

**Technische Universität München
TUM School of Medicine and Health**

**Der kurz- und mittelfristige Einfluss der Tracheotomie auf
Hämodynamik, Lungenfunktion und Weaning**

Fabian Bern Sehl

Vollständiger Abdruck der von der TUM School of Medicine
and Health der Technischen Universität München zur Erlangung
des akademischen Grades eines Doktors der Medizin
genehmigten Dissertation.

Vorsitz: apl. Prof. Dr. Ute Reuning

Prüfende der Dissertation:

1. Priv.-Doz. Dr. Sebastian Rasch

2. apl. Prof. Dr. Tobias Lahmer

Die Dissertation wurde am 06.12.2024 bei der Technischen
Universität München eingereicht und durch die TUM School of
Medicine and Health am 06.08.2025 angenommen.

Inhaltsverzeichnis

1.	Einleitung	10
1.1	Definition Monitoring	10
1.2	Die Tracheotomie	10
1.2.1	Die Indikationen	13
1.2.2	Die Kontraindikationen	14
1.2.3	Die Vorteile einer Tracheotomie	15
1.2.4	Komplikationen und Nachteile einer Tracheotomie	17
1.2.5	Tracheotomie-Methoden	19
1.2.6	Im Vergleich: Dilatative vs. chirurgische Tracheotomie	19
1.3	Intensivmedizin: Häodynamisches Monitoring	21
1.3.1	Klinisches Monitoring	21
1.3.2	Laborchemisches Monitoring	21
1.3.3	Apparatives Monitoring	21
1.3.3.1	Nicht-invasiv	21
1.3.3.2	Invasiv	22
1.3.4	Zentralvenöser Druck (ZVD)	22
2.	Fragestellung	23
2.1	Nutzen für die Praxis	24
3.	Patienten, Material und Methoden	24
3.1	Ein- und Ausschlusskriterien	24
3.2	Erhobene Daten	25
3.2.1	Patientenspezifische Daten	25
3.3	Klinische Scores	26
3.3.1	APACHE-II-Score	26
3.4	Häodynamische Parameter	27
3.5	Das PiCCO®-System	28
3.5.1	Grundlagen	29
3.5.2	Die transkardiopulmonale Thermodilution (TPTD)	30
3.5.3	Die Pulskonturanalyse	33
3.5.4	Das extravaskuläre Lungenwasser (EVLW)	34
3.5.5	Anschluss zwischen Patient und Monitor	34
3.5.6	Ablauf einer Messreihe	35
3.5.7	PiCCO®-Parameter	36
3.5.7.1	Die Messparameter	36
3.5.8	Medikamente	36
3.5.9	Blutgasparameter	37
3.6	Studienablauf	38
3.7	Statistische Auswertung	38
4.	Ergebnisse	39
4.1	Deskriptive Statistik	39
4.1.1	Epidemiologie	39
4.1.2	Grunderkrankung	39
4.1.3	Tracheotomie und Krankheitsschwere	40
5.	Vergleich der Beatmungsparameter	41
5.1	Kurzfristiger Vergleich M-1 vs. M+1	41
5.2	Mittelfristiger Vergleich M-1 vs. M+2	46
5.3	Zusammenfassung zu den Beatmungsparametern	50
6.	Vergleich der Häodynamikparameter	51

6.1	Kurzfristiger Vergleich M-1 vs. M+1	51
6.2	Mittelfristiger Vergleich M-1 vs. M+2	56
6.3	Zusammenfassung zu den Hämodynamikparametern.....	61
7.	Diskussion	62
7.1	Zusammenfassung der Ergebnisse	64
7.2	Diskussion der Methoden.....	66
7.2.1	Messungen.....	66
7.3	Diskussion der Ergebnisse.....	68
7.3.1	Beatmungsparameter	68
7.3.1.1	Kurzfristiger Vergleich.....	68
7.3.1.2	Mittelfristiger Vergleich.....	68
7.3.2	Hämodynamikparameter	72
7.3.2.1	Kurzfristiger Vergleich.....	72
7.3.2.2	Mittelfristiger Vergleich.....	73
7.4	Ausblick.....	75
7.5	Einschränkungen der Studie	75
8.	Abbildungsverzeichnis	77
9.	Tabellenverzeichnis.....	78
10.	Literatur	79
11.	Appendix	90

Danksagung

Hiermit möchte ich Prof. Dr. R. Schmid für die Möglichkeit der Promotion sowie das Überlassen des Themas danken. Ebenso möchte ich Prof. Dr. W. Huber für seine Geduld und sein immerzu offenes Ohr bei Problemen danken. Er war stets eine inspirierende Quelle im fachlichen sowie privaten Diskurs. Leider musste er unerwartet viel zu früh von uns gehen. Auch danken möchte ich meinen Betreuern und späteren Mentoren, welche Prof. Dr. Hubers Platz einnahmen: PD Dr. T. Lahmer und PD Dr. S. Rasch. Sie unterstützten mich trotz meiner länger dauernden Phasen im Zwiespalt zwischen Verpflichtungen der Familie, Beruf und der wissenschaftlichen Arbeit.

Den größten Dank möchte ich meinen Eltern aussprechen. Ohne sie wären mein Studium sowie die Promotion nicht möglich gewesen. Ihre ewig dauernde Geduld, Liebe sowie motivierenden Worte haben mich regelmäßig gefördert und ermutigt, neue Ziele zu erreichen. Ebenso meiner Frau, meinem Sohn und der restlichen Familie möchte ich für die lange Zeit des Verzichts, der Rücksichtnahme und motivierenden Worte danken. Nicht zuletzt möchte ich allen meinen Freunden und Kommilitonen danken. Ohne sie wäre dieser Lebensabschnitt nicht halb so spannend, lustig und erfolgreich verlaufen. Ich hoffe, diese Verbindungen noch viele weitere Jahre genießen zu können.

Abkürzungsverzeichnis

A. / Aa.	Arteria / Arteriae
AF	Atemfrequenz
APACHE	Acute Physiology and Chronic Health Evaluation
ARDS	Acute (adult) respiratory distress syndrome
BE	Base excess
BGA	Blutgasanalyse
BFPT	Balloon facilitated percutaneous tracheostomy
Bsp.	Beispiel
C ₂	Alkohol
CA	Karzinom
Ca ²⁺	Calcium
CI	Cardiac Index
CO	Cardiac Output
COPD	Chronisch obstruktive Lungenerkrankung
CPI	Cardiac power Index
dPmax	Druckanstieg in der Aorta während der Systole
DSt	Downslope time
EDA	End-diastolic area (im TEE bestimmt)
ELWI	Extravaskulärer Lungenwasserindex
etc.	Et cetera
EVLW	Extravaskuläres Lungenwasser
evtl.	Eventuell
FiO ₂	inspiratorische Sauerstoffkonzentration
GEDI	Globaler enddiastolischer Volumenindex
GEDV	Globales Enddiastolisches Volumen
GEDVI	Globaler enddiastolischer Volumenindex
GEF	Globale Auswurffrac tion
Gl. / Gll.	Glandula / Glandulae
Hb	Hämoglobin
HCO ₃ ⁻	Bikarbonat
HF	Herzfrequenz
HI	Herzindex
Hkt	Hämatokrit
HNO	Hals-Nasen-Ohren
HR	Herzrhythmus
HWS	Halswirbelsäule
HZV	Herz-Zeit-Volumen
IAP	Intraabdomineller Druck
IST	Intensivstation
ITBV	Intrathorakales Blutvolumen
ITBVI	Intrathorakaler Blutvolumenindex
ITTV	Intrathorakales Thermovolumen
K ⁺	Kalium
KI	Konfidenzintervall

Lig.	Ligamentum
LVEDV	Linksventrikuläres enddiastolisches Volumen
LVEDVI	Linksventrikulärer enddiastolischer Volumenindex
M	Männlich / Mean
MAD	Mittlerer arterieller Blutdruck
M. / Mm.	Musculus / Muskuli
mm Hg	Millimeter Quecksilbersäule
MRSA	Multiresistenter Staphylococcus aureus
MTt	Mean transit time
MV	Minutenvolumen (L/min)
N. / Nn.	Nervus / Nervi
n	Anzahl
Na ⁺	Natrium
n. Chr.	nach Christus
pCO ₂	Partieller Kohlenstoffdioxidpartialdruck
pO ₂	Partieller Sauerstoffpartialdruck
pO ₂ /FiO ₂	Oxygenierungsindex
PAK	Pulmonalarterienkatheter
PAP	Pulmonalarteriendruck
PAWP	Pulmonal-arterieller Verschlussdruck
PBV	Pulmonales Blutvolumen
PCHI	Pulskontur Herzindex
PCHZV	Pulskontur HZV
pCO ₂ ²	Periphere Kohlenstoffdioxid-Sättigung
PCWP	Pulmonaler Verschlussdruck
PDT	Perkutane Dilatations-Tracheotomie
PEEP	Positive endexpiratory pressure
PIP	Peak inspiratory pressure (mm Hg)
Pmax	Maximaler Beatmungsdruck
Pmittel	Mittlerer Beatmungsdruck
pO ₂ ²	Periphere Sauerstoffsättigung
PPV	Pulsdruckvariation
PTV	Pulmonales Thermovolumen
PVPI	Pulmonal-vaskulärer Permeabilitätsindex
PVR	Pulmonaler Gefäßwiderstand
RSVT	Respiratory systolic variation test
RVEDV	Rechtsventrikuläres enddiastolisches Volumen
RVEDVI	Rechtsventrikulärer enddiastolischer Volumenindex
RVEF	Rechtsventrikuläre Ejektionsfraktion
SaO ₂	Arterielle Sauerstoffsättigung
SD	Standard Deviation
sec	Sekunden
SHT	Schädel-Hirn-Trauma
SOFA	Sequential Organ Failure Assessment Score
SpO ₂	Periphere Sauerstoffsättigung
SPV	Systolic Pressure Variation
Std.	Standard

SV	Schlagvolumen
SVI	Schlagvolumenindex
SVR	Systemic Vascular Resistance
SVRI	Systemvaskulärer Widerstandsindex
SVV	Schlagvolumenvariation
TD	Thermodilution
TEE	Transösophageale Echokardiographie
TPHZV	Transpulmonales Herzzeitvolumen
TPTD	Transpulmonale Thermodilution
TPZ	Thromboplastinzeit in %
TLT	Translaryngeale Tracheotomie
TTE	Transthorakale Echokardiographie
TV	Tidalvolumen
u.	und
V. / Vv.	Vene / Venae
v. Chr.	vor Christus
vs.	versus
Vtidal (VT)	Tidalvolumen
W	Weiblich
z. B.	zum Beispiel
ZVD	Zentralvenöser Druck
ZVK	Zentralvenöser Katheter
°C	Grad Celsius

Zusammenfassung

Die Tracheotomie ist ein Eingriff, der bereits seit Jahrhunderten durchgeführt wird. Er stellt einen freien Atemweg bei sonst kritisch erkrankten Patienten sicher und zählt zu einer der letzten Therapieoptionen, die schwer zu beatmende Patienten erhalten können. Angesichts der demografischen Alterung in Deutschland steigt die Prävalenz von Patienten mit beeinträchtigten kardiopulmonalen Kompensationsmechanismen signifikant an. Durch die signifikanten Fortschritte in der Medizin und Medizintechnik ist es jedoch möglich, diesen Patienten effektive Therapien anzubieten. So wurden bereits 2018 etwa 30000 Patienten tracheotomiert und mit einem Tracheostoma in die ambulante Weiterversorgung entlassen (Lehmacher-Dubberke 2018). Auf einer Intensivstation ist das hämodynamische Monitoring inzwischen zur Norm geworden. In vielen Fällen wird es mithilfe der Thermodilutionsmethode durchgeführt. Die vorliegende Arbeit hat zum Ziel, fundierte Daten für die Abwägung von Intensivmedizinern zwischen Risiko und Nutzen zu liefern.

In der vorliegenden Studie erfolgt eine Analyse eines spezifischen Bereichs der Intensivmedizin, in dem bisher vornehmlich auf der Grundlage klinischer Expertise und Intuition agiert wurde. Es liegen derzeit keine klinischen Studien vor, die den Einfluss einer Tracheotomie auf die mit PiCCO® gemessene Hämodynamik untersuchen.

Die Analyse der Beatmungsparameter ergab eine signifikant erhöhte Compliance der Lunge, einen reduzierten inspiratorischen Spitzendruck (Pmax) und ein erhöhtes Minutenvolumen. Diese Beatmung dient dem Schutz der Lunge und kann beispielsweise die Perfusion aller Organe erhöhen.

Die hämodynamischen Parameter zeigten eine Erhöhung der Herzfrequenz (HF) im Verlauf und eine Reduktion des systemvaskulären Widerstands (SVRI), was auf eine deutliche Verbesserung der kardialen Rekompensation im Sinne eines vermehrten Auswurfs bei gleichzeitig reduziertem Widerstand hindeutet. In der Folge wird die Perfusion der übrigen Organe begünstigt. Des Weiteren lagen mehrere Parameter nur knapp unterhalb des Signifikanzniveaus, sodass in zukünftigen Studien auf eine höhere Fallzahl geachtet werden sollte.

Die Ergebnisse der vorliegenden Arbeit bilden eine wesentliche Grundlage für weitere Studien, in denen deutliche Veränderungen der Hämodynamik nach einer Tracheotomie zu erwarten sind.

Summary

Tracheotomy is an operation that has been performed since hundreds of years. It is one of the last options you have, to treat ventilatory impaired patients to secure their airway. In an aging society like Germany also the number of patients with cardiopulmonary impaired compensatory mechanisms rises. Along with our high medical and medical-technology progress these aging patients can be treated nevertheless. Estimated 30000 patients underwent the procedure of tracheotomy in 2018 and subsequently sent in an outpatient care with the tracheostoma (Lehmacher-Dubberke 2018). Even more common on an intensive care unit is the hemodynamic monitoring. In many cases this is being accomplished with the method of thermodilution. This work is expected to help clinicians evaluate the risks and benefits with profound data.

Overall, this study examines a part of the intensive care where decisions often are made because of experience or gut instinct. Other studies that observe the influence of tracheotomy on hemodynamics measured with PiCCO® could not be found. We could show that there is a significant increase in the lung compliance. Also, there is a reduced inspiratory peak pressure (Pmax) and an increased minute volume. These things go along with a lung protective ventilation and increase the perfusion of all inner organs. Furthermore, we could show an increase in heart rate (HF) and a reduction of the total peripheral resistance (SVRI). This points to an improvement of cardiac recompensation with a consecutive higher cardiac ejection at a lower level of peripheral resistance. This again shows an increased perfusion of all organs.

In addition, there are several parameters that are slightly below the level of significance. Future studies should contain a higher number of patients so that these parameters might come out more significant. After these results more notable changes in hemodynamics after tracheotomy are yet to be expected in further studies.

1. Einleitung

1.1 Definition Monitoring

Das sogenannte Monitoring auf Intensivstationen bezeichnet das kontinuierliche bzw. rezidivierende Erfassen von Messparametern, die die physiologischen Organfunktionen indizieren, wobei auch supportive Maßnahmen der Intensivtherapie erfasst werden.

Ziele des Monitorings sind:

- Ein engmaschiges Überwachen von Risikopatienten zur Komplikations-Prävention
- Diagnostik und Erkennung von Organdysfunktionen mit den daraus resultierenden physiologischen Dysregulationen und Kreislaufentgleisungen
- Bestimmung von idealen Zeitpunkten zur Einleitung von Therapien
- Steuerung von Therapien sowie Überwachung ihrer Effekte

Ein Monitoring sollte wie bei jeder Art der Diagnostik nur dann erfolgen, wenn auch eine hohe Wahrscheinlichkeit für eine Optimierung der physiologischen Regelkreisläufe besteht. Auf eine weitere Untergliederung des hämodynamischen Monitorings wird in Abschnitt 1.4 eingegangen.

1.2 Die Tracheotomie

Die Kunst der Chirurgie ist so alt wie die Menschheit selbst, da Verletzungen schon immer möglichst adäquat behandelt werden mussten. Die vermutlich ältesten medizinischen Schriften der Welt, die bis in unsere Gegenwart überliefert wurden, sind der Papyrus Ebers und der Papyrus Edwin Smith aus dem 16. Jahrhundert v. Christus. Sie stammen aus dem heutigen Ägypten und liefern erste Hinweise auf chirurgische Interventionen im Halsbereich. Der erste indirekte Hinweis auf eine Tracheotomie findet sich bei Claudius Galenus (um 129–199 n. Chr.), der die Empfehlung der Eröffnung der Trachea von Asklepiades beschreibt (um 128–60 v. Chr.) (Holmes (1887). Asklepiades von Bithynien war zu seiner Zeit ein einflussreicher Mediziner und Leibarzt Ciceros in Rom. Sein Einfluss war maßgeblich für die Verbreitung der griechischen Medizin in Rom. Die meisten seiner Schriften gingen allerdings unwiederbringlich verloren, sodass wir auf die Überlieferung durch Galenus angewiesen sind. Im Laufe der folgenden Jahrhunderte geriet die Tracheotomie nahezu vollständig in Vergessenheit. Die Gelehrten waren in dieser Hinsicht geteilt, es gab einige Befürworter ebenso wie Kritiker der Intervention.

Nach einer langen Zeit des Desinteresses an der Tracheotomie erfolgte eine Renaissance dieses Verfahrens durch Antonio Musa Brasavola (1500–1554) was den ersten dokumentierten Einsatz seit der Antike markiert. Ein wachsendes Verständnis der Anatomie, präzisere Beschreibungen und die von Julius Casserius angefertigten Tabulae Anatomicae Casserius von 1601 erhöhten die Akzeptanz für diese Therapieform.

Sanctorius (1561–1636) legte die Grundlagen für die perkutane Dilatationstracheotomie, als er 1627 die Eröffnung der Trachea mit einem einem Trokar ähnlichen Instrument beschrieb, um dann eine Kanüle einzuführen.

Die Abneigung und Furcht vor der Eröffnung der Trachea zeigte sich in besonderer Weise im Zusammenhang mit dem Ableben von Georg Washington im Jahr 1799, dem ersten Präsidenten Amerikas. Er erlag einer Laryngitis, die von seinen Ärzten mit Aderlässen therapiert wurde, statt eine Tracheotomie durchzuführen. Dies endete für den damals 67-jährigen Gründervater in einem tödlichen hypovolämischen Schock.

Obwohl die Tracheotomie auch im 19. Jahrhundert vor allem bei an Diphtherie erkrankten Kindern durchgeführt wurde, kommt der PDT heute eine besondere Rolle zu. Durch die stetige Weiterentwicklung und die vereinfachte Handhabung konnte sie sich im intensivmedizinischen Alltag etablieren und zu einem Standardverfahren avancieren. Durch die deutlich einfachere Methode der PDT kann sie heute am Patientenbett und ohne den hohen logistischen Aufwand eines OP-Saales durchgeführt werden. Das Erlernen und Beherrschen der Methode ist heute auch für den Intensivmediziner nur mit einem geringen Aufwand verbunden. Dadurch ist die perkutane Eröffnung der Trachea zu einer Methode der Wahl auf den Intensivstationen geworden.

122 TAB. XXII. DE LARYNGOTOMIA.

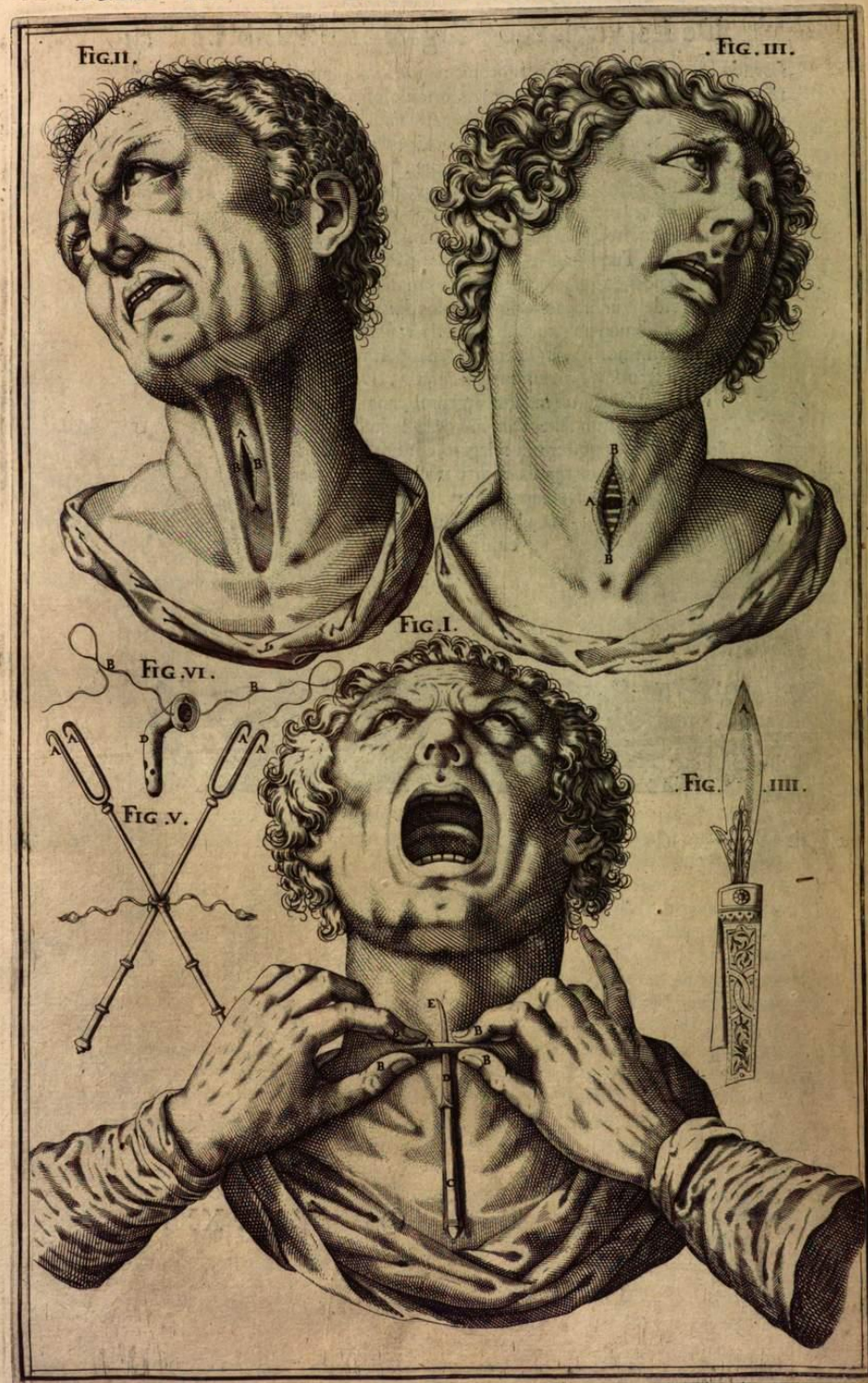


Abbildung 1. Laryngotomie nach Casserius.

Darstellung der Laryngotomie und der verwendeten Instrumente von Casserius (Abb.1). (Casserius 1601).

Der Eingriff der Tracheotomie ist also mit seinem Ursprung vor über 2000 Jahren einer der ältesten chirurgischen Eingriffe überhaupt (Borman & Davidson 1963).

Um eine möglichst erfolgreiche und sichere Tracheotomie durchführen zu können, sollte zuerst die richtige Indikation gestellt werden. Wie bei jedem operativen Eingriff kann auch diese Operation mit potenziell lebensbedrohlichen Komplikationen verbunden sein. In den Anfängen der Intensiv- und Beatmungsmedizin wurde dieser Schritt in der Regel vermieden, sodass die Beatmung der Patienten weiterhin über eine translaryngeale Intubation erfolgte. Später wurden immer mehr mit der Intubation assoziierte Komplikationen festgestellt, sodass erstmals Indikationen und Kontraindikationen für die Tracheotomie definiert werden konnten. Trachealstenosen können beispielsweise als Folge einer langwierigen Einwirkung von Druckkräften auf den Larynx und die Trachealschleimhaut entstehen. Dadurch ergibt sich eine Indikation für eine Tracheotomie bei Erkrankungen, die mit einer langfristigen Intubation verbunden sind, wie z. B. bei einem Ausfall der Schluckreflexe (*Myasthenia gravis*, MS, Apoplex etc.). Auch eine Verlegung der oberen Atemwege erfordert sehr häufig eine dauerhafte Intubation, was eine weitere Indikation für eine Tracheotomie darstellt. Dabei sollte auch an häufig auftretende Raumforderungen im Kopf- und Halsbereich gedacht werden. Ein sekundär protrahiertes Weaning bildet ebenso eine Indikation für eine therapeutische Tracheotomie. Dennoch sollte vor jeder Tracheotomie eine ausführliche Risiko-Nutzen-Abwägung durchgeführt werden.

1.2.1 Die Indikationen

Ein permanenter Zugang zur Trachea mit einer gleichzeitig möglichst niedrigen oder völlig fehlenden Analgosedierung ist nur nach der Anlage eines Tracheostomas möglich. Die Stimmlippen (*Plicae vocales*) bilden anatomisch die engste Stelle der Trachea. Dem Hagen-Poiseuille-Gesetz zufolge steigt der Luftstrom in der vierten Potenz an, wenn durch die Tracheotomie diese Engstelle überwunden und zusätzlich der respiratorische Totraum verkürzt wurde. In der Folge wird nach diesem Eingriff auch der Kraftaufwand des Patienten beim Atmen deutlich geringer. In der Konsequenz kann sich für tracheotomierte Patienten die Dauer der Entwöhnung von einer maschinellen Beatmung signifikant verkürzen, da der Energiebedarf für die Atmung sinkt (Shapiro, Wilson et al. (1986).

$$V/t = \frac{(r^4 \times \pi \times \Delta P)}{(8 \times \eta \times l)}$$

Hagen – Poiseuillesches Gesetz

V/t	= Volumenstrom
r	= Innenradius
ΔP	= Druckdifferenz zw. Anfang und Ende d. Rohres
η	= dynamische Viskosität
l	= Länge d. Rohres

Indikationen:

- Verletzungen des Kehlkopfes oder der oberen Luftwege
- Ein voraussichtlich noch längeres Ausbleiben der Schluckreflexe
- Bestimmte HNO- oder Mund-Kiefer-Gesichtschirurgische Operationen
- Tracheal- oder Kehlkopfschäden als Folge einer Langzeitintubation
- Tumorleiden oder andere raumfordernde Erkrankungen
- Patienten mit einem zu erwartenden protrahierten Weaning (z. B. COPD)
- Zustand nach mehreren erfolglosen Weaning-Versuchen
- Vermeidung von laryngealen oder subglottischen Schädigungen bei Langzeitintubation oder protrahiertem Weaning
- Bestimmte neuromuskuläre Erkrankungen

1.2.2 Die Kontraindikationen

Generell gelten Gerinnungsstörungen und Infektionen im OP-Gebiet, wie bei allen anderen elektiven Operationen, als allgemeine Kontraindikationen. Sind diese nicht vorhanden oder nicht bekannt, so ergeben sich aus der jeweils gewählten Methode der Tracheotomie spezielle Kontraindikationen. Bei der perkutanen Tracheotomie ist vor allem eine genaue Kenntnis des Verlaufs der Trachea entscheidend, dadurch können anatomische Anomalien erfasst werden, die eine sichere Identifikation der Trachea unmöglich machen oder eine PDT (Perkutane Dilatationstracheotomie) nur unter einem erhöhten Risiko zulassen. Außerdem sollte man beachten, dass eine PDT nur unter bronchoskopischer Kontrolle durchgeführt werden sollte. Ohne den Einsatz dieser Technik und dem damit verbundenen Personal- und Zeitaufwand wird das Potenzial dieser Art der Tracheotomie weiter eingeschränkt. In einigen Fällen kann es notwendig sein, vor der Operation eine Probelaryngoskopie durchzuführen. Patienten mit kritischen Oxygenierungsparametern und kardiopulmonal erschöpfte Patienten haben bei der potenziell belastenden Prozedur schlechte Voraussetzungen, weshalb man in diesen Situationen die PDT auch nicht durchführen sollte. Aufgrund der potenziellen Gefährdung der Hinterwand der Trachea sind Kinder und Jugendliche mit einer teilweise noch verformbaren und elastischen Trachea keine geeigneten Patienten für eine PDT. Im Falle einer Kontraindikation ist eine konventionelle und offen-chirurgische Tracheotomie zwingend erforderlich.

Kontraindikationen:

- therapierefraktäre Gerinnungsstörungen
- Infektionen im OP-Gebiet
- Trachea und ihr Verlauf sind nicht sicher zu identifizieren
- *Adipositas permagna* (relativ)
- große Struma
- Instabile oder frakturierte HWS
- Respiratorischer Notfall

- Schwierige Intubationsverhältnisse (oral)
- Keine bronchoskopische Überwachung möglich
- Patient jünger als 18 Jahre (Ausnahme: Verfahren nach Fantoni)
- Dauerhaft notwendiges Tracheostoma

1.2.3 Die Vorteile einer Tracheotomie

Die Vorteile der Tracheotomie ergeben sich in erster Linie aus den Nachteilen der translaryngealen Intubation. Dabei sind manche Vorteile trivial, etwa die deutliche Erleichterung der Mundpflege für die Pflegekräfte. Darüber hinaus begünstigt dies die Enteralisierung (Nieszkowska, Combes et al. 2005; Trouillet, Luyt et al. 2011). Für die Patienten resultiert daraus ein deutlich höherer Komfort und mehr Lebensqualität (Nieszkowska, Combes et al. 2005). Die geringere Mobilität der Trachealkanüle im Vergleich mit dem normalen Tubus bedingt eine Reduktion möglicher Folgeschäden. Diese können beispielsweise durch Scheuerbewegungen am Larynx, Oropharynx oder Nasopharynx entstehen. Außerdem liegen translaryngeale Tuben durch ihre vorgegebene Form und die anatomischen Gegebenheiten der dorsalen Larynxwand an und üben dabei einen Druck auf die dortige Mukosa aus, der weit über 100 mm Hg betragen kann. Dadurch können rasch Druckulzera und -nekrosen auftreten, wenn man bedenkt, dass der dort normalerweise vorherrschende Perfusionsdruck bei etwa 30 mm Hg liegt (Weymuller, Bishop et al. 1983). Das erhöhte Risiko von Larynxvernarbungen oder -stenosen wird dadurch verständlich. Ein direktes Larynxtrauma ist bei einer Tracheotomie kaum möglich, was einen entscheidenden Vorteil bei der Wahl der Methode darstellt.

Das Risiko einer Sinusitis mit einem konsekutiv erhöhten Risiko einer Sepsis, insbesondere bei der nasotrachealen Intubation, ist bei der Tracheotomie ebenso deutlich reduziert.

Ein nicht zu unterschätzender Vorteil für die Patienten ist die deutlich vereinfachte Kommunikation von tracheotomierten im Unterschied zu intubierten Patienten. Mittels einer Sprechkanüle oder eines entsprechenden Aufsatzes kann der Patient beinahe normal mit seiner Umwelt kommunizieren.

Tabelle 1. Vor- und Nachteile der Tracheotomie

Vorteile	Nachteile
Verbesserte Bronchial- und Mundtoilette	Verletzung <i>N. recurrens</i> bei offen chirurgischer Anlage
Geringerer Bedarf einer Analgosedierung (Rumbak, Newton et al. 2004; Nieszkowska, Combes et al. 2005; Trouillet, Luyt et al. 2011; Young, Harrison et al. 2013; Diaz-Prieto, Mateu et al. 2014; Hosokawa, Nishimura et al. 2015)	Trachealstenosen
Geringere Mobilität der Kanüle und dadurch weniger Larynxschäden	Blutung durch iatrogene Verletzung oder Arrosionsblutung
Sprechmöglichkeit mit speziellen Kanülen	Pneumothorax (zwischen 0,5 - 4 %)
Leichtere Oralisierung (Trouillet, Luyt et al. 2011)	Mediastinalemphysem
erhöhter Patientenkomfort	
Verminderte Atemarbeit	
Schnelleres Weaning (Rumbak, Newton et al. 2004; Terragni, Antonelli et al. 2010; Trouillet, Luyt et al. 2011; Zheng, Sui et al. 2012; Diaz-Prieto, Mateu et al. 2014; Hosokawa, Nishimura et al. 2015)	
Totraumreduktion → Verbesserung der Ventilation	

Es konnte in zahlreichen Studien nachgewiesen werden, dass die frühzeitige Anlage eines Tracheostomas (im Zeitraum von weniger als 10 Tagen nach der Intubation) das Weaning signifikant verkürzt. Dieser Effekt wird durch die Verwendung eines deutlich kürzeren und dickeren Tubus erzielt, wodurch der Atemwegswiderstand signifikant reduziert wird (Rumbak, Newton et al. 2004; Terragni, Antonelli et al. 2010; Trouillet, Luyt et al. 2011; Zheng, Sui et al. 2012; Diaz-Prieto, Mateu et al. 2014; Hosokawa, Nishimura et al. 2015). Auch die Inzidenz nosokomialer Pneumonien bei früh tracheotomierten Patienten fällt deutlich geringer aus (Gandia-Martinez, Martinez-Gil et al. 2010; Siempos, Ntaidou et al. 2015), was auch Siempos et al. in einer Metaanalyse mit 2434 Patienten zeigen konnten.

Außerdem kann der intensivmedizinische Aufenthalt der Patienten signifikant verkürzt werden (Brook, Sherman et al. 2000; Arabi, Haddad et al. 2004; Andriolo, Andriolo et al. 2015; Liu, Livingstone et al. 2015), wodurch sich auch Kosten einsparen lassen. Der Sedationsbedarf fällt ebenfalls signifikant geringer aus als bei translaryngeal intubierten Patienten (Rumbak, Newton et al. 2004; Nieszkowska, Combes et al. 2005; Trouillet, Luyt et al. 2011; Young, Harrison et al. 2013; Diaz-Prieto, Mateu et al. 2014; Hosokawa, Nishimura et al. 2015; Liu, Livingstone et al. 2015). Dadurch können indirekt Komplikationen wie Allergien oder Kreuzreaktionen reduziert werden. Schließlich konnte in mehreren Studien

eine signifikante Senkung der Mortalität beobachtet werden (Rumbak, Newton et al. 2004; Alhajhusain, Ali et al. 2014; Hosokawa, Nishimura et al. 2015; Turkovic, Lukic et al. 2016). Die Frage, zu welchem Zeitpunkt die Anlage eines Tracheostomas durchgeführt werden sollte, ist Gegenstand kontroverser Diskussionen und bedarf weiterer Studien, um eine fundierte Beurteilung zu ermöglichen.

1.2.4 Komplikationen und Nachteile einer Tracheotomie

Die Anlage eines Tracheostomas geht, wie bei jedem chirurgischen Eingriff, mit einem gewissen Blutungsrisiko einher. Dieses ist eine der am häufigsten auftretenden peri- und postoperativen Komplikationen bei einer Tracheotomie. Es kann dabei zu kleineren Blutungen kommen, die sich mit Streifentamponaden oder durch Koagulation eindämmen lassen. Bei einem hoch liegenden *Truncus brachiocephalicus* kann es allerdings auch zu schwerwiegenderen Blutungen kommen, die eine chirurgische Revision erforderlich machen können.

Verletzungen der Hinterwand, wie sie häufig bei der PDT vorkommen, können effektiv durch eine visuelle Kontrolle mittels Bronchoskopie verhindert werden. Ein weiteres Problem der PDT ergibt sich durch eine anatomische Fehleinschätzung, die zur Einführung der Trachealkanüle durch das *Lig. conicum* führen kann. Außerdem kann es bei der PDT auch zu Knorpelspannenbrüchen kommen, wodurch der Wechsel der Kanülen deutlich erschwert oder eine akute Dyspnoe ausgelöst werden kann.

Bei einer offenen chirurgischen Tracheotomie kann es gelegentlich bei einer mangelnden Adaptation von Mukosa und Haut oder einer falschen Kanülenlage zu Emphysemen kommen. Infektionen und Wundheilungsstörungen zählen zu den häufigen postoperativen Komplikationen und sind bei Intensivpatienten mit einer Immunsuppression und einem reduzierten Allgemeinstatus ein klinisch relevantes Problem. Wundheilungsstörungen durch Scheuerbewegungen können zu Nekrosen und im weiteren Verlauf zu einer insuffizienten Abdichtung der Kanüle führen.

Trachealstenosen zählen zu den besonders problematischen Langzeitkomplikationen. Sie können durch einen unsachgemäß zu hohen Cuff-Druck entstehen oder bei einer mangelhaften chirurgischen Anlage am tracheocutanen Übergang.

Dennoch gilt die Tracheotomie, ob offen oder als PDT, als ein sicherer chirurgischer Eingriff. Zusammengefasste Komplikationen:

- Druckulzera in der Trachea durch zu starkes Blocken
- Stoma Infektionen
- Ösophagotracheale Fistel durch Ulzera oder Drucknekrosen
- Gefäßverletzungen durch falsche Anlage oder Scheuerbewegungen
- Stoma Verschluss
- Trachealkanüle liegt paraluminal:
Beim Wechsel der Kanüle besteht die Gefahr, dass die Kanüle subkutan statt in den Tracheotomie-Kanal eingeschoben wird.

Astrachan et al. konnten einen signifikanten Trend hinsichtlich früher Komplikationen bei Patienten nachweisen, die mehr als eine Woche lang translaryngeal intubiert waren, gegenüber früh tracheotomierten Patienten auf einer Intensivstation. Dabei zeigte sich bei den intubierten Patienten insgesamt eine Komplikationsrate von 57 %, wozu Selbstextubation, Cuff-Lecks, beidseitige Stimmbandparalyse und ausgeprägte supraglottische Ödeme gehörten. In geringfügigen prozentualen Anteilen wurden noch Sinusitiden, Nasenflügelnekrosen und temporäre Hypoxie durch eine Intubation des rechten Hauptbronchus genannt (Astrachan, Kirchner et al. 1988).

Demgegenüber stellten sich bei den tracheotomierten Patienten in lediglich 14 % der Fälle frühzeitige Komplikationen ein, die insgesamt deutlich weniger gravierend waren als bei den intubierten Patienten.

Hierzu zählten Stoma-Infektionen, die keine systemische Antibiose benötigten, sondern mit einer lokalen Therapie suffizient behandelt werden konnten. Außerdem wurden kleinere Blutungen unmittelbar nach dem Eingriff beschrieben, eine versehentliche Dekanülierung und ein Patient mit einer ungewöhnlich großen Narbe (Astrachan, Kirchner et al. 1988).

Bei einer längerfristigen translaryngealen Intubation traten nach der Dekanülierung deutlich mehr Glottisödeme, Larynxstenosen und Stimmveränderungen auf als nach einer frühzeitigen Anlage eines Tracheostomas (Astrachan, Kirchner et al. 1988).

Auch Stauffer et al. konnten bei Patienten mit prolongierter endotrachealer Intubation verstärkt Larynxschäden und häufigere Trachealstenosen feststellen als bei Patienten, die früh tracheotomiert wurden (Stauffer, Olson et al. 1981).

Wie bereits erwähnt wurde, wird über den Zeitpunkt der Tracheotomie nach wie vor kontrovers diskutiert.

Ein Artikel aus dem Jahr 2015 (Anon 2015) geht auf die aktuelle Problematik ein, den präzisen Zeitpunkt für eine Tracheotomie festzulegen. Die beiden aktuell umfangreichsten, randomisierten und prospektiv multizentrischen Studien verdeutlichen die Problematik. Terragni et al. teilten ihre Patienten (n = 419) in zwei Arme auf. Dabei wurden 209 Patienten der Gruppe der frühen Tracheotomie zugeordnet, wobei sie vorher bereits zwischen 6 und 8 Tage lang translaryngeal intubiert waren. 210 Patienten wurden der Gruppe zugeordnet, die eine verspätete Tracheotomie nach 13 bis 15 Tagen erhielten.

In dieser Studie wurde die Inzidenz einer Beatmungspneumonie (primär), die Anzahl der beatmungsfreien Tage, die Anzahl der Tage ohne eine intensivmedizinische Versorgung und die Mortalität (sekundär) als Endpunkte festgelegt. Es konnte weder bei den primären noch bei den sekundären Endpunkten ein signifikanter Unterschied festgestellt werden. Darüber hinaus wurden 17 % des ersten und 20 % des zweiten Studienarms im Verlauf der Studie entgegen der Erwartung nicht tracheotomiert.

In der zweiten Studie von Young et al. (n = 909) wurden ebenfalls 2 Studienarme gebildet (früh: n = 455; spät: n = 454). Auch hier ergaben sich für die Patienten, die bereits 4 Tage translaryngeal intubiert waren und anschließend früh tracheotomiert wurden, kein signifikanter Vorteil bei der Ein-Jahres-Mortalität (primär), der Zwei-Jahres-Mortalität oder der Anzahl der Tage ohne intensivmedizinische Betreuung (sekundär). 14 % (n = 66) des frühen Tracheotomie-Armes und sogar 55 % (n = 244) des späten Armes wurden nicht tracheotomiert, und zwar vor allem deshalb, weil sie zuvor extubiert und aus der intensivmedizinischen Versorgung entlassen wurden. Durch diese Tatsachen wird aktuell in Frage gestellt, wie zuverlässig und genau die Angaben der klinisch tätigen Ärzte sind, die

Notwendigkeit von Beatmungsmaschinen für Patienten für eine Woche vorhersagen zu können.

1.2.5 Tracheotomie-Methoden

Seit Beginn des 20. Jahrhunderts hat sich die Tracheotomie im Zuge der fortschreitenden Aufklärung und des medizinischen Verständnisses von einem gefürchteten zu einem alltäglichen Eingriff gewandelt. Dilatationstracheotomien gehören auf Intensivstationen zum Alltag und können mittlerweile auch von nicht-chirurgischen Fachkräften durchgeführt werden. Viele Intensivmediziner haben das ihnen bereits bekannte Prinzip der Seldinger-Technik ohne große Mühen erlernt und können es auf die Trachea anwenden, wodurch die Zahl der Punktionstracheotomien im intensivmedizinischen Bereich rasant gewachsen ist.

Inzwischen haben sich sechs verschiedene Methoden der perkutanen Dilatationstracheotomie etabliert, deren Grundprinzipien in Tabelle 3 dargestellt werden. Auf eine detaillierte Beschreibung der einzelnen Techniken wird im Rahmen dieser Arbeit verzichtet.

2008 zeigte eine Umfrage von Kluge et al. unter der Beteiligung von 513 Intensivstationen deutschlandweit, wie verbreitet diese Techniken inzwischen sind.

In den befragten Intensivstationen wurde zu 86 % die PDT routinemäßig durchgeführt.

Dabei war die modifizierte Ciaglia-Blue-Rhino®-Methode mit 69 % die am häufigsten verwendete Methode in Deutschland und 98 % der Interventionisten gaben an, diese Methode unter bronchoskopischer Kontrolle einzusetzen (Kluge, Baumann et al. 2008).

1.2.6 Im Vergleich: Dilatative vs. chirurgische Tracheotomie

Bei einem Vergleich zwischen prinzipiell möglichen Methoden sollten zudem potenzielle Komplikationen und deren Inzidenz berücksichtigt werden. Bei der Komplikationsrate ergaben sich nach Graham et al. weder in der Gruppe der leichteren noch in der Gruppe der schwereren Komplikationen signifikante Unterschiede zwischen einer PDT und einer offenen chirurgischen Tracheotomie (Graham, Mulloy et al. 1996). Aus 22 Studien mit insgesamt 1608 Patienten konnten auch Johnson-Obaseki et al. hinsichtlich der Blutungskomplikationen oder der Mortalität keinen klaren Favoriten zwischen der PDT und der offenen Tracheotomie ermitteln (Johnson-Obaseki, Veljkovic et al. 2016). Allerdings erwies sich die PDT der chirurgischen Methode in Bezug auf die Infektionsraten und die Dauer der Operation als überlegen.

Im Jahre 2006 haben Delaney et al. aus ihrer Metaanalyse von 1212 randomisierten Versuchspersonen die Empfehlung für eine perkutane Dilatationstracheotomie als Goldstandard für die elektive Tracheotomie von intensivmedizinisch behandelten Patienten abgeleitet. Sie begründeten diese Entscheidung ebenfalls mit einer signifikant geringeren Infektionsrate, einem geringeren Blutungsrisiko und einer niedrigeren Mortalität (Delaney, Bagshaw et al. 2006).

Gemäß Higgins et al. treten nach einer PDT signifikant häufiger versehentliche Dekanülierungen und Obstruktionen auf. Allerdings ergeben sich auch signifikant weniger

Wundinfektionen, schönere Narben nach der Dekanülierung und ökonomisch betrachtet auch eine um 4,6 min kürzere Dauer der Operation.

Insgesamt beschreiben sie in ihrer Metaanalyse mit etwa 1000 Patienten ebenfalls einen deutlichen Trend für die PDT hinsichtlich der Komplikationsrate und einer Ersparnis von etwa 456 USD pro Patient (Higgins & Punthakee 2007).

Tabelle 2. Techniken der Tracheotomie, modifiziert nach (Bartels 2005)

Tracheotomie-Methoden	
Methode	Technik
Chirurgische Tracheotomie (nach Björk od. Jackson)	Chirurgische Präparation der Trachea, Fensterung der Trachea, Naht des kaudal gestielten Knorpelfensters an die Haut
Punktionstracheotomie (Bsp. nach Ciaglia)	Punktion, Weitung der Trachea mit größer werdenden Dilatatoren
Translaryngeale Tracheotomie (Bsp. nach Fantoni)	Punktion, Weitung der Trachea durch retrograden Durchzug der Kanüle
Dilatationstracheotomie (Bsp. nach Frova u. Quintel)	Punktion, Weitung der Trachea durch Dilatationsschraube mit selbstschneidendem Gewinde

1.3 Intensivmedizin: Häodynamisches Monitoring

Das häodynamische Monitoring gehört zur täglichen Routine auf Intensivstationen und ist als ein wichtiger Bestandteil nicht mehr wegzudenken. Dabei besteht die Aufgabe darin, die kardiovaskuläre Funktion und damit die Sauerstoffversorgung der einzelnen Organe zu überwachen, sicherzustellen und den Flüssigkeitshaushalt des Patienten so weit zu optimieren, dass keine Über- oder Unterversorgung auftritt. Die folgende Einteilung soll eine gegliederte Übersicht darüber bieten, auf welche Weise ein Patienten-Monitoring auf einer Intensivstation erfolgen und bei Bedarf eskaliert werden kann.

1.3.1 Klinisches Monitoring

Das klinische Monitoring ist stark abhängig von den klinischen Umständen und der Grunderkrankung des Patienten. Wenn der Patient eine gefäßchirurgische Intervention erfahren hat, dann sind der Puls, die Hautfarbe und die Hauttemperatur wichtige klinische Parameter, um einen ersten Eindruck des Patienten zu gewinnen. Pulmonale Rasselgeräusche, eine Jugularvenenstauung, Aszites, Ödeme oder Pleuraergüsse sind ebenso wichtige Hinweise für den Intensivmediziner. Bei Frakturen der Extremitäten sind diese Parameter ebenso wichtig wie die Umfangsmessung, Sensibilität, Motorik und die Hautfarbe oder der Hautturgor. Nach plastisch-chirurgischen Eingriffen kann die Hautfarbe spezieller Hautinseln die Durchblutung und damit die Vitalität eines Transplantates anzeigen. Nach neurochirurgischen Operationen werden regelmäßig die Vigilanz und Bewusstseinslage, die Atemfrequenz und Atemtiefe sowie die grobe Muskelkraft und Aufmerksamkeit beurteilt. Die zuletzt genannten Aspekte stellen generelle Parameter dar, die einer postoperativen Überwachung bedürfen.

1.3.2 Laborchemisches Monitoring

Um postoperativ mögliche Probleme frühzeitig erkennen zu können, werden häufig postoperativ wichtige Laborwerte bestimmt, wie Hämoglobin, Hämatokrit, Laktatwert, Gerinnungsparameter, Elektrolytparameter oder Blutgaswerte. Diese Werte können dabei helfen, einzuschätzen, ob beispielsweise eine Substitution notwendig ist oder erforderlich werden könnte.

1.3.3 Apparatives Monitoring

1.3.3.1 Nicht-invasiv

Das Standardmonitoring liefert Informationen über den Grundstatus und eine Übersicht über die Vitalparameter eines Patienten.

Zum apparativen, aber nicht-invasiven Monitoring gehören dabei

- Pulsoximeter-Sonde
Zur Überwachung der Herzfrequenz und der peripheren O₂-Sättigung, um Tachy- oder Bradykardien oder ein respiratorisches Problem zu erkennen.
- Nicht-invasives Blutdruckmessgerät
Zur Überwachung des Blutdrucks und für ein rasches Erkennen von hypo- oder hypertensiven Phasen nach Riva-Rocci.
- EKG
Dient unter anderem dem Erkennen von Herzrhythmusstörungen und Myokardinfarkten, aber auch einer vermehrten Belastung einzelner Herzabschnitte mit daraus resultierenden Erkrankungen.
- Echokardiographie (TEE oder TTE)
Eine dynamische Visualisierung des Herzmuskels, seiner Teilabschnitte und dadurch eine Visualisierung der Herzleistung. Dabei können mehrere Parameter gemessen und bestimmt werden.

1.3.3.2 Invasiv

- Zentralvenöser Katheter
Zur sicheren Überwachung des zentralvenösen Drucks (ZVD) und auch für eine sichere venöse Blutentnahme oder eine schnelle systemische Gabe von Flüssigkeit oder Medikamenten geeignet.
- Arterieller Katheter
Zur invasiven und kontinuierlichen Blutdruckmessung und zur Entnahme von arteriellen Blutproben.
- Swan-Ganz-Katheter
(Pulmonalarterienkatheter)
Kann die Drücke im rechten Herzen (Vorhof, Ventrikel und *A. pulmonalis*) messen, woraus Rückschlüsse auf die Funktion des linken Herzens und der Lunge gezogen werden können.

1.3.4 Zentralvenöser Druck (ZVD)

Im klinischen Alltag wird bisher immer noch regelmäßig der ZVD gemessen und als Parameter verwendet, um den Volumenstatus des Patienten abschätzen zu können. Zahlreiche Studien mit einer Fülle von Daten machen deutlich, dass sich durch die Messung des ZVDs Volumenveränderungen nur ungenügend einschätzen lassen (Marik & Cavallazzi 2013; Sasai, Tokioka et al. 2014; Mouncey, Osborn et al. 2015; Hutchinson & Shaw 2016).

Eine präzisere Abschätzung wird durch variable Vorlastparameter ermöglicht. Im Zweifelsfall liefert eine Sonografie der Vena cava inferior weiterhin schneller und zuverlässiger Parameter für eine Abschätzung der Vorlast.

2. Fragestellung

Diese Arbeit beschäftigt sich, unabhängig von der Methode ihrer Durchführung, mit dem Einfluss einer Tracheotomie auf den weiteren Verlauf des Zustandes eines intensivmedizinisch therapierten Patienten.

Im Rahmen der Überwachung und Messung wurde auf das PiCCO®-System zurückgegriffen, zusätzlich wurden in regelmäßigen Abständen Blutgasanalysen durchgeführt. Insbesondere wurden die folgenden Parameter und Werte genauer in ihrem Verlauf beobachtet und beschrieben:

- Ändern sich die Beatmungsparameter?
- Ändern sich die Beatmungsparameter im zeitlichen Intervall?
- Wie verhält sich die Compliance der Lunge im Vergleich?
- Wie verhalten sich die hämodynamischen Parameter vor und nach dem Eingriff?
- Wie verhält sich das ELWI nach der Tracheotomie?
- Gibt es eine Verbesserung des HI nach der Tracheotomie?

Der Fokus wurde dabei vor allem auf die Dynamik der Beatmungs- und der hämodynamischen Parameter vor und nach dem Eingriff gerichtet.

Kann der PEEP im Verlauf reduziert werden? Zusätzlich wurde die Compliance der Lunge im Vergleich beobachtet, denn deren Veränderung kann ein Hinweis auf ein verbessertes Weaning sein.

Eine weitere Hypothese bezieht sich auf die initial nach dem Eingriff schlechtere hämodynamische Situation, die sich allerdings im mittelfristigen Vergleich deutlich verbessern sollte. Dafür wurden ELWI, GEDI und HI als Schlüsselparameter des Lungenödems, der Vorlast und der kardialen Funktion miteinander verglichen. Diese Parameter sind nicht nur diagnostisch wertvoll, sondern bilden auch Entscheidungshilfen für die therapierelevante Einstellung des Flüssigkeitshaushaltes intensivmedizinisch betreuter Patienten.

Kann die Tracheotomie zu einer Verbesserung der hämodynamischen Situation beitragen?

Außerdem wurde der Fokus auf die Entwicklung des ELWI zur Bestimmung des Lungenödems gerichtet, wodurch sich unter anderem die Steuerung des Volumenhaushaltes des Patienten bestimmen lässt. Das EVLW wird im Kapitel 3.5.4 genauer beschrieben.

2.1 Nutzen für die Praxis

Die auf unabhängige Studien basierte Nutzen- und Risikobewertung gängiger Verfahren der Therapie und des Monitorings soll die Patientensicherheit erhöhen und zu einer Optimierung der Therapien beitragen. Auf diese Weise erhalten auch die Therapeuten eine fundierte Grundlage, um Therapieentscheidungen mit größerer Sicherheit treffen zu können. Diese Arbeit soll die bisher sehr eingeschränkte Informationslage hinsichtlich der Konsequenzen der Tracheotomie durch die Untersuchung verschiedener hämodynamischer Parameter verbessern.

Damit ist die Hoffnung verbunden, dem behandelnden Arzt im klinischen Alltag eine Entscheidungshilfe zu bieten, wenn er darüber entscheiden muss, ob ein intensivmedizinisch behandelter Patient tracheotomiert werden sollte oder nicht.

In der vorliegenden Arbeit werden keine Empfehlungen für den frühestmöglichen Zeitpunkt einer Tracheotomie gegeben und es geht auch nicht um praktische Anleitungen für die Durchführung der Operation.

Der behandelnde Arzt sollte den Patienten und die Ergebnisse dieser Arbeit im Gesamtkontext betrachten, um die hämodynamischen Bedingungen und die Reserven des Patienten richtig einschätzen zu können. Dabei kann nur auf einen Teil der Risiken und Chancen eingegangen werden, mit denen der Behandler konfrontiert wird.

3. Patienten, Material und Methoden

3.1 Ein- und Ausschlusskriterien

Im Zeitraum von Frühjahr 2000 bis Frühjahr 2018 wurden alle Patienten erfasst, die auf der Intensivstation R3a der Klinik und Poliklinik für Innere Medizin II des Klinikums rechts der Isar in München eine Therapie erhielten. Diese Patienten wurden daraufhin untersucht, ob sie im Rahmen ihres intensivmedizinischen Aufenthalts eine Tracheotomie erhielten ($n = 65$). Patienten, die die Intensivstation bereits vor dem Beginn der Studie verlassen hatten, wurden anhand einer Aktenrecherche beurteilt und entweder ein- oder ausgeschlossen. Die Patienten, die nach dem Studienbeginn auf unserer Station tracheotomiert wurden, konnten in den meisten Fällen in die Untersuchung eingeschlossen werden. Entscheidend war die Dokumentation des genauen Zeitpunkts der Tracheotomie (Datum + Uhrzeit), um prä- und postoperative Messpunkte bestimmen zu können. Danach konnten die gemessenen BGA-, die Beatmungs- und die PiCCO®-Parameter bestimmt und erfasst werden. Somit konnten insgesamt 17 Patienten prospektiv und 13 Patienten retrospektiv untersucht werden.

Ausgeschlossen wurden Patienten, wenn die Tracheotomie in einer anderen Klinik durchgeführt wurde oder der Zeitpunkt des Eingriffs unklar war. Ein weiteres Ausschlusskriterium bestand, wenn die Dekanülierung oder die Verlegung des Patienten bereits innerhalb 48 Stunden postoperativ stattgefunden hat. Auch Patienten, die innerhalb von 48 Stunden nach der Tracheotomie verstarben, wurden ausgeschlossen. Eine weitere Voraussetzung war mindestens ein vollständiger Datensatz der BGA in Kombination mit den

Beatmungsparametern oder den PiCCO®-Parametern.

3.2 Erhobene Daten

Die folgenden Datenreihen wurden von allen eingeschlossenen Patienten erhoben, in Microsoft Excel-Tabellen gespeichert, gruppiert, geordnet und im weiteren Verlauf anonymisiert statistisch ausgewertet. Wenn bei den Patienten einzelne Messwerte fehlten, die Messreihen aber sonst vollständig vorhanden waren, wurden sie dennoch eingeschlossen. Die fehlenden Werte wurden in der statistischen Auswertung durch eine Reduktion der Fallzahl ausgeglichen, wenn der jeweilige Messwert erforderlich war. Das Einverständnis des Ethikkomitees der TU München lag für alle in dieser Studie erhobenen Daten unter der Nummer 3049/11 vor.

3.2.1 Patientenspezifische Daten

Zunächst wurde jedem Patienten eine Nummer zugeordnet, um eine Anonymisierung zu gewährleisten. Erfasst wurden dann Alter, Größe, Gewicht, die Grunderkrankung, der Tag der Tracheotomie und die Trachealkanülen-Größe des jeweiligen Patienten. Um den generellen Gesundheitszustand des Patienten am Tag der Tracheotomie zu erfassen, wurde der APACHE-II-Score (*Acute Physiology And Chronic Health Evaluation Score*) errechnet und die dabei erhobene Punktezahl wurde als Richtwert verwendet. Dies ist ein Instrument zur Klassifikation des allgemeinen Schweregrades einer Erkrankung und der relativen Sterbewahrscheinlichkeit im Krankenhaus.

Außerdem wurde für jeden Patienten der SOFA (*Sequential Organ Failure Assessment*)-Score ermittelt. Dies ist ein Instrument zur Beurteilung des Grades der Dysfunktionen einzelner Organsysteme. Dabei handelt es sich um zwei unterschiedliche Klassifikationsmöglichkeiten, die üblicherweise auf Intensivstationen eingesetzt werden.

3.3 Klinische Scores

3.3.1 APACHE-II-Score

Der APACHE-II-Score besteht aus drei Punkteguppen:

- Punktwert für aktuelle physiologische Befunde
- Punktwert für das Alter
- Punktwert für chronische Erkrankungen

Die Gesamtsumme der Punkte dieser Gruppen erstreckt sich von 0 bis 71 Punkten. Im Originalartikel von Knaus et al., in dem die Daten aus einer multizentrischen Studie mit 5815 Patienten ausgewertet wurden, konnte eine enge Korrelation zwischen einem steigenden Punktwert und einer prognostisch steigenden Sterbewahrscheinlichkeit im Krankenhaus nachgewiesen werden (Knaus, Draper et al. 1985). Dieser Score ist daher ein auf Intensivstationen regelmäßig eingesetztes Werkzeug, um die relative Überlebenswahrscheinlichkeit eines Patienten zu evaluieren und im Laufe des Aufenthaltes intensivmedizinische Therapien und ihre Auswirkungen beobachten zu können.

Chronische Krankheiten

Bei bestimmten chronischen Krankheiten werden zusätzlich +5 Punkte berechnet. Dazu gehören unter anderem: Herzinsuffizienz NYHA IV, chronische Dialysepflichtigkeit, eine Immunschwäche oder Krankheiten, die mit einer Immunschwäche einhergehen (Bsp.: AIDS, Leukämie, Chemotherapie, langfristig hochdosierte Steroide, Immunsuppression), chronische Hypoxie, Hyperkapnie, erworbene Polyzythämie, schwere pulmonale Hypertension oder chronisch restriktive oder obstruktive Erkrankungen, die zu Einschränkungen bei leichten Aufgaben führen. Auch eine gesicherte Zirrhose zusammen mit einem portalen Hypertonus oder gastrointestinalen Blutungen, bedingt durch einen portalen Hypertonus, und Episoden mit hepatischer Insuffizienz oder hepatischer Enzephalopathie/Koma werden hier mit +5 Punkten bewertet.

Diese Erkrankungen müssen bereits vor dem gegenwärtigen stationären Aufenthalt bekannt gewesen sein.

Als Ausnahme gelten diese Erkrankungen dann, wenn sie auf elektive operative Eingriffe zurückgehen, wobei sie dann ausnahmslos mit +2 Punkten bewertet werden.

Knaus et al. (Knaus, Draper et al. 1985) verweisen für die Anwendung des APACHE-II darauf, dass eine Bewertung der Patienten innerhalb der ersten 24 Stunden nach der Aufnahme auf die Intensivstation mit den in diesem Zeitraum schlechtesten gemessenen physiologischen Werten erfolgen sollte (beispielsweise höchste Temperatur, höchste Herzfrequenz oder niedrigster pH). Diese Einschätzungen werden dann als Ausgangswert für die weitere Beurteilung der später bestimmten Punktwerte verwendet. Im Rahmen der vorliegenden Studie diente der APACHE-II-Punktwert als ein Instrument, mit dem, ähnlich

wie bei der visuellen und analogen Skala, der generelle Gesundheitszustand eines Patienten zum Zeitpunkt der Tracheotomie ermittelt werden kann. Deshalb wurden die formal schlechtesten Parameter der letzten 24 Stunden und der GCS vor der Tracheotomie als Parameter verwendet.

3.4 Hämodynamische Parameter

Bei jedem Messzeitpunkt wurden auch Parameter des Herzkreislaufsystems gemessen und registriert, wovon im Folgenden einige aufgelistet werden:

- Herzfrequenz (HF) in Schlägen/min
- Herzrhythmus (Sinusrhythmus (SR) oder absolute Arrhythmie (AA))
- Blutdruck (RR) in mm Hg
- Mittlerer arterieller Druck (MAD) in mm Hg
- Zentralvenöser Druck (ZVD) in mm Hg

3.5 Das PiCCO®-System

Pulse Contour Cardiac Output ist ein Monitoring-System der Maquet GmbH (ehemals Firma PULSION Medical Systems SE (München)). Das PiCCO-System bezieht sich auf zwei unterschiedliche physiologische Messmethoden, nämlich zum einen die transpulmonale Thermodilution und zum anderen die Pulskonturanalyse. Beide Prinzipien werden im weiteren Verlauf genauer erläutert.

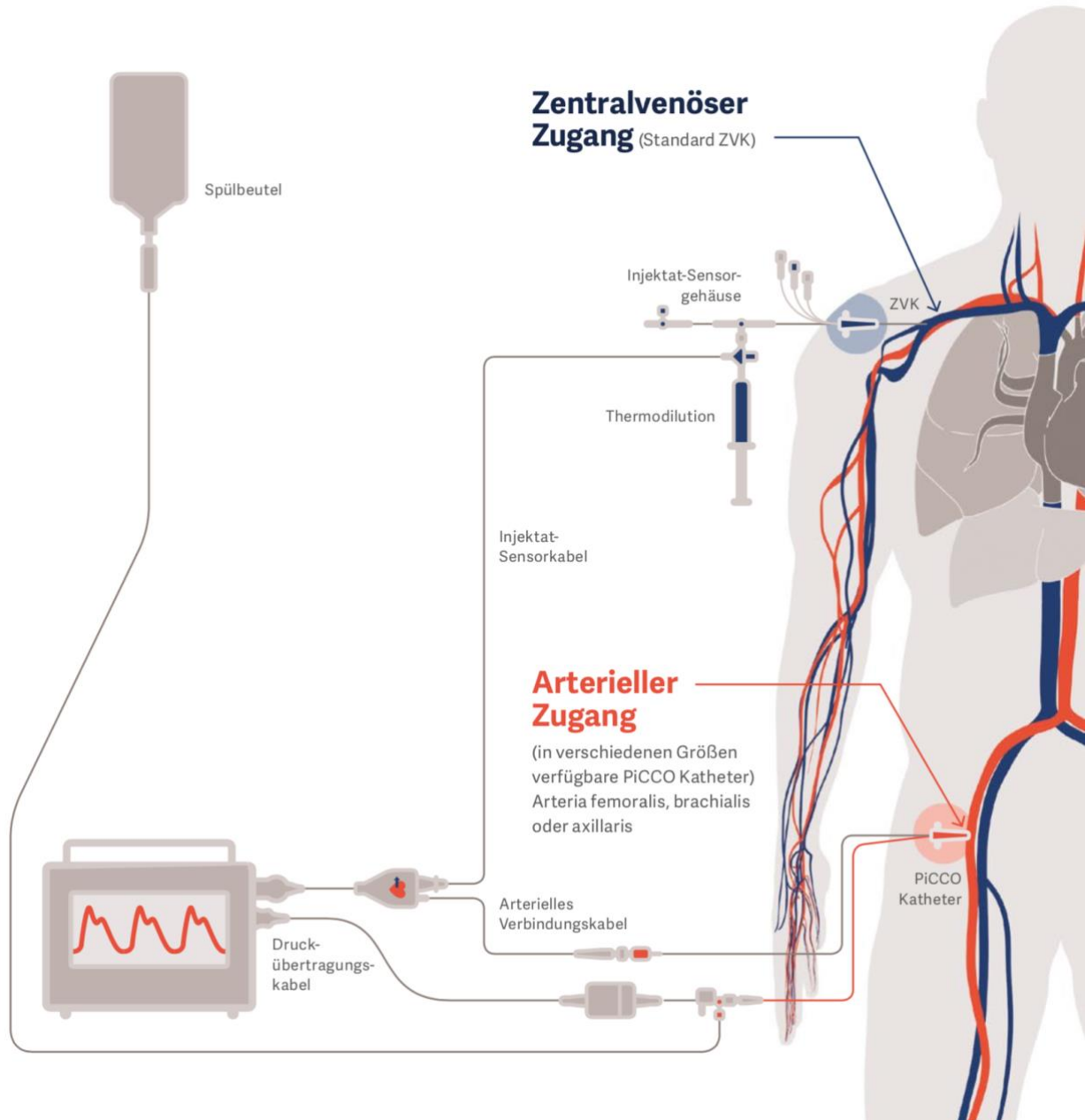


Abbildung 2. Schematischer PiCCO Aufbau.

Tabelle 3. Vor- und Nachteile des PiCCO-Systems

Vor- und Nachteile des PiCCO®-Systems	
Vorteile	Nachteile
Anwendung kann am wachen Patienten erfolgen	Keine direkte visuelle Darstellung (indirekte Messung)
Volumetrisches Monitoring	Investitions- und Betriebskosten
Live-Monitoring durch kontinuierliche Messung	Relativ neues Monitorsystem, erfordert Schulung und Übung
Quantifizierung des extravasalen Lungenwassers	Keine Beurteilung einzelner Herzabschnitte möglich
Geringer Zeitaufwand bei der Katheteranlage	Pulmonal-arterielle Drücke werden nicht erfasst
Schnelle Inbetriebnahme	Lungenresektion beeinflusst die Berechnung des EVLW
Messung von Fluss, Vorlast, Nachlast und Kontraktilität	
Bei Kleinkindern ab 2 kg problemlos einsetzbar	
Unabhängig vom Untersucher	
Wenig personalintensiv	
Weniger invasiv als ein Pulmonalkatheter	

3.5.1 Grundlagen

Verschiedene Krankheitsbilder erfordern eine Überwachung des kardiovaskulären Zustands und/oder des hämodynamisch relevanten Volumenstatus.

Dies gilt beispielsweise bei verschiedenen Formen des Schocks (septisch, kardiogen, hypovolämisch), bei akutem Lungenversagen, bei schweren Formen der Pankreatitis, bei Hochrisiko-Operationen und bei Schwerbrandverletzten. Außerdem gibt es verschiedenste Kombinationen von Erkrankungen, die teilweise zu therapeutischen Konflikten führen und sich durch ein hämodynamisches Monitoring in ihrer Therapie besser steuern lassen.

Durch einen möglichst mehrlumigen und zentralen Venenkatheter und einen speziellen PiCCO®-Katheter, der in den meisten Fällen in der *A. femoralis* (selten in der *Arteria brachialis*) platziert wird, können sowohl hämodynamische Parameter (z. B. Herzminutenvolumen) als auch volumetrische Parameter, wie z. B. extravaskuläres Lungenwasser (EVLW) oder intrathorakales Blutvolumen (ITBV), erfasst werden. Ein hinsichtlich des Verhältnisses von Nutzen und Risiko stark umstrittener Pulmonalkatheter ist dabei obsolet (Valentine, Duke et al. 1998; Rhodes, Cusack et al. 2002; Sandham, Hull et al. 2003; Chittock, Dhingra et al. 2004; Domino, Bowdle et al. 2004; Harvey, Harrison et al. 2005).

Zur Berechnung der Parameter verbindet das PiCCO®-System zwei Prinzipien:

- Die transkardiopulmonale Thermodilution
- Die Pulskonturanalyse

3.5.2 Die transkardiopulmonale Thermodilution (TPTD)

Diese Messwerte sind statisch, weil sie nur zum Zeitpunkt der Bolusgabe gemessen werden. Dabei wird ein auf ca. 8 °C temperiertes definiertes Volumen (z. B. 15 ml NaCl-Lösung) als Bolus über einen gewöhnlichen zentralvenösen Zugang injiziert. Ein Thermistor am ZVK misst die Temperatur des Bolus vor dem Eintritt in den Kreislauf. Ein zweiter Thermistor misst am distalen Ende eines arteriellen Thermodilutionskatheters (in der Regel über die *A. femoralis* bis in die distale Aorta) die Temperaturänderung. Nach dem Durchlaufen des rechten Herzens, des Lungenkreislaufs und schließlich des linken Herzens erhält man einen individuellen Temperaturverlauf des Blutes (Dilutionskurve; Abb. 3).

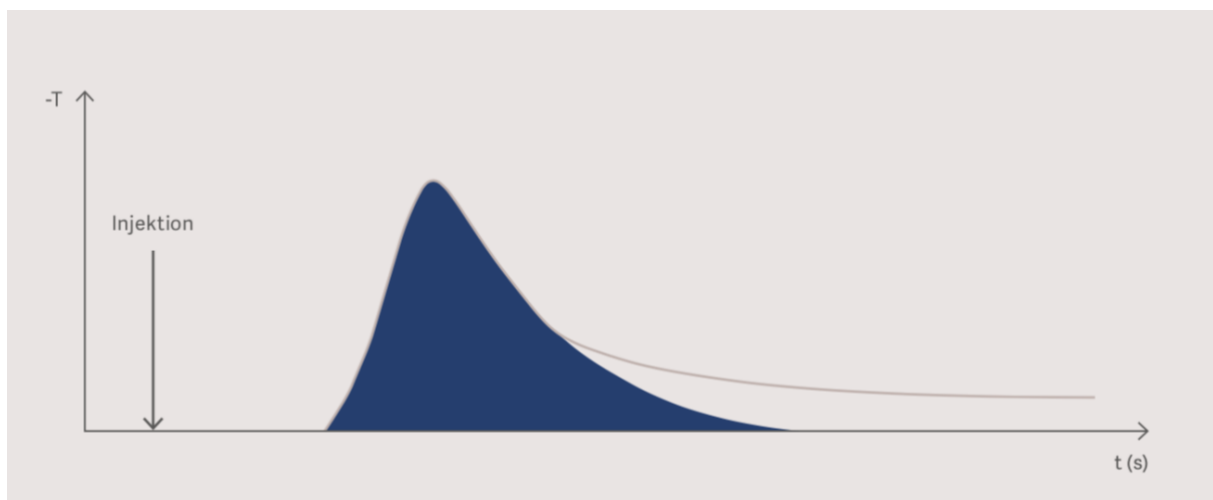


Abbildung 3. *Thermodilutionskurve.*

Dies ist der wesentliche Unterschied zum PAK, bei dem die Messung direkt in der *A. pulmonalis* vorgenommen wird. Durch die TPTD kann dagegen das gesamte ITTV (Intrathorakale Thermovolumen) gemessen bzw. errechnet werden. Einen signifikanten Nachteil hinsichtlich der HZV-Messung gibt es daher gegenüber dem PAK nicht (Bindels, van der Hoeven et al. 2000; Della Rocca, Costa et al. 2002). Anhand der Stewart-Hamilton-Gleichung kann anschließend die Fläche unter der Thermodilutionskurve bestimmt werden, die dem Herzzeitvolumen (*Cardiac output*; CO) bzw. dem HI (*Cardiac Index*; CI) entspricht. Um möglichst genaue Messwerte zu erhalten, muss dabei in regelmäßigen Abständen eine Kalibrierung vorgenommen werden.

Das ITTV besteht aus dem Volumen der vier Herzkammern, dem PTV (pulmonales Thermovolumen), dem EVLW und dem PBV (pulmonales Blutvolumen).

Um die genauen Volumina bestimmen zu können, muss die Thermodilutionskurve weiter analysiert werden.

Dabei erhält man die *Mean Transit time* (MTt) und die *Downslope time* (DSt).

Die MTt (Mittlere Durchgangszeit) ist die Durchschnittszeit, die der Indikator von der Injektion bis zum Abfall der Dilutionskurve auf 75 % des Maximums benötigt.

Die DSt (Downslope time / exponentielle Abfall- bzw. Auswaschzeit) ist die Zeit, die verstreicht, bis die Dilutionskurve von 75 % ihres Maximums auf 25 % abgefallen ist. Sie entspricht der Zeit, die bei der Durchmischung des Indikators in der größten Mischkammer verstreicht.

Aus diesen neuen Parametern kann man dann die genauen Volumina des ITTV und des PTV berechnen (Abb. 4):


$$\text{ITTV} = \text{HZV} \times \text{MTt}$$

Abbildung 4. **Berechnung ITTV.**

Mit diesen neugewonnenen Volumina kann man durch einfache Subtraktion den Füllungszustand der vier Herzkammern und damit die wichtige Vorlast berechnen (Globales Enddiastolisches Volumen (GEDV)) (Hilmar, Reinhard et al. 2008) (Abb.5):


$$\text{PTV} = \text{HZV} \times \text{DSt}$$

Abbildung 5. **Berechnung PTV.**

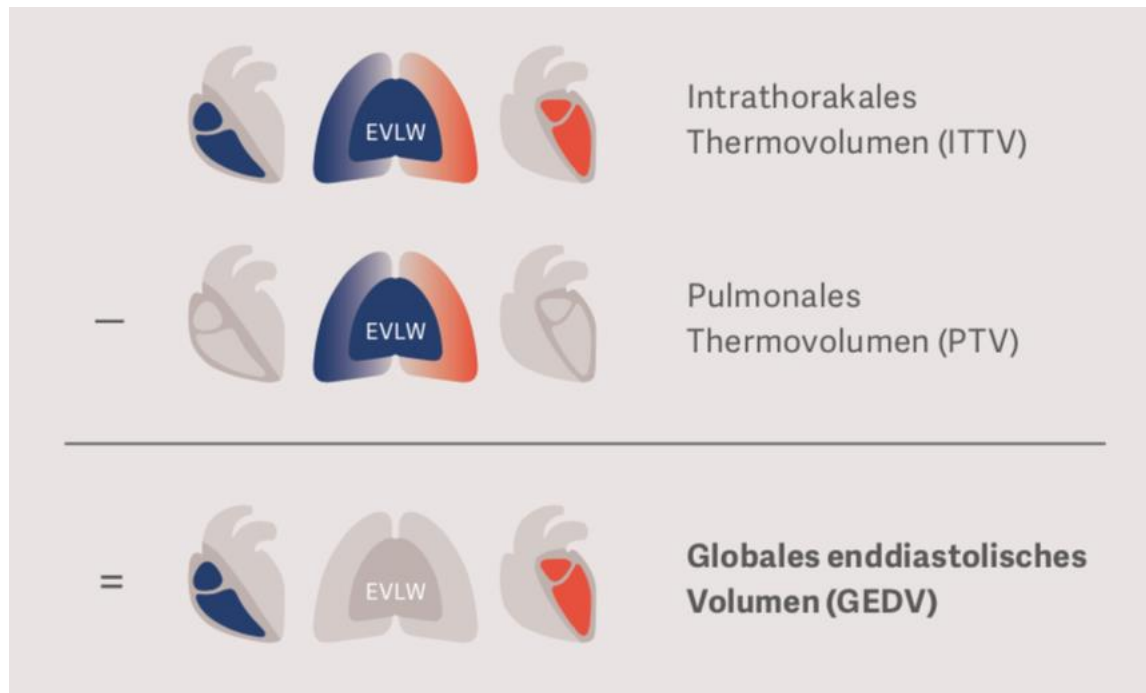


Abbildung 6. **Berechnung GEDV.**

Parameter wie der ZVD oder der PCWP (*Pulmonary Capillary Wedge Pressure*) sind nachgewiesenermaßen keine idealen Instrumente für eine Abschätzung der kardialen Vorlast, der Volumen-Reagibilität oder des Volumenstatus des Herzens (Kumar, Anel et al. 2004; Osman, Ridel et al. 2007).

Eine deutlich bessere Abschätzung kann mit auf dem Volumen basierenden Parametern erreicht werden, wie dem GEDV, ITTV und ITBV (Sakka, Bredle et al. 1999; Goedje, Seebauer et al. 2000; Reuter, Felbinger et al. 2002; Michard, Alaya et al. 2003; Renner, Gruenewald et al. 2007).

Mit am GEDV orientierten Therapiemaßnahmen konnten Goepfert et al. 2007 sogar eine Verkürzung der intensivmedizinischen Therapie sowie einen reduzierten Katecholaminbedarf nachweisen (Goepfert, Reuter et al. 2007).

Außerdem können mit der transkardiopulmonalen Thermodilution die folgenden Parameter ermittelt werden:

- ITBV (intrathorakales Blutvolumen)
- GEDV (globales enddiastolisches Volumen; enddiastolisches Volumen des linken und rechten Herzens)
- GEF (globale Ejektions-Fraktion)
- CI (Kardialer Funktionsindex)
- SVI (Stroke Volume Index)
- CPI (Cardiac Power Index)
- PVPI (Pulmonal Vascular Permeability Index)

3.5.3 Die Pulskonturanalyse

1899 wurde der Grundstein für die aktuell weiterhin gültige und weitverbreitete Pulskonturanalyse gelegt. Der deutsche Arzt und Physiologe für Herz und Kreislauf Otto Frank (1865-1944), welcher an der Formulierung des Frank-Starling-Mechanismus beteiligt war, beschrieb in seinem Aufsatz „Die Grundform des arteriellen Pulses“ die zeitliche Veränderung des Pulsdruckes in einem Gefäß. Auf dieser Grundlage kann man heute den Zeitpunkt der Öffnung der Aortenklappe als Beginn des Kurvenanstiegs, den Schluss der Klappe als dikrote Kerbe mit Einschnitt in der Kurve und auch das Schlagvolumen als Fläche unter der Kurve bis zur dikroten Kerbe bestimmen. Die Systole kann als Bereich zwischen dem Beginn der Kurve und der dikroten Kerbe beschrieben werden.

Das Schlagvolumen und damit die Form der Kurve sind allerdings nicht nur vom vorherrschenden Druck, sondern auch von der Compliance der anschließenden Gefäße abhängig. Bei intensivmedizinisch betreuten Patienten kann sich die Compliance dieser Gefäße aufgrund der Grunderkrankung sowie vasoaktiver Medikamente verändern.

Die Messwerte der Pulskonturanalyse sind dynamisch und können kontinuierlich abgelesen werden. Die Multiplikation des Schlagvolumens unter der Kurve mit der gemessenen Herzfrequenz führt zu einem kontinuierlich abgeleiteten Herzzeitvolumen.

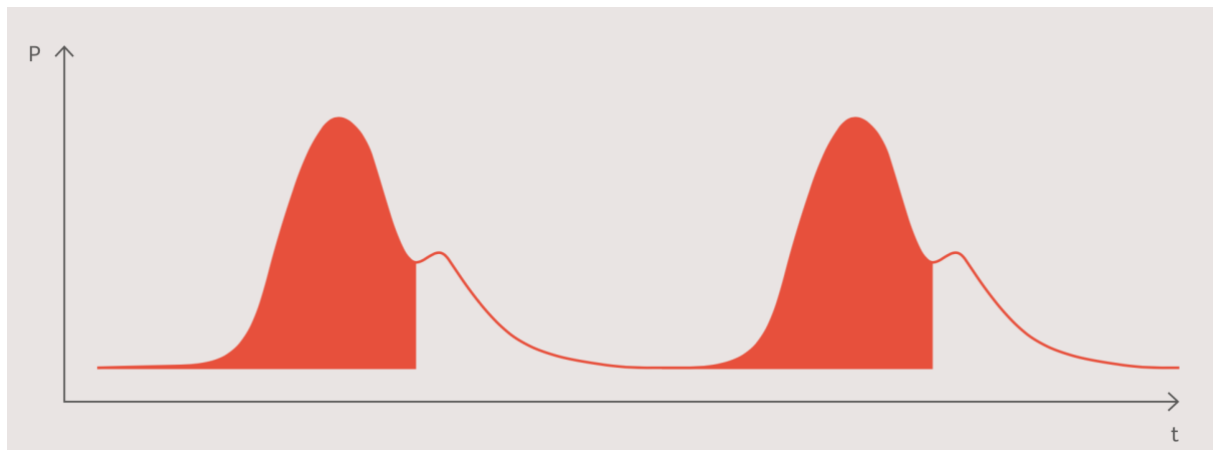


Abbildung 7. **Pulskonturkurve.**

3.5.4 Das extravaskuläre Lungenwasser (EVLW)

Wie der Name schon vermuten lässt, befindet sich dieses Wasser im Interstitium, und zwar interzellulär oder aber intrazellulär.

Bezogen auf die Körperoberfläche ergibt dieses Volumen den extravaskulären Lungenwasserindex (ELWI).

Das EVLW kann durch zwei Mechanismen verstärkt erzeugt werden:

- Durch inflammatorische Vorgänge wird die Permeabilität der Kapillaren erhöht, sodass mehr Wasser in das Interstitium gelangen kann.
- Durch einen erhöhten hydrostatischen Druck wird verstärkt Wasser ‚herausgepresst‘ was zum Beispiel bei einer Linksherzinsuffizienz auftritt.

Der ELWI kann somit als ein Warnsignal für eine Volumenüberladung des pulmonalen Systems dienen (Katzenelson, Perel et al. 2004; Khan, Trof et al. 2007; Michard 2007).

3.5.5 Anschluss zwischen Patient und Monitor

Bei einer postoperativen Aufnahme auf der Intensivstation verfügen die Patienten oft bereits über einen ZVK (meistens in der *V. jugularis*) und einen arteriellen Zugang (meistens in der *A. radialis* oder *A. femoralis*).

Sofern dies noch nicht erfolgt war, wurde es unmittelbar nach der Aufnahme durchgeführt. Dabei wurde der ZVK in n = 8 Fällen in die *V. femoralis* gelegt und in n = 22 Fällen wurde die *V. jugularis interna* ausgewählt. Dabei wurde die Seite willkürlich gewählt, wenn beide Seiten zur Verfügung standen. Der arterielle Zugangsweg wurde über die *A. femoralis* gewählt, wobei der gängig eingesetzte, mit Thermistor versehene PiCCO-Katheter PV2015L20-N (PULSION Medical System, München; Durchmesser 5 French, Länge 20 cm) eingesetzt und in Seldinger-Technik intraluminal platziert wurde.

Die Katheterspitze wurde vorgeschoben, bis sie in der *Aorta descendens* zum Liegen kam. Vor der Inbetriebnahme und dem endgültigen Anschluss wurden alle Leitungen mit 0,9-%iger NaCl-Lösung gespült und sämtliche Luftblasen wurden entfernt. Die arterielle Katheterspitze wurde entgegen dem Blutfluss ausgerichtet.

Danach wurden die Thermofühler des ZVKs und des arteriellen Katheters an den PiCCO-Monitor angeschlossen. Der arterielle Zugang wurde zusätzlich noch über ein Druckübertragungskabel mit dem Druckaufnehmer des PiCCO-Monitors verbunden. Diese Druckleitung wurde permanent mit einer 0,9-%igen NaCl-Lösung gespült. Der Druckaufnehmer konnte durch eine Haltevorrichtung immer auf der Herzhöhe des Patienten gehalten werden. Nach erfolgter Komponentenkopplung wurde das PiCCO-Gerät eingeschaltet. Im Anschluss wurden die für den jeweiligen Patienten spezifischen Daten eingegeben, darunter Name, Größe, Gewicht und Geschlecht. Somit konnte eine Vergleichbarkeit der Daten ermöglicht werden, indem die gemessenen hämodynamischen Parameter auf die Körperoberfläche des Patienten bezogen und somit als Index der Werte angegeben werden können.

Abschließend wurden ein Druck-Nullabgleich und eine Erstkalibrierung durch eine dreifache TPTD durchgeführt.

3.5.6 Ablauf einer Messreihe

Um möglichst vergleichbare Ergebnisse bei den einzelnen Messwerten zu erhalten, wurden die Messwerte in bestimmten zeitlichen Abständen zueinander erfasst. Nach der Aufnahme auf der Intensivstation R3a wurden zunächst die bereits unter 3.5.5. beschriebenen Zugänge und Anschlüsse eingerichtet. In regelmäßigen Abständen wurden TPTD- und BGA-Messungen durchgeführt, auch wenn die Patienten noch keine Tracheotomie erhalten hatten. Bei der Neuanlage eines Tracheostomas wurden jeweils etwa 24 h und 8 h davor eine TPTD- und eine BGA-Messung durchgeführt und dokumentiert. Im Anschluss an den Eingriff wurden ebenfalls nach 8 h und nach 24 h Messungen durchgeführt und dokumentiert (Abb. 8). Durch diese Zeitintervalle konnte eine Vergleichbarkeit im kurzfristigen und im mittelfristigen Verlauf sichergestellt werden.

Um die vom Hersteller angegebenen maximalen TD-freien Zeitintervalle nicht zu überschreiten, wurden zwischen den offiziellen Studien-Messungen zusätzliche TD-Messungen durchgeführt.

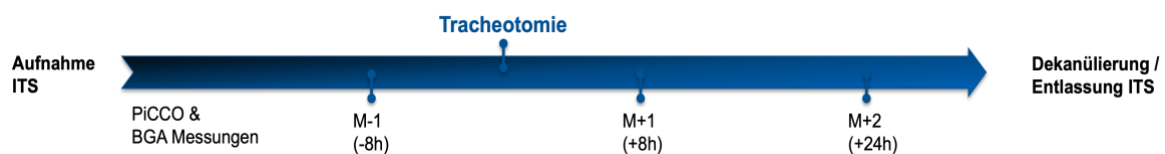


Abbildung 8. *Messreihe chronologisch*

3.5.7 PiCCO®-Parameter

3.5.7.1 Die Messparameter

- Arterieller Blutdruck (systolisch und diastolisch) in mm Hg
- Mittlerer arterieller Blutdruck (MAD) in mm Hg
- Zentralvenöser Druck (ZVD) in mm Hg
- Herzfrequenz (HF) in Schlägen/min [bpm]
- Schlagvolumen Index (SVI) in ml/m²
- Transpulmonales Herzzeitvolumen (TPHZV)
- Pulskontur-Herzzeitvolumen (PCHZV) in l/min
- Globaler enddiastolischer Index (GEDI) in ml/m²
- Kardialer Funktionsindex (CI) in l/min
- Intrathorakales Blutvolumen (ITBV) in ml
- Globale Ejektions-Fraktion (GEF) in %
- Pulmonal-vaskulärer Permeabilitätsindex (PVPI)
- Pulsdruck Variation (PPV) in %
- Schlagvolumen-Variation (SVV) in %
- Systemisch-vaskulärer Widerstands-Index (SVRI) in dyn x sec x cm⁻⁵ x m²
- Extravaskulärer Lungenwasser-Index (ELWI) in ml/kg
- Systolischer Druckanstieg in der Aorta (dPmax) in mm Hg/s

3.5.8 Medikamente

Vasoaktive und sedierende Pharmaka, die überwiegend bei der Therapie von intensivpflichtigen Patienten zum Einsatz kamen, werden hier aufgelistet, wobei Substanzen mit nur partieller sedierender oder vasoaktiver Wirkung nicht eingeschlossen wurden, wie beispielsweise Fentanyl. Die Gabe dieser Art von Substanzen wurde hinsichtlich der Menge und Dosierung leider nicht ausreichend erhoben und kann somit nicht in unsere statistische Auswertung mit einfließen.

- Vasokonstriktor: Noradrenalin in µg/h
- Sedierung:
 - Propofol in ml/h
 - Midazolam in mg/h
 - Lormetazepam in ml/h
 - Ketamin in ml/h
 - Dexmedetomidin in ml/h

3.5.9 Blutgasparameter

• Lagerung	(Rückenlage, Bauch- und Seitenlage)
• Tidal Volumen	(TV) in ml
• Atemfrequenz	(AF) in Züge/min
• Minutenvolumen	in L/min
• Positiver endexpiratorischer Druck	(PEEP) in mbar
• Maximaler Beatmungsdruck	(Pmax) in mbar
• Mittlerer Beatmungsdruck	(Pmittel) in mbar
• Fraktion eingeatmeter Sauerstoff	(FiO ₂) in %
• Arteriell/venös	(a/v)
• pH-Wert	
• Periphere Kohlenstoffdioxid-Sättigung	(pCO ₂) in mm Hg
• Periphere Sauerstoffsättigung	(pO ₂) in mm Hg
• Bikarbonat	(HCO ₃ ⁻) in mmol/l
• Base excess	(BE) in mmol/l
• Hämatokrit	(Hkt) in %
• Hämoglobin	(Hb) in g/dl
• Arterielle Sauerstoffsättigung	(SaO ₂) in %
• Natrium	(Na ⁺) in mmol/l
• Kalium	(K ⁺) in mmol/l
• Calcium	(Ca ²⁺) in mmol/l
• Chlorid	(Cl ⁻) in mmol/l
• Anionen-Lücke	in mmol/l
• Glukose	in mg/dl

3.6 Studienablauf

Nur wenige Messreihen wurden mit dem Vorgängermodell PiCCOPlus aufgenommen, teilweise wurden die Messungen aber auch mit dem PiCCO2 aufgenommen. Die meisten Messungen konnten jedoch mit dem neuesten PULSIO-Flex-Monitor in einer Kombination mit dem PiCCO-Modul durchgeführt werden.

Da die Messungen mit dem ältesten Modell sich nur auf einen kleinen Anteil beziehen und das System, der Algorithmus und der Aufbau der Systeme identisch sind, wird im weiteren Verlauf nur noch von PiCCO® gesprochen. Bei den Patienten, die in absehbarer Zeit eine Tracheotomie benötigten, wurden bereits vor der Intervention Messungen durchgeführt. Aufgrund der wiederholten Messungen im Zeitverlauf war es möglich, Patienten mit vollständigen Messreihen retrospektiv in die Studie einzuschließen.

Nach Festlegung des Termins der Tracheotomie konnten die PiCCO- und BGA-Messungen in kürzeren Zeitabständen erfolgen, sodass weit mehr als vier Messungen pro Patienten durchgeführt wurden. Lediglich die vier Messzeitpunkte, die chronologisch in den besten Kontext passten, wurden in der Studie erfasst. Ein Grund für die häufigen Messungen war zum einen die lange Liegedauer auf der Intensivstation und zum anderen war durch die Schwere der Grunderkrankung und die damit verbundene instabile hämodynamische Situation eine engere Überwachung und Therapiekontrolle erforderlich.

3.7 Statistische Auswertung

Die statistischen Auswertungen wurden in Zusammenarbeit mit meinem Promotionsbetreuer Prof. Dr. W. Huber sowie nachfolgend PD Dr. S. Rasch und den Mitarbeitern der Intensivstation R3a der Klinik und Poliklinik für Innere Medizin II des Klinikums rechts der Isar durchgeführt. Als grundlegende Auswertungssoftware wurden SPSS Statistics (Fa. IBM) für Windows (Version 25.0) sowie SPSS Statistics für Mac (Version 25.0 und 27.0) verwendet. Dabei wurden die gemessenen Daten zunächst deskriptiv analysiert und auf Plausibilität und fehlerhafte Eingaben überprüft. Auch Ausreißer wurden im Gesamtkontext bewertet. Im Anschluss wurden dann für bestimmte Merkmale absolute und relative Häufigkeiten berechnet und in Tabellen erfasst. Auch die quantitativen Merkmale wurden in Tabellen erfasst, zusammen mit den jeweils errechneten Medianwerten. Zur detaillierten Analyse der Zusammenhänge der metrischen Merkmale wurden sie in das Statistikprogramm SPSS (Fa. IBM) eingepflegt und anschließend wurden Korrelationen und Entwicklungen berechnet. Für die Beurteilung der Ergebnisse auf ihre Signifikanz wurde der Wilcoxon-Test für abhängige Stichproben verwendet. Von einer Normalverteilung wurde nicht ausgegangen, ebenso waren die vorliegenden Daten überwiegend ordinalskaliert, daher wurde der t-Test ausgeschlossen. Bei nicht komplett vollständigem Datensatz musste zur Erstellung der Boxplot-Grafiken in wenigen Fällen die Option „Variable für Variable ausschließen“ verwendet werden. Somit konnte für jede Variable der maximale Datensatz ausgewertet werden.

4. Ergebnisse

4.1 Deskriptive Statistik

4.1.1 Epidemiologie

Von den 30 eingeschlossenen und untersuchten Patienten waren $n = 15$ (50 %) Frauen und $n = 15$ (50 %) Männer. Das durchschnittliche Alter lag bei $71,6 \pm 9,9$ Jahren. Der BMI war mit $25,95 \pm 4,6 \text{ kg/m}^2$ im Bereich der Präadipositas (Tab. 5). Der mittlere APACHE-Score beträgt 25,5. Dies zeigt bereits ein deutliches Mortalitätsrisiko von etwa 55 % an (Chiavone & Sens 2003).

Tabelle 4. Deskriptive Statistik

	n	Minimum	Maximum	Mittelwert	Std.- Abweichung
Alter (J.)	30	47	87	71,6	9,9
Größe (cm)	30	150	186	169,8	9,6
Gewicht (kg)	30	45	103	74,9	14,7
BMI (kg/m ²)	30	16,5	35,8	25,9	4,6
APACHE	29	9	43	25,5	8,1

4.1.2 Grunderkrankung

Die Grunderkrankungen der Patienten kann man folgendermaßen einteilen:

33 % gastrointestinale Erkrankungen (Bsp.: Pankreatitis); 23 % ARDS (Bsp.: Pneumonie); 27 % andere Erkrankungen (Bsp.: multiples Myelom, Nierenzell-CA); 13 % kardiologische Erkrankungen (Bsp.: akutes Koronarsyndrom) sowie 3 % zentrale Erkrankungen (Bsp.: unklare Vigilanzminderung) (Abb. 9).

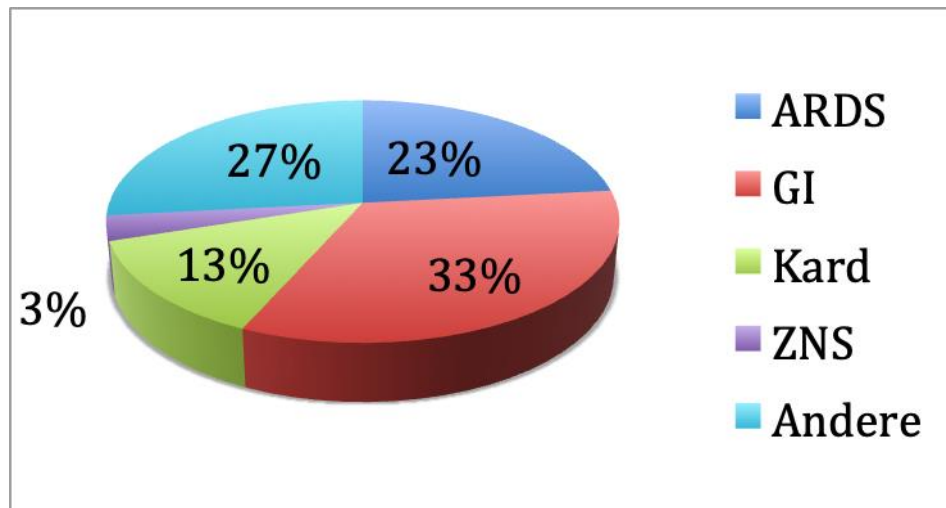


Abbildung 9. Verteilung der Grunderkrankungen.

ARDS – Acute respiratory distress syndrome; GI – Gastrointestinale Erkrankungen [EK]; Kard – Kardiologische EK; ZNS – EK des zentr. Nervensystems

4.1.3 Tracheotomie und Krankheitsschwere

Der Trachealkanülen-Durchmesser lag im Mittel bei 8,9 mm, wobei die kleinste Kanüle einen Durchmesser von 7 mm aufwies und die größte Kanüle mit 10 mm gewählt wurde. In 8 Fällen (26,66 %) konnte der zeitliche Verbleib der Trachealkanüle nicht ermittelt werden, da nicht ermittelt werden konnte, wann und ob die Kanüle im stationären Aufenthalt entfernt wurde. In 22 Fällen (73,33 %) konnte der Verbleib der Kanüle geklärt werden. Von den 22 Patienten starben 13 (43,33 %) im Laufe des Aufenthalts. Bei diesen Patienten konnten, trotz des späteren Versterbens, alle Messergebnisse gewonnen werden, sodass sie weiterhin in die Studie eingeschlossen werden konnten. Wenn Patienten mit einer Trachealkanüle vor der letzten Messung verstarben, dann wurden sie aus der Studie ausgeschlossen.

9 der 22 Patienten (30,00 %) konnte die Trachealkanüle unter kontrollierten Bedingungen während des stationären Aufenthalts entfernt werden.

Die Anzahl der kurzzeitig nach der Tracheotomie registrierten allgemeinen Komplikationen war mit 3 von 30 (10,00 %) gering. Noch geringer war das Risiko der schwereren Komplikationen im kurzen Intervall. Denn nur 1 Patient (0,3 %) blutete während oder kurz nach der Tracheostoma-Anlage so stark, dass die Gabe von 2 Erythrozyten-Konzentraten nötig war. Dabei wurde die Ursache der Blutung von den Chirurgen nicht genauer beschrieben. Die anderen beiden Patienten (0,6 %) bluteten in einem Rahmen, der bei dieser Art des Eingriffs als normal erscheint und mit keinen besonderen Konsequenzen verbunden war.

Beim längerfristigen Verlauf postoperativ, der ab dem ersten postoperativen Tag definiert wurde, benötigten 3 weitere Patienten (10 %) ebenfalls 2 Erythrozytenkonzentrate, wobei sich einer der Patienten im Verlauf zweimal selbst dekanülierte. Ein Patient (0,3 %) erlitt im Langzeitverlauf rezidivierende epileptische Anfälle und ein weiterer Patient (0,3 %) verließ den stationären Aufenthalt mit einer Sprachkanüle, nachdem eine Stimmlippenparese ungeklärter Genese diagnostiziert worden war. Ob nur eine Stimmlippe, ggf. durch eine

intraoperative *N. recurrens* Verletzung, oder beide Stimmlippen betroffen waren, wurde nicht erfasst.

Außerdem wurde bei einem Patienten (0,3 %) eine MRSA-Besiedelung und eine Pneumonie im Verlauf festgestellt. Sie heilte jedoch folgenlos aus, sodass er mit Tracheostoma-Anlage aus dem stationären Aufenthalt entlassen werden konnte.

Bei einer weiteren Patientin, die als Grunderkrankung eine akute Pankreatitis hatte, zeigten sich multiple nosokomiale Pneumonien, ein deutlich protrahiertes Weaning bei einer Critical-Illness-Polyneuropathie und im Verlauf eine schwere Sepsis. Diese Patientin erlag im weiteren stationären Aufenthalt ihrer schweren Erkrankung. Ob dies eine Langzeitkomplikation der Tracheotomie war oder im Rahmen der schweren Grunderkrankung erfolgte, konnte nicht abschließend geklärt werden.

Bei den Patienten wurde präoperativ anhand des APACHE-II-Scores die Überlebenswahrscheinlichkeit auf der Intensivstation berechnet und aufgezeichnet (n = 29). Im Mittel ergab sich ein APACHE-II von 25,59 mit einer Standardabweichung von 8,17, was einer prognostizierten Mortalität von etwa 55 % entspricht (Knaus, Zimmerman et al. 1981).

5. Vergleich der Beatmungsparameter

5.1 Kurzfristiger Vergleich M-1 vs. M+1

Im Wilcoxon-Test zeigte sich die Compliance nach der Intervention (Mdn = 35,50; R = 138,56) nicht signifikant verändert zu vor der Intervention (Mdn = 32,50; R = 60,22). Wilcoxon-Test $z = -1,35$; $p = ,174$; $n = 27$.

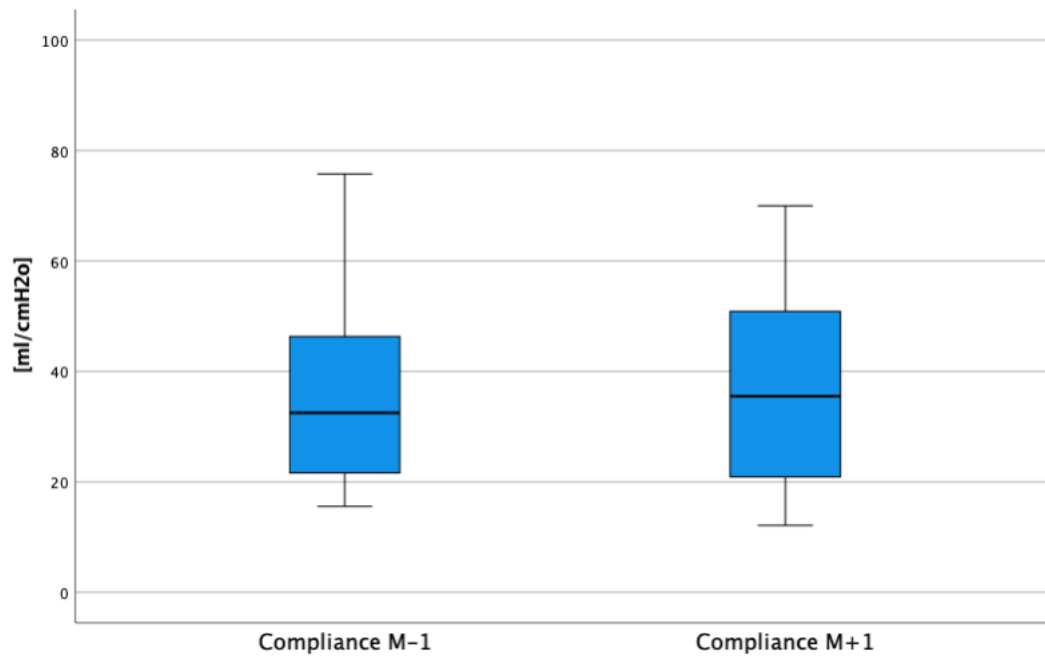


Abbildung 10. **Kurzfristige Compliance.**

Im direkten Vergleich konnte bei den folgenden Beatmungsparametern keine signifikante Veränderung nach der Durchführung der Tracheotomie festgestellt werden.

- PEEP vor (Mdn = 7,50; R = 8) und nach Intervention (Mdn = 8,00; R = 9). Wilcoxon-Test $z = -0,875$; $p = ,382$; $n = 25$.

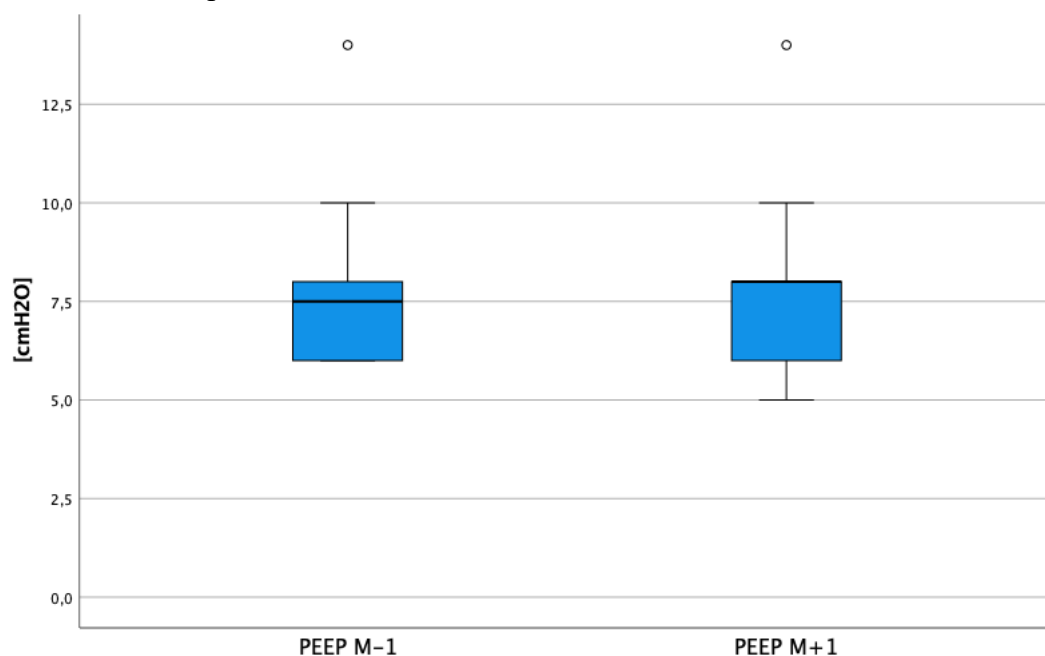


Abbildung 11. **Kurzfristiger PEEP.**

- Pmax vor (Mdn = 23,0; R = 29) und nach Intervention (Mdn = 24,0; R = 25).
Wilcoxon-Test $z = -1,160$; $p = ,246$; $n = 27$.

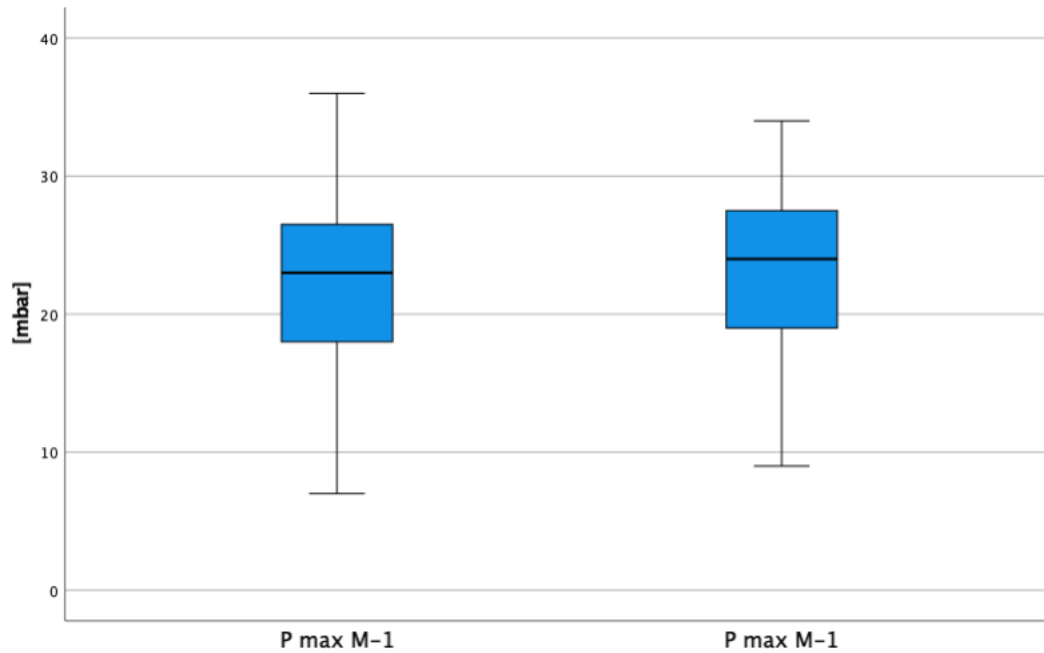


Abbildung 12. *Kurzfristiger Pmax.*

- Pmittel vor (Mdn = 11,50; R = 15) und nach Intervention (Mdn = 12,00; R = 13).
Wilcoxon-Test $z = -0,035$; $p = ,972$; $n = 25$.

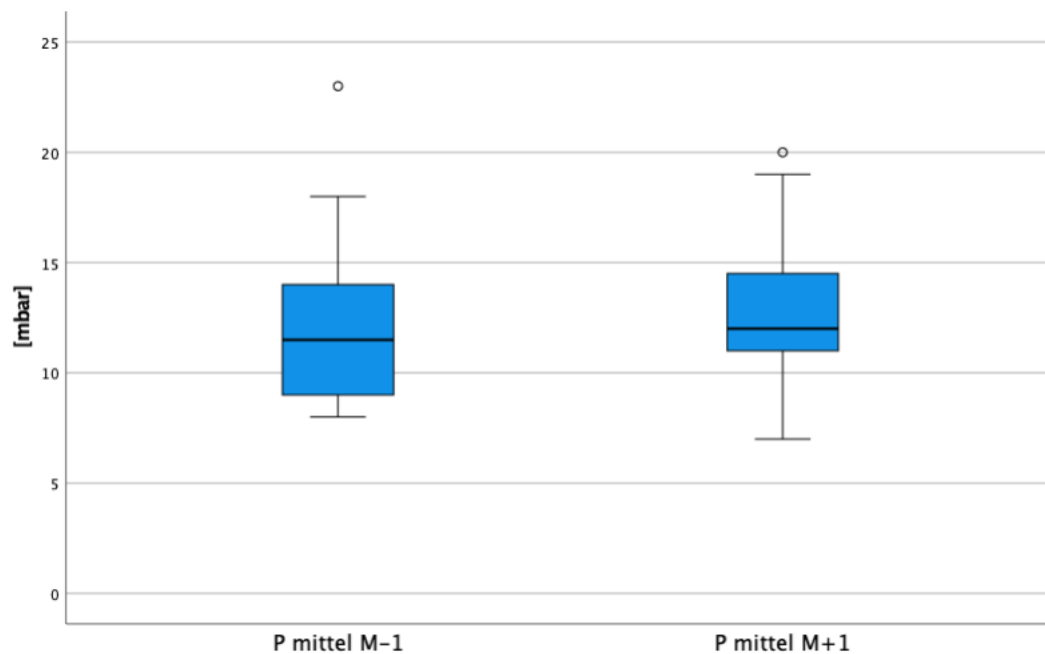


Abbildung 13. *Kurzfristiger Pmittel.*

- FiO_2 vor (Mdn = 0,40; R = 0,45) und nach Intervention (Mdn = 0,40; R = 0,45). Wilcoxon-Test $z = -,225$; $p = ,822$; $n = 28$.

- pO_2/FiO_2 vor (Mdn = 231,84; R = 298,5) und nach Intervention (Mdn = 217,50; R = 289,60). Wilcoxon-Test $z = -1,20$; $p = ,227$; $n = 28$.

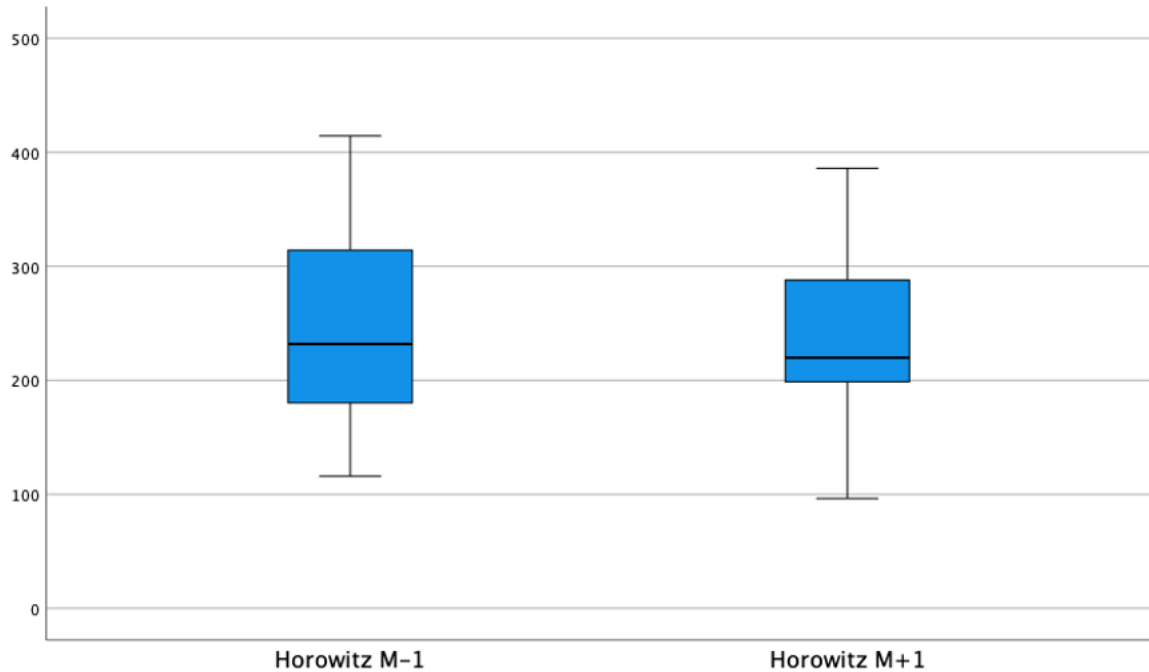


Abbildung 14. *Kurzfristig Horowitz.*

- Oxygenationsindex vor (Mdn = 4,98; R = 13,5) und nach Intervention (Mdn = 5,81; R = 16,2). Wilcoxon-Test $z = -1,00$; $p = ,313$; $n = 25$.

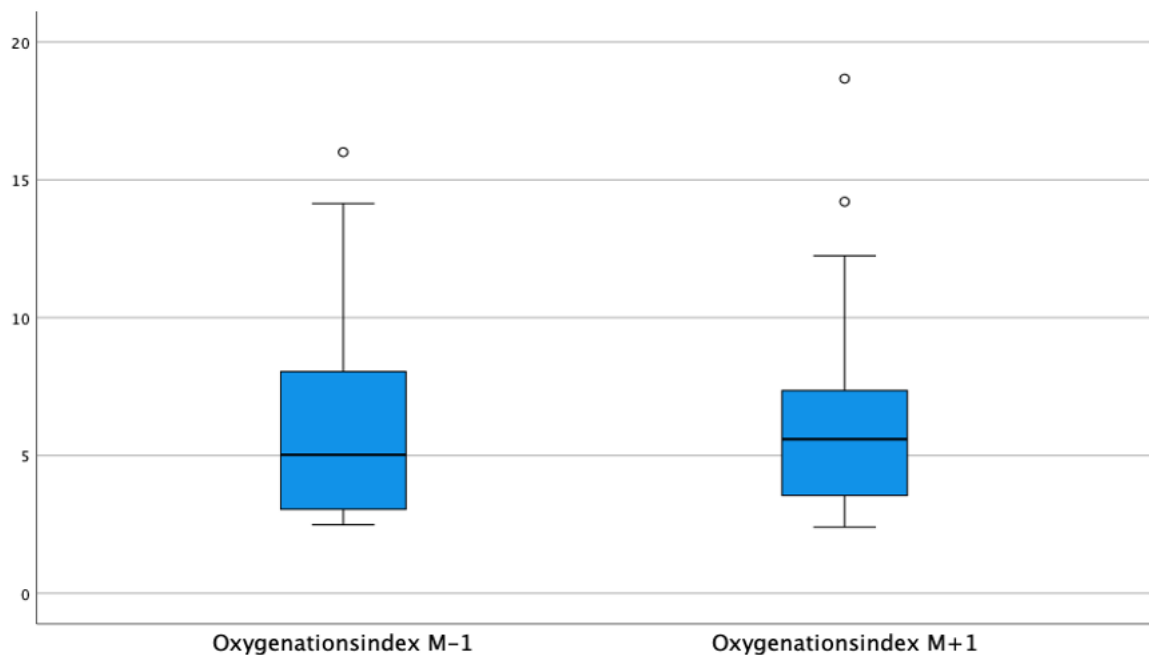


Abbildung 15. *Kurzfristiger Oxygenationsindex.*

- AF vor (Mdn = 22,50; R = 26,0) und nach Intervention (Mdn = 22,00; R = 42). Wilcoxon-Test $z = -0,054$; $p = ,957$; $n = 27$.
- Minutenvolumen vor (Mdn = 8,75; R = 14,4) und nach Intervention (Mdn = 8,90; R = 21,5). Wilcoxon-Test $z = -0,202$; $p = ,840$; $n = 26$.

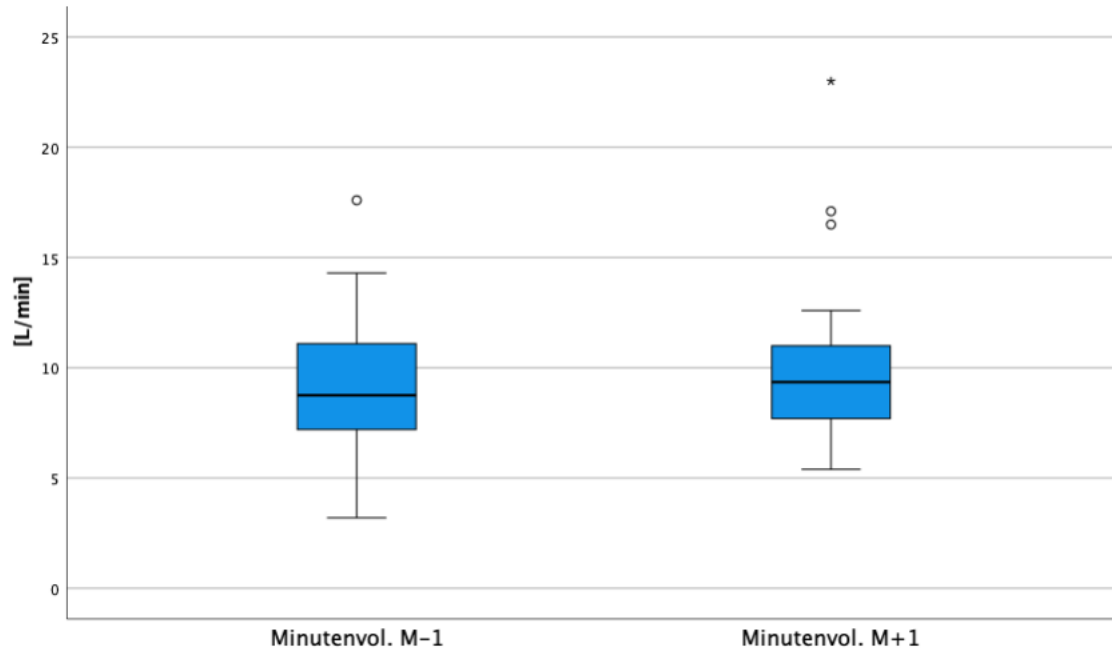


Abbildung 16. **Kurzfristiges Minutenvolumen.**

Mit dem Wilcoxon-Test für verbundene Stichproben konnten bei den gewählten gepaarten Stichproben keine signifikanten Änderungen nachgewiesen werden.

5.2 Mittelfristiger Vergleich M-1 vs. M+2

Im Wilcoxon-Test zeigte sich die Compliance nach der Intervention (Mdn = 35,41; R = 111,0) im mittelfristigen Vergleich nun signifikant erhöht zu vor der Intervention (Mdn = 32,50; R = 60,22). Wilcoxon-Test $z = -2,54$; $p = ,011$; $n = 24$.

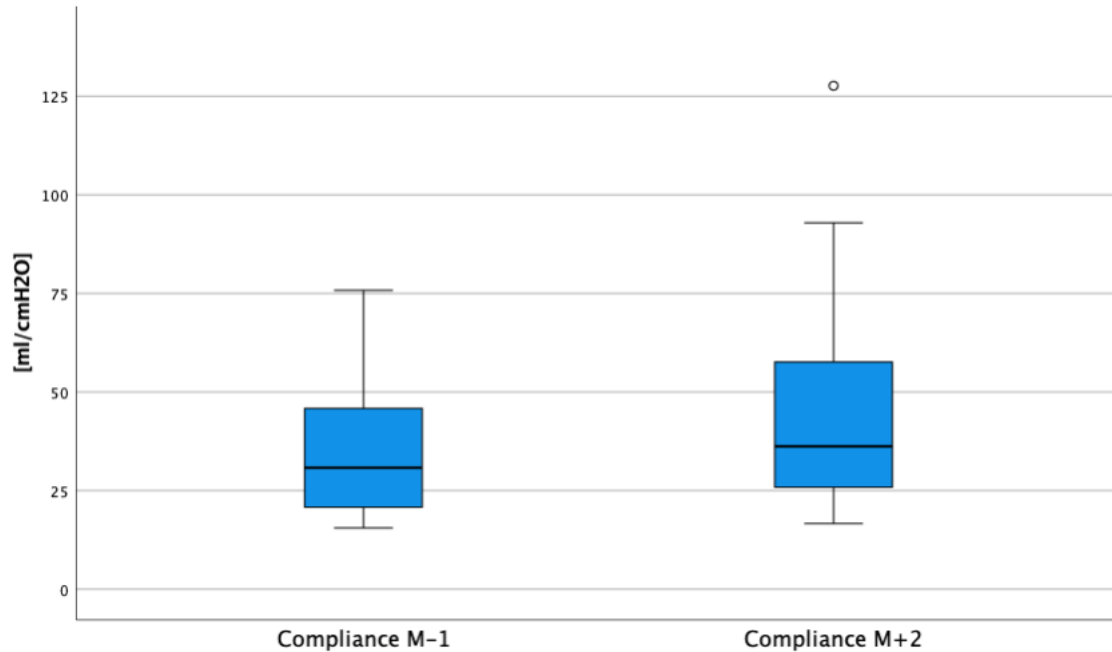


Abbildung 17. *Mittelfristige Compliance.*

Im weiteren mittelfristigen Vergleich konnte gezeigt werden, dass sich Pmax im Wilcoxon-Test signifikant reduziert.

Außerdem wurde bei diesem Test das Minutenvolumen signifikant verbessert.

- PEEP vor (Mdn = 7,50; R = 8) und nach Intervention (Mdn = 8,00; R = 9). Wilcoxon-Test $z = -1,06$; $p = ,916$; $n = 25$.

- Pmax vor (Mdn = 23,0; R = 29) und nach Intervention (Mdn = 21,0; R = 21).
Wilcoxon-Test $z = -2,15$; $p = ,031$; $n = 24$.

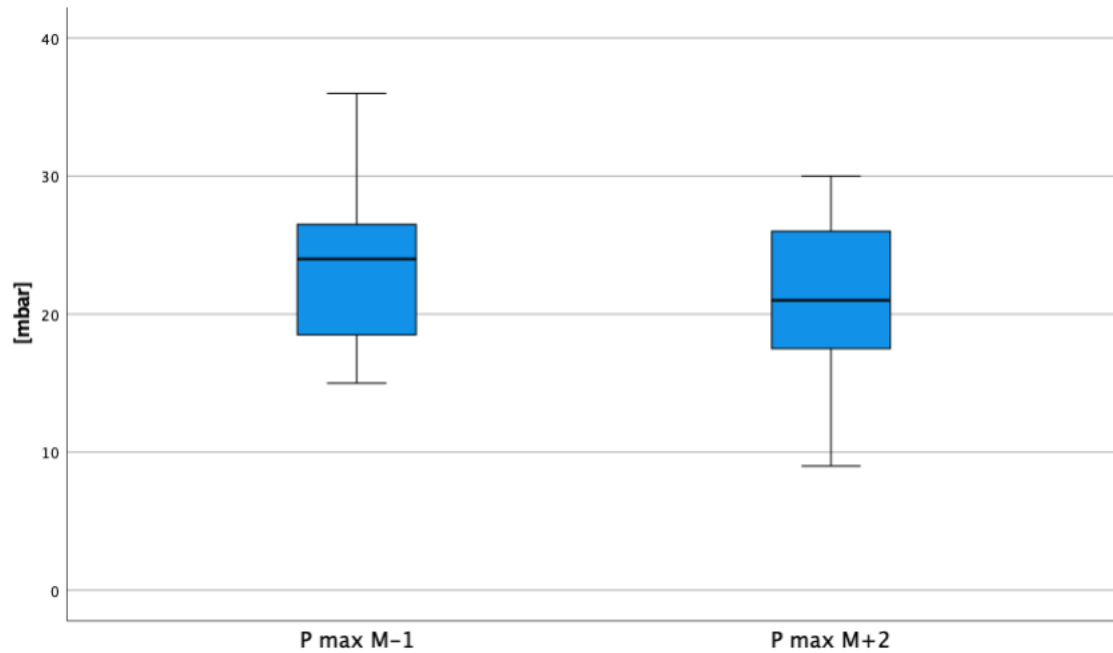


Abbildung 18. *Mittelfristiger Pmax.*

- Pmittel vor (Mdn = 11,50; R = 15) und nach Intervention (Mdn = 11,00; R = 12).
Wilcoxon-Test $z = -1,129$; $p = ,259$; $n = 25$.

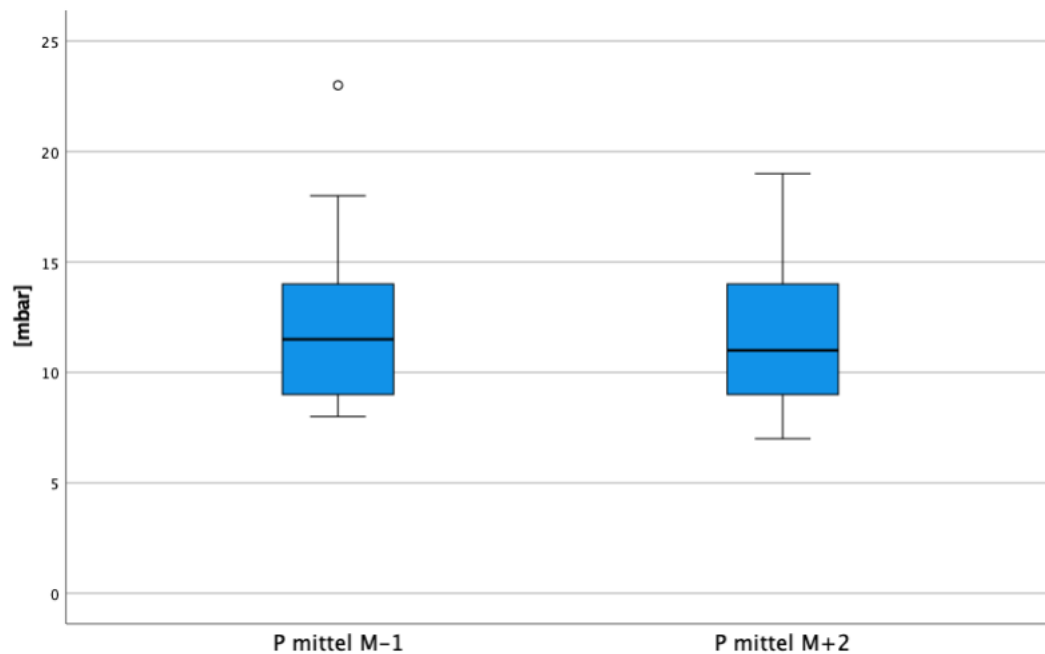


Abbildung 19. *Mittelfristiger Pmittel.*

- FiO_2 vor (Mdn = 0,40; R = 0,45) und nach Intervention (Mdn = 0,40; R = 0,35). Wilcoxon-Test $z = -,463$; $p = ,643$; $n = 28$.

- pO_2/FiO_2 vor (Mdn = 231,84; R = 298,5) und nach Intervention (Mdn = 234,28; R = 317,33). Wilcoxon-Test $z = -0,432$; $p = ,665$; $n = 27$.

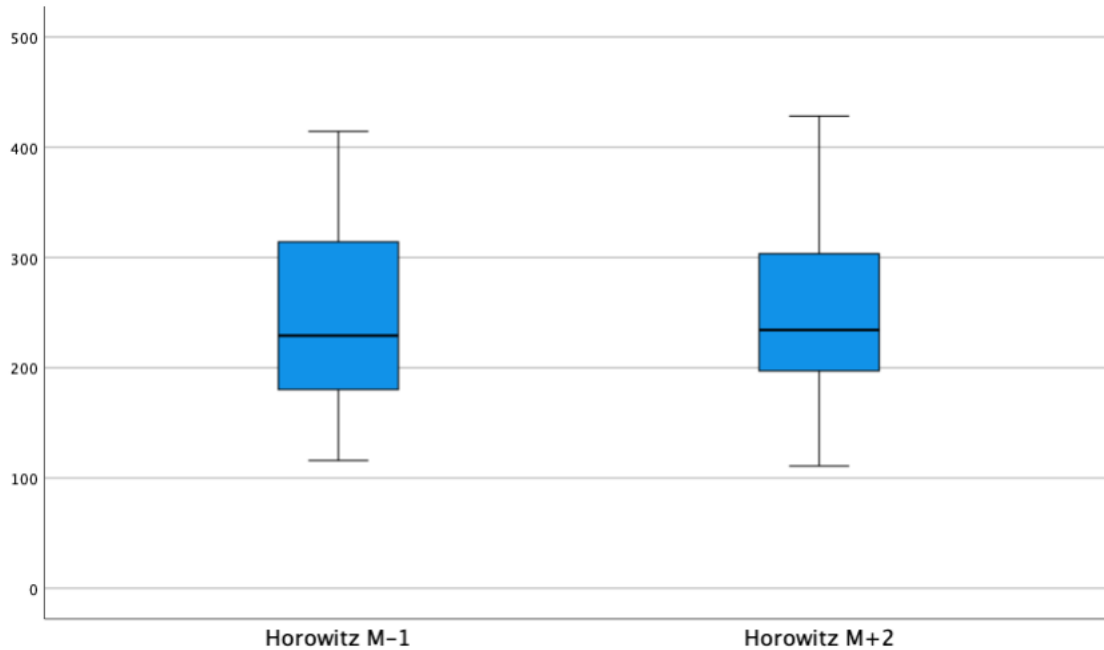


Abbildung 20. *Mittelfristig pO_2/FiO_2 .*

- Oxygenationsindex vor (Mdn = 4,98; R = 13,5) und nach Intervention (Mdn = 4,43; R = 10,75). Wilcoxon-Test $z = -1,477$; $p = ,140$; $n = 24$.

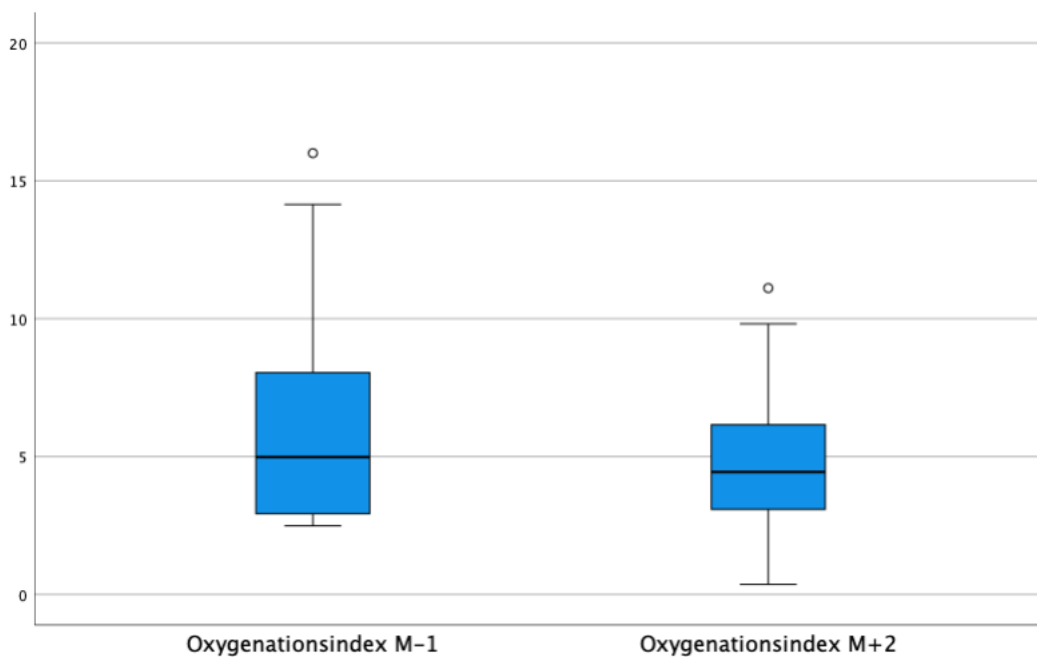


Abbildung 21. *Mittelfristiger Oxygenationsindex.*

- AF vor (Mdn = 22,50; R = 26) und nach Intervention (Mdn = 24,50; R = 40). Wilcoxon-Test $z = -1,043$; $p = ,297$; $n = 27$.
- Minutenvolumen vor (Mdn = 8,75; R = 14,4) und nach Intervention (Mdn = 11,05; R = 11,3). Wilcoxon-Test $z = -2,489$; $p = ,013$; $n = 25$.

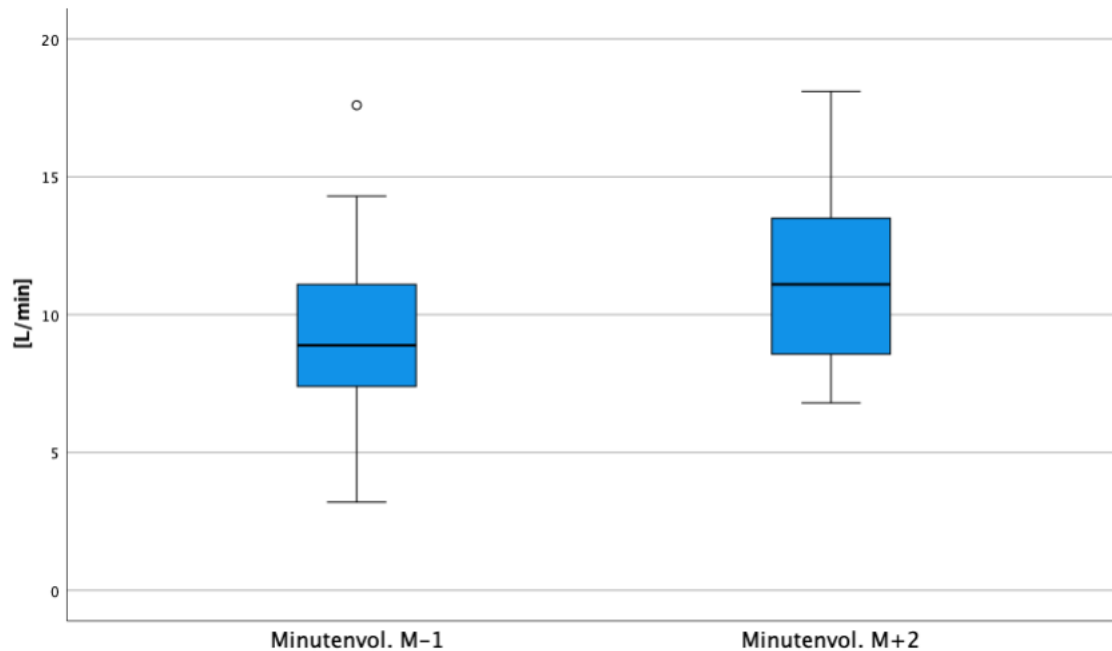


Abbildung 22. **Mittelfristiges Minutenvolumen.**

Mit dem Wilcoxon-Test für verbundene Stichproben konnten bei den gewählten gepaarten Stichproben sowohl bei Pmax als auch bei der Compliance signifikante Änderungen im mittelfristigen Verlauf nachgewiesen werden. Zudem konnte eine signifikante Änderung des Minutenvolumens mit dem Wilcoxon-Test bestätigt werden.

5.3 Zusammenfassung zu den Beatmungsparametern

In der folgenden Tabelle werden die Ergebnisse der einzelnen Medianwerte der Messungen und die Signifikanzen aus dem Wilcoxon-Test dargestellt.

Tabelle 5. Zusammenfassung zu den Beatmungsparametern

	M-1 (0)	M+1 (1)	M+2 (2)	p 0vs1	p 0vs2
PEEP [mbar/cmH ₂ O]	7,50	8,00	8,00	0,382	0,916
Pmax [mbar]	23,00	24,00	21,00	0,246	0,031
Pmittel [mbar]	11,50	12,00	11,00	0,972	0,259
Minutenvolumen [L/min]	8,75	8,90	11,05	0,840	0,013
FiO ₂	0,40	0,40	0,40	0,822	0,643
pO ₂ /FiO ₂ (mm Hg)	231,84	217,50	234,28	0,227	0,665
Oxygenationsindex	4,98	5,81	4,43	0,313	0,140
Compliance [ml/cm H ₂ O]	32,50	35,50	35,41	0,174	0,011
AF [min]	22,50	22,00	24,50	0,957	0,297

6. Vergleich der Hämodynamikparameter

6.1 Kurzfristiger Vergleich M-1 vs. M+1

Im kurzfristigen Vergleich der hämodynamischen Parameter zeigte sich lediglich bei dem SVRI eine signifikante Verbesserung der Messwerte. Bei den übrigen Parametern traten keine signifikanten Änderungen auf.

- HF vor (Mdn = 87,00; R = 61) und nach Intervention (Mdn = 88,50; R = 76). Wilcoxon-Test $z = -1,417$; $p = ,156$; $n = 30$.

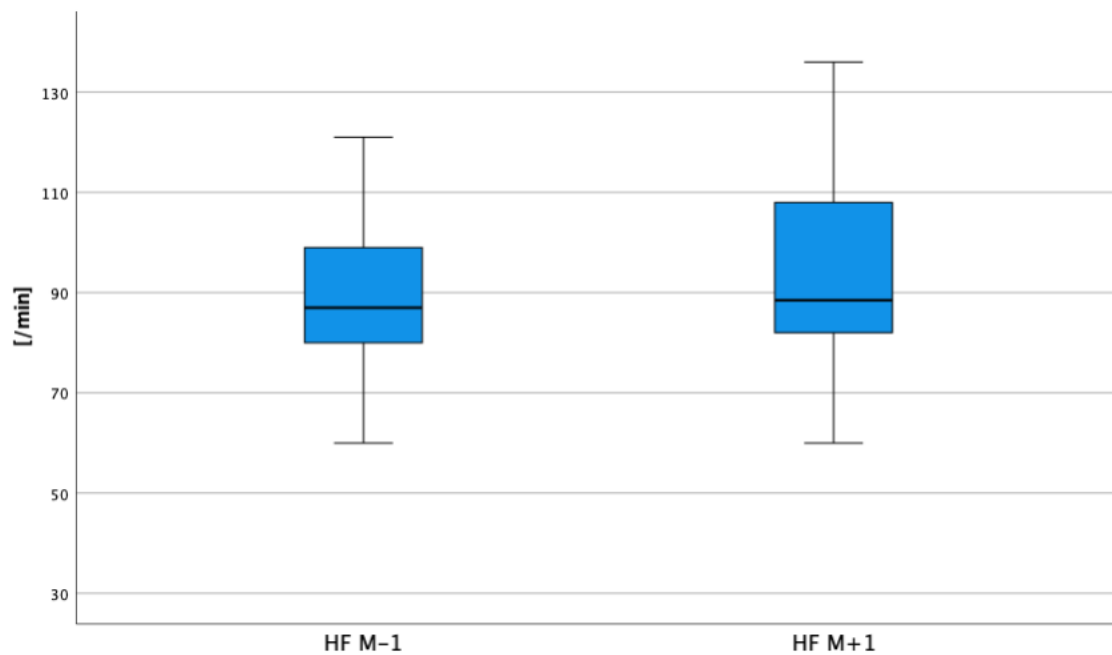


Abbildung 23. *Kurzfristige Herzfrequenz.*

- ZVD vor (Mdn = 12,50; R = 17) und nach Intervention (Mdn = 13,00; R = 23). Wilcoxon-Test $z = -,285$; $p = ,775$; $n = 30$.

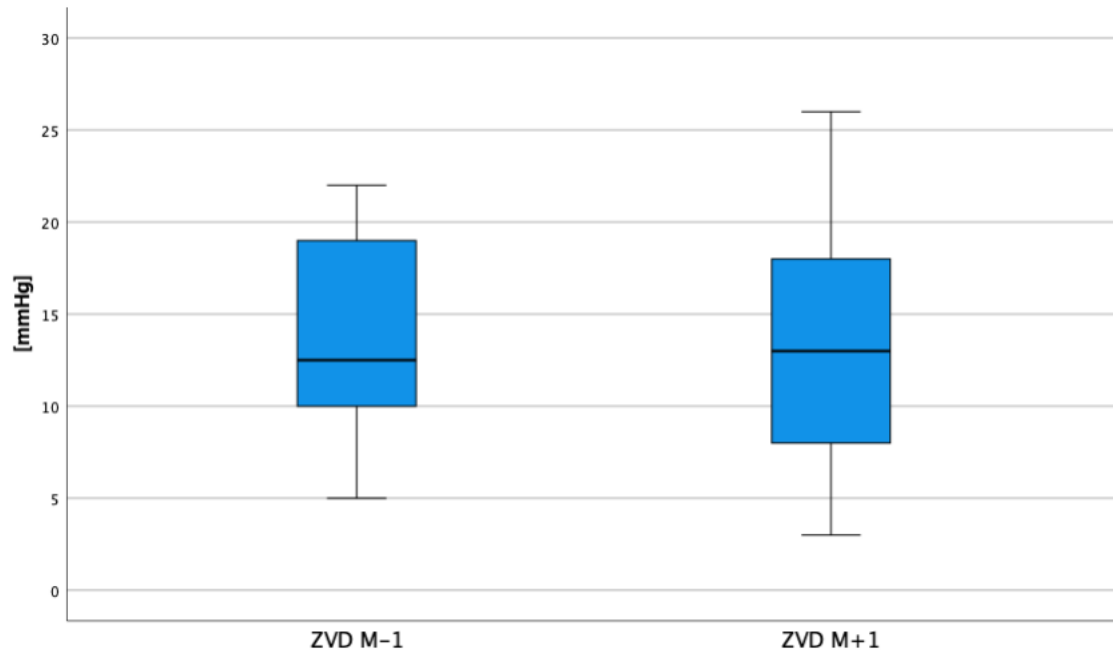


Abbildung 24. **Kurzfristig ZVD.**

- SVRI vor (Mdn = 1509,00; R = 2149) und nach Intervention (Mdn = 1270,00; R = 2161). Wilcoxon-Test $z = -2,335$; $p = ,020$; $n = 30$.

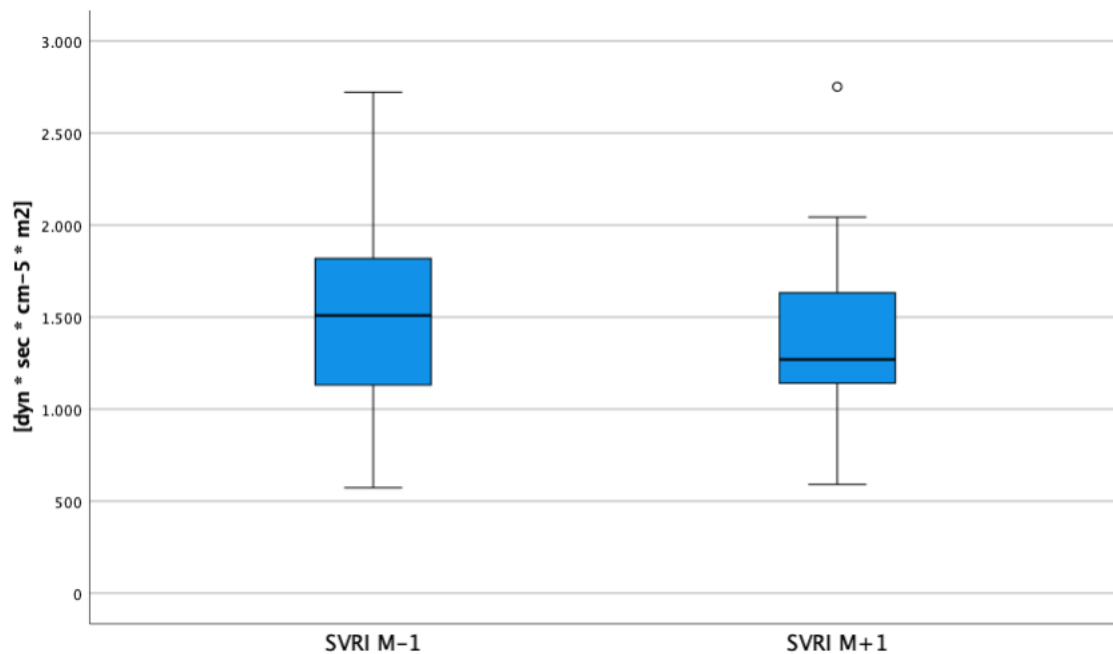


Abbildung 25. **Kurzfristig SVRI.**

- GEDI vor (Mdn = 788,00; R = 1237,4) und nach Intervention (Mdn = 748,00; R = 1113). Wilcoxon-Test $z = -,130$; $p = ,897$; $n = 29$.

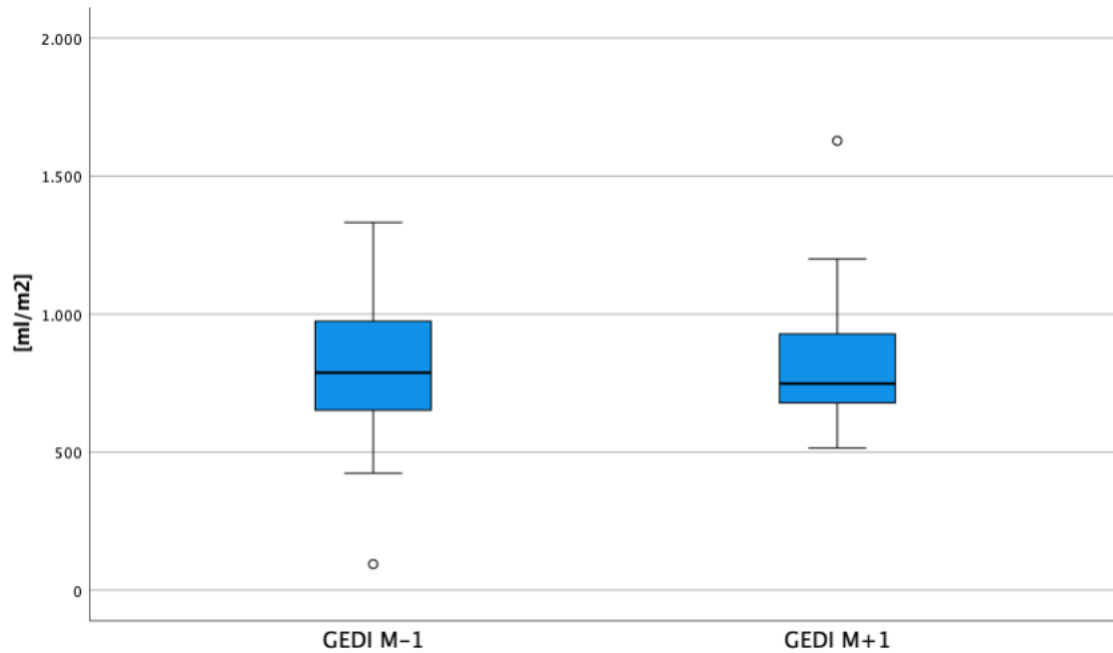


Abbildung 26. **Kurzfristig GEDI.**

- ELWI vor (Mdn = 9,00; R = 14) und nach Intervention (Mdn = 9,00; R = 12). Wilcoxon-Test $z = -,133$; $p = ,894$; $n = 29$.

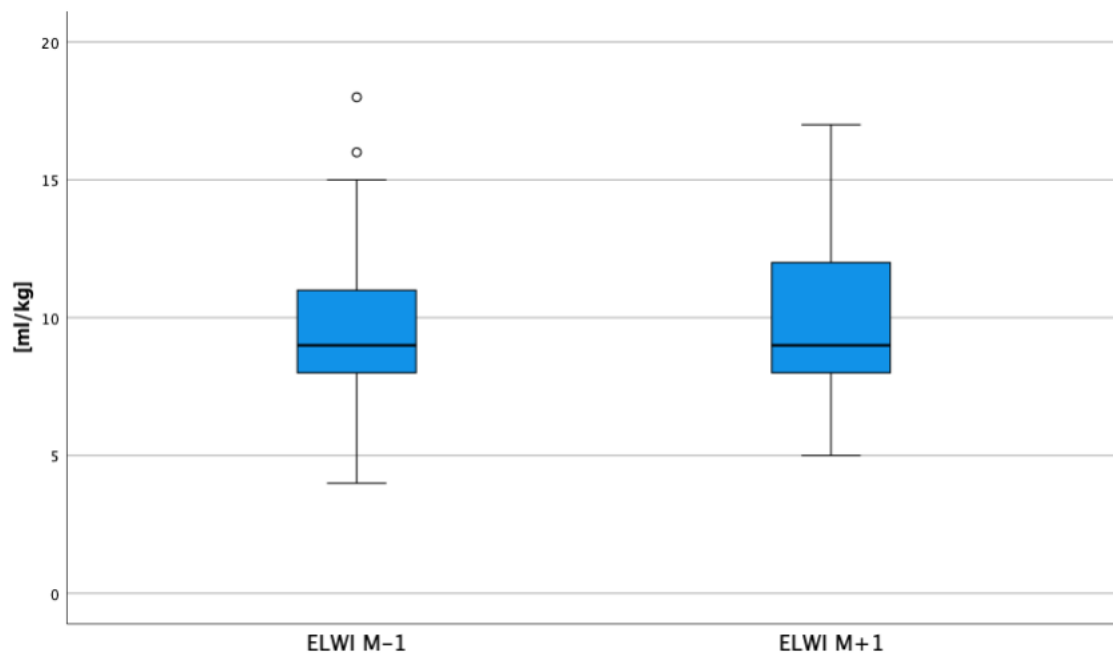


Abbildung 27. **Kurzfristig ELWI.**

- SVI vor (Mdn = 42,60; R = 63) und nach Intervention (Mdn = 43,50; R = 59). Wilcoxon-Test $z = -,165$; $p = ,869$; $n = 30$.

- HI vor (Mdn = 3,80; R = 5,93) und nach Intervention (Mdn = 3,88; R = 4,56). Wilcoxon-Test $z = -,330$; $p = ,741$; $n = 27$.

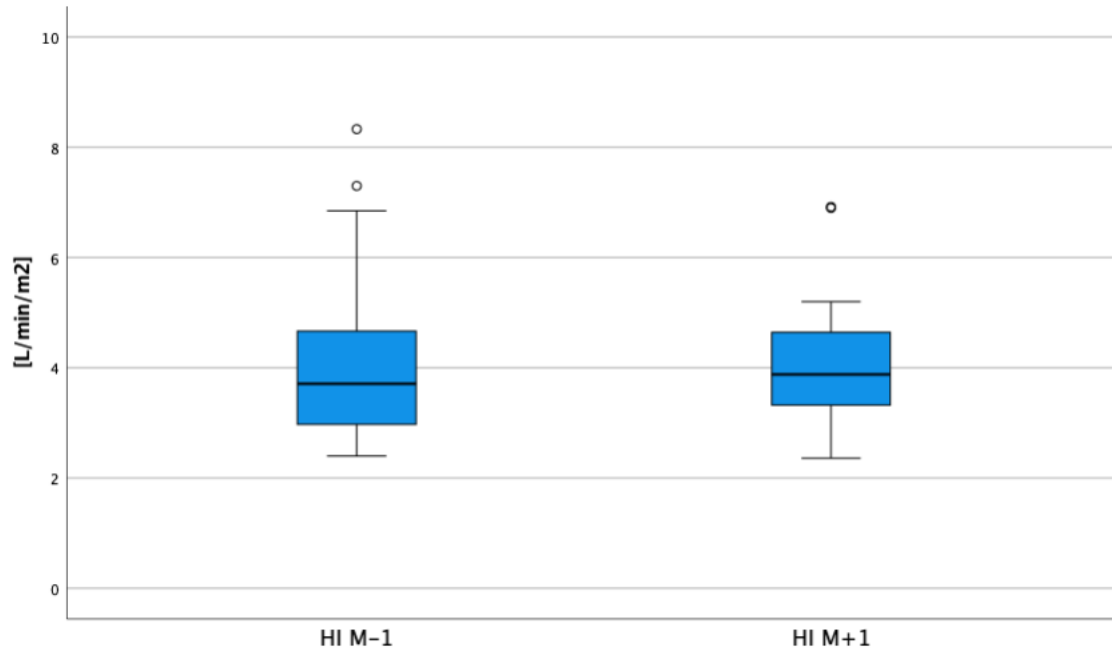


Abbildung 28. **Kurzfristig HI.**

- GEF vor (Mdn = 25,00; R = 28) und nach Intervention (Mdn = 23,50; R = 28). Wilcoxon-Test $z = -,810$; $p = ,418$; $n = 21$.

- PVPI vor (Mdn = 1,50; R = 2,5) und nach Intervention (Mdn = 1,60; R = 2,3). Wilcoxon-Test $z = -,048$; $p = ,961$; $n = 27$.

- CPI vor (Mdn = 0,75; R = 1,1) und nach Intervention (Mdn = 0,70; R = 0,8).
Wilcoxon-Test $z = -1,273$; $p = ,203$; $n = 24$.

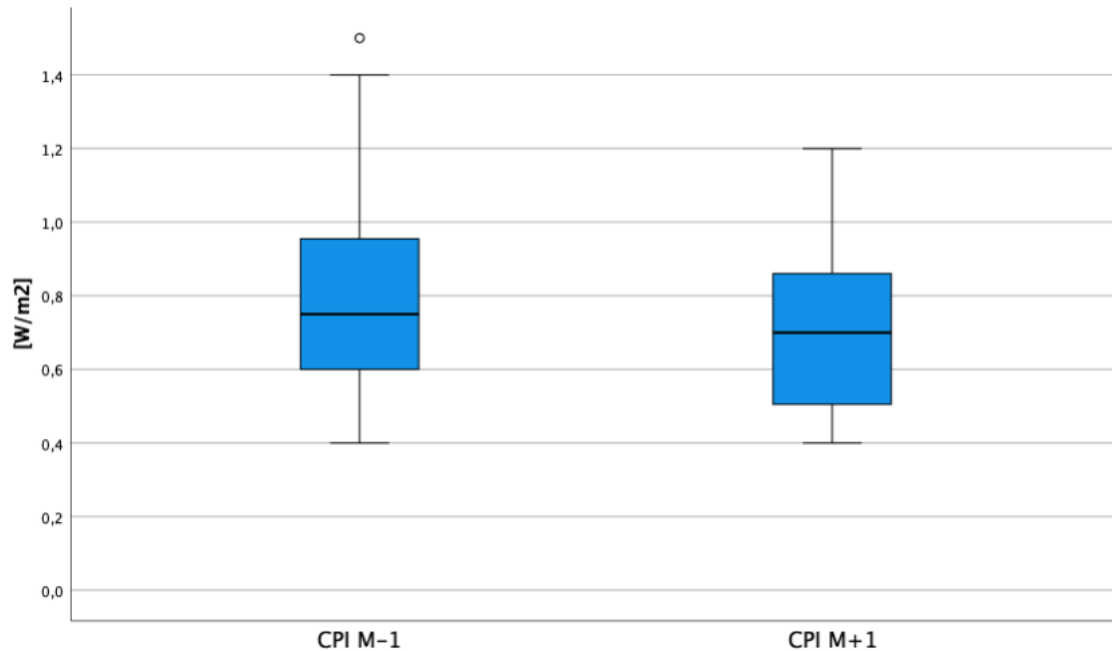


Abbildung 29. **Kurzfristig CPI.**

Durch den Wilcoxon-Test für verbundene Stichproben konnte im kurzfristigen Vergleich bei den gewählten gepaarten Stichproben nur der SVRI als signifikant verändert nachgewiesen werden. Aus Gründen der Übersichtlichkeit wird auf eine erneute grafische Darstellung verzichtet.

6.2 Mittelfristiger Vergleich M-1 vs. M+2

Im Wilcoxon-Test konnte im mittelfristigen Intervall von 8 Stunden vor und 24 Stunden nach der Tracheotomie eine Erhöhung der Herzfrequenz nachgewiesen werden.

Im Folgenden werden die untersuchten Parameter und die Ergebnisse dazu aufgelistet:

- HF vor (Mdn = 87,00; R = 61) und nach Intervention (Mdn = 94,00; R = 67).
Wilcoxon-Test $z = -1,965$; $p = ,049$; $n = 29$.

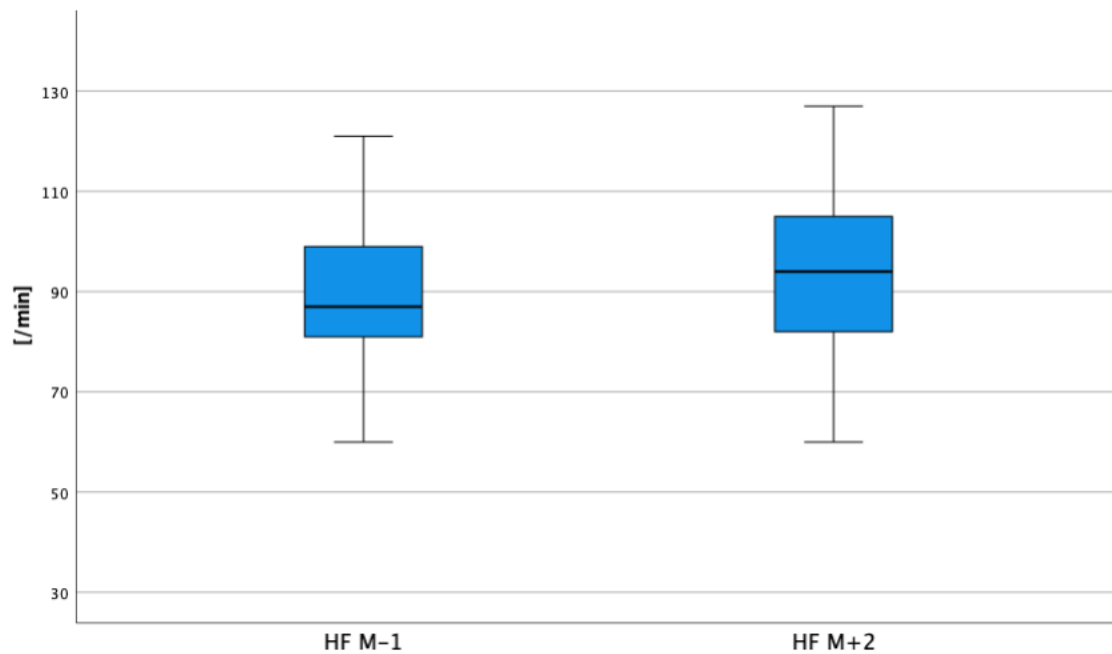


Abbildung 30. *Mittelfristige Herzfrequenz.*

- ZVD vor (Mdn = 12,50; R = 17) und nach Intervention (Mdn = 13,50; R = 41). Wilcoxon-Test $z = -0,868$; $p = 0,386$; $n = 30$.

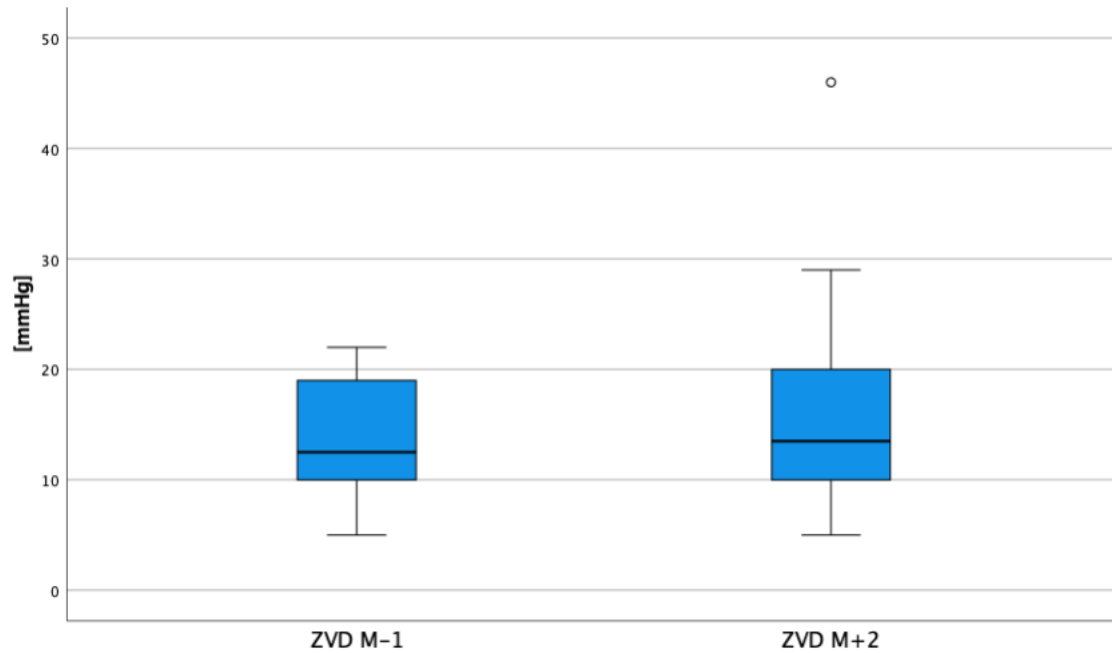


Abbildung 31. *Mittelfristig ZVD.*

- SVRI vor (Mdn = 1509,00; R = 2149) und nach Intervention (Mdn = 1366,00; R = 1470). Wilcoxon-Test $z = -1,731$; $p = 0,083$; $n = 29$.

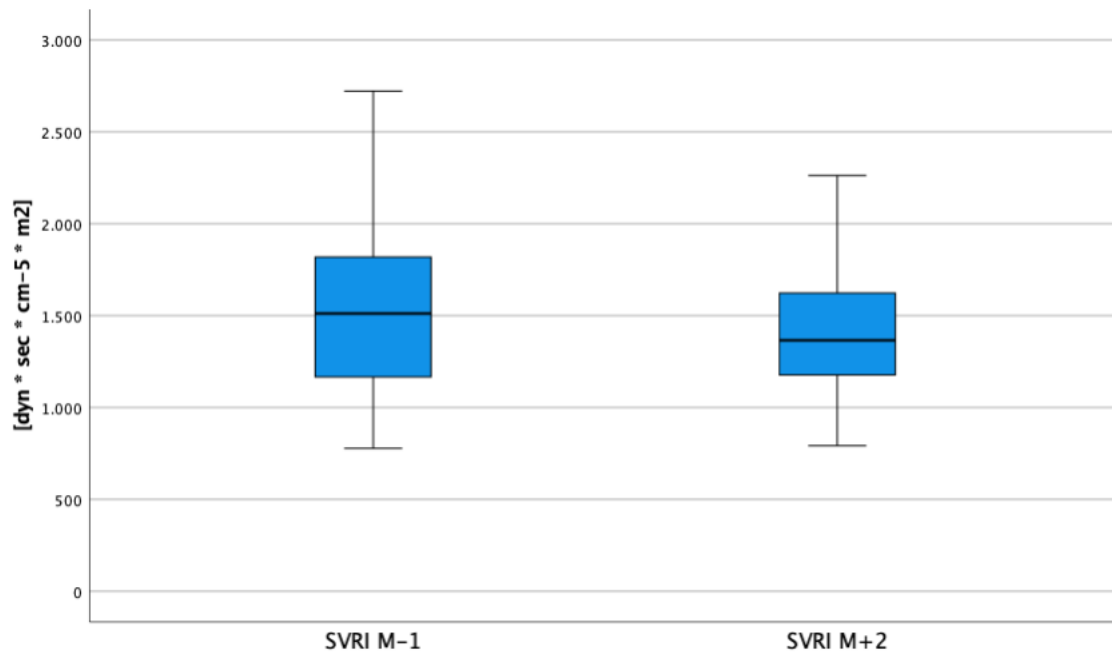


Abbildung 32. *Mittelfristig SVRI.*

- GEDI vor (Mdn = 788,00; R = 1237,4) und nach Intervention (Mdn = 770,50; R = 632). Wilcoxon-Test $z = -1,492$; $p = ,136$; $n = 28$.

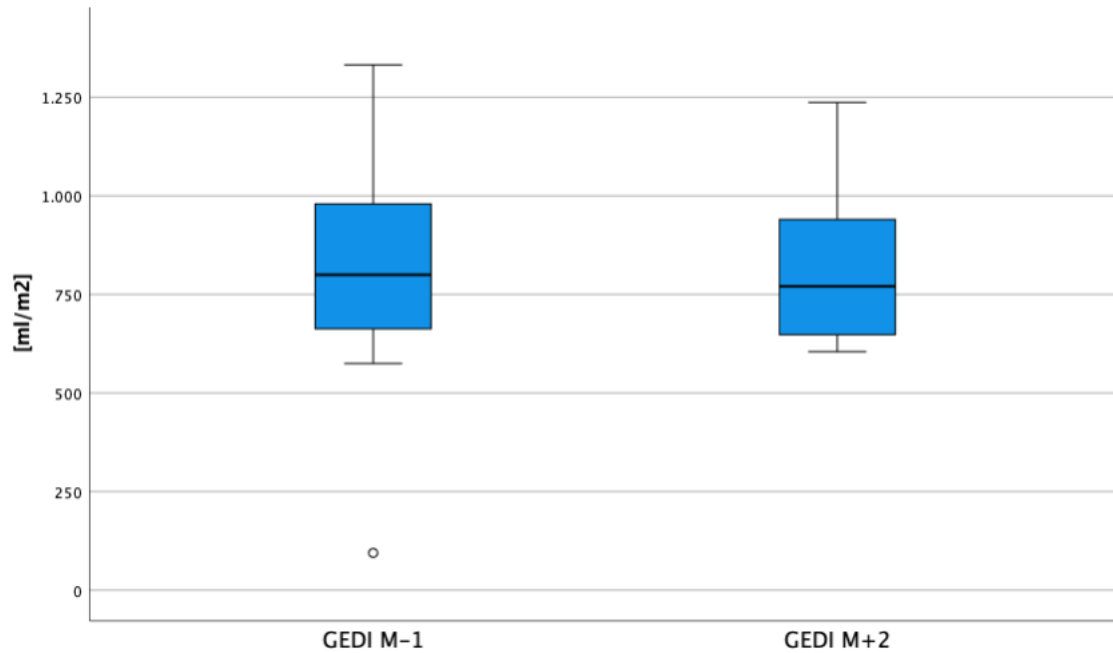


Abbildung 33. *Mittelfristig GEDI.*

- ELWI vor (Mdn = 9,00; R = 14) und nach Intervention (Mdn = 9,00; R = 12). Wilcoxon-Test $z = -,035$; $p = ,972$; $n = 30$.

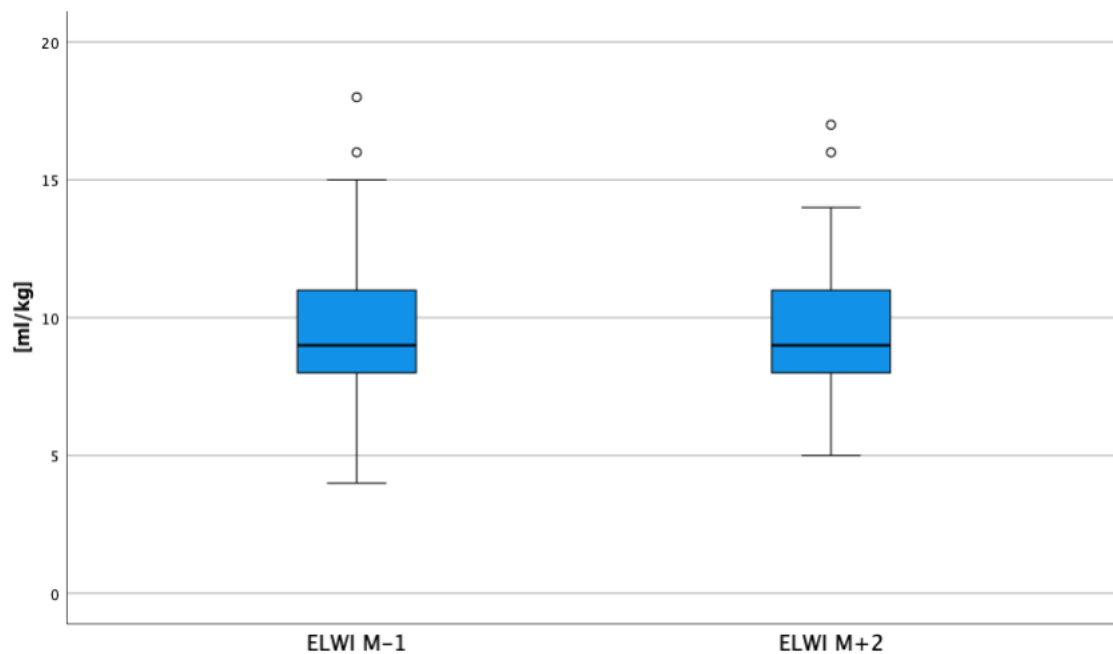


Abbildung 34. *Mittelfristig ELWI.*

- SVI vor (Mdn = 42,60; R = 63,0) und nach Intervention (Mdn = 42,00; R = 43). Wilcoxon-Test $z = -1,197$; $p = ,231$; $n = 29$.

- HI vor (Mdn = 3,80; R = 5,93) und nach Intervention (Mdn = 4,10; R = 5,58). Wilcoxon-Test $z = -1,027$; $p = ,304$; $n = 29$.

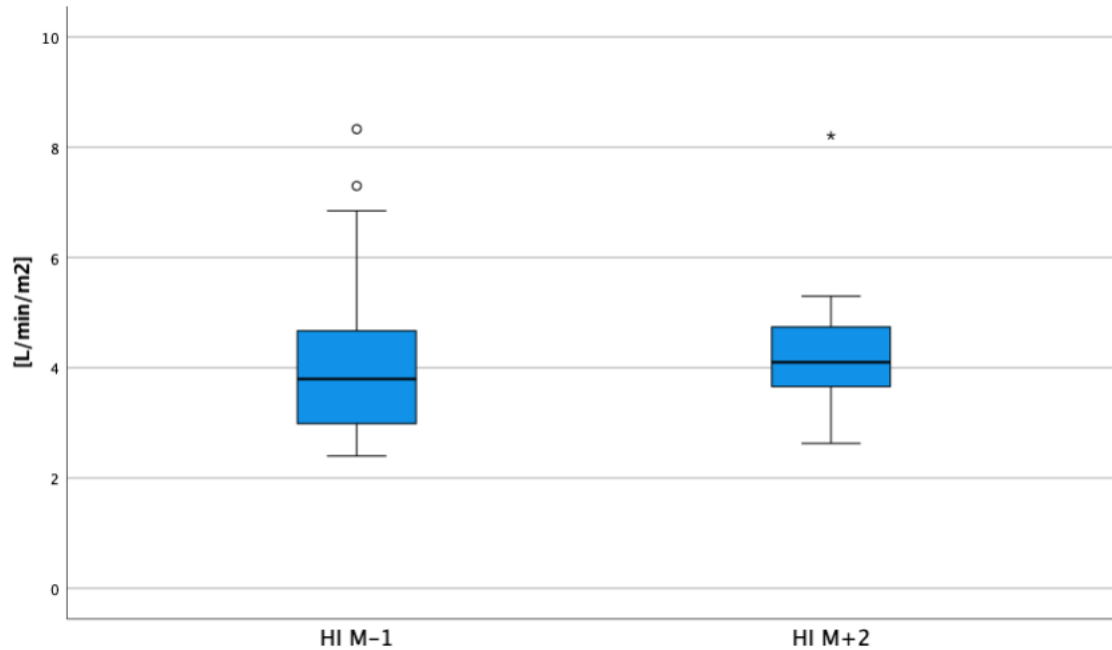


Abbildung 35. **Mittelfristig HI.**

- GEF vor (Mdn = 25,00; R = 28) und nach Intervention (Mdn = 23,50; R = 27). Wilcoxon-Test $z = -1,012$; $p = ,311$; $n = 21$.
- PVPI vor (Mdn = 1,50; R = 2,5) und nach Intervention (Mdn = 1,50; R = 1,9). Wilcoxon-Test $z = -,831$; $p = ,406$; $n = 28$.

- CPI vor (Mdn = 0,75; R = 1,1) und nach Intervention (Mdn = 0,80; R = 2,1).
Wilcoxon-Test $z = -,244$; $p = ,807$; $n = 24$.

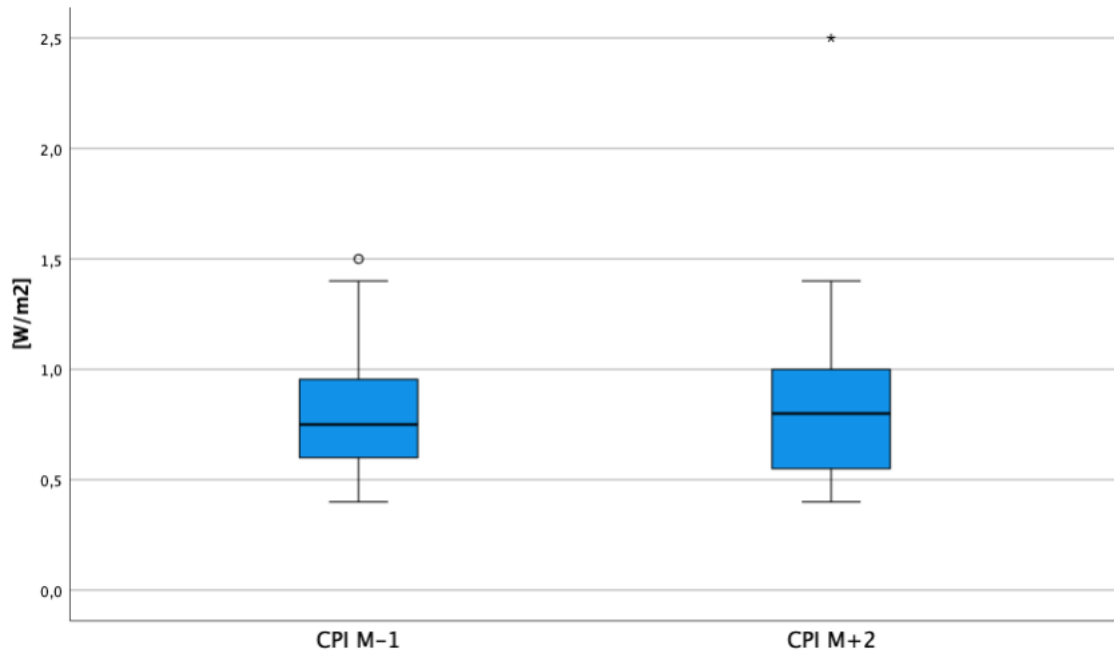


Abbildung 36. **Mittelfristig CPI.**

Mit dem Wilcoxon-Test für verbundene Stichproben konnte im mittelfristigen Vergleich bei den gewählten gepaarten Stichproben die Herzfrequenz als gerade noch innerhalb des Signifikanzniveaus nachgewiesen werden. Man kann daher für den mittelfristigen Verlauf eine Erhöhung der Herzfrequenz annehmen. Der SVRI lag diesmal knapp oberhalb des Signifikanzniveaus und war damit nicht mehr statistisch signifikant verändert.

6.3 Zusammenfassung zu den Hämodynamikparametern

Die Ergebnisse zu den Mittelwerten der einzelnen Messungen und die Signifikanzen aus dem Wilcoxon-Test werden in der folgenden Tabelle zur Übersicht zusammengetragen.

Tabelle 6. Zusammenfassung zu den Hämodynamik Parametern

	M-1 (0)	M+1 (1)	M+2 (2)	p 0vs1	p 0vs2
HF (bpm)	87,00	88,50	94,00	0,156	0,049
ZVD (mm Hg)	12,50	13,00	13,50	0,775	0,386
SVRI (dyn x sec x cm ⁻⁵ x m ²)	1509,00	1270,00	1366,00	0,020	0,083
GED I (ml/ m ²)	788,00	748,00	770,50	0,897	0,136
ELWI (ml/kg)	9,00	9,00	9,00	0,894	0,972
SVI (ml/ m ²)	42,60	43,50	42,00	0,869	0,231
HI (l/min)	3,80	3,88	4,10	0,741	0,304
GEF (%)	25,00	23,50	23,50	0,418	0,311
PVPI	1,50	1,60	1,50	0,961	0,406
CPI (W/ m ²)	0,75	0,70	0,80	0,203	0,807

7. Diskussion

Das hämodynamische Monitoring ist ein essenzieller und grundlegender Baustein der Überwachung und Therapiesteuerung auf jeder Intensivstation. Grundsätzlich kann zwischen drei verschiedenen Methoden des Informationsgewinns in Bezug auf die Hämodynamik unterschieden werden.

Zunächst sind die klassischen Druckparameter zu nennen, welche die Füllungsdrücke einzelner Kompartimente angeben. Hier sei der bereits seit langem bekannte ZVD oder der PCWP, welcher mittels Pulmonalarterienkatheter ermittelt wird, genannt. Es sei darauf hingewiesen, dass die verschiedenen Füllungsdrücke als Instrument der kardialen Vorlast in ihrer Aufgabe als Vorbote der Volumenreagibilität seit längerem umstritten sind. So zeigen Kumar und Kollegen, dass das Schlagvolumen oder dessen Variabilität nicht mit der Höhe oder Änderungen des ZVD korrelieren (Kumar, Anel et al. 2004). Die gleiche Arbeitsgruppe zeigt eine fehlende Korrelation des PCWP zum Herzindex (Kumar, Anel et al. 2004). Ein verbessertes Outcome von ARDS-Patienten ist mit dem Flüssigkeitsmanagement, welches am ZVD oder PCWP orientiert ist, nicht zu erwarten (Wiedemann 2008).

Die zweite Methode ergibt sich aus den dynamischen Parametern. Dazu zählen die Pulsdruckvariation (PPV) und die SVV. Dies sind Parameter der kardialen Volumenreagibilität. Sie geben Erkenntnis, ob das Herz auf eine externe Volumenzufuhr mit einem erhöhten Auswurf reagieren wird oder nicht. Somit lässt sich leichter beurteilen, ob das HZV bei Volumenzufuhr steigt oder ob eine Volumenzufuhr generell sinnvoll ist. Die SVV zeigt sich bei Berkenstadt und Kollegen sogar mit einer höheren Sensitivität sowie einer höheren Spezifität als der ZVD (Berkenstadt, Margalit et al. 2001). Eine wesentliche Einschränkung in Bezug auf die Verwendung dieser beiden Parameter muss erwähnt werden: Als Prädiktoren der Volumenreagibilität können sie nur verwendet werden, wenn eine regelmäßige kontrollierte Beatmung vorliegt. Obligatorisch sind also ein Sinusrhythmus sowie eine kontrollierte maschinelle Beatmung und eine artefaktfreie arterielle Druckkurve.

Die dritte und letzte Gruppe der hämodynamischen Parameter sind die volumetrischen Parameter. Dazu gehören als bedeutsamste Parameter das GEDV, das EVLW sowie das ITBV. Dies sind Volumenparameter, welche alle mehr oder weniger aus dem HZV berechnet werden können. Sie zeigen direkt den kardialen Füllstand bzw. die Quantifizierung eines pulmonalen Ödems im Sinne des extravaskulären Lungenwassers (Katzenelson, Perel et al. 2004; Kuzkov, Suborov et al. 2007; Tagami, Kushimoto et al. 2010).

Gerade wegen der Einschränkung, die dynamischen Parameter SVV sowie PPV nur bei Patienten einsetzen zu können, welche einen Sinusrhythmus haben, können diese vor allem auf unserer Station nur sehr eingeschränkt verwendet werden. Bei bis zu einem Drittel der internistisch intensivmedizinisch behandelten Patienten zeigt sich in der Liste der Nebendiagnosen eine kardiale Rhythmusstörung (Goodman, Shirov et al. 2007; Annane, Sebille et al. 2008). Zudem ist meist eine frühzeitige Umstellung auf Spontanatmungs-Modi oder zumindest unterstützte Modi angestrebt.

Daher nehmen die Volumenparameter ITBV sowie das EVLW eine immer wichtigere Rolle ein. Das ITBV ist wesentlicher Bestandteil der Berechnung und Quantifizierung des Lungenödems.

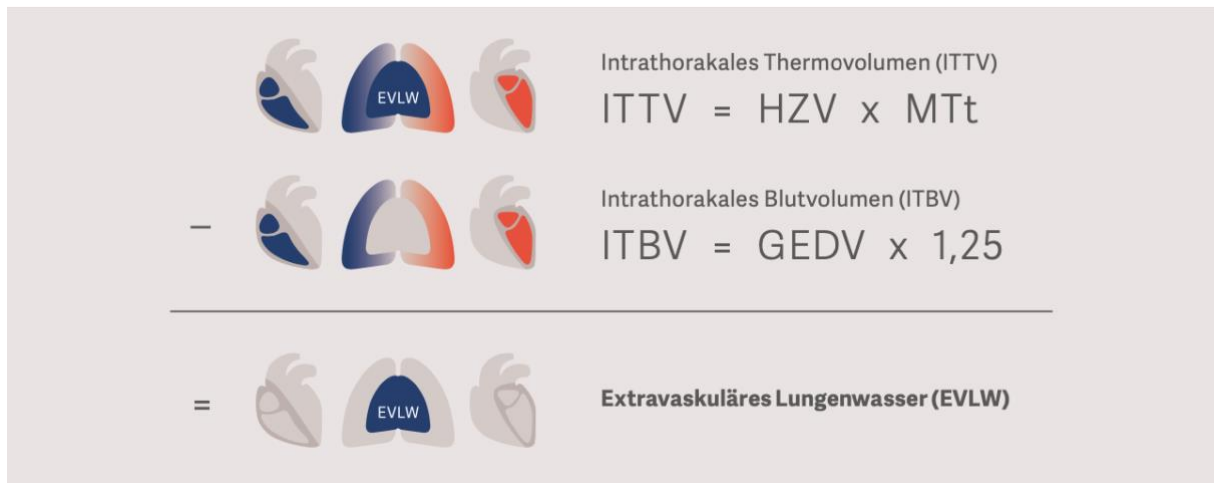


Abbildung 37. **Berechnung EVLW.**

In Abbildung 37 zeigt sich die Berechnung des EVLW durch Subtraktion des ITBV vom ITTV. Dieser Wert kann zusätzlich noch auf die Körperoberfläche eines jeden Patienten berechnet werden. So erhält man das ELWI.

Diese Studie soll der Anstoß für weitere Arbeiten sein, um das schwierige Thema des Einflusses einer Tracheotomie auf die Hämodynamik genauer zu beleuchten. Bisher gibt es diesbezüglich keine wegweisenden Arbeiten, um die klinisch tätigen Intensivmediziner in ihrem Bauchgefühl zu bestärken oder es zu widerlegen.

7.1 Zusammenfassung der Ergebnisse

Die Studie „Der kurz- und mittelfristige Einfluss der Tracheotomie auf Hämodynamik, Lungenfunktion und Weaning“ beschäftigte sich mit einer möglichst genauen Beobachtung der Beatmungs- und Hämodynamikparameter intensivmedizinisch behandelter Patienten unter Verwendung der PiCCO®-Technologie vor und nach einer Tracheotomie. Dabei konnten insgesamt 30 Patienten im Alter von 47 bis 87 Jahren in die Studie eingeschlossen werden. Alle eingeschlossenen Patienten wurden im Rahmen eines intensivmedizinischen Aufenthalts tracheotomiert. Außerdem wurden bei allen Patienten während des gesamten stationären Aufenthalts regelmäßig BGAs durchgeführt und bestimmte Parameter mit der PiCCO®-Technologie gemessen und protokolliert. Die primär für diese Studie gewählten Messzeitpunkte waren 24 sowie 8 Stunden vor und nach der Intervention, sodass sich insgesamt 4 Messzeitpunkte pro Patienten ergaben. Bei insgesamt 30 eingeschlossenen Patienten ergab dies insgesamt 120 Messungen.

In dem intensivmedizinischen Alltag wird häufig von einer respiratorischen Verbesserung nach der Durchführung einer Tracheotomie ausgegangen. Diese Einschätzungen beruhen aber häufig nicht auf entsprechenden Studien, sondern eher auf Expertenmeinungen, weshalb sie in die geringste Evidenzklasse (Klasse V) einzustufen sind. Dabei werden auch oft potenzielle Nachteile des Eingriffs nicht bedacht. Insgesamt ist es ebenso wichtig, nicht nur die Komplikationen der Operation als solche zu betrachten, weil auch die Komplikationen und Risiken durch eine zusätzliche Sedierung und Analgesie einbezogen werden sollten.

Pierson konnte 2005 zeigen, dass sich die Atemarbeit durch eine Tracheotomie im Vergleich mit einem gleichgroßen translaryngealen Tubus verringert (Pierson 2005). Dennoch konnte keine Veränderung beim Tidalvolumen, der Atemfrequenz oder dem Minutenvolumen festgestellt werden. PiCCO®- oder BGA-Parameter wurden von Pierson in dieser Studie nicht verglichen.

1999 wurde eine Studie von Lin et al. mit einem ähnlichen Aufbau veröffentlicht. Dabei wurden allerdings nur zwei Messreihen jeweils 24 Stunden vor und 24 Stunden nach der Tracheotomie durchgeführt. Dabei wurden jedoch keine BG-Analysen eingesetzt (Lin, Huang et al. 1999) und auch die bei der PiCCO®-Technologie standardmäßig analysierten Parameter nur anteilig berücksichtigt. In dieser Studie wurde auch nicht mit der PiCCO®-Technologie gearbeitet, sondern die Parameter wurden mit dem Bicare CP-100 gemessen und aufgezeichnet.

Es zeigte sich, dass der PIP (*Peak inspiratory pressure*) nach einer Tracheotomie signifikant reduziert war. V_T , AF, Minutenvolumen, Compliance und die Atemarbeit wiesen jedoch keine signifikanten Veränderungen auf (Lin, Huang et al. 1999).

Insgesamt gibt es zum aktuellen Zeitpunkt nur eine überschaubare Anzahl von Studien mit einer ähnlichen Studienkonstellation wie in unserer vorliegenden Studie. Übereinstimmungen hinsichtlich der untersuchten Daten gibt es in keiner dieser Studien.

Die gewonnenen wissenschaftlichen Erkenntnisse stellen im Vergleich zu den offiziellen Studienergebnissen eine Neuigkeit dar. Sie können folglich bestimmte theoretische Annahmen sowohl stützen als auch widerlegen.

Insgesamt ist es schwierig, die Einflüsse der Tracheotomie auf das gesamte körperliche System wissenschaftlich korrekt zu erfassen.

So birgt die objektive Durchführung von Studien zum Weaning besondere Probleme, die sich deutlich von anderen Untersuchungskontexten unterscheiden.

Ein Problem, das im Rahmen der vorliegenden Studie noch überschaubar war, ergibt sich durch die Adhärenz der Ärzte der Intensivstation an die festgelegten Messzeitpunkte. Dabei konnte z. T. auch kein Einfluss mehr auf die Zeitpunkte genommen werden, da diese Daten bereits vor wenigen Jahren erfasst und retrospektiv ausgewertet wurden.

Im Unterschied zu vielen anderen Studien, in denen unterschiedlich therapierte Gruppen miteinander verglichen werden, war in dieser Studie eine Verblindung der behandelnden Ärzte nicht nötig, da alle Patienten eine Tracheotomie erhielten.

Mit Wilcoxon-Tests für verbundene Stichproben konnten Signifikanzen im kurz- und mittelfristigen Verlauf für die einzelnen gemessenen Parameter ermittelt werden.

Im kurzfristigen Verlauf zeigte sich im Vergleich mit dem Zustand vor der Intervention der SVRI erniedrigt. Die Beatmungsparameter änderten sich jedoch kurzfristig nicht, zeigten sich aber im mittelfristigen Vergleich sowohl bei der Compliance als auch beim Minutenvolumen und auch bei Pmax nach der Intervention in positivem Sinne signifikant verändert.

Im Bereich der Hämodynamikparameter wurde eine signifikante Reduktion des SVRI im kurzfristigen Intervall nach der Intervention festgestellt. Mittelfristig war dieser jedoch knapp nicht mehr signifikant verändert. Mittelfristig war jedoch eine deutlich erhöhte Herzfrequenz zu beobachten.

Die anderen nicht genannten Parameter unterlagen dabei keiner signifikanten Änderung.

7.2 Diskussion der Methoden

7.2.1 Messungen

Es wurden alle Messparameter, die bei der regelmäßigen Messung in den BGAs und in der PiCCO®-Messung erfasst wurden, in die Auswertung aufgenommen, um beurteilen zu können, bei welchen Parametern Veränderungen auftreten.

Um eine möglichst hohe interindividuelle Vergleichbarkeit zu gewährleisten und eine vollständige Erfassung aller Messzeitpunkte sicherzustellen, wurden die Messzeitpunkte innerhalb eines zeitlichen Rahmens festgelegt, in dem eine hohe Wahrscheinlichkeit für den Aufenthalt der Patienten auf derselben Station besteht. In diesem Kontext wurden Zeitpunkte definiert, die einen kurz- und mittelfristigen Vergleich ermöglichen.

Die Datenerfassung erfolgte schriftlich unmittelbar nach der Durchführung der Messungen auf einem vorgefertigten Erfassungsbogen, wobei jeweils die Beatmungs- und die Hämodynamikparameter erfasst wurden. Die dabei verwendete PiCCO®-Technologie wird bereits seit mehreren Jahren eingesetzt und wurde schon in einer Vielzahl von Studien eingesetzt (Franzen, Umgelter et al. 2007; Huber, Ringmaier et al. 2007; Osthaus, Huber et al. 2007; Huber, Umgelter et al. 2008; Mutoh, Kazumata et al. 2009; Adler, Reuter et al. 2013; Goepfert, Richter et al. 2013; Berbara, Mair et al. 2014; Hu, Lin et al. 2014).

Da die Messergebnisse zum Teil retrospektiv und zum Teil prospektiv erfasst wurden, mussten bei den retrospektiv erfassten Daten jene Messzeitpunkte verwendet werden, welche am genauesten übereinstimmten. Bei den Messungen wurden allerdings stets die vom Hersteller vorgeschriebenen Schritte für das Vorgehen zur Messung beachtet. Bei retrospektiv eingeschlossenen Messparametern besteht generell die Gefahr, dass einzelne Parameter nicht erfasst oder protokolliert wurden und somit auch nicht mehr nachvollziehbar sind. Etwaige Übertragungsfehler können ebenso nicht mehr nachvollzogen oder korrigiert werden, wenn es nur jenes Protokoll gibt. Dadurch besteht die Möglichkeit, dass fehlerhafte Daten übertragen und weiterverarbeitet werden (Messfehler).

Um die Wahrscheinlichkeit von fehlerhaft übertragenen Messwerten zu reduzieren, wurden diese auf Plausibilität geprüft. Einzelne unterschiedliche Einheitsangaben wurden vereinheitlicht. Klassische Messfehler könnten die Studienergebnisse in beide Richtungen hin verzerren.

Eine Selektionsbias ist in der vorliegenden Studie unter Umständen möglich. Wenn man bedenkt, dass nur jene Patienten eingeschlossen werden konnten, welche gesund genug waren, um noch eine Tracheotomie zu erhalten. Diese Patienten mussten auch entsprechend lange nach dem Eingriff leben, um eingeschlossen zu werden. Jene Patienten, welche unmittelbar vor oder nach der Operation verstarben, wurden aus der Studie ausgeschlossen. Außerdem ist die Studie auf einer internistischen Intensivstation durchgeführt worden. Hiermit sind per se Patienten mit chirurgischen Krankheitsbildern nicht abgebildet.

Ebenso wenig Beachtung fanden die Nebendiagnosen der Patienten. Bei bestimmten Kombinationen wäre eine Beeinflussung der hier untersuchten Parameter nicht sicher auszuschließen.

Bei einem Patienten mit fibrotischem Umbau der Lunge oder einer Pneumonie ist eine Verbesserung der pulmonalen Compliance allein aufgrund der Tracheotomie unwahrscheinlich. Andere Patienten mit Herzrhythmusstörungen könnten die Herzfrequenz in beide Richtungen positiv oder negativ beeinflussen. Auch die hämodynamische Messung kann sich hier verändert zeigen s. Abschnitt 7.3.2.

Ebenso ist eine Veränderung der hämodynamischen Parameter bei hochdosierter Gabe von Medikamenten zur Tracheotomie denkbar.

Als weitere Optimierung des Messvorganges wäre eine maschinelle Injektion zur Erhaltung der Konstanz der Injektat-Temperatur und der -geschwindigkeit denkbar. Dennoch wurde auch in vielen anderen Studien gängig die manuelle Injektion eingesetzt.

Die Thermodilutionskurve wurde visuell vom Untersucher bzw. Messenden kontrolliert und auf Plausibilität geprüft.

Auch die BGA-Messungen, wie sie in diese Studie eingebunden wurden, sind alltägliche Routine auf Intensivstationen und wurden von dem gleichen Vertreter des intensivmedizinischen Personals durchgeführt wie die PiCCO®-Messungen.

Ebenso müssen bisher unbekannte anatomische Gegebenheiten (intrakardiale oder pulmonale Shunts, Aneurysmen, Herzklappenfehler) der Patienten als Fehlerquelle für gewisse ungenaue Messergebnisse genannt werden (Stemmler, Weigert et al. 2007).

In den daran anschließenden Untersuchungen sollte ein Fokus auf einzelne Parameter in ihrer Abhängigkeit von den jeweiligen Therapieoptionen gerichtet werden, um Therapieentscheidungen in der Intensivmedizin adäquater, gezielter und mit höherer Evidenz treffen zu können.

7.3 Diskussion der Ergebnisse

7.3.1 Beatmungsparameter

7.3.1.1 Kurzfristiger Vergleich

In der untersuchten Gruppe konnten im kurzfristigen Intervall keine signifikanten Änderungen der Beatmungsparameter nachgewiesen werden. Eine vorübergehende Verschlechterung postoperativ könnte man mit einer notwendigen Sedierung für den Eingriff erklären. Es ist anzunehmen, dass sich derlei Auswirkungen im weiteren Verlauf nach dem Ausscheiden der entsprechenden Substanzen und einer weiteren Reduktion der Sedierung rückläufig entwickeln. Eine weitere Wirkung der Substanzen zur Sedierung ist Stunden nach Beenden der Zufuhr nicht mehr zu erwarten. Frühzeitig verstorbene Patienten, welche wenige Stunden nach dem Eingriff verstorben sind, sind in dieser Arbeit nicht erfasst worden. Daher sind auch theoretisch mögliche gravierende Auswirkungen des Eingriffs auf die Beatmung nicht erfasst. Denkbar wäre hier beispielsweise bei schwierigen anatomischen Gegebenheiten (kurzer und dicker Hals, schwierige Intubationsbedingungen) ein verzögertes Einbringen des Tracheostomas. Auch eine Verletzung der Gefäße der gut durchbluteten Schilddrüse mit entsprechendem Blutverlust ist eine Komplikation, welche bei höheren Fallzahlen definitiv zu erwarten wäre (Muhammad, Major et al. 2000; Delaney, Bagshaw et al. 2006; Higgins & Punthakee 2007).

7.3.1.2 Mittelfristiger Vergleich

Im mittelfristigen Vergleich zeigte sich eine signifikante Verbesserung der Compliance, die auch zu einer Reduktion von Pmax führte. Durch eine Reduktion von Pmax reduziert sich auch die Wahrscheinlichkeit von pulmonalen Traumata (Plotz & van Vught 1999).

Die Reduktion des notwendigen Beatmungsdrucks zeigt sich im physiologisch hoch komplexen Balanceakt des kardio-respiratorischen Systems als mehrfach positiv.

Zum einen zeigt ein reduzierter Beatmungsdruck einen reduzierten intrathorakalen Druck und damit auch einen reduzierten Druck auf das rechte Atrium, welches physiologischerweise nur einen niedrigen Druck entgegensetzt (1-9 mm Hg).

Das Herz kann nur das abpumpen, was es gespeist bekommt, ist die Quintessenz des Massenerhaltungsgesetzes (Magder 2006).

Erhöhte Beatmungsdrücke übermitteln den Druck auf die intrathorakal gelegenen Gefäße wie z. B. die V. cava inferior oder den rechten Vorhof. Somit ist bei reduziertem Pmax der venöse Rückstrom und damit die Vorlast erhöht (Feihl & Broccard 2009; Feihl & Broccard 2009; Vieillard-Baron, Matthay et al. 2016).

Den negativen Effekt eines wesentlich reduzierten HZV bei einer Überdruckbeatmung (Hall, Johnson et al. 1974; Manny, Justice et al. 1978; Marquez, Douglas et al. 1979; Beyer, Conzen et al. 1980) lässt sich damit indirekt auch reduzieren.

So regeneriert sich etwa durch den verbesserten venösen Rückstrom und bessere HZV die GFR signifikant (Hall, Johnson et al. 1974; Gammanpila, Bevan et al.

1977; Marquez, Douglas et al. 1979; Beyer, Conzen et al. 1980; Vieillard-Baron, Matthay et al. 2016). Giftstoffe verweilen weniger lange im Körper und werden schneller ausgeschieden.

Darüber hinaus können sich durch den niedrigeren intrathorakalen Druck positive hepatische Auswirkungen ergeben (Johnson & Hedley-Whyte 1972; Beyer, Conzen et al. 1980; Beyer, Schosser et al. 1980). Das weniger nach unten wirkende Diaphragma führt zu einer geringeren Kompression des hepatischen Systems, was zu einer Absenkung des Pfortaderdrucks führt. Auch erhöht sich hier der venöse Rückfluss aus der Leber. Das Ergebnis ist eine bessere Perfusion der Leber (Johnson & Hedley-Whyte 1972; Manny, Justice et al. 1978). Sie wird besser durchblutet und hat dadurch ein vermehrtes Nährstoffangebot. Giftstoffe werden ebenfalls vermehrt angeboten und bei gegebener Leberfunktion verstoffwechselt.

Im zerebellären System ist der Einfluss von Beatmungsdrücken noch nicht abschließend geklärt. Eine positive Korrelation zwischen PEEP und intrakraniell Druck (ICP) konnte festgestellt werden (Zhang, Yang et al. 2011). Jedoch umfasst die Studienpopulation dabei nur 9 Patienten. Weitere Arbeit ist hier zur Untersuchung des teilweise sehr heterogenen Patientenkollektivs mit gemischten pulmonalen und kranialen Krankheitsbildern nötig.

Im Vergleich mit der vorliegenden Studie konnte auch in anderen Studien ein reduzierter Pmax nachgewiesen werden (Lin, Huang et al. 1999; Sofi & Wani 2010).

Der reduzierte inspiratorische Spitzendruck könnte auf den verringerten belüfteten Totraum nach der Tracheotomie sowie gegebenenfalls den vergrößerten Durchmesser der Kanüle zurückgeführt werden. Hier wurden jedoch leider die jeweiligen Tubusmaße in unserer Studie nicht erfasst. Somit kann dies bei uns nicht mit abschließender Sicherheit festgestellt werden. Sofi und Kollegen konnten jedoch trotz gleichbleibendem Innendurchmesser der Kanüle ein reduziertes Pmax im Verlauf nach der Intervention feststellen (Sofi & Wani 2010).

Es sollte darauf hingewiesen werden, dass in der Studie von Lin ausschließlich pulmonal erkrankte Patienten (Bsp. COPD, ARDS) untersucht wurden, während in der Studie von Sofi lediglich Patienten mit einem erheblichen kranialen Verletzungsmuster untersucht wurden. In diesen beiden aktuellen Studien gab es eine insgesamt ähnliche Anzahl an untersuchten Patienten ($n = 30$ vs. $n = 20$ sowie $n = 20$), aber in unserer Studie wurde die Grunderkrankung nicht ausschließlich auf pulmonale oder neurologische Erkrankungen beschränkt. Deshalb muss man davon ausgehen, dass unser Patientenkollektiv im Durchschnitt ein erhöhtes pulmonales Regenerationspotenzial hatte als bei Lin et al.. Vermutlich aus einem ähnlichen Grund konnte auch in der Studie von Lin et al. im Unterschied zur vorliegenden Studie keine signifikante Änderung bei der Lungen-Compliance nachgewiesen werden. Sofi et al. konnten wie wir mit ihrem Patientenkollektiv eine erhöhte Compliance nachweisen (Sofi & Wani 2010).

Zu den gleichen Ergebnissen kommt auch eine Studie von Palmieri et al., in der eine signifikante Reduktion von Pmax und eine Erhöhung der Compliance bei Kindern festgestellt wurden, die schwere Verbrennungen erlitten hatten (Palmieri, Jackson et al. 2002).

Des Weiteren konnte bei mehreren umfassenden internationalen multizentrischen Kohortenstudien (u. a. PROVENT) ein erhöhtes Pmax in direkten Zusammenhang

mit einer signifikant erhöhten Mortalität nachgewiesen werden (Vasilyev, Schaap et al. 1995; Esteban, Anzueto et al. 2002; Laffey, Bellani et al. 2016; Neto, Barbas et al. 2016; Simonis, Barbas et al. 2018).

Ebenso erwähnenswert ist ein signifikanter Anstieg des Minutenvolumens im mittelfristigen Vergleich. Dies würde im Hinblick auf alle Beatmungsparameter einer Erhöhung der Compliance und einer Absenkung von Pmax entsprechen.

Im Vergleich wurde in dieser Studie lediglich das Minutenvolumen signifikant erhöht, was der Erwartung hinsichtlich der Ergebnisse der mittelfristigen Vergleichsparameter entspricht. Denn bei den eventuell bei der Tracheotomie eingesetzten Sedativa und Analgetika kann man davon ausgehen, dass sie 24 Stunden nach Tracheotomie zum überwiegenden Anteil ausgeschieden oder verstoffwechselt wurden. Nichtsdestotrotz benötigt es in der Regel postoperativ Analgetika. Deren Einfluss konnten wir nicht ermitteln.

Eine Unsicherheit dieser Arbeit ist das nicht zu ermittelnde Ausmaß dieser Störfaktoren auf die postoperative Beatmungsparameter. Sufentanyl ist die analgetische Substanz, welche auf dieser Intensivstation am häufigsten zum Einsatz kommt. Es ist auch deutschlandweit das meistverwendete Opioid auf Intensivstationen (Martin, Franck et al. 2007). Der anzunehmende atemdepressive Effekt zeigt sich jedoch bei mechanisch beatmeten Patienten mehrfach als nicht signifikant messbar (Wappler, Scholz et al. 1998; Prause, Wappler et al. 2000; Conti, Arcangeli et al. 2004). Auch die Atemfrequenz, das Tidalvolumen, das Minutenvolumen und der Atemantrieb sowie der Gasaustausch blieben von dem Analgetikum unbeeinflusst (Prause, Wappler et al. 2000; Conti, Arcangeli et al. 2004).

Ebenso wenig wurden in unserer Studie die verwendeten Sedativa vollständig erfasst. Dies sind weitere Confounder, welche eine Bradykardie, Hypotonie und weitere Nebenwirkungen auf das kardiopulmonale System haben können. Jedoch sind bei beobachtetem deutlichen Anstieg des Minutenvolumens lediglich geringere Mengen an Sedativa oder Analgetika postinterventionell vorstellbar, da bei ihrer Wirkung ein adverser Effekt zu erwarten wäre. Auch konnte eine Arbeitsgruppe um Rosa keinen negativen Effekt auf Atemfrequenz, Minutenvolumen, Tidalvolumen, Atemantrieb oder die Blutgasparameter durch das am häufigsten verwendete Sedativum Propofol für kurze Interventionen zeigen (Rosa, Conti et al. 1992). Somit bleibt die Frage offen, ob diese Substanzen in unserer Untersuchung überhaupt einen Effekt auf die ermittelten Werte gehabt haben dürften.

Bei der hypothetischen Annahme einer zu geringen Analgesie würde zwar schmerzbedingt das Minutenvolumen steigen. Das Minutenvolumen ist jedoch unmittelbar mit der Atemfrequenz verbunden. Die AF würde also ebenso ansteigen. Dies konnte bei uns jedoch nicht beobachtet werden.

Eine nicht zu vernachlässigende Komplikation der Tracheotomie ist die postoperative Blutung. Mit einer nicht zu unterschätzenden Inzidenz von 0,3–1,0 % kann etwa 3 Tage bis 6 Wochen postoperativ die fulminanteste aller Blutungen, eine Arrosion des Truncus brachiocephalicus, auftreten (Grant, Dempsey et al. 2006). Diese Komplikation führt ohne eine sofortige chirurgische Revision zu einer 100-prozentigen Mortalität (Grant, Dempsey et al. 2006). Die Wahrscheinlichkeit, dieser Komplikation zu begegnen, ist durch das Platzieren der Kanüle sowohl unter bronchoskopischer Sicht als auch über dem 4. Ringknorpel bereits deutlich

reduziert (Muhammad, Major et al. 2000). Komplikationen dieser Art sind in dieser Arbeit leider nicht abgebildet. Eine Arrosion der Gefäßwand geschieht über einen längeren Zeitraum. Da unsere Studie jedoch nicht weiter als 24 Stunden postoperativ Daten erfasst, sind solche Schicksale nicht eingeschlossen. In jedem Fall ist die Menge der zugeführten Medikamente weit geringer als im kurzfristigen Intervall. Es ist anzunehmen, dass im kurzfristigen Intervall potenziell bereits positive Effekte eintreten, die jedoch durch die medikamentöse Therapie und die damit einhergehende maschinelle Beatmung maskiert werden könnten.

7.3.2 Hämodynamikparameter

7.3.2.1 Kurzfristiger Vergleich

Im kurzfristigen Intervall zeigte sich lediglich der SVRI als signifikant reduziert. Die genaue Berechnung des SVRI wurde nach der Formel in Abbildung 38 durchgeführt.

$$\text{SVRI} = \left[\frac{(\text{MAD} - \text{ZVD})}{\text{HI}} \right] \times 80$$

Abbildung 38. **Berechnung des SVRI.**

Gong et al. konnten in ihrer Arbeit eine ähnliche Tendenz feststellen. Sie hatten allerdings eine größere Anzahl an Patienten ($n = 55$) (Gong, Zhang et al. 2017). Dabei konnten sie bei fallendem SVRI ebenso eine entsprechend signifikante Erhöhung des HI feststellen. Auch Werdan und Kollegen zeigen dieselbe inverse Korrelation (Werdan, Oelke et al. 2011). Diese Erwartung gründet auf der Annahme, dass das Herz bei einem verminderten peripheren Widerstand (SVRI) eine erhöhte Blutmenge pro Zeit (HZV/m^2) pumpen kann.

Die Formel zur Berechnung des SVRI enthält drei verschiedene Parameter. Den MAD, den ZVD und den HI (auch HZV/m^2). Der MAD wurde in unserer Studie nicht erfasst. Im kurzfristigen Verlauf nach der Intervention ist zwar eine reduzierte Sedierung und Analgesie angestrebt, jedoch ist dies unmittelbar nach dem Eingriff noch nicht möglich. Maßgebliche Veränderungen würden wir hier erst in einem gewissen längerfristigen Verlauf erwarten.

Der ZVD zeigte in unserer Arbeit keine signifikante Veränderung im kurzfristigen Intervall und wirkte konstant. Auswirkungen auf den ZVD würden wir auch erst im längerfristigen Verlauf bei Reduktion von PEEP und Atemarbeit erwarten. Auch der HI zeigte im kurzfristigen Intervall keine signifikante Änderung. Dies wäre jedoch im Anbetracht der anderen Studien zu erwarten gewesen. Es kann gemutmaßt werden, ob der Beobachtungszeitraum zu kurz war, um eine entsprechende Anhebung des HI zu beobachten. Man siehe hierzu Abschnitt 7.3.2.2. Mit entsprechendem Abstand betrachtet ändert sich die HF wie erwartet, um bei nachlassendem vorgeschaltetem Widerstand mehr Blut zu fördern.

Bei genauer Betrachtung der Studie von Gong, Zhang et al. 2017 zeigt sich ein Durchschnittsalter der untersuchten Patienten von $38,07 \pm 10,9$ Jahren. In unserer Studie zeigte sich das Kollektiv mit einem durchschnittlichen Alter von $71,6 \pm 9,9$ Jahren beinahe doppelt so alt. Entsprechende kardiale Nebendiagnosen wie Arrhythmien, welche bei der PiCCO-Messung Werte maßgeblich verändern können, sind von Gong nicht angegeben, sind in unserer Kohorte jedoch mit hoher Wahrscheinlichkeit öfter vertreten. In 13 % der Fälle liegt bei den eingeschlossenen Patienten eine kardiologische Hauptdiagnose vor.

Eine weitere theoretische Überlegung betrifft die bei Prozeduren entstandenen Schmerzen (z. B. bei der Tracheotomie) und ist der Frage gewidmet, ob eine unzureichende Analgesie ursächlich ist. Hierdurch würden intrinsische Mediatoren

wie Prostaglandine freigesetzt. Prostaglandin E2 ist ein Mediator, welcher unter anderem Schmerz triggert (Chapple, Disting et al. 1980; Schaible & Richter 2004). Ein weiterer Effekt ist jedoch auch eine Vasodilatation. Diesen Wirkmechanismus des in der Pharmakologie Alprostadil genannten Wirkstoffes macht man sich unter anderem in der Urologie, Neonatologie oder Angiologie mit dem gleichen Effekt zunutze. Hier ist eine gezielte Vasodilatation erwünscht. In geringen Mengen bei der Tracheotomie oder anderen Interventionen freigesetztes Prostaglandin kann den SVRI also ebenso beeinflussen (Chapple, Disting et al. 1980; Yamashita, Nishiyama et al. 2008). Jedoch ist dieser Effekt im Anbetracht der sonstigen vegetativen Schmerzreaktionen von vermutlich untergeordneter Rolle. Eine zu geringe Analgesie ist auf Intensivstationen keine Seltenheit. Die vollständige Analgesie scheint im Zwiespalt der Überdosierung mit entsprechenden Nebenwirkungen und der Unterdosierung mit entsprechendem Schmerzempfinden weiterhin ein Balanceakt zu sein (Puntillo 1990; Valdivia & Puntillo 1995; Schaible & Richter 2004; Puntillo, Max et al. 2018).

Die Schmerzquelle muss nicht immer die Tracheotomie selbst sein. Ein sehr hohes Schmerzniveau bieten Prozeduren, die teilweise täglich vollzogen werden. Beispielsweise der Zug von Wunddrainagen oder tracheale sowie endotracheale Absaugung (Puntillo, Max et al. 2018).

7.3.2.2 Mittelfristiger Vergleich

Beim mittelfristigen Vergleich konnte mit dem Wilcoxon-Test eine knapp signifikante Erhöhung der Herzfrequenz mit $p = 0,049$ nachgewiesen werden. Allerdings erreichte der SVRI knapp nicht mehr das Signifikanzniveau mit $p = 0,083$.

Mit Hilfe der Pulskonturanalyse kann die Fläche unter der Kurve berechnet werden, siehe hierzu auch Abb. 7 und Abschnitt 3.5.3. Hieraus ergibt sich das Schlagvolumen. Das Produkt des Schlagvolumens mit der Herzfrequenz ergibt das Herzzeitvolumen. Im PiCCO-Monitoring ist das SVI (Schlagvolumen/m²) abhängig von Vorlast (GEDV), Nachlast (SVRI) sowie Kontraktilität (CPI). Für keinen dieser Parameter konnte eine signifikante Änderung mittelfristig beobachtet werden. Eine Exklusion derjenigen Patienten, welche kardial vorerkrankt waren, wurde entgegen einiger anderer Studien nicht vorgenommen. Hier kann eine Gruppe von Patienten, die an kardiovaskulären Vorerkrankungen leiden, eine signifikante Änderung der SVI mit GEDV/CPI und ihren Determinanten der restlichen Kohorte maskieren.

In unserer Kohorte beträgt der Anteil der Patienten mit einer kardialen Pathologie als Hauptdiagnose 13 %. Nebendiagnosen der anderen Patienten sind hier noch nicht berücksichtigt.

Die beobachteten Änderungen der Beatmungsparameter würden ebenfalls eine Verbesserung der Vorlast erwarten lassen. Wenn man bedenkt, dass eine reduzierte Pmax den intrathorakalen Druck und somit den Druck auf die zuführenden Venen reduziert und damit die Vorlast erhöht. Eine konstante Vorlast kann für eine differenzierte Volumentherapie der Einrichtung, angepasst an die entsprechende kardiale Leistung, sprechen. Eine konstante Vorlast ist hier teilweise explizit gewünscht, beispielsweise bei Herzinsuffizienz oder pulmonalen Ödemen. Ein Überangebot an Volumen scheint nicht vorzuliegen. Dies würde zwar die HF

steigern, jedoch auch den ZVD, GEDI und im Verlauf auch das ELWI. Herzinsuffiziente Patienten sind hier besonders vulnerabel.

Dies zeigt sich ebenso in einer konstanten ELWI, welche sich allerdings erwartungsgemäß erst mit einer deutlichen Verzögerung ändern würde. Hier zeigt sich unsere kurze Beobachtungszeit nach der Intervention als weitere Grenze unserer Studie.

Katecholamine spielen in unserer Arbeit auch hierbei eine bisher nicht eruierbare Rolle. Im vorangegangenen kurzfristigen Intervall (s. Abschnitt 7.3.2.1) zeigte sich jedoch eine deutlich reduzierte Nachlast. Somit kann im zeitlich kurz aufeinander folgenden Zeitfenster die Herzfrequenz als Reaktion des Herzens im Sinne der Autoregulation und Aufrechterhaltung eines konstanten Blutdrucks ansteigen. Es ist zu bedenken, dass Katecholamine, wie beispielsweise Dobutamin, auch präoperativ eine falsch hohe kardiale Funktion (hohe CI bei reduzierter SVRI) vortäuschen können. Im weiteren Verlauf würde sich diese bei einer tatsächlichen Verbesserung des CI, jedoch ohne/weniger Katecholamin, maskieren und keine signifikante Änderung zeigen. Bei dem weit häufiger verwendeten Noradrenalin erhöht sich nach der Gabe der SVRI. Der CI kann unverändert bleiben oder bei vorerkranktem Herzen sogar abfallen. Gleichzeitig würde der MAD steigen. Ein fallender SVRI kann also im Umkehrschluss bei nicht bekannter Katecholamingabe auch für eine Reduktion dieser nach der Intervention sprechen.

Ein konstantes CPI könnte bei reduzierter Katecholamingabe für eine zunehmende kardiale Rekompensation sprechen, in der das Herz weniger auf medikamentöse Unterstützung angewiesen ist. Bei einem mittleren APACHE-Score von 25,5 wie in dieser Studie muss jedoch auch eine septische Kardiomyopathie im Hinterkopf behalten werden. Falls sich klinisch die septische Situation noch nicht in Abheilung befindet, kann der CPI weiterhin auf reduziertem Niveau verbleiben und erst im Verlauf ansteigen.

Die Studienlage bezüglich einer Reduktion von Katecholaminen sowie Analgetika unter PiCCO-Monitoring nach einer Tracheotomie ist aktuell noch sehr dünn, jedoch scheint es Hinweise auf genau diesen Zusammenhang zu geben (Hosokawa, Nishimura et al. 2015; Carmichael, Wright et al. 2021; Schmidt, Fisser et al. 2021). Eine weitere theoretische Überlegung als Ursache wären die wohlbekannten Auswirkungen des PEEP auf intrathorakale Volumina. Die Effekte der Überdruckbeatmung wurden vor beinahe drei Jahrzehnten von Cournand und Kollegen aufgezeigt. Diese beschreiben ebenso die Verringerung des HZV durch erhöhten PEEP (Cournand & Motley 1948). Mit daraus resultierenden positiv chronotropen Effekten durch den Sympathikus mit folgender Steigerung der Herzfrequenz konnten dadurch jedoch bisher nicht nachgewiesen werden (Viquerat, Righetti et al. 1983).

7.4 Ausblick

In dieser Arbeit konnte für die untersuchten Parameter eine signifikante und global bisher kaum untersuchte Veränderung sowohl bei den Beatmungs- als auch bei den hämodynamischen Parametern nach einer Tracheotomie nachgewiesen werden. Einschränkend muss man aber auch hier auf die relativ geringe Studienpopulation hinweisen. Diese Einschränkung könnte beispielsweise über ein multizentrisch angelegtes Studiendesign und einen längeren Untersuchungszeitraum verbessert werden. Da einige Ergebnisse knapp unterhalb der Signifikanzgrenze lagen, ist bei einer Erhöhung der Fallzahl von deutlich ausgeprägteren Ergebnissen sowohl in die eine wie auch in die entgegengesetzte Richtung auszugehen.

Innerhalb der Studienpopulation zeigte sich jedoch auch bei den nachgewiesenen signifikanten Ergebnissen ein Effekt in der Grundgesamtheit hin zu einer schonenderen Beatmung mit geringen Spitzendrücken und verbesserten pulmonalen Eigenschaften. Es konnten zahlreiche indirekte Verbesserungen nach einer Tracheotomie beobachtet werden. Beispielsweise erhöhen sich durch ein verringertes Pmax das HZV sowie die GFR. Hierdurch ist eine vermehrte renale Ausscheidung von entsprechenden Substanzen gegeben. Dies könnte durch entsprechende Erfassung in kommenden Studien quantifiziert werden.

Es zeigt sich beispielsweise auch die Mortalität auf der behandelnden Intensivstation indirekt durch ein reduziertes Pmax reduziert.

Auch bei der Betrachtung der hämodynamischen Änderungen zeigt sich anfangs eine reduzierte Nachlast bei kurz darauf angestiegener HF. Hier würden Katecholamine eine deutlich bedeutendere Rolle als Confounder spielen.

Somit kann abschließend gesagt werden, dass die Tracheotomie keine signifikant schlechte Auswirkung auf die Hämodynamik und eine geringe Verbesserung der Beatmungsparameter mit sich bringt.

Für nachfolgende Untersuchungen sollte eine Erweiterung der Studienpopulation erfolgen, um die Datenbasis zu verbreitern, die bislang erzielten Ergebnisse weiter zu objektivieren und zugleich eine systematische Evaluation von Sedativa, Analgetika und Katecholaminen sowie der maschinellen Beatmungsparameter zu ermöglichen.

7.5 Einschränkungen der Studie

Zuallererst ist anzuführen, dass unser Patientenkollektiv aus einer übersichtlichen Anzahl Patienten ($n = 30$ Patienten) bestand.

Dieses Patientenkollektiv war darüber hinaus insgesamt inhomogen, sowohl bezüglich des Alters der Patienten als auch bezüglich deren Grunderkrankung. Nach Giustiniano und Kollegen korreliert ein weites Altersspektrum mit zunehmenden interindividuellen Messabweichungen (Giustiniano, Morengi et al. 2012). In unserem Kollektiv befanden sich Patienten zwischen 47 und 87 Jahren.

Ebenso sind ältere Patienten meist mit weiteren internistischen Nebenerkrankungen belastet. Allen voran zeigt sich ein deutlich signifikanter Anteil der internistischen Patienten mit Vorhofflimmern (Goodman, Shirov et al. 2007; Annane, Sebille et al.

2008). Vorhofflimmern kann die Verlässlichkeit der transpulmonalen Thermodilution deutlich beeinträchtigen (Litton & Morgan 2012). Ebenso wurden an unseren Patienten verschiedene weitere diagnostische oder therapeutisch individuell notwendige Maßnahmen während unseres Beobachtungszeitraumes unterzogen. Somit konnten wir die Messbedingungen nicht für jedes Individuum identisch halten. Die Messungen wurden unter klinisch echten und realistischen Bedingungen durchgeführt.

Eine weitere Limitation dieser und vieler ähnlicher Studien ist die exakte Bestimmung des Körpergewichts.

Da diese Studie auf einer Intensivstation mit intensivmedizinisch betreuten Patienten durchgeführt wurde, ergeben sich daraus teilweise banal erscheinende Probleme, welche jedoch im Verlauf extrapoliert werden könnten. Die Verwendung einer regulären Waage war nicht möglich. Eine Stuhlwaage war ebenso nur sehr selten möglich. Das Körpergewicht musste also noch durch Befragung der Patienten, sofern noch möglich, oder durch Befragung von Angehörigen erfolgen. War beides nicht möglich, wurde bei der überweisenden Station bzw. Einrichtung nachgefragt und gegebenenfalls der letzte aktuelle Wert übernommen. Dasselbe gilt für die Größenangabe. Dies entspricht dem praktischen und realistischen Vorgehen im Klinikalltag.

Ebenso problematisch erwies sich die Tatsache, dass Patienten im Verlauf des intensivmedizinischen Aufenthaltes das Gewicht verändern konnten. Gründe dafür wären zum Beispiel vermehrter oder reduzierter Aszites oder Ödeme. Auch spontane Veränderungen, zum Beispiel nach Entlastung einer größeren Menge Aszites, sind dabei zu beachten. Bei nicht regelmäßig aktualisierten Grundwerten können so falsche Messwerte entstehen und bei errechneten Variablen zu deutlich verfälschten Ergebnissen führen.

8. Abbildungsverzeichnis

Abbildung 1. Laryngotomie nach Casserius.	12
Abbildung 2. Schematischer PiCCO Aufbau.	28
Abbildung 3. Thermodilutionskurve.	30
Abbildung 4. Berechnung ITTV.	31
Abbildung 5. Berechnung PTV.	31
Abbildung 6. Berechnung GEDV.	32
Abbildung 7. Pulskonturkurve.	34
Abbildung 8. Messreihe chronologisch.	35
Abbildung 9. Verteilung der Grunderkrankungen.	40
Abbildung 10. Kurzfristige Compliance.	42
Abbildung 11. Kurzfristiger PEEP.	42
Abbildung 12. Kurzfristiger Pmax.	43
Abbildung 13. Kurzfristiger Pmittel.	43
Abbildung 14. Kurzfristig Horowitz.	44
Abbildung 15. Kurzfristiger Oxygenationsindex.	44
Abbildung 16. Kurzfristiges Minutenvolumen.	45
Abbildung 17. Mittelfristige Compliance.	46
Abbildung 18. Mittelfristiger Pmax.	47
Abbildung 19. Mittelfristiger Pmittel.	47
Abbildung 20. Mittelfristig pO_2/FiO_2	48
Abbildung 21. Mittelfristiger Oxygenationsindex.	48
Abbildung 22. Mittelfristiges Minutenvolumen.	49
Abbildung 23. Kurzfristige Herzfrequenz.	51
Abbildung 24. Kurzfristig ZVD.	52
Abbildung 25. Kurzfristig SVRI.	52
Abbildung 26. Kurzfristig GEDI.	53
Abbildung 27. Kurzfristig ELWI.	53
Abbildung 28. Kurzfristig HI.	54
Abbildung 29. Kurzfristig CPI.	55
Abbildung 30. Mittelfristige Herzfrequenz.	56
Abbildung 31. Mittelfristig ZVD.	57
Abbildung 32. Mittelfristig SVRI.	57
Abbildung 33. Mittelfristig GEDI.	58
Abbildung 34. Mittelfristig ELWI.	58
Abbildung 35. Mittelfristig HI.	59
Abbildung 36. Mittelfristig CPI.	60
Abbildung 37. Berechnung EVLW.	63
Abbildung 38. Berechnung des SVRI.	72
Abbildung 39 Appendix PiCCO M-1+Basis.	90
Abbildung 40 Appendix Beatmung M-1.	91
Abbildung 41 Appendix PiCCO M+1.	92
Abbildung 42 Appendix Beatmung M+1.	93
Abbildung 43 Appendix PiCCO M+2.	94
Abbildung 44 Appendix Beatmung M+2.	95
Abbildung 2 bis 7 sowie 52 und 53 (MKT-000061-01 PiCCO-Technology-Brochure-EN · PiCCO is a registered Trademark · Copyright by Pulsion Medical Systems SE)	

9. Tabellenverzeichnis

Tabelle 1. Vor- und Nachteile der Tracheotomie	16
Tabelle 2. Techniken der Tracheotomie, modifiziert nach (Bartels 2005)	20
Tabelle 3. Vor- und Nachteile des PiCCO-Systems.....	29
Tabelle 4. Deskriptive Statistik	39
Tabelle 5. Zusammenfassung zu den Beatmungsparametern	50
Tabelle 6. Zusammenfassung zu den Hämodynamik Parametern	61

10. Literatur

Adler, C., H. Reuter, C. Seck, M. Hellmich and C. Zobel (2013). "Fluid therapy and acute kidney injury in cardiogenic shock after cardiac arrest." Resuscitation **84**(2): 194-199.

Alhajhusain, A., A. W. Ali, A. Najmuddin, K. Hussain, M. Aqeel and A. A. El-Solh (2014). "Timing of tracheotomy in mechanically ventilated critically ill morbidly obese patients." Crit Care Res Pract **2014**: 840638.

Andriolo, B. N., R. B. Andriolo, H. Saconato, A. N. Atallah and O. Valente (2015). "Early versus late tracheostomy for critically ill patients." Cochrane Database Syst Rev **1**: CD007271.

Annane, D., V. Seville, D. Duboc, J. Y. Le Heuzey, N. Sadoul, E. Bouvier and E. Bellissant (2008). "Incidence and prognosis of sustained arrhythmias in critically ill patients." Am J Respir Crit Care Med **178**(1): 20-25.

Anon, J. M. (2015). "Does early versus late tracheotomy afford benefits in ventilated patients?" Med Intensiva **39**(9): 573-574.

Arabi, Y., S. Haddad, N. Shirawi and A. Al Shimemeri (2004). "Early tracheostomy in intensive care trauma patients improves resource utilization: a cohort study and literature review." Crit Care **8**(5): R347-352.

Astrachan, D. I., J. C. Kirchner and W. J. Goodwin, Jr. (1988). "Prolonged intubation vs. tracheotomy: complications, practical and psychological considerations." Laryngoscope **98**(11): 1165-1169.

Bartels, H. (2005). "Tracheotomy and tracheostomy techniques." Der Chirurg **76**(5): 507-516.

Berbara, H., S. Mair, A. Beitz, B. Henschel, R. M. Schmid and W. Huber (2014). "Pulmonary vascular permeability index and global end-diastolic volume: are the data consistent in patients with femoral venous access for transpulmonary thermodilution: a prospective observational study." BMC Anesthesiol **14**: 81.

Berkenstadt, H., N. Margalit, M. Hadani, Z. Friedman, E. Segal, Y. Villa and A. Perel (2001). "Stroke volume variation as a predictor of fluid responsiveness in patients undergoing brain surgery." Anesth Analg **92**(4): 984-989.

Beyer, J., P. Conzen, R. Schosser and K. Messmer (1980). "The effect of PEEP ventilation on hemodynamics and regional blood flow with special regard to coronary blood flow." Thorac Cardiovasc Surg **28**(2): 128-132.

Beyer, J., R. Schosser, P. Conzen, W. Funk, P. Beckenlechner and K. Messmer (1980). "[Regional blood flow in splanchnic organs during positive end-expiratory pressure ventilation (author's transl)]." Chir Forum Exp Klin Forsch: 239-242.

Bindels, A. J., J. G. van der Hoeven, A. D. Graafland, J. de Koning and A. E. Meinders (2000). "Relationships between volume and pressure measurements and stroke volume in critically ill patients." Critical Care **4**(3): 193.

Borman, J. and J. T. Davidson (1963). "A HISTORY OF TRACHEOSTOMY:SI SPIRITUM DUCIT VIVIT (CICERO)." BJA: British Journal of Anaesthesia **35**(6): 388-390.

Brook, A. D., G. Sherman, J. Malen and M. H. Kollef (2000). "Early versus late tracheostomy in patients who require prolonged mechanical ventilation." Am J Crit Care **9**(5): 352-359.

Carmichael, H., F. L. Wright, R. C. McIntyre, T. Vogler, S. Urban, S. E. Jolley, E. L. Burnham, W. Firth, C. G. Velopulos and J. P. Idrovo (2021). "Early ventilator liberation and decreased sedation needs after tracheostomy in patients with COVID-19 infection." Trauma Surg Acute Care Open **6**(1): e000591.

Casseri, J. B. (1601). Iulii Casserii Placentini Philosophi Atq[ue] Medici Patavii Utranque Medicinam Exercentis De Vocis Auditusq[ue] Organis Historia Anatomica. Augsburg, Staats- und Stadtbibliothek: Signatur: 2 Med 32, Seite.

Chapple, D. J., G. J. Dusing, R. Hughes and J. R. Vane (1980). "Some direct and reflex cardiovascular actions of prostacyclin (PGI₂) and prostaglandin E₂ in anaesthetized dogs." British journal of pharmacology **68**(3): 437-447.

Chiavone, P. A. and Y. A. Sens (2003). "Evaluation of APACHE II system among intensive care patients at a teaching hospital." Sao Paulo Med J **121**(2): 53-57.

Chittock, D. R., V. K. Dhingra, J. J. Ronco, J. A. Russell, D. M. Forrest, M. Tweeddale and J. C. Fenwick (2004). "Severity of illness and risk of death associated with pulmonary artery catheter use*." Critical Care Medicine **32**(4): 911-915.

Conti, G., A. Arcangeli, M. Antonelli, F. Cavaliere, R. Costa, F. Simeoni and R. Proietti (2004). "Sedation with sufentanil in patients receiving pressure support ventilation has no effects on respiration: a pilot study." Can J Anaesth **51**(5): 494-499.

Cournand, A. and H. L. Motley (1948). "Physiological studies of the effects of intermittent positive pressure breathing on cardiac output in man." Am J Physiol **152**(1): 162-174.

Delaney, A., S. M. Bagshaw and M. Nalos (2006). "Percutaneous dilatational tracheostomy versus surgical tracheostomy in critically ill patients: a systematic review and meta-analysis." Crit Care.

Delaney, A., S. M. Bagshaw and M. Nalos (2006). "Percutaneous dilatational tracheostomy versus surgical tracheostomy in critically ill patients: a systematic review and meta-analysis." Crit Care **10**(2): R55.

Della Rocca, G., M. G. Costa, L. Pompei, C. Coccia and P. Pietropaoli (2002). "Continuous and intermittent cardiac output measurement: pulmonary artery catheter versus aortic transpulmonary technique." British Journal of Anaesthesia **88**(3): 350-356.

Diaz-Prieto, A., A. Mateu, M. Gorriz, B. Ortiga, C. Truchero, N. Sampietro, M. J. Ferrer and R. Manez (2014). "A randomized clinical trial for the timing of tracheotomy in critically ill patients: factors precluding inclusion in a single center study." Crit Care **18**(5): 585.

Domino, M. D. M. P. H. Karen B., M. D. P. D. T. A. Bowdle, P. D. Karen L. Posner, M. D. Pete H. Spitellie, M. D. Lorri A. Lee and M. D. Frederick W. Cheney (2004). "Injuries and Liability Related to Central Vascular CathetersA Closed Claims Analysis." Anesthesiology **100**(6): 1411-1418.

Esteban, A., A. Anzueto, F. Frutos, I. Alia, L. Brochard, T. E. Stewart, S. Benito, S. K. Epstein, C. Apezteguia, P. Nightingale, A. C. Arroliga, M. J. Tobin and G. Mechanical Ventilation International Study (2002). "Characteristics and outcomes in adult patients receiving mechanical ventilation: a 28-day international study." JAMA **287**(3): 345-355.

Feihl, F. and A. F. Broccard (2009). "Interactions between respiration and systemic hemodynamics. Part I: basic concepts." Intensive Care Med **35**(1): 45-54.

Feihl, F. and A. F. Broccard (2009). "Interactions between respiration and systemic hemodynamics. Part II: practical implications in critical care." Intensive Care Med **35**(2): 198-205.

Franzen, M., A. Umgelter, S. von Delius, A. Weber, J. Reichenberger, M. Dohmen, R. Schmid and W. Huber (2007). "Reliability of the continuous cardiac index measurement using the pulse contour analysis of the PiCCO system." Critical Care **11**(2): P292.

Gammanpila, S., D. R. Bevan and R. Bhudu (1977). "Effect of positive and negative expiratory pressure on renal function." Br J Anaesth **49**(3): 199-205.

Gandia-Martinez, F., I. Martinez-Gil, D. Andaluz-Ojeda, F. Bobillo de Lamo, L. Parra-Moraes and F. Diez-Gutierrez (2010). "[Analysis of early tracheostomy and its impact on development of pneumonia, use of resources and mortality in neurocritically ill patients]." Neurocirugia (Astur) **21**(3): 211-221.

Giustiniano, E., E. Morengi, N. Ruggieri, F. Pellegrino, J. Balazova, C. Dominoni and G. L. Marinelli (2012). "Cardiac output by FloTrac/VigileoTM validation trials: are there reliable conclusions?" Rev Recent Clin Trials **7**(3): 181-186.

Goedje, O., T. Seebauer, M. Peyerl, U. J. Pfeiffer and B. Reichart (2000). "Hemodynamic monitoring by double-indicator dilution technique in patients after orthotopic heart transplantation." Chest **118**(3): 775-781.

Goepfert, M. S., D. A. Reuter, D. Akyol, P. Lamm, E. Kilger and A. E. Goetz (2007). "Goal-directed fluid management reduces vasopressor and catecholamine use in cardiac surgery patients." Intensive Care Med **33**(1): 96-103.

Goepfert, M. S., H. P. Richter, C. Zu Eulenburg, J. Gruetzmacher, E. Rafflenbeul, K. Roehrer, A. von Sandersleben, S. Diedrichs, H. Reichenspurner, A. E. Goetz and D. A. Reuter (2013). "Individually optimized hemodynamic therapy reduces complications and

length of stay in the intensive care unit: a prospective, randomized controlled trial." Anesthesiology **119**(4): 824-836.

Gong, C., F. Zhang, L. Li, F. He, G. C. Liu, S. H. Zhu, G. Y. Wang and Z. F. Xia (2017). "The Variation of Hemodynamic Parameters Through PiCCO in the Early Stage After Severe Burns." J Burn Care Res **38**(6): e966-e972.

Goodman, S., T. Shirov and C. Weissman (2007). "Supraventricular arrhythmias in intensive care unit patients: short and long-term consequences." Anesth Analg **104**(4): 880-886.

Graham, J. S., R. H. Mulloy, F. R. Sutherland and S. Rose (1996). "Percutaneous versus Open Tracheostomy: A Retrospective Cohort Outcome Study." Journal of Trauma and Acute Care Surgery **41**(2): 245-250.

Grant, C. A., G. Dempsey, J. Harrison and T. Jones (2006). "Tracheo-innominate artery fistula after percutaneous tracheostomy: three case reports and a clinical review." Br J Anaesth **96**(1): 127-131.

Hall, S. V., E. E. Johnson and J. Hedley-Whyte (1974). "Renal hemodynamics and function with continuous positive-pressure ventilation in dogs." Anesthesiology **41**(5): 452-461.

Harvey, S., D. A. Harrison, M. Singer, J. Ashcroft, C. M. Jones, D. Elbourne, W. Brampton, D. Williams, D. Young and K. Rowan (2005). "Assessment of the clinical effectiveness of pulmonary artery catheters in management of patients in intensive care (PAC-Man): a randomised controlled trial." The Lancet **366**(9484): 472-477.

Higgins, K. M. and X. Punthakee (2007). "Meta-analysis comparison of open versus percutaneous tracheostomy." Laryngoscope **117**(3): 447-454.

Hilmar, B., L. Reinhard, M. Gernot, M. Elke and S. Jürgen (2008). Die Intensivmedizin. Berlin, Heidelberg, Springer Berlin Heidelberg: Berlin, Heidelberg.

Holmes, G. (1887). Die Geschichte der Laryngologie: von den frühesten Zeiten bis zur Gegenwart, Hirschwald.

Hosokawa, K., M. Nishimura, M. Egi and J. L. Vincent (2015). "Timing of tracheotomy in ICU patients: a systematic review of randomized controlled trials." Crit Care **19**: 424.

Hu, W., C. W. Lin, B. W. Liu, W. H. Hu and Y. Zhu (2014). "Extravascular lung water and pulmonary arterial wedge pressure for fluid management in patients with acute respiratory distress syndrome." Multidiscip Respir Med **9**(1): 3.

Huber, W., S. Ringmaier, A. Umgelter, K. Holzapfel, W. Reindl, M. Franzen, J. Gaa and R. Schmid (2007). "The role of clinical examination, chest X-ray and central venous pressure in volume assessment in critically ill patients: a comparison with PiCCO-derived data." Critical Care **11**(2): 115-116.

Huber, W., A. Umgelter, W. Reindl, M. Franzen, C. Schmidt, S. von Delius, F. Geisler, F. Eckel, R. Fritsch, J. Siveke, B. Henschel and R. M. Schmid (2008). "Volume assessment in

patients with necrotizing pancreatitis: a comparison of intrathoracic blood volume index, central venous pressure, and hematocrit, and their correlation to cardiac index and extravascular lung water index." Crit Care Med **36**(8): 2348-2354.

Hutchinson, K. M. and S. P. Shaw (2016). "A Review of Central Venous Pressure and Its Reliability as a Hemodynamic Monitoring Tool in Veterinary Medicine." Top Companion Anim Med **31**(3): 109-121.

Johnson, E. E. and J. Hedley-Whyte (1972). "Continuous positive-pressure ventilation and portal flow in dogs with pulmonary edema." J Appl Physiol **33**(3): 385-389.

Johnson-Obaseki, S., A. Veljkovic and H. Javidnia (2016). "Complication rates of open surgical versus percutaneous tracheostomy in critically ill patients." Laryngoscope **126**(11): 2459-2467.

Katzenelson, R., A. Perel, H. Berkenstadt, S. Preisman, S. Kogan, L. Sternik and E. Segal (2004). "Accuracy of transpulmonary thermodilution versus gravimetric measurement of extravascular lung water." Crit Care Med **32**(7): 1550-1554.

Khan, S., R. J. Trof and A. J. Groeneveld (2007). "Transpulmonary dilution-derived extravascular lung water as a measure of lung edema." Current Opinion in Critical Care **13**(3): 303-307.

Kluge, S., H. J. Baumann, C. Maier, H. Klose, A. Meyer, A. Nierhaus and G. Kreymann (2008). "Tracheostomy in the Intensive Care Unit: A Nationwide Survey." Anesthesia & Analgesia **107**(5): 1639-1643.

Knaus, W. A., E. A. Draper, D. P. Wagner and J. E. Zimmerman (1985). "APACHE II: A severity of disease classification system." Critical Care Medicine **13**(10).

Knaus, W. A., J. E. Zimmerman, D. P. Wagner, E. A. Draper and D. E. Lawrence (1981). "APACHE-acute physiology and chronic health evaluation: a physiologically based classification system." Critical care medicine **9**(8): 591-597.

Kumar, A., R. Anel, E. Bunnell, K. Habet, S. Zanotti, S. Marshall, A. Neumann, A. Ali, M. Cheang, C. Kavinsky and J. E. Parrillo (2004). "Pulmonary artery occlusion pressure and central venous pressure fail to predict ventricular filling volume, cardiac performance, or the response to volume infusion in normal subjects." Crit Care Med **32**(3): 691-699.

Kuzkov, V. V., E. V. Suborov, M. Y. Kirov, V. N. Kuklin, M. Sobhkhez, S. Johnsen, K. Waerhaug and L. J. Bjertnaes (2007). "Extravascular lung water after pneumonectomy and one-lung ventilation in sheep." Crit Care Med **35**(6): 1550-1559.

Laffey, J. G., G. Bellani, T. Pham, E. Fan, F. Madotto, E. K. Bajwa, L. Brochard, K. Clarkson, A. Esteban, L. Gattinoni, F. van Haren, L. M. Heunks, K. Kurahashi, J. H. Laake, A. Larsson, D. F. McAuley, L. McNamee, N. Nin, H. Qiu, M. Ranieri, G. D. Rubenfeld, B. T. Thompson, H. Wrigge, A. S. Slutsky, A. Pesenti, L. S. Investigators and E. T. G. the (2016). "Potentially modifiable factors contributing to outcome from acute respiratory distress syndrome: the LUNG SAFE study." Intensive Care Med **42**(12): 1865-1876.

Lehmacher-Dubberke, C. (2018). Außerklinische Beatmung mit hohem pflegerischen und medizinischen Unterstützungsbedarf. Pflege 2021 Grundlagen für den fachpolitischen Diskurs. KomPart Berlin, Szepan, Nadine-Michèle; Wagner, Franz: 157 - 160.

Lin, M. C., C. C. Huang, C. T. Yang, Y. H. Tsai and T. C. Y. Tsao (1999). "Pulmonary Mechanics in Patients with Prolonged Mechanical Ventilation Requiring Tracheostomy." Anaesthesia and Intensive Care **27**(6): 581-585.

Litton, E. and M. Morgan (2012). "The PiCCO monitor: a review." Anaesth Intensive Care **40**(3): 393-409.

Liu, C. C., D. Livingstone, E. Dixon and J. C. Dort (2015). "Early versus late tracheostomy: a systematic review and meta-analysis." Otolaryngol Head Neck Surg **152**(2): 219-227.

Magder, S. (2006). "The classical Guyton view that mean systemic pressure, right atrial pressure, and venous resistance govern venous return is/is not correct." J Appl Physiol (1985) **101**(5): 1533.

Manny, J., R. E. Justice and H. B. Hechtman (1978). "Maldistribution of blood flow during positive end expiratory pressure." Surg Forum **29**: 203-205.

Marik, P. E. and R. Cavallazzi (2013). "Does the Central Venous Pressure Predict Fluid Responsiveness? An Updated Meta-Analysis and a Plea for Some Common Sense*." Critical Care Medicine **41**(7): 1774-1781.

Marquez, J. M., M. E. Douglas, J. B. Downs, W. H. Wu, E. L. Mantini, E. J. Kuck and H. W. Calderwood (1979). "Renal function and cardiovascular responses during positive airway pressure." Anesthesiology **50**(5): 393-398.

Martin, J., M. Franck, S. Sigel, M. Weiss and C. Spies (2007). "Changes in sedation management in German intensive care units between 2002 and 2006: a national follow-up survey." Crit Care **11**(6): R124.

Michard, F. (2007). "Bedside assessment of extravascular lung water by dilution methods: temptations and pitfalls." Crit Care Med **35**(4): 1186-1192.

Michard, F., S. Alaya, V. Zarka, M. Bahloul, C. Richard and J.-L. Teboul (2003). "Global End-Diastolic Volume as an Indicator of Cardiac Preload in Patients With Septic Shock." CHEST **124**(5): 1900-1908.

Mouncey, P. R., T. M. Osborn, G. S. Power, D. A. Harrison, M. Z. Sadique, R. D. Grieve, R. Jahan, S. E. Harvey, D. Bell, J. F. Bion, T. J. Coats, M. Singer, J. D. Young and K. M. Rowan (2015). "Trial of Early, Goal-Directed Resuscitation for Septic Shock." New England Journal of Medicine **372**(14): 1301-1311.

Muhammad, J. K., E. Major, A. Wood and D. W. Patton (2000). "Percutaneous dilatational tracheostomy: haemorrhagic complications and the vascular anatomy of the anterior neck. A review based on 497 cases." International Journal of Oral and Maxillofacial Surgery **29**(3): 217-222.

Mutoh, T., K. Kazumata, T. Ishikawa and S. Terasaka (2009). "Performance of bedside transpulmonary thermodilution monitoring for goal-directed hemodynamic management after subarachnoid hemorrhage." Stroke **40**(7): 2368-2374.

Neto, A. S., C. S. V. Barbas, F. D. Simonis, A. Artigas-Raventos, J. Canet, R. M. Determann, J. Anstey, G. Hedenstierna, S. N. T. Hemmes, G. Hermans, M. Hiesmayr, M. W. Hollmann, S. Jaber, I. Martin-Loeches, G. H. Mills, R. M. Pearse, C. Putensen, W. Schmid, P. Severgnini, R. Smith, T. A. Treschan, E. M. Tschernko, M. F. V. Melo, H. Wrigge, M. G. de Abreu, P. Pelosi, M. J. Schultz, ProVent and P. N. investigators (2016). "Epidemiological characteristics, practice of ventilation, and clinical outcome in patients at risk of acute respiratory distress syndrome in intensive care units from 16 countries (PROVENT): an international, multicentre, prospective study." Lancet Respir Med **4**(11): 882-893.

Nieszkowska, A., A. Combes, C. E. Luyt, H. Ksibi, J. L. Trouillet, C. Gibert and J. Chastre (2005). "Impact of tracheotomy on sedative administration, sedation level, and comfort of mechanically ventilated intensive care unit patients." Crit Care Med **33**(11): 2527-2533.

Osman, D., C. Ridel, P. Ray, X. Monnet, N. Anguel, C. Richard and J.-L. Teboul (2007). "Cardiac filling pressures are not appropriate to predict hemodynamic response to volume challenge*." Critical Care Medicine **35**(1): 64-68.

Osthaus, W. A., D. Huber, C. Beck, M. Winterhalter, D. Boethig, A. Wessel and R. Sumpelmann (2007). "Comparison of electrical velocimetry and transpulmonary thermodilution for measuring cardiac output in piglets." Paediatr Anaesth **17**(8): 749-755.

Palmieri, T. L., W. Jackson and D. G. Greenhalgh (2002). "Benefits of early tracheostomy in severely burned children." Critical Care Medicine **30**(4): 922-924.

Pierson, D. J. (2005). "Tracheostomy and Weaning." Respiratory Care **50**(4): 526.

Plotz, F. B. and A. J. van Vught (1999). "[Lung damage due to mechanical ventilation]." Ned Tijdschr Geneesk **143**(3): 133-136.

Prause, A., F. Wappler, J. Scholz, H. Bause and J. Schulte am Esch (2000). "Respiratory depression under long-term sedation with sufentanil, midazolam and clonidine has no clinical significance." Intensive Care Med **26**(10): 1454-1461.

Puntillo, K. A. (1990). "Pain experiences of intensive care unit patients." Heart Lung **19**(5 Pt 1): 526-533.

Puntillo, K. A., A. Max, J. F. Timsit, S. Ruckly, G. Chanques, G. Robleda, F. Roche-Campo, J. Mancebo, J. V. Divatia, M. Soares, D. C. Ionescu, I. M. Grintescu, S. M. Maggiore, K. Rusinova, R. Owczuk, I. Egerod, E. D. E. Papathanassoglou, M. Kyranou, G. M. Joynt, G. Burghi, R. C. Freebairn, K. M. Ho, A. Kaarlola, R. T. Gerritsen, J. Kesecioglu, M. M. S. Sulaj, M. Norrenberg, D. D. Benoit, M. S. G. Seha, A. Hennein, F. J. Pereira, J. S. Benbenishty, F. Abroug, A. Aquilina, J. R. C. Monte, Y. An and E. Azoulay (2018). "Pain distress: the

negative emotion associated with procedures in ICU patients." Intensive Care Med **44**(9): 1493-1501.

Renner, J., M. Gruenewald, P. Brand, M. Steinfath, J. Scholz, G. Lutter and B. Bein (2007). "Global End-Diastolic Volume as a Variable of Fluid Responsiveness During Acute Changing Loading Conditions." Journal of Cardiothoracic and Vascular Anesthesia **21**(5): 650-654.

Reuter, D. A., T. W. Felbinger, K. Moerstedt, F. Weis, C. Schmidt, E. Kilger and A. E. Goetz (2002). "Intrathoracic blood volume index measured by thermodilution for preload monitoring after cardiac surgery." J Cardiothorac Vasc Anesth **16**(2): 191-195.

Rhodes, A., R. J. Cusack, P. J. Newman, M. R. Grounds and D. E. Bennett (2002). "A randomised, controlled trial of the pulmonary artery catheter in critically ill patients." Intensive Care Medicine **28**(3): 256-264.

Rosa, G., G. Conti, P. Orsi, F. D'Alessandro, I. La Rosa, G. Di Giugno and A. Gasparetto (1992). "Effects of low-dose propofol administration on central respiratory drive, gas exchanges and respiratory pattern." Acta Anaesthesiol Scand **36**(2): 128-131.

Rumbak, M. J., M. Newton, T. Truncale, S. W. Schwartz, J. W. Adams and P. B. Hazard (2004). "A prospective, randomized, study comparing early percutaneous dilational tracheotomy to prolonged translaryngeal intubation (delayed tracheotomy) in critically ill medical patients." Crit Care Med **32**(8): 1689-1694.

Sakka, S. G., D. L. Bredle, K. Reinhart and A. Meier-Hellmann (1999). "Comparison between intrathoracic blood volume and cardiac filling pressures in the early phase of hemodynamic instability of patients with sepsis or septic shock." Journal of Critical Care **14**(2): 78-83.

Sandham, J. D., R. D. Hull, R. F. Brant, L. Knox, G. F. Pineo, C. J. Doig, D. P. Laporta, S. Viner, L. Passerini, H. Devitt, A. Kirby and M. Jacka (2003). "A Randomized, Controlled Trial of the Use of Pulmonary-Artery Catheters in High-Risk Surgical Patients." New England Journal of Medicine **348**(1): 5-14.

Sasai, T., H. Tokioka, T. Fukushima, T. Mikane, S. Oku, E. Iwasaki, M. Ishii, H. Mieda, T. Ishikawa and E. Minami (2014). "Reliability of central venous pressure to assess left ventricular preload for fluid resuscitation in patients with septic shock." J Intensive Care **2**(1): 58.

Schaible, H. G. and F. Richter (2004). "Pathophysiology of pain." Langenbecks Arch Surg **389**(4): 237-243.

Schmidt, M., C. Fisser, G. Martucci, D. Abrams, T. Frapard, K. Popugaev, A. Arcadipane, B. Bromberger, G. Lino, A. Serra, S. Rozencwajg, M. Lubnow, S. Petrikov, T. Mueller, A. Combes, T. Pham, D. Brodie and E. N. International (2021). "Tracheostomy management in patients with severe acute respiratory distress syndrome receiving extracorporeal membrane oxygenation: an International Multicenter Retrospective Study." Crit Care **25**(1): 238.

Shapiro, M., R. K. Wilson, G. Casar, K. Bloom and R. B. Teague (1986). "Work of breathing through different sized endotracheal tubes." Critical care medicine **14**(12): 1028-1031.

Siempos, I., T. K. Ntaidou, F. T. Filippidis and A. M. K. Choi (2015). "Effect of early versus late or no tracheostomy on mortality and pneumonia of critically ill patients receiving mechanical ventilation: a systematic review and meta-analysis." Lancet Respir Med **3**(2): 150-158.

Simonis, F. D., C. S. V. Barbas, A. Artigas-Raventos, J. Canet, R. M. Determann, J. Anstey, G. Hedenstierna, S. N. T. Hemmes, G. Hermans, M. Hiesmayr, M. W. Hollmann, S. Jaber, I. Martin-Loeches, G. H. Mills, R. M. Pearse, C. Putensen, W. Schmid, P. Severgnini, R. Smith, T. A. Treschan, E. M. Tschernko, M. F. Vidal Melo, H. Wrigge, M. G. de Abreu, P. Pelosi, M. J. Schultz, A. S. Neto, P. R. investigators and P. N. investigators (2018). "Potentially modifiable respiratory variables contributing to outcome in ICU patients without ARDS: a secondary analysis of PROVENT." Ann Intensive Care **8**(1): 39.

Sofi, K. and T. Wani (2010). "Effect of tracheostomy on pulmonary mechanics: An observational study." Saudi journal of anaesthesia **4**(1): 2-5.

Stauffer, J. L., D. E. Olson and T. L. Petty (1981). "Complications and consequences of endotracheal intubation and tracheotomy. A prospective study of 150 critically ill adult patients." Am J Med **70**(1): 65-76.

Stemmler, H. J., O. Weigert, N. Grüner, K. Tschöp, V. Lange and K. G. Parhofer (2007). "Nicht-invasives hämodynamisches Monitoring bei Intensivpatienten." Intensivmedizin und Notfallmedizin **44**(6): 366-371.

Tagami, T., S. Kushimoto, Y. Yamamoto, T. Atsumi, R. Tosa, K. Matsuda, R. Oyama, T. Kawaguchi, T. Masuno, H. Hiramata and H. Yokota (2010). "Validation of extravascular lung water measurement by single transpulmonary thermodilution: human autopsy study." Critical Care **14**(5): R162.

Terragni, P. P., M. Antonelli, R. Fumagalli, C. Faggiano, M. Berardino, F. B. Pallavicini, A. Miletto, S. Mangione, A. U. Sinardi, M. Pastorelli, N. Vivaldi, A. Pasetto, G. Della Rocca, R. Urbino, C. Filippini, E. Pagano, A. Evangelista, G. Ciccone, L. Mascia and V. M. Ranieri (2010). "Early vs late tracheotomy for prevention of pneumonia in mechanically ventilated adult ICU patients: a randomized controlled trial." JAMA **303**(15): 1483-1489.

Trouillet, J. L., C. E. Luyt, M. Guiguet, A. Ouattara, E. Vaissier, R. Makri, A. Nieszkowska, P. Leprince, A. Pavie, J. Chastre and A. Combes (2011). "Early percutaneous tracheotomy versus prolonged intubation of mechanically ventilated patients after cardiac surgery: a randomized trial." Ann Intern Med **154**(6): 373-383.

Turkovic, T. M., A. Lukic and M. Peric (2016). "Early Versus Late Percutaneous Tracheotomy in Critically Ill Patients: A Retrospective Single Center Observational Study." Acta Clin Croat **55 Suppl 1**: 33-40.

Valdix, S. W. and K. A. Puntillo (1995). "Pain, pain relief and accuracy of their recall after cardiac surgery." Prog Cardiovasc Nurs **10**(3): 3-11.

Valentine, R. J., M. L. Duke, M. H. Inman, P. A. Grayburn, R. T. Hagino, H. B. Kakish and G. P. Clagett (1998). "Effectiveness of pulmonary artery catheters in aortic surgery: A randomized trial." Journal of Vascular Surgery **27**(2): 203-212.

Vasilyev, S., R. N. Schaap and J. D. Mortensen (1995). "Hospital survival rates of patients with acute respiratory failure in modern respiratory intensive care units. An international, multicenter, prospective survey." Chest **107**(4): 1083-1088.

Vieillard-Baron, A., M. Matthay, J. L. Teboul, T. Bein, M. Schultz, S. Magder and J. J. Marini (2016). "Experts' opinion on management of hemodynamics in ARDS patients: focus on the effects of mechanical ventilation." Intensive Care Med **42**(5): 739-749.

Viquerat, C. E., A. Righetti and P. M. Suter (1983). "Biventricular volumes and function in patients with adult respiratory distress syndrome ventilated with PEEP." Chest **83**(3): 509-514.

Wappler, F., J. Scholz, A. Prause, O. Mollenberg, H. Bause and J. Schulte am Esch (1998). "[Level concept of analgesic dosing in intensive care medicine with sufentanil]." Anesthesiol Intensivmed Notfallmed Schmerzther **33**(1): 8-26.

Werdan, K., A. Oelke, S. Hettwer, S. Nuding, S. Bubel, R. Hoke, M. Russ, C. Lautenschlager, U. Mueller-Werdan and H. Ebelt (2011). "Septic cardiomyopathy: hemodynamic quantification, occurrence, and prognostic implications." Clin Res Cardiol **100**(8): 661-668.

Weymuller, E. A., Jr., M. J. Bishop, B. R. Fink, A. W. Hibbard and F. A. Spelman (1983). "Quantification of intralaryngeal pressure exerted by endotracheal tubes." Ann Otol Rhinol Laryngol **92**(5 Pt 1): 444-447.

Wiedemann, H. P. (2008). "A perspective on the fluids and catheters treatment trial (FACTT). Fluid restriction is superior in acute lung injury and ARDS." Cleve Clin J Med **75**(1): 42-48.

Yamashita, K., T. Nishiyama, T. Yokoyama, H. Abe and M. Manabe (2008). "The Effects of Vasodilation on Cardiac Output Measured by PiCCO." Journal of Cardiothoracic and Vascular Anesthesia **22**(5): 688-692.

Young, D., D. A. Harrison, B. H. Cuthbertson, K. Rowan and C. TracMan (2013). "Effect of early vs late tracheostomy placement on survival in patients receiving mechanical ventilation: the TracMan randomized trial." JAMA **309**(20): 2121-2129.

Zhang, X. Y., Z. J. Yang, Q. X. Wang and H. R. Fan (2011). "Impact of positive end-expiratory pressure on cerebral injury patients with hypoxemia." Am J Emerg Med **29**(7): 699-703.

Zheng, Y., F. Sui, X. K. Chen, G. C. Zhang, X. W. Wang, S. Zhao, Y. Song, W. Liu, X. Xin and W. X. Li (2012). "Early versus late percutaneous dilational tracheostomy in critically ill patients anticipated requiring prolonged mechanical ventilation." Chin Med J (Engl) **125**(11): 1925-1930.

11. Appendix

M	Großern	Gewichtg	BMI	APACHEII	SOFA	HF_0	ZVD_0	SVWL_0	GEDL_0	ELWL_0	SVL_0	HL_0	GFF_0	PVPL_0	CPL_0
w	170	50	17,3	19	2	96	7	975	606,0	8	46,0	4,28	27	1,5	,60
w	170	60	20,8	33	1	78	8	1216	647,0	9	58,0	4,60	34	1,8	,70
w	165	85	31,2	32	2	100	7	2381	788,0	9	27,0	2,40	14	1,6	,40
m	181	82	25,0	31	2	99	19	1776	696,0	9	28,0	2,70	15	2,0	,50
m	172	67	22,6	39	2	83	15	2523	1238,0	8	33,0	2,79	12	,9	,80
w	165	75	27,5	28	2	68	20	1167	984,0	9	50,0	4,80	26	,8	,80
w	175	76	24,8	32	2	96	22	573	877,0	15	87,0	8,33	40	2,4	1,50
M	185	85	24,8	18	2	87	9	1105	1332,0	8	76,0	6,85	24	,9	1,40
w	170	90	31,1	24	2	94	15	2208	775,0	8	40,0	3,54	-	1,5	,90
M	183	100	29,9	28	2	87	15	1688	946	11	32,0	2,74	14	1,8	,40
w	151	59	25,9	23	1	92	5	1390	839,0	11	41,0	3,92	24	1,3	,66
M	160	75	29,3	19	2	112	22	1284	688,0	9	42,0	4,66	26	1,4	,94
w	165	45	16,5	23	1	104	20	778	1019,0	11	70,0	7,30	-	1,4	1,40
w	162	94	35,8	32	2	121	11	1008	775,0	18	37,0	3,80	-	3,3	-
M	170	70	24,2	24	2	86	10	1430	740,0	10	42,2	3,71	-	1,9	-
M	186	94	27,2	30	2	81	15	1819	1088,0	12	50,0	3,69	-	1,7	1,00
w	150	73	32,4	25	2	112	15	1701	424,0	4	24,0	2,96	-	-	-
M	173	103	34,4	23	2	64	14	2722	812,0	8	50,0	-	-	1,7	-
M	172	74	25,0	43	2	75	8	1847	-	10	41,0	2,85	-	-	-
M	175	80	26,1	20	1	83	20	1663	674,0	7	43,0	3,42	25	1,4	,70
M	180	90	27,8	13	1	60	11	1574	899,0	10	50,0	2,99	22	1,2	,48
M	180	80	24,7	34	2	79	12	1098	887,0	7	58,0	4,67	26	1,1	,80
M	168	65	23,0	-	-	103	10	2296	652,0	6	38,0	4,30	-	1,3	-
w	155	55	22,9	29	1	80	13	1512	638,0	8	50,0	3,83	32	1,5	,70
M	180	70	21,6	24	2	81	10	1009	991,0	12	55,0	4,69	23	1,7	,70
w	156	75	30,8	37	2	103	11	1436	975,0	10	53,0	5,47	25	,9	1,30
w	159	60	23,7	17	1	85	9	1728	575,0	11	40,0	3,55	30	2,0	,60
M	175	90	29,4	11	2	98	19	1131	872,0	16	50,0	4,71	24	2,7	,97
w	173	64	21,4	9	2	62	10	2028	581,0	6	42,0	2,64	32	1,2	,46
M	168	61	21,6	22	2	92	20	1506	1000,0	7	40,0	3,67	16	1,0	,80

Abbildung 39 Appendix PiCCO M-1+Basis

	 AF_0	 Minutenvol_0	 PEEP_0	 Pmax_0	 Prititel_0	 FIO2_0	 Horowitz_0	 Oxygenationsindex_0	 Compliance_0
1	28,0	8,62	8	26	12	,45	216,22222222222220	5,549845837615620	17,77777778
2	24,0	6,56	6	19	9	,30	323,00000000000006	2,786377708978330	22,61538462
3	13,0	8,89	8	25	14	,40	203,50000000000000	6,879606879606880	39,82352941
4	15,0	10,80	10	19	12	,55	234,545454545453	5,116279069767440	75,77777778
5	31,0	12,60	6	18	8	,35	275,71428571428570	2,901554404145080	28,91666667
6	14,0	6,80	10	27	14	,60	123,33333333333334	11,351351351351353	34,70588235
7	28,0	10,30	8	30	16	,35	229,14285714285717	6,982543640897755	16,72727273
8	25,0	13,90	6	15	8	,45	273,11111111111114	2,929210740439380	55,55555556
9	.	.	.	.	.	.	.	.	.
10	9,0	5,61	6	21	11	,45	222,66666666666666	4,940119760479040	45,66666667
11	35,0	13,30	6	15	12	,30	347,66666666666670	3,451581975071910	43,22222222
12	13,0	6,00	6	.	.	,40	283,75000000000000	.	.
13	11,0	7,40	6	26	9	,35	317,14285714285717	2,837837837837840	32,50000000
14	30,0	13,90	8	36	14	,50	160,00000000000000	8,750000000000000	16,42857143
15	16,0	7,20	6	27	16	,50	116,00000000000000	13,793103448275861	26,19047619
16	23,0	14,30	6	22	10	,40	198,99999999999997	5,025125628140704	46,81250000
17	26,0	10,20	14	35	23	,65	143,69230769230770	16,006423982869382	21,42857143
18	22,0	3,20	10	20	13	,50	158,00000000000000	8,227848101265820	46,60000000
19	29,6	17,60	8	35	18	,55	127,27272727272727	14,142857142857142	21,77777778
20	20,0	10,00	7	17	11	,25	341,20000000000000	3,223915592028140	47,40000000
21	10,0	7,50	7	28	11	,21	393,33333333333330	2,796610169491526	46,04761905
22	35,0	10,10	8	26	13	,55	161,63636363636363	8,042744656917890	15,55555556
23	.	.	.	.	.	.	.	.	.
24	30,0	8,41	6	15	8	,30	321,66666666666670	2,487046632124350	33,88888889
25	18,0	8,00	8	17	8	,40	262,50000000000000	3,047619047619050	48,22222222
26	22,0	7,50	6	26	8	,45	224,66666666666666	3,560830860534120	18,50000000
27	17,0	7,10	8	23	11	,30	310,00000000000000	3,548387096774190	20,13333333
28	21,0	11,10	10	26	14	,40	208,99999999999997	6,698564593301440	27,31250000
29	24,0	7,25	10	7	.	,20	414,50000000000000	.	48,71428571
30	30,0	10,20	6	18	8	,30	311,33333333333337	2,569593147751610	29,16666667

Abbildung 40 Appendix Beatmung M-1

 HF_1	 ZVD_1	 SVRL_1	 CED_1	 ELWL_1	 SVL_1	 HL_1	 GEF_1	 PVPL_1	 CPL_1
114	17	1703	644	8	36	4,28	21	1,6	1,00
95	9	1306	650	9	55	.	33	1,9	1,00
108	8	2752	844	9	20	2,36	11	1,4	,40
108	14	2044	699	9	27	2,69	16	1,9	,60
76	11	1252	1200	17	34	2,77	11	2,0	,50
74	18	1094	998	12	60	.	26	.	,70
87	25	591	832	15	79	6,92	39	2,5	1,20
86	4	1165	1129	6	65	4,61	24	,8	,70
84	15	1313	668	7	37	3,18	.	1,6	,40
115	8	1288	1110	10	33	3,62	13	1,4	,50
82	13	1190	927	14	33	2,73	23	1,7	,48
106	21	1195	707	9	43	4,49	27	1,3	,82
110	19	660	867	8	63	6,90	.	1,2	1,10
100	7	1141	726	13	46	4,50	.	2,5	.
80	16	1768	748	11	42	3,25	.	2,1	.
108	18	1554	867	11	35	3,78	16	1,8	,70
136	11	1632	525	5	35	4,26	.	.	.
86	12	1512	735	8	53	.	.	1,9	.
85	5	1828	.	.	43	3,40	.	.	.
102	26	1115	679	8	46	4,95	28	1,8	1,10
60	3	1238	966	9	65	3,87	24	1,0	,51
87	17	679	928	16	63	5,20	26	2,6	,80
96	6	1641	659	6	51	5,10	.	1,4	.
82	10	1405	515	9	49	3,55	38	1,4	,70
107	22	1146	723	12	44	4,49	23	2,0	,60
64	21	998	1628	7	72	4,68	20	,3	,70
125	5	1453	713	10	38	4,74	22	1,4	,90
80	13	1069	750	12	40	3,55	28	2,4	,79
63	10	1870	650	5	46	3,18	29	,8	,50
90	19	1213	984	9	38	3,88	16	1,3	,81

Abbildung 41 Appendix PiCCO M+1

 AF_1	 Minutenvol. 1	 PEEP_1	 Pmax_1	 Pmittel_1	 FIO2_1	 Horowitz_1	 Oxygenationsindex_1	 Compliance_1
16	10,20	6	23	11	,48	202,50000000000000	5,432098765432098	39,647058823529410
28	7,60	6	18	8	,35	272,85714285714290	2,931937172774870	23,833333333333332
12	8,47	8	20	12	,35	382,57142857142860	3,136669156086630	56,833333333333336
12	7,70	10	24	14	,50	284,80000000000000	4,915730337078650	45,714285714285715
24	11,00	6	9	7	,36	197,22222222222223	3,549295774647887	150,66666666666660
27	11,00	8	24	12	,50	98,00000000000000	12,244897959183673	26,687500000000000
30	9,80	8	29	16	,40	217,50000000000000	7,356321839080460	16,476190476190474
18	12,60	10	28	18	,50	96,40000000000000	18,672199170124482	53,833333333333336
50	1,50	6	24	13	,45	142,22222222222223	9,140625000000000	17,222222222222220
24	10,60	6	27	12	,40	206,49999999999997	5,811138014527850	21,809523809523810
20	8,20	6	15	9	,30	347,33333333333337	2,591170825335892	51,777777777777780
21	8,90	8	29	18	,40	230,74999999999997	7,800650054171180	22,142857142857142
8	5,40	6	23	8	,40	214,75000000000000	3,725261932479630	39,705882352941174
48	23,00	5	34	12	,45	128,88888888888889	9,310344827586210	16,896551724137932
16	8,00	10	26	19	,70	133,71428571428572	14,209401709401709	31,687500000000000
23	8,00	8	30	13	,40	232,50000000000000	5,591397849462366	16,909090909090910
24	9,80	14	32	20	,55	290,90909090909090	6,875000000000000	20,000000000000000
30	17,10	10	22	14	,50	142,00000000000000	9,859154929577460	50,000000000000000
25	16,50	8	28	15	,55	129,09090909090910	11,619718309859154	31,500000000000000
19	8,50	8	16	11	,30	352,66666666666670	3,119092627599240	52,625000000000000
16	9,90	8	18	12	,25	342,40000000000000	3,504672897196262	61,900000000000000
33	11,00	8	27	13	,40	203,99999999999997	6,372549019607840	12,105263157894736
.	.	.	.	.	.	.	.	.
17	6,80	6	14	8	,30	333,00000000000006	2,402402402402402	48,750000000000000
16	11,80	8	22	15	,50	216,00000000000000	6,944444444444440	35,500000000000000
26	7,60	7	26	12	,40	240,50000000000000	4,989604989604990	20,000000000000000
28	7,10	8	12	9	,30	226,66666666666669	3,970588235294120	70,000000000000000
18	7,40	10	23	12	,40	200,50000000000000	5,985037406483790	41,307692307692310
.	.	.	.	.	,40	222,25000000000000	.	.
20	.	6	.	.	,30	386,00000000000000	.	.

Abbildung 42 Appendix Beatmung M+1

 HF_2	 ZVD_2	 SVRL_2	 GEDL_2	 ELWL_2	 SVL_2	 HL_2	 GEF_2	 PVPL_2	 CPL_2
105	29	1068	612	10	41,0	4,54	25	1,9	,90
94	12	1216	648	8	55,0	4,95	32	1,5	1,00
120	10	1854	818	9	22,0	2,63	12	1,5	,40
91	19	1755	722	9	31,0	2,79	17	1,8	,40
98	20	1558	1229	16	42,0	4,15	13	1,9	,90
102	17	1623	917	9	37,0	3,80	21	,8	,60
97	29	.	841	14	.	8,21	39	2,5	2,50
80	10	1563	1237	9	52,0	4,10	18	1,0	,80
77	18	1789	668	7	35,0	2,88	.	1,3	,40
103	27	1022	977	11	33,0	3,66	14	1,6	,50
94	10	1544	731	13	47,0	3,90	23	1,0	,94
111	10	1248	648	10	36,0	4,17	25	1,6	,63
91	21	793	916	7	65,0	5,30	.	1,1	1,00
90	7	1231	753	11	44,0	4,00	.	2,0	.
86	15	2263	828	8	41,0	3,70	.	1,5	.
81	12	1773	1009	10	41,0	3,30	16	1,8	,60
118	12	1200	.	6	41,0	4,60	.	.	.
75	17	1310	785	8	54,0	.	.	1,8	.
.	5	1880	.	10	28,0	3,82	.	.	.
91	17	1604	631	6	43,0	3,83	28	1,4	,80
60	6	1343	963	9	56,0	3,59	26	1,0	,44
82	5	1178	1000	7	61,0	5,07	23	,9	1,40
103	8	1461	632	6	48,5	4,51	.	1,2	.
94	6	1176	611	8	52,0	4,74	34	1,4	,70
108	16	1016	756	17	48,0	4,90	23	2,7	,90
110	24	1366	886	13	46,0	5,01	24	1,3	1,20
127	46	1082	605	9	29,0	4,40	25	1,6	1,20
81	10	1110	739	12	38,0	3,26	27	2,5	,59
78	12	2007	632	5	36,0	3,41	28	1,1	,51
109	21	1428	1009	12	46,0	4,81	18	1,7	1,11

Abbildung 43 Appendix PiCCO M+2

 AF_2	 Minutenvol. 2	 PEEP_2	 Pmax_2	 Pmittel_2	 FIO2_2	 Oxygenationsindex_2	 Horowitz_2	 Compliance_2	
16	10,30	6	24	12		,45	5,051449953227320	237,5555555555557	36,33333333333336
26	7,40	6	18	8		,35	3,100775193798450	258,0000000000000	17,08333333333332
19	10,40	8	23	13		,35	5,548780487804880	234,28571428571430	34,73333333333334
10	9,40	10	20	13		,50	.	.	92,90000000000000
33	15,00	6	9	7		,35	,359237536656891	234,28571428571430	127,6666666666670
23	13,00	10	26	14		,50	7,070707070707070	198,0000000000000	26,87500000000000
30	11,30	8	29	15		,40	6,472491909385110	231,7500000000000	17,809523809523810
19	12,60	10	21	13		,35	4,292452830188680	302,85714285714290	69,363636363636360
21	9,50	6	24	14		,45	5,833333333333333	240,0000000000000	25,55555555555557
12	7,33	6	21	10		,60	5,802707930367500	172,33333333333334	49,33333333333336
13	8,11	6	22	10		,25	3,071253071253071	325,6000000000000	44,43750000000000
20	10,50	8	29	16		,30	3,735408560311280	428,3333333333337	26,761904761904763
10	6,80	6	17	8		,45	3,913043478260870	204,4444444444443	68,181818181818190
31	14,00	5	27	9		,40	4,845222072678330	185,7499999999997	30,00000000000000
.	.	.	.	.		,60	.	111,0000000000000	.
50	18,10	6	19	11		,35	2,984496124031010	368,57142857142860	24,846153846153847
24	7,60	14	30	19		,40	6,563039723661490	289,5000000000000	22,18750000000000
26	15,40	8	16	.		,45	.	198,2222222222223	71,25000000000000
25	15,50	8	30	15		,60	11,111111111111110	135,0000000000000	27,7272727272727
29	.	.	.	.		,50	.	139,0000000000000	.
28	11,60	8	15	10		,25	2,500000000000000	400,0000000000000	65,57142857142870
35	12,40	8	26	14		,40	6,682577565632460	209,4999999999997	16,66666666666668
.	.	.	.	.		.	.	.	.
19	7,11	6	15	8		,25	2,352941176470590	340,0000000000000	44,77777777777780
32	11,10	8	20	10		,40	3,571428571428570	280,0000000000000	33,25000000000000
27	11,00	6	21	9		,45	4,586636466591167	196,2222222222220	22,46666666666665
22	8,57	8	19	10		,30	3,289473684210530	304,0000000000000	38,454545454545450
10	15,50	10	29	14		,45	9,813084112149530	142,6666666666666	36,105263157894740
26	.	.	.	.		,40	.	228,2499999999997	.
32	13,50	6	16	9		,25	2,401280683030950	374,8000000000000	49,70000000000000

Abbildung 44 Appendix Beatmung M+2