der VENTILA-Studien von Esteban et al. ^{18,19} untersucht. So wurden zwar im Jahr 2004 andere Beatmungstechniken angewendet als noch 1998, doch das Outcome war nicht signifikant verändert. Dies änderte sich erst in der Studie aus dem Jahr 2010, in der ein signifikant höheres Überleben festgestellt werden konnte ¹⁹. Die Verbesserung der Mortalitätsrate durch lungenprotektive Beatmung zeigen auch viele andere Studien ^{1,28}. Dabei zeigt besonders ΔP als Variable am besten das Mortalitätsrisiko der Patienten an ⁴⁰. Weitere Variablen die Prädiktoren für das Überleben darstellen, sind unter anderem das Alter, Komorbiditäten, pH, PaCO₂, PaO₂/FiO₂ und die Aufenthaltsdauer ¹⁰³.

Ein weiterer wichtiger Faktor für die Mortalitätsrate der Patienten könnte die Organisation auf den Intensivstationen darstellen ¹⁰⁴. Dabei zeigt die Unterscheidung von geschlossenen (verpflichtende intensivmedizinische Versorgung) und offenen Intensivstationen, dass auf den geschlossenen niedrigere Tidalvolumina verwendet werden ¹⁰⁵. Dies wirkt sich auch auf die Mortalität der Patienten aus, die auf geschlossenen Intensivstationen geringer ist als auf offenen ¹⁰⁶. Außerdem hilft der Einsatz von Protokollen dabei, niedrige und an den Patienten angepasste Tidalvolumina zu verwenden ^{107,108}. Die Verwendung von vielen oder wenigen Protokollen stellt jedoch keinen Unterschied bezüglich der Mortalität der Patienten dar ¹⁰⁹.

Die Studie von Brun-Buisson et al. zeigt, dass in Europa die Mortalitätsrate bei Patienten ohne ARDS auf Intensivstationen bei 32,7% lag ¹¹⁰. Diese Zahl deckt sich in etwa mit der Gesamtmortalität von 29,3% auf den untersuchten Intensivstationen. Dabei fällt auf, dass Station A mit 18,2% deutlich unter diesem Durchschnitt lag. Dies ist insbesondere deswegen auffällig, da neurologische Patienten häufig höhere Mortalitätsraten als nicht-neurologische Patienten aufweisen ⁸⁴.

Der niedrigen Mortalitätsrate auf der Station A musste dennoch die ebenso niedrige Entlassungsrate nach Hause entgegengestellt werden. Denn nur 27,3% der Patienten auf der Station A konnten nach Hause entlassen werden, während dies mit jeweils ca. 45% auf den Stationen B und C ein deutlich größerer Anteil war. Dies ließ darauf schließen, dass mehr Patienten der Stationen B und C in einem, dem vorherigen Zustand vergleichbaren Zustand, wieder entlassen wurden. Im Gegensatz dazu wurden die meisten Patienten der Station A in ein Pflegeheim, in Rehabilitationsmaßnahmen oder sogar ein anderes peripheres Krankenhaus entlassen.

5.10 Limitationen

Auf den drei untersuchten Intensivstationen haben über den Zeitraum von einem Monat nur 51 Patienten die erforderlichen Kriterien erfüllt und konnten in die Studie eingeschlossen werden. Daraus ergab sich eine begrenzte Anzahl an Werten bezogen auf das Outcome der Patienten. Deswegen ließen sich die gefundenen Unterschiede in der Beatmungsqualität nicht auf das Behandlungsergebnis übertragen, da durch die geringe Anzahl keine signifikanten Unterschiede zwischen den Stationen aufgezeigt werden konnten.

Allerdings konnte durch die Nachbeobachtung der Patienten über 28 Tage eine große Datenmenge bezogen auf die Beatmungsparameter und Komplikationen im Verlauf der Beatmung erhoben werden. Aus diesem Grund ließen sich trotz der geringen Anzahl an Patienten signifikante Beatmungsunterschiede und entstandene Komplikationen sehr gut darstellen. Außerdem ließ die Festlegung auf genau einen Monat der Patientenerfassung eine gute Vergleichbarkeit für künftige Studien zu.

Ein weiterer Kritikpunkt war die nur einmal tägliche Erfassung der Werte. Insbesondere die Beatmungswerte können im Laufe des Tages schwanken und daher repräsentierten die erhobenen Werte am Morgen nicht etwaige Variationen zu späterer Stunde. Dennoch bot die tägliche Erhebung zumindest einen guten Überblick über den Behandlungsverlauf und erfasste die standardmäßige Verwendung verschiedener Beatmungseinstellungen.

Auch die Auswertungen des optimalen PEEP stellte eine Herausforderung dar und war mit Limitationen behaftet. Da für jeden einzelnen Patienten der optimale PEEP vor Ort angepasst und von dem medizinischen Personal eingeschätzt werden musste, war die retrospektive Auswertung nur als Annäherung möglich. Zu diesem Zweck wurde, wie in den AWMF-Leitlinien empfohlen, die oben aufgeführte FiO₂:PEEP-Tabelle verwendet ²².

Des Weiteren wurde in Bezug auf das Tidalvolumen nur eine Überschreitung der empfohlenen Werte ausgewertet und nicht untersucht wie viele der Werte den Richtwert von 6 ml/kg KG unterschritten. Dadurch konnten die im Diskussionsteil unter 4.1 beschriebenen negativen Effekte zu niedriger Tidalvolumina in der vorliegenden Arbeit nicht berücksichtigt werden.

5.11 Schlussfolgerungen

Die vorliegende Arbeit hat als Ziel die Hypothesenprüfung (H_0), dass die Beatmung bei den Patienten auf den untersuchten Intensivstationen leitliniengerecht durchgeführt wurde. Diese Hypothese ließ sich durch die Betrachtung der Einhaltung der Tidalvolumen- und Plateaudruckgrenzen nicht bestätigen. Diese beinhalteten Tidalvolumina <8 ml/kg KG und Plateaudrücke <30 cmH₂O. Die Auswertung zeigte, dass der Grad der praktischen Umsetzung lungenprotektiver Beatmung nur bei 62,8% lag. In diesen Fällen wurden sowohl die Tidalvolumina als auch die Plateaudrücke leitliniengerecht angewendet.

Die Subanalyse der Untergruppen postoperative und nicht-postoperative Patienten zeigte ebenfalls einen Unterschied im Grad der Umsetzung leitliniengerechter Beatmung. Dieser war bei den postoperativen Patienten mit 74,2% höher als der Durchschnitt.

Nahm man jedoch noch die Auswertung des optimalen PEEP hinzu, erfüllten nur noch 37,3% der Beatmungswerte die Vorgabe sowohl der niedrigen Tidalvolumina als auch des Plateaudruckes unter 30 cmH₂O und die Einhaltung des empfohlenen FiO₂ zu PEEP-Verhältnisses. Dies war ein deutlich niedrigerer Prozentsatz an lungenprotektiver Beatmung, welcher insbesondere auf den PEEP zurückzuführen war. Hierfür war zum einen die unter Punkt 4.9 „Limitationen“ bereits beschriebene Schwierigkeit der retrospektiven Analyse des optimalen PEEP-Wertes verantwortlich. Zum anderen wurden auf den untersuchten Stationen hauptsächlich höhere PEEP-Werte verwendet. Da die zur Auswertung vorliegende FiO₂:PEEP-Tabelle jedoch zur Einstellung niedriger PEEP-Werte diente, mussten die PEEP-Überschreitungen relativ gesehen werden. Die vielfach kritisierte Anwendung zu niedriger PEEP-Werte konnte durch diese Auswertung ausgeschlossen werden und die Anwendung adäquat hoher Werte wurde auf allen drei Intensivstationen bestätigt.

Durch den Vergleich der neurochirurgischen Station A mit den beiden rein chirurgischen Stationen B und C konnte insbesondere im Hinblick auf die Verwendung adäquater Tidalvolumina ein deutlicher Unterschied festgestellt werden. Dies zeigt, dass die Einhaltung der Grenzwerte von <8 ml/kg KG auf den chirurgischen Stationen einen höheren Stellenwert hatte, während auf der neurochirurgischen Station andere Parameter, wie z.B. der PaCO₂, eine ebenso wichtige Rolle spielten.

Auf den drei Intensivstationen zeigte sich ein unterschiedliches Spektrum an Komplikationen, die jedoch eher auf die bereits bestehenden Grunderkrankungen zurückzuführen waren und nur teilweise beatmungsassoziiert auftraten. Einen Zusammenhang zwischen erfolgreicher lungenprotektiver Beatmung und dem Outcome konnte aufgrund der niedrigen Patientenzahl nicht eindeutig aufgezeigt werden.

6. Literaturverzeichnis

- 1 The Acute Respiratory Distress Syndrome Network. Ventilation with lower tidal volumes as compared with traditional tidal volumes for acute lung injury and the acute respiratory distress syndrome. *N Engl J Med* 2000; **342**: 1301–08.
<https://doi.org/10.1056/NEJM200005043421801>.
- 2 Brunkhorst FM, Engel C, Ragaller M, et al. Practice and perception--a nationwide survey of therapy habits in sepsis. *Crit Care Med* 2008; **36**: 2719–25.
<https://doi.org/10.1097/CCM.0b013e318186b6f3>.
- 3 Carbery C. Basic concepts in mechanical ventilation. *J Perioper Pract* 2008; **18**: 106–14.
- 4 Dries DJ. Mechanical Ventilation. History and Harm. *Air Med J* 2016; **35**: 12–15.
<https://doi.org/10.1016/j.amj.2015.10.006>.
- 5 Shapiro BA. A historical perspective on ventilator management. *New Horiz* 1994; **2**: 8–18.
- 6 Frutos-Vivar F, Ferguson ND, Esteban A. Mechanical ventilation. Quo vadis? *Intensive Care Med* 2009; **35**: 775–78. <https://doi.org/10.1007/s00134-009-1450-3>.
- 7 Gattinoni L, Pesenti A. The concept of "baby lung". *Intensive Care Med* 2005; **31**: 776–84. <https://doi.org/10.1007/s00134-005-2627-z>.
- 8 Gattinoni L, Marini JJ, Pesenti A, Quintel M, Mancebo J, Brochard L. The "baby lung" became an adult. *Intensive Care Med* 2016; **42**: 663–73. <https://doi.org/10.1007/s00134-015-4200-8>.
- 9 Gattinoni L, Carlesso E, Valenza F, Chiumello D, Caspani ML. Acute respiratory distress syndrome, the critical care paradigm. What we learned and what we forgot. *Curr Opin Crit Care* 2004; **10**: 272–78.
- 10 Lachmann B. Open up the lung and keep the lung open. *Intensive Care Med* 1992; **18**: 319–21. <https://doi.org/10.1007/BF01694358>.
- 11 Engelmann L. Das Open-lung-Konzept. *Anaesthesist* 2000; **49**: 1046–53.
<https://doi.org/10.1007/s001010070021>.
- 12 Rotman V, Carvalho AR, Rodrigues RS, et al. Effects of the open lung concept following ARDSnet ventilation in patients with early ARDS. *BMC Anesthesiol* 2016; **16**: 40.
<https://doi.org/10.1186/s12871-016-0206-1>.
- 13 Reis Miranda D, Gommers D, Struijs A, et al. Ventilation according to the open lung concept attenuates pulmonary inflammatory response in cardiac surgery. *Eur J Cardiothorac Surg* 2005; **28**: 889–95. <https://doi.org/10.1016/j.ejcts.2005.10.007>.
- 14 Hodgson C, Goligher EC, Young ME, et al. Recruitment manoeuvres for adults with acute respiratory distress syndrome receiving mechanical ventilation. *Cochrane Database Syst Rev* 2016; **11**: CD006667. <https://doi.org/10.1002/14651858.CD006667.pub3>.

- 15 Kersten A, Cornelissen C. „Acute respiratory distress syndrome“: Diagnostik und Therapie – State of the Art. *Pneumologie (Berl)* 2020: 1–9.
<https://doi.org/10.1007/s10405-020-00326-5>.
- 16 Ball L, Serpa Neto A, Trifiletti V, et al. Effects of higher PEEP and recruitment manoeuvres on mortality in patients with ARDS: a systematic review, meta-analysis, meta-regression and trial sequential analysis of randomized controlled trials. *Intensive Care Med Exp* 2020; **8**: 39. <https://doi.org/10.1186/s40635-020-00322-2>.
- 17 Esteban A, Anzueto A, Frutos F, et al. Characteristics and outcomes in adult patients receiving mechanical ventilation. A 28-day international study. *JAMA* 2002; **287**: 345–55.
- 18 Esteban A, Ferguson ND, Meade MO, et al. Evolution of mechanical ventilation in response to clinical research. *Am J Respir Crit Care Med* 2008; **177**: 170–77.
<https://doi.org/10.1164/rccm.200706-893OC>.
- 19 Esteban A, Frutos-Vivar F, Muriel A, et al. Evolution of mortality over time in patients receiving mechanical ventilation. *Am J Respir Crit Care Med* 2013; **188**: 220–30.
<https://doi.org/10.1164/rccm.201212-2169OC>.
- 20 Peñuelas O, Muriel A, Abaira V, et al. Inter-country variability over time in the mortality of mechanically ventilated patients. *Intensive Care Med* 2020; **46**: 444–53.
<https://doi.org/10.1007/s00134-019-05867-9>.
- 21 Simonis FD, Serpa Neto A, Binnekade JM, et al. Effect of a Low vs Intermediate Tidal Volume Strategy on Ventilator-Free Days in Intensive Care Unit Patients Without ARDS. A Randomized Clinical Trial. *JAMA* 2018; **320**: 1872–80.
<https://doi.org/10.1001/jama.2018.14280>.
- 22 Deutsche Gesellschaft für Anästhesiologie & Intensivmedizin. Invasive Beatmung und Einsatz extrakorporaler Verfahren bei akuter respiratorischer Insuffizienz. S3 Leitlinie. http://www.awmf.org/uploads/tx_szleitlinien/001-021k_S3_Invasive_Beatmung_2017-12.pdf. (Zuletzt abgerufen am 16.04.2021)
- 23 Ranieri VM, Rubenfeld GD, Thompson BT, et al. Acute respiratory distress syndrome. The Berlin Definition. *JAMA* 2012; **307**: 2526–33.
<https://doi.org/10.1001/jama.2012.5669>.
- 24 Saguil A, Fargo MV. Acute Respiratory Distress Syndrome: Diagnosis and Management. *Am Fam Physician* 2020; **101**: 730–38.
- 25 Bernard GR, Artigas A, Brigham KL, et al. The American-European Consensus Conference on ARDS. Definitions, mechanisms, relevant outcomes, and clinical trial coordination. *Am J Respir Crit Care Med* 1994; **149**: 818–24.
<https://doi.org/10.1164/ajrccm.149.3.7509706>.
- 26 Jahn N., Völker T., Laudi S., Kaisers U. Beatmung auf der Intensivstation - eine Praxisanleitung. *Aktuelles Wissen für Anästhesisten* 2014: 77–85.

- 27 Kiss T, Bluth T, Gama de Abreu M. Reduziert eine intraoperative lungenprotektive Beatmung postoperative pulmonale Komplikationen? *Anaesthesist* 2016; **65**: 573–79. <https://doi.org/10.1007/s00101-016-0198-8>.
- 28 Amato MB, Barbas CS, Medeiros DM, et al. Effect of a protective-ventilation strategy on mortality in the acute respiratory distress syndrome. *N Engl J Med* 1998; **338**: 347–54. <https://doi.org/10.1056/NEJM199802053380602>.
- 29 Oczenski W, Hörmann C. ÖGARI-Leitlinien zur invasiven Beatmung von Intensivpatienten. https://www.oegari.at/web_files/dateiarchiv/editor/leitlinien_invasiven_beatmung_aktualisiert__2017.pdf (accessed Apr 16, 2021). (Zuletzt abgerufen am 16.04.2021)
- 30 Hinkelbein J, Genzwürker H. Formeln und Scores in Anästhesie, Intensivmedizin, Notfallmedizin und Schmerztherapie. Verstehen, berechnen, bewerten und anwenden. Berlin: Medizinisch Wissenschaftliche Verlagsgesellschaft, 2016.
- 31 Brower RG, Lanken PN, MacIntyre N, et al. Higher versus lower positive end-expiratory pressures in patients with the acute respiratory distress syndrome. *N Engl J Med* 2004; **351**: 327–36. <https://doi.org/10.1056/NEJMoa032193>.
- 32 Laffey JG, Kavanagh BP. Ventilation with lower tidal volumes as compared with traditional tidal volumes for acute lung injury. *N Engl J Med* 2000; **343**: 812; author reply 813-4. <https://doi.org/10.1056/NEJM200009143431113>.
- 33 Shen Y, Cai G, Gong S, Dong L, Yan J, Cai W. Interaction between low tidal volume ventilation strategy and severity of acute respiratory distress syndrome: a retrospective cohort study. *Crit Care* 2019; **23**: 254. <https://doi.org/10.1186/s13054-019-2530-6>.
- 34 Checkley W, Brower R, Korpak A, Thompson BT. Effects of a clinical trial on mechanical ventilation practices in patients with acute lung injury. *Am J Respir Crit Care Med* 2008; **177**: 1215–22. <https://doi.org/10.1164/rccm.200709-1424OC>.
- 35 Bates DM, Fernandes TM, Duwe BV, et al. Efficacy of a Low-Tidal Volume Ventilation Strategy to Prevent Reperfusion Lung Injury after Pulmonary Thromboendarterectomy. *Ann Am Thorac Soc* 2015; **12**: 1520–27. <https://doi.org/10.1513/AnnalsATS.201503-142OC>.
- 36 Eichacker PQ, Gerstenberger EP, Banks SM, Cui X, Natanson C. Meta-analysis of acute lung injury and acute respiratory distress syndrome trials testing low tidal volumes. *Am J Respir Crit Care Med* 2002; **166**: 1510–14. <https://doi.org/10.1164/rccm.200208-956OC>.
- 37 Petrucci N, Feo C de. Lung protective ventilation strategy for the acute respiratory distress syndrome. *Cochrane Database Syst Rev* 2013: CD003844. <https://doi.org/10.1002/14651858.CD003844.pub4>.
- 38 Brochard L, Roudot-Thoraval F, Roupie E, et al. Tidal volume reduction for prevention of ventilator-induced lung injury in acute respiratory distress syndrome. The Multicenter Trial

- Group on Tidal Volume reduction in ARDS. *Am J Respir Crit Care Med* 1998; **158**: 1831–38. <https://doi.org/10.1164/ajrccm.158.6.9801044>.
- 39 Marini JJ, Gattinoni L. Ventilatory management of acute respiratory distress syndrome. A consensus of two. *Crit Care Med* 2004; **32**: 250–55. <https://doi.org/10.1097/01.CCM.0000104946.66723.A8>.
- 40 Amato MBP, Meade MO, Slutsky AS, et al. Driving pressure and survival in the acute respiratory distress syndrome. *N Engl J Med* 2015; **372**: 747–55. <https://doi.org/10.1056/NEJMsa1410639>.
- 41 Villar J, Kacmarek RM, Perez-Mendez L, Aguirre-Jaime A. A high positive end-expiratory pressure, low tidal volume ventilatory strategy improves outcome in persistent acute respiratory distress syndrome. A randomized, controlled trial. *Crit Care Med* 2006; **34**: 1311–18. <https://doi.org/10.1097/01.CCM.0000215598.84885.01>.
- 42 Rhodes A, Evans LE, Alhazzani W, et al. Surviving Sepsis Campaign. International Guidelines for Management of Sepsis and Septic Shock: 2016. *Crit Care Med* 2017; **45**: 486–552. <https://doi.org/10.1097/CCM.0000000000002255>.
- 43 Pinheiro de Oliveira R, Hetzel MP, dos Anjos Silva M, Dallegrave D, Friedman G. Mechanical ventilation with high tidal volume induces inflammation in patients without lung disease. *Crit Care* 2010; **14**: R39. <https://doi.org/10.1186/cc8919>.
- 44 Estenssoro E. The FINNALI study on acute respiratory failure. Not the final cut. *Intensive Care Med* 2009; **35**: 1328–30. <https://doi.org/10.1007/s00134-009-1518-0>.
- 45 Anzueto A, Frutos-Vivar F, Esteban A, et al. Influence of body mass index on outcome of the mechanically ventilated patients. *Thorax* 2011; **66**: 66–73. <https://doi.org/10.1136/thx.2010.145086>.
- 46 Kalra SS, Siuba M, Panitchote A, et al. Higher Class of Obesity Is Associated With Delivery of Higher Tidal Volumes in Subjects With ARDS. *Respir Care* 2020; **65**: 1519–26. <https://doi.org/10.4187/respcare.07110>.
- 47 Jong A de, Wrigge H, Hedenstierna G, et al. How to ventilate obese patients in the ICU. *Intensive Care Med* 2020; **46**: 2423–35. <https://doi.org/10.1007/s00134-020-06286-x>.
- 48 Brochard L, Slutsky A, Pesenti A. Mechanical Ventilation to Minimize Progression of Lung Injury in Acute Respiratory Failure. *Am J Respir Crit Care Med* 2017; **195**: 438–42. <https://doi.org/10.1164/rccm.201605-1081CP>.
- 49 Seymour CW, Pandharipande PP, Koestner T, et al. Diurnal sedative changes during intensive care. Impact on liberation from mechanical ventilation and delirium. *Crit Care Med* 2012; **40**: 2788–96. <https://doi.org/10.1097/CCM.0b013e31825b8ade>.
- 50 Jardin F. Tidal volume reduction in patients with acute lung injury when plateau pressures are not high. *Am J Respir Crit Care Med* 2006; **173**: 685-6; author reply 687. <https://doi.org/10.1164/ajrccm.173.6.685b>.

- 51 Tobin MJ. Culmination of an era in research on the acute respiratory distress syndrome. *N Engl J Med* 2000; **342**: 1360–61. <https://doi.org/10.1056/NEJM200005043421808>.
- 52 Hager DN, Krishnan JA, Hayden DL, Brower RG. Tidal volume reduction in patients with acute lung injury when plateau pressures are not high. *Am J Respir Crit Care Med* 2005; **172**: 1241–45. <https://doi.org/10.1164/rccm.200501-048CP>.
- 53 Yasuda H, Nishimura T, Kamo T, et al. Optimal plateau pressure for patients with acute respiratory distress syndrome. A protocol for a systematic review and meta-analysis with meta-regression. *BMJ Open* 2017; **7**: e015091. <https://doi.org/10.1136/bmjopen-2016-015091>.
- 54 Metnitz PGH, Metnitz B, Moreno RP, et al. Epidemiology of mechanical ventilation. Analysis of the SAPS 3 database. *Intensive Care Med* 2009; **35**: 816–25. <https://doi.org/10.1007/s00134-009-1449-9>.
- 55 Gattinoni L, Caironi P, Cressoni M, et al. Lung recruitment in patients with the acute respiratory distress syndrome. *N Engl J Med* 2006; **354**: 1775–86. <https://doi.org/10.1056/NEJMoa052052>.
- 56 Mercat A, Richard J-CM, Vielle B, et al. Positive end-expiratory pressure setting in adults with acute lung injury and acute respiratory distress syndrome. A randomized controlled trial. *JAMA* 2008; **299**: 646–55. <https://doi.org/10.1001/jama.299.6.646>.
- 57 Hess DR. Approaches to conventional mechanical ventilation of the patient with acute respiratory distress syndrome. *Respir Care* 2011; **56**: 1555–72. <https://doi.org/10.4187/respcare.01387>.
- 58 Dasenbrook EC, Needham DM, Brower RG, Fan E. Higher PEEP in patients with acute lung injury. A systematic review and meta-analysis. *Respir Care* 2011; **56**: 568–75. <https://doi.org/10.4187/respcare.01011>.
- 59 Serpa Neto A, Filho RR, Cherpanath T, et al. Associations between positive end-expiratory pressure and outcome of patients without ARDS at onset of ventilation. A systematic review and meta-analysis of randomized controlled trials. *Ann Intensive Care* 2016; **6**: 109. <https://doi.org/10.1186/s13613-016-0208-7>.
- 60 Simonis FD, Juffermans NP, Schultz MJ. Mechanical ventilation of the healthy lungs: lessons learned from recent trials. *Curr Opin Crit Care* 2021; **27**: 55–59. <https://doi.org/10.1097/MCC.0000000000000787>.
- 61 Briel M, Meade M, Mercat A, et al. Higher vs lower positive end-expiratory pressure in patients with acute lung injury and acute respiratory distress syndrome. Systematic review and meta-analysis. *JAMA* 2010; **303**: 865–73. <https://doi.org/10.1001/jama.2010.218>.
- 62 Cavalcanti AB, Suzumura ÉA, Laranjeira LN, et al. Effect of Lung Recruitment and Titrated Positive End-Expiratory Pressure (PEEP) vs Low PEEP on Mortality in Patients

- With Acute Respiratory Distress Syndrome. A Randomized Clinical Trial. *JAMA* 2017; **318**: 1335–45. <https://doi.org/10.1001/jama.2017.14171>.
- 63 Chiumello D, Carlesso E, Brioni M, Cressoni M. Airway driving pressure and lung stress in ARDS patients. *Crit Care* 2016; **20**: 276. <https://doi.org/10.1186/s13054-016-1446-7>.
- 64 Algera AG, Pisani L, Serpa Neto A, et al. Effect of a Lower vs Higher Positive End-Expiratory Pressure Strategy on Ventilator-Free Days in ICU Patients Without ARDS: A Randomized Clinical Trial. *JAMA* 2020; **324**: 2509–20. <https://doi.org/10.1001/jama.2020.23517>.
- 65 Sahetya SK, Goligher EC, Slutsky AS. Searching for the Optimal PEEP in Patients Without ARDS: High, Low, or in Between? *JAMA* 2020; **324**: 2490–92. <https://doi.org/10.1001/jama.2020.23067>.
- 66 Beitler JR. Lung protection in acute respiratory distress syndrome: what should we target? *Curr Opin Crit Care* 2020; **26**: 26–34. <https://doi.org/10.1097/MCC.0000000000000692>.
- 67 Cressoni M, Chiurazzi C, Chiumello D, Gattinoni L. Verhindert ein hoher PEEP den zyklischen Kollaps der Alveolen? *Med Klin Intensivmed Notfmed* 2018; **113**: 7–12. <https://doi.org/10.1007/s00063-017-0375-9>.
- 68 Guo L, Wang W, Zhao N, et al. Mechanical ventilation strategies for intensive care unit patients without acute lung injury or acute respiratory distress syndrome. A systematic review and network meta-analysis. *Crit Care* 2016; **20**: 226. <https://doi.org/10.1186/s13054-016-1396-0>.
- 69 Meade MO, Cook DJ, Guyatt GH, et al. Ventilation strategy using low tidal volumes, recruitment maneuvers, and high positive end-expiratory pressure for acute lung injury and acute respiratory distress syndrome. A randomized controlled trial. *JAMA* 2008; **299**: 637–45. <https://doi.org/10.1001/jama.299.6.637>.
- 70 Pi X, Cui Y, Wang C, et al. Low tidal volume with PEEP and recruitment expedite the recovery of pulmonary function. *Int J Clin Exp Pathol* 2015; **8**: 14305–14.
- 71 Ni Chonghaile M, Higgins B, Laffey JG. Permissive hypercapnia. Role in protective lung ventilatory strategies. *Curr Opin Crit Care* 2005; **11**: 56–62.
- 72 Young M, DiSilvio B, Rao S, Velliyattikuzhi S, Balaan M. Mechanical Ventilation in ARDS. *Crit Care Nurs Q* 2019; **42**: 392–99. <https://doi.org/10.1097/CNQ.0000000000000279>.
- 73 Morales-Quinteros L, Camprubí-Rimblas M, Bringué J, Bos LD, Schultz MJ, Artigas A. The role of hypercapnia in acute respiratory failure. *Intensive Care Med Exp* 2019; **7**: 39. <https://doi.org/10.1186/s40635-019-0239-0>.
- 74 Borsellino B, Schultz MJ, Gama de Abreu M, Robba C, Bilotta F. Mechanical ventilation in neurocritical care patients. A systematic literature review. *Expert Rev Respir Med* 2016; **10**: 1123–32. <https://doi.org/10.1080/17476348.2017.1235976>.

- 75 Boone MD, Jinadasa SP, Mueller A, et al. The Effect of Positive End-Expiratory Pressure on Intracranial Pressure and Cerebral Hemodynamics. *Neurocrit Care* 2017; **26**: 174–81. <https://doi.org/10.1007/s12028-016-0328-9>.
- 76 Lowe GJ, Ferguson ND. Lung-protective ventilation in neurosurgical patients. *Curr Opin Crit Care* 2006; **12**: 3–7.
- 77 Liu Z, Liu X, Huang Y, Zhao J. Intraoperative mechanical ventilation strategies in patients undergoing one-lung ventilation. A meta-analysis. *Springerplus* 2016; **5**: 1251. <https://doi.org/10.1186/s40064-016-2867-0>.
- 78 Futier E, Constantin J-M, Paugam-Burtz C, et al. A trial of intraoperative low-tidal-volume ventilation in abdominal surgery. *N Engl J Med* 2013; **369**: 428–37. <https://doi.org/10.1056/NEJMoa1301082>.
- 79 Westhoff M, Schönhofer B, Neumann P, et al. Nicht-invasive Beatmung als Therapie der akuten respiratorischen Insuffizienz. *Pneumologie* 2015; **69**: 719–56. <https://doi.org/10.1055/s-0034-1393309>.
- 80 Richard J-CM, Lefebvre J-C, Tassaux D, Brochard L. Update in mechanical ventilation 2010. *Am J Respir Crit Care Med* 2011; **184**: 32–36. <https://doi.org/10.1164/rccm.201103-0424UP>.
- 81 Yaglioglu H, Koksall GM, Erbabacan E, Ekici B. Comparison and Evaluation of the Effects of Administration of Postoperative Non-Invasive Mechanical Ventilation Methods (CPAP and BIPAP) on Respiratory Mechanics and Gas Exchange in Patients Undergoing Abdominal Surgery. *Turk J Anaesthesiol Reanim* 2015; **43**: 246–52. <https://doi.org/10.5152/TJAR.2015.26937>.
- 82 Ouellette DR, Patel S, Girard TD, et al. Liberation From Mechanical Ventilation in Critically Ill Adults. An Official American College of Chest Physicians/American Thoracic Society Clinical Practice Guideline: Inspiratory Pressure Augmentation During Spontaneous Breathing Trials, Protocols Minimizing Sedation, and Noninvasive Ventilation Immediately After Extubation. *Chest* 2017; **151**: 166–80. <https://doi.org/10.1016/j.chest.2016.10.036>.
- 83 Linko R, Okkonen M, Pettila V, et al. Acute respiratory failure in intensive care units. FINNALI. A prospective cohort study. *Intensive Care Med* 2009; **35**: 1352–61. <https://doi.org/10.1007/s00134-009-1519-z>.
- 84 Pelosi P, Ferguson ND, Frutos-Vivar F, et al. Management and outcome of mechanically ventilated neurologic patients. *Crit Care Med* 2011; **39**: 1482–92. <https://doi.org/10.1097/CCM.0b013e31821209a8>.
- 85 Oczenski W, Andel H, Werba A. Atmen, Atemhilfen. Atemphysiologie und Beatmungstechnik. Stuttgart: Thieme, 2012.

- 86 Turon M, Fernández-Gonzalo S, Haro C de, Magrans R, López-Aguilar J, Blanch L. Mechanisms involved in brain dysfunction in mechanically ventilated critically ill patients. Implications and therapeutics. *Ann Transl Med* 2018; **6**: 30. <https://doi.org/10.21037/atm.2017.12.10>.
- 87 Lombardi R, Nin N, Lorente JA, et al. An assessment of the Acute Kidney Injury Network creatinine-based criteria in patients submitted to mechanical ventilation. *Clin J Am Soc Nephrol* 2011; **6**: 1547–55. <https://doi.org/10.2215/CJN.09531010>.
- 88 Husain-Syed F, Birk H-W, Seeger W, Ronco C. A Protective Kidney-Lung Approach to Improve Outcomes in Mechanically Ventilated Patients. *Blood Purif* 2016; **42**: 214–18. <https://doi.org/10.1159/000448471>.
- 89 Wernly B, Frutos-Vivar F, Peñuelas O, et al. Easy prognostic assessment of concomitant organ failure in critically ill patients undergoing mechanical ventilation. *Eur J Intern Med* 2019; **70**: 18–23. <https://doi.org/10.1016/j.ejim.2019.09.002>.
- 90 Blackwood B, Burns KEA, Cardwell CR, O'Halloran P. Protocolized versus non-protocolized weaning for reducing the duration of mechanical ventilation in critically ill adult patients. *Cochrane Database Syst Rev* 2014: CD006904. <https://doi.org/10.1002/14651858.CD006904.pub3>.
- 91 Ely EW, Baker AM, Dunagan DP, et al. Effect on the duration of mechanical ventilation of identifying patients capable of breathing spontaneously. *N Engl J Med* 1996; **335**: 1864–69. <https://doi.org/10.1056/NEJM199612193352502>.
- 92 Goligher EC, Ferguson ND, Brochard LJ. Clinical challenges in mechanical ventilation. *The Lancet* 2016; **387**: 1856–66. [https://doi.org/10.1016/S0140-6736\(16\)30176-3](https://doi.org/10.1016/S0140-6736(16)30176-3).
- 93 Penuelas O, Frutos-Vivar F, Fernandez C, et al. Characteristics and outcomes of ventilated patients according to time to liberation from mechanical ventilation. *Am J Respir Crit Care Med* 2011; **184**: 430–37. <https://doi.org/10.1164/rccm.201011-1887OC>.
- 94 Tobin MJ. Advances in mechanical ventilation. *N Engl J Med* 2001: 1986–96.
- 95 Putensen C, Hering R, Muders T, Wrigge H. Assisted breathing is better in acute respiratory failure. *Curr Opin Crit Care* 2005; **11**: 63–68.
- 96 Burns KEA, Adhikari NKJ, Slutsky AS, et al. Pressure and volume limited ventilation for the ventilatory management of patients with acute lung injury. A systematic review and meta-analysis. *PLoS One* 2011; **6**: e14623. <https://doi.org/10.1371/journal.pone.0014623>.
- 97 MacIntyre NR, Sessler CN. Are there benefits or harm from pressure targeting during lung-protective ventilation? *Respir Care* 2010; **55**: 175-80; discussion 180-3.
- 98 Gonzalez M, Arroliga AC, Frutos-Vivar F, et al. Airway pressure release ventilation versus assist-control ventilation. A comparative propensity score and international cohort study. *Intensive Care Med* 2010; **36**: 817–27. <https://doi.org/10.1007/s00134-010-1837-1>.

- 99 Tobin MJ. Extubation and the myth of "minimal ventilator settings". *Am J Respir Crit Care Med* 2012; **185**: 349–50. <https://doi.org/10.1164/rccm.201201-0050ED>.
- 100 Young D, Harrison DA, Cuthbertson BH, Rowan K. Effect of early vs late tracheostomy placement on survival in patients receiving mechanical ventilation. The TracMan randomized trial. *JAMA* 2013; **309**: 2121–29. <https://doi.org/10.1001/jama.2013.5154>.
- 101 Zhang Z, Hu X, Zhang X, et al. Lung protective ventilation in patients undergoing major surgery. A systematic review incorporating a Bayesian approach. *BMJ Open* 2015; **5**: e007473. <https://doi.org/10.1136/bmjopen-2014-007473>.
- 102 Putensen C, Zech S, Wrigge H, et al. Long-term effects of spontaneous breathing during ventilatory support in patients with acute lung injury. *Am J Respir Crit Care Med* 2001; **164**: 43–49. <https://doi.org/10.1164/ajrccm.164.1.2001078>.
- 103 Cooke CR, Kahn JM, Caldwell E, et al. Predictors of hospital mortality in a population-based cohort of patients with acute lung injury. *Crit Care Med* 2008; **36**: 1412–20. <https://doi.org/10.1097/CCM.0b013e318170a375>.
- 104 Carmel S, Rowan K. Variation in intensive care unit outcomes. A search for the evidence on organizational factors. *Curr Opin Crit Care* 2001; **7**: 284–96.
- 105 Cooke CR, Watkins TR, Kahn JM, et al. The effect of an intensive care unit staffing model on tidal volume in patients with acute lung injury. *Crit Care* 2008; **12**: R134. <https://doi.org/10.1186/cc7105>.
- 106 Treggiari MM, Martin DP, Yanez ND, Caldwell E, Hudson LD, Rubenfeld GD. Effect of intensive care unit organizational model and structure on outcomes in patients with acute lung injury. *Am J Respir Crit Care Med* 2007; **176**: 685–90. <https://doi.org/10.1164/rccm.200701-165OC>.
- 107 Umoh NJ, Fan E, Mendez-Tellez PA, et al. Patient and intensive care unit organizational factors associated with low tidal volume ventilation in acute lung injury. *Crit Care Med* 2008; **36**: 1463–68. <https://doi.org/10.1097/CCM.0b013e31816fc3d0>.
- 108 Duggal A, Panitchote A, Siuba M, et al. Implementation of Protocolized Care in ARDS Improves Outcomes. *Respir Care* 2020. <https://doi.org/10.4187/respcare.07999>.
- 109 Sevransky JE, Checkley W, Herrera P, et al. Protocols and Hospital Mortality in Critically Ill Patients. The United States Critical Illness and Injury Trials Group Critical Illness Outcomes Study. *Crit Care Med* 2015; **43**: 2076–84. <https://doi.org/10.1097/CCM.0000000000001157>.
- 110 Brun-Buisson C, Minelli C, Bertolini G, et al. Epidemiology and outcome of acute lung injury in European intensive care units. Results from the ALIVE study. *Intensive Care Med* 2004; **30**: 51–61. <https://doi.org/10.1007/s00134-003-2022-6>.

7. Anhang

7.1 Abbildungsverzeichnis

- Abb. 1: Flussdiagramm nach CONSORT zur Darstellung der Stichprobengröße
- Abb. 2: Verteilung der Gründe für die Beatmung aller drei Stationen (n=51)
- Abb. 3: Verteilung der Tidalvolumina (V_t) aller beatmeten Patienten auf den Intensivstationen
- Abb. 4: Mittelwerte der Überschreitungen von 6 ml/kg KG der Tidalvolumina über die gesamte Beatmungsdauer aller beatmeten Patienten
- Abb. 5: Mittelwerte der Überschreitungen von 8 ml/kg KG der Tidalvolumina über die gesamte Beatmungsdauer aller beatmeten Patienten
- Abb. 6: Verteilung der PaCO_2 -Mittelwerte aller beatmeten Patienten [mmHg]
- Abb. 7: Abweichungen der PEEP-Werte von dem optimalen FiO_2 :PEEP-Verhältnis laut der Tabelle des ARDS-Networks
- Abb. 8: Anteil der Patienten bei denen die Einhaltung des korrekten PEEP, Tidalvolumens und Plateaudruckes erreicht wurde
- Abb. 9: mittlere Beatmungsdauer [Tage] bei erfolgreicher Beatmungsbeendigung
- Abb. 10: Verteilung der Tidalvolumina bei postoperativen und nicht-postoperativen Patienten
- Abb. 11: Gründe für die nicht-invasive Beatmung (n=7)
- Abb. 12: Anzahl und Verteilung der Ereignisse und Komplikationen im Verlauf im gesamten Patientenkollektiv
- Abb. 13: Verteilung der Tidalvolumina bei nicht-neurochirurgischen Patienten mit Nieren- oder Leberversagen und Patienten ohne Nieren- oder Leberversagen
- Abb. 14: Kumulatives Überleben der Patienten
- Abb. 15: Entlassungsort der Patienten auf den drei Intensivstationen

7.2 Tabellenverzeichnis

- Tab. 1: Empfehlung des ARDS Network zur Einstellung des PEEP anhand der erforderlichen FiO_2
- Tab. 2: Demografische Patientenmerkmale
- Tab. 3: Beatmungsparameter (V_t , PaCO_2 , PEEP, P_{max} , P_{plat} , Beatmungsdauer)
- Tab. 4: Beatmungsparameter und -dauer der postoperativen und nicht-postoperativen Patienten
- Tab. 5: Organversagen und weitere Komplikationen
- Tab. 6: Beatmungsparameter und -dauer der nicht-neurochirurgischen Patienten mit Nieren- oder Leberversagen und Patienten ohne Nieren- oder Leberversagen
- Tab. 7: Behandlungsergebnis