

**Aus der Klinik für Anästhesiologie
(Prof. Dr. med. M. Quintel)
im Zentrum Anaesthesiologie-, Rettungs- und Intensivmedizin
der Medizinischen Fakultät der Universität Göttingen**

**Anwendung von Notfallbeatmungsgeräten zur invasiven und
nicht-invasiven Beatmung an einem Versuchsmodell –
resultierende Beatmungsgrößen und gastrale Insufflation**

INAUGURAL – DISSERTATION

zur Erlangung des Doktorgrades

der Medizinischen Fakultät der
Georg-August-Universität zu Göttingen
vorgelegt von

Nils Helgo Beiser

aus

Herford

Göttingen 2015

Dekan: Prof. Dr. rer. nat. H. K. Kroemer

I. Berichterstatter: apl. Prof. Dr. med. O. Mörer

**II. Berichterstatter/in: Prof. Dr. phil. nat. B. C.
Burckhardt**

III. Berichterstatter/in:

Tag der mündlichen Prüfung: 30.06.2015

A. Inhaltsverzeichnis

B. Abkürzungsregister	VI
C. Abbildungsverzeichnis	VIII
D. Tabellenverzeichnis	X
1. Einleitung und Fragestellung	1
2. Grundlagen	4
2.1 Pathophysiologische Grundlagen der respiratorischen Insuffizienz	4
2.2 Atemmechanik, Ventilation und Bedeutung des Ösophagussphinkters.....	6
2.3 Beatmungsoptionen bei der respiratorischen Insuffizienz - invasive vs. nicht-invasive Ventilation	16
2.3.1 Allgemeine Therapieprinzipien.....	16
2.3.2 Beatmungsmuster und -formen	17
2.3.3 Die invasive Beatmung (IV)	20
2.3.4 Die nicht-invasive Beatmung (NIV)	22
2.4 Folgen für den präklinischen Einsatz der NIV	28
3. Methoden: Gerätebeschreibungen, Versuchsaufbau und -ablauf.....	30
3.1 Ort der Messung	30
3.2 Beatmungsgeräte und Modellkomponenten.....	31
3.2.1 Allgemeine Beschreibung	31
3.2.2 Untersuchte Beatmungsgeräte	33
3.2.2.1 Oxylator [®] EM-100 Typ I und II.....	34
3.2.2.2 Medumat [®] Standard a.....	35
3.2.2.3 Smart Bag [®]	37
3.2.2.4 Ambu [®] Mark III [®]	38
3.2.2.5 Evita 2	38
3.2.3 Messgeräte – Funktion und präexperimentelle Kalibrierungen	39
3.2.3.1 Messung von Druck und Flow	39
3.2.3.2 Messung des den Sphinkter passierenden Volumens und Kalibrierung des Glockenspirometers.....	41
3.2.4 Lungensimulator LS 800 S (Fa. Dräger).....	42
3.2.5 Ösophagussphinktermodell	43
3.3 Versuchsaufbau	44

3.3.1 Versuchsaufbau bei invasiver Ventilation (IV).....	44
3.3.2 Versuchsaufbau bei nicht-invasiver Ventilation (NIV).....	44
3.4 Versuchsablauf	45
3.4.1 Justierung des Ösophagussphinktermodells.....	45
3.4.2 Eingestellte Lungenparameter	46
3.4.3 Versuchsreihen zur invasiven Beatmung	47
3.4.4 Versuchsreihe zur nicht-invasiven Beatmung ohne festgelegten PEEP	49
3.4.5 Versuchsreihe zur nicht-invasiven Beatmung mit festgelegten PEEP	51
3.6 Auswertungen.....	52
3.6.1 Auswertung der aufgezeichneten Beatmungsparameter	52
3.6.2 Auswertung der Volumenmessung mittels Spirometer.....	53
3.6.3 Statistische Berechnungen.....	53
4. Ergebnisse	54
4.1 Kalibrierungen der Flow- und Drucksensoren (Pneumotachographen).....	54
4.2 Evaluierung des Sphinktermodells	56
4.2.1 Charakteristika anhand von Flow-Druck-Beziehungen	56
4.2.2 Charakteristika anhand von Beatmungskurven.....	57
4.3 Ergebnisse der invasiven und nicht-invasiven Ventilation	61
4.3.1 Ergebnisse der einzelnen Beatmungsgeräte	61
4.3.1.1 Oxylator [®] EM-100 Typ I und II.....	61
4.3.1.2 Medumat [®] Standard a.....	72
4.3.1.3 Handbeatmungsbeutel	74
4.3.1.4 Evita 2	76
4.3.2 Geräteübergreifende Ergebnisse.....	78
4.3.2.1 Vergleiche zwischen Oxylator [®] und Medumat [®]	78
4.3.2.2 Vergleiche zwischen Medumat [®] und Handbeatmungsbeutel:	82
4.3.2.3 Einflüsse der Beatmungsgeräte auf den gastralen Flow.....	83
5. Diskussion	86
5.1 Bedeutung und Charakteristik des Sphinktermodells	87
5.2 Referenzbereiche der Respiration und Beurteilung der Messergebnisse	89
5.3 Diskussion der Ergebnisse	92
5.3.1. Der Oxylator [®] – Bewertung einer druckgesteuerten Beatmung	92
5.3.2 Der Medumat [®] – Vergleich mit dem Oxylator [®]	99

5.3.3 Der Medumat® – Bewertung der Standardeinstellungen	102
5.3.4 Die Handbeatmungsbeutel – Bewertung der manuellen Beatmung mit kontrollierten Standardzielsetzungen	103
5.3.5 Die Evita 2 – Der Einfluss des PEEPs auf den gastralen Flow	106
5.3.6 Der gastralen Flow – geräteunabhängige Einflüsse	107
5.4 Fazit und theoretische Überlegungen für die Praxis	108
6. Zusammenfassung	112
E. Tabellen der Messergebnisse	114
F. Literaturverzeichnis	147

B. Abkürzungsregister

Abb.	Abbildung
AF	Atemfrequenz / Beatmungsfrequenz
AHA	<i>American Heart Association</i>
ALI	<i>Acute Lung Injury</i>
AMV	Atemminutenvolumen
ARDS	<i>Acute Respiratory Distress Syndrome</i>
ASB	<i>Assisted Spontaneous Breathing</i>
AZV	Atemzugvolumen / Tidalvolumen
BIPAP	<i>Biphasic Intermittent Positiv Airway Pressure</i>
CMV	<i>Controlled Mechanical Ventilation</i>
Comp.	Pulmonale Compliance / Volumendehnbarkeit
COPD	<i>Chronic Obstructive Pulmonary Disease</i>
CPAP	<i>Continous Positive Airway Pressure</i>
CPR	<i>cardiopulmonary resuscitation</i>
ERC	<i>European Resuscitation Council</i>
Fa.	Firma
FRC	Funktionelle Residualkapazität
HF	Herzfrequenz
Hz	Hertz
Insp.	Inspirationszeit
IPPV	<i>Intermittend Positive Pressure Ventilation</i>
IV	invasive Ventilation
kg KG	Kilogramm Körpergewicht
l.	Liter
Max.	Maximum
Min.	Minimum
NIV	nicht-invasive Ventilation / <i>noninvasive Ventilation</i>
P1	Differenzdrucktransducer
pCO ₂	Kohlendioxidpartialdruck
PCV	<i>Pressure Controlled Ventilation</i>
PEEP	Positiver Endexpiratorischer Druck / <i>Positive Endexpiratory Pressure</i>

pO ₂	Sauerstoffpartialdruck
PSV	<i>Pressure Supported Ventilation</i>
PT1/2	Pneumotachograph 1/2
Resist.	pulmonale Resistance / Widerstand
s.	siehe
sek	Sekunde
SIMV	<i>Synchronized Intermittent Mandatory Ventilation</i>
Tab.	Tabelle
VCV	<i>Volume Controlled Ventilation</i>

C. Abbildungsverzeichnis

Abb. 1: Circulus vitiosus: NIV und Überschreitung des Ösophagusphinkterdrucks	15
Abb. 2: Versuchsaufbau im Labor der Anästhesie.....	30
Abb. 3: schematische Darstellung der Versuchsaufbauten	32
Abb. 4: Oxylator [®] EM-100 Typ I.....	34
Abb. 5: Medumat [®] Standard a.....	36
Abb. 6: Smart Bag [®]	37
Abb. 7: schematischer Aufbau des Pneumotachograhen nach Fleisch	39
Abb. 8: Glockenspirometer	41
Abb. 9: Lungensimulator LS 800 S.....	42
Abb. 10: Schema des Ösophagusphinktermodells mit Querschnittsbetrachtung	43
Abb. 11: schematische Darstellung der Versuchsreihen.....	50
Abb. 12: schematische Darstellung der Versuchsreihe mit definiertem PEEP	51
Abb. 13: Überprüfung der Pneumotachographen (PT1 und PT2) mit dem Gilibrator [™] 2.....	54
Abb. 14: Überprüfung des Pneumotachographen 1 mit der Digima Champion	55
Abb. 15: Flow-Druck-Beziehungen des Sphinktermodells.....	56
Abb. 16: Beispielkurven Oxylator [®] Typ I	57
Abb. 17: Beispielkurven Medumat [®]	58
Abb. 18: Beispielkurven Smart Bag [®]	59
Abb. 19: Beispielkurven Ambu [®] -Beutel.....	60
Abb. 20: Beatmung mit dem Oxylator [®] I (automat. Modus / IV): Zusammenhang von Inspirationszeit, Inspirationsdruck und Lungenparameter	62
Abb. 21: Beatmung mit dem Oxylator [®] I (automat. Modus / NIV): Zusammenhang von Inspirationszeit, Inspirationsdruck und Lungenparameter	63
Abb. 22: Beatmung mit dem Oxylator [®] I (automat. Modus / IV): Zusammenhang AMV, eingestellter Umschaltdruck und Lungenparameter.	64
Abb. 23: Beatmung mit dem Oxylator [®] I (automat. Modus / NIV): Zusammenhang AMV, eingestellter Umschaltdruck und Lungenparameter	65
Abb. 24: Beatmung mit dem Oxylator [®] I + II (autom. Modus / NIV): Anteil des Verlustes des inspiratorischen Volumens vom AMV	66
Abb. 25: Beatmung mit dem Oxylator [®] (automat. Modus / IV): Automatische Generierung des PEEPs.	67

Abb. 26: Beatmung mit dem Oxylator® I (automat. Modus / NIV): Automatisch Generierung des PEEPs	68
Abb. 27: Beatmung mit dem Medumat® (Standardeinstellungen / IV und NIV): resultierende Inspirationsdrücke und gastraler Flow.	72
Abb. 28: Beatmung mit dem Smart Bag® (Standardzielgrößen AZV 500ml und 100 ml / IV und NIV): resultierende Inspirationsdrücke und gastraler Flow.	74
Abb. 29: Beatmung mit dem Ambu®-Beutel (Standardzielgrößen AZV 500ml und 100 ml / IV und NIV): resultierende Inspirationsdrücke und gastraler Flow	75
Abb. 30: Beatmung mit der Evita 2: Zusammenhang zwischen PEEP und gastralem Flow ...	77
Abb. 31: Beatmung mit dem Medumat® (Nacheinstellung des autom. Modus / NIV): Anteil des Verlustes des inspiratorischen Volumens am AMV.	80
Abb. 32: Beatmung mit Oxylator® und Medumat® (autom. und manuell. Modus / NIV): gastraler Flow bei Überschreitung des Sphinkterverschlussdrucks.	81
Abb. 33: Messwerte des gastralen Flow aller Beatmungsgeräte in Bezug auf den erreichten Inspirationsdruck	83

D. Tabellenverzeichnis

Tab. 1: Atemparameter unter Ruheatmung	8
Tab. 2: Intubationskriterien nach Brochard et al. 1995.....	25
Tab. 3: untersuchte Beatmungsgeräte	33
Tab. 4: eingestellte Lungenparameter	46
Tab. 5: Übersicht über die Beatmungsparameter	53
Tab. 6: Oxylator [®] Typ I (automat. Modus / IV): Minimal und maximal gemessene Beatmungsparameter	69
Tab. 7 Oxylator [®] Typ I (automat. Modus / NIV): Minimal und maximal gemessene..... Beatmungsparameter	69
Tab. 8: Oxylator [®] Typ I (manuell. Modus/ IV): AMV bei AF 12/min.....	70
Tab. 9: Oxylator [®] Typ I (manuell. Modus/ NIV): AMV bei AF 12/min.....	71
Tab. 10: Stärke des Zusammenhangs der Nacheinstellung am Medumat [®]	78
Tab. 11: Vergleich Medumat mit Standardeinstellungen und Handbeatmungsbeutel bei IV	82
Tab. 12: Vergleich Medumat mit Standardeinstellungen und Handbeatmungsbeutel bei NIV	82
Tab. 13: Zusammenhänge und Schätzer der Beatmungsparameter in Bezug auf den gastralen Flow aller Messreihen.....	84
Tab. 14: Referenzbereiche ausgewählter Beatmungsparameter.....	91
Tab. 15: Oxylator [®] Typ I: Anwendbare Umschaltdrücke nach Kriterien der Referenzbereiche	92
Tab. 16: Medumat [®] bei Standardbeatmung: Anwendbare Atemzuvolumina nach Kriterien der Referenzbereiche	102
Tab. 17: Handbeatmungsbeutel mit Standardbeatmung: Anwendbare Atemzuvolumina nach Kriterien der Referenzbereiche	103
Tab. 18: Oxylator [®] Typ I automatischer Modus / IV.....	115
Tab. 19: Oxylator [®] Typ I manueller Modus / IV	117
Tab. 20: Medumat [®] in Analogeeinstellung automatischer Modus / IV	119
Tab. 21: Medumat [®] in Analogeeinstellung manueller Modus / IV	121
Tab. 22: Oxylator [®] Typ I automatischer Modus / NIV	123
Tab. 23: Oxylator [®] Typ II automatischer Modus / NIV	125

Tab. 24: Oxylator [®] Typ I manueller Modus / NIV	127
Tab. 25: Medumat [®] in Analogeinstellung automatischer Modus / NIV	129
Tab. 26: Medumat [®] in Analogeinstellung manueller Modus / NIV	131
Tab. 27: Medumat [®] mit Standardeinstellungen	133
Tab. 28: Smart Bag [®] mit Standardzielsetzung	135
Tab. 29: Ambu [®] Mark III [®] mit Standardzielsetzung	137
Tab. 30: Evita 2, PEEP 0	139
Tab. 31: Evita 2, PEEP 2	141
Tab. 32: Evita 2, PEEP 4	143
Tab. 33: Evita 2, PEEP 6	145

1. Einleitung und Fragestellung

Bei ca. 10 % von Rettungs- und Notarzteinsätzen liegt eine respiratorische Insuffizienz vor (Roessler und Kill 2010). Die Fähigkeit zur ausreichenden Oxygenierung des Blutes kann eingeschränkt, aber auch die Möglichkeit zur Kohlendioxidabgabe kann vermindert sein. Das Resultat ist eine Hypoxämie und/oder Hyperkapnie (Rathgeber 1999). Beides kann zur akuten Gefährdung des Patienten führen. Der Extremfall ist der Atemstillstand und die Wiederbelebungssituation. Diese Situation kann eintreten, wenn Kompensationsmechanismen nicht mehr ausreichen und insuffizient werden.

Die möglichen Behandlungsmaßnahmen sind neben der Sauerstoff- und Medikamentengabe sowie Unterstützung einer atemerleichternden Körperhaltung, zur mechanischen Ventilation die invasive endotracheale Intubation (IV) oder die nicht-invasive Maskenüberdruckbeatmung (NIV) bzw. die Anwendung eines kontinuierlichen endexpiratorischen Drucks (CPAP bzw. PEEP) (Roessler und Kill 2010).

Beide Beatmungsverfahren haben Vorteile und Risiken, die im Grundlagenkapitel näher erörtert werden. Bei Anwendung der NIV konnte die Mortalität in verschiedenen Studien im Vergleich zur IV gesenkt werden (Bott et al. 1993, Peter et al. 2002, Plant et al. 2000). Die Intubation bei respiratorischer Einschränkung mit Vigilanzminderung oder Verlust von Schutzreflexen ist jedoch das Mittel der Wahl (Timmermann et al. 2012). Auch in Bezug auf konservative Maßnahmen, wie z.B. Sauerstoffinsufflation, konnte die NIV Vorteile für den Patienten zeigen (Väisänen und Räsänen 1987, Masip et al. 2005). Dies kann durch die Verbesserung der pulmonalen Compliance und Resistance und gegebenenfalls Kompensation eines intrinsischen PEEPs durch Applikation eines kontinuierlich positiven Atemwegsdrucks über Maske erklärt werden. Die Atemarbeit des Patienten verringert sich und die Ventilation wird erleichtert (Appendini et al. 1994, Lenique et al. 1997, Vitacca et al. 2001). Darüber hinaus kann die inspiratorische Atemarbeit mit einem Inspirationsdruck unterstützt werden (Roessler und Kill 2010).

Durch Rekrutierung von Lungenarealen mit Verbesserung des intrapulmonalen Shuntanteils kann die Oxygenierung des Blutes verbessert werden. Dies kann ebenfalls durch Anwendung eines PEEPs erreicht werden, aber auch über eine Erhöhung des Atemzugvolumens bzw. Inspirationsdrucks (Hoffmann und Welte 1997, Lenique et al. 1997, Welte und Hoffmann 1999, Kindgen-Milles et al. 2000).

Die IV hat grundsätzlich die gleiche Zielsetzung, jedoch mit invasiveren Maßnahmen, welche andere Risiken für den Patienten bergen. Darüber hinaus kann die notwendig Sedierung und Relaxierung bei der endotrachealen Intubation diesen Bemühungen sogar teilweise zuwiderlaufen (Rothen et al. 1998, Gunnarsson et al. 1991, Lindberg et al. 1992).

Gerade der frühzeitige Einsatz der NIV vor Ausbildung einer Azidose erhöht die Chance, diese suffizient durchzuführen (Plant et al. 2000) und macht die Bedeutung für die präklinische Patientenversorgung deutlich (Roessler und Kill 2010).

Dem Risiko der Aspiration muss bei NIV besondere Aufmerksamkeit gewidmet werden, um das Outcome des Patienten nicht zusätzlich zu verschlechtern (Larsen 2002, Larsen und Ziegenfuß 2004, Roissant et al. 2008). Die Effektivität des unteren Ösophagussphinkters, die Speisröhre zum Magen abzudichten, ist ein wichtiger Aspekt, die Aspiration zu verhindern (Cotton und Smith 1984, Weiler et al. 1995, Wenzel et al. 2000). Die Gefahr der Aspiration liegt beim ungesicherten Atemweg ohne endotrachealen Tubus, aber tendenziell auch mit invasiver Atemwegssicherung, vor. Zudem kann durch die Insufflation von Beatmungsgas in den Magen mit und ohne Aspiration ein lebensbedrohlicher Circulus vitiosus ausgelöst werden und die Lungenfunktion maßgeblich beeinflussen (Döriges et al. 2001, Wenzel et al. 1998 a). Generell kann die Wahl ungeeigneter Beatmungsparameter die Lunge zusätzlich schädigen (Villar et al. 2009, Hong et al. 2010).

Dies verdeutlicht, dass für jeden Patienten und jede pulmonale Situation die geeignetste Beatmung möglichst früh gefunden werden muss.

Präklinisch stehen hierfür in der Regel keine Intensivrespiratoren, wie z.B. die Evita 2 zur Verfügung, die eine Vielzahl an unterschiedlichen Einstellungen und Beatmungsmodi zu bieten hat. Die hier untersuchten Notfallbeatmungsgeräte unterstützen nur begrenzte Beatmungsmodi, mit denen die Beatmung sichergestellt werden muss. Dies kann die Mitarbeit des Patienten und die Suffizienz der Beatmung beschränken.

Die Firma CPR aus Kanada hat versucht, das Problem der gastralen Insufflation von Atemgas durch den Oxylator[®] EM-100 zu umgehen. Sie vertritt die Meinung, dass sich durch ihr druckgesteuertes Gerät mit einer konstanten Inspirationsflowkurve mit fester Flowhöhe von ungefähr 0,5 l/sek die gastrale Insufflation abwenden lässt (Romeo Worner, President of CPR, Toronto, Canada: persönliche Mitteilung).

Der Medumat[®] Standard a ermöglicht eine volumenkontrollierte Beatmung mit konstanter Flowkurve, die in der Flowhöhe jedoch variiert. Die Beatmung mit Handbeatmungsbeutel ist vom Beatmungsstil des Anwenders abhängig.

Das Monitoring, um die Effizienz der Beatmung zu kontrollieren, ist im Vergleich zur Intensivstation reduziert. In der Regel ist die Blutgasanalyse mit pH-Wertbestimmung im Rettungsdienst nicht möglich. Neben der Pulsoximetrie und der Kapnometrie sind die Verbesserung der „Patientenklintik“ und der Vitalparameter wichtige Indikatoren zum Abschätzen des Erfolges respiratorisch unterstützender Maßnahmen (Burchhardi et al. 2002).

Folglich sind Untersuchungen über die physikalischen Auswirkungen dieser Notfallbeatmungsgeräte wichtig, um einschätzen zu können, ob diese „einfachen“ Geräte in der Lage sind, die suffiziente Ventilation sicherzustellen und um das Gefährdungspotential durch nicht-invasive aber auch bei invasiver Beatmung für den Patienten zu klären.

Dazu wurde ein Versuchsaufbau entwickelt, welcher invasiv und nicht-invasiv mit den genannten Notfallbeatmungsgeräten beatmet werden konnte und darüber hinaus reproduzierbare Ergebnisse lieferte. Um die Auswirkungen des positiven endexpiratorischen Drucks systematisch zu ermitteln, wurde der Intensivrespirator Evita 2 eingesetzt.

Neben der potentiellen Patientengefährdung sollten zudem folgende weitere Fragestellungen geklärt werden:

- Welche Beatmungsgrößen haben den größten Einfluss auf den gastralen Flow?
- Welche Auswirkung hat die Änderung von pulmonaler Compliance und Resistance auf die Beatmungsparameter bei invasiver und nicht-invasiver Ventilation und auf den gastralen Flow bei nicht-invasiver Beatmung?
- Lassen sich Unterschiede zwischen verschiedenen Beatmungsformen erkennen?
- Hat der konstante Inspirationsflow einen positiven Einfluss auf den gastralen Flow im Vergleich mit einem inspiratorischen Flow, der durch Handbeatmungsbeutel generiert wird?
- Welche Auswirkung hat der PEEP auf den gastralen Flow über den Ösophagussphinkter?

Im folgenden Grundlagenkapitel werden die Bedeutungen der verschiedenen Einflüsse auf die Beatmung und Aspiration sowie die verschiedenen Beatmungsmöglichkeiten erörtert und dargestellt.

2. Grundlagen

2.1 Pathophysiologische Grundlagen der respiratorischen Insuffizienz

Bei der respiratorischen Insuffizienz kann der Patient die arteriellen Blutgase nicht ihrer Norm entsprechend ausgleichen. Grund hierfür können eine mangelnde Fähigkeit zur suffizienten Ventilation, reduzierte Möglichkeit der Oxygenierung des Blutes und eine pulmonale Durchblutungsstörung sowie die Kombination dieser Faktoren sein (Rathgeber 1999). Die respiratorische Insuffizienz kann partiell oder global sein. Bei Oxygenierungsstörungen als Ursache einer respiratorischen Insuffizienz mit Abfall des arteriellen Sauerstoffpartialdrucks handelt es sich um eine partielle Insuffizienz, während ein zusätzlicher Anstieg des Kohlendioxids als globale respiratorische Insuffizienz bezeichnet wird und das Resultat einer Ventilationsstörung ist (Larsen und Ziegenfuß 2004). Primäre Hyperkapnie ist eher Ausdruck einer Erschöpfung der Atempumpe, d.h. eines Ungleichgewichts zwischen muskulärer Belastung und muskulärer Kapazität als Auslöser der respiratorischen Insuffizienz (Vassilakopoulos et al. 1996, Roessler und Kill 2010).

Beispiele für auslösende Faktoren einer respiratorischen Insuffizienz bzw. eines Lungenversagens sind

pulmonal

- die COPD-Exazerbation
- das Asthma bronchiale
- die Pneumonie
- das ARDS (*acute respiratory distress syndrom*) als z.B. Trauma- oder Schockfolge, Lungenkontusion
- die Aspiration
- die Obstruktion durch Fremdkörper, Ödem oder Tumor

extrapulmonal

- das kardiale Lungenödem
- die disseminierte intravasale Koagulopathie,
- septische Krankheitsbilder
- die Lungenembolie
- der Pneumothorax, Pleuraerguss, Hämatothorax

- der apoplektischer Insult oder das Schädelhirntrauma mit Atemregulationsstörungen,
- Intoxikationen
- neuromuskuläre Erkrankungen

(Herold 2004, Rathgeber 1999). Die Zuordnung des Symptoms respiratorische Insuffizienz zur respiratorischen Störung kann fließend sein. Oftmals hängen mangelnde Sauerstoffversorgung und Lungenperfusionstörungen direkt von der pulmonalen Ventilation ab. In dieser Arbeit wird primär auf diese wichtigen Ventilationsstörungen eingegangen.

Im Vordergrund steht grundsätzlich die Therapie der Krankheitsursache. Eine maschinelle Beatmung kann hierbei therapeutisch oder temporär bis zum Therapieerfolg der Grunderkrankung indiziert sein. Je nach Ausprägung der respiratorischen Insuffizienz, Art der Grunderkrankung und des Allgemeinzustandes des Patienten muss die Beatmungstherapie individuell gestaltet werden. So kann die Beatmung beim Patienten invasiv, d.h. mit gesicherten Atemwegen durch endotracheale Intubation oder Tracheotomie oder nicht-invasiv, d.h. mit ungesicherten Atemwegen durch z.B. Gesichtsmaske oder Beatmungshelm erfolgen. Weitere Möglichkeiten sind u.a. die Larynxmaske oder der Larynxtubus. Hierfür muss jeweils eine geeignete Beatmungsform wie volumen- oder druckkontrollierte bzw. assistierte Ventilationen angewendet werden. Die Bedeutungen von beatmungsbeeinflussenden Faktoren und der verschiedenen Beatmungsmöglichkeiten werden im Folgenden besprochen.

2.2 Atemmechanik, Ventilation und Bedeutung des Ösophagusphinkters

Wichtige physikalische Größen bei der Atmung sind die Compliance und die Resistance der Atemwege, des Thoraxes und der Lungen. Der untere Ösophagusphinkter ist die bedeutendste Barriere bei der Aspiration unter der Überdruckbeatmung mit ungesicherten Atemwegen.

Compliance: Als Compliance wird die Volumendehnbarkeit bezeichnet, definiert als das Volumen, das eine bestimmte Druckzunahme in einem Körper zur Folge hat.¹ Für die beiden Lungenflügel und den Thorax beträgt diese unter gesunden physiologischen Bedingungen bei Ruheatmung 0,1 l/cm H₂O (Schmidt und Thews 1995). Reduziert sich das Lungenvolumen unterhalb des funktionellen Residualvolumens (s.u.), nimmt die Retraktionskraft des Thorax zu, d.h. je kleiner das initiale Gasvolumen intrapulmonal ist, desto geringer ist die Volumendehnbarkeit (Larsen und Ziegenfuß 2004). Bei generalisiertem Muskeltonusverlust können das Lungenvolumen und die Compliance sinken, so dass das eingebrachte Volumen eine größere Druckzunahme zur Folge hat oder ein geringeres Volumen bei gleichem Druck eingebracht werden kann. Ursachen der krankheitsbezogenen Complianceminderung und restriktiver Ventilationsstörung können u.a. sein (Herold 2004):

- Lungenfibrose, z.B. als Folge des ARDS
- Aspirationsfolgen
- Pleuraerguss, pulmonalvenöse Stauung
- neuromuskuläre Erkrankungen

Der reziproke Wert der Compliance wird Elastance genannt und ist ein Maß für die Steifigkeit von Lunge und Thorax.

¹ Anmerkung: Druckangaben erfolgen in cm H₂O **und** in mbar. Grund hierfür ist, dass in dieser Studie Messungen in cm H₂O durchgeführt wurden und dass in der Regel die Druckangaben in der Literatur in cm H₂O angegeben wurden. Demgegenüber stehen Einstellungen an vereinzelt Geräten in mbar. Es gilt:

$$1 \text{ cm H}_2\text{O} = 0,981 \text{ mbar}$$

(Schmidt und Thews 1995). In den Versuchsreihen maximal gemessene 65 cm H₂O führen bei Umrechnung in mbar zu einem maximalen Unterschied von -1,24. Da in der Praxis und zur Interpretation in dieser Arbeit diese Diskrepanz als gering einzustufen ist, werden die ursprünglichen Druckangaben beibehalten. Dies ermöglicht, Druckeinstellung an Respiratoren nachvollziehbar beibehalten zu können und keine praxisfernen Druckangaben (wie z.B. ein eingestellter PEEP von 5,88 cm H₂O bei dementsprechend eingestellten PEEP am Gerät von 6 mbar) machen zu müssen. Gleiches gilt für Angaben zur pulmonalen Compliance und Resistance.

An einer kleinen Gruppe von Patienten mit kongestiver Herzinsuffizienz konnte eine signifikante Verbesserung der pulmonalen Compliance durch eine CPAP-Beatmung (s.u.) gezeigt werden (Lenique et al. 1997).

Davis et al. konnten 1995 zeigen, dass die statische Lungencompliance bei reanimationspflichtigen Patienten unter kardiopulmonaler Wiederbelebung im Mittel um die Hälfte des physiologischen Wertes auf $0,05 \text{ l/cm H}_2\text{O}$ abfällt.

Resistance: Der physiologische Atemwegswiderstand beträgt bei einem gesunden Erwachsenen $2 \text{ cm H}_2\text{O} \cdot \text{l}^{-1} \cdot \text{sek}$ (Schmidt und Thews 1995). Hier wird die Abhängigkeit vom entstehenden Druck zum fließenden Volumen beschrieben analog dem Ohmschen Gesetz der Elektrizitätslehre ($\text{Resistance} = \text{Druckdifferenz} / \text{Flow}$). Der Strömungswiderstand nimmt zu, wenn sich der Querschnitt des Lumens reduziert. Dies wird für die laminare Strömung durch das Hagen-Poiseuille-Gesetz beschrieben. Da in der Lunge aber nur in den kleinen Atemwegen eine laminare Strömung und sonst eine Mischung aus laminarer und turbulenter Strömung zu finden ist, beschreibt das Gesetz nur theoretisch die Auswirkung einer Lumenveränderung im Bronchialbaum (Rathgeber 1999).

Eine Lumenverkleinerung kann durch Fremdkörper, bei Schwellung im Bronchialsystem oder vermehrter Schleimsekretion bzw. mangelndem Schleimabtransport entstehen. Beispiele hierfür sind

- der Asthmaanfall und Status asthmaticus
- die COPD
- die Folgen der Aspiration.

So kann die pulmonale Resistance auf Werte von $8-15 \text{ cm H}_2\text{O} \cdot \text{l}^{-1} \cdot \text{sek}$ bei entsprechenden Lungenerkrankungen zunehmen oder nach Narkoseeinleitung und Maskenbeatmung auch Werte im Mittel um $17 \text{ cm H}_2\text{O} \cdot \text{l}^{-1} \cdot \text{sek}$ annehmen (Wenzel et al. 2000; Weiler et al. 1995). Die pulmonale Resistance ist ebenso wie die pulmonale Compliance durch Anwendung einer CPAP-Beatmung (s.u.) verbesserbar (Lenique et al. 1997).

Lungenvolumina: Die Lungenvolumina sind u.a. Ausdruck des Zusammenspiels von pulmonaler Compliance und Resistance.

Atemfrequenz und Atemzugvolumen in der Ruheatmung sind beim Erwachsenen z.B. vom Alter, Geschlecht und der körperlichen Konstitution geprägt. Beide Atemparameter zusammen ergeben das Atemminutenvolumen. Durch diese Abhängigkeiten entstehen per se bereits leichte Unterschiede in den Größenangaben dieser Parameter in der Literatur.

In der folgenden Tabelle sind Atemgrößen aus Referenzwerken von vier ausgesuchten Autoren angegeben:

Parameter bei Ruheatmung	<u>Schmidt und Thewes 1995</u> Physiologie des Menschen	<u>Roissant et al. 2008</u> Die Anästhesiologie	<u>Rathgeber 1999</u> Grundlagen der maschinellen Beatmung	<u>Larsen und Ziegenfuß 2004</u> Beatmung
Atemfrequenz	10-18/min	8-16/min	6-16/min	7-20/min
Atemzugvolumen	500 ml	7 ml/kg	8-10 ml/kg	350-850 ml
Atemminutenvolumen	7 l/min	90-100 ml/kg	90-100 ml/kg	6-10 l/min

Tab. 1: Atemparameter unter Ruheatmung

Diese Parameter unterliegen weiteren Schwankungen, verursacht durch physiologische Unterschiede, wie z.B. unter körperlicher Belastung. Aber auch pathophysiologische Ursachen, beispielsweise psychisch oder metabolisch bedingte Hyperventilation oder Hypoventilation durch atemdepressiv wirkende Medikamente, Verletzung des Stammhirns oder durch Muskeldystrophien sind denkbar.

Die Variabilität der pulmonalen Funktionsparameter ist zusätzlich durch die Möglichkeit zur Erhöhung der Atemfrequenz, aber auch durch die Nutzung der Reservevolumina der Lunge zu erklären, die neben dem beschriebenen Ruheatemzugvolumen noch durch vertiefte Inspiration (inspiratorisches Reservevolumen ca. 3000 ml) und Expiration (expiratorisches Reservevolumen ca. 1000 ml) das Atemzugvolumen deutlich vergrößern können (Rathgeber 1999, Larsen und Ziegenfuß 2004). Reservevolumen und Ruheatemzugvolumen werden als Vitalkapazität bezeichnet. Diese beträgt in Litern unter physiologischen Bedingungen $7 \cdot (\text{Körpergröße [m]} - 1)$. Die Vitalkapazität liegt bei Männern im Durchschnitt um 10-20 % höher als bei Frauen und umfasst ca. 75% der Totalkapazität. Die weiteren 25 % der Totalkapazität werden durch das Residualvolumen bestimmt, das in der Lunge verbleibt (Rathgeber 1999). Die Totalkapazität umfasst somit das gesamte Volumen der Lunge. Vital- und Totalkapazität reduzieren sich im Laufe des Lebensalters, das Residualvolumen nimmt zu (Schmidt und Thews 1995).

Compliance und Resistance sind entscheidende physikalische Größen, die diese Beatmungsgrößen mit beeinflussen.

Unter physiologischen Bedingungen wird so die alveoläre Ventilation sichergestellt, also der Gasaustausch in den Alveolen, der im Vergleich zur Gesamtventilation um den Teil kleiner ist, der bereits bei Lungengesunden nicht am Gasaustausch teilnimmt. Dieser anatomische Totraum beträgt in Millilitern das doppelte Körpergewicht (Schmidt und Thews, 1995). Zusammen mit dem alveolären Totraum, der beim Gesunden nur einen kleinen Teil ausmacht, ergibt sich der funktionelle Totraum.

Das Residualvolumen ist das Volumen, das auch unter tiefster Expiration in den Lungen verbleibt. Das Residualvolumen und das expiratorische Reservevolumen beschreiben die funktionelle Residualkapazität (FRC). Diese Kapazität der Lunge stellt unter Normalbedingung einen Sicherheitspuffer gegen Schwankungen des Gasaustausches dar und ermöglicht den Gasaustausch auch während der Expiration (Rathgeber 1999, Larsen und Ziegenfuß 2004). Beim Atemstillstand bestimmt die FRC die Sauerstoffreserve der Lunge. Je größer diese Kapazität und je höher der Sauerstoffpartialdruck bzw. -konzentration in diesem Volumen, desto länger kann der Patient eine Apnoe ohne Schaden überstehen. Auf dieser Grundlage findet die Präoxygenierung vor Narkoseeinleitungen statt, bei der versucht wird, den Stickstoff in der Lunge durch Sauerstoff zu ersetzen (Roissant et al. 2008).

Bedeutung der Ventilation für den Gasaustausch: Der alveoläre Gasaustausch findet aufgrund der Partialdruckgefälle der Gase zwischen Alveole und Blut und der Gasgröße bzw. Gasschwere statt. Je höher der Partialdruck eines Gases in der Alveole und je niedriger dieser im Blut, desto größer ist die Gasaufnahme des Blutes. Für Sauerstoff gilt hierbei, dass der Partialdruck zum Ende der Inspiration alveolär zunimmt. Am Anfang der Inspiration besteht die alveoläre Luft aus dem Gasgemisch der Expiration, nachdem sich Partialdrücke für Sauerstoff zwischen Alveole und Blut bei der vorherigen Inspiration bereits teilweise angeglichen haben. Dieses Gasgemisch befindet sich auch in den luftleitenden Lungenbereichen (Trachea, Bronchien, etc.) die nicht am Gasaustausch teilnehmen. Sie bilden den anatomischen Totraum. Der alveoläre Sauerstoffpartialdruck nimmt während der Inspiration erst zu, wenn der anatomische Totraum überbrückt, das Pendelvolumen des Totraums mit genügend Frischgas (mit einem höheren Sauerstoffpartialdruck) gemischt ist und die Alveolen erreicht (Larsen und Ziegenfuß 2004).

Der alveoläre Totraum beschreibt die Alveolen, die funktionell nicht am Gasaustausch teilnehmen, z.B. in einem atelektatischen Bereich der Lunge. Hierbei kann es konsekutive zur

Abnahme der Durchblutung kommen (hypoxische Vasokonstriktion nach Euler-Liljestrand) (Rathgeber 1999). Bleibt die hypoxische Vasokonstriktion aus, fließt weiterhin Blut durch die Pulmonalarterien minderbelüfteter Lungenbereiche. Durch den pulmonalen Recht-Links-Shunt ist die verminderte Oxygenierung des Blutes die Folge. Rothen et al. konnten 1998 nachweisen, dass Patienten, die eine Allgemeinanästhesie bekommen, Atelektasen ausbilden. Diese zeigen lineare Korrelation zum pulmonalen Shuntanteil. Gunnarsson et al. haben 1991 bei fast 90% der untersuchten Patienten eine neue Atelektasenbildung nach Inhalationsnarkose gefunden. Als Ursachen hierfür kann u.a. eine inhomogene Verteilung des Tidalvolumens in Narkose mit bevorzugter Ventilation ventraler Lungenabschnitte in Rückenlage angesehen werden. Dies ist Folge einer veränderten Zwerchfellgeometrie bei passiver Bewegung durch Überdruckbeatmung (Rehder et al. 1977, David et al. 2010).

Atelektasen entstehen nach Narkoseeinleitung und können mehrere Tage nach der Operation noch vorhanden sein (Lindberg et al. 1992).

Das alveoläre Minutenvolumen ist das Produkt aus Atemfrequenz und Atemzugvolumen, vermindert um das Totraumvolumen ($AMV(\text{alveolär}) = AF * (AZV - \text{Totraumvolumen})$) (Larsen und Ziegenfuß 2004).

Durch diesen Zusammenhang wird deutlich, dass eine gesteigerte Atemfrequenz in gewissen Grenzen die Abnahme des Atemzugvolumens ausgleichen kann. Je weiter sich jedoch das AZV dem Totraumvolumen annähert, desto geringer wird die alveoläre Ventilation und damit der Gasaustausch in der Alveole (Annäherung der Partialdrücke zwischen Gas und Blut). Ab 4 ml/kg KG ist eine suffiziente alveoläre Ventilation nicht mehr gegeben (Roissant et al. 2008).

Weiterer Effekt eines geringen Atemzugvolumens ist die reduzierte Entfaltung der Lunge mit Atelektasenbildung. Roissant et al. (2008) fordern aus diesem Grund die Narkosebeatmung zunächst mit 10 ml/kg KG durchzuführen mit dem Ziel, die funktionelle Residualkapazität, die in Narkose in der Regel um 20% abfällt (Wahba 1991), wieder zu vergrößern. Demgegenüber steht eine Studie von Cai et al. aus dem Jahr 2007. Hier konnte bei Patienten nach Narkoseeinleitung per Computertomographie kein Unterschied in der Ausbildung von Atelektasen zwischen einer Beatmung mit 10 ml/kg KG und 6 ml/kg KG Tidalvolumen nachgewiesen werden.

Der Kollaps kleiner Atemwege kann auch durch die Anwendung eines endexpiratorischen Drucks (PEEP) reduziert werden, der die funktionelle Residualkapazität erhöht und der Bildung von Atelektasen entgegenwirkt (Tokics et al 1987, Pelosi und Rocco 2007). Resultat

kann die Umverteilung des Shuntblutes (Hedenstierna et al. 1984) und eine Zunahme der Oxygenierung (Wetterslev et al. 2001) sein.

Aber nicht nur zu geringe Tidalvolumina und insuffizienter PEEP können schädlich sein, auch zu hoch gewählte Tidalvolumina bzw. eine inadäquate Kombination aus Tidalvolumen und PEEP haben sich als bedrohlich herausgestellt und können Lungensubstanz schädigen (Villar et al. 2009, Hong et al. 2010). Beatmungsassoziierte Lungenschäden können einerseits durch hohe Tidalvolumina mit Überdehnung des Lungenparenchyms entstehen. Dies wird Volutrauma genannt und beinhaltet verschiedene Veränderungen der Lunge wie diffuse Alveolarschäden, erhöhte epitheliale und mikrovaskuläre Permeabilität und somit erhöhte Gefahr der interstitiellen und alveolären Flüssigkeitsinfiltration. Andererseits können Lungenparenchymschäden auch durch Scherkräfte auftreten, die bei häufigem zyklischen Eröffnen und Verschließen von Atelektasen auftreten. Hier entsteht als Atelekttrauma die Ruptur von Basalmembranen und Epithelien. Auf Basis des mechanisch-physikalischen Auslösers wird ersteres als *high lung volume injury* und das Zweite als *low lung volume injury* bezeichnet (Slutsky 1999, David et al. 2010).

Auf u.a. diesen Grundlagen beruht die „lungenprotektive Beatmung“ bei Patienten mit ARDS (Engelmann 2000). Niedriges Tidalvolumen (6 ml/kg ideales Körpergewicht) und die Limitierung des Inspirationsdrucks auf unter 30 mbar zur Vermeidung eines Barotraumas sind momentane Eckpfeiler der „lungenprotektiven Beatmung“. Volumen und Druckbegrenzung haben beim ARDS-Patienten zu einer signifikanten Reduktion der Mortalität geführt (Amato et al. 1998). Die Anwendung eines PEEP gehört ebenso zum Standard (Amato et al. 1998), jedoch ist der optimale PEEP schwierig zu finden. Er sollte hoch genug sein, um die FRC über das Volumen, bei dem endexpiratorische kleine Atemwege kollabieren (*closing capacity*), anzuheben. Er sollte aber nicht mit dem maximalen inspiratorischen Spitzendruck zum Barotrauma führen oder im Gegenzug das Tidalvolumen insuffizient werden lassen. Dieser Bereich des optimalen PEEPs liegt im steilen Anteil der pulmonalen Druck-Volumen-Kurve, zwischen oberen und unteren *inflection point* (Engelmann 2000). Demgegenüber haben Phoenix et al. 2009 in einer Meta-Analyse keinen signifikanten, positiven Effekt auf die Mortalität bei ARDS durch einen „hohen“ PEEP (über 10 cm H₂O) gefunden.

Die Entstehung beatmungsassoziiertes Lungenschäden ist auch bei vorher gesunder Lungenstruktur in Tierversuchen nachgewiesen worden (Dreyfuss et al. 1985, Chu et al. 2004). Hohe Tidalvolumina mit oder ohne PEEP (Villar et al. 2009) und auch hoher PEEP (10 cm H₂O) mit niedrigem Tidalvolumen (Hong et al. 2010) haben in Studien einen Anstieg von

proinflammatorischen Mediatoren ausgelöst. Resultat einer Beatmung mit unzureichenden Beatmungsgrößen kann das Biotrauma mit inflammatorischer Reaktion sein, das dem Bild des ARDS entsprechen kann (Slutsky 1999, Pinhu et al. 2003).

Es zeigen sich kontroverse Ergebnisse zum PEEP und zum Tidalvolumen, die letztendlich schlussfolgern lassen, dass es keine standardisierten Rezepte gibt, sondern für jeden Patienten, in der jeweiligen Situation mit seinen individuellen Erkrankungen die ideale Beatmung gefunden werden muss. Diese These wird von Pelosi et al. unterstützt, die in ihrer Studie 1999 zwar einen positiven Effekt eines PEEP von 10 mbar bei adipösen, anästhesierten Patienten gesehen haben, demgegenüber aber die Auswirkung auf Atemmechanik und Oxygenierung nicht in einem unselektierten Patientenkollektiv ausmachen konnten. Hier verursachte der PEEP im Mittel sogar eine Verschlechterung der Oxygenierung. Unter Spontanatmung liegt ein intrinsischer endexpiratorischer Druck von ca. 5 mbar vor (Oczensky 2008).

Ösophagussphinkter: Der untere Ösophagussphinkter grenzt den Ösophagus vom Magen ab. Er hat eine anatomische Länge zwischen 2 und 5 cm (Cotton und Smith 1984; Power und Kam 2008). Durch seine glatte, zirkuläre Muskulatur wird ein Verschluss tonus aufgebaut. Er wird als wichtige und bedeutende Barriere gegen den Reflux von Magensäure bzw. Regurgitation von Mageninhalt und letztlich gegen die Aspiration gesehen (Cotton und Smith 1984, Weiler et al. 1995, Wenzel et al. 2000). Je nach Literatur wird ein Sphinktertonus von ca. 20 cm H₂O teilweise auch 15 oder 30 cm H₂O angegeben (Cotton und Smith 1984, Melker 1986, Lawes und Baskett 1987, Weiler et al. 1995). Die Funktion unterliegt verschiedensten (bio-) chemischen, physikalischen, anatomischen und auch individuellen Schwankungen. Der Tonus des Muskels kann unter Medikamentenwirkungen zu oder abnehmen (Cotton und Smith 1984, Brocke-Utne und Downing 1986). Der Sphinktertonus ist in verschiedenen Bereichen des unteren Ösophagussphinkters unterschiedlich. So nimmt er kurz nach seinem Durchtritt durch das Diaphragma bis auf einen maximalen Druck zu, um dann nach kaudal zum Magen hin wieder abzunehmen (Lind et al. 1968, Winans 1972, Cotton und Smith 1984). Auch die anatomischen Begebenheiten (Hiatushernie, Lage zum Diaphragma) können die Funktion des Sphinkters beeinflussen. Bei einem veränderten Winkel zwischen Speiseröhre und Magen kann der physiologische Klappenventilmechanismus, der durch diesen Winkel ermöglicht wird, funktionell verloren gehen. So ist es möglich, dass es trotz normalen Sphinkterverschluss tonus zur Refluxneigung kommt. Bei Zunahme des gastral bzw. intraabdominellen Drucks, nimmt der Sphinktertonus zu. Reagiert der Sphinkter nicht akkurat auf den intragastralen Druck kann es auch durch diese Beziehung zum Reflux kommen (Cot-

ton und Smith 1984, Lind et al. 1968, Power und Kam 2008). Der Schutz vor Regurgitation wird also besser durch dieses Druckverhältnis ausgedrückt.

Um die Schutzfunktion vor Regurgitation zu beschreiben, wird auch vom *barrier pressure* gesprochen, der Druckdifferenz zwischen Sphinkterdruck und gastralem Druck. Normalerweise liegt dieser Ruhedruck des Sphinkters 15-25 mm Hg (dies entspricht 20,4 – 34 cm H₂O) über dem gastralen Druck (Cotton und Smith 1984, Power und Kam 2008).

Im Tierexperiment wurde bei künstlichem Herzkreislaufstillstand ein Abfall des Verschlussdrucks des unteren Ösophagussphinkters innerhalb von sieben Minuten von 20.6 +/- 2.8 auf 3.3 +/- 4.2 cm H₂O gemessen. Auch nach Wiederherstellen des Spontankreislaufes war der Sphinktertonus noch minutenlang mit ca. 10 cm H₂O verringert (Bowman et al. 1995).

Die Höhe des Drucks, wie auch des *barrier pressure* ist somit unvorhersehbar. Individuelle Unterschiede, Medikamentengabe und Situation des Patienten lassen keine sichere Aussage über die Kompetenz des Sphinkters zu, den Reflux von Magensäure zu verhindern.

Folge des Überschreitens des Verschlussstonus bzw. des *barrier pressure* kann durch Reflux bzw. Regurgitation von Mageninhalt die Aspiration sein.

Bei der Narkoseeinleitung wird davon ausgegangen, dass die Maskenbeatmung unterhalb von 20 cm H₂O nicht den Sphinktertonus übersteigt (Weiler et al. 1995).

Der obere Ösophagussphinkter wird in dieser Arbeit nicht betrachtet. Druckwerte unter physiologischen Bedingungen werden mit 39 +/- 20 cm H₂O angegeben. Der obere Sphinkter reagiert u.a. auf Anästhetika sehr sensibel. Bei Thiopentalnarkosen fallen die Druckwerte auf Werte von ca. 9 cm H₂O noch vor Bewusstseinsverlust ab. Zu ähnlichen Druckabfällen kam es bei Gabe von Midazolam, jedoch nicht bei Ketamin (Vanner et al. 1992). So scheint dem unteren Ösophagussphinkter die größere Bedeutung für die Vermeidung der Regurgitation und Aspiration zuzukommen.

Aspiration: Die Aspiration ist das „Einatmen“ von Sekreten, Fremdkörpern oder Mageninhalt. Diese führt zu

- Bildung von Atelektasen durch Verlegung der Atemwege oder reaktives Anschwellen der Bronchialschleimhaut bzw. Bronchospasmus
- diffusem Alveolarschaden mit serofibrinöser Exsudatreaktion (Lungenödem, Mikrothromben der Lungenendstrombahn, hyaline Membrane), Schädigung der Alveozyten Typ I, fibrotischen Umbauvorgängen.

Daraus resultieren Störungen der Diffusion und der Perfusion (Riede und Schäfer 1999, Larsen 2002). Besondere Bedeutung kommt der Aspiration von Mageninhalt bzw. Magensäure

aufgrund des niedrigen pH-Wertes zu. Ab einem pH-Wert $< 2,5$ besteht die Gefahr, ein akutes Lungenversagen (ARDS) im Verlaufe des sogenannten Mendelson-Syndroms mit hoher Letalität (20-50%) zu entwickeln. (Larsen 2002, Larsen und Ziegenfuß 2004, Roissant et al. 2008).

Folgen für die Beatmung: Im Unterschied zur Spontanatmung sind unter maschineller Beatmung in der Inspirationsphase die intrathorakalen Drücke positiv (Larsen und Ziegenfuß 2004, Rathgeber 1999). Dieser Überdruck kann zu Aspiration bei ungesicherten Atemwegen führen. Aber auch die oben beschriebenen Pathologien und Veränderungen des unteren Ösophagussphinkters können bei reduzierten Schutzreflexen zur Aspiration bei ungesicherten Atemwegen führen, tendenziell als Mikroaspiration auch bei gesicherten Atemwegen. Die Gefahr ist bei ungesicherten Atemwegen z.B. bei nicht-invasiver Ventilation (NIV) unter Maskenbeatmung jedoch durch das Fehlen eines Tubuscuffs und durch die Überdruckbeatmung über den oberen Atemweg deutlich erhöht. Das Risiko, unbeabsichtigt die Speiseröhre und den Magen mit resultierender gastralischer Überblähung zu ventilieren, ist hoch. Wenn die Lungencompliance sinkt, steigt bei konstantem Atemzugvolumen notgedrungen der Atemwegsdruck. Steigt dieser Druck über den Ösophagusverschlussdruck wird das Gasvolumen über den Weg des geringsten Widerstandes in den Magen geleitet (Döriges et al. 2001, Wenzel et al. 1997, Wenzel et al. 1998 a). Der Magen wird aufgebläht, bis der Druck auch intragastral den Verschlussdruck des Sphinkters übersteigt (*barrier pressure*) und Mageninhalt in den Ösophagus fließen kann.

Die Reduzierung des Verschlussdrucks des unteren Ösophagussphinkters kann diesen Zustand verschlimmern und würde zum früheren Erreichen der Schwelle zur gastrischen Insufflation führen. Diese Komponente des aufgeblähten, vergrößerten Magens wirkt durch Hochverlagerung des Diaphragmas wiederum negativ auf die Lungencompliance ein (Döriges et al. 2001, Wenzel et al. 1997). Konsekutive Atelektasenbildung können zu einer Ventilations-Perfusionsstörung der Lunge und wiederum zur Abnahme der Oxygenierung des Blutes führen (Rothen et al. 1998). Die Umverteilung des Atemzugvolumens von der Lunge in den Magen nimmt zu (Wenzel et al. 1997).

Aus reduzierten Atemzugvolumina können je nach Ausmaß selber alveoläre Mangelventilationen resultieren (Roissant et al. 2008). Die folgende Abbildung soll den Verlauf des Circulus vitiosus unter Berücksichtigung der oben erwähnten Faktoren veranschaulichen:

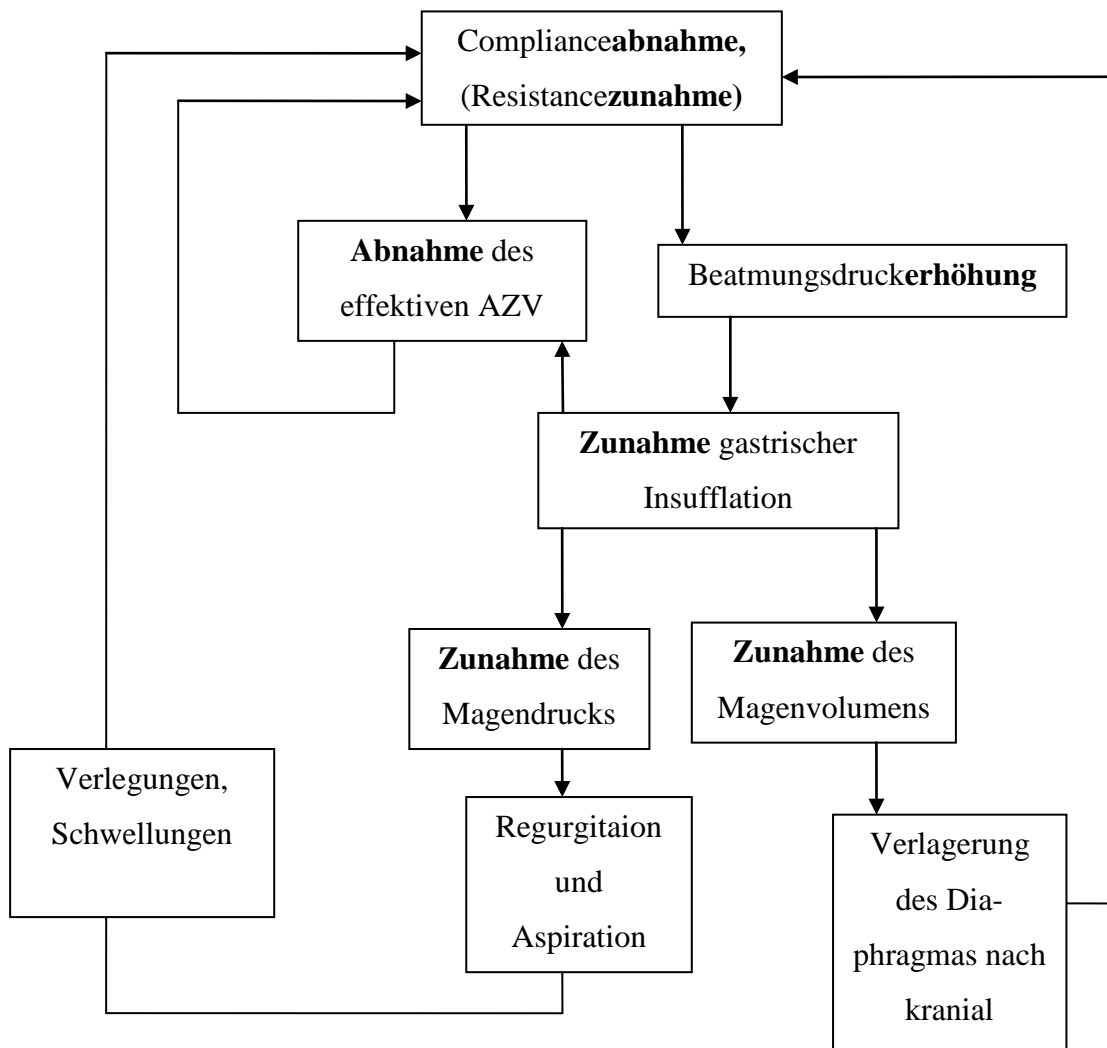


Abb. 1: Circulus vitiosus: NIV und Überschreitung des Ösophagusphinkterdrucks (selbst erstelltes Schema²)

Diese Zusammenhänge zeigen die Bedeutung der Mageninsufflation und Aspiration bei Überdruckbeatmung in ungesicherten Atemwegen.

Es ist also erforderlich, eine adäquate Beatmungstherapie für die jeweilige Patientensituation zu finden.

Durch den Oxylator[®] EM-100 soll die nicht-invasive Beatmung mit reduzierter Gefahr der Magenbeatmung möglich sein. Dies soll durch einen konstant hohen, rechteckförmigen Inspi-

² Nach dem Erstellen dieses Schemas sind bei Sichtung weiterer Literatur ähnliche Schemata von unterschiedlichen Autoren gefunden worden, deren Literatur hier aus wissenschaftlichen Gründen Erwähnung finden sollte, da sie zur weiteren Überarbeitung genutzt wurde: Dörges et al. 2001, Wenzel et al. 1998 a, der wiederum eine Abbildung von Ruben et al. 1961 verwendet hat. Da die Literatur von Ruben et al. von 1961 nicht einsehbar war, findet sich diese nicht im Literaturverzeichnis wieder.

rationsflow gewährleistet werden (Romeo Worner, President of CPR, Toronto, Canada: persönliche Mitteilung).

Osterwalder und Schuhwerk haben 1998 den Oxylator[®] EM 100 und den Ambu[®]-Beutel Mark III unter simulierten Reanimationsbedingungen miteinander verglichen. Sie haben 72 medizinisch ausgebildete Probanden eine Simulationspuppe über einen ungesicherten Atemweg mit beiden Beatmungsgeräten beatmen lassen. Die Parameter der Simulationspuppe wurden auf eine Lungencompliance von 0,05-0,055 l/cm H₂O eingestellt und der Eröffnungsdruck für die gastrale Insufflation betrug 30 cm H₂O. Der Oxylator[®] wurde mit einem Umschaltdruck von 35 cm H₂O manuell betrieben. Als Ziel wurden eine Atemfrequenz von 10-12/min innerhalb der Thoraxkompressionspausen und ein AZV von 0,8 bis 1,2 l festgelegt. Die Probanden beatmeten den Simulator zunächst mit dem Oxylator[®], danach mit dem Ambu[®]-Beutel. Das Ergebnis war, dass die Probanden mit dem Ambu[®]-Beutel nur in 15% ein mittleres Atemzugvolumen über 800 ml (unterer Grenzwert) generieren konnten. Mit dem Oxylator[®] konnten es fast 99% der Anwender. Bei 42 % der Probanden kam es zu einer gastralen Insufflation mit dem Ambu[®]-Beutel. Mit dem Oxylator[®] wurde keine gastrale Insufflation festgestellt.

2.3 Beatmungsoptionen bei der respiratorischen Insuffizienz – invasive vs. nicht-invasive Ventilation

2.3.1 Allgemeine Therapieprinzipien

Die Therapie ist abhängig von der Genese, dem Schweregrad der respiratorischen Insuffizienz und dem Allgemeinzustand des Patienten. Bei einer partiellen Insuffizienz kann in leichten Fällen die Insufflation von Sauerstoff via Nasensonde oder Sauerstoffmaske ausreichend sein. Gegebenenfalls muss ein Offenhalten der Atemwege durch einen Guedel- oder Wendeltubus ermöglicht werden. Als unterstützende Maßnahmen kann auch eine Veränderung der Körperlage z.B. eine Oberkörperhochlagerung zur Verbesserung der Effizienz der Atemhilfsmuskulatur oder auch zur Herzentlastung bei kardial bedingter pulmonalvenöser Stauung, sowie medikamentöse Behandlung indiziert sein.

Die möglichen Ventilationsmaßnahmen können über eine Gesichtsmaske mit Beatmungsbeutel oder mit einem geeigneten mechanischen Beatmungsgerät erfolgen. Patienten mit unzureichender Spontanatmung können assistiert beatmet werden, so dass mindestens die suffiziente Sauerstoffversorgung gewährleistet wird. So ist bei wachem Patienten mit COPD-Exazerbation eine andere Beatmung zu wählen als beim reanimationspflichtigen Patienten.

In einer Befragung von 34 Kliniken ist durch Becker et al. 1999 eine Stichpunktanalyse erstellt worden (Becker et al. 2003). Dabei wurden Kliniken bzw. Abteilungen, die zur Arbeitsgruppe Beatmung der DIVI (Deutsche Interdisziplinäre Vereinigung für Intensiv- und Notfallmedizin) gehörten, über die Beatmung von Patienten auf der Intensivstation zu einem festen Zeitpunkt befragt. 160 Patienten waren über 24 Stunden lang beatmet, davon 52 (32,5%) nicht-invasiv (NIV), die restlichen Patienten wurden invasiv ventiliert (IV). Hauptgründe der Beatmung waren OP, Trauma, Pneumonie und COPD. Invasive Beatmungsmodi waren meist kontrollierte mechanische (CMV) oder druckunterstützte (PSV) Verfahren (64%). Bei nicht-invasiven Ventilationen wurden CMV und PSV ebenfalls eingesetzt, aber häufiger als bei der IV auch BiPAP oder CPAP.

Die Beatmungsmuster und -formen sollen im Folgenden kurz erläutert werden.

2.3.2 Beatmungsmuster und -formen

Als Beatmungsmuster werden die zeitlichen Verläufe von Flow, Druck und Volumen beschrieben. Die Beatmungsform kennzeichnet das Zusammenspiel von Patient und Respirator. Im Bereich des Respirationszyklus (Inspiration und Expiration) kommt es durch den inspiratorischen Flow, der das fließende Volumen pro Zeiteinheit beschreibt, zum Ansteigen des pulmonalen Drucks.

Je nach Möglichkeiten des Beatmungsgerätes können verschiedene **Flowformen** gewählt werden: Rechteck- oder Konstantflow bedeutet, dass der inspiratorische Flow durchgehend konstant hoch ist. Dezelerierender oder abnehmender Flow bedeutet, dass dieser mit der Dauer des Atemhubs abnimmt. Dies führt zu einem relativ niedrigeren Spitzendruck. Der Atemwegmitteldruck ist erhöht. Akzelerierender Flow bedeutet, dass das Volumen pro Zeiteinheit zunimmt. Der Atemwegmitteldruck ist niedriger, der Spitzendruck nimmt zu.

Der Sinusflow ist durch ein ansteigendes und ein absteigendes Volumen pro Zeit in Sinusform gekennzeichnet, entsprechend der Spontanatmung (Rathgeber 1999).

Die hierdurch entstehenden **Beatmungsdrücke** gliedern sich in den maximalen Spitzendruck mit möglicher nachfolgender Plateauphase, in der kein Volumen fließt, und den endexpiratorischen Druck. Der maximale Spitzendruck ist Folge des Inspirationsflows. Das Plateau kann genutzt werden, um durch anhaltenden Druck in den Atemwegen das intrapulmonale Volumen in Lungenarealen mit unterschiedlichen Volumendehnbarkeiten und Atemwegswiderständen auszugleichen (Rathgeber 1999).

Ebenso wie die Beatmungsmuster ist somit die Auswahl der Beatmungsform wichtig. Nicht alle Ventilatoren weisen die gleichen Einstellungsmöglichkeiten auf:

Je nach Beatmungsgerät wird bei **volumenkontrollierter Beatmung (VCV)** das Atemzugvolumen und die Atemfrequenz festgelegt oder das Atemminutenvolumen und die Atemfrequenz. Beides führt zur Beatmung mit definierten Volumina. Hierbei können hohe Inspirationsdrücke erreicht werden. Gerade bei mangelhaft sedierten oder hustenden Patienten kann es zu Lungenschäden durch Zerreißen von Lungenstrukturen bzw. bei langfristig hohen Drücken zu pulmonalen Gewebeumbau kommen. Die Möglichkeit zur Einstellung einer Druckbegrenzung ist hier somit Pflicht. Wird diese Druckbegrenzung nicht erreicht, ist die volumenkontrollierte eine volumenkonstante Beatmung (Rathgeber 1999).

Bei **druckkontrollierter Beatmung (PCV)** wird die Frequenz und der inspiratorische Spitzendruck festgesetzt. Dem Patienten wird das Inspirationsvolumen zugeführt, bis die eingestellte Inspirationszeit erreicht ist (zeitgesteuert). Der Flowverlauf ist hier dezelerierend. Ein Abbruch der Inspiration durch Erreichen des eingestellten Spitzendrucks wird als druckgesteuert bezeichnet.

Es kann zu kurzfristigen hohen Spitzendrücken kommen. Hierbei kann durch Nichtbeachtung des Inspirationsvolumens eine Hypoventilation oder Hyperventilationen entstehen. Bei beiden Formen kann die Atemfrequenz fest eingestellt werden oder ein Resultat des eingestellten Inspirations-Expirations-Quotienten sein (Rathgeber 1999).

Durch **assistierte Beatmungsformen** ist es geräteabhängig unterschiedlich möglich, den insuffizient spontan atmenden Patienten durch maschinelle Beatmung zu unterstützen. Hierbei soll durch das Gerät synchron zur Patientenatmung das Tidalvolumen vergrößert und/oder die Atemfrequenz durch zusätzliche Atemzyklen ergänzt werden. Bei Spontanatmung kommt es zu Flow- oder Druckveränderungen im Respirationssystem, die als Trigger (Auslöser) für das Beatmungsgerät dienen. Sinnvoll sind die assistierten Beatmungsformen, um dem Patienten die für die kontrollierten Formen notwendige tiefe Sedierung zu ersparen. Die Patienteneigen-

atmung wird nicht unterdrückt, sondern solange unterstützt, bis die Spontanatmung wieder ausreicht (*Weaning*) (Rathgeber 1999).

Als Beispiele für assistierte Beatmungsformen seien die SIMV (*Synchronized Intermittent Mandatory Ventilation*), das ASB (*Assisted Spontaneous Breathing*) oder auch PSV (*Pressure Supported Ventilation*) und das BIPAP (*Biphasic Intermittent Positive Airway Pressure*) genannt. Da bei diesem Versuchsaufbau keine assistierte Beatmung möglich ist, werden diese Beatmungsformen nicht weiter erörtert.

Unter CPAP (*Continuous Positive Airway Pressure*) atmet der Patient selber bei kontinuierlich positivem Atemwegsdruck. Dieser ist bei der NIV das untere Druckniveau. Der kontinuierliche Druck verhindert hierbei das Kollabieren von Alveolen und hemmt die Dystelektasenbildung analog zum PEEP unter kontrollierter Beatmung (Rathgeber 1999).

Neumann et al. zeigten 1998, dass die Lunge bei unzureichendem positivem endexpiratorischen Atemwegsdruck zum zyklischen Atemwegkollaps mit inspiratorischer Wiedereröffnung neigt. Hierbei kann es zur Lungenschädigung (Atelektrauma) kommen.

Sonderfall bei Beatmung während kardiopulmonaler Reanimation: In den vergangenen Jahren hat sich die Tendenz durchgesetzt, geringere Atemzugvolumina während der kardiopulmonalen Reanimation anzuwenden. Die AHA (*American Heart Association*) forderte 1992 noch ein Atemzugvolumen von 800-1200 ml (*Guidelines for cardiopulmonary resuscitation and emergency cardiac care; Adult basic life support*). Von verschiedenen Autoren wurden Vorteile auf die gastrale Insufflation durch eine Limitierung des Tidalvolumens bei geringeren Volumina erkannt (Wenzel et al. 1998 b, Döriges et al. 2001). In den *Guidelines* 2000 des *European Resuscitation Council* (ERC) wurde das Tidalvolumen reduziert und sollte ca. 700 bis 1000 ml (bzw. 8-10 ml/kg Körpergewicht) bei Raumluft betragen (de Latorre et al. 2001). Wenn die Anreicherung des Beatmungsgases mit Sauerstoff möglich ist, sollten Atemzugvolumina zwischen 400 und 600 ml (bzw. 6-7 ml/kg Körpergewicht) gewählt werden, um die Aufblähung des Magens und folgende Regurgitation und Aspirationsgefahr zu verringern. Die Inspirationsdauer sollte ungefähr 1 bis 2 Sekunden betragen, so dass einerseits Beatmungsspitzen drücke verringert und andererseits suffiziente Expirationen bzw. kreislaufwirksame Thoraxkompressionen bei der kardiopulmonalen Reanimation ermöglicht werden. Seit 2005 hat die Bedeutung der möglichst kontinuierlichen Herzdruckmassage zugenommen. Die ERC limitierte das Atemzugvolumen generell auf 500–600 ml beim Erwachsenen. Diese Werte scheinen zur Oxygenierung ausreichend zu sein. Das AZV von einem Liter wird hier offiziell als schädlich bezeichnet. Als Grund dafür wird ein erhöhter intrathorakaler Druck mit Ver-

minderung des venösen Rückflusses und erhöhte Magenblähung unter nicht-invasiver Beatmung angegeben (Handley et al. 2006).

2.3.3 Die invasive Beatmung (IV)

Die invasive Beatmung wird durch endotracheale Intubation bzw. bei länger bestehender Beatmungspflicht durch eine Tracheotomie gewährleistet.

Vorteile der endotrachealen Intubation: Durch die Platzierung des Tubus in der Trachea wird die Beatmung über die oberen Atemwege und somit das Risiko der Magenventilation umgangen. Der Tubuscuff wird in der Trachea geblockt und verschließt sie. Die Möglichkeit, dass Sekrete in die Lunge eindringen, wird somit verringert. Ein Gasverlust retrograd in die oberen Atemwege wird reduziert und eine kontrollierte Beatmung gewährleistet.

Ein Druckplateau in der Inspiration bei druckkontrollierter Ventilation kann das Pendelvolumen zwischen verschiedenen schnell reagierenden Alveolen reduzieren und somit der Vergrößerung der Totraumventilation entgegenwirken.

In den Handlungsempfehlungen für das präklinische Atemwegsmanagement des wissenschaftlichen Arbeitskreises Notfallmedizin der DGAI (Deutsche Gesellschaft für Anästhesiologie und Intensivmedizin e. V.) aus dem Jahr 2012 heißt es: „Die endotracheale Intubation (ETI) gilt als der „Goldstandard“ in der Atemwegssicherung respiratorisch insuffizienter bzw. bewusstseinsgestörter Patienten!“ (Timmermann et al. 2012, Seite 295).

Nachteile der endotrachealen Intubation: Hierbei müssen verschiedene Faktoren erwähnt werden: Steigendes Risiko einer nosokomialen Pneumonie als Resultat der verminderten Fähigkeit des Abhustens von Bronchialsekreten und/oder Atemluftfilterung durch die oberen Atemwege. Bereits in den ersten Tagen auf der Intensivstation steigt das Risiko einer beatmungsassoziierten Pneumonie, wobei die endotracheale Intubation ein hohes Risiko darstellt (Joshi et al. 1992). Das Risiko nimmt mit der Intubationsdauer proportional zu (Fagon et al. 1993). Die Deutsche Gesellschaft für Pneumologie und Beatmungsmedizin e. V. hat 2008 in ihrer S3–Leitlinie zur nichtinvasiven Beatmung als Therapie der akuten respiratorischen Insuffizienz Evidenzlevel definiert. Ein Evidenzlevel I ist beispielsweise gut durch verschiedene Studien und ein bestimmtes Studiendesign belegt. Mit numerischer Zunahme der Eingruppierung sind die Aussagen von Studien qualitativ abnehmend und befinden sich bei Level IV im Bereich der Expertenmeinung. Die Korrelation zwischen Intubationsdauer und Pneumonie ist

nach der Studie von Fagon et al. von 1993 dem Evidenzlevel III b) zugeordnet. Die folgenden Evidenzlevel beziehen sich auf die erwähnte S3-Leitlinie.

Laut Larsen und Ziegenfuß (2004) kann die Mortalität der ventilatorassoziierten Pneumonie abhängig von Dauer der Beatmung und Art des Erregers bis 50 % betragen. In einer Studie von Rello et al. lag die Inzidenz einer ventilatorassoziierten Pneumonie in der Studiengruppe bei ungefähr 9 %. Dies führte zu deutlichen Mehrkosten und einer verlängerten Aufenthaltszeit auf der Intensivstation bzw. im Krankenhaus (Rello et al. 2002) (Evidenzlevel III b). Die Notwendigkeit zur Sedierung und gegebenenfalls der Analgosedierung kann die Störung der Magen-Darm-Motilität, Kreislaufdepression und psychische Veränderungen bedingen (Hoffmann und Welte 1997). Immobilisierung des Patienten und deren Folgen, wie z.B. Thrombose, können weitere Folgen sein. Die Nahrungsaufnahme des sedierten Patienten muss oft über eine Magensonde oder parenteral erfolgen.

Weitere Komplikationen können Verletzungen bei der Intubation oder durch mechanische Belastung der Atemwege und der Schleimhaut durch Tubus und Cuff sein (Ambrosino 1996). Bei 5 bis 10 % der Intensivpatienten kommt es zu prolongierten Beatmungen, die laut Cohen und Booth (1994) zur Ressourcenbelastung einer Intensivstation von mindestens 50% führen. Häufige Krankheitsbilder, die zu einer Langzeitbeatmung führen können, sind die COPD, Herzversagen, Trauma und postoperative Komplikationen (Gillespie et al. 1986, Esteban et al. 1994). Laut Epstein und Vuong (1999) sind keine geschlechterspezifischen Unterschiede in der Mortalität zu erkennen.

Weiterhin sollte erwähnt sein, dass es in einer Studie von Timmermann et al. (2007) gerade im präklinischen Setting zur endobronchialen oder ösophagealen Fehlintonation in fast 11 % bzw. 7 % der untersuchten Intubationen gekommen ist. Auch wenn es hier zumindest zum Erkennen der ösophagealen Fehllage gekommen ist, zeigt diese Studie eindrucksvoll die Gefahr im Bereich des Atemwegsmanagements außerhalb der Klinik, verbunden mit einer Erhöhung der Mortalität durch ösophageale Fehlintonationen.

Die Nachteile der endotrachealen Intubation haben in den letzten Jahren dazu geführt, bei bestimmten Krankheitsbildern die Möglichkeit der Beatmung ohne Intubation (NIV, nicht-invasive Beatmung) näher zu untersuchen.

2.3.4 Die nicht-invasive Beatmung (NIV)

Über eine Beatmungsmaske oder einen Beatmungshelm kann Patienten ein dauerhafter end-expiratorischer Druck in den Atemwegen zur Verbesserung der Oxygenierung generiert werden (CPAP) und /oder die Inspiration mit einem Unterstützungsdruck erleichtert werden (z.B. ASB, BiPAP, PSV), um die Atempumpe zu entlasten (Roessler und Kill 2010). Welcher Beatmungsmodus angewendet wird, hängt u.a. vom Patienten und der zugrunde liegenden Erkrankung ab. Im Weiteren steht NIV für CPAP und nicht-invasive Ventilation gleichermaßen. Die NIV wird klinisch bei verschiedenen Erkrankungen durchgeführt. Hierzu gehört z.B. die chronisch obstruktive Lungenerkrankung (COPD), bei der sich der Gebrauch der NIV in verschiedenen Studien als vorteilhaft erwiesen hat. Die subjektive Dyspnoe in einer COPD-Exazerbation kann unter NIV abnehmen, die Notwendigkeit zur Intubation kann reduziert, die Mortalität und die Dauer des Krankenhausaufenthaltes gesenkt werden (Bott et al. 1993, Brochard et al. 1995). Bei Patienten mit Herzversagen konnte durch CPAP die pulmonale Compliance und Resistance verbessert sowie die Atemarbeit reduziert werden (Lenique et al. 1997).

Benhamou et al. zeigten bereits 1992, dass der arterielle Sauerstoffpartialdruck innerhalb der ersten Stunde NIV bei Patienten mit Exazerbation einer COPD ansteigen kann, wohingegen die Abnahme des Kohlendioxidpartialdrucks längere Zeit benötigt. Die Studie von Servera et al. 1995 bestätigte, wie einige andere hier erwähnte Studien auch, dass es unter der NIV relativ schnell zur Verbesserung der Blutgase und des arteriellen pH-Wertes kommen kann.

Die Rekrutierung von Lungenbereichen, die nicht am Gasaustausch teilnehmen, führt zur Vergrößerung der Gasaustauschfläche und zur Verminderung des intrapulmonalen Rechts-Links-Shunts. Diese Lungenareale müssen somit eröffnet und offen gehalten werden. Dies ist durch erhöhte Inspirationsdrücke und der Anwendung eines PEEPs möglich (Hoffmann und Welte 1997, Lenique et al. 1997, Larsen und Ziegenfuß 2004, Roessler und Kill 2010). Bei Patienten mit Lungenödem oder postoperativen Atelektasen konnte so eine verbesserte Oxygenierung erreicht werden (Welte und Hoffmann 1999; Kindgen-Milles et al. 2000).

Effekte der NIV liegen des Weiteren in der Antagonisierung des intrinsischen PEEPs durch den externen PEEP und in der reduzierten diaphragmalen Atemarbeit durch die maschinelle Druckunterstützung (Appendini et al. 1994, Vitacca et al. 2001).

Der externe PEEP führt ferner zu einer „Schienung“ und zum Offenhalten der oberen Atemwege (Mathru et al. 1996), was die Wirkung von CPAP-Beatmung u.a. bei Patienten mit Schlaf-Apnoe-Syndrom erklärt.

Wysocki et al. konnten 1995 die Reduzierung der Mortalität bei Patienten ohne COPD mit respiratorischem hyperkapnischem Versagen von 66% auf 9% nachweisen. In der gleichen Studie zeigten Patienten ohne Hyperkapnie jedoch eine tendenziell leicht niedrigere Mortalität, wenn nur konventionell, ohne NIV, behandelt wurde. Plant et al. bestätigten 2000 bei COPD-Patienten die Reduzierung der Mortalität und Intubationshäufigkeit durch NIV.

Das kardiale Lungenödem kann effektiv durch CPAP-Beatmung behandelt werden, wobei die Verbesserung klinischer kardiopulmonaler Parameter wie z.B. Atemfrequenz und Verbesserung des Blutdrucks durch CPAP, nicht aber durch Sauerstoffinsufflation erreicht werden kann (Väisänen und Räsänen 1987). Beim kardial-bedingten Lungenödem führt eine Überdruckbeatmung zur Abnahme der Vorlast und Zunahme der Nachlast des rechten Herzens und folglich zur Vorlastsenkung des linken Herzens. Der transmurale Druckgradient des Herzens nimmt ab, das Herzzeitvolumen kann zunehmen (Lenique et al. 1997, Hoffmann und Welte 1997). Demgegenüber konnten Liston et al. 1995 jedoch zeigen, dass Patienten mit einer kardialen Ejektionsfraktion unter 30 % während CPAP von nur 5 cm H₂O nach 2 Stunden eine deutliche Abnahme des *Cardiac Index* (gemessen über Rechtsherzkatheter) zeigten. Die Patientenzahl betrug jedoch nur 7, von denen 6 ein Vorhofflimmern aufwiesen. Eine andere Studie zeigte gehäuft Myokardinfarkte während der NIV mit BiPAP bzw. BiLevel (Mehta et al. 1997). Auch Ho und Wong (2006) und Peter et al. (2006) haben eine leichte, aber nicht signifikante Tendenz zum Myokardinfarkt unter BiPAP ausmachen können. In Metaanalysen zeigte sich für CPAP keine signifikante Zunahme der Myokardinfarkthäufigkeit bei Patienten mit kardialem Lungenödem, wohl aber eine signifikant niedrigere Mortalitätsrate (Masip et al. 2005, Peter et al. 2006). Ebenso für CPAP und Druckunterstützung bzw. Druckkontrolle konnte in einer weiteren Metaanalyse keine Zunahme der Infarkthäufigkeit gefunden werden (Winck et al. 2006).

Auch beim Versuch der Beatmungsentwöhnung wird die NIV angewendet (Becker et al. 2003). Patienten mit chronischen Atemwegserkrankungen können nach Beatmung im *Weaning* von der NIV profitieren und früher extubiert werden (Girault et al. 1999). Die Gefahr der Re-Intubationsnotwendigkeit durch temporäre NIV verringerte sich. Dies war auch bei Patienten ohne Hyperkapnie postoperativ zu beobachten (Kindgen-Milles et al. 2000) und

sollte bei einer Inzidenz der Re-Intubation nach großen chirurgischen Eingriffen von 20 % besondere Beachtung finden (Stock et al. 1985, Kindgen-Milles et al. 2000).

Weitere Metaanalysen (Peter et al. 2002, Keenan et al. 2003), die zwischen 8 und 15 randomisierte kontrollierte Studien einschlossen (Evidenzlevel I a), ergaben eine Besserung der Blutgase innerhalb der ersten Stunde mit Senkung der Atemfrequenz, Abnahme der Intubationshäufigkeit, Krankenhausaufenthaltsdauer und Mortalität durch die Kombination aus krankheitsbezogener Standardtherapie und NIV. Hierbei erscheinen die Patienten mit COPD besonders zu profitieren.

Durch die Deutsche Gesellschaft für Pneumologie und Beatmungsmedizin e. V. erfolgte die Erstellung der S3-Leitlinie "Nichtinvasive Beatmung als Therapie der akuten respiratorischen Insuffizienz" (2008), in der u.a. die Empfehlungen und Indikationen zur NIV festgehalten worden sind. Unter Beachtung der Kontraindikationen, Vorsichtsmaßnahmen und Grenzen in Bezug auf die jeweiligen Erkrankungen und Krankheitsstadien gehören zu den Indikationen der NIV die hyperkapnische akute respiratorische Insuffizienz, Lungenödem kardialer Ursache sowie die hypoxische akute respiratorische Insuffizienz nicht kardialer Genese, das *Weaning*, prophylaktische Anwendung perioperativ und die Verbesserung der Lebensqualität bei Palliativpatienten. Die Leitlinie umfasst knapp 100 Seiten und geht dort genau auf die jeweiligen Limitierungen ein, die aufgrund ihrer Ausführlichkeit hier nicht wiedergegeben werden können.

Die Reduktion der Re-Intubationsnotwendigkeit sowie die Möglichkeit, die NIV theoretisch auch außerhalb von Intensivpflegestationen anwenden zu können, kann Ressourcen entlasten. Bei geschultem Personal kann im Verlauf einer NIV der Pflegeaufwand abnehmen, Dauer des *Weanings* und des Aufenthalts auf der Intensivstation verkürzt werden und somit aus krankenhäusökonomischer Sicht sinnvoll sein (Antonelli et al. 1998, Nava et al. 1997, Nava et al. 1998, Plant et al. 2005).

Vorteile der NIV: Es entfallen oder reduzieren sich Komplikationen, die bei invasiven Maßnahmen gehäuft vorkommen bzw. hiermit in Zusammenhang gebracht werden.

Die Verringerung von nosokomialen Infektionen sowie die Reduzierung der Intubationshäufigkeiten und Vermeidung von Nebenwirkung einer Sedierung, die einer nicht-invasiven Ventilation zugeschrieben werden, führten in Studien indikationsabhängig zu einer Verringerung des Intensivaufenthaltes und Erhöhung der Überlebenschancen (Evidenzlevel I a) (Peter et al. 2002, Antonelli et al. 1998, Nava et al. 1998).

Weitere positive Effekte für den Patienten sind nach Ambrosino (1996):

- Die Nahrungsaufnahme, physiologisches Abhusten und verbale Artikulation bleiben erhalten.
- Die NIV ist intermittierend einsetzbar.
- Die Gefahr der Beatmungsgewöhnung reduziert sich und akzidentelle Extubationen entfallen.

Kontraindikationen der NIV: Kontraindikationen führen zur Indikation der invasiven Beatmung. Diese Situation ist z.B. gegeben bei fehlender Spontanatmung und fehlenden Schutzreflexen, komatösen oder unkooperativen Patienten sowie Krankheitsbildern mit erhöhter Aspirationsgefahr, Verlegung der Atemwege, akuter lebensbedrohlicher Hypoxie, schwierig abhustbarer oder per Bronchoskopie nicht beherrschbarer Bronchialsekretion (Hamm et al. 1999).

In der bereits erwähnten S3-Leitlinie werden als absolute Kontraindikationen fehlende spontane Atmung, fixierte oder funktionelle Atemwegsverlegung, gastrointestinale Blutung und Ileus angegeben. Diese Kontraindikationen beruhen jedoch auf Expertenmeinungen und Beobachtungsstudien (British Thoracic Society Standards of Care Committee 2002) und haben somit einen niedrigen Evidenzlevel. Beim Koma durch hyperkapnische, akute respiratorische Insuffizienz kann eine Indikation für die NIV bestehen. Diese hat sich hier in einzelnen Studien mit niedrigen Evidenzlevel (III und IV) als erfolgreich herausgestellt (Scala et al. 2005, Díaz et al. 2005).

Neben den erwähnten Hauptkriterien gibt es weitere Kriterien, eine Intubationsbeatmung durchzuführen bzw. von NIV zur IV zu wechseln.

Hauptkriterien zur Intubation	Nebenkriterien zur Intubation
Apnoe	AF > 35 /min, höher als bei Aufnahme
Atempausen mit Bewußtseinsverlust, Schnappatmung	pH < 7,3, geringer als bei Aufnahme
agitierte und unkooperative Patienten mit der Notwendigkeit zur Sedierung,	pO ₂ < 45 mmHg trotz O ₂ -Gabe
Bradykardie (HF < 50/min)	progrediente Bewusstseinsbeeinträchtigung
systolischer Druckabfall unter 70 mm Hg	

Tab. 2: Intubationskriterien nach Brochard et al. 1995

Der Wechsel von NIV zur Intubation soll erfolgen, wenn eines der Hauptkriterien vorliegt oder zwei Nebenkriterien nach einer Stunde NIV mit zusätzlicher medikamentöser Therapie beobachtet werden können (Brochard et al. 1995).

Der pH-Wert ist ein wichtiger Indikator für den zu erwartenden Erfolg einer NIV. Je weiter sich dieser initial im azidotischen Bereich befindet, desto eher ist von einem Misslingen der NIV auszugehen (Ambrosino 1996, Bott et al. 1993). So sollte bereits bei mäßiger respiratorischer Insuffizienz und einem initialen pH-Wert $>7,3$ mit der NIV begonnen werden (Plant et al. 2000). Girault et al. konnten 2003 an einer gemischten Gruppe von 124 Patienten mit hypoxischen oder hyperkapnischen respiratorischen Insuffizienzen sowie *Weaning*-Patienten als einzige unabhängige, prädiktive Faktoren eines NIV-Versagens den arteriellen pH-Wert und den Horovitz-Index feststellen. So erscheint dem frühen Beginn der NIV entscheidende Bedeutung zu zukommen.

Weitere Abbruchkriterien der NIV sind ein SaO_2 -Abfall unter 85 % trotz Sauerstoffinsufflation, weiterer Anstieg des pCO_2 mit pH-Abfall, progrediente Bewußtseinstrübung, unbeherrschbar Aerophagie, schwere Hautläsionen im Gesichtsbereich oder Aspiration (Hamm et al. 1999, Burchardi et al. 2002).

Hinweise für ein mögliches Auftreten von Spätfolgen können die oben erwähnten Veränderungen des pCO_2 , anhaltende Dyspnoe und Vigilanzminderung trotz 6 Stunden durchgeführter NIV sein. Da die Spätfolgen sehr gravierende Komplikationen und eine hohe Letalität haben, sollte hier rechtzeitig die Intubation erfolgen (Burchardi et al. 2002). Voraussetzung für die Anwendung der NIV ist somit ein möglichst genaues Monitoring des Patienten.

Voraussetzungen zur Anwendung der NIV: Unverzichtbar bei Patienten, die eine NIV nötig haben, ist das Basismonitoring wie EKG-Überwachung, Blutdruckmessung und Puls-oxymetrie (Burchardi et al. 2002).

Zur weiteren Beurteilung der Beatmung und des Krankheitsverlaufs sind die Messung der Atemfrequenz, der Atemzugvolumina und Beatmungsdrücke notwendig. Durchaus sinnvoll kann eine endexpiratorische Kapnometrie sein. Zusätzlich ist die Blutgasanalyse (BGA) sinnvoll (Burchardi et al. 2002). Sie ermöglicht eine etwas genauere Einschätzung des Patienten, da die Gaspartialdrücke im Blut und deren Auswirkungen auf den pH-Wert bestimmt werden können. Der initiale Zustand des Patienten und die Veränderung durch die NIV durch die BGA ist aussagekräftig zu erheben und wird in der bereits zitierten S3-Leitlinie in regelmäßigen engmaschigen Zeitintervallen gefordert.

Die klinische Einschätzung des Patienten in Bezug auf Vigilanz und neurologischen Status, Atemanstrengung sowie Atemfrequenz, Dyspnoe und Zyanose ist einfach zu erfassen und darf im technisch dominierten Alltag nicht vergessen werden (Burchardi et al. 2002).

Beatmungsgeräte müssen den für den Patienten notwendigen Beatmungsmodus bereitstellen. Neben einer inspiratorischen Druck- oder Volumensteuerung sollte die Möglichkeit für die PEEP/CPAP-Anwendung bestehen. Für assistierte Beatmungsmodi muss das Gerät eine Triggerfunktion haben. Die Entscheidung zur druck- oder volumenkontrollierten Ventilation kann von der Art der Erkrankung abhängig gemacht werden. Die druckkontrollierte wird jedoch deutlich öfter angewendet (Becker et al. 2003).

Von der Deutsche Gesellschaft für Pneumologie und Beatmungsmedizin e. V. wurden 2008 in der erwähnten S3-Leitlinie klare Anforderungen an Beatmungsgeräte zur NIV gestellt:

Mindestanforderungen sind:

- Druckvorgabe
- Max. inspiratorischer Druck ≥ 30 cm H₂O
- Inspiratorische Flussrate mindestens 60 l/min
- Backup-Frequenz
- Bilevel-Modus
- Die maximale Atemfrequenz sollte über 30/min betragen können
- Sensibler Flowtrigger
- Diskonnektionsalarm
- Einstellbares Verhältnis von Inspiration zu Expiration

Weiterhin wünschenswert sind schnelle Reaktionszeiten auf Beatmungsparameteränderung, schneller Druckaufbau, einstellbare Triggerschwellen, Alarm-Stummschaltung, interner Akku, Bedienerfreundlichkeit, Patientensperre und Betriebsstundenzähler.

Ergänzend sei angemerkt, dass bei der Anwendung der Gesichtsmaske diese zur suffizienten NIV ohne größere Leckagen über Mund und Nase fixiert werden muss, damit der notwendige Druckaufbau für den PEEP und auch für die Inspirationsunterstützung gewährleistet werden kann. Dies erfolgt in der Regel mit einer geeigneten Gummifixierung. Die Bedeutung einer möglichen Leckagekompensation des Beatmungsgerätes darf nicht unterschätzt werden. Im Notfall kann aber auch manuell, bevorzugt durch zwei Hände, die Fixierung der Maske erfolgen.

Praktisches Vorgehen bei NIV: Bei neuromuskulären Krankheiten und Thoraxwanderkrankungen, bei denen die Entlastung der Atemmuskulatur erreicht werden und

einer Hyperkapnie entgegengewirkt werden soll, wird die kontrollierte Beatmung empfohlen (Burchardi et al. 2002). „Bei Patienten mit COPD ist ein kontrollierter Modus günstig, sofern er vom Patienten toleriert wird.“ (Burchardi et al. 2002, Seite 39). Jedoch wird bei einer Erschöpfung der Atemmuskulatur bei der akuten Verschlechterung der COPD, Weaningversagen oder einem Asthmaanfall, eine assistierende Beatmungsform (z.B. PSV oder ASB) vermutlich besser akzeptiert (Welte und Hoffmann 1999). Dies gilt ebenso bei Lungenödem und Pneumonie (Burchardi et al. 2002).

Die initiale NIV kann wie folgt aussehen: Der expiratorische Druck von 6 mbar sollte anfangs wegen möglicher subjektiven Ausatemerschwerung nicht überschritten werden. Dieser kann im Verlauf der Therapie jedoch erhöht werden. Der inspiratorische Druck sollte langsam gesteigert werden bis ein suffizienter Druckpegel erreicht wird, der eine alveoläre Hypoventilation vermeidet. Auch hier kann eine subjektive Dyspnoe entstehen. Dieses kann ebenso bei einer zu flachen Anstiegssteilheit des Inspirationsflows auftreten. Sollte eine Atemfrequenz eingestellt werden, muss sie initial hoch genug gewählt werden und kann bei der situativ patienteneigenen Frequenz liegen (Burchardi et al. 2002).

2.4 Folgen für den präklinischen Einsatz der NIV

In den vorigen Kapiteln wurden die physiologischen Komponenten der Atmung und Beatmung bzw. deren Pathophysiologien vorgestellt. Auf die Gefahren der invasiven und der nicht-invasiven Ventilation, ebenso wie auf deren Vorteile wurde detailliert eingegangen. Die positiven Aspekte der nicht-invasiven Beatmung, ohne die Begleiterscheinungen von Komplikationen der invasiven Beatmung mitzubringen, machen die NIV interessant. Besonders die Feststellung, dass eine frühe Anwendung der NIV dem Patienten Nutzen bringen kann und ein Absinken des pH-Wertes unter 7,3 vermieden werden sollte (Ambrosino 1996, Bott et al. 1993, Plant et al. 2000), macht die Bedeutung der bereits präklinischen Anwendung klar.

Die Beatmungsgeräte in der Rettungsmedizin können die oben erwähnten Anforderungen der NIV nicht oder nur teilweise erfüllen. Je nach Notfallrespirator ist die Auswahl an Einstellungsmöglichkeiten unterschiedlich oder die Beatmungsparameter müssen, wie bei der Handbeatmung mit Beatmungsbeutel, abgeschätzt werden. Zwar gibt es mobile Beatmungsgeräte wie der Oxylog 3000 (Fa. Draeger) oder der Medumat Transport (Fa. Weinmann), die eine

differenzierte Beatmung und NIV zu lassen, diese sind allerdings (noch) nicht die Standardbeatmungsgeräte auf allen Rettungsmitteln.

Blutgasanalysen sind routinemäßig auf präklinischen Rettungsmitteln nicht möglich, jedoch Kontrollen des nicht-invasiven Blutdrucks, der Herz- und Atemfrequenz, die Ableitung des EKGs und die Pulsoxymetrie.

Die Möglichkeit der endexpiratorischen Kohlendioxidmessung ist präklinisch bereits gegeben. Die Firma Weinmann bietet z.B. ergänzend zum Beatmungsmodul Medumat® das Modul CapnoVol an, mit dem die expiratorische Kohlendioxidkurve aufgezeigt werden kann. Ebenso ist die Kapnometrie mittels „Lifepak 12®“ möglich, ein EKG/Defibrillator der Firma Medtronic.

Aus diesen Begebenheiten ist abzuleiten, dass die Forderungen zum Monitoring und Anforderung an Beatmungsgeräte der Deutschen Gesellschaft für Pneumologie und Beatmungsmedizin e. V. nicht voll einzuhalten sind. Somit können einfache Notfallrespiratoren präklinisch nur angewendet werden, wenn die physikalischen Auswirkungen unter Beatmungssituation bekannt sind.

Mit dem dieser Arbeit zugrunde liegenden Versuchsaufbau können physikalische Auswirkungen einer Beatmung erfasst werden. Die assistierte Beatmung mit Spontanatmung konnten hier nicht untersucht werden. Die Reaktionen von Patienten auf eine NIV zeigen sehr große individuelle Bandbreiten und lenken zudem den Blick von den eigentlichen physikalischen Resultaten und Größen ab.

3. Methoden: Gerätebeschreibungen, Versuchsaufbau und -ablauf

3.1 Ort der Messung

Die Messungen wurden im Labor des Zentrums Anaesthesiologie-, Rettungs- und Intensivmedizin der Georg-August-Universität Göttingen durchgeführt.

Die untersuchten Beatmungsgeräte wurden mit Druckgasen aus der zentralen Versorgung des Uniklinikums und die Handbeatmungsbeutel mit Raumluft betrieben.

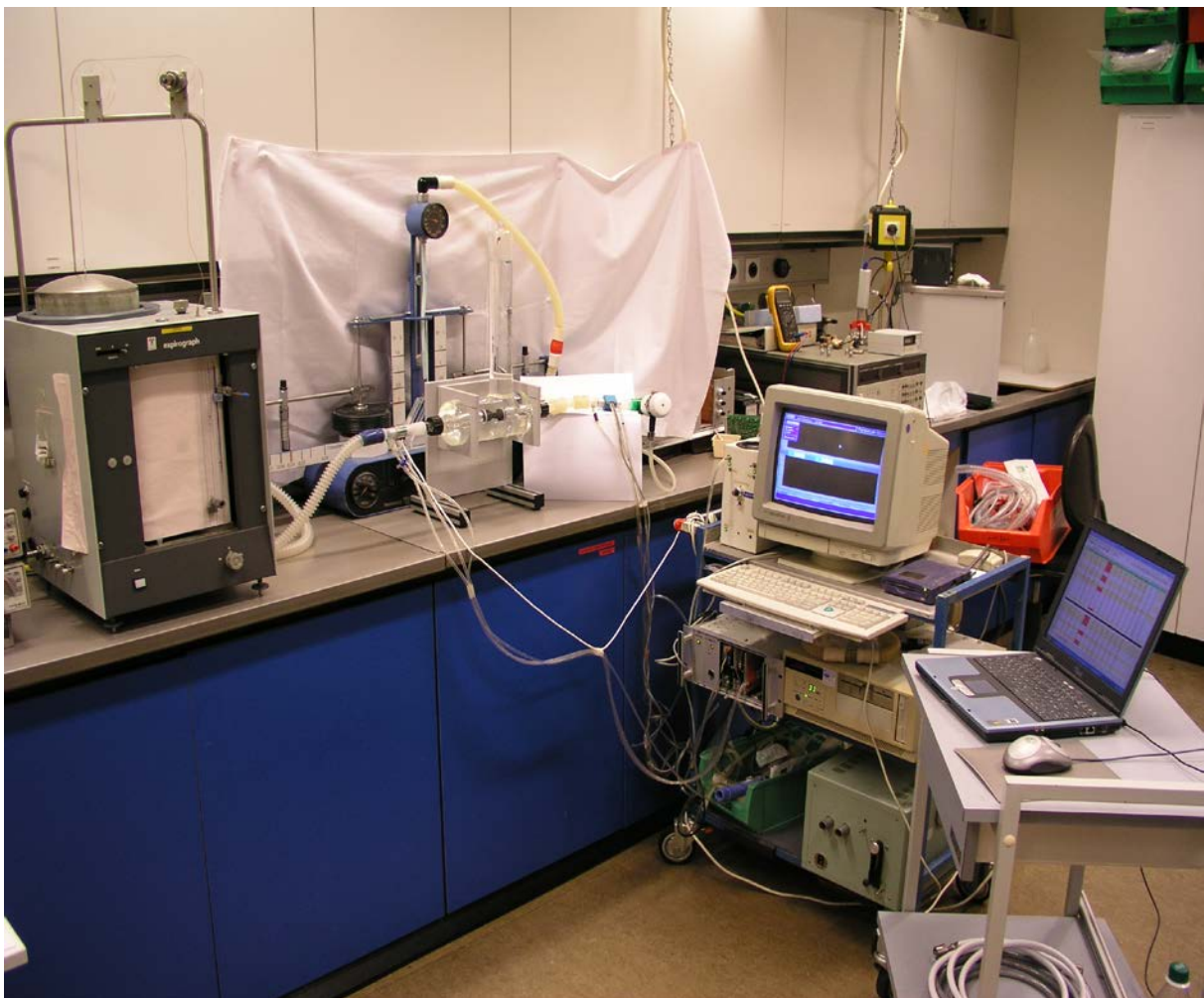


Abb. 2: Versuchsaufbau im Labor der Anästhesie (selbst erstelltes Foto)

3.2 Beatmungsgeräte und Modellkomponenten

3.2.1 Allgemeine Beschreibung

Beatmungsgeräte beatmen in einem Wechselspiel mit der Lunge und reagieren auf die physikalischen Gegebenheiten. Widerstände in der Lungenstrombahn und Volumendehnbarkeit sind entscheidende Größen, die die Ventilation mit Beatmungsgeräten in der Inspiration wie auch in der Expiration beeinflussen. So stehen die Rückstellkräfte der Lunge wie auch Leckagen im System oder Turbulenzen bzw. Flussumkehr eines fließenden Gases mit Veränderungen in der Ventilation der Lungen in Verbindung. Jeder dieser Faktoren nimmt unterschiedlich Einfluss auf diese Wechselwirkung. Um das Ausmaß des Einflusses eines einzelnen Faktors messen oder berechnen zu können, ist es notwendig diese Faktoren zu isolieren.

Der im Rahmen dieser Arbeit entwickelte Versuchsaufbau besteht aus einem Patientenmodell mit Lungensimulator mit einstellbarer Compliance und Resistance. Hierdurch kann der Einfluss dieser wichtigen pulmonalen Faktoren getrennt betrachtet werden. Wahlweise kann ein selbst entwickeltes Ventil als Simulation für den unteren Ösophagussphinkter in das Modell integriert werden. Ein daran anschließendes Glockenspirometer simuliert den Magen zur Bestimmung der gastralen Insufflation, der jedoch abweichend vom humanen Magen, bei gastraler Insufflation keinen Druck und somit keinen Widerstand aufbaut. D.h. beim Übersteigen des intragastralen Drucks über dem Druck im Ösophagussphinkter und Ösophagus wird keine Umkehr des Gasstromes wie bei der Regurgitation von Mageninhalt erreicht.

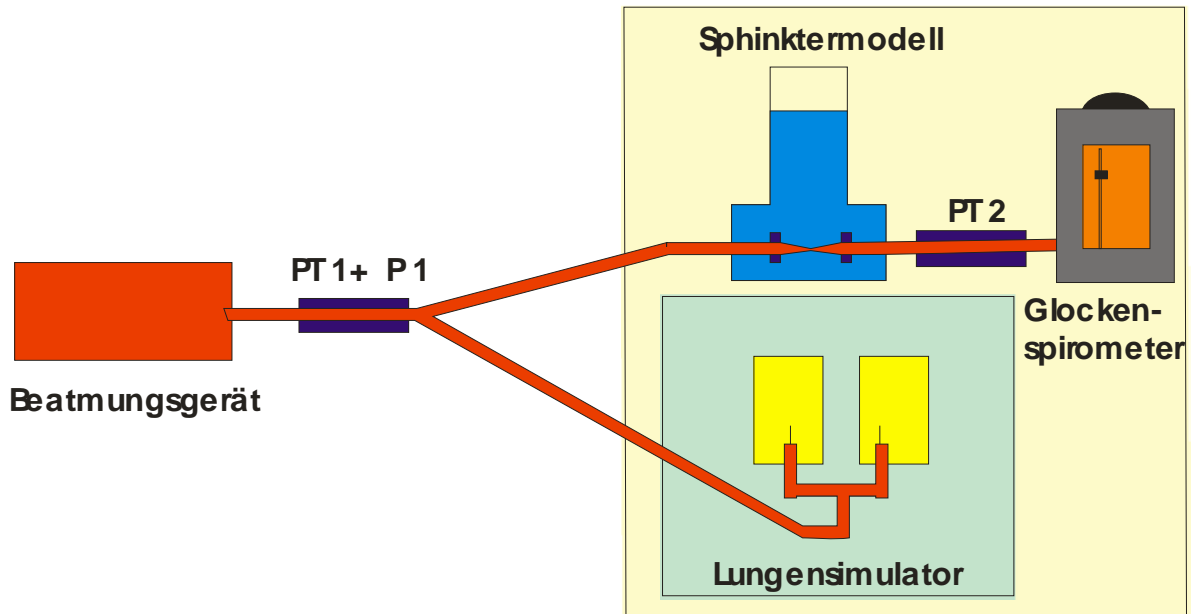


Abb. 3: schematische Darstellung der Versuchsaufbauten. Bei der IV ist nur der blaue Abschnitt an das Beatmungsgerät und den Pneumotachograph PT 1 mit Differenzdrucktransducer P1 angeschlossen. Der Aufbau zur NIV wird durch den gelben Bereich ergänzt (PT 2 = Pneumotachograph 2) (selbst erstelltes Schema)

Dieser Versuchsaufbau ermöglicht die kontrollierte invasive (IV) oder nicht-invasive (NIV) Beatmung. Die Gasflüsse im Modell werden mit Pneumotachographen nach Fleisch (PT1 und PT2) gemessen. Der Atemwegsdruck wird mit einem im Pneumotachograph PT1 integrierten Differenzdrucktransducer (P1) ermittelt. Der PT2 registriert den durch den Sphinkter gelangenden Flow. Das den Sphinkter passierende Volumen wird zudem von einem Glockenspirometer widerstandsfrei aufgefangen und gemessen.

Die elektrischen Signale der Pneumotachographen und des Drucktransducers (PT1, PT2 und P1) wurden mit dem A/D-Wandler Keithly Dash 2000 analog-digital umgewandelt und mit 200 Hz Abtastrate von einem Datenaquisitionsprogramm (TurboLab V 4.3 der Firma Stemmer, Eichenau) aufbereitet sowie in einem Standard-PC aufgezeichnet. Die Auswertung erfolgt über Excel (Fa. Microsoft), die Grafiken werden mit Statistica (Fa. StatSoft (Europe) GmbH, Hamburg) erstellt.

3.2.2 Untersuchte Beatmungsgeräte

Die folgende Tabelle zeigt die Übersicht der in den Versuchen verwendeten Beatmungsgeräte, deren Hersteller und die untersuchten, gerätetypischen Beatmungsformen:

Gerät	Angewandte Beatmungsform
Oxylator[®] EM-100 Typ I Fa. CPR Medical Devices Inc., Ontario, Kanada	konstanter Flow druckgesteuert (20 -45 cm H ₂ O), manuell steuerbar
Oxylator[®] EM-100 Typ II Fa. CPR Medical Devices Inc., Ontario, Kanada	konstanter Flow druckgesteuert (25 -50 cm H ₂ O) manuell steuerbar
Medumat[®] Standard a Fa. Weinmann Geräte für Medizin GmbH + Co. KG , Hamburg, Deutsch- land	zeitgesteuert, druckbegrenzt, volumenkonstant
Smart Bag[®] Fa. O-Two Medical Technologies Inc., Ontario, Kanada	Handbeatmungsbeutel mit Flowbegrenzung
Ambu[®] Mark III[®] Fa. Ambu International A/S, Ballerup, Dänemark	Handbeatmungsbeutel mit Druckbegrenzung
Evita 2 Fa. Dräger Medical AG & Co. KGaA, Lübeck, Deutschland	zeitgesteuert, druckbegrenzt, volumenkonstant; einstellbare Inspiration/Expiration Ratio (I:E)

Tab. 3: untersuchte Beatmungsgeräte

3.2.2.1 Oxylator[®] EM-100 Typ I und II

Bei den Messungen wurde der Oxylator[®] EM-100 in zwei Ausführungen (im weiteren Verlauf als Oxylator[®] I bzw. II bezeichnet) verwendet. Bei diesen Beatmungsgeräten handelt es sich um druckgesteuerte Ventilatoren. Sie applizieren die gleiche Beatmungsform, unterscheiden sich jedoch nach Herstellerangaben im wählbaren Bereich des maximalen Inspirationsumschaltdrucks. Der Oxylator[®] Typ I kann auf Inspirationsumschaltdrücke zwischen 20 und 45 cm H₂O, der Typ 2 zwischen 25-50 cm H₂O eingestellt werden. Wählbare Beatmungsmodi sind der automatische und der manuelle Gerätebetrieb. Mit dem Inspirationsknopf wird die Beatmung gestartet. Der automatische Modus wird durch Fixierung des Inspirationsknopfes (Betätigung und Drehung) erreicht. Die Umschaltung unterhalb der gewählten Druckgrenze ist auch manuell auslösbar.

Der Oxylator[®] kann zur invasiven sowie zur nicht-invasiven Beatmung eingesetzt werden.



Abb. 4: Oxylator[®] EM-100 Typ I; Fa. CPR Medical Devices Inc., Ontario, Kanada (selbst erstelltes Foto)

Es sollen nur Patienten mit einem Körpergewicht von mehr als 10 kg beatmet werden.

Das Gerät wird mit der Sauerstoff- oder Druckluftversorgung über einen flexiblen Schlauch verbunden. Die Gasversorgung muss einen Druck zwischen 3,0 und 5,5 bar und einen Flow von mindestens 100 l/min liefern können. Durch Drehen des Geräteoberteils lässt sich der maximale Beatmungsdruck stufenlos zwischen 20 und 45 (Oxylator[®] I) bzw. 25 und 50 cm H₂O (Oxylator[®] II) einstellen. Bei Erreichen dieses Druckes schaltet das Gerät in die Expiration um. Der maximale Beatmungsdruck ist also auch gleichzeitig der Umschaltdruck für den Wechsel von der Inspiration zur Expiration.

Während der Inspiration fließt nach Herstellerangaben ein konstanter Flow von 0,5 l/s, d.h. 30 l/min.

Im manuellen Betrieb wird jede Inspiration durch Betätigen und Halten des Inspirationsknopfes von Hand appliziert, im automatischen Betrieb wird dieser Knopf durch Betätigen und Drehen fixiert, so dass beide Hände zur Maskenfixierung genutzt werden können. Die Inspiration erfolgt bis zum Erreichen des eingestellten Beatmungsdrucks, ist also von der Resistance und Compliance der Atemwege des Patienten sowie der Atmungsaktivität des Patienten abhängig. Werden 2 Sekunden für die Inspiration überschritten, soll nach Herstellerangaben manuell beatmet und die Inspiration nach 2 Sekunden abgebrochen werden. Bei Kindern soll dies bereits bei Inspirationszeiten ab einer Sekunde erfolgen. Die Expiration wird durch einen Widerstand von 5 cm H₂O * l⁻¹ * sek gebremst. Der Oxylator[®] schaltet im automatischen Modus selbstständig wieder in die Inspiration um, im manuellen Modus muss dies durch Auslösen des Inspirationsknopfes erfolgen.

Im automatischen Modus baut das Gerät einen positiven endexpiratorischen Druck zwischen 2 und 4 cm H₂O auf, der vom Anwender nicht beeinflusst werden kann. (Produktinformation der Fa. CPR Medical Devices Inc., Ontario, Kanada).

3.2.2.2 Medumat[®] Standard a

Der Medumat[®] Standard a (im weiteren Verlauf als Medumat[®] bezeichnet) ermöglicht eine kontrollierte Beatmung. Sie erfolgt zeitgesteuert, drucklimitiert und volumenkonstant. Der Medumat[®] wird mit medizinischem Sauerstoff von 2,7 bis 6 bar Betriebsdruck bei mindestens 70 l/min Volumenstrom betrieben und eignet sich zum Beatmen von Patienten ab 10 kg Körpergewicht bei kontrollierter bzw. 15 kg bei assistierter Beatmung. Für die Untersuchungen in dieser Arbeit wurde anstelle von Sauerstoff medizinische Druckluft aus der Gasversorgung des Klinikums Göttingen verwendet.

Spontanatmung des Patienten wird über das Patientenventil ermöglicht, wobei die Atemluft hierbei aus der Umgebungsluft gezogen wird.

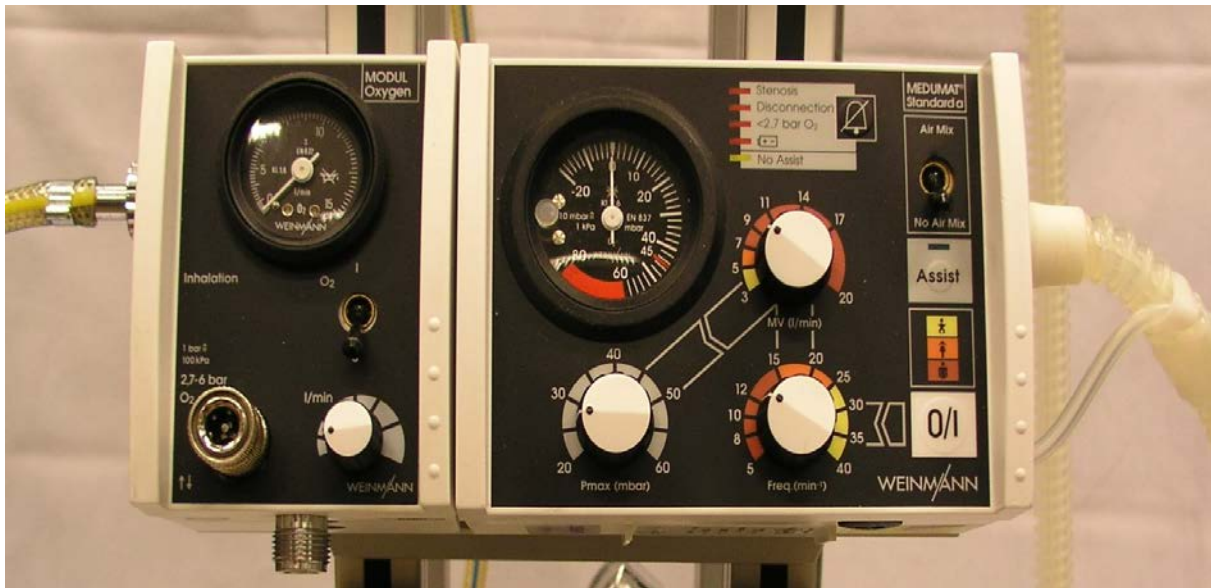


Abb. 5: Medumat[®] Standard a; Fa. Weinmann Geräte für Medizin GmbH + Co. KG , Hamburg, Deutschland (rechtes Modul: Sauerstoffinsufflation; linkes Modul: maschinelle Beatmung) (selbst erstelltes Foto)

Der Medumat[®] ist zur invasiven wie auch zur nicht-invasiven Beatmung geeignet. Drei variable Beatmungsparameter müssen hierfür eingestellt werden: Die Atemfrequenz (AF: 5-40 Atemzüge/min) muss definiert gewählt werden. Kombiniert mit einem einstellbaren Atemminutenvolumen (AMV: 3-20 l/min) errechnet sich das Atemzugvolumen. Eine Drucklimitierung (Pmax: 20-60 mbar) kann Druckspitzen vermeiden. Das Verhältnis zwischen Inspiration und Expiration beträgt im kontrollierten Beatmungsmodus fest 1:1,67. Der Medumat[®] baut selbst keinen PEEP auf. Dieser kann jedoch durch ein externes PEEP-Ventil am Expirationsschenkel des Patientenventils ermöglicht werden.

Bei der Betriebsart „No Air Mix“ wird das Volumen ausschließlich aus der verwendeten Gasquelle bezogen. In der Geräteeinstellung „Air Mix“ wird das Gas aus der Versorgung vom Medumat[®] mit Umgebungsluft verdünnt. Ein Manometer ermöglicht die Überwachung des Beatmungsdrucks.

Alarmer (z.B. bei Stenose oder bei Diskonnektion vom Patienten) weisen den Benutzer auf mögliche Fehler bzw. Beatmungsprobleme hin. Da der Medumat[®] im Betrieb keine Aktivierung von In- bzw. Expiration benötigt, ist hier die Fixierung der Beatmungsmaske durch zwei Hände möglich (Produktinformation Fa. Weinmann Geräte für Medizin GmbH + Co. KG , Hamburg, Deutschland).

3.2.2.3 Smart Bag®

Bei dem Smart Bag® handelt es sich um einen Handbeatmungsbeutel aus Silikon, mit limitiertem Inspirationsflow. Er hat ein Volumen von 1700 ml mit einem maximalen Hubvolumen von 900 ml. Die Verabreichungszeit für einen Atemzug soll zwischen 1,5 und 2 Sekunden betragen. Hierdurch soll ein zu hoher Inspirationsflow vermieden werden. Wird die Inspirationszeit zu gering gewählt bzw. wird durch die Inspiration ein hoher Flow verursacht, schließt das Flowventil, welches sich zwischen dem Beutel und der Beatmungs-Maske befindet. Das Ventil schließt hierbei unvollständig und lässt einen verringerten Flow zu. Analog zum Ohmschen Gesetz der Elektrizitätslehre soll aus dem Zusammenhang zwischen Flow (Stromstärke I) und Widerstand (R) der Einfluss auf den Inspirationsdruck (P) genommen werden: $I = P/R$. Wird der Flow I begrenzt wird folglich der Druck bei konstantem Widerstand begrenzt. So sollen Druckspitzen vermieden werden.

Bei einem Patienten mit normaler pulmonaler Compliance und Resistance ist laut Herstellerinformation (Produktionformation Fa. O-Two Medical Technologies Inc., Ontario, Kanada) das Inspirationsdruckmaximum auf unter 19 cm H₂O begrenzt. Hierdurch soll die gastrale Insufflation limitiert werden.

Der Widerstand im Smart Bag® ist für die Inspiration mit $3,3 \text{ cm H}_2\text{O} \cdot \text{l}^{-1} \cdot \text{sek}$, für die Expiration mit $2,2 \text{ cm H}_2\text{O} \cdot \text{l}^{-1} \cdot \text{sek}$ angegeben.



Abb. 6: Smart Bag® ; Fa. O-Two Medical Technologies Inc., Ontario, Kanada (selbst erstelltes Foto)

3.2.2.4 Ambu[®] Mark III[®]

Der Ambu[®] Mark III[®] (Fa. Ambu International A/S, Ballerup, Dänemark) ist ein Handbeatmungsbeutel mit Doppelkammerprinzip, d.h. er hat eine Innenhülle, die das Beatmungsvolumen fasst und eine elastische Außenhülle.

Die Außenhülle begrenzt den Atemwegdruck während der Kompression auf einen Höchstwert von 70 cm H₂O. Durch das automatische Aufblähen der Außenhülle kann der Anwender hohe Beatmungsdrücke fühlen.

Eine weitere Limitierung des Drucks ist durch eine dazugehörige Maske Gr.0 für Kinderbeatmung auf 40 cm H₂O möglich. Die maximale Beatmungsfrequenz ist vom Beatmungsvolumen abhängig, das maximale Hubvolumen liegt bei ca. 1300 ml. Der Ambu[®] Mark III[®] eignet sich für Patienten ab einem Körpergewicht von 15 kg.

Die Beatmungswiderstände des Beutels betragen bei 50 l/min ca. 4,2 cm H₂O * l⁻¹ * sek bei Inspiration und 2,6 cm H₂O * l⁻¹ * sek bei Expiration. Ein PEEP-Ventil kann angeschlossen werden.

3.2.2.5 Evita 2

Die Evita 2 (Fa. Dräger Medical AG & Co. KGaA, Lübeck, Deutschland) verfügt über einen Inspirations- und einen Expirationsschlauch. Über den Inspirationsschenkel werden Atemwegdruck, Volumen sowie Sauerstoffkonzentration und über den Expirationsschenkel Atemwegdruck, expiratorisches Volumen und Flow gemessen. Über ein Display können Druck- und Flowkurven graphisch wiedergegeben werden. Die Evita 2 kann die Lungenparameter Resistance und Compliance berechnen. Es können Patienten ab 3 kg Körpergewicht beatmet werden. Der Versorgungsdruck muss zwischen 2,7 und 6 mbar sein. Die Evita 2 ist ein für die Intensivmedizin konzipiertes Hochleistungs-Langzeitbeatmungsgerät, das in dieser Arbeit als Referenzgerät untersucht wurde, da ein definierter PEEP eingestellt werden kann.

3.2.3 Messgeräte – Funktion und präexperimentelle Kalibrierungen

3.2.3.1 Messung von Druck und Flow

Der Pneumotachograph (PT) nach Fleisch misst den Flow einer Gasströmung. Er besteht aus einem Staurohr, in dessen Inneren sich Lamellen befinden. Diese erzeugen im definierten Messbereich aus dem Flow der Gasströmung einen hierzu linear proportionalen Druck. Im Modell wurden zwei Pneumotachographen installiert (PT 1 und PT 2).

Der in der Auswerteeinheit PT 1 zusätzlich integrierte Drucktransducer ermöglicht die Messung des im System entstehenden Drucks gegen Atmosphäre. PT 2 misst nur den Flow.

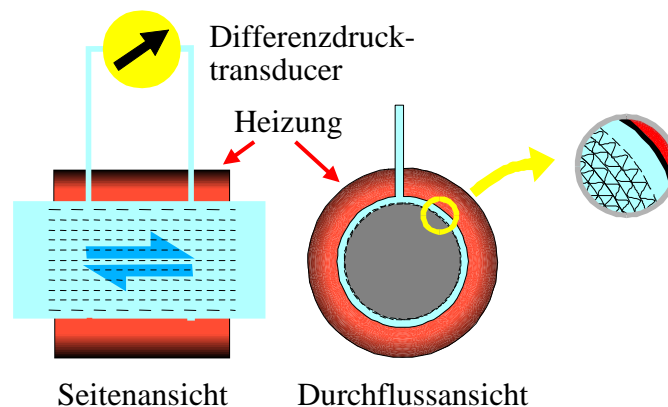


Abb. 7: schematischer Aufbau des Pneumotachographen nach Fleisch (aus Rathgeber J: Grundlagen der maschinellen Beatmung; Hrsg. von Züchner K; 1. Auflage; Aktiv Druck und Verlag, Elsbach 1999, S. 406. Mit freundlicher Genehmigung von Dr. rer. nat. K. Züchner)

Vor Beginn der Versuchsreihen wurden die Peumotachographen mit dem Gilibrator™ 2 auf ihre Messgenauigkeit geprüft.

Der Gilibrator™ 2 (Fa. Gilian Instrument Corp., Wayne, USA) diente als Referenz für den Flow. Er ist ein Volumenmessgerät mit hoher Messgenauigkeit. In einem Messrohr bewegt sich eine Seifenblase, die Zeit zwischen zwei Messpunkten wird fotoelektrisch registriert und die Geschwindigkeit bestimmt. Daraus wird der Fluss durch das Messrohr errechnet.

Es wurde ein grob definierter Flow zuerst durch die Pneumotachographen und dann zum Gilibrator™ 2 geleitet.

Die Messwerte der Pneumotachographen wurden mittels TurboLab (s. 3.2.1) aufgezeichnet. Die gemessenen Werte der Pneumotachographen und vom Gilibrator™ 2 wurden in einer Grafik (Abb. 13) gegeneinander aufgetragen und die faktorielle Abweichung mittels linearer Regression ermittelt.

Der Drucktransducer P1 im Pneumotachographen PT1 wurde mit dem geeichten Referenzgerät Digima Champion überprüft (SI-Special Instruments, Gesellschaft für Mess-, Steuer- und Reglergeräte GmbH, Nördlingen). Hierzu wurden in einem geschlossenen System Drücke generiert und durch die Digima Champion und den Drucktransducer des Pneumotachographen 1 gemessen. Die Aufzeichnung des Pneumotachographen erfolgte mittels TurboLab. Die Werte wurden wiederum in einer Grafik (Abb. 14) gegeneinander aufgetragen und die faktorielle Abweichung mittels linearer Regression ermittelt (s. 4.1).

3.2.3.2 Messung des den Sphinkter passierenden Volumens und Kalibrierung des Glockenspirometers

Ein Glockenspirometer (expirograph, Typ 16000/Nr. 6117; Fa. Godhart-Statham bv, Bilthoven, Holland) diente zur Volumenbestimmung. Das Volumen, das bei der Beatmung über das Ösophagussphinktermodell verloren ging, wurde so widerstandsfrei gemessen.

Das Glockenspirometer wurde zu Beginn der Versuche kalibriert, indem definierte Volumina mit mehreren Wiederholungen durch eine geeichte Kolbenspritze (Fa. Hamilton) in das Gerät eingebracht wurden. Der Ausschlag des Schreibers wurde mit Millimeterpapier gemessen und der Mittelwert dieser Ergebnisse berechnet. Hierdurch konnte das Volumen pro Millimeter Ausschlag bestimmt und der Grenzwert von 5 Liter markiert werden.



Abb. 8: Glockenspirometer; (expirograph, Typ 16000/Nr. 6117; Fa. Godhart-Statham bv, Bilthoven, Holland) (selbst erstelltes Foto)

3.2.4 Lungensimulator LS 800 S (Fa. Dräger)

Der Lungensimulator besteht aus zwei mechanischen Lungenflügeln, deren Compliance stufenweise zwischen 0,1 und 0,01 l/mbar einstellbar ist. Weiterhin kann die Resistance der Atemwege stufenweise von 0 bis 128 mbar * l⁻¹ * sek verändert werden. Eine Leckage kann von 0 bis 3 l/min gewählt werden. Die Luftzuleitung zu den Lungenflügeln erfolgte über einen gemeinsamen Endotrachealtubus (7,5 mm Innendurchmesser). Die Lungenfunktionen sind für beide Lungenflügel getrennt einstellbar.

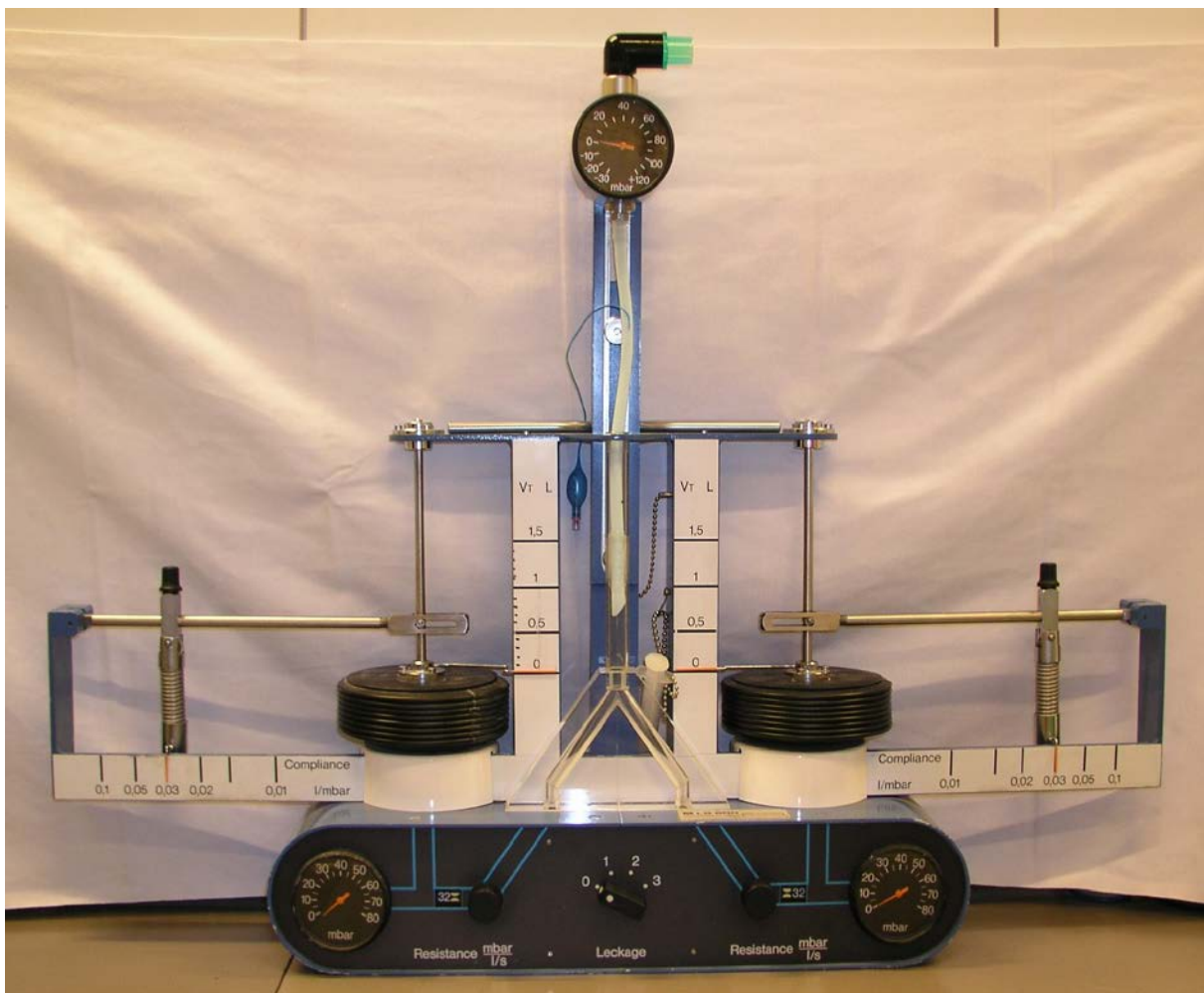
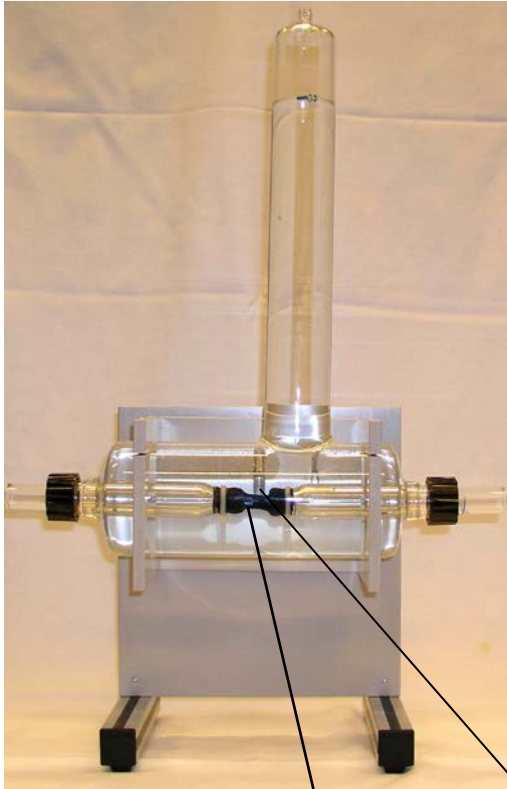


Abb. 9: Lungensimulator LS 800 S; Fa. Dräger (selbst erstelltes Foto)

3.2.5 Ösophagusphinktermodell

Das Glasmodell besteht aus zwei T-förmig angeordneten Glasröhren. Dieses wurde von der Glasbläserwerkstatt der Fakultät für Chemie der Universität Göttingen gefertigt. Der Wasserdruck innerhalb des Modells verteilt sich so, dass innerhalb des Gefäßes der Druck auf gleicher Höhe identisch ist. Durch die Füllung des Druckdomes konnte so der Verschlussdruck eingestellt werden. Als Modell für den unteren Ösophagusphinkter wurde ein elastischer Gummischlauch genutzt, der in dem Glasmodell unter definiertem Wasserdruck komprimiert wurde. Die Länge des Schlauches betrug 2-3 cm, entsprechend der anatomischen Sphinkterlänge (s. 2.2). Der Schlauch wurde an zwei 22 mm dicken Glasröhren fixiert, welche die Schlauchenden offen hielten, dazwischen fand die Kompression statt. Das eine Röhren war mit dem Glockenspirometer, das andere mit dem Lungensimulator und Beatmungsgerät verbunden.



Durch die Füllung des Druckdomes konnte so der Verschlussdruck eingestellt werden. Als Modell für den unteren Ösophagusphinkter wurde ein elastischer Gummischlauch genutzt, der in dem Glasmodell unter definiertem Wasserdruck komprimiert wurde. Die Länge des Schlauches betrug 2-3 cm, entsprechend der anatomischen Sphinkterlänge (s. 2.2). Der Schlauch wurde an zwei 22 mm dicken Glasröhren fixiert, welche die Schlauchenden offen hielten, dazwischen fand die Kompression statt. Das eine Röhren war mit dem Glockenspirometer, das andere mit dem Lungensimulator und Beatmungsgerät verbunden.

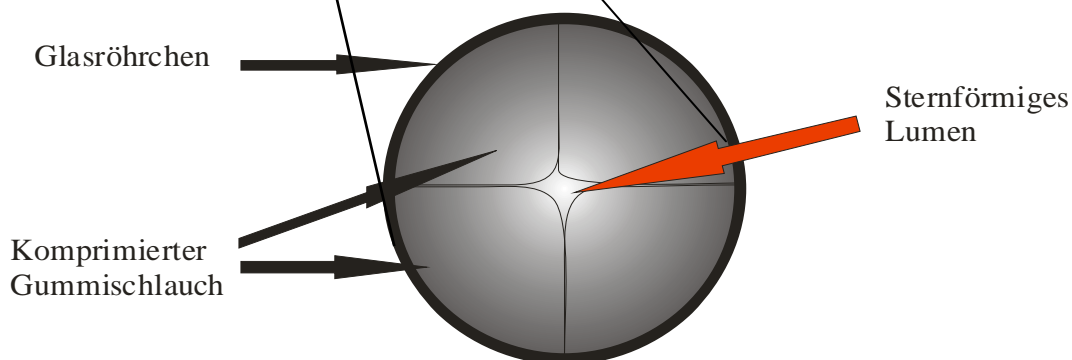


Abb. 10: Schema des Ösophagusphinktermodells mit Querschnittsbetrachtung (selbst erstelltes Foto und selbst erstelltes Schema)

Unter dem Druck der Wassersäule auf den Gummischlauch bildete sich im Querschnitt ein sternenförmiges Lumen, durch welches ein geringer Gasfluss möglich ist.

Die Erhöhung des Gasdrucks im Atemsystem „kranial“ des Sphinktermodells erweitert das Lumen, so dass ein höherer Gasfluss durch das Sphinktermodell ermöglicht wird. Der Luftweg „kaudal“ des Sphinktermodells mündet zur widerstandsfreien Volumenmessung in das Glockenspirometer. Das Flussprofil dieses Volumenstroms wird mit dem Pneumotachographen PT2 gemessen.

3.3 Versuchsaufbau

Die beschriebenen Komponenten wurden zusammengefügt, um Beatmungen am Patienten mit gesichertem (IV) und ungesichertem (NIV) Atemweg zu simulieren (s. Abb. 3).

3.3.1 Versuchsaufbau bei invasiver Ventilation (IV)

Die invasive Beatmung wurde simuliert, indem das Beatmungsgerät ausschließlich den Lungensimulator beatmete. Hierfür wurde direkt am Beatmungsgerät der Pneumotachograph nach Fleisch PT 1 mit integriertem Differenzdrucktransducer P1 eingefügt, um die Flow- und Druckkurven zwischen Beatmungsgerät und Lungensimulator zu registrieren.

Vom Pneumotachographen wurde die Verbindung zum Lungensimulator durch einen Silikon-Beatmungsschlauch (22 mm Durchmesser) hergestellt.

3.3.2 Versuchsaufbau bei nicht-invasiver Ventilation (NIV)

Zur Simulation der nicht-invasiven Beatmung wurde das Modell des unteren Ösophagusphinkters einschließlich Glockenspirometer mit dem Lungensimulator parallel verbunden und mit dem jeweiligen Beatmungsgerät ventiliert.

Das Beatmungsgerät wurde wie beim Aufbau zur IV mit den PT 1 und P1 verbunden, so dass damit der gesamte Flow im Patientenmodell und der Druck in den Atemwegen registriert werden konnte.

Hinter dem Pneumotachographen wurde der Gasstrom über ein Y-Stück aufgeteilt. Der eine Anschluss des Y-Stückes führte wie beim Versuchsaufbau zur invasiven Ventilation über den Silikonschlauch zum Lungensimulator. Am anderen Anschluss befand sich das Ösophagusphinktermodell. Der PT 2 leitete direkt hinter dem Modell das Flussprofil des Volumenstroms ab, welcher durch den Sphinkter gelangte. Das Glockenspirometer registrierte das den Sphinkter passierende Volumen.

3.4 Versuchsablauf

Zu Beginn wurden die Messegeräte (Flow- und Drucksensoren und Glockenspirometer) kalibriert (s. 3.2.3) und das Ösophagusphinktermodell justiert und evaluiert.

Eine Versuchsreihe besteht aus der Kombination eines Beatmungsgerätes mit definierter Beatmungseinstellung und einer Lungenparametereinstellung (s.u.). Die Versuchsdurchführung erfolgte pro Versuchsreihe fünf Mal.

3.4.1 Justierung des Ösophagusphinktermodells

Die Justierung des Gummischlauches unter festgelegtem Wasserdruck erfolgte zunächst anhand der in 4.2.1 beschriebenen Flow-Druck-Beziehung für das Sphinktermodell: Bei Durchströmung mit konstanten Flüssen bewirkt das Sphinktermodell einen charakteristischen Druckaufbau vor dem Sphinkter, der als Funktion des Flows in Abbildung 15 als Ergebnis von vier zu verschiedenen Zeitpunkten aufgenommenen Messreihen dargestellt ist. Der Flow, der durch ein Flowmeter aus der zentralen Gasversorgung des Universitätsklinikums Göttingen dosiert wurde, wurde bei jedem Messpunkt konstant gehalten. Der darauf folgende Messpunkt lag im numerischen Wert höher als der vorherige, zwischen zwei Messpunkten wurde der Flow kurzzeitig unterbrochen. Der Flow wurde mit einem Hitzdraht-Anemometer (TSI, Model 4040) gemessen. Der Druck, der sich vor dem Sphinktermodell durch den Flow aufbaute, wurde mit dem Differenzdruckmessgerät Digima Champion N gegen Atmosphäre gemessen. In einem Koordinatensystem wurde der Druck als Funktion des Flows eingetragen.

Danach wurde die erste Versuchsreihe mit dem Oxylator[®] Typ I (automatischer Modus, systematische Erhöhung des eingestellten Drucks) am Gesamtmodell durchgeführt, bei dem

nacheinander die oben beschriebenen 5 Kombinationen der Lungenfunktion eingestellt wurden. Die Wechselwirkung des mit der Flow-Druck-Kurve charakterisierten Sphinktermodells führt zu charakteristischen Messergebnissen mit dem Oxylator[®]. Die Ergebnisse dieser Oxylator[®]-Messreihe dienten als Einstellwert des Gesamtmodells für darauf folgende Messungen mit Beatmungsgeräten. D.h. das Modell wurde vor jeder neuen Messung mit dem Oxylator[®] Typ I auf die resultierenden Ergebnisse überprüft. Diese Werte wurden mit den Ergebnissen der ersten Testreihe des Oxylator[®] Typ I verglichen. Waren diese Werte nicht identisch, wurde der Sphinkterschlauch des Modells neu justiert. Dies wurde als Kalibrierung vor jeder Versuchsreihe mit anderen Beatmungsgeräten als Verifizierung der Sphinktermodelleinstellung verwendet. Zudem wurde zu Beginn einer neuen Versuchsreihe stichpunktartig eine Flow-Druck-Kurve erstellt, wie sie in Abbildung 15 beispielhaft zu sehen sind. Die Justierung des Sphinktermodells erfolgte somit zunächst durch einen statischen Flow. Die Überprüfung auf dynamische Verhältnisse des Gesamtmodells unter Beatmung wurde mit dem Oxylator[®] durchgeführt.

3.4.2 Eingestellte Lungenparameter

Die Lungenparameter des Lungensimulators LS 800 S wurden folgendermaßen gewählt:

Lungenparameter Nr.	Compliance [l/mbar]	Resistance [mbar * l ⁻¹ * sek]
1	0,1	2
2	0,06	8
3	0,06	16
4	0,02	8
5	0,02	16

Tab. 4: eingestellte Lungenparameter

Die Parameter Nr. 1 entsprechen den Werten eines Erwachsenen mit physiologisch gesunder Lunge. Durch Abnahme der Compliance bzw. Zunahme der Resistance wurden zunehmend pathophysiologische Lungensituationen simuliert.

Die Parameter wurden in den Versuchsreihen nacheinander eingestellt. Die am LS 800 S einstellbare Leckage wurde bei allen Versuchen auf 0 belassen. An den beiden Lungenflügeln wurden jeweils seitengleiche Lungenfunktionen eingestellt.

3.4.3 Versuchsreihen zur invasiven Beatmung

Die Versuchsreihe zur invasiven Ventilation wurde ohne Ösophagussphinktermodell nur am Lungensimulator durchgeführt. Bei dieser Versuchsreihe wurden der Oxylator[®] Typ I, der Medumat[®] (No Air Mix) und die Beatmungsbeutel verwendet.

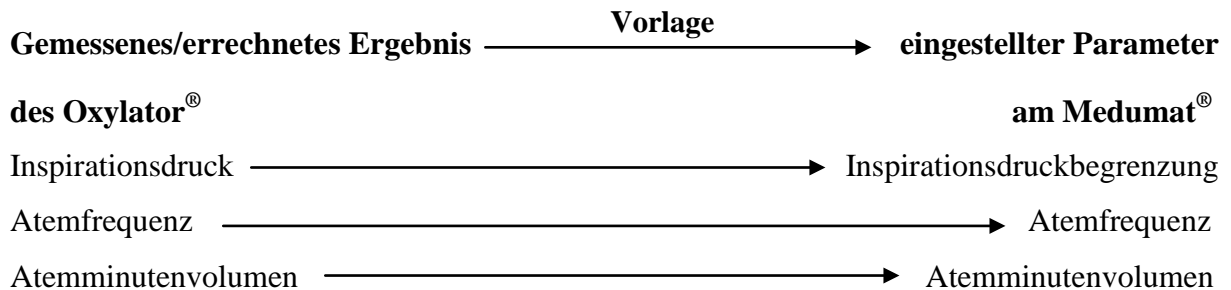
Oxylator[®]: Die ersten Messungen wurden mit dem Oxylator[®] Typ I durchgeführt. Dieser wurde zunächst im automatischen Modus betrieben. Als Maximaldruck wurde bei verschiedenen Lungenparametern (Tab. 4) jeweils 20, 25, 30, 35 und 40 cm H₂O eingestellt. Die Aufzeichnungsdauer des Datenaquisitionsprogrammes im automatischen Betrieb betrug 30 Sekunden, mindestens aber 3 Beatmungszyklen, im manuellen Betrieb 60 Sekunden.

Aus den aufgezeichneten Daten wurden mit Excel Flow- und Druckkurven erstellt und folgende Parameter ermittelt: Inspirations- und Expirationszeit, Inspirationsflow, Inspirationsdruck und PEEP.

Aus diesen Parametern wurden Atemzug-, Atemminutenvolumen und Atemfrequenz errechnet. Die einzelnen Verfahren werden in der Auswertmethodik detailliert dargestellt.

Die Untersuchungen wurden danach im manuellen Modus wiederholt: Bei Druckeinstellungen am Oxylator[®], die Inspirationszeiten > 2 Sekunden erzeugten, wurden die manuell gestarteten Inspirationen nach ca. 2 Sekunden beendet. Nach ca. 3 Sekunden Expirationszeit wurde die Inspiration neu gestartet, so dass daraus eine Atemfrequenz von ca. 12/min resultierte. Bei Druckeinstellungen am Oxylator[®], die Inspirationszeiten < 2 Sekunden erzeugten, wurde ebenfalls eine Atemfrequenz von ca. 12/min erzeugt, indem nach insgesamt jeweils 5 Sekunden eine neue Inspiration gestartet wurde. Hier wurde die Inspirationszeit vom Oxylator[®] bestimmt, die Expirationszeit ergibt sich aus 5 Sekunden weniger Inspirationszeit. Auch von den Messreihen im manuellen Modus wurden die gleichen Kennwerte wie im automatischen Modus ermittelt. Die Zeitmessung erfolgte mit einer Stoppuhr.

Medumat[®]: Die errechnete Atemfrequenz und das Minutenvolumen **einer Messung** mit dem Oxylator[®] wurde am Medumat[®] eingestellt. Dies wurde **für alle Kombinationen** von Lungenparametern und Oxylator[®]-Druckeinstellungen am Medumat durchgeführt.



Es resultiert die Beatmung mit nahezu identischen Beatmungsparametern bei einer Lungen-einstellung mit zwei verschiedenen Beatmungsgeräten.

Die Qualität der Analogeinstellungen wurde in Bezug auf die Atemfrequenz via Stoppuhr und in Bezug auf die Atemvolumina mittels Spirometer (Wright Spirometer H 12562, Brit. Pat. 765206, Medishield, England) anhand der errechneten Atemzugvolumina ermittelt.

Zusätzlich wurden die 5 verschiedenen Lungeneinstellungen mit den Standardbeatmungsparametern AF: 12/min und AMV 6 und 12 l/min ohne Druckbegrenzung getestet.

Handbeatmung: Die Beatmung mit Handbeatmungsbeutel erfolgte mit den Zielparametern Atemfrequenz 12/min und Atemzugvolumina 500 bzw. 1000 ml (AMV: 6 und 12 l/min). Die Frequenz wurde anhand der Inspirations- und Expirationszeit per Stoppuhr gesichert. Das in der Inspirationszeit zu verabreichende Atemzugvolumen wurde mit einem Spirometer (Wright Spirometer H 12562, Brit. Pat. 765206, Medishield, England) direkt hinter dem Handbeatmungsbeutel überprüft.

3.4.4 Versuchsreihe zur nicht-invasiven Beatmung ohne festgelegten PEEP

Hierbei wurden der Oxylator[®] Typ I und II, der Medumat[®] und die Beatmungsbeutel untersucht. Der Ablauf der Versuche und die eingestellten Lungenparameter entsprachen der Durchführung der Versuchsreihe zur invasiven Beatmung (s. 3.4.3 und Abb. 11).

Der Oxylator[®] Typ II wurde nur im automatischen Betrieb eingesetzt. Die Versuche mit maschineller Beatmung wurden beendet, wenn sich 5 l im Glockenspirometer befanden, also 5 l Beatmungsgas den Sphinkter passiert hatte. Die manuelle Beatmung wurden nach 2 Minuten abgebrochen oder wenn sich das Spirometer mit 5 l gefüllt hat. Alle Versuche wurden 5 Mal durchgeführt.

Die Aufzeichnungsdauer im automatischen Betrieb betrug wie bei der invasiven Beatmung 30 Sekunden, mindestens aber 3 Beatmungszyklen und im manuellen Betrieb 60 Sekunden.

Die Ergebnisse des Oxylator[®] Typ I dienten jeweils als Zielvorgabe für die Einstellungsparameter des Medumat[®]. Der Medumat[®] und die Beatmungsbeutel wurden zusätzlich mit den beschriebenen Standardeinstellungen betrieben.

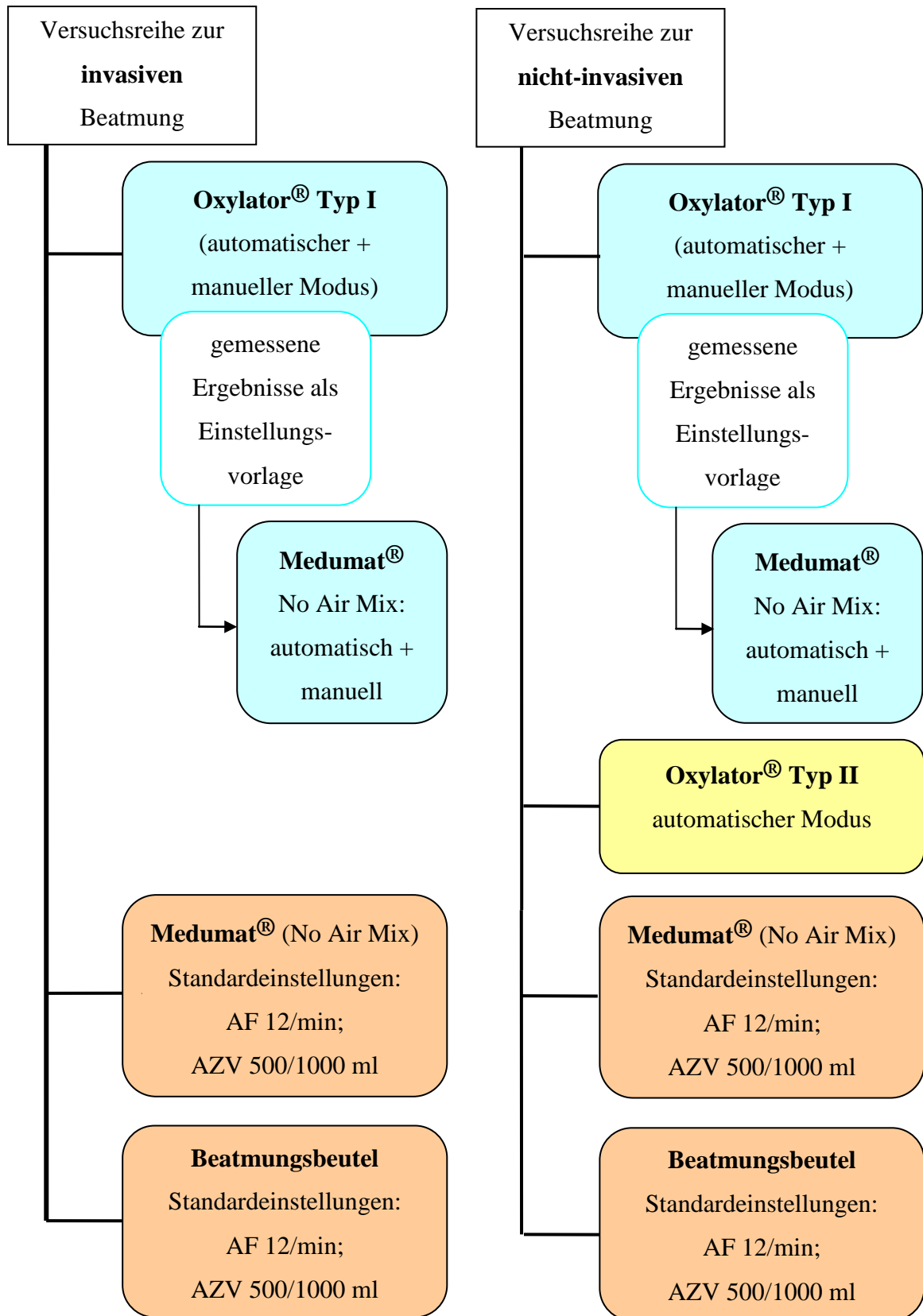


Abb. 11: schematische Darstellung der Versuchsreihen zur invasiven und nicht-invasiven Ventilation

3.4.5 Versuchsreihe zur nicht-invasiven Beatmung mit festgelegten PEEP

Die Evita 2 wurde ebenfalls mit den Beatmungsparametern, die aus der Auswertung der Oxylator[®]-Beatmung im automatischen Modus resultierten, als Zielparameter betrieben. Um diese Beatmungssituation mit denen der Notfallbeatmungsgeräte vergleichen zu können, wurden im kontrollierten Beatmungsmodus (IPPV, *Intermittend Positive Pressure Ventilation*) an der Evita das Tidalvolumen, die Frequenz, der maximale Inspirationsdruck und das I:E-Verhältnis so eingestellt, das ähnliche Beatmungssituationen wie mit dem Oxylator[®] realisiert werden konnten. Zusätzlich wurde der PEEP mit 0, 2, 4 und 6 mbar eingestellt.

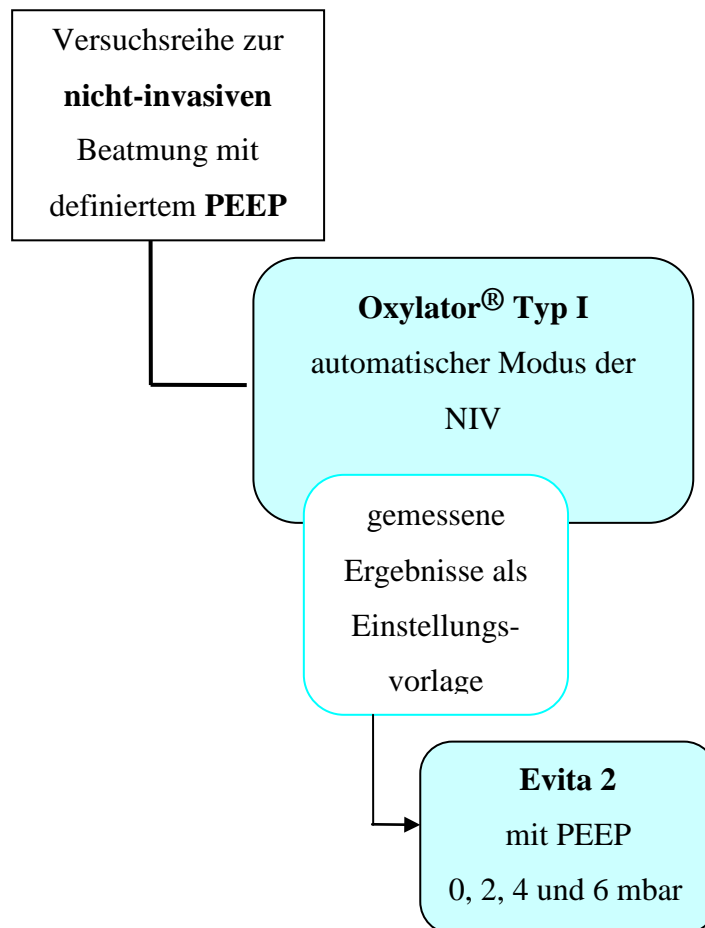


Abb. 12: schematische Darstellung der Versuchsreihe mit definiertem PEEP

3.6 Auswertungen

3.6.1 Auswertung der aufgezeichneten Beatmungsparameter

Für jede Kombination aus Geräte- und Modelleinstellung wurden die über TurboLab aufgezeichneten Daten (PT 1: Flow und Druck; PT 2: Flow) mit Excel (Fa. Microsoft) als Funktion der Zeit graphisch dargestellt. Bei maschineller Beatmung wurden mindestens 3 Respirationszyklen, bei der Beatmung mit Handbeatmungsbeutel mindestens 60 Sekunden aufgezeichnet. Aus den PT 1 Druck- und Flowkurven wurden die Beatmungsparameter wie folgt berechnet: Zunächst wurden die einzelnen Druckmaxima ermittelt und der Mittelwert aus mindestens drei Messpunkten einer Versuchsdurchführung errechnet. Ebenso wurde der PEEP aus mindestens drei Druckminima bestimmt. Die Inspirations- und Expirationszeiten der einzelnen Atemzyklen wurden in den erstellten Flowkurven gemessen und die Mittelwerte der In- und Expirationszeiten sowie die Länge der Atemzyklen und die Atemfrequenz berechnet. Der Inspirationsflow wurde als Mittelwert eines mit 200 Hz Abtastrate aufgezeichneten repräsentativen Flowsegments für jeden Atemzyklus bestimmt. Um das Atemzugvolumen zu berechnen, wurde die Zeit bestimmt, in der ein Inspirationsflow fließt. Der Mittelwert des Inspirationsflows wurde mit dem Mittelwert der Inspirationszeit multipliziert und ergab so das AZV. Dieses wurde wiederum mit der Atemfrequenz multipliziert und ergab das AMV. Das AMV gilt als das mit dem PT 1 gemessene AMV, also das AMV, welches tatsächlich durch die Beatmung generiert wurde. Bei der NIV steht, bedingt durch den Atemgasverlust durch das Sphinktermodell, dieses AMV der Lunge nicht vollständig für den möglichen Gasaustausch zur Verfügung. Durch Subtrahieren des mit dem Spirometer gemessenen gastralen Flows vom gemessenen AMV wurde das „effektive AMV“ errechnet.

Die Tabellen berechneter Mittelwerte und Standardabweichungen aus den fünf Versuchsdurchführungen sind pro Versuchsreihe in Abschnitt E „Tabellen der Messergebnisse“ einzusehen.

3.6.2 Auswertung der Volumenmessung mittels Spirometer

Der ösophageale bzw. gastrale Flow wurde aus den Messwerten des Glockenspirometers berechnet. Beim automatischen Betrieb eines Beatmungsgerätes wurde mit einer Stoppuhr die Zeit gemessen, die bis zum Erreichen von 5 Litern im Glockenspirometer benötigt wurde. Bei manueller Beatmung wurde nach zwei Minuten die Ventilation beendet und das im Spirometer aufgefangene Volumen bestimmt. Waren 5 Liter in weniger als 2 Minuten erreicht, so wurde diese Zeit bestimmt. Der gastrale Flow errechnete sich durch Division des gemessenen Volumens durch die entsprechende Zeit.

Tab. 5: Übersicht über die gemessenen und abgeleiteten Beatmungsparameter

Gemessene Parameter	Abgeleitete Parameter
maximaler Inspirationsdruck	
PEEP	
Expirationszeit	Atemzyklus
Inspirationszeit	Atemfrequenz
Inspirationsflow	Atemzugvolumen
	gemessenes AMV
Spirometervolumen	gastraler Flow
	effektives AMV

3.6.3 Statistische Berechnungen

Es wurden die multiple und lineare Regressionsberechnungen angewendet. Hierfür wurde das Programm Statistica (Fa. StatSoft (Europe) GmbH, Hamburg) eingesetzt.

4. Ergebnisse

4.1 Kalibrierungen der Flow- und Drucksensoren (Pneumotachographen)

Die Pneumotachographen wurden mit dem Gilibrator™ 2 auf ihre Messgenauigkeit hin geprüft. Es wurde hierfür ein grob definierter Flow zuerst durch die Pneumotachographen und dann zum Gilibrator™ 2 geleitet (s. 3.2.3.1). Die Grafik 13 zeigt die gegeneinander aufgetragenen Werte der beiden Messeinheiten.

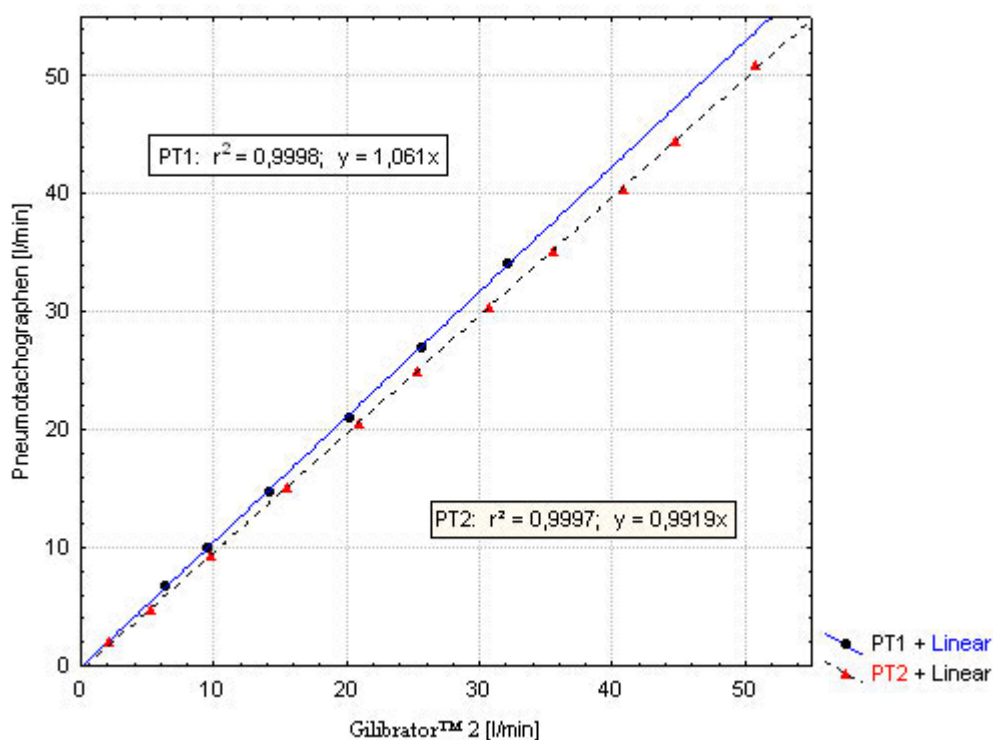


Abb. 13: Überprüfung der Pneumotachographen (PT1 und PT2) mit dem Gilibrator™ 2 (Fa. Gilian Instrument Corp., Wayne, USA): Die gemessenen Flowwerte wurde gegeneinander aufgetragen und die jeweilige lineare Regressionsanalyse durchgeführt (s. Formel in der Grafik)

Anhand der linearen Regressionsanalyse (Linien und dazugehörigen Gleichungen in der Grafik) wurden die Abweichungen ermittelt.

Die Überprüfung des Pneumotachographen 1 ergab eine Faktorabweichung von 1,061 und die Kontrolle des Pneumotachographen 2 eine Faktorabweichung von 0,992 vom gegebenen Ist-Wert des Gilibrator™ 2.

Die Werte des mit dem Pneumotachographen 1 gemessenen Flows wurden durch 1,061 dividiert. Die Abweichungen von 0,9919 des Pneumotachographen 2 wurden vernachlässigt.

Die Genauigkeit der Druckmessung des Pneumotachographen 1 wurde mit der Digima Champion überprüft (s. 3.2.3.1) und sind in Abbildung 14 dargestellt.

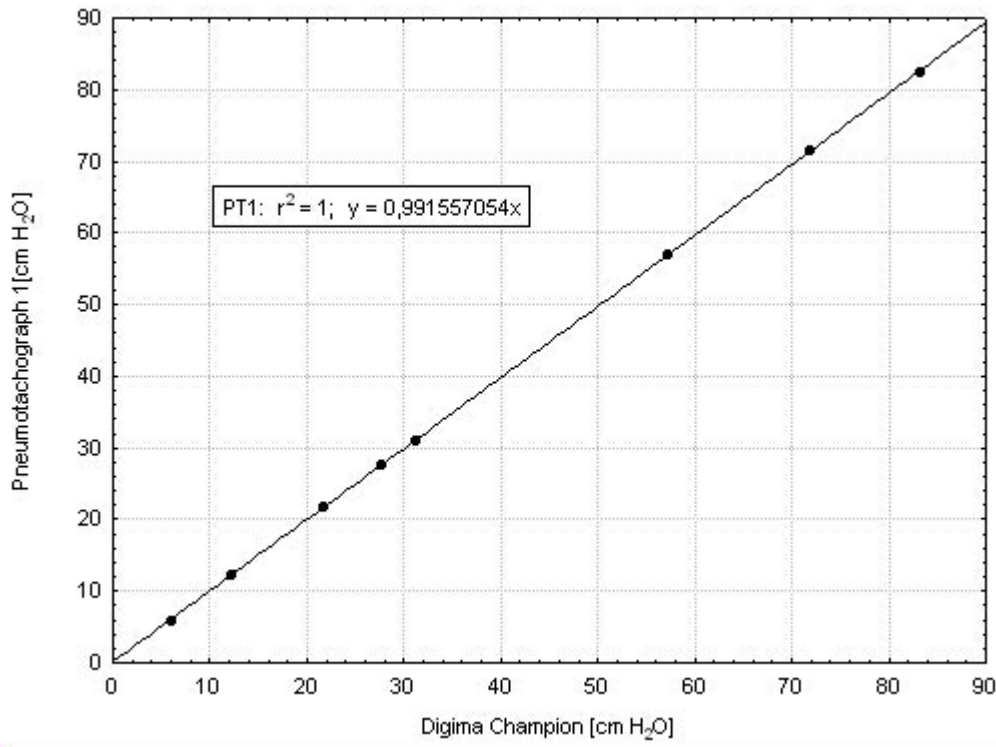


Abb. 14: Überprüfung des Pneumotachographen 1 mit dem Differenzdruckmessgerät Digima Champion (SI-Special Instruments, Gesellschaft für Mess-, Steuer- und Reglergeräte GmbH, Nördlingen): Die gemessenen Drücke wurden gegeneinander aufgetragen und die lineare Regressionsanalyse durchgeführt (s. Formel in der Grafik)

Die Punkte geben die gemessenen Werte an. Anhand der linearen Regressionsanalyse wurde die Abweichung berechnet (Linie und Gleichung).

Das angewendete Linear ergab eine Faktorabweichung von 0,992 zwischen den vom Pneumotachographen registrierten zu den durch die Digima Champion gemessenen Werte. Diese Abweichung wurde vernachlässigt.

4.2 Evaluierung des Sphinktermodells

4.2.1 Charakteristika anhand von Flow-Druck-Beziehungen

Das Ösophagussphinktermodell wurde durch Messung von flowresultierenden Drücken vor dem Sphinkter charakterisiert (s. 3.4.1). Die Abbildung 15 zeigt den vom Flow abhängigen charakteristischen Druckaufbau für vier verschiedene Messreihen, die im Laufe der Untersuchung zu unterschiedlichen Zeitpunkten durchgeführt wurden.

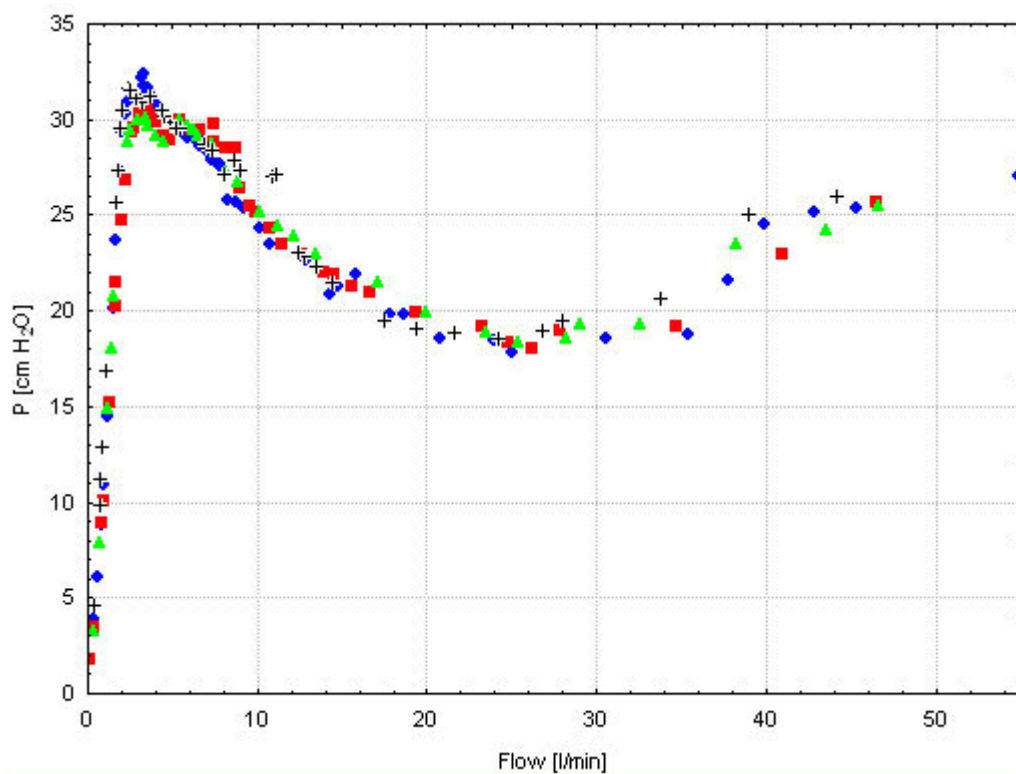


Abb. 15: Flow-Druck-Beziehungen des Sphinktermodells: die vier farbig verschiedenen Punktarten beschreiben die gemessenen Ergebnisse, die in voneinander unabhängig durchgeführten Messreihen registriert wurden.

Für kleine Flüsse steigt der Druck steil an, bis er bei ca. 2 l/min den Maximalwert von durchschnittlich ca. 31 cm H₂O (30,1 bis 32,4 cm H₂O) erreicht. Dies entspricht annähernd dem Druck der Wassersäule, die auf 33 cm H₂O über dem Sphinkter eingestellt wurde. Eine weitere Erhöhung des Flusses führt nun zu einer Abnahme des vor dem Sphinkter aufgebauten Drucks, der bei ca. 25-26 l/min das Minimum von 17 cm H₂O erreicht. Eine weitere Flowerrhöhung führt zu einer erneuten Druckerhöhung.

4.2.2 Charakteristika anhand von Beatmungskurven

Die Ventilation mit den verschiedenen Beatmungsgeräten und deren unterschiedlichen Einstellungen führen zu charakteristischen Wechselwirkungen mit dem Sphinktermodell:

Die folgende Abbildung zeigt beispielhaft die respiratorische Flow- und Druckkurve, die mit dem PT 1 sowie die gastrale Flowkurve, die mit dem PT 2 aufgezeichnet wurden. Die Kurvenverläufe sind typisch für diese Lungen-Beatmungsgerät-Kombination. Zu sehen ist ein Atemzyklus (Inspiration + Expiration).

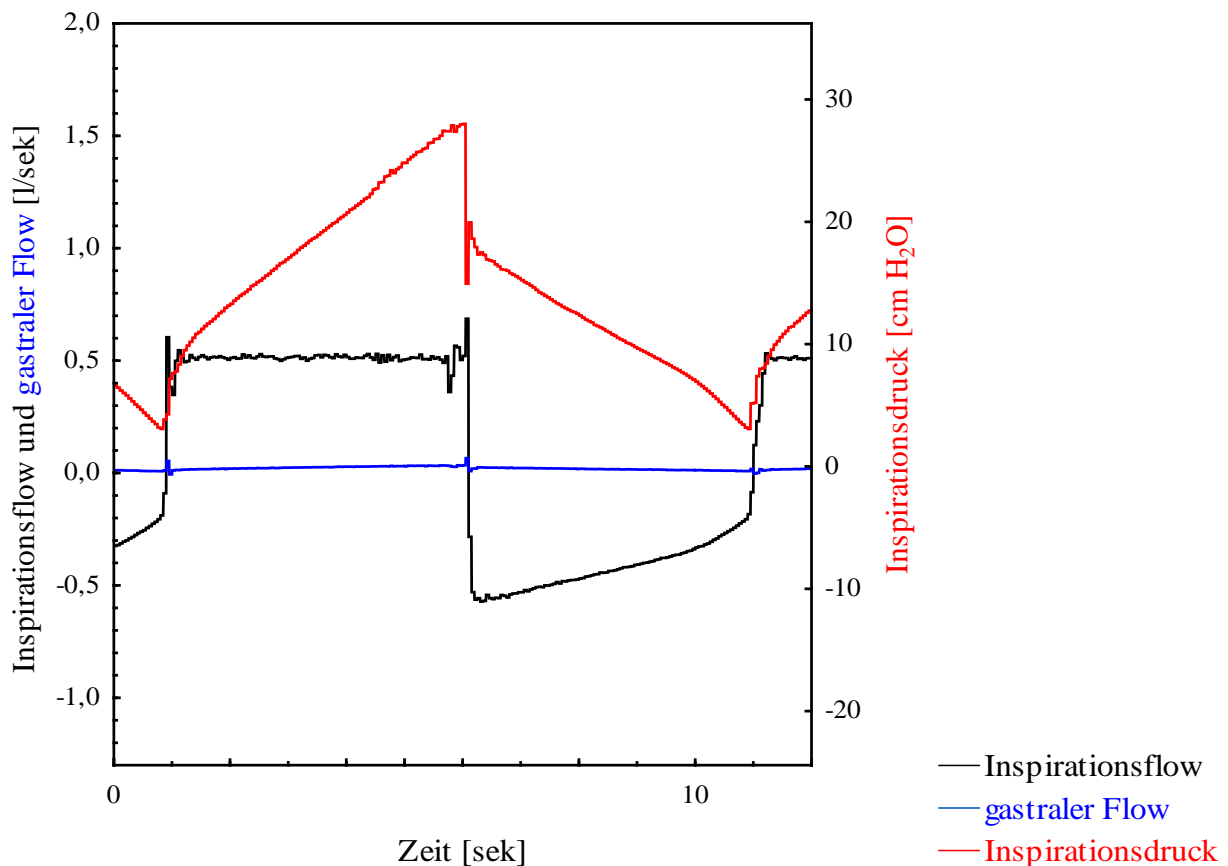


Abb. 16: Beispielkurven Oxylator[®] Typ I (Compliance 0,1 [l/mbar] / Resistance 2 [mbar*l⁻¹*sek] / Umschalt-
druck 30 cm H₂O / NIV): Flow- und Druckkurven eines Respirationszyklus

In diesem Beispiel wurde mit dem Oxylator[®] Typ I im automatischen Modus bei NIV beatmet. Es zeigt sich, dass in der Inspiration, wie auch in der Expiration, ein geringer Flow durch den Sphinkter (blaue Kurve) gelangt. Der Beatmungsdruck liegt hierbei unterhalb des Sphinkterverschlussdrucks.

Die folgende Abbildung zeigt Flow- und Druckkurven, generiert durch den Medumat[®] bei nicht-invasiver Beatmung, die mit den Pneumotachographen vor (PT 1) und hinter (PT 2) dem Ösophagussphinkter ermittelt wurden. Es handelt sich um die Standardeinstellung mit der Atemfrequenz 12/min und dem Atemzugvolumen 1000 ml. In dieser Abbildung wird jeweils ein Atemzyklus mit gleicher Beatmungsgeräteinstellung bei den fünf unterschiedlichen Lungenparameterkombinationen dargestellt.

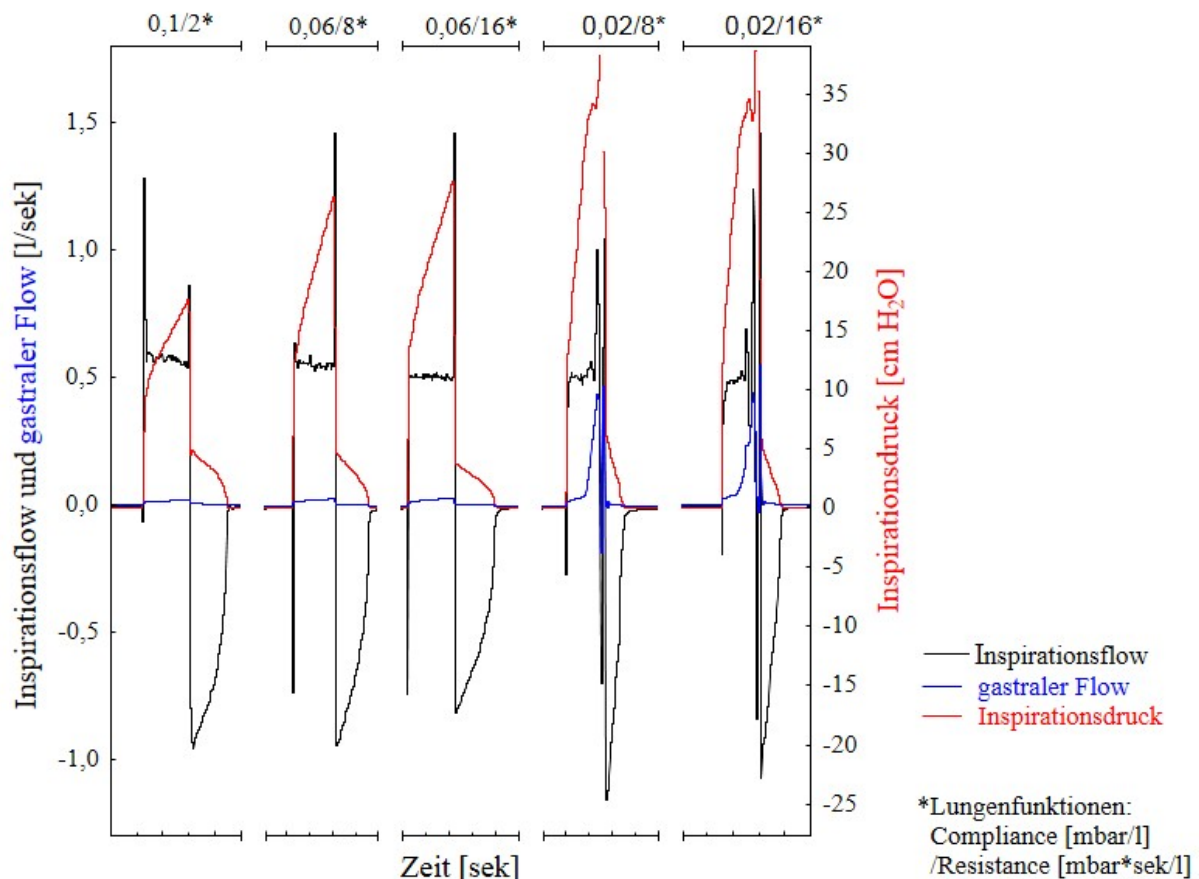


Abb. 17: Beispielkurven Medumat[®] (1000 ml AZV / NIV): Flow- und Druckkurven eines Respirationszyklus bei den jeweiligen Kombinationen der fünf Lungenparameter (Abszisse oben)

An diesen Beispielkurven ist ersichtlich, dass der Flow durch den Sphinkter bei Inspirationsdruckzunahme abhängig von den Lungenparametern unterschiedlich zunimmt. Die deutlichste Zunahme des Inspirationsdrucks und des gastralen Flows ist bei Verschlechterung der pulmonalen Compliance zu erkennen.

In der Abbildung 18 ist die Beatmung mit dem Handbeatmungsbeutel Smart Bag[®] bei guten Lungenfunktionen über 30 Sekunden zu sehen. Die Kurven des Inspirationsflows und Inspirationsdrucks repräsentieren die Beatmung in allen Versuchsdurchführungen mit Handbeatmungsbeuteln.

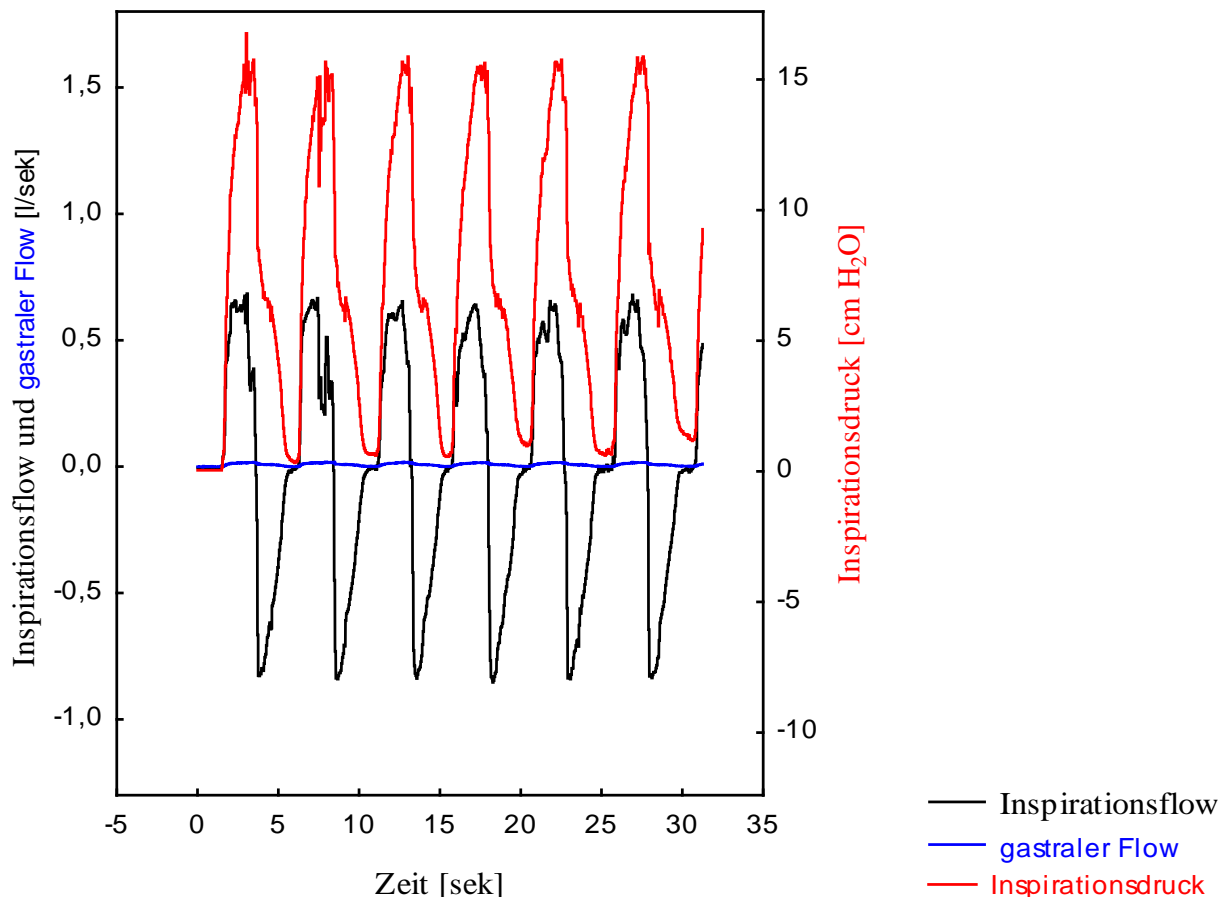


Abb. 18: Beispielkurven Smart Bag[®] (Compliance 0,1 [l/mbar] /Resistance 2 [mbar*s] / AZV 1000 ml / NIV): Flow- und Druckkurven mehrerer Respirationszyklen bei gleich bleibenden Lungenparametern

Veranschaulicht wird die sinusförmige bis deszelerierende Flowform durch die manuelle Ventilation mit Handbeatmungsbeutel. Auch die Druckkurve zeigt eine eher sinusförmige Form.

In der Expiration kommt es beim Smart Bag[®] bei der angestrebten Atemfrequenz von 12/min regelmäßig zu einem PEEP.

Die Beatmung mit dem Ambu[®] Mark III[®] zeigt das gleiche Muster. Die Flow- und Inspirationsdruckkurven in Abbildung 19 (Ambu[®] Mark III[®]) sind bei gleicher Lungeneinstellung mit gleichem AZV wie in Abbildung 18 (Smart Bag[®]) aufgezeichnet worden.

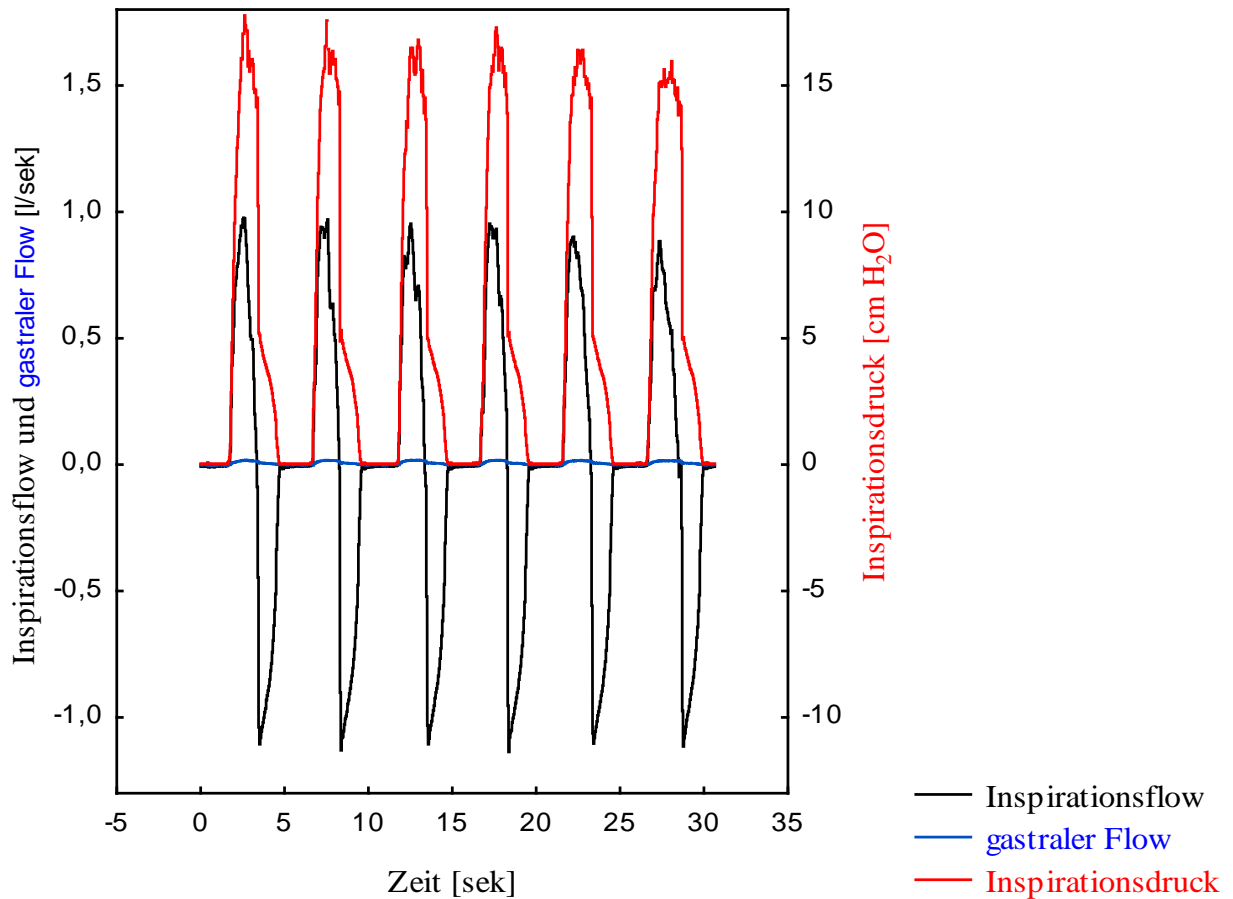


Abb. 19: Beispielkurven Ambu[®]-Beutel (Compliance 0,1 [l/mbar] /Resistance 2 [mbar*l⁻¹*sek] / AZV 1000 ml / NIV): Flow- und Druckkurven mehrerer Respirationszyklen bei gleich bleibenden Lungenparametern

Der verursachte gastrale Flow ist bei dieser Beatmung so gering, dass er unter dieser Skalierung kaum zu erkennen ist. Hier liegt der Mittelwert bei 0,38 l/min. Ein PEEP entsteht nicht.

4.3 Ergebnisse der invasiven und nicht-invasiven Ventilation

Die Darstellung der Ergebnisse wird getrennt in

- die Ergebnisse der einzelnen Beatmungsgeräte und
- die Vergleiche zwischen den Beatmungsgeräten.

4.3.1 Ergebnisse der einzelnen Beatmungsgeräte

In den folgenden Grafiken werden die errechneten Mittelwerte der fünf Messwiederholungen pro Einstellung wiedergegeben. Standardabweichungen sind in diesen Grafiken nicht enthalten, damit die Übersichtlichkeit gewährleistet werden konnte. Es soll lediglich ein visueller Eindruck der Zusammenhänge erfolgen.

Die Tabellen mit den errechneten Mittelwerten und den dazugehörigen Standardabweichungen der Ergebnisse der fünf Versuchsdurchführungen aller Versuchsreihen befinden sich in Abschnitt E „Tabellen der Messergebnisse“.

4.3.1.1 Oxylator[®] EM-100 Typ I und II

Tabellen der Messergebnisse in Abschnitt E: 18, 19, 22, 23, 24

Der Inspirationsflow ist bei IV und NIV sowohl im automatischen wie auch manuellen Betrieb nahezu konstant und liegt zwischen 0,32 und 0,55 l/sek. D.h. wie in der Abbildung 16 zu sehen ist, nimmt der Flow am Anfang der Inspiration sehr schnell zu, verbleibt dann auf annähernd gleichem Niveau und fällt anschließend wieder schnell ab.

Automatischer Modus: Einzige einstellbare Größe ist der Umschaltdruck. Dieser wurde von 20 bis 40 cm H₂O stufenweise gewählt. Aus eingestellter Lungencompliance und -resistance ergibt sich aus der Wechselwirkung mit dem Umschaltdruck die Länge der Inspirationszeit (Abb. 20 und 21).

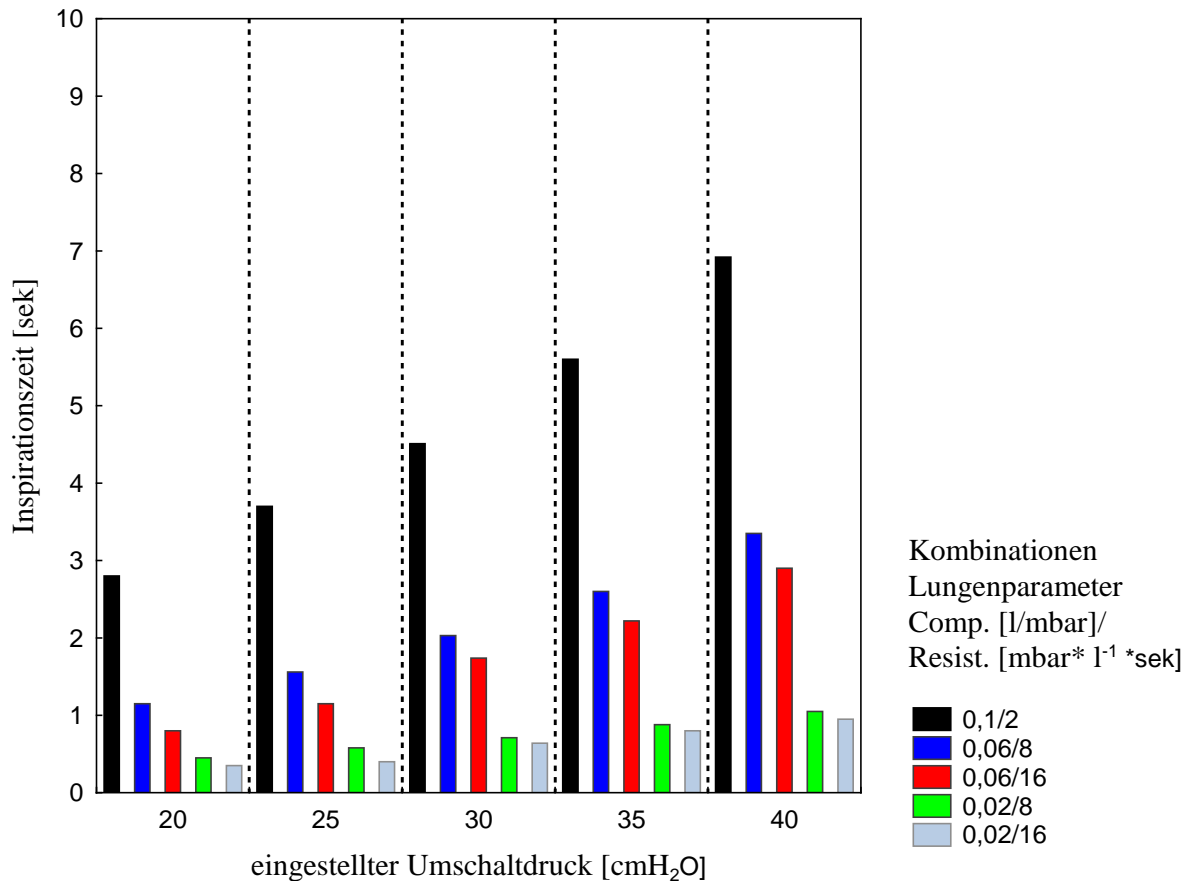


Abb. 20: Beatmung mit dem Oxylator[®] I (automat. Modus / IV): Zusammenhang von Inspirationszeit, Inspirationsdruck und Lungenparameter. Die **Farben** der Balken kennzeichnen die eingestellten Kombinationen der **Lungenparameter**. Die Höhe der Balken beschreibt die mittlere **Inspirationszeit**, abzulesen an der **Ordinate links**. An der **Abszisse** sind blockweise die eingestellten **Umschaltdrücke** dargestellt. Diese Grafik zeigt Mittelwerte ohne Standardabweichung.

Die Inspirationszeit beeinflusst bei dieser druckgesteuerten, nicht zeitkontrollierten Beatmung direkt die Atemfrequenz.

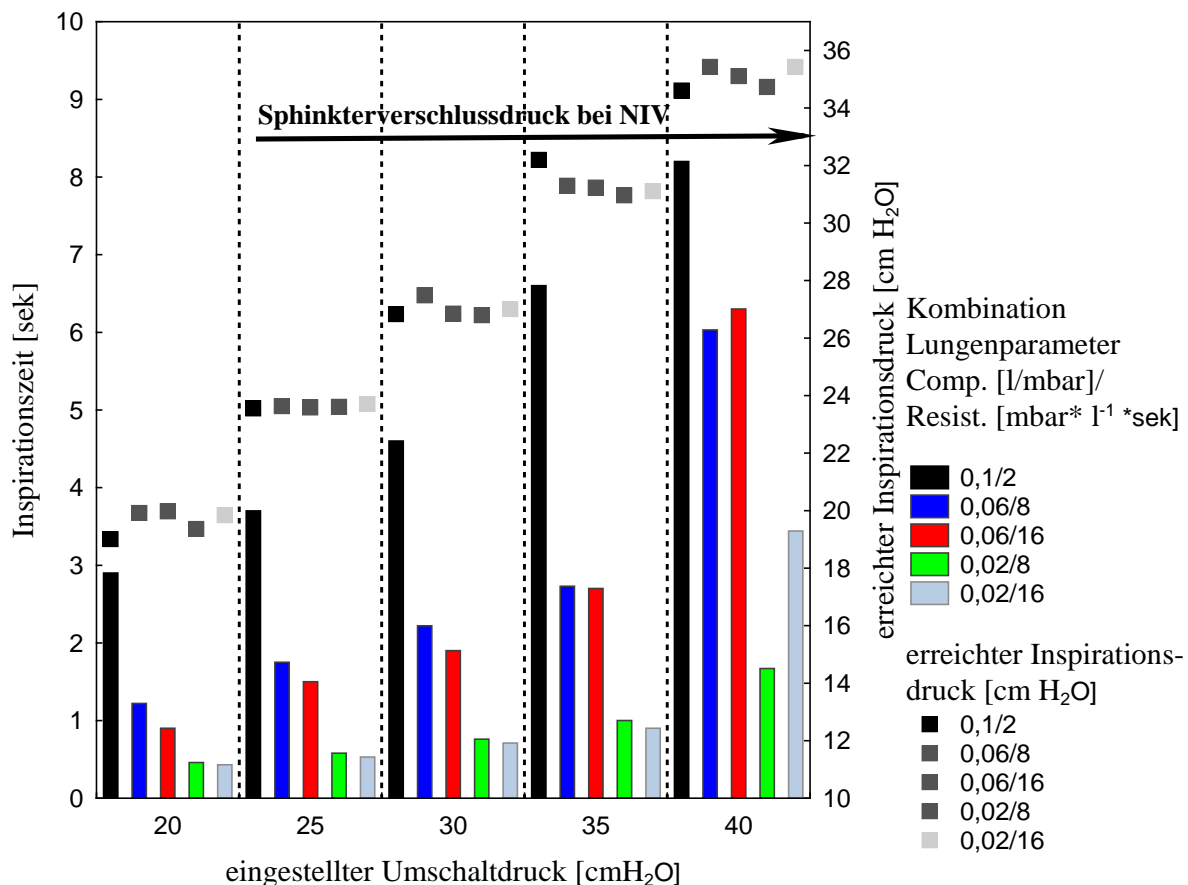


Abb. 21: Beatmung mit dem Oxylator® I (automat. Modus / NIV): Zusammenhang von Inspirationszeit, Inspirationsdruck und Lungenparameter. Die **Farben** der Balken kennzeichnen die eingestellten Kombinationen der **Lungenparameter**. Die Höhe der Balken beschreibt die mittlere **Inspirationszeit**, abzulesen an der **Ordinate links**. An der **Abszisse** sind blockweise die eingestellten **Umschaltdrücke** dargestellt. Durch die **Scatterpunkte** sind die Mittelwerte der tatsächlich **erreichten Inspirationsdrücke** nur für die NIV angegeben (**Ordinate rechts**). Diese Grafik zeigt Mittelwerte ohne Standardabweichung.

Die Inspirationszeiten nehmen mit Zunahme des eingestellten Umschaltdrucks zu. Dagegen nehmen sie mit Complianceabnahme und Resistancezunahme ab. Dies betrifft die IV und die NIV. Die Inspirationszeiten sind bei eingestelltem Umschaltdruck von 40 cm H₂O und der pulmonalen Compliance von 0,06 und 0,02 l/mbar unter NIV deutlich höher als die Inspirationszeiten bei IV mit gleichen Lungen- und Umschaltdruckeinstellungen. Hier liegt der erreichte Inspirationsdruck über dem Sphinkterverschlussdruck. Der erreichte Inspirationsdruck ist fast immer niedriger als der eingestellte Umschaltdruck.

Kernaussage: Die Inspirationszeit nimmt bei Überschreitung des Sphinkterdrucks (Abb. 21) zu. Dies ist Ausdruck der druckgesteuerten Beatmung mit Leckage.

Bei konstantem Inspirationsflow werden durch die Inspirationszeiten bis zum Erreichen der Umschaltdrücke auch die Atemzugvolumina definiert.

Das Atemzugvolumen multipliziert mit der Atemfrequenz ergibt das Atemminutenvolumen.

In Abbildung 22 und 23 ist das generierte AMV bei den jeweilig eingestellten Umschaltdrücken dargestellt.

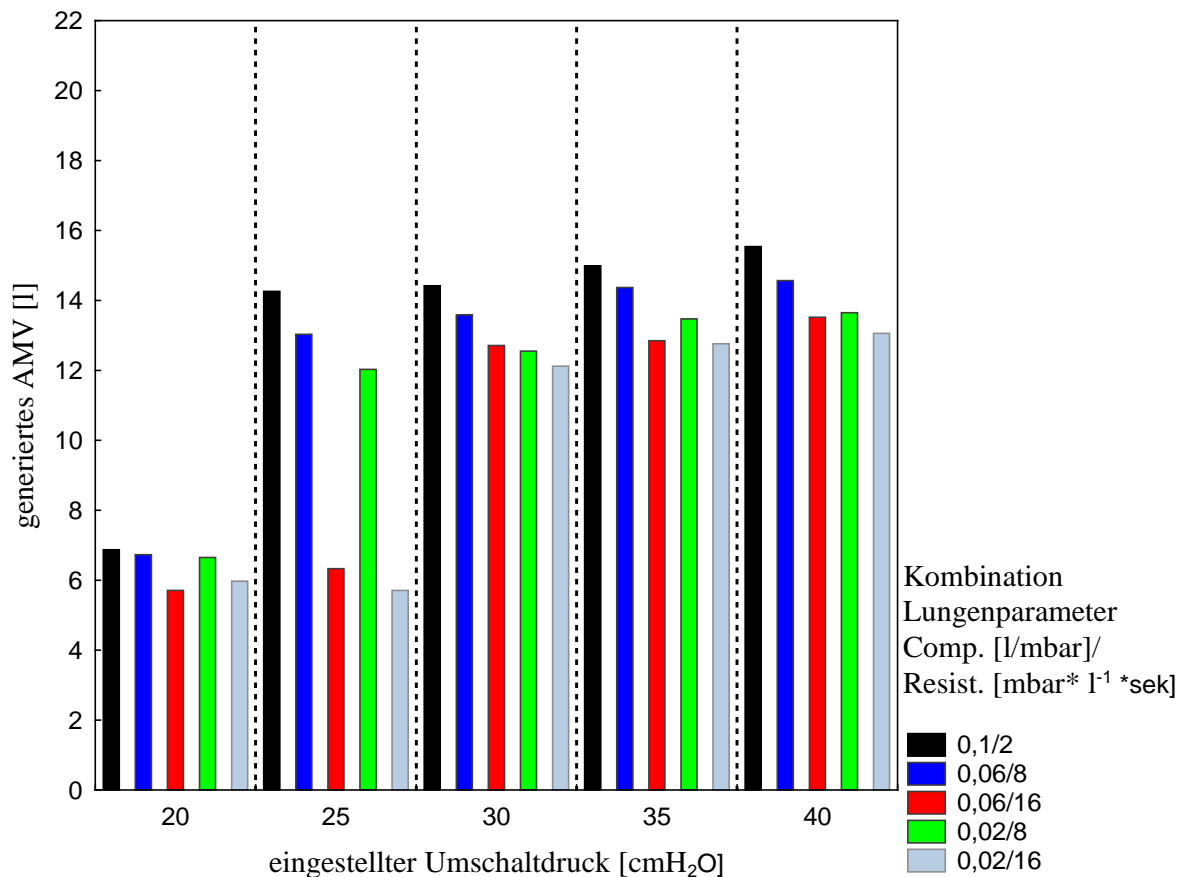


Abb. 22: Beatmung mit dem Oxylator® I (automat. Modus / IV): Zusammenhang AMV, eingestellter Umschaltdruck und Lungenparameter. Die **Farben** der Balken kennzeichnen die eingestellten Kombinationen der **Lungenfunktionen**. Die Höhe der Balken beschreibt das gemessene, **generierte AMV**, abzulesen an der **Ordinate links**. An der **Abszisse** sind blockweise die eingestellten **Umschaltdrücke** dargestellt. Diese Grafik zeigt die Mittelwerte ohne Standardabweichung.

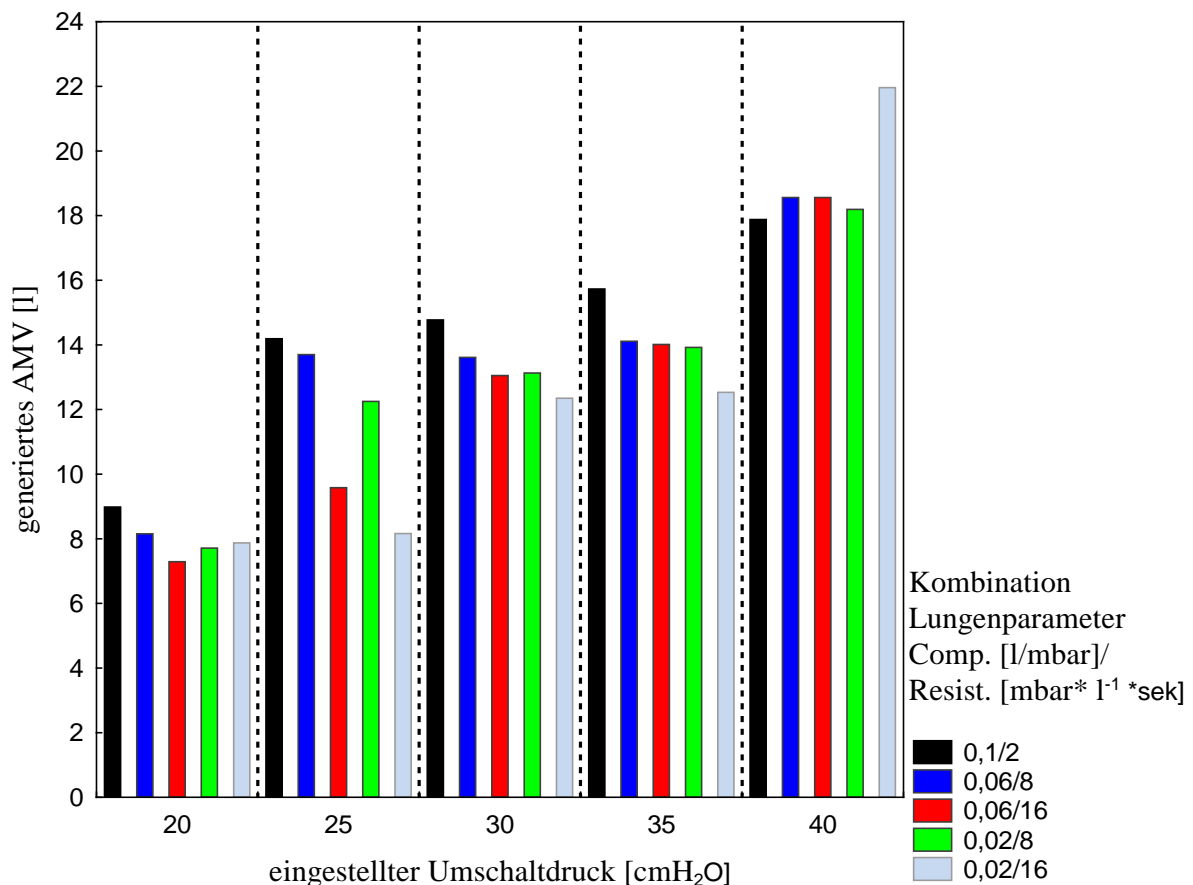


Abb. 23: Beatmung mit dem Oxylator® I (automat. Modus / NIV): Zusammenhang AMV, eingestellter Umschaltdruck und Lungenparameter. Die **Farben** der Balken kennzeichnen die eingestellten Kombinationen der **Lungenfunktionen**. Die Höhe der Balken beschreibt das gemessene, **generierte AMV**, abzulesen an der **Ordinate links**. An der **Abszisse** sind blockweise die eingestellten **Umschaltdrücke** dargestellt. Diese Grafik zeigt die Mittelwerte ohne Standardabweichung.

Das AMV bei NIV liegt meist höher als bei der IV. Beim Umschaltdruck von 25 cm H₂O ist das AMV bei der IV und NIV im Vergleich zu den anderen erreichten Atemminutenvolumina geringer, wenn eine pulmonale Resistenzsteigerung von 8 auf 16 mbar * l⁻¹ * sek vorliegt.

Der Umschaltdruck von 40 cm H₂O führt zu einer deutlichen Zunahme des generierten AMVs bei NIV. Hier liegt der erreichte inspiratorische Druck über dem Sphinkterverschlussdruck (vgl. Abb. 21).

Der PT 1 ermittelte die generierten Volumina direkt hinter dem Beatmungsgerät, so dass bei IV die gemessenen Atemvolumina den effektiv der Lunge zur Verfügung stehenden Atemvolumina entsprechen. Bei der NIV führt die Leckage über das Sphinktermodell zu einem Verlust des Atemgases, so dass der Lunge effektiv ein geringeres Atemvolumen zukommt.

Kernaussage: Die Leckage über den Ösophagus sphinkter führt bei druckgesteuerter Beatmung zu Zunahme des generierten AMV.

In Abbildung 24 ist der Anteil des Atemgases vom generierten AMV angegeben, das über die Leckage des Ösophagusphinktermodells verloren geht.

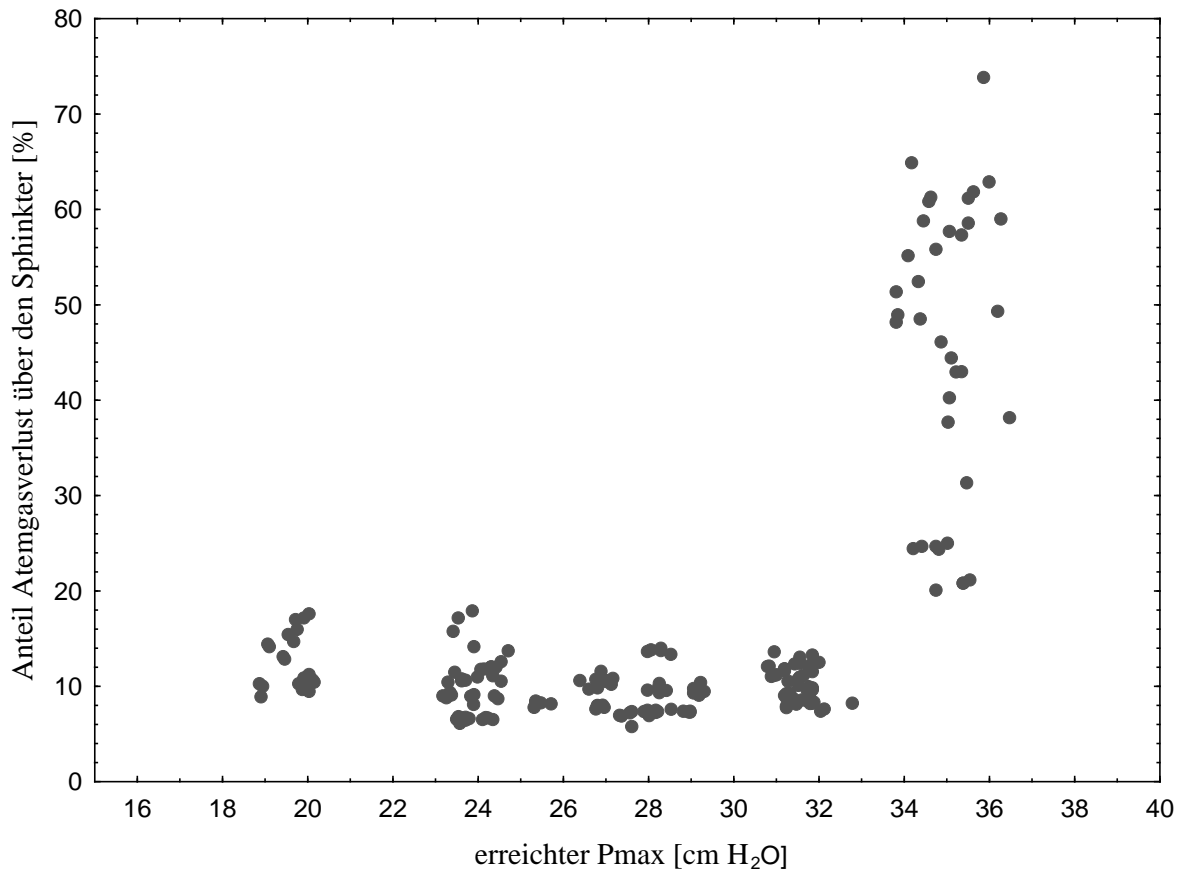


Abb. 24: Beatmung mit dem Oxylator[®] I + II (autom. Modus / NIV): Anteil des Verlustes des inspiratorischen Volumens vom AMV. Die Grafik verdeutlicht die Höhe des **Atemgasverlustes** über den Sphinkter, also der gastralen Insufflation (**Ordinate links**), bei den jeweils erreichten **Inspirationsdrücken** (**Abszisse**). Angegeben ist der prozentuale Anteil des Atemminutenvolumens, welcher über den Sphinkter in den Magen gelangt.

Beatmungsdrücke unterhalb des Sphinkterverschlussdrucks verursachen einen Verlust des Atemgases von ungefähr 10 % des generierten AMV. Die Grafik zeigt einen deutlichen Anstieg des prozentualen Atemgasverlustes, wenn der Beatmungsdruck unter druckgesteuerter Ventilation den Sphinkterverschlussdruck überschreitet.

Kernaussage: Das Überschreiten des Sphinkterdrucks durch den Inspirationsdruck führt zur deutlichen Zunahme der gastralen Insufflation.

Der Oxylator[®] generiert im automatischen Modus einen PEEP, der nicht einstellbar ist. Dieser ist in den Abbildungen 25 und 26 angegeben.

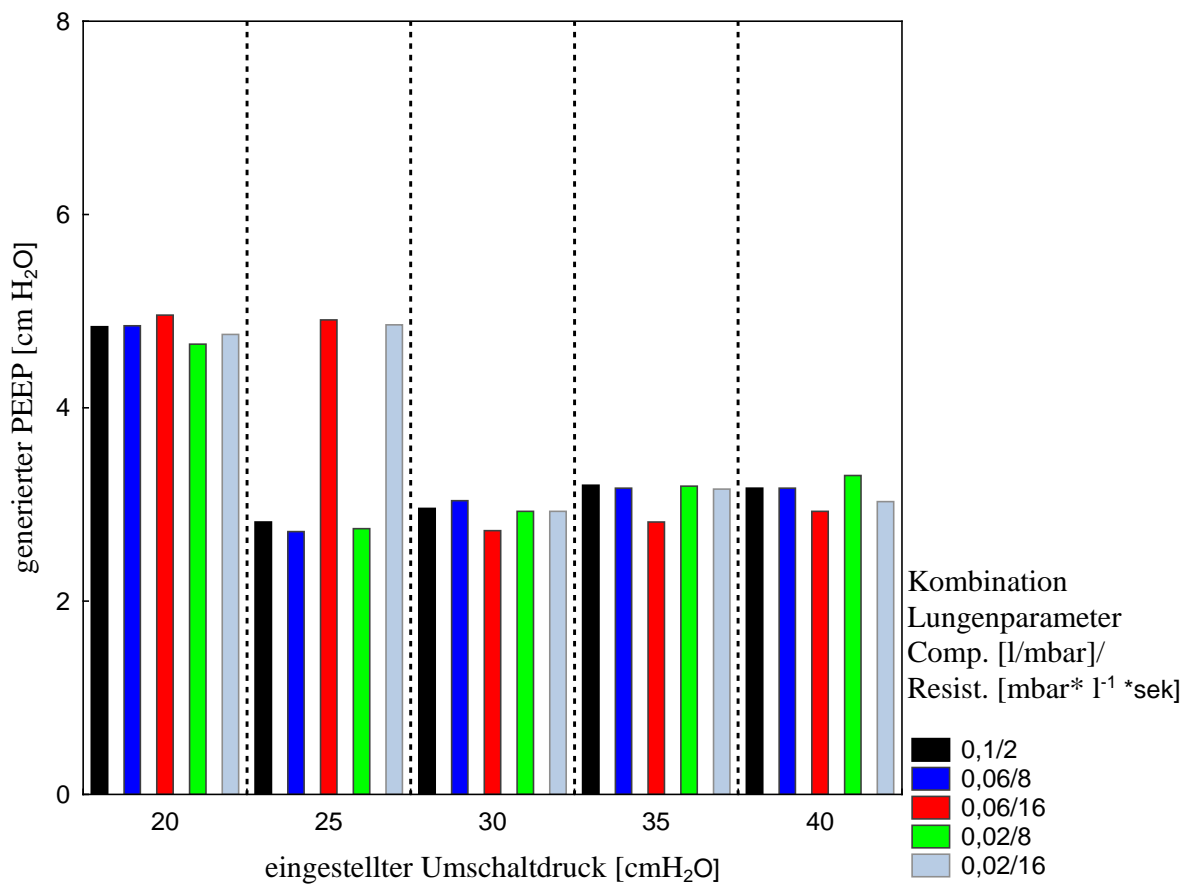


Abb. 25: Beatmung mit dem Oxylator[®] (automat. Modus / IV): Automatische Generierung des PEEPs. Die **Farben** der Balken kennzeichnen die eingestellten Kombinationen der **Lungenfunktionen**. Die Höhe des Balkens beschreibt den **PEEP (Ordinate links)**, der bei den fünf unterschiedlichen **Umschaltdrücken (Abszisse)** automatisch vom Oxylator[®] Typ I generiert wird. Diese Grafik zeigt Mittelwerte ohne Standardabweichung.

Die Höhe des PEEPs hängt hierbei von eingestelltem Umschaltdruck und der Resistance ab. Der Umschaltdruck von 20 cm H₂O generiert einen hohen PEEP, der mit zunehmendem Umschaltdruck zunächst deutlich abnimmt, bei weiterer Umschaltdruckerhöhung wieder ganz leicht zunimmt. Bei der Resistance von 16 mbar*I⁻¹*sek erfolgt der Abfall des PEEPs erst bei 30 cm H₂O eingestelltem Umschaltdruck. Beim Betrieb im automatischen Modus zeigt sich auch bei NIV ein fast identisches Muster.

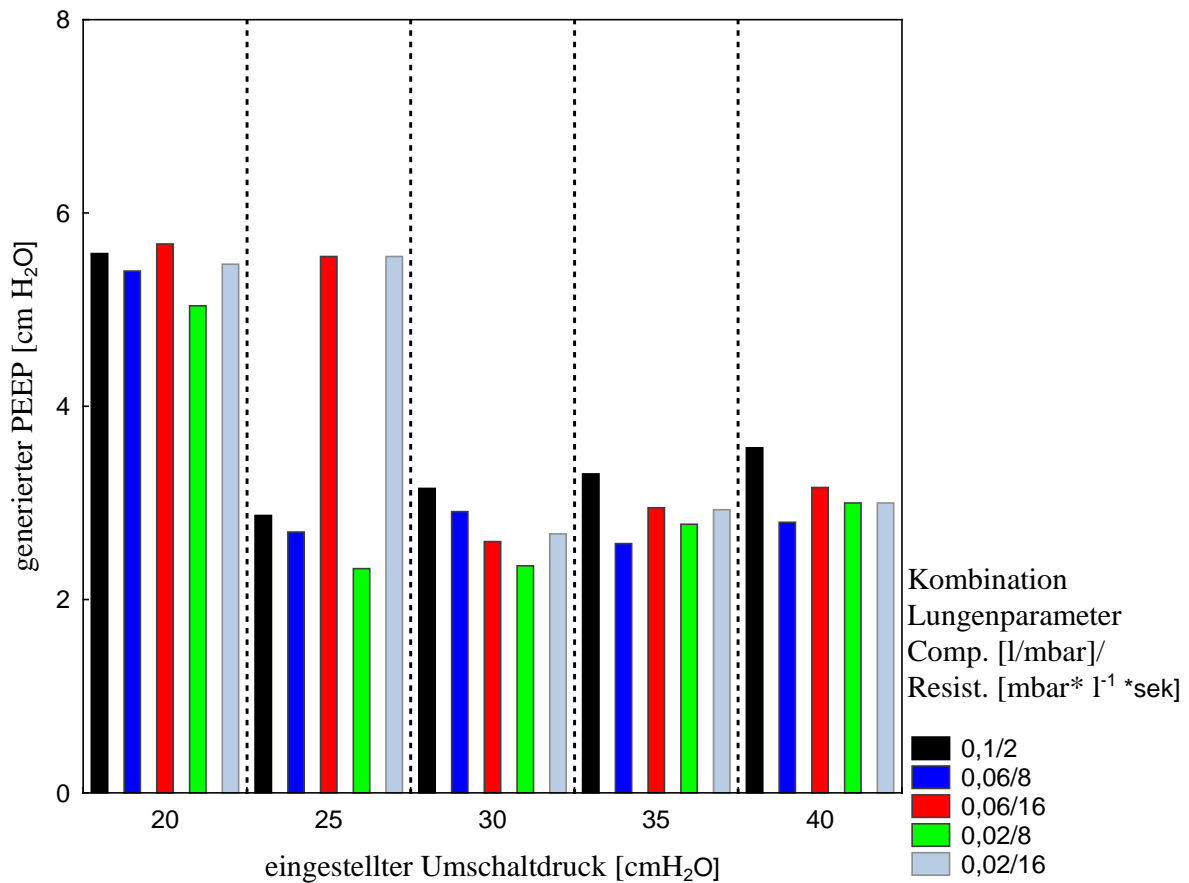


Abb. 26: Beatmung mit dem Oxylator[®] I (automat. Modus / NIV): Automatisch Generierung des PEEPs. Die **Farben** der Balken kennzeichnen die eingestellten Kombinationen der **Lungenfunktionen**. Die Höhe des Balkens beschreibt den **PEEP (Ordinate links)**, der bei den fünf unterschiedlichen **Umschaltdrücken (Abszisse)** automatisch vom Oxylator[®] Typ I generiert wird. Diese Grafik zeigt Mittelwerte ohne Standardabweichung.

Kernaussage: Der automatisch generierte PEEP kann nicht beeinflusst und nur bedingt abgeschätzt werden. Die Lungenfunktionen haben einen Einfluss auf die Höhe des PEEP-Niveaus.

Die folgenden Tabellen geben die gemessenen bzw. errechneten Maximal- und Minimalwerte an, die in diesen Versuchen durch den Oxylator® Typ I im automatischen Modus entstanden sind. Die vollständigen Tabellen sind im Abschnitt E einzusehen.

	Erreichter Insp. Druck [cm H ₂ O]	PEEP [cm H ₂ O]	Flow [l/sek]	Insp. Zeit [sek]	AF [1/min]	AZV [l]	AMV [l/min]
Min.	20	3	0,5	0,4	5	0,16	5,9
Max.	37	5	0,5	6,9	44	3,74	15,4

Tab. 6: Oxylator® Typ I (automat. Modus / **IV**): Minimal und maximal gemessene Beatmungsparameter. Die Tabelle beinhaltet die gerundeten **Mittelwerte der minimal und maximal** gemessenen bzw. errechneten **Ergebnisse** der Beatmungsparameter, die durch den Oxylator® im **automatischen Modus** generiert wurden. Die hierbei angegebenen Extrema sind **nicht zusammenhängend** dargestellt. Sie setzen sich aus mindestens sieben unterschiedlichen Beatmungen zusammen, d.h. sie wurden nicht oder nur teilweise bei dem gleichen Versuch gemessen.

	Erreich. Insp. Druck [cm H ₂ O]	PEEP [cm H ₂ O]	Flow [l/sek]	Insp. Zeit [sek]	AF [1/min]	AZV [l]	gemess. AMV [l/min]	gastr. Flow [l/min]
Min.	19	2	0,4	0,4	4	0,19	7,6	0,85
Max.	35	6	0,5	8,2	46	4,16	20,4	11,78

Tab. 7: Oxylator® Typ I (automat. Modus / **NIV**): Minimal und maximal gemessene Beatmungsparameter. Die Tabelle beinhaltet die gerundeten **Mittelwerte der minimal und maximal** gemessenen bzw. errechneten **Ergebnisse** der Beatmungsparameter, die durch den Oxylator® im **automatischen Modus** generiert wurden. Die hierbei angegebenen Extrema sind **nicht zusammenhängend** dargestellt. Sie setzen sich aus mindestens neun unterschiedlichen Beatmungen zusammen, d.h. sie wurden nicht oder nur teilweise bei dem gleichen Versuch gemessen.

Kernaussage: Im automatischen Betrieb werden mit dem Oxylator® in den Versuchen Beatmungsgrößen mit sehr hoher Varianz erreicht.

Manueller Modus: Die Vorgabe bei dieser Versuchsreihe war die Atemfrequenz von 12/min. Die Inspiration wurde nach 2 Sekunden abgebrochen, wenn die Inspirationszeit nicht durch Erreichen des Umschaltdrucks und somit vom Gerät selber limitiert wurde. Wurde der Umschaltdruck innerhalb dieser 2 Sekunden nicht erreicht, ist die automatische Limitierung der Inspirationszeit auch bei weiterer Erhöhung des Umschaltdrucks nicht zu erwarten. Aus der Erhöhung des Umschaltdrucks dürfte keine Veränderung in der Beatmung resultieren und diese wäre somit unnötig. Diese These wurde stichpunktartig überprüft.

In den Folgenden Tabellen 8 und 9 sind die effektiv, der Lunge zur Verfügung stehenden AMV angegeben, die bei der manuellen Betätigung des Oxylator[®] entstanden sind.

Eingestel. Umschalt- druck [cm H ₂ O]	Comp. 0,1 [l/mbar] Resist. 2 [mbar*l ¹ *sek]	Comp. 0,06 [l/mbar] Resist. 8 [mbar*l ¹ *sek]	Comp. 0,06 [l/mbar] Resist. 16 [mbar*l ¹ *sek]	Comp. 0,02 [l/mbar] Resist. 8 [mbar*l ¹ *sek]	Comp. 0,02 [l/mbar] Resist. 16 [mbar*l ¹ *sek]
20	10,95	4,57	3,64	1,46	1,04
25	(12,3)	6,91	5,49	1,98	1,39
30	(11,91)	10,88	8,22	2,95	2,19
35	(11,15)	(11,36)	11,41	3,48	2,96
40	(11,42)	(11,86)	(10,84)	4,43	3,92

Tab. 8: Oxylator[®] Typ I (manuell. Modus/ IV): AMV bei AF 12/min. Angegeben sind die Mittelwerte der errechneten, effektiven **Atemminutenvolumina**. Die **obere Spalte** beinhaltet die am Lungensimulator eingestellten Werte für die **Compliance** und **Resistance**. Die **schwarz** gedruckten Werte des AMV beschreiben die Beatmung ohne Erreichen des Umschaltdrucks innerhalb von ca. 2 Sekunden. Die Inspiration wurde durch den Anwender abgebrochen (**zeitgesteuert**). Die **rot** gedruckten Messwerte ergaben sich durch Erreichen des Umschaltdrucks (**druckkontrolliert**). Die **Klammern** kennzeichnen die stichpunktartigen Kontrollen.

Der Flow lag bei diesen Versuchen zwischen 0,3 und 0,5 l/sek (Tab. 19).

Eingestel. Umschalt- druck [cm H ₂ O]	Comp. 0,1 [l/mbar] Resist. 2 [mbar*l ¹ *sek]	Comp. 0,06 [l/mbar] Resist. 8 [mbar*l ¹ *sek]	Comp. 0,06 [l/mbar] Resist. 16 [mbar*l ¹ *sek]	Comp. 0,02 [l/mbar] Resist. 8 [mbar*l ¹ *sek]	Comp. 0,02 [l/mbar] Resist. 16 [mbar*l ¹ *sek]
20	10,2	5,0	4,6	1,7	1,4
25	(10,0)	7,7	5,6	2,5	1,7
30	(11,3)	10,6	9,2	3,3	3,0
35	(11,6)	(11,4)	11,0	4,1	3,8
40	(12,2)	-	-	6,7	5,5

Tab. 9: Oxylator[®] Typ I (manuell. Modus/ NIV): AMV bei AF 12/min. Angegeben sind die Mittelwerte der errechneten, effektiven **Atemminutenvolumina**. Die **obere Spalte** beinhaltet die am Lungensimulator eingestellten Werte für die **Compliance** und **Resistance**. Die **schwarz** gedruckten Werte des AMV beschreiben die Beatmung ohne Erreichen des Umschaltdrucks innerhalb von ca. 2 Sekunden Die Inspiration wurde durch den Anwender abgebrochen (**zeitgesteuert**). Die **rot** gedruckten Messwerte ergaben sich durch Erreichen des Umschaltdrucks (**druckkontrolliert**). Die **Klammern** kennzeichnen die stichpunktartigen Kontrollen. Bei den **kurziv, fett** gekennzeichneten Werte des AMV ist ein gastraler Flow zwischen 2 bis 3 l/min gemessen worden. Bei den übrigen Beatmungen lag der gastrale Flow unter 2 l/min. **Striche** bezeichnen Bereiche, für die aus dem oben genannten Grund keine Messungen mehr durchgeführt wurden.

Der Flow lag bei diesen Versuchen zwischen 0,4 und 0,5 l/sek (Tab. 24). Angegeben ist das effektive AMV (Atemgasverlust über den Sphinkter subtrahiert vom generierten AMV), das bei IV dem generierten AMV entspricht. Die effektiven Atemminutenvolumina liegen bei der NIV insgesamt leicht höher als bei der IV, sofern der Umschaltdruck innerhalb des 2 Sekunden-Fensters erreicht wurde. Bei zeitgesteuerter Beatmung sind die Volumina annähernd gleich.

Kernaussage: Je schlechter die Lungenfunktion, desto wahrscheinlicher beatmet der Oxylator[®] druckkontrolliert. Umgekehrt gilt, je besser die Lungenfunktion desto wahrscheinlicher ist eine Zeitlimitierung notwendig.

4.3.1.2 Medumat® Standard a

Betrieb mit Standardeinstellungen: Tabelle der Messergebnisse in Abschnitt E: 27

Zunächst werden Ergebnisse der Standardeinstellungen am Medumat® (AF 12/min und AZV 500 und 1000 ml) vorgestellt. In Abschnitt 4.3.2.1 werden die Ergebnisse im direkten Vergleich mit den Ergebnissen des Oxylator® Typ I dargestellt.

Die Abbildung 27 zeigt die resultierenden Inspirationsdrücke und den gastralen Flow bei NIV, die bei der Beatmung mit den Standardzielvorgaben von AZV und AF entstehen.

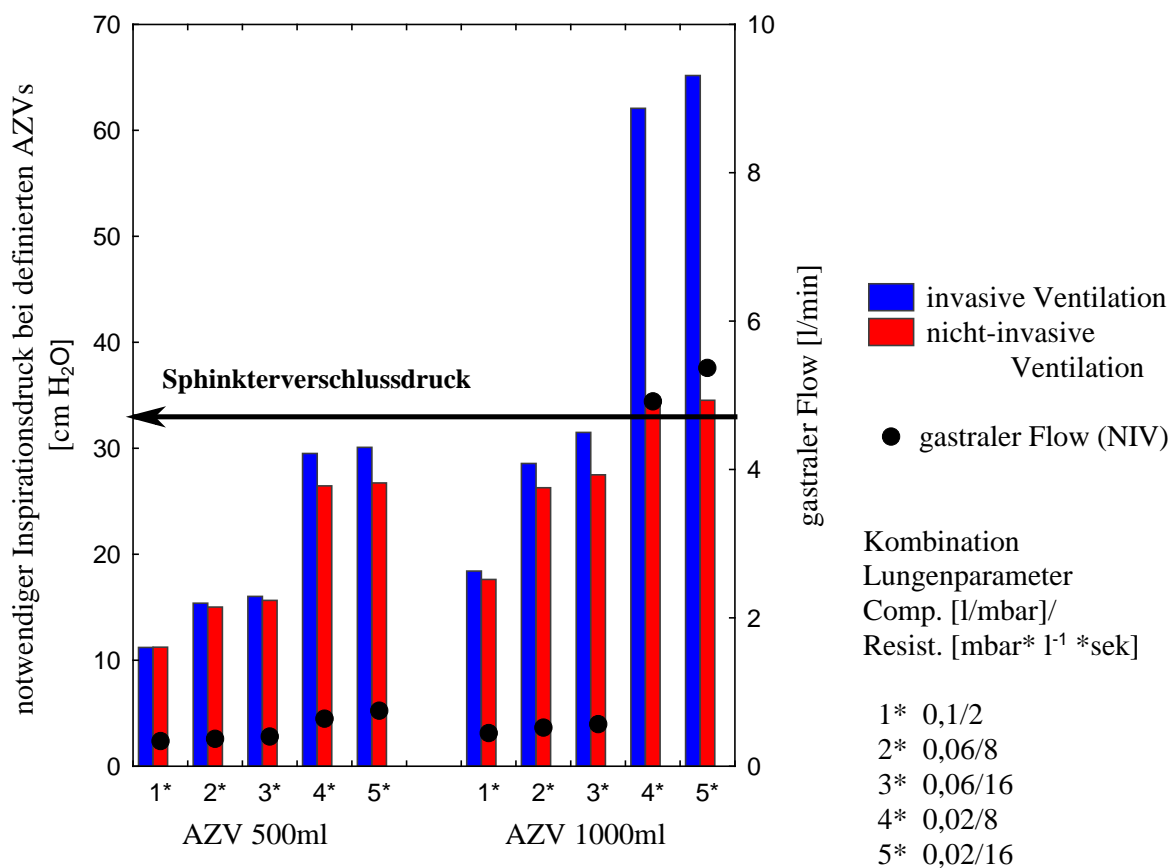


Abb. 27: Beatmung mit dem Medumat® (Standardeinstellungen / IV und NIV): resultierende Inspirationsdrücke und gastraler Flow. Die **Farben** der Balken kennzeichnet die **invasive (blau)** und die **nicht-invasive (rot)** Ventilation. An der **Abszisse** ist die Kombination der **Lungenparameter** gekennzeichnet, die mit den **Zielatemzugvolumina** 500 ml und 1000 ml beatmet wurden. Die Höhe der Balken beschreibt den hierfür notwendigen **Inspirationsdruck (Ordinate links)** bei einer AF von 12/min. Der bei der NIV resultierte **gastrale Flow** ist an der **Ordinate rechts** abzulesen.

Zu sehen ist hier, dass die Beatmung mit dem Ziel des AZV von 500 ml keine Beatmungsdrücke über 30 cm H₂O benötigt. Eine deutliche Druckzunahme ist bei dem AZV von 1000 ml erkennbar. Diese liegt ab der pulmonalen Compliance von 0,02 l/mbar deutlich über 60 cm H₂O. Ein Anstieg des gastralen Flows wurde erst bei diesen pulmonalen Einstellungen bei dem AZV von 1000 ml gemessen. Die Compliancereduzierung bewirkt einen größeren Einfluss auf die Inspirationsdruckzunahme als die Resistanceerhöhung.

Die gemessenen Inspirationszeiten lagen im Mittel zwischen 1,6 und 2 Sekunden. Die errechnete AF lag beim AZV von 500 ml bei NIV bei 13/min. Der Mittelwert des generierten Flows lag beim AZV von 500 ml zwischen 0,2 und 0,3 l/sek. Bei 1000 ml AZV ergab sich ein Flow von 0,4 bis 0,6 l/sek.

Kernaussagen: Das AZV von 500 ml ist bei allen Kombinationen von Lungenparametern mit Inspirationsdrücken unterhalb des Sphinkterverschlussdrucks möglich.

Die Überschreitung des Sphinkterverschlussdrucks führt zur sprunghaften Zunahme der gastralen Insufflation mit Abnahme des gemessenen Inspirationsdrucks. Dies wird nur mit einem AZV von 1000 ml erreicht. Die pulmonale Compliance hat auf den notwendigen Inspirationsdruck einen grösseren Einfluss als die pulmonale Resistance.

4.3.1.3 Handbeatmungsbeutel

Tabellen der Messergebnisse in Abschnitt E: 28 + 29

Die Handbeatmungsbeutel wurden bei IV und NIV mit der AF von 12/min und einem Ziel-AZV von 500 bzw. 1000 ml manuell betätigt. Hier liegt eine frequenz- und volumenkontrollierte Beatmung vor. Die Beatmung wurde in allen Kombinationen durch den gleichen Untersucher durchgeführt.

Die Abbildung 28 zeigt die resultierenden Inspirationsdrücke und den gastralen Flow bei NIV, die bei der Beatmung mit den Standardzielvorgaben von AZV und AF entstehen.

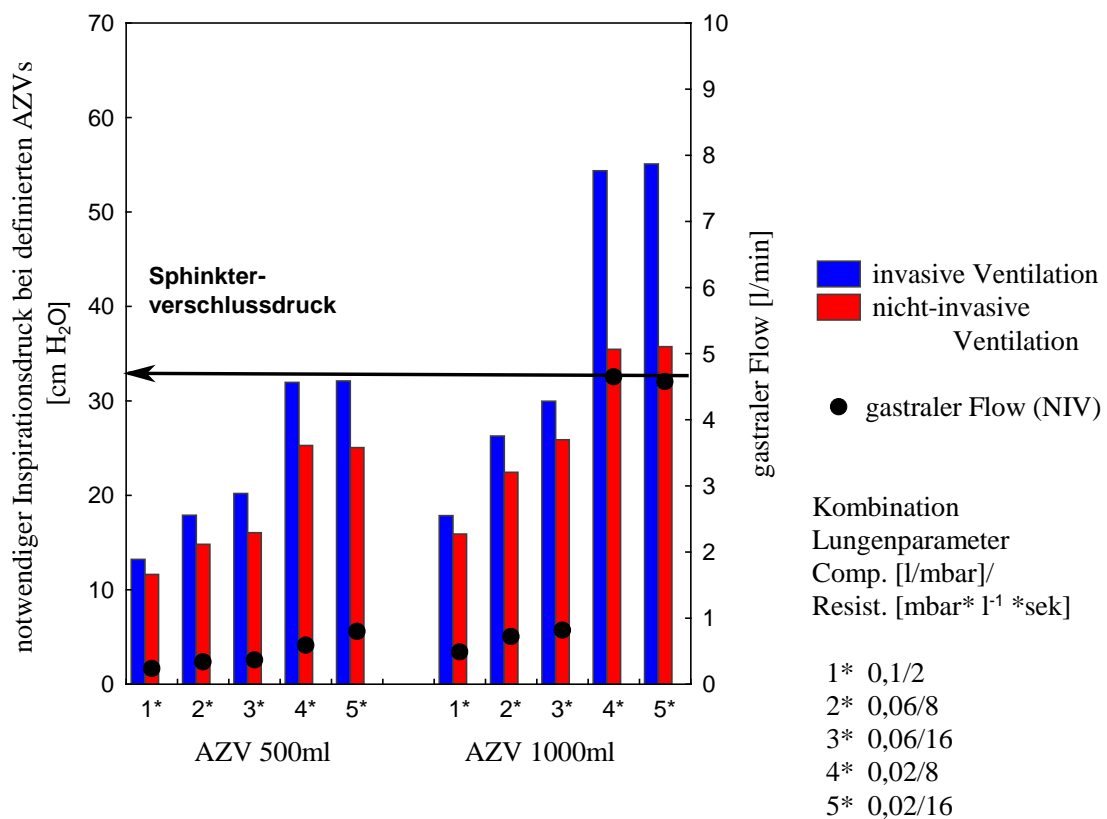


Abb. 28: Beatmung mit dem Smart Bag[®] (Standardzielgrößen AZV 500ml und 1000 ml / IV und NIV): resultierende Inspirationsdrücke und gastraler Flow. Die **Farben** der Balken kennzeichnet die **invasive (blau)** und die **nicht-invasive (rot)** Ventilation. An der **Abszisse** ist die Kombination der **Lungenparameter** gekennzeichnet, die mit den **Zielatemzugvolumina** 500 ml und 1000 ml beatmet wurden. Die Höhe der Balken beschreibt den hierfür notwendigen **Inspirationsdruck (Ordinate links)** bei einer AF von 12/min. Der bei der NIV resultierte **gastrale Flow** ist an der **Ordinate rechts** abzulesen.

Bei der Beatmung mit dem Smart Bag[®] sind annähernd gleiche Resultate erzielt worden, wie bei der Anwendung des Ambu[®]-Beutels.

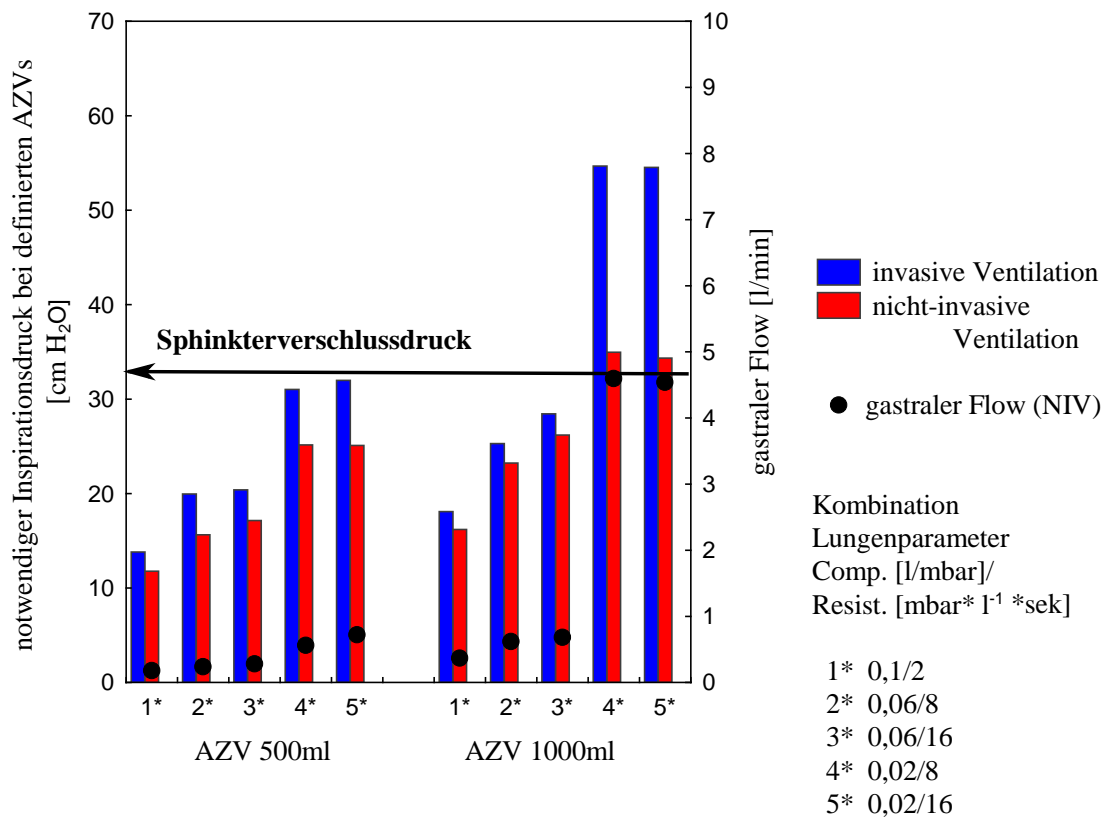


Abb. 29: Beatmung mit dem Ambu[®]-Beutel (Standardzielgrößen AZV 500ml und 1000 ml / IV und NIV): resultierende Inspirationsdrücke und gastraler Flow. Die **Farben** der Balken kennzeichnet die **invasive (blau)** und die **nicht-invasive (rot)** Ventilation. An der **Abszisse** ist die Kombination der **Lungenparameter** gekennzeichnet, die mit den **Zielatemzugvolumina** 500 ml und 1000 ml beatmet wurden. Die Höhe der Balken beschreibt den hierfür notwendigen **Inspirationsdruck (Ordinate links)** bei einer AF von 12/min. Der bei der NIV resultierende **gastrale Flow** ist an der **Ordinate rechts** abzulesen.

Bei der IV werden bei Lungeneinstellungen mit der Compliance 0,02 l/mbar sehr hohe Beatmungsdrücke benötigt, um mit dem gewünschten Volumen zu ventilieren. Die Beatmungsdrücke bei beiden Beatmungsbeuteln erreichen hier Werte um 55 cm H₂O. Die Complianceabnahme auf 0,02 l/mbar hat den deutlichsten Einfluss auf die Druckerhöhung bei den vorgegebenen Ventilationsvolumina. Hierbei zeigt es sich, dass die Druckzunahme bei doppeltem Zugvolumen in diesem Bereich sich auch fast verdoppelt.

Der Mittelwert des Inspirationsflows variiert bei beiden Handbeatmungsbeuteln zwischen 0,3 und 0,5 l/sek unabhängig davon, ob invasiv oder nicht-invasiv ventiliert wird. Eine Ausnahme von 0,7 l/sek mit dem Ambu[®]-Beutel wurde bei dem AZV von 1000 ml und „gesunder“ Lun-

ge erzeugt. Tendenziell nimmt die Flowhöhe mit zunehmender Complianceverringernung und Resistenceerhöhung ab.

Bei NIV mit 500 ml AZV werden keine Inspirationsdrücke über dem Sphinkterverschlußtonus benötigt, so dass sich der Fluss durch das Sphinktermodell erst bei einem AZV von 1000 ml und einer Compliance von 0,02 l/mbar sprunghaft auf Werte von 4,5 und 4,6 l/min steigert. Die Verluste des AZVs durch die Sphinkterleckage betragen insgesamt Werte zwischen 3 und 44 % vom generierten Atemzugvolumen.

Wie aus den Tabellen 28 und 29 in Abschnitt E zu entnehmen ist, liegt bei beiden Handbeatmungsbeuteln die Inspirationszeit im Mittel zwischen 1 und 2,6 Sekunden, bedingt durch das angestrebte Volumen und die Atemfrequenz von 12/min. Bei nicht-invasiver Ventilation wird mit dem Smart Bag[®] bei 1000 ml AZV in Einzelfällen sogar eine Inspirationszeit um 3 Sekunden benötigt. Hier lag der Schwerpunkt der Beatmung primär auf dem Erreichen des Ziel-AZV und sekundär auf Einhalten der Inspirationszeit von 2 Sekunden.

Kernaussagen: Das AZV von 500 ml ist bei allen Kombinationen von Lungenparametern mit Inspirationsdrücken unterhalb des Sphinkterverschlussdrucks möglich.

Überschreiten des Sphinkterverschlussdrucks führt zur sprunghaften Zunahme der gastralen Insufflation mit Abnahme des gemessenen Inspirationsdruckes. Dies wird nur mit einem AZV von 1000 ml erreicht. Die pulmonale Compliance hat auf den notwendigen Inspirationsdruck einen grösseren Einfluss als die pulmonale Resistance.

Ein Vorteil der Flowlimitierung des Smart Bag[®] zur Limitierung des gastralen Flows ist hier nicht zu erkennen.

4.3.1.4 Evita 2

Tabellen der Messergebnisse in Abschnitt E: 30-33

Die gemessenen und errechneten Beatmungsparameter aus der Beatmung mit dem Oxylator[®] Typ I (automat. Modus / NIV) wurden in Kombination mit allen fünf Lungenparametereinstellungen an der Evita 2 nahegestellt. Die Evita bietet die Möglichkeit mit PEEP zu beatmen.

Es wurde eine volumenkontrollierte Beatmung mit rechteckiger Flowkurve gewählt und nur die nicht-invasive Ventilation durchgeführt. Alle Beatmungs-Lungen-Kombinationen wurden

an der Evita 2 mit PEEP von 0, 2, 4 und 6 mbar durchgeführt. Die Abbildung 30 zeigt die entstandenen gastral Flow bei den unterschiedlichen PEEP-Niveaus.

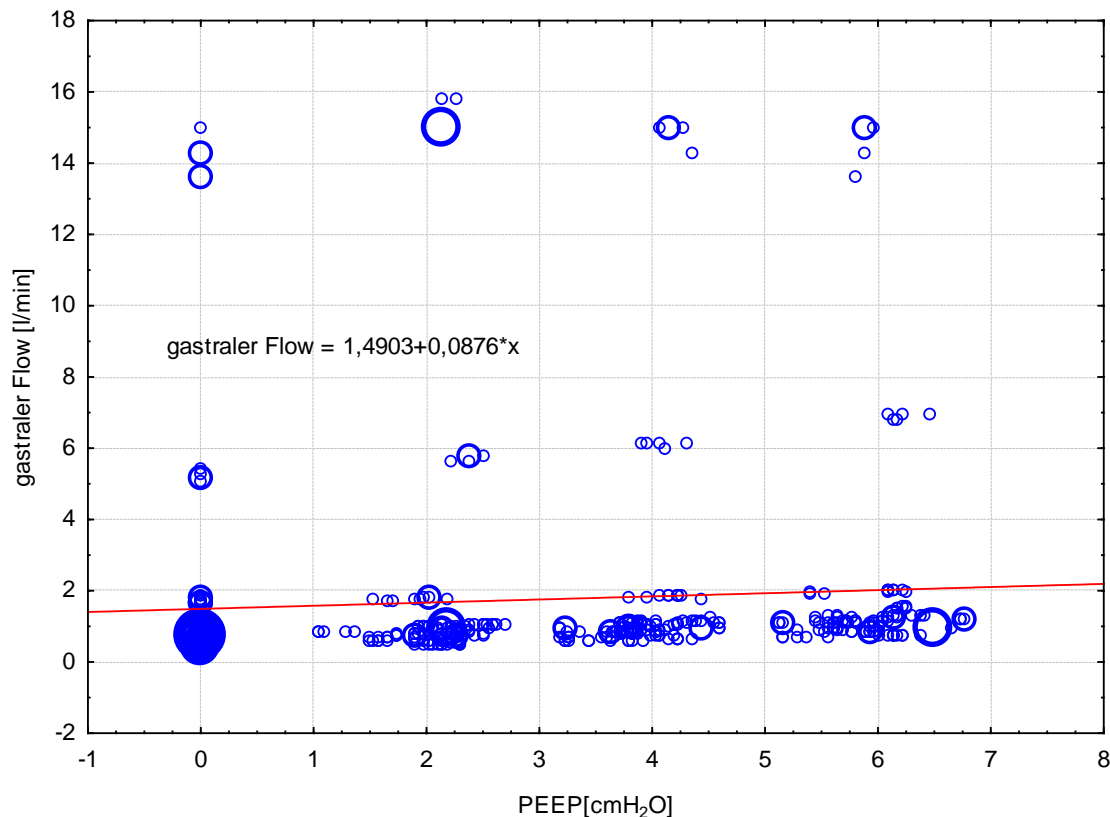


Abb. 30: Beatmung mit der Evita 2: Zusammenhang zwischen PEEP und gastralem Flow. Die Grafik beinhaltet alle Messwerte des **gastral Flow** (**Ordinate**) bei stufenweise erhöhten **PEEP** (**Abszisse**) unter Anwendung der Evita 2 mit den Nacheinstellungen.

Der sehr kleine Steigungskoeffizient (0,0876) der Regressionsgrade zeigt hierbei an, dass der PEEP kaum einen Einfluss auf den gastral Flow hat. Auch die Berechnung einer linearen Einfachregression ergab hier keinen signifikanten Zusammenhang zwischen gastral In-sufflation und Anwendung des PEEP mit 0, 2, 4 und 6 cm H₂O (p = 0,15; r₂ = 0,066).

Die Abbildung 30 zeigt, dass unabhängig vom PEEP der gastral Flow in den meisten Fällen zwischen 0 und 2 l/min liegt, er aber in einigen Fällen um die 6 l/min oder 14 bis 16 l/min beträgt. Hier liegt die Abhängigkeit zu einem weiteren Kriterium vor, welches eine Trennung der Flowhöhe in drei Gruppen zu separieren scheint. Die erste Gruppe umfasst die gastral Flüsse unter 2 l/min. Die zweite Gruppe mit Flüssen um ca. 6 l/min tritt nur bei der Lungencompliance 0,02 l/mbar und –resistance 8 mbar* l⁻¹ *sek sowie Beatmungsdrücken oberhalb oder im Bereich des Sphinkterdrucks auf. Gastrale Flüsse in der Höhe von 14-16

l/min treten nur bei einer Lungencompliance von 0,02 l/mbar und weiterer Erhöhung der Lungenresistance auf 16 mbar* l⁻¹ *sek sowie deutlicher Überschreitung des Sphinkterverschlussdrucks auf.

Kernaussage: Ein PEEP bis 6 mbar hat nur geringen Einfluss auf den gastral Flow.

4.3.2 Geräteübergreifende Ergebnisse

4.3.2.1 Vergleiche zwischen Oxylator[®] und Medumat[®]

Auf der Grundlage der Ergebnisse der Messreihe mit dem Oxylator[®] Typ I bei IV und NIV wurden die gemessenen und errechneten Atemzugvolumina und Atemfrequenzen zu jeder Lungen-Beatmungsgerät-Kombination am Medumat[®] von Hand sorgfältig eingestellt.

Die Ergebnisse der Einfachregression zeigen die qualitative Stärke dieser Nacheinstellung am Medumat[®] (Tab. 10).

Zielgröße	Typ	Modus	Schätzer	p-Wert
erreichter Inspirationsdruck [cm H ₂ O]	IV	automatisch	0.93	0.61
	NIV	automatisch	-0.17	0.91
	IV	manuell	-2.48	0.13
	NIV	manuell	-4.32	0.004
Atemfrequenz/min	IV	automatisch	-1.32	0.62
	NIV	automatisch	1.39	0.66
	IV	manuell	-0.08	<0.0001
	NIV	manuell	0.09	0.29
Atemzugvolumen [ml]	IV	automatisch	-0.17	0.38
	NIV	automatisch	0.06	0.75
	IV	manuell	-0.04	0.60
	NIV	manuell	-0.11	0.16
gastral Flow [ml/sek]	NIV	automatisch	-9.78	0.03
	NIV	manuell	-0.08	0.97

Tab. 10: Stärke des Zusammenhangs der Nacheinstellung am Medumat[®] in Bezug auf die gemessenen Beatmungsparameter des Oxylator[®] Typ I.

Die Einstellungsmöglichkeiten am Medumat[®] beschränken sich auf die Druckbegrenzung, sowie Einstellen von Atemfrequenz und Atemminutenvolumen. Es wird in der Tabelle 10 das generierte Atemzugvolumen dargestellt. Atemfrequenz und AZV sind somit eingestellte Größen, der erreichte Inspirationsdruck und der gastrale Flow resultierende Größen. Die Druckbegrenzung wurde auf den am Oxylator[®] eingestellten Inspirationsdruck limitiert. Der erreichte Maximaldruck unterscheidet sich nur bei der manuellen nicht-invasiven Beatmung signifikant zwischen Oxylator[®] Typ I und Medumat[®].

Die Atemfrequenz unterscheidet sich signifikant nur bei der manuellen invasiven Beatmung. Das Atemzugvolumen ist bei den beiden Geräten in keinem Fall signifikant unterschiedlich. Der gastrale Flow ist nur beim automatischen Betrieb signifikant unterschiedlich. Der automatische Betrieb bei NIV zeigt keine signifikanten Unterschiede in den anderen betrachteten Beatmungsgrößen. Somit ist der gemessene gastrale Flow nicht Ausdruck von Differenzen zwischen Ergebnissen des Oxylator[®] und den Nacheinstellungen am Medumat[®]. Es sei hier darauf hingewiesen, dass der Medumat[®] anders als der Oxylator[®] keinen PEEP aufbaut (Tab. 20, 21, 25, 26).

Die Abbildung 31 beinhaltet den Anteil am AMV, der über den Sphinkter verloren geht (gast-raler Flow). Es handelt sich um die Beatmung mit dem Medumat[®] mit Nacheinstellungen.

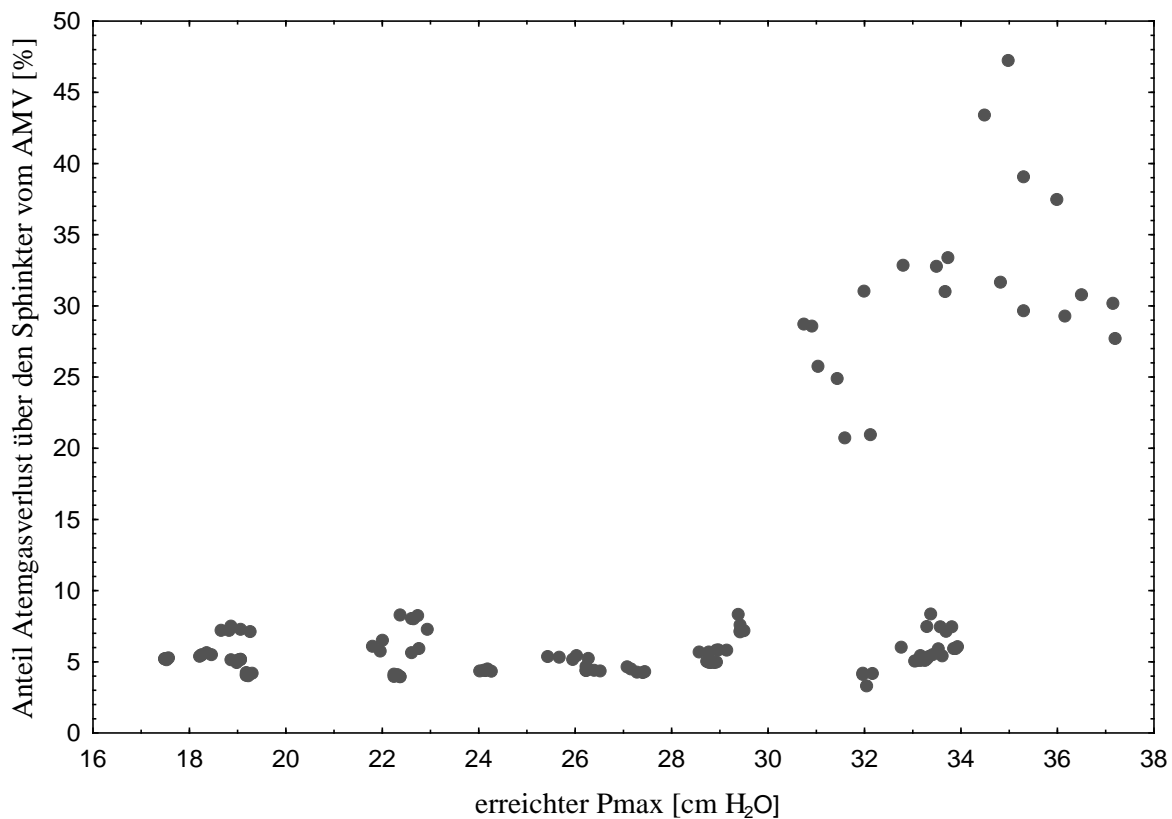


Abb. 31: Beatmung mit dem Medumat[®] (Nacheinstellung des autom. Modus / NIV): Anteil des Verlustes des inspiratorischen Volumens am AMV. Die Grafik veranschaulicht die Höhe des **Atemgasverlustes** über den Sphinkter (gastraler Flow) (**Ordinate links**), bei den jeweils erreichten **Inspirationsdrücken** (**Abszisse**). Angegeben ist der prozentuale Anteil des Atemminutenvolumens, der über den Sphinkter in den Magen gelangt.

Hierbei handelt sich um eine druckbegrenzte, volumengesteuerte Beatmung. Beatmungsdrücke unterhalb des Sphinkterverschlussdrucks haben einen Verlust des Atemgases von ungefähr 5 % des generierten AMV zur Folge. Bei 32 bis 34 cm H₂O ist ein sprunghafter Anstieg zu sehen. Es kann somit der gleiche Zusammenhang zwischen Inspirationsdruck und gastralem Flow verdeutlicht werden wie bei der Beatmung mit dem Oxylator[®]. Der Verlust über den Sphinkter lag unterhalb der Schwelle von 2 l/min bei der druckgesteuerten Beatmung des Oxylator[®] bei 10 %. Dies ist doppelt so hoch wie bei der volumenkontrollierten Beatmung mit dem Medumat[®].

Kernaussage: Das Überschreiten des Sphinkterdrucks durch den Inspirationsdruck führt zur Zunahme der gastralen Insufflation. Liegt der Inspirationsdruck unterhalb des Sphinkterver-

schlussdrucks ist der Anteil des gastralen Flows vom AMV bei Beatmung mit dem Oxylator® doppelt so hoch wie bei der Beatmung mit dem Medumat®.

Die Abbildung 32 betrachtet den gastral Flow, der bei einem Inspirationsdruck oberhalb des Sphinkterschlussdrucks durch die Beatmungsgeräte verursacht wird.

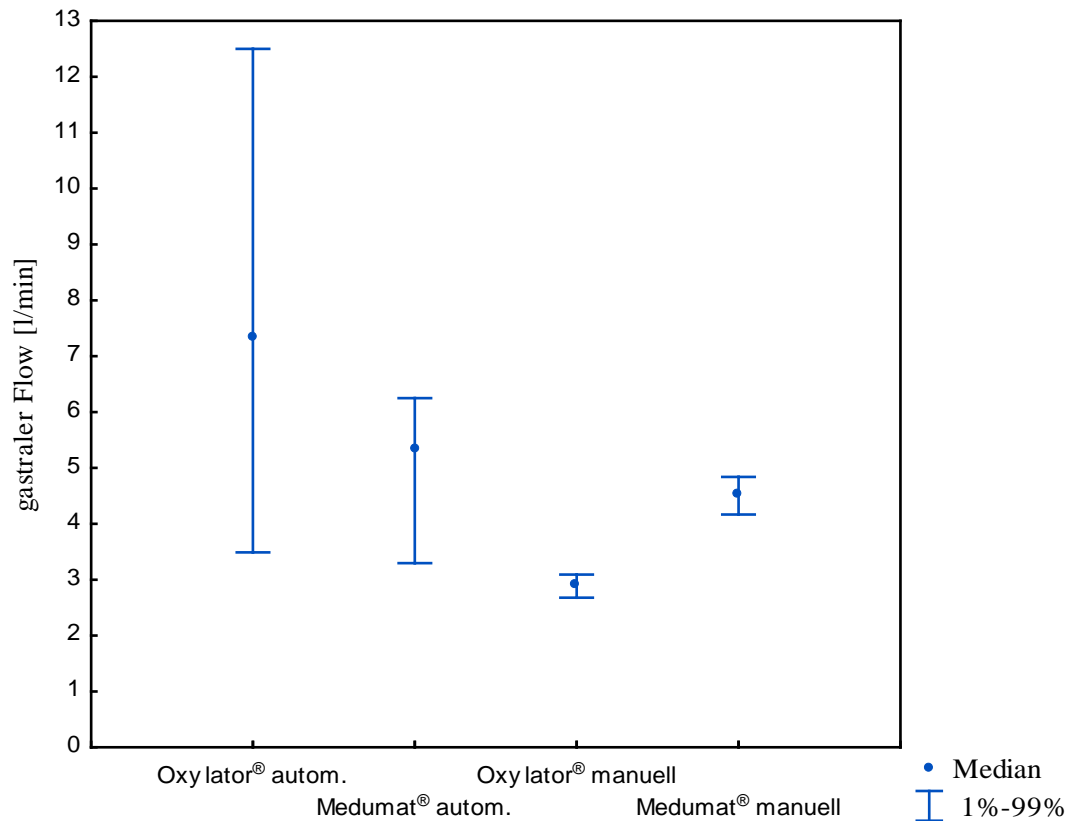


Abb. 32: Beatmung mit Oxylator® und Medumat® (autom. und manuell. Modus / NIV): gastraler Flow bei Überschreitung des Sphinkterschlussdrucks. Der Median des **gastralen Flows**, der bei einer Ventilation mit Übersteigen des Sphinkterschlussdrucks durch den Inspirationsdruck verursacht wurde, ist an der **Ordinate** abzulesen. Dieser wird für **Oxylator® und Medumat® im automatischen und im manuellen Modus (Abszisse)** angegeben.

Der gastrale Flow des Oxylator® ist im automatischen Modus also auch bei Überschreiten des Sphinkterschlussdrucks deutlich höher als beim Medumat®. Im manuellen Modus verhält es sich umgekehrt, ist aber generell deutlich niedriger als im automatischen Modus. Die Streuung der Messergebnisse ist im automatischen Modus größer als im manuellen Modus.

Kernaussage: Wird der Oxylator® automatisch betrieben, ist die Gefahr der gastralen Insufflation am größten.

4.3.2.2 Vergleiche zwischen Medumat® und Handbeatmungsbeutel:

Wird der Medumat® mit den Parametern der Handbeatmungsbeutel auf Unterschiede verglichen, sind die Ergebnisse der Einfachregression wie folgt:

Einfluss	p-Wert
erreichter Inspirationsdruck	0.70
PEEP [cmH ₂ O]	0.036
Inspirationszeit [sek]	0.15
Expirationszeit [sek]	0.02
Atemminutenvolumen [ml/min]	0.87
Inspirationsflow [ml/sek]	0.56

Tab. 11: Vergleich Medumat® mit Standardeinstellungen und Handbeatmungsbeutel bei IV.

Einfluss	p-Wert
erreichter Inspirationsdruck [cmH ₂ O]	0.29
PEEP [cmH ₂ O]	0.02
Inspirationszeit [sek]	0.59
Expirationszeit [sek]	0.17
effektives Atemminutenvolumen [ml/min]	0.73
gemessenes Atemminutenvolumen [ml/min]	0.37
Inspirationsflow [ml/sek]	0.71
gastraler Flow [ml/sek]	0.82

Tab. 12: Vergleich Medumat® mit Standardeinstellungen und Handbeatmungsbeutel bei NIV.

Der p-Wert unter 0,05 beschreibt einen signifikanten Unterschied. Es zeigt sich, dass sich die Beatmungsparameter nur beim endexpiratorischen Druck, sowie bei der Expirationszeit unter invasiver Beatmung signifikant unterscheiden. Ansonsten sind mit der manuellen Betätigung der Handbeatmungsgeräte die gleichen Beatmungsparameter zu erreichen, wie mit der maschinellen Anwendung des Medumat®. Im Vergleich der Messreihen mit dem Medumat®

mit Standardeinstellungen und den Handbeatmungsbeuteln ist keinen geräteabhängigen Einfluss auf den gastral Flow erkennbar.

4.3.2.3 Einflüsse der Beatmungsgeräte auf den gastral Flow

Die Abbildung 33 zeigt den gastral Flow, der von allen Beatmungsgeräten in allen Versuchen zur NIV bei den unterschiedlichen Inspirationsdrücken verursacht wurde.

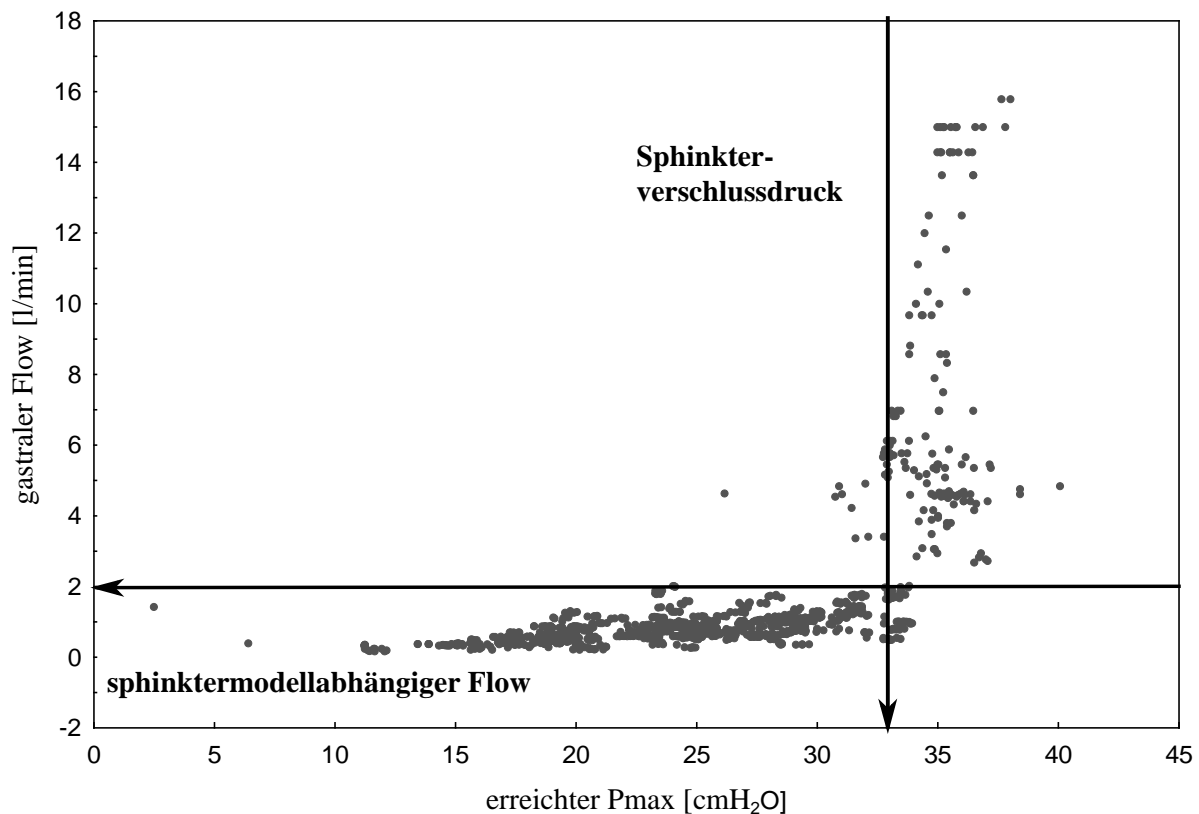


Abb. 33: Messwerte des gastral Flow aller Beatmungsgeräte in Bezug auf den erreichten Inspirationsdruck. An der **Ordinate** ist der **gastrale Flow** und an der **Abszisse** sind die erreichten **Inspirationsdrücken** abzulesen. Einbezogen sind alle Messwerte zum gastral Flow ohne Gerätedifferenzierung.

Die Zunahme des Beatmungsdrucks führt zu einer Zunahme des gastral Flows besonders nach Erreichen und Überschreiten des Verschlussdrucks des Ösophagus sphinkters.

Kernaussage: Das Überschreiten des Sphinkterdrucks durch den Inspirationsdruck führt geräteunabhängig zur Zunahme der gastral Insufflation.

Aus der Grafik sind keine weiteren Beatmungsparameter ersichtlich. Der Zusammenhang zwischen gastralem Flow und Beatmungsparametern kann über die Einfachregression bestimmt werden (Tab. 13).

Einfluss	Schätzer	p-Wert
erreichter Inspirationsdruck [cmH ₂ O]	2.38	<0.0001
Compliance [l/mbar]	-194.11	<0.0001
Resistance [mbar*l ⁻¹ *sek]	0.57	<0.0001
eingestellter Inspirationsdruck [cm H ₂ O]	1.76	<0.0001
autom. vs. manuell	-12.66	<0.0001
PEEP [cmH ₂ O]	0.005	0.996
Inspirationszeit [sek]	5.80	<0.0001
Exspirationszeit [sek]	-1.26	<0.0001
Atemfrequenz /min	-0.26	<0.0001
Atemzugvolumen [ml]	1.48	<0.0001
gemessenes Atemminutenvolumen [ml/min]	0.16	<0.0001
Inspirationsflow [ml/sek]	0.01	0.88

Tab. 13: Zusammenhänge und Schätzer der Beatmungsparameter in Bezug auf den gastralen Flow aller Messreihen.

Fast alle Beatmungsparameter haben einen signifikanten Einfluss auf den gastralen Flow. Es bestehen hierbei jedoch, wie schon beschrieben, unmittelbare Zusammenhänge und Abhängigkeiten der Beatmungsparameter untereinander, so dass fast alle Beatmungsparameter einen Einfluss auf die gastrale Insufflation haben müssen. Die Aussagekraft der Ergebnisse ist somit nur zusammen zu betrachten. Eine weitere Einschränkung entsteht dadurch, dass die Regressionen anhand von Daten mit einem eindeutigen Schwellenwert (Sphinkterverschlussdruck) erstellt und somit nicht linear sind. Somit können aus dem Schätzer keine absoluten Zahlen entnommen und nur relative Größenunterschiede betrachtet werden. Der Schätzer beschreibt prinzipiell, um wie viel Einheiten (in ml/sek) der gastrale Flow zunimmt, wenn die Einfluss-

größe um eine Einheit steigt. So wäre beispielsweise zu erwarten, dass sich der gastrale Flow um 2,38 ml/sek erhöht, wenn sich der Beatmungsdruck um 1 cm H₂O erhöht, oder sich um 0,005 ml/sek erhöht, wenn der PEEP 1 cm H₂O zunimmt. Aus dem zuvor genannten Grund (Schwellenwert) kann hier nur die Aussage getroffen werden, dass der Einfluss des Inspirationsdrucks um ein Vielfaches höher ist, als der des PEEPs.

Der Tabelle 13 ist so zu entnehmen, dass generell die größten Veränderungen im gastralen Flow zu erwarten sind, wenn sich Beatmungsdruck, pulmonale Compliance und Inspirationszeit ändern. Außerdem muss man von einer Erhöhung des gastralen Flows ausgehen, wenn man geräteunabhängig von manueller Betätigung auf automatischen Modus wechselt. So können durch die Anwendung der Einfachregression trotz der oben erwähnten Einschränkung die Zusammenhänge zwischen Parametern und Messungen relativ bestätigt werden, die aus den vorhergehenden Grafiken und Tabellen deskriptiv erfasst wurden.

5. Diskussion

Ist die Ventilation oder Oxygenierung des Blutes beim Patienten eingeschränkt, kann eine Überdruckbeatmung indiziert sein. Diese kann invasiv erfolgen, vorzugweise aber nicht-invasiv, wenn bestimmte Voraussetzungen erfüllt sind. Die gastrale Atemgasinsufflation ist u.a. eine der bedeutsamsten Komplikationen, die aus einer nicht-invasiven Beatmung resultieren kann. Das Aufblähen des Magens kann sich negativ auf die Beatmung und die Lungenfunktionen auswirken. Das Atemvolumen, welches effektiv der Lunge für den Gasaustausch zur Verfügung steht, wird über den Verlust in den Magen verkleinert. Das Aufblähen des Magens kann durch Verdrängung das Diaphragma nach kranial verschieben, Atelektasen in der Lunge verursachen und die Lungenfunktionen verschlechtern. Bei Verschlechterung der Lungenfunktion kann wiederum ein erhöhter Inspirationsdruck notwendig werden, um die Ventilation suffizient zu ermöglichen. Hierdurch kann dann wieder vermehrt Atemgas in den Magen anstatt in die Lunge gelangen. Dies ist ein Teufelskreislauf (Circulus vitiosus; s. Abb. 1), der durch das Magenaufblähen zur Aspiration führen kann und die Lungenfunktion durch direkte Verlegung oder pulmonale Veränderungen weiterhin verschlechtern wird.

Die Firma CPR, Hersteller des Oxylator[®], vertritt die Annahme, dass die Gefahr der gastralen Insufflation durch einen Inspirationsflow mit konstanter Flowkurve bei NIV verringert werden kann. Durch den Oxylator[®] soll somit die nicht-invasive Beatmung mit reduzierter Gefahr der Magenbeatmung möglich sein (Romeo Worner, President of CPR, Toronto, Canada: persönliche Mitteilung).

Eine Anwendung der Geräte am Patienten zur nicht-invasiven Beatmung birgt die Gefahr der oben genannten Komplikationen und ist somit zu Versuchszwecken unzulässig. Die Einsatzmöglichkeit des Oxylator[®] sollte daher mit einem Modell geklärt werden. Der Vergleich mit Standardgeräten in der Notfallmedizin, wie dem Handbeatmungsbeutel und dem Medumat[®] sollte zeigen, ob Vorteile bei der Anwendung des Oxylator[®] erkennbar sind und welche Beatmungs- und Lungenparameter die größten Einflüsse auf die gastrale Insufflation haben.

Die Untersuchungen mit dem Intensivbeatmungsgerät Evita 2 sollte systematisch die Folgen einer Beatmung mit PEEP aufzeigen, da eine PEEP-Anwendung Vorteile bringen kann.

Diese Fragestellungen machten es erforderlich, ein Modell zu entwickeln, dass die physikalischen Einflüsse der nicht-invasiven Beatmungen inklusive der gastralen Insufflation untersuchen lässt. Vorteil des Modells ist, die Beatmungen unter standardisierten und reproduzierba-

ren Bedingungen durchführen zu können. Das Modell ermöglicht somit Beatmungsgeräte ohne Störeinflüsse und Patientengefährdung miteinander zu vergleichen.

5.1 Bedeutung und Charakteristik des Sphinktermodells

Für die Wirkung der nicht-invasiven Beatmung wurde ein Modell des unteren Ösophagus sphinkters entwickelt, da dieser die wichtigste und bedeutendste Hürde für die gastrale Insufflation und Regurgitation darstellt (Cotton und Smith 1984, Weiler et al. 1995, Wenzel et al. 2000).

Den in Abbildung 15 gezeigten Kalibrierungskurven ist zu entnehmen, dass das Sphinktermodell immer die gleiche Fluss-Druck-Charakteristik aufweist und einen Öffnungsdruck zwischen 31 und 33 cm H₂O hat. Vor jeder neuen Versuchsreihe wurde das Sphinktermodell justiert, um die gleiche Fluss-Druck-Charakteristik zu gewährleisten.

Die Höhe der auf dem Modellschlauch einwirkenden Wassersäule von ca. 33 cm H₂O ist höher als in der Literatur gefundene Werte zum Tonus des unteren Ösophagus sphinkters. Die Streubreite der gefundenen Druckangaben ist hoch und befindet sich zwischen ca. 3 cm H₂O bei reanimationspflichtigen Patienten (Bowman et al. 1995) und 19 bis 30 cm H₂O (Weiler et al. 1995). Zudem reagiert der Sphinkter auf chemische und physikalische Veränderungen, wie z.B. auf einen Anstieg des intragastralen Drucks. So wurde der höchste Sphinkterdruckwert mit einer Toleranzgrenze von + 10 % auf 33 cm H₂O festgelegt. Hierdurch ist es auch möglich, die baubedingte Leckage, welche durch den unvollständigen Verschluss des sternförmigen Lumens des Schlauches entsteht, gering zu halten. Wie in der Abbildung 15 zu sehen ist, ist ein Flow von bis zu ca. 2 l/min bei Beatmungsdrücken unterhalb des Verschlussdrucks durch den Sphinkter auch mit der höheren Wassersäule in diesem Modell nicht zu vermeiden. Der unvollständige Verschluss des Schlauches hat jedoch den Vorteil, dass das Modell unter den Versuchsbedingungen empfindlich reagiert. Verfälschungen durch Adhäsion und Scherkräfte können so gering gehalten werden.

Für die Auswertung der Ergebnisse hat diese Tatsache folgende Bedeutung: Eine Überdruckbeatmung führt modellbedingt immer zu einem Fluss durch den Sphinkter. Der Fluss, der unterhalb des Verschlussdrucks möglich ist, ist eine modelleigene Größe. Die gastrale Insufflation durch die Beatmung ist somit erst bei Flusswerten über ca. 2 l/min anzunehmen,

da ab dieser Höhe erst das Erreichen und die Überschreitung des Verschlussdrucks bei vollständig schließendem Sphinkter zu erwarten ist.

Die Zunahme des gastralen Flows innerhalb der Inspirationszeit bei Zunahme des Beatmungsdrucks entspricht einem linearen Verhalten (Abb. 15) des Sphinkterwiderstandes analog dem Ohmschen Gesetz. Ab Erreichen des Sphinkterdrucks erhöht sich der gastrale Flow überproportional und der vor dem Sphinkter aufgebaute Druck sinkt sogar ab, so dass ab dieser Schwelle nicht mehr von einem linearen Verhalten ausgegangen werden kann. Dies wurde als die beste Modellierung des natürlichen Sphinkters angesehen. Diese dynamische Reaktion erscheint physiologischer als ein einfaches, starres PEEP-Ventil, wie es in verschiedenen Publikationen verwendet wurde (Updike et al. 1997, Wenzel et al. 1998 b, Ocker et al. 2001).

Die Länge des Gummischlauches des Sphinktermodells betrug zwischen 2-3 cm je nach Justierung für die Versuchsreihen und lag damit innerhalb der in der Literatur genannten Längenangaben (Cotton und Smith 1984, Power und Kam 2008).

Das Spirometer entwickelt bei diesem Versuchsaufbau keinen Gegendruck, wie es der Magen mit zunehmender Füllung tun würde. Die Folgen eines gedehnten Magens mit Flowumkehr wurden vernachlässigt, um allein die Auswirkungen und Einflüsse des Sphinkters zu beobachten. In welchem Umfang dieses Modell den menschlichen Sphinkterreaktionen entspricht, kann hier allerdings nicht geklärt werden.

Die Abnahme des Sphinktertonus stellt hier eine nicht diskutierte Situation dar. Sollte der Sphinkterverschlussdruck bei einem Herz-Kreislauf-Stillstand auf 3 bis 5 cm H₂O abfallen, ist das Überschreiten des Verschlussdrucks bei NIV schon alleine durch einen eventuell angewendeten PEEP denkbar. In diesem Fall bleibt die Frage offen, ob ein PEEP dann zu einem unakzeptabel höheren gastralen Flow führen würde, als wenn kein PEEP angewendet würde. Wahrscheinlich ist ein erhöhter Gasverlust über den Sphinkter in der Expiration und ein Ausbleiben des positiven Effekts durch den PEEP auf die Lunge. Dies dürfte solange der Fall sein, bis der intragastrale und ösophageale Druck dem Druck in den Atemwegen entspricht und kein Gasverlust über den Sphinkter mehr möglich ist. Dass dies aufgrund der wahrscheinlichen Regurgitation und Zwerchfellverlagerung nach kranial kein erwünschter Effekt ist, ist wohl unbestritten. Wie bereits erwähnt, ist diese These aufgrund unseres Versuchsaufbaus nicht nachweisbar.

Unbeachtet blieben in diesem Modell die Einflüsse, wie z.B. Turbulenzen oder Widerstände weiterer Anteile des Ösophagus oder des Nasen-Rachen-Raumes.

5.2 Referenzbereiche der Respiration und Beurteilung der Messergebnisse

Durch den Versuchsaufbau mit festgelegten Lungenfunktionen und Sphinkterverschluss tonus konnten reproduzierbare und vergleichbare Beatmungsparameter gemessen und errechnet bzw. an den untersuchten Geräten eingestellt werden. Gemessen wurden der zeitliche Verlauf von Beatmungsdruck und -flow des Beatmungsgerätes, sowie der gastrale Flow und das gastrale Volumen. Daraus wurden folgende Parameter ermittelt, die besonders diskutiert werden sollen: Inspirationszeiten, Atemfrequenz, Atemvolumina (AZV und AMV) und der gastrale Flow. Der Inspirationsdruck war häufig bereits vorgegeben und nur in Beatmungen ohne Druckbegrenzung mit dem Medumat[®] und den Handbeatmungsbeuteln eine resultierende Ventilationsgröße.

Zur **Beurteilung der Ergebnisse** wurde ein **Referenzbereich** festgelegt, der es ermöglichen soll, die gemessenen und errechneten Parameter der Beatmungsgeräte einzuordnen. Ausschlaggebend war hierfür die Relevanz für den klinischen Alltag und die mögliche Gefährdung des Patienten.

Wie unter 2.2 bereits ausführlich besprochen, unterliegen die Beatmungsgrößen unterschiedlichen Einflussfaktoren. Aber auch bereits Angaben zur Ruheatmung sind autorenabhängig. Um Aussagen über eine mögliche Patientengefährdung machen zu können, sollten hierbei die dafür bestimmten Referenzwerte die Meinungen der zitierten Autoren und den von ihnen favorisierten Beatmungsgrößen entsprechen. Des Weiteren sollten die Referenzbereiche die in der Klinik vorgefundenen Situationen in Anästhesie, Intensivmedizin und Notfallmedizin (kardiopulmonale Reanimation) aus Sicht des Verfassers dieser Dissertation widerspiegeln.

- Die **AF** wurde zwischen 6 und 18 Atemzügen als klinisch vertretbar gesehen.
Bei einer Reanimation mit dem Herzmassage-Beatmungs-Verhältnis von 30:2 sind bei einer angestrebten Herzmassagefrequenz von 100/min zumindest rechnerisch 3 Pausen für jeweils 2 Beatmungen möglich. Atemfrequenzen über 18/min sind im Alltag bei respiratorischem Versagen normalerweise kompensatorisch deutlich höher, haben aber unter kontrollierter Beatmung nur einen Stellenwert in der „lungenprotektiven Beatmung“.
- Die **Inspirationszeit** wurde auf 1-2 Sekunden festgelegt: Die Forderung des ERC in Ihrer ALS Richtlinie von 2005 ist eine Inspirationszeit von einer Sekunde (Handley et al. 2006). Im Jahr 2000 betrug die geforderte Inspirationszeit noch 1-2 Sekunden (de Latorre et al. 2001). Bei einer Beatmung in Narkose mit der Atemfrequenz von 12/min

(Mittlerer Wert des Referenzbereiches der Atemfrequenz und festgelegte Atemfrequenz in den Versuchsdurchführungen) ergibt sich bei einem I:E-Verhältnis (Verhältnis von Inspirations- zur Expirationsdauer) von 1:1,5 eine Inspirationszeit von 2 Sekunden. Aufgrund der deutlichen Anwenderabhängigkeit in diesen Versuchsreihen, wurden Ergebnisse in diesem Bereich $\pm 20\%$, also zwischen 0,8 und 2,4 Sekunden als akzeptabel angesehen.

- Das **AZV** eines Patienten bei der Narkosebeatmung kann zwischen 6-10 ml/kg KG liegen. Bei 10 ml/kg KG AZV ist auf die Atelektasenbildung in Narkose kein positiver Effekt im Vergleich mit 6 ml/kg KG AZV zu sehen (Cai et al. 2007), jedoch kann ein AZV in dieser Höhe zur Vermeidung einer Hyperkapnie zum Einsatz kommen. Höhere Atemzugvolumina werden für diese Versuchsreihen aber nicht mehr als sinnvoll erachtet. Es wird von einem Patienten zwischen 70 und 100 kg Körpergewicht ausgegangen. Es ergibt sich damit ein Referenzbereich mit $\pm 20\%$ von gerundet 340 bis 1200 ml. Im Folgenden werden die generierten Atemzugvolumina in die Referenzbereiche eingeordnet.

Das Atemminutenvolumen ergibt sich rechnerisch aus der Atemfrequenz und dem Atemzugvolumen. Je nach Stoffwechsellage und Körperaktivität, kann es bis 30 l/min (Larsen und Ziegenfuß 2004) betragen. Somit erscheint es sinnvoller, die einzelnen Faktoren in Referenzbereiche einzuordnen als das Produkt aus ihnen.

Als klinisch anwendbar und sinnvoll wurde die Beatmung bzw. die Einstellung eines Beatmungsgerätes angesehen, wenn die Beatmungsparameter alle innerhalb dieser vier Referenzbereiche liegen. Bei der NIV wurde zusätzlich der gastrale Flow über 2 l/min (s. 5.1) als klinisch zu hoch und damit als zu vermeidende Beatmung eingestuft.

Durch die Standardeinstellungen des Medumat[®] mit der AF von 12/min und dem AZV von 500 bzw. 1000 ml ebenso wie für die Beatmung mit den Handbeatmungsbeutel ist bereits durch die gewählten Größen der Beatmungsparameter der Referenzbereich festgelegt worden. Der verursachte gastrale Flow und der notwendige Beatmungsdruck werden bei diesen Beatmungen als die Parameter definiert, die eine Aussage zur Patientengefährdung zulassen. Ein Inspirationsspitzenruck von über 35 cm H₂O wurde bei ARDS-Patienten als bedenklich angesehen (Engelmann 2000). Sofern dieser Druck nicht aufgrund einer Druckeinstellung am Beatmungsgerät, sondern als Resultat aus Inspirationszeit bzw. AF und Tidalvolumen entsteht, werden Inspirationsdrücke über 35 cm H₂O nicht mehr als vertretbar angesehen.

Die folgende Tabelle stellt die Referenzbereiche bzw. die Referenzgrenzen noch einmal übersichtlich dar:

Inspirationszeit	AF	AZV	gastral. Flow	Inspirationsdruck
0,8 - 2,4 Sek.	6-18 /min	340 - 1200 ml	> 2 l/min	> 35 cm H ₂ O

Tab. 14: Referenzbereiche ausgewählter Beatmungsparameter

5.3 Diskussion der Ergebnisse

5.3.1. Der Oxylator® – Bewertung einer druckgesteuerten Beatmung

Der Oxylator® ist ein druckgesteuertes Beatmungsgerät mit allen daraus resultierenden Konsequenzen. Dies gilt besonders für den Betrieb im automatischen Modus. Einzige einstellbare Größe ist der Umschaltdruck, der den Wechsel von Inspiration zur Expiration bestimmt. Der Zeitpunkt des Erreichens dieses Drucks ist von den Lungenparametern und von der Leckage des Beatmungsgases über den Ösophagussphinkter bei der NIV abhängig und bestimmt die Dauer der Inspiration. Bei konstant hohem Flow ist das generierte Atemzugvolumen direkt proportional zur Inspirationszeit.

Werden die Ergebnisse in die Referenzbereiche eingeordnet, kann der mögliche Einsatzbereich des Oxylator® I bestimmt werden.

Die folgende Tabelle zeigt eine Übersicht über **anwendbare Inspirationsumschaltdrücke** pro Lungeneinstellung, bei denen nach den oben genannten Referenzkriterien keine Gefährdung für den Patienten zu erwarten ist. Die Mittelwerte der einzelnen Messergebnisse mit Standardabweichungen sind in den Tabellen 18, 19, 22 und 24 einsehbar.

Lungeneinstellungen	einstellbare Beatmungsdrücke [cm H ₂ O]			
	IV automat. Modus	IV manuell. Modus	NIV automat. Modus	NIV manuell. Modus
0,1/2 Resist. [mbar [*] I ⁻¹ *sek]	---	20-40	---	20-40
0,06/8	20-30	20-40	20-30	20-40
0,06/16	20-35	25-40	25-30	20-40
0,02/8	---	40	---	35
0,02/16	---	---	---	35

Tab. 15: Oxylator® Typ I: anwendbare Umschaltdrücke nach Kriterien der Referenzbereiche

In den Versuchen führte ein zu hoher gastral Flow bei der NIV fast nie allein dazu, dass eine Beatmungskombination nicht innerhalb der Referenzbereiche lag. Vielmehr ist meistens das Verlassen der Referenzbereiche einer oder mehrerer Beatmungsgrößen zu finden, die vom Oxylator[®] automatisch generiert wurden. So werden im automatischen Modus Beatmungsgrößen generiert, die eine suffiziente Beatmung nur in vereinzelt Situationen ermöglichen. Der klinische Anwendungsbereich der manuellen Betätigung ist deutlich größer.

Durch die Interpretation der Messergebnisse und Einordnung in die Referenzbereiche lassen sich zur Beatmung mit dem Oxylator[®] folgende Schlussfolgerungen formulieren, die jeweils im Anschluss diskutiert und erläutert werden:

1) Die alleinige, automatische Drucksteuerung führt zu Kombinationen extremer Werte von Atemfrequenz und Tidalvolumina.

Ist die Lunge dehnbar und baut geringe Widerstände auf, reicht ein geringer Inspirationsdruck um eine hohe Inspirationszeit zu verursachen (Abb. 20 und 21). Wird die Lunge steifer mit hohen Widerständen, muss ein höherer Druck aufgewendet werden, damit die Inspirationszeit ein suffizientes AZV ermöglichen kann. Bei gut dehnbarer Lunge mit geringen Atemwegswiderständen beatmet der Oxylator[®] im **automatischen Modus** also mit durchgehend druckgesteuerter Beatmung, daraus resultierend mit hohen Inspirationszeiten und hohen Atemzugvolumina. Umschaltdrücke über 20 cm H₂O führen bereits zu Inspirationszeiten von über 3 bis teilweise 8 Sekunden. Umschaltdrücke unter 20 cm H₂O sind bei diesem Oxylator[®] Modell jedoch nicht einstellbar. Inspirationsdrücke über 25 cm H₂O führen zu Atemminutenvolumina von 14 Litern (Abb. 22 und 23). Bei Abnahme der Volumendehnbarkeit der Lunge werden die Inspirationszeiten und die Atemzugvolumina geringer. Bei einer Compliance von 0,02 l/mbar liegen alle Inspirationszeiten deutlich unter 1 Sekunde, wenn nicht mindestens ein Umschaltdruck von 40 cm H₂O eingestellt wird. Da der Oxylator[®] einen festen Inspirationsflow hat, der stets 0,4-0,5 l/min beträgt (Tab. 6 und 7), kann dies nur zu deutlich reduzierten Tidalvolumina führen. Bei schlechter Compliance von 0,02 l/mbar mit eingestellten Umschaltdrücken von 20 und 25 cm H₂O bei NIV, bei invasiver Beatmung teilweise auch noch bei 35 cm H₂O, kommt es zu Atemzugvolumina, die möglicherweise nur zur Ventilation des anatomischen Totraums von ca. 2 ml/kg KG führen und keinen Gasaustausch mehr zulassen.

Geringe Inspirationszeiten führen im automatischen Modus zu hohen Atemfrequenzen (Tab. 18 und 22). Durch die Atemfrequenzsteigerung wird das AMV trotz teilweise sehr niedrigen Atemzugvolumina bei jedem Versuch in IV über mindestens 5,9 l/min gehalten und nimmt bei dehnbarer Lunge Werte bis 15,4 l/min an (Abb. 22 und 23; Tab. 6 und 7). Der Oxylator[®] täuscht so mit ausreichenden Atemminutenvolumen über vorhandene Mängel der Beatmung hinweg. Inspirationsdrücke, die zu suffizienten Atemzugvolumina führen sollen, müssen somit ab der pulmonalen Compliance von 0,02 l/mbar über 30 bis 35 cm H₂O liegen. In ähnlicher Art beatmet der Oxylator[®] auch in der NIV.

Nach den Kriterien für die Referenzbereiche ist der automatische Modus des Oxylator[®] nur bei einer Lungencompliance von 0,06 l/mbar anwendbar, wobei die möglichen Inspirationsdrücke beschränkt sind. Bei Umschaltdrücken über 30 bzw. 35 mbar und der Compliance von 0,06 l/mbar oder bei höherer pulmonaler Volumendehnbarkeit von 0,1 l/mbar kommt es, wie beschrieben, zu langen Inspirationszeiten mit folglich zu hohen Atemvolumina. Die Verringerung der Lungencompliance auf 0,02 l/mbar erfordert für eine Beatmung mit suffizienten Atemzugvolumina Inspirationsdrücke von mindestens 30 cm H₂O. Die Atemfrequenz nimmt hier Werte zwischen 20 und 38/min an. Die Gefahr des gastralen Flows nimmt ab einem eingestellten Umschaltdruck von 40 cm H₂O zu.

2) Die manuelle Betätigung kann eine suffizientere Beatmung ermöglichen als der automatische Modus.

Wird der Oxylator[®] manuell mit der AF von 12/min betätigt, ist der Anwendungsbereich nach den Referenzkriterien deutlich größer. Es können fast alle pulmonalen Situationen beatmet werden (Tab. 15).

Abhängig von den Lungenfunktionen resultieren Beatmungsbereiche mit zeitgesteuerter und Bereiche mit druckgesteuerter Beatmung, die beide durch den Anwender kontrolliert werden können (Tab. 8 und 9). Der Effekt der Lungenparameter, besonders der Lungencompliance, und der festgelegten AF führen zu teilweise sehr niedrigen Atemminutenvolumina. Das AMV, das hierbei letztendlich in der Lunge als Zielorgan tatsächlich ankommt, lässt in einer schlechten Lunge mit einer Compliance von 0,02 l/mbar beim Umschaltdruck unterhalb von 40 cm H₂O bei IV auf eine mögliche Hypoventilation rückschließen. Bei NIV ist hier die Gefahr der gastralen Insufflation erhöht (Tab. 19 und 24). Der Grat zwischen Hypoventilation

und deutlicher Zunahme gastraler Insufflation ist sehr schmal, besonders wenn z.B. in der Praxis nicht mit einer Erhöhung der Beatmungsfrequenz reagiert werden kann.

Zum gastralen Flow oberhalb der definierten Schwelle kommt es bei dieser Anwendung nur, wenn die Beatmung mit Umschaltdrücken ab 40 cm H₂O bei der Compliance von 0,02 l/mbar stattfindet. Dieses Ergebnis kommt dadurch zustande, dass bei manueller Betätigung die Inspirationszeit maximal 2 Sekunden betragen soll. Bei Lungenparametern mit höherer Volumendehnbarkeit kommt es durch Erhöhung des Umschaltdrucks zum Wechsel von druckgesteuerter zur zeitlimitierten Beatmung und somit nicht mehr zum Erreichen des Umschaltdrucks und Überschreiten des Sphinkterverschlussstonsus.

3) Der Inspirationsdruck ist der entscheidende Faktor für die gastrale Insufflation.

Die Grafiken 24 und 33 zeigen einen deutlichen Zusammenhang zwischen Inspirationsdruck und gastralem Flow. Der Anteil des Atemgasverlustes am AMV über den Sphinkter liegt unter 20%, solange der Verschlussdruck nicht erreicht wird. Bei Überschreitung des Verschlussdrucks kann er zwischen 15 bis 75 % betragen. Der Anteil zeigt hier eine hohe Streubreite (Abb. 32).

Die Ballung der Messpunkte unterhalb dieser Grenze in ungefähr den Bereichen der stufenweise gewählten Umschaltdrücke von 20, 25, 30 und 35 cm H₂O in Abbildung 24 könnte darauf hinweisen, dass die unterschiedlichen Lungenparameter unterhalb der Überschreitung des Verschlussdrucks des Sphinktermodells keine wesentliche Bedeutung für die gastrale Insufflation haben. Dies ist auch für den Medumat[®] in Abb. 31 angedeutet zu sehen. Erst beim Überschreiten des Sphinkterverschlussdrucks durch den Inspirationsdruck liegen die Messergebnisse weiter auseinander. Auch die absoluten Werte des gastralen Flows spiegeln diese Ergebnisse wieder. So könnte die Verschlechterung der pulmonalen Situation selber erst bedeutend für die gastrale Insufflation sein, wenn der Sphinkterverschlussdruck überschritten wird.

4) Der Oxylator[®] kann zur Reanimation begrenzt angewendet werden.

Die Richtlinien des ERC zum ALS 2005 besagen, dass eine Ventilation des Patienten mit zu großen Atemzugvolumina das Aspirationsrisiko durch eine Mageninsufflation erhöhen. Das Ziel-AZV wurde dort auf 400-600 ml festgelegt. Atemzugvolumina von 1000 ml oder mehr

könnten zur Reduktion des venösen Rückstroms zum Herzen führen und somit die Effekte der Herzdruckmassage verringern (Handley et al. 2006).

Da laut Davis et al. (1995) die Compliance unter Herzstillstand und kardiopulmonaler Reanimation bei 0,05 l/cm H₂O (entspricht 0,049 l/mbar) liegen kann und der Anwendungsbereich des Oxylator[®] im automatischen Modus bei einer Lungencompliance von 0,06 l/mbar den größten Einsatzbereich innerhalb der Referenzbereiche hat, scheint der Oxylator[®] seine Arbeit in diesen Situationen vermutlich am effektivsten zu verrichten. Wobei es aber auch bei dieser pulmonalen Compliance bei Umschaltdrücken oberhalb von 20 bzw. 25 cm H₂O zu Atemzugvolumina über 600 ml kommen kann (Tab. 18 und 22). Dies bedeutet für den Oxylator[®], dass die anwendbaren Umschaltdrücke im **automatischen Modus** aufgrund der zu hohen Atemzugvolumina weiter eingeschränkt werden müssen. Zeigt sich eine Reduzierung der pulmonalen Compliance, wie es nach Davis et al. (1995) anzunehmen ist, reduziert sich der anwendbare Umschaltdruck auf 20 bis 25 cm H₂O. Diese Einschränkung wird durch die hier definierten Referenzbereiche, die auch andere klinische Situationen mit abdecken (s. 5.2), nicht abgebildet. Diese Bedenken sollten jedoch der Vollständigkeit halber erwähnt werden.

Der **gastrale Flow** allerdings nimmt allein aufgrund des Atemzugvolumens über 600 ml in diesen Versuchen kaum zu, solange der Sphinkterverschlussdruck nicht überschritten wird. Hierzu muss betont werden, dass sich diese Forderung des ERC auf reanimationspflichtige Patienten bezieht, bei denen von einem Sphinktertonusverlust auszugehen ist, der zumindest in Tierversuchen nachweisbar war (Bowman et al. 1995), hier aber nicht untersucht wurde. Die Schwelle zur gastralen Insufflation wird dann mit geringerem Inspirationsdruck früher erreicht. Die hierdurch entstehende Problematik wird in der folgenden These 5) erörtert.

Bei einem konstant hohen Inspirationsflow von ca. 0,5 l/sek ist das AZV direkt proportional zur Inspirationszeit. Die manuelle Beatmung mit einer Zeitbegrenzung von einer Sekunde führt dann zum AZV von ca. 500 ml und ist dementsprechend unter den Kriterien des ERC zur Reanimation anwendbar.

5) Die alleinige Drucksteuerung führt bei Leckage zu einem Ansteigen von Inspirationszeit und Tidalvolumen und ist zur NIV theoretisch ungeeignet.

Das Überschreiten des Sphinkterverschlussstons bei druckgesteuerter Beatmung mit fehlender Atemvolumenbegrenzung bedeutet bei NIV resultierend durch einen hohen Verlust von Atemgas über den Sphinkter eine inadäquate Steigerung der Inspirationszeit und des AZV. Dies ist in Abbildungen 21 und 23 zu sehen. Im Vergleich mit der IV ohne Leckage (Abb. 20 und 22) ist bei der NIV die Dauer der Inspirationszeit länger und das Atemminutenvolumen höher insbesondere, wenn der Umschaltdruck 40 cm H₂O beträgt.

Durch einen Tonusverlust des Ösophagussphinkters kann sich somit der Gasverlust in den Magen weiter erhöhen, was zum weiteren verzögerten Anstieg des Inspirations- und somit Umschaltdrucks führen würde. Diese Auswirkung des Beatmungsgerätes, die im Übrigen alle druckkontrollierten und druckgesteuerten Beatmungsmodi mit fehlender oder insuffizienter Volumenbegrenzung betreffen dürfte, führt zu einer erhöhten Gefahr der Magenventilation. Die enormen Streubreiten der Beatmungsgrößen, die im automatischen Modus generiert werden, sind in Tabelle 6 und 7 zu sehen. Diese Ergebnisse spiegeln auch den Effekt der Lungenparameter auf die druckgesteuerte Beatmung wider. Um eine Patientengefährdung auszuschließen, müsste somit eine engmaschige Überwachung des Patienten möglich sein bzw. ist die tracheale Intubation weiterhin der Goldstandard.

Die **manuelle Betätigung** des Gerätes zeigt einen deutlich größeren Anwendungsbereich, der schon allein durch die größere Einbindung und Einflussnahme des Anwenders in die Beatmung zu erklären ist, auch wenn diesem in den seltensten klinischen Situationen die genaue Überwachung der Inspirationsdauer und Atemvolumina zur Verfügung steht. Die Begrenzung der Inspirationszeit auf 2 Sekunden kommt bei konstant hohem Inspirationsflow effektiv einer Volumenbegrenzung gleich.

6) Der automatisch generierte PEEP ist unsystematisch und möglicherweise insuffizient.

Der **PEEP** wird durch den Oxylator[®] ohne Einflussnahme durch den Anwender im automatischen Modus in unterschiedlicher Höhe von selbst generiert (Abb. 25 und 26). Nur der eingestellte Umschaltdruck und die Lungenresistance stellen hier Größen dar, die die Höhe des PEEPs beeinflussen. Die Beatmungsart (IV oder NIV) hat keinen Einfluss auf den PEEP.

Der in den Versuchen am höchsten gemessenen PEEP wird beim geringsten Umschaltdruck aufgebaut. Steigt der Umschaltdruck von 20 auf 25 cm H₂O fällt der PEEP ab. Eine Ausnahme stellt nur die Erhöhung der Atemwegswiderstände auf 16 mbar *l⁻¹* sek dar. Die Expiration wird erschwert bzw. verlängert und der PEEP liegt auch bei Umschaltdrücken von 25 cm H₂O ungefähr bei 5 cm H₂O. Die weitere Erhöhung des Umschaltdrucks führt schließlich generell zur Abnahme des PEEPs.

Warum der Oxylator[®] den PEEP so generiert, ist unklar. Ein möglicher positiver Effekt der Reduzierung des PEEPs bei hohen Umschaltdrücken kann eine zusätzlich erhöhte Differenz zwischen PEEP und Umschaltdruck sein, so dass ein größeres Atemzugvolumen resultiert.

Ob es allerdings Sinn macht, den PEEP ausgerechnet bei hohen Umschaltdrücken zu verringern, muss bezweifelt werden. Denn bei Lungenerkrankungen, wie z.B. der COPD, die tendenziell bei Complianceverringern höhere Beatmungsdrücke erfordern, wird u.U. die Oxygenierung und die Atemarbeit des Patienten von einem suffizient hohen PEEP zur Vermeidung des Bronchiolenkollaps und von Atelektasen sowie durch Reduzierung eines intrinsischen PEEPs profitieren. Hierauf wurde im Grundlagenteil bereits eingegangen. Der positive Effekt des PEEPs könnte hierdurch also ausbleiben.

Durch diese Ergebnisse kann hierbei nicht beurteilt werden, welche Anteile der Oxylator[®] (extrinsischer PEEP) und welche Anteile die Lunge selber (intrinsischer PEEP) auf die gesamte Höhe des PEEPs haben. Zudem wird der PEEP in diesen Versuchen außerhalb der Lunge und nicht intrapulmonal gemessen. Zu erwähnen bleibt, dass ein PEEP nur dann Sinn macht, wenn er zu einer Verbesserung von Ventilation und Oxygenierung führt, ohne die Perfusion negativ zu beeinflussen. So kann es durchaus sein, dass die automatische PEEP-Generierung des Gerätes insuffizient ist.

Zusammenfassend ist zu sagen, dass die automatische Anwendung des Oxylator[®] mit den hier eingestellten Umschaltdrücken bei Patienten grundsätzlich möglich ist, die erzeugten Beatmungsparameter aber nur in bestimmten Lungensituationen zu befriedigenden Ergebnissen führen. Der Oxylator[®] ist ein Notfallbeatmungsgerät und dürfte somit zur Beatmung von u.a. reanimationspflichtigen Patienten konzipiert sein. Aber auch in diesem Einsatzbereich ist die Auswahl des Umschaltdrucks deutlich reduziert. Auf die Effekte der Herzkompression kann hier nicht eingegangen werden. Die alleinige Möglichkeit zur Drucksteuerung des Gerätes kann gerade bei reduziertem Ösophagusphinktertonus in eine gefährliche Zunahme von gastral Insufflation resultieren.

Die manuelle Betätigung des Oxylator[®] erzeugt weniger bedenkliche Beatmungsgrößen. In Bezug auf den gastralen Flow ist die manuelle Betätigung deutlich sicherer als die automatische Anwendung. Der Grund hierfür ist die Begrenzung der Inspirationszeit, die effektiv einer fehlenden Volumenbegrenzung entspricht.

5.3.2 Der Medumat[®] – Vergleich mit dem Oxylator[®]

Der Medumat[®] ermöglicht es dem Anwender, mehr Beatmungsparameter einzustellen als der Oxylator[®]. Aus diesen möglichen Einstellungen resultiert die volumenkontrollierte Beatmung des Medumat[®]. Die Beatmung kann druckbegrenzt werden. Der zeitkontrollierte Aspekt der Ventilation bezieht sich nur auf das Verhältnis zwischen Inspiration- und Expirationszeit und ist nach Herstellerangaben festgelegt. Resultierend aus dieser Fixierung des I zu E-Verhältnisses ist der Inspirationsflow variabel. Er differiert in der Höhe, ist jedoch während der Inspiration weitestgehend konstant.

Die Tabelle 10 veranschaulicht, inwieweit die Nacheinstellung am Medumat[®] den generierten Beatmungsparametern der Oxylator[®]-Messreihen entsprechen.

Die Einordnung der Messparameter in unsere klinischen Grenzen ist nicht nötig, da die Nacheinstellungen am Medumat[®] fast immer den zugrunde liegenden Oxylator[®]-Ergebnissen entsprechen. Die qualitative Stärke der Nacheinstellungen ist hier hoch.

Anzumerken ist, dass die eingestellten Parameter in der täglichen Klinikarbeit so sicherlich nicht durchgeführt werden würden, da die Atemzugvolumina wie auch die Atemfrequenzen Extremwerte annehmen, die eine suffiziente Beatmung nicht erwarten lassen. Klinisch erfolgversprechender sind Beatmungsparameter, die im „physiologischen“ Bereich liegen, wie die gewählten Standardeinstellungen.

Folgende These kann nach Interpretation der Ergebnisse formuliert werden:

Die volumenkontrollierte Beatmung des Medumat[®] erscheint in Bezug auf den gastral Flow sicherer zu sein, als die druckgesteuerte Beatmung des Oxylator[®].

Es wird deutlich, dass die Analogeeinstellungen am volumenkontrollierten Medumat[®] zu einem Atemgasverlust über den Sphinkter unterhalb des Verschlussdrucks führt, der um ungefähr 5 % geringer ist als beim Oxylator[®] **im automatischen Betrieb** (Abb. 24 und 31). Dies

wurde unter NIV bei annähernd gleichen Atemzugvolumina, Atemfrequenzen und Inspirationsdrücken gemessen (Tab. 10).

Nach Überschreiten des Verschlussdrucks beträgt der Atemgasverlust bei der Beatmung mit dem Medumat[®] ca. 20 bis 50 % und liegt insgesamt niedriger, als der Verlustanteil bei der Beatmung mit dem Oxylator[®]. Auch die gemessenen absoluten Werte des gastral Flow über dem Verschlussdruck liegen bis auf Ausnahmen unterhalb der Werte des Oxylator[®] (Tab. 22 und 25). Aus der Abbildung 32 ist an dem Median des gemessenen absoluten gastral Flowwertes bei der Beatmung oberhalb des Sphinkterverschlussdrucks zu entnehmen, dass bei der druckgesteuerten Beatmung des Oxylator[®] im automatischen Modus deutlich höhere gastrale Flowwerte entstehen. Interessanterweise dreht sich dieses Verhältnis bei der manuellen Anwendung um. Ein definitiver Grund ist hierfür nicht ausmachbar.

Der Schätzer (Tab. 10) besagt, dass ein durchschnittlich fast 10 ml/sek niedrigerer gastral Flow erreicht werden kann, wenn anstatt des druckgesteuerten Oxylator[®] der volumengesteuerte Medumat[®] im **automatischen Modus** verwendet wird. Dieser Wert kann aufgrund der Limitierung der statischen Auswertung, wie bereits erörtert, von Ergebnissen mit Schwellenwert nicht als absoluter Wert, sondern nur als Anhaltswert verstanden werden. Die Höhe des gastral Flow ist hiernach signifikant niedriger, wenn der Medumat[®] angewendet wird.

Differenzen im gastral Flow könnten generell Folge der Beatmungsform (druckgesteuert gegen volumenkontrolliert) sein. Der theoretische Mechanismus ist bereits weiter oben beschrieben worden. Die Abbildungen 21 und 23 zeigen deskriptiv die deutliche Zunahme von Inspirationszeit bzw. AMV bei Überschreitung des Sphinkterverschlusstonus mit einem Umschaltdruck von 40 cm H₂O. Dass dies für einen eingestellten Umschaltdruck von 35 cm H₂O noch nicht auffällig wird, liegt daran, dass der Oxylator[®] den eingestellten Umschaltdruck selten erreicht. Die Möglichkeit, dass der gastrale Flow in diesen Versuchen durch die Volumenkontrolle niedriger ist als bei der Drucksteuerung, wird jedoch dadurch eingeschränkt, dass die Atemzugvolumina bei beiden Geräten angeglichen wurden und damit fast gleich sind. Letztendlich muss gesagt werden, dass die These der Überlegenheit der volumenkontrollierten Beatmung gegenüber der druckgesteuerten, nicht volumenbegrenzten Beatmung nur auf der Beobachtung der Ergebnisse der druckgesteuerten Beatmung mit dem Oxylator[®] beruht (Abb. 21 und 23).

Ein weiterer Unterschied stellt beim Medumat[®] im Vergleich zum Oxlator[®] der Inspirationsflow in ml/sek dar. Die Flowkurve hat bei beiden Geräten eine rechteckige Form (Abb. 16 und 17). Die Höhe des Inspirationsflows ist beim Medumat[®] das Resultat des eingestellten Atemminutenvolumens und der Atemfrequenz bei fixem Inspirations-Exspiration-Verhältnis. Der Inspirationsflow zeigt allerdings mathematisch bei Einbezug aller Messreihen in ml/sek keinen signifikanten Einfluss auf den gastralen Flow (Tab 13).

Eine weitere Abweichung zwischen den Beatmungsgeräten stellt der PEEP dar, der beim Oxlator[®] unterschiedlich hoch generiert wird. Der Medumat[®] baut keinen PEEP auf. Dieser scheint aber bei statistischen Betrachtung auch keinen signifikanten Einfluss auf den gastralen Flow zu haben (Tab. 13).

Die Inspirationszeit spielt jedoch für den gastralen Flow eine statistisch signifikante Rolle (Tab. 13). Die Inspirationszeit ist bei der Beatmung mit den AnaloEinstellungen zum automatischen Modus beim Medumat[®] nur mit Ausnahmen kürzer als bei der Beatmung mit dem Oxlator[®]. Gerade bei den Beatmungen mit höheren Inspirationsdrücken bis hin zur Überschreitung des Sphinkterdrucks ist dies zu sehen (Tab. 18, 20, 22, 25). Es ist somit möglich, dass der niedrigere gastrale Flow beim Medumat[®] aus der oft geringeren Inspirationszeit bzw. einer Zeitkontrolle (fixes I:E-Verhältnis) resultiert. Diese These müsste allerdings noch systematisch mit weiteren Studien abgeklärt werden.

5.3.3 Der Medumat® – Bewertung der Standardeinstellungen

Werden die Ergebnisse der Standardeinstellungen in die definierten Referenzbereiche eingeordnet, zeigen sich folgende Beatmungsmöglichkeiten. Da Inspirationszeit, AF und AZV vorgegeben sind, werden nur die Referenzbereiche zum Inspirationsdruck und zum gastral Flow angewendet.

Lungeneinstellungen	mögliche Atemzugvolumina [ml]	
	IV	NIV
Comp. [l/mbar]/ Resist. [mbar*l ⁻¹ *sek]		
0,1/2	500, 1000	500, 1000
0,06/8	500, 1000	500, 1000
0,06/16	500, 1000	500, 1000
0,02/8	500	500
0,02/16	500	500

Tab. 16: Medumat® bei Standardbeatmung: anwendbare Atemzugvolumina nach Kriterien der Referenzbereiche.

Durch die Interpretation der Messergebnisse bei Standardeinstellungen und Einordnung in die Referenzbereiche lassen sich zur Beatmung mit dem Medumat® folgende Schlussfolgerungen formulieren:

- 1) **Die Standardbeatmungseinstellungen sind beim vorliegenden Ösophagus-sphinkterdruck bei fast allen Lungenfunktionen problemlos durchführbar.**
- 2) **Die Aussage, dass der Inspirationsdruck den größten Einfluss auf die gastrale Insufflation hat, wird bestätigt.**
- 3) **Die Forderung des ERC von 2005 nach Begrenzung des Atemzugvolumens wird unterstrichen.**

Bei den hier definierten Einstellungen (AF von 12/min und Atemzugvolumina von 500 und 1000 ml) ohne Druckbegrenzung, werden zum größten Teil suffiziente Beatmungen ermöglicht, es kann jedoch zu extrem hohen Inspirationsdrücken bei IV kommen. Bei NIV kommt

es bei den gleichen Beatmungsparameter-Lungeneinstellungskombinationen zu hohen gastralen Insufflationen (Abb. 27). Auch hier wird der deutliche Zusammenhang zwischen Inspirationsdruck und gastralem Flow deutlich. Das AZV von 1000 ml sollte bei der Lungenvolumendehnbareit ab 0,02 l/mbar keine Anwendung mehr finden, egal ob bei invasiver oder nicht-invasiver Ventilation. Dies unterstreicht die Forderung des ERC zur Volumenbegrenzung.

5.3.4 Die Handbeatmungsbeutel – Bewertung der manuellen Beatmung mit kontrollierten Standardzielsetzungen

Die Handbeatmungsbeutel wurden bei festgelegter Atemfrequenz von 12/min mit definierten Zielvolumina von 500 und 1000 ml betätigt.

Werden die Ergebnisse betrachtet und auf die Referenzbereiche angewendet, kann eine Aussage darüber getroffen werden, mit welchen Atemzugvolumina bei welchen Lungenfunktionen beatmet werden kann. Da Inspirationszeit, AF und AZV vorgegeben sind, werden nur die Referenzbereiche zum Inspirationsdruck und zum gastralen Flow angewendet.

Lungeneinstellungen	mögliche Atemzugvolumina [ml]			
	IV; Smart Bag [®]	NIV; Smart Bag [®]	IV; Ambu [®] -Beutel	NIV; Ambu [®] -Beutel
Comp. [l/mbar]/ Resist. [mbar*l ⁻¹ *sek]				
0,1/2	500, 1000	500, 1000	500, 1000	500, 1000
0,06/8	500, 1000	500, 1000	500, 1000	500, 1000
0,06/16	500, 1000	500, 1000	500, 1000	500, 1000
0,02/8	500	500	500	500
0,02/16	500	500	500	500

Tab. 17: Handbeatmungsbeutel mit Standardbeatmung: anwendbare Atemzugvolumina nach Kriterien der Referenzbereiche.

Durch Interpretation der Messergebnisse der manuellen Beatmung mit den Handbeatmungsbeuteln bei Standardzielsetzungen und durch Einordnung in die Referenzbereiche lassen sich folgende Schlussfolgerungen formulieren:

- 1) Die Standardbeatmungseinstellungen sind beim vorliegenden Ösophagus-sphinkterdruck bei fast allen Lungenfunktionen problemlos durchführbar.**
- 2) Die Aussage, dass der Inspirationsdruck den größten Einfluss auf die gastrale Insufflation hat, wird bestätigt.**
- 3) Die Forderung des ERC von 2005 nach Begrenzung des Atemzugvolumens wird unterstrichen.**

Aus Abbildung 28 und 29 wird deutlich, dass das Atemzugvolumen von 1000 ml unabhängig vom Beatmungsbeutel bei einer Lungencompliance von 0,02 l/mbar sehr hohe Beatmungsdrücke erfordert. Die Beatmungsdrücke bei beiden Beatmungsbeuteln nehmen bei der IV hier Werte um 55 cm H₂O an und können besonders bei einer pathologisch veränderten Lunge Schäden auslösen. Bei NIV können hier Drücke weit über den Verschlussstonus erreicht werden. Die Folge ist ein drastischer Verlust von Gasvolumen über den Sphinkter.

Der Tabelle 17 ist zu entnehmen, dass beide Beatmungsbeutel bei allen Lungensituationen eine suffiziente Beatmung ermöglichen. Zum Ausschluss des AZV von 1000 ml bei den Lungeneinstellungen mit der Compliance 0,02 l/mbar kommt es durch Überschreitung der Inspirationszeit und/oder einem gastralen Flow von über 2 l/min bzw. hohen Inspirationsdrücken.

Der **gastrale Flow** zeigt auch hier den deutlichen Zusammenhang zum Inspirationsdruck. Auch die Beatmungen mit den Handbeatmungsbeuteln verleihen somit der Forderung des ERC nach einer Volumenbegrenzung Nachdruck.

- 4) Die manuelle Beatmung ist nach den Kriterien der Referenzparameter genauso effizient wie die maschinelle Beatmung mit dem Medumat[®].**

Die Beatmung unter den gleichen Vorgaben von Atemvolumen und Atemfrequenz zeigt mit den Handbeatmungsbeuteln das gleiche Muster wie die Beatmung mit dem Medumat[®] (Abb. 27-29). Die Tabellen 11 und 12 verdeutlichen, dass die Beatmungsparameter bei der Beatmung durch den Medumat[®] und die Handbeatmungsbeutel, mit Ausnahme des PEEPs, nahezu identisch sind. Gleiches gilt für die statistische Betrachtung des gastralen Flows. Nur bei sehr

schlechten Lungenfunktionen übersteigt der gastrale Flow bei maschineller Beatmung den gastralen Flow bei manueller Ventilation. Hier könnte der Einfluss durch den Anwender dazu geführt haben, dass eher mit längerer Inspirationszeit und etwas niedrigerem Inspirationsflow beatmet wurde. Es bleibt zu erwähnen, dass diese Beatmungen zwar, wie beschrieben, mit fester Dauer wiederholt wurden, jedoch nur durch einen Anwender durchgeführt wurden.

5) Der positive Einfluss des Konstantflows auf den gastralen Flow kann bezweifelt werden.

Im Bereich der Beatmungsreihen mit den festen Zielvorgaben für Inspirationszeit, Atemfrequenz und Zielvolumina können mit dem Medumat[®] und den Handbeatmungsbeuteln die gleichen Resultate erzielt werden (Tab. 11 und 12). Dieses Ergebnis ist insofern interessant, als dass der Medumat[®], wie auch der Oxylator[®], mit konstanten, rechteckförmigen Flow arbeitet und mit den Handbeatmungsbeuteln ein sinusförmiger oder dezelerierender Flow erzeugt wird (Abb. 18 und 19). Dies lässt den Rückschluss zu, dass beide Flowmuster gleichwertig in Bezug auf den gastralen Flow sind. So kann auch ohne strukturierten Vergleich von maschinell generierten, unterschiedlichen Flowkurven, zumindest deutlicher Zweifel an der Aussage der Firma CPR geäußert werden, dass ein konstanter Flow positiven Einfluss auf den gastralen Flow habe.

6) Die Flowlimitierung des Smart Bags[®] zur Limitierung des Inspirationsdrucks zeigt bei schlechten Lungenfunktionen keine Wirkung.

Die Produktinformation des Smart Bag[®] besagt, dass bei „normaler“ Lungenfunktion des Patienten durch die Flowlimitierung kein Inspirationsdruck über 19 cm H₂O generiert werden kann. Diese Aussage kann hier nicht widerlegt werden. Es wird durch diese Messergebnisse aber deutlich, dass bei sehr pathologischer Lunge die Flowlimitierung mit dem Ziel der Druckbegrenzung nicht wirksam ist.

5.3.5 Die Evita 2 – Der Einfluss des PEEPs auf den gastral Flow

Nach Betrachtung der Ergebnisse kann folgende Schlussfolgerung gezogen werden:

Der PEEP stellt bis 6 mbar kein Risiko zur erhöhten gastral Insufflation dar, wenn der Sphinkter funktionell seine Aufgaben erfüllt.

Der positive Effekt bzw. das Motiv für die Beatmung mit einem PEEP liegt in einer möglichen, verbesserten Ventilation von Lungenbereichen, deren Alveolen und kleine Bronchioli die Tendenz haben, in der Expiration zu kollabieren und Dystelektasen auszubilden. Resultat der Beatmung mit PEEP kann eine verbesserte Oxygenierung des Blutes und eine Reduktion der Atemarbeit sein (beschrieben unter 2.2, Unterabschnitt: Bedeutung der Ventilation für den Gasaustausch). Auch die Verringerung des nötigen Inspirationsdrucks ist hierdurch tendenziell möglich. Bei Anhebung des intrapulmonalen Drucks in den steilen Bereich der pulmonalen Druck-Volumen-Kurve kann die Compliance verbessert und im Optimum der zusätzliche Inspirationsdruck über dem PEEP-Niveau gesenkt werden. Dies ist Grundlage der „lungenprotektiven Beatmung“ mit PEEP (Engelmann 2000).

In den Versuchen stellt der PEEP nur einen geringen Risikofaktor für das Auftreten bzw. Ansteigen des gastral Flows dar, zumindest wenn der PEEP unterhalb des Verschlussstonsus liegt. Statistisch kann in diesen Untersuchungsreihen keine Korrelation zwischen der Zunahme der gastral Insufflation durch die Zunahme des PEEPs gezeigt werden (Abb. 30).

Jedoch kann über eine Beatmung mit PEEP unter z.B. Reanimationsbedingungen in den ungeschützten Atemweg keine definitive Aussage gemacht und somit weder empfohlen noch davon abgeraten werden, da hier weder der situative Sphinktertonus erfasst werden kann, noch die Effekte der Herzkompensation geklärt werden können.

Es kann aber die Aussage getroffen werden, dass der PEEP bis 6 cm H₂O bei NIV von wachen Patienten bzw. bei suffizient schließendem Ösophagus sphinkter nur geringfügig zu einer gastral Insufflation beiträgt und die positiven Aspekte überwiegen können.

5.3.6 Der gastralen Flow – geräteunabhängige Einflüsse

Die Abbildung 33 macht den grundsätzlichen, geräteunabhängigen Zusammenhang zwischen Inspirationsdruck und gastralem Flow deutlich. Die Abbildungen 16 und 17 zeigen beispielhaft den zunehmenden Druck im System und den daraus resultierenden Anstieg des Flows durch den Sphinkter als weiteres Indiz für den Einfluss des Inspirationsdrucks.

Statistisch haben zunächst fast alle Beatmungsparameter einen Einfluss auf den gastral Flow. Dies ist dadurch zu erklären, dass die Beatmungsparameter wie z.B. Atemvolumen, Atemfrequenz, Inspirationszeit etc. teilweise eine Funktion aus den eingestellten Beatmungsgrößen und den Lungenfunktionsparametern sind. Als Beispiel sei die Drucksteuerung des Oxylator[®] genannt. Hier sind der Inspirationsdruck sowie die pulmonale Compliance und Resistance die eingestellten Größen aus deren Zusammenspiel sich während der Beatmung weitere Beatmungsgrößen ergeben. Zeigt die eingestellte Größe einen Einfluss auf den gastral Flow, ist die Wahrscheinlichkeit sehr groß, dass auch eine resultierende Beatmungsgröße einen Einfluss hat. Die Höhe des Inspirationsflows ist neben dem PEEP die einzige Größe, die statistisch keinen Einfluss auf den gastral Flow zeigt. Die pulmonale Compliance hat dagegen statistisch einen deutlichen Einfluss auf den gastral Flow (Tab. 13). Die Abbildungen 27 bis 29 zeigen hier den Zusammenhang zum notwendigen Inspirationsdruck. Statistisch wie auch aus den Abbildungen geht hervor, dass der Einfluss der pulmonalen Compliance größer ist als der Einfluss der pulmonalen Resistance.

Aus der Tabelle 13 geht weiterhin hervor, dass die Inspirationszeit eine der Größen ist, die sich mit am stärksten auf die Zunahme des gastralen Flows auswirkt (Schätzer). Hier wird der Forderung des ERCs nach Limitierung der Inspirationszeit Nachdruck gegeben.

Die These der Firma CPR, dass der konstante Flow aufgrund seiner Konstanz einen positiven Einfluss auf den gastral Flow hat und somit zu dessen Verminderung beiträgt, kann nicht eindeutig widerlegt werden. Jedoch zeigen diese Ergebnisse, dass das Überschreiten des Sphinkterverschlussdrucks mit dem Inspirationsdruck geräteunabhängig zum sprunghaften Anstieg des gastralen Flow führt. Dies gilt für den Konstantflow von Oxylator[®] und Medumat[®] (Abb. 16 und 17), aber auch für den sinusförmigen bis dezelerierenden Inspirationsflow der Handbeatmungsbeutel (Abb. 18 und 19). Zumindest im Vergleich zwischen dem Konstantflow des Medumat[®] und dem Sinusflow der Handbeatmungsbeutel kann kein Zusammenhang zwischen der Form des Inspirationsflows und dem gastralen Flow gezeigt werden.

5.4 Fazit und theoretische Überlegungen für die Praxis

Bedarf ein Patient einer Beatmung, wird die pulmonale Compliance und Resistance sowie die Höhe des Sphinktertonus unbekannt sein.

Aus den Ergebnissen wird deutlich, dass der Inspirationsdruck die entscheidende Rolle bei der gastralen Insufflation bei ungesicherten Atemwegen spielt. Die pulmonale Compliance hat hierbei über die Beeinflussung des notwendigen Inspirationsdrucks folglich ebenso große Bedeutung für die gastrale Insufflation.

Es lässt sich durch den „Schätzer“ eine relative Gefahr für die Zunahme des gastralen Flows durch Beatmungs- und Lungenparameter formulieren. So kann angenommen werden, dass der gastrale Flow die deutlichste Veränderung bei Veränderungen der Inspirationszeit, der Lungencompliance und des Inspirationsdrucks zeigen wird (Tab. 13).

Die NIV eines wachen Patienten mit respiratorischer Insuffizienz ist mit dem Oxylator[®] mit begrenzten Umschaltdrücken mit akzeptablen Werten für die Atemvolumina theoretisch möglich, setzt allerdings voraus, dass der Patient diese starre Beatmungsform ohne Triggerungsmöglichkeit durch den eigenen Atemantrieb toleriert. Ebenso ist in einem engen Bereich die automatische Anwendung des Oxylator[®] bei reanimationspflichtigen Patienten möglich. Die druckgesteuerte Beatmung durch den Oxylator[®] birgt im automatischen Modus jedoch die Gefahr, dass der gastrale Flow durch die fehlende Volumenbegrenzung ansteigt. Es kommt nicht zu einer erwähnenswerten Zunahme des gastralen Flows, wenn die Compliance auf ca. 0,05 l/cm H₂O sinkt (Davis et al. 1995), der Ösophagussphinkterdruck aber nicht überschritten wird. Es wird aber vermutlich unter CPR auch der Sphinktertonus sinken (Bowman et al. 1995). Somit ist das Erreichen des Sphinkterdrucks früher anzunehmen und die Zunahme des gastralen Flows wahrscheinlich. Zudem muss auf die Länge der Inspirationszeit und die resultierenden Zunahme des Atemzugvolumens geachtet werden, um nicht den Effekt der Herzkompression durch Verringerung des venösen Rückstroms zunichte zu machen. Von daher wäre die manuelle Betätigung des Gerätes sicherer und zeigt bei NIV auch einen deutlich geringeren gastral Flow. Ob die Beatmung bei reanimationspflichtigen Patienten manuell oder automatisch betrieben wird: die Drucksteuerung wird es vermutlich notwendig machen, dass zur Beatmung eine Kompressionspause der Herzdruckmassage eingehalten werden muss. Dies ist unter nicht gesichertem Atemweg zwar Standard, bei intubierten Patienten sollte jedoch beides parallel verlaufen. Der Umschaltdruck könnte dann durch

Herzkompression früher erreicht werden und ein suffizientes AZV verhindern. Letztendlich ist der Oxylator[®] am ehesten für die Beatmung eines reanimationspflichtigen oder bewusstlosen Patienten im angegebenen Rahmen geeignet. Dies wird durch die Einordnung in die Referenzbereiche deutlich.

Die Ergebnisse der Studie von Osterwalder und Schuhwerk (1998) können nicht nachvollzogen werden. Hier wurden bei Anwendung des Handbeatmungsbeckens mit geringeren Atemzugvolumina höhere gastrale Insufflationen erzielt (Beschreibung der Studie unter 2.2). Allerdings fehlen zum direkten Vergleich Angaben aus der Studie: es werden die erreichten Inspirationsdrücke nicht angegeben, ebenso keine Mengenangabe zur gastralen Insufflation. In unseren Versuchsreihen erreichte der Oxylator[®] nur in Einzelfällen den eingestellten Umschaltdruck. U.a. liegt gerade beim Umschaltdruck von 35 cm H₂O (Osterwalder-Studie) bei manueller Anwendung der erreichte Inspirationsdruck deutlich niedriger (Tab. 18, 19, 22-24). Dies kann auch bei der Studie von Osterwalder und Schuhwerk zum Nichterreichen des Verschlussdrucks geführt haben. Werden die Ergebnisse der Messreihen zwischen manuell angewendetem Oxylator[®] und Ambu[®]-Beutel verglichen wird ersichtlich, dass eine Beatmung mit dem Oxylator[®] bei der Lungencompliance von 0,06 l/mbar (0,05-0,055 l/cm H₂O in der Osterwalder-Studie) höhere Inspirationsdrücke benötigt als der Ambu[®]-Beutel, um ungefähr das gleiche AZV (ca. 500 ml und 1000 ml) zu generieren. Der gastrale Flow ist hier folglich bei der Beatmung mit dem Ambu[®]-Beutel niedriger als der gastrale Flow, der durch den Oxylator[®] verursacht wurde (Tab. 24 und 29). Woraus das niedrigere AZV und der höhere gastrale Flow durch die Beutelbeatmung in der Osterwalder-Studie resultiert, ist somit unklar. Bei den hier vorliegenden Messreihen wurde das AZV mit den Beatmungsbeckens überwacht, so dass die Näherung an die Zielwerte größer sein könnte und keine Differenz durch z.B. insuffiziente Maskenbeatmung möglich war. Die Erklärung in der Differenz der Ergebnisse der beiden Studien kann u.U. in einer unkritischen Anwendung des Beatmungsbeckens durch die Probanden der Osterwalder-Studie liegen. Somit würde es sich um unterschiedliche Versuchsmethoden handeln.

Wird der Medumat[®] mit den gleichen Beatmungsparametern betrieben, wie der Oxylator[®] diese generiert, resultiert daraus in den meisten Fällen ein deutlich geringerer gastraler Flow. Durch die Einstellmöglichkeiten von Atemfrequenz und Atemzugvolumen am Medumat[®] kann auch bei wachen Patienten eher eine Akzeptanz vermutet werden als bei der Anwendung

des Oxylator®. Eine Atemfrequenz, die der patienteneigenen Frequenz entspricht, kann mit einem suffizienten Atemzugvolumen kombiniert werden und den Patienten entlasten. Dies ist nur eine These und wurde hier nicht untersucht. Dieses Vorgehen wird aber zumindest von Burchardi et al. (2002) empfohlen.

Die Forderung des ERC nach Limitierung des Atemzugvolumens und der Inspirationszeit, um den venösen Rückfluss zu gewährleisten, die Umleitung von Beatmungsvolumen in den Magen zu vermindern und mit möglichst kurzer Beatmungszeit eine suffiziente Beatmung zu schaffen, kann nachvollzogen werden. Die Beatmung mit der Standardeinstellung bzw. –zielsetzung zeigt, dass dies durchaus möglich sein kann.

Der PEEP kann seinen positiven Einfluss auf die Lungenfunktion auch bei ungesicherten Atemwegen ausüben, ohne den gastral Flow zu erhöhen. Beim bewusstlosen oder reanimationspflichtigen Patienten mit möglichem Absinken des Sphinktertonus, besonders unterhalb des PEEP-Niveaus, kann aber aufgrund der oben erwähnten Überlegungen für die Anwendung des PEEPs keine Empfehlung gegeben werden.

Wichtig für einen suffizienten PEEP ebenso wie für die NIV ist der möglichst leckagefreie Maskenschluss über Mund und Nase. (Auf das sogenannte Nasen-CPAP soll hier nicht eingegangen werden.) Dies macht eine mechanische Fixierung z.B. durch Gummibänder nötig, wie sie u. a. auf Intensivstationen zur NIV und zum CPAP-Training angewendet werden. Auch denkbar ist eine manuelle Fixierung, die mit zwei Händen leichter und suffizienter ist, als mit einer Hand. Die Vorteile der Möglichkeit der Zwei-Hand-Maskenfixierung beim Oxylator® werden dadurch relativiert, dass das Gerät im automatischen Modus, der die Zwei-Hand-Fixierung ermöglichen würde, nur angewendet werden kann, wenn der Patient eine kontrollierte Beatmung akzeptiert. Bei Fixierung mit Gummibändern könnte auch eine manuelle Betätigung erfolgen, wenn die Aufmerksamkeit des Anwenders ganz beim Patienten liegt und er so die Triggerfunktion übernimmt. Zusammen mit dem Patienten könnte dann der passende Umschaltdruck gesucht werden. Dies ist jedoch nur eine theoretische Überlegung und nicht praxisnah. Dass der Anwender eine ausreichend kurze Reaktionszeit besitzt, um rechtzeitig mit dem Gerät die Inspiration zu unterstützen, ist gerade in dynamischen Notfallsituationen vermutlich eine zu idealistische Vorstellung. Burchardi et al. (2002) raten gerade von einer zur Patientenatmung asynchronen Beatmung dringend ab.

Eine Zwei-Hand-Maskenfixierung zur suffizienten Beatmung durch den Medumat[®] ist eher möglich. Der Modus zur assistierten Beatmung kann bei NIV neben der (volumen-) kontrollierten auch eine volumenunterstützende Beatmung gewährleisten und führt zur Anwendung der NIV zur Therapie der respiratorischen Insuffizienz bei wachem Patienten bei einem vermutlich größeren Patientenkollektiv. Durch Beatmungsdruck und Alarmanzeigen ist gewährleistet, dass der Anwender früh auf Komplikationen hingewiesen wird.

Die Handbeatmungsbeutel geben keine Möglichkeit zur Zwei-Hand-Fixierung. Sollte eine Hand unzureichend zur suffizienten Beatmung sein, muss die Maske mechanisch per Gummiband fixiert werden. Eine assistierte Beatmung ist durchaus möglich, erfordert aber auch die enge Einbindung des Anwenders, da Ein- und Ausatembemühungen nicht vom Gerät, sondern vom Anwender bemerkt werden müssen. Eine Maskenfixierung mit Gummibändern ist generell bei bewusstlosen und reanimationspflichtigen Patienten ungünstig. Erbricht der Patient, ist die Reaktionszeit bis zum Absaugen und Freimachen der Atemwege zu lang.

Nach Meinung des Autors dieser Arbeit ist zusammenfassend zu sagen, dass der Oxylator[®] nicht zur NIV angewendet werden kann. Auch zur Anwendung bei der Reanimation kann nur eine sehr eingeschränkte Empfehlung aufgrund der oben geschilderten Überlegungen ausgesprochen werden. Der Medumat[®] ist zur NIV sicherlich vielversprechender. Allerdings sind nicht alle Modelle mit einer assistierten Beatmungsmöglichkeit ausgerüstet. Um hier eine Empfehlung auszusprechen, bedarf es weiterer Studien. Gleiches gilt für die einfachste Beatmungsform, den Handbeatmungsbeutel. Durch die engere Einbindung in die Patientenbeatmung stellt dies vermutlich die sicherere Alternative zum Oxylator[®] besonders bei der CPR dar, zumindest wenn die Anwendung durch erfahrenes Personal stattfindet, das suffiziente Atemzugvolumina auch ohne technische Hilfe abschätzen kann.

6. Zusammenfassung

Bei einem Notfallpatienten mit akuter respiratorischer Insuffizienz ist die Beatmung oft eine lebenswichtige Maßnahme, für die dem Therapeuten sowohl invasive wie auch nicht-invasive Methoden zur Verfügung stehen. Bei der nicht-invasiven Beatmung muss eine gastrale Insufflation vermieden werden, da die daraus resultierende mögliche Aspiration eine Komplikation darstellt, die das *outcome* des Patienten maßgeblich verschlechtern kann.

Die präklinische Versorgung dieser Patienten wird durch Beatmungsgeräte mit eingeschränkten Beatmungsmodi und durch mangelndes Monitoring limitiert. Dies betrifft besonders die nicht-invasive Beatmung, die wegen größerer Störanfälligkeit nur unter größter Sorgfalt durchgeführt werden sollte, aber dennoch deutliche Vorteile für den Patienten haben kann. Die Patientensicherheit steht aber letztlich immer im Vordergrund.

Aus diesem Grund sind fundierte Kenntnisse über die Auswirkungen von Beatmungen respiratorisch kompromittierter Patienten mit Notfallbeatmungsgeräten besonders wichtig.

Diese Arbeit untersucht an einem Modell den Oxylator[®], den Medumat[®] und zwei handelsübliche Handbeatmungsbeutel auf die resultierende Beatmung bei unterschiedlichen Lungenfunktionsparametern in Bezug auf die wichtigsten Beatmungsparameter und den resultierenden gastralen Flow.

Mit der Evita 2, einem Intensivrespirator, wurde separat der Einfluss des PEEPs auf den gastralen Flow gemessen.

Die Ergebnisse wurden analysiert und anhand von definierten Referenzbereichen auf potentielle Patientengefährdung hin eingeschätzt.

Folgende Aussagen können getroffen werden:

- Theoretisch sind alle untersuchten Beatmungsgeräte in der Lage, eine invasive wie auch nicht-invasive Beatmung zu gewährleisten. Hierbei ist der Oxylator[®] in seinem automatischen Betrieb aufgrund der druckgesteuerten Beatmung und daraus resultierender Extremwerte nur mit äußerster Vorsicht anzuwenden.
- Unter den Bedingungen in diesen Versuchsreihen ist die Anwendung der manuellen Betätigungen von Beatmungsgeräten mit „physiologischen“ Standardeinstellungen sicherer als die Anwendung des Oxylator[®] im automatischen Betrieb.
- Der Medumat[®] und die Handbeatmungsbeutel können mit „physiologischen“ Standardeinstellungen fast immer sicher angewendet werden.

- In Bezug auf die gastrale Insufflation bei nicht-invasiver Beatmung gibt es Hinweise auf eine Überlegenheit kürzerer Inspirationszeiten und auf eine tendenzielle Gefahr durch druckgesteuerte Beatmung ohne Volumenbegrenzung.
- Bei deskriptiver Analyse der Ergebnisse wird als größter Einflussfaktor auf den gastralen Flow der Inspirationsdruck identifiziert.
- Bei statistischer Analyse der Ergebnisse zeigt sich zudem, dass Veränderungen in der pulmonalen Compliance deutliche Auswirkungen auf den gastralen Flow haben. Der Einfluss der pulmonalen Resistance ist weniger erwähnenswert. Der Zusammenhang zwischen pulmonaler Compliance und Inspirationsdruck kann deskriptiv belegt werden.
- Die konstante Flowform der automatischen Beatmungsgeräte zeigt in diesen Versuchen keinen Vorteil zum sinusförmigen bis dezelerierenden Flow der Handbeatmungsbeutel.
- Der PEEP zeigt bis 6 mbar keinen signifikanten Einfluss auf den gastralen Flow, wenn der PEEP selbst den Sphinkterverschlussdruck nicht übersteigt.
- Die Forderung des ERC, das AZV unter Reanimationsbedingung auf max. 600 ml zu begrenzen und die Inspirationszeit zu limitieren ist sinnvoll und wird unterstützt.

Die Handbeatmungsbeutel und der Medumat[®] zeigen gleich gute Resultate bei der Anwendung einer physiologischen Standardbeatmung. Der Oxylator[®] sollte nur in einem sehr engen Bereich in der Reanimationsbeatmung angewendet werden. Der Einsatz zur NIV wird durch das starre, nicht-assistierende Beatmungsmuster deutlich eingeschränkt. Er zeigt aufgrund seiner einfachen, druckgesteuerten Beatmung das höchste Gefährdungspotential aller getesteten Geräte für den Patienten.

Der Gebrauch eines PEEPs kann Vorteile bringen. Hierzu gehören u.a. die Verbesserung der Oxygenierung und die Entlastung der Atemmuskulatur. Die Anwendung kann bei nicht-invasiver Ventilation bei wachen Patienten weiter empfohlen werden.

E. Tabellen der Messergebnisse

- Im Folgenden sind die Tabellen mit den Ergebnissen aller Testreihen angegeben. Für die fünf Versuchswiederholungen pro Beatmungs-Lungenparameter-Kombination sind die Ergebnisse als Mittelwerte und die errechneten Standardabweichungen in der jeweils rechten Spalte daneben angegeben.
- Die Werte sind auf maximal zwei Stellen hinter dem Komma gerundet.
- Pro markierten Block sind die Lungenparameter für Compliance und Resistance gleich (fett gedruckt)

Legende

Pul Comp [l/mbar]	Pulmonale Compliance (Volumendehnbarkeit)
Pul Resist [mbar*l ⁻¹ *sek]	Pulmonale Resistance (Atemwegswiderstand)
Umschaltdruck [cm H ₂ O]	Umschaltdruck, bei dem von Inspiration auf Expiration gewechselt wird (Oxylator [®])
Analog Umschaltdruck [cm H ₂ O]	Kennzeichnet den eingestellten Umschaltdruck am Oxylator [®] , dessen Ergebnisse an Medumat [®] oder Evita 2 nahegestellt wurden
Inspirationsdruck [cm H ₂ O]	erreichter gemessener Inspirationsdruck
PEEP [cm H ₂ O]	erreichter gemessener endexpiratorischer Druck
Inspirationsflow [l/sek]	Pro Zeiteinheit der Inspiration fließendes Gas
Inspirationszeit [sek]	Applikationszeit von positiven Inspirationsflow in die Lunge
Expirationszeit [sek]	Zeit ohne positiven Inspirationsflow
Atemfrequenz /min	Atemzyklen (Inspirationszeit + Expirationszeit) pro Minute
Atemzugvolumen [ml]	Produkt aus Inspirationsflow und Inspirationszeit
Atemminutenvolumen [l/min]	Produkt aus Atemfrequenz und Atemzugvolumen

	Mittel	SD	Mittel	SD	Mittel	SD	Mittel	SD	Mittel	SD
Pul Comp [l/mbar]	0,10		0,10		0,10		0,10		0,10	
Pul Resist [mbar*l⁻¹*sek]	2,00		2,00		2,00		2,00		2,00	
Umschaltdruck [cm H₂O]	20,00		25,00		30,00		35,00		40,00	
Inspirationsdruck [cm H ₂ O]	20,21	0,08	24,04	0,06	27,65	0,15	31,95	0,11	36,70	0,06
PEEP [cm H ₂ O]	4,85	0,02	2,82	0,05	2,96	0,04	3,20	0,08	3,17	0,08
Inspirationsflow [l/sek]	0,50	0,00	0,53	0,00	0,53	0,00	0,54	0,00	0,54	0,01
Inspirationszeit [sek]	2,78	0,06	3,67	0,04	4,53	0,03	5,64	0,04	6,89	0,06
Expirationszeit [sek]	9,46	0,19	4,53	0,04	5,43	0,04	6,50	0,04	7,57	0,08
Atemfrequenz /min	4,94	0,10	7,32	0,08	6,02	0,01	6,08	2,54	5,29	2,27
Atemzugvolumen [ml]	1,38	0,03	1,94	0,04	2,41	0,03	3,04	0,03	3,74	0,05
Atemminutenvolumen [l/min]	6,75	0,05	14,18	0,13	14,52	0,19	15,05	0,07	15,43	0,09
Pul Comp [l/mbar]	0,06		0,06		0,06		0,06		0,06	
Pul Resist [mbar*l⁻¹*sek]	8,00		8,00		8,00		8,00		8,00	
Umschaltdruck [cm H₂O]	20,00		25,00		30,00		35,00		40,00	
Inspirationsdruck [cm H ₂ O]	20,05	0,08	24,03	0,10	28,62	1,92	31,81	0,12	36,60	0,14
PEEP [cm H ₂ O]	4,85	0,08	2,72	0,10	3,04	0,10	3,17	0,07	3,17	0,02
Inspirationsflow [l/sek]	0,49	0,00	0,52	0,01	0,52	0,00	0,53	0,01	0,52	0,00
Inspirationszeit [sek]	1,15	0,00	1,58	0,04	2,04	0,02	2,60	0,00	3,34	0,05
Expirationszeit [sek]	3,92	0,07	2,17	0,04	2,52	0,24	3,18	0,03	3,83	0,09
Atemfrequenz /min	11,84	0,16	16,00	0,00	13,19	0,71	10,38	0,05	8,38	0,17
Atemzugvolumen [ml]	0,57	0,01	0,82	0,03	1,06	0,01	1,38	0,02	1,74	0,03
Atemminutenvolumen [l/min]	6,70	0,09	13,15	0,53	13,99	0,81	14,30	0,20	14,54	0,09
Pul Comp [l/mbar]	0,06		0,06		0,06		0,06		0,06	
Pul Resist [mbar*l⁻¹*sek]	16,00		16,00		16,00		16,00		16,00	
Umschaltdruck [cm H₂O]	20,00		25,00		30,00		35,00		40,00	
Inspirationsdruck [cm H ₂ O]	19,96	0,12	24,09	0,11	27,70	0,14	31,74	0,19	36,09	0,19
PEEP [cm H ₂ O]	4,98	0,06	4,91	0,07	2,72	0,05	2,82	0,10	2,93	0,04
Inspirationsflow [l/sek]	0,48	0,00	0,51	0,00	0,51	0,00	0,51	0,01	0,51	0,01
Inspirationszeit [sek]	0,83	0,04	1,17	0,03	1,70	0,05	2,25	0,06	2,87	0,03
Expirationszeit [sek]	3,24	0,09	4,38	0,10	2,48	0,03	3,08	0,03	3,69	0,03
Atemfrequenz /min	14,75	0,24	19,08	18,50	14,36	0,23	11,25	0,09	9,17	0,06
Atemzugvolumen [ml]	0,40	0,02	0,60	0,02	0,87	0,02	1,16	0,04	1,45	0,00
Atemminutenvolumen [l/min]	5,85	0,38	11,33	10,77	12,49	0,18	13,10	0,39	13,30	0,12

Tab. 18: Oxylator[®] Typ I automatischer Modus / IV

	Mittel	SD	Mittel	SD	Mittel	SD	Mittel	SD	Mittel	SD
Pul Comp [l/mbar]	0,02		0,02		0,02		0,02		0,02	
Pul Resist [mbar*l⁻¹*sek]	8,00		8,00		8,00		8,00		8,00	
Umschaltdruck [cm H₂O]	20,00		25,00		30,00		35,00		40,00	
Inspirationsdruck [cm H ₂ O]	19,76	0,54	23,66	0,27	27,44	0,31	31,82	0,28	36,07	0,42
PEEP [cm H ₂ O]	4,66	0,04	2,75	0,10	2,92	0,08	3,19	0,11	3,32	0,04
Inspirationsflow [l/sek]	0,48	0,01	0,47	0,00	0,48	0,00	0,49	0,01	0,48	0,00
Inspirationszeit [sek]	0,43	0,03	0,59	0,02	0,70	0,04	0,88	0,03	1,07	0,03
Exspirationszeit [sek]	1,49	0,05	0,78	0,03	0,93	0,03	1,06	0,02	1,15	0,00
Atemfrequenz /min	31,29	1,27	43,81	0,87	36,82	0,62	30,93	0,36	27,03	0,33
Atemzugvolumen [ml]	0,20	0,01	0,28	0,01	0,34	0,02	0,43	0,01	0,51	0,01
Atemminutenvolumen [l/min]	6,39	0,29	12,19	0,34	12,37	0,52	13,23	0,36	13,88	0,18
Pul Comp [l/mbar]	0,02		0,02		0,02		0,02		0,02	
Pul Resist [mbar*l⁻¹*sek]	16,00		16,00		16,00		16,00		16,00	
Umschaltdruck [cm H₂O]	20,00		25,00		30,00		35,00		40,00	
Inspirationsdruck [cm H ₂ O]	19,87	0,28	23,90	0,40	27,67	0,34	32,02	0,24	36,25	0,33
PEEP [cm H ₂ O]	4,77	0,05	4,86	0,10	2,92	0,11	3,14	0,08	3,03	0,10
Inspirationsflow [l/sek]	0,45	0,01	0,49	0,01	0,48	0,00	0,49	0,01	0,49	0,00
Inspirationszeit [sek]	0,35	0,00	0,47	0,03	1,74	2,38	0,80	0,00	0,97	0,03
Exspirationszeit [sek]	1,23	0,04	1,58	0,06	0,90	0,04	1,04	0,02	1,19	0,02
Atemfrequenz /min	38,00	1,12	29,29	0,90	32,24	13,20	32,61	0,40	27,78	0,28
Atemzugvolumen [ml]	0,16	0,00	0,23	0,01	0,82	1,12	0,39	0,01	0,48	0,01
Atemminutenvolumen [l/min]	6,04	0,16	6,68	0,33	12,38	0,39	12,73	0,19	13,20	0,31

Tab. 18: Oxylator[®] Typ I automatischer Modus / IV (Fortsetzung)

	Mittel	SD	Mittel	SD	Mittel	SD	Mittel	SD	Mittel	SD
Pul Comp [l/mbar]	0,10		0,10		0,10		0,10		0,10	
Pul Resist [mbar*l⁻¹*sek]	2,00		2,00		2,00		2,00		2,00	
Umschaltdruck [cm H₂O]	20,00		25,00		30,00		35,00		40,00	
Inspirationsdruck [cm H ₂ O]	18,32	0,09	19,02	0,53	19,72	0,53	19,18	0,38	19,24	0,51
PEEP [cm H ₂ O]	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
Inspirationsflow [l/sek]	0,47	0,01	0,51	0,01	0,52	0,01	0,52	0,00	0,51	0,01
Inspirationszeit [sek]	1,92	0,03	1,87	0,14	1,91	0,11	1,81	0,07	1,87	0,09
Expirationszeit [sek]	3,07	0,05	3,12	0,10	3,09	0,10	3,05	0,06	3,14	0,11
Atemfrequenz /min	12,02	0,15	12,03	0,23	12,00	0,24	12,35	0,30	11,98	0,23
Atemzugvolumen [ml]	0,89	0,02	0,96	0,08	0,99	0,04	0,94	0,04	0,96	0,05
Atemminutenvolumen [l/min]	10,75	0,16	11,55	0,79	11,82	0,45	11,57	0,18	11,51	0,55
Pul Comp [l/mbar]	0,06		0,06		0,06		0,06		0,06	
Pul Resist [mbar*l⁻¹*sek]	8,00		8,00		8,00		8,00		8,00	
Umschaltdruck [cm H₂O]	20,00		25,00		30,00		35,00		40,00	
Inspirationsdruck [cm H ₂ O]	19,20	0,08	23,24	0,07	28,61	0,03	30,74	0,24	30,31	1,04
PEEP [cm H ₂ O]	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
Inspirationsflow [l/sek]	0,45	0,01	0,48	0,00	0,49	0,01	0,49	0,00	0,49	0,00
Inspirationszeit [sek]	0,88	0,03	1,24	0,04	1,85	0,04	1,91	0,07	1,96	0,10
Expirationszeit [sek]	4,10	0,13	3,75	0,12	3,32	0,36	3,09	0,07	3,00	0,12
Atemfrequenz /min	12,05	0,25	12,03	0,24	11,65	0,75	12,00	0,23	12,10	0,16
Atemzugvolumen [ml]	0,40	0,02	0,60	0,02	0,90	0,01	0,94	0,04	0,96	0,05
Atemminutenvolumen [l/min]	4,82	0,28	7,16	0,32	10,47	0,62	11,28	0,35	11,58	0,68
Pul Comp [l/mbar]	0,06		0,06		0,06		0,06		0,06	
Pul Resist [mbar*l⁻¹*sek]	16,00		16,00		16,00		16,00		16,00	
Umschaltdruck [cm H₂O]	20,00		25,00		30,00		35,00		40,00	
Inspirationsdruck [cm H ₂ O]	20,17	0,10	23,74	0,12	27,48	0,33	31,95	0,37	32,27	0,60
PEEP [cm H ₂ O]	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
Inspirationsflow [l/sek]	0,44	0,01	0,46	0,00	0,48	0,00	0,48	0,01	0,47	0,01
Inspirationszeit [sek]	0,71	0,04	0,99	0,02	1,38	0,06	1,90	0,10	1,91	0,13
Expirationszeit [sek]	4,31	0,14	3,99	0,05	3,58	0,06	3,21	0,26	3,09	0,15
Atemfrequenz /min	11,96	0,30	12,05	0,14	12,10	0,20	11,77	0,61	12,00	0,15
Atemzugvolumen [ml]	0,31	0,02	0,45	0,01	0,66	0,03	0,91	0,05	0,91	0,07
Atemminutenvolumen [l/min]	3,70	0,29	5,46	0,13	8,01	0,25	10,66	0,73	10,87	0,81

Tab. 19: Oxylator[®] Typ I manueller Modus / IV

	Mittel	SD	Mittel	SD	Mittel	SD	Mittel	SD	Mittel	SD
Pul Comp [l/mbar]	0,02		0,02		0,02		0,02		0,02	
Pul Resist [mbar*l⁻¹*sek]	8,00		8,00		8,00		8,00		8,00	
Umschaltdruck [cm H₂O]	20,00		25,00		30,00		35,00		40,00	
Inspirationsdruck [cm H ₂ O]	18,82	0,33	23,45	0,36	26,70	0,15	31,74	0,26	35,49	0,32
PEEP [cm H ₂ O]	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
Inspirationsflow [l/sek]	0,38	0,00	0,40	0,01	0,42	0,00	0,41	0,00	0,42	0,00
Inspirationszeit [sek]	0,32	0,03	0,47	0,03	0,59	0,02	0,73	0,03	0,85	0,04
Expirationszeit [sek]	4,78	0,24	4,49	0,08	4,42	0,04	4,23	0,06	4,09	0,08
Atemfrequenz /min	11,79	0,52	12,10	0,22	11,99	0,10	12,10	0,16	12,15	0,25
Atemzugvolumen [ml]	0,12	0,01	0,19	0,01	0,25	0,01	0,30	0,01	0,36	0,01
Atemminutenvolumen [l/min]	0,12	0,13	2,25	0,11	2,98	0,12	3,64	0,14	4,34	0,13
Pul Comp [l/mbar]	0,02		0,02		0,02		0,02		0,02	
Pul Resist [mbar*l⁻¹*sek]	16,00		16,00		16,00		16,00		16,00	
Umschaltdruck [cm H₂O]	20,00		25,00		30,00		35,00		40,00	
Inspirationsdruck [cm H ₂ O]	18,87	0,67	22,69	0,12	26,93	0,27	31,21	0,24	36,32	0,19
PEEP [cm H ₂ O]	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
Inspirationsflow [l/sek]	0,32	0,01	0,37	0,01	0,38	0,00	0,40	0,00	0,41	0,01
Inspirationszeit [sek]	0,26	0,04	0,33	0,03	0,48	0,03	0,60	0,04	0,78	0,03
Expirationszeit [sek]	4,71	0,11	4,66	0,07	4,47	0,13	4,36	0,04	4,22	0,13
Atemfrequenz /min	12,08	0,22	12,02	0,10	12,13	0,27	12,10	0,10	12,01	0,35
Atemzugvolumen [ml]	0,08	0,01	0,12	0,01	0,18	0,01	0,24	0,01	0,32	0,01
Atemminutenvolumen [l/min]	0,99	0,15	1,47	0,13	2,21	0,15	2,92	0,17	3,80	0,11

Tab. 19: Oxylator[®] Typ I manueller Modus / IV (Fortsetzung)

	Mittel	SD	Mittel	SD	Mittel	SD	Mittel	SD	Mittel	SD
Pul Comp [l/mbar]	0,10		0,10		0,10		0,10		0,10	
Pul Resist [mbar*l⁻¹*sek]	2,00		2,00		2,00		2,00		2,00	
analog Umschaltdruck [cm H₂O]	20,00		25,00		30,00		35,00		40,00	
Inspirationsdruck [cm H ₂ O]	19,57	0,35	21,58	0,12	26,05	0,14	32,62	0,09	39,59	0,04
PEEP [cm H ₂ O]	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
Inspirationsflow [l/sek]	0,28	0,01	0,57	0,00	0,59	0,01	0,57	0,00	0,72	0,01
Inspirationszeit [sek]	4,48	0,04	2,00	0,00	2,76	0,05	4,48	0,04	4,48	0,04
Expirationszeit [sek]	7,60	0,00	3,50	0,00	4,80	0,00	7,60	0,00	7,60	0,00
Atemfrequenz /min	4,96	0,00	10,91	0,00	7,92	0,05	4,97	0,02	4,97	0,02
Atemzugvolumen [ml]	1,27	0,02	1,14	0,00	1,62	0,02	2,55	0,03	3,21	0,03
Atemminutenvolumen [l/min]	6,30	0,11	12,44	0,00	12,86	0,13	12,67	0,09	15,93	0,12
Pul Comp [l/mbar]	0,06		0,06		0,06		0,06		0,06	
Pul Resist [mbar*l⁻¹*sek]	8,00		8,00		8,00		8,00		8,00	
analog Umschaltdruck [cm H₂O]	20,00		25,00		30,00		35,00		40,00	
Inspirationsdruck [cm H ₂ O]	19,10	0,05	22,12	0,14	26,77	0,15	34,36	0,17	39,58	0,12
PEEP [cm H ₂ O]	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
Inspirationsflow [l/sek]	0,31	0,01	0,53	0,00	0,56	0,00	0,59	0,00	0,61	0,00
Inspirationszeit [sek]	1,78	0,04	0,80	0,00	1,20	0,00	1,82	0,04	2,20	0,00
Expirationszeit [sek]	3,24	0,05	1,48	0,04	2,16	0,05	3,20	0,00	3,84	0,05
Atemfrequenz /min	11,95	0,11	26,32	0,53	17,86	0,29	11,95	0,11	9,93	0,09
Atemzugvolumen [ml]	0,56	0,01	0,42	0,00	0,67	0,01	1,07	0,03	1,34	0,01
Atemminutenvolumen [l/min]	6,68	0,15	11,16	0,22	11,96	0,25	12,83	0,20	13,29	0,12
Pul Comp [l/mbar]	0,06		0,06		0,06		0,06		0,06	
Pul Resist [mbar*l⁻¹*sek]	16,00		16,00		16,00		16,00		16,00	
analog Umschaltdruck [cm H₂O]	20,00		25,00		30,00		35,00		40,00	
Inspirationsdruck [cm H ₂ O]	15,80	0,04	19,44	0,08	27,61	0,16	33,04	0,11	39,12	0,26
PEEP [cm H ₂ O]	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
Inspirationsflow [l/sek]	0,23	0,01	0,29	0,00	0,51	0,00	0,51	0,00	0,55	0,00
Inspirationszeit [sek]	1,46	0,05	1,80	0,00	1,20	0,00	1,82	0,04	2,16	0,11
Expirationszeit [sek]	2,56	0,05	3,20	0,00	2,16	0,05	3,20	0,00	3,90	0,10
Atemfrequenz /min	14,93	0,16	12,00	0,00	17,86	0,29	11,95	0,11	9,91	0,29
Atemzugvolumen [ml]	0,34	0,02	0,52	0,00	0,61	0,01	0,93	0,02	1,19	0,07
Atemminutenvolumen [l/min]	5,10	0,29	6,26	0,00	10,89	0,14	11,09	0,17	11,80	0,37

Tab. 20: Medumat[®] in Analogeinstellung automatischer Modus / IV

	Mittel	SD	Mittel	SD	Mittel	SD	Mittel	SD	Mittel	SD
Pul Comp [l/mbar]	0,02		0,02		0,02		0,02		0,02	
Pul Resist [mbar*l⁻¹*sek]	8,00		8,00		8,00		8,00		8,00	
analog Umschaltdruck [cm H₂O]	20,00		25,00		30,00		35,00		40,00	
Inspirationsdruck [cm H ₂ O]	18,76	0,21	23,46	0,39	29,66	0,42	32,43	0,19	39,39	0,24
PEEP [cm H ₂ O]	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
Inspirationsflow [l/sek]	0,24	0,01	0,36	0,00	0,47	0,00	0,45	0,00	0,48	0,00
Inspirationszeit [sek]	0,66	0,05	0,50	0,00	0,52	0,04	0,60	0,00	0,82	0,04
Exspirationszeit [sek]	1,26	0,05	1,00	0,00	1,14	0,05	1,30	0,00	1,50	0,00
Atemfrequenz /min	31,26	0,71	40,00	0,00	36,18	1,21	31,58	0,00	25,87	0,49
Atemzugvolumen [ml]	0,16	0,01	0,18	0,00	0,24	0,02	0,27	0,00	0,39	0,02
Atemminutenvolumen [l/min]	5,03	0,36	7,20	0,00	8,80	0,68	8,56	0,08	10,17	0,35
Pul Comp [l/mbar]	0,02		0,02		0,02		0,02		0,02	
Pul Resist [mbar*l⁻¹*sek]	16,00		16,00		16,00		16,00		16,00	
analog Umschaltdruck [cm H₂O]	20,00		25,00		30,00		35,00		40,00	
Inspirationsdruck [cm H ₂ O]	17,67	0,02	19,54	0,10	28,30	0,38	33,38	0,31	41,72	0,31
PEEP [cm H ₂ O]	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
Inspirationsflow [l/sek]	0,25	0,01	0,22	0,01	0,40	0,00	0,44	0,01	0,48	0,00
Inspirationszeit [sek]	0,60	0,00	0,76	0,05	0,52	0,04	0,66	0,05	0,78	0,04
Exspirationszeit [sek]	1,00	0,00	1,30	0,00	1,00	0,00	1,22	0,04	1,40	0,00
Atemfrequenz /min	37,50	0,00	29,14	0,78	39,50	1,12	31,93	0,78	27,53	0,58
Atemzugvolumen [ml]	0,15	0,00	0,17	0,02	0,21	0,02	0,29	0,02	0,37	0,58
Atemminutenvolumen [l/min]	5,72	0,12	4,87	0,34	8,20	0,45	9,18	0,63	10,30	0,39

Tab. 20 Medumat[®] in Analogeinstellung automatischer Modus / IV (Fortsetzung)

	Mittel	SD	Mittel	SD	Mittel	SD	Mittel	SD	Mittel	SD
Pul Comp [l/mbar]	0,10		0,10		0,10		0,10		0,10	
Pul Resist [mbar*I⁻¹*sek]	2,00		2,00		2,00		2,00		2,00	
analog Umschaltdruck [cm H₂O]	20,00		25,00		30,00		35,00		40,00	
Inspirationsdruck [cm H ₂ O]	18,39	0,19								
PEEP [cm H ₂ O]	0,00	0,00								
Inspirationsflow [l/sek]	0,50	0,01								
Inspirationszeit [sek]	1,80	0,04								
Expirationszeit [sek]	3,20	0,04								
Atemfrequenz /min	12,00	0,12								
Atemzugvolumen [ml]	0,89	0,01								
Atemminutenvolumen [l/min]	10,71	0,17								
Pul Comp [l/mbar]	0,06		0,06		0,06		0,06		0,06	
Pul Resist [mbar*I⁻¹*sek]	8,00		8,00		8,00		8,00		8,00	
analog Umschaltdruck [cm H₂O]	20,00		25,00		30,00		35,00		40,00	
Inspirationsdruck [cm H ₂ O]	15,76	0,04	20,74	0,08	27,99	0,12	28,63	0,17		
PEEP [cm H ₂ O]	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00		
Inspirationsflow [l/sek]	0,24	0,00	0,37	0,00	0,53	0,00	0,53	0,00		
Inspirationszeit [sek]	1,80	0,04	1,79	0,04	1,81	0,02	1,82	0,03		
Expirationszeit [sek]	3,20	0,00	3,23	0,03	3,20	0,00	3,21	0,02		
Atemfrequenz /min	12,00	0,08	11,95	0,14	11,98	0,05	11,93	0,07		
Atemzugvolumen [ml]	0,43	0,01	0,66	0,02	0,96	0,01	0,96	0,01		
Atemminutenvolumen [l/min]	5,18	0,07	7,92	0,11	11,49	0,09	11,51	0,14		
Pul Comp [l/mbar]	0,06		0,06		0,06		0,06		0,06	
Pul Resist [mbar*I⁻¹*sek]	16,00		16,00		16,00		16,00		16,00	
analog Umschaltdruck [cm H₂O]	20,00		25,00		30,00		35,00		40,00	
Inspirationsdruck [cm H ₂ O]	15,14	0,09	18,88	0,08	25,04	0,10	31,54	0,10		
PEEP [cm H ₂ O]	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00		
Inspirationsflow [l/sek]	0,21	0,00	0,29	0,00	0,42	0,00	0,49	0,00		
Inspirationszeit [sek]	1,80	0,04	1,81	0,02	1,82	0,03	1,82	0,03		
Expirationszeit [sek]	3,22	0,03	3,20	0,00	3,21	0,02	3,20	0,04		
Atemfrequenz /min	11,95	0,14	11,98	0,05	11,93	0,07	11,95	0,07		
Atemzugvolumen [ml]	0,38	0,01	0,53	0,01	0,76	0,01	0,89	0,01		
Atemminutenvolumen [l/min]	4,52	0,05	6,33	0,10	9,12	0,11	10,66	0,16		

Tab. 21: Medumat[®] in Analogeinstellung manueller Modus / IV

	Mittel	SD	Mittel	SD	Mittel	SD	Mittel	SD	Mittel	SD
Pul Comp [l/mbar]	0,02		0,02		0,02		0,02		0,02	
Pul Resist [mbar*l⁻¹*sek]	8,00		8,00		8,00		8,00		8,00	
analog Umschaltdruck [cm H₂O]	20,00		25,00		30,00		35,00		40,00	
Inspirationsdruck [cm H ₂ O]	17,45	0,08	20,41	0,10	23,53	0,15	27,88	0,14	32,85	0,15
PEEP [cm H ₂ O]	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
Inspirationsflow [l/sek]	0,10	0,00	0,12	0,00	0,15	0,00	0,19	0,00	0,24	0,00
Inspirationszeit [sek]	1,77	0,03	1,76	0,07	1,79	0,04	1,78	0,04	1,80	0,05
Exspirationszeit [sek]	3,31	0,04	3,25	0,06	3,29	0,08	3,26	0,04	3,23	0,03
Atemfrequenz /min	11,81	0,11	11,98	0,29	11,81	0,24	11,91	0,10	11,93	0,14
Atemzugvolumen [ml]	0,18	0,01	0,21	0,01	0,27	0,01	0,33	0,01	0,43	0,01
Atemminutenvolumen [l/min]	2,13	0,08	2,53	0,06	3,17	0,06	3,98	0,16	5,15	0,10
Pul Comp [l/mbar]	0,02		0,02		0,02		0,02		0,02	
Pul Resist [mbar*l⁻¹*sek]	16,00		16,00		16,00		16,00		16,00	
analog Umschaltdruck [cm H₂O]	20,00		25,00		30,00		35,00		40,00	
Inspirationsdruck [cm H ₂ O]	15,72	0,06	18,38	0,11	22,04	0,13	25,68	0,13	30,55	0,16
PEEP [cm H ₂ O]	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
Inspirationsflow [l/sek]	0,08	0,00	0,10	0,00	0,14	0,00	0,17	0,00	0,21	0,00
Inspirationszeit [sek]	1,75	0,04	1,77	0,08	1,77	0,03	1,78	0,04	1,78	0,04
Exspirationszeit [sek]	3,28	0,03	3,25	0,06	3,25	0,06	3,23	0,03	3,23	0,03
Atemfrequenz /min	11,93	0,11	11,95	0,14	11,95	0,18	11,98	0,13	11,98	0,13
Atemzugvolumen [ml]	0,14	0,00	0,18	0,01	0,25	0,00	0,30	0,01	0,37	0,01
Atemminutenvolumen [l/min]	1,67	0,02	2,12	0,09	2,96	0,04	3,62	0,06	4,48	0,07

Tab.21: Medumat[®] in Analogeinstellung manueller Modus / IV (Fortsetzung)

	Mittel	SD	Mittel	SD	Mittel	SD	Mittel	SD	Mittel	SD
Pul Comp [l/mbar]	0,10		0,10		0,10		0,10		0,10	
Pul Resist [mbar*l⁻¹*sek]	2,00		2,00		2,00		2,00		2,00	
Umschaltdruck [cm H₂O]	20,00		25,00		30,00		35,00		40,00	
Inspirationsdruck [cm H ₂ O]	18,91	0,04	23,49	0,06	28,13	0,11	32,31	0,41	34,65	0,21
PEEP [cm H ₂ O]	5,63	0,06	2,84	0,06	3,07	0,02	3,32	0,09	3,51	0,14
Inspirationsflow [l/sek]	0,46	0,02	0,48	0,01	0,49	0,01	0,47	0,03	0,51	0,01
Inspirationszeit [sek]	2,89	0,21	3,74	0,12	4,58	0,06	6,66	0,08	8,22	0,21
Expirationszeit [sek]	6,07	0,14	4,08	0,07	4,68	0,05	5,81	0,11	6,38	0,14
Atemfrequenz /min	6,70	0,23	7,68	0,18	6,48	0,05	4,81	0,01	4,11	0,06
Atemzugvolumen [ml]	1,35	0,14	1,79	0,03	2,23	0,03	3,15	0,20	4,16	0,11
Atemminutenvolumen [l/min]	9,02	0,65	13,77	0,20	14,44	0,22	15,17	0,95	17,11	0,24
gastraler Flow [l/min]	0,87	0,01	0,92	0,01	1,04	0,01	1,18	0,01	3,78	0,36
Pul Comp [l/mbar]	0,06		0,06		0,06		0,06		0,06	
Pul Resist [mbar*l⁻¹*sek]	8,00		8,00		8,00		8,00			
Umschaltdruck [cm H₂O]	20,00		25,00		30,00		35,00		40,00	
Inspirationsdruck [cm H ₂ O]	19,97	0,07	23,67	0,08	27,49	0,14	31,28	0,07	35,43	0,09
PEEP [cm H ₂ O]	5,52	0,05	2,77	0,10	2,92	0,13	2,67	0,07	2,78	0,04
Inspirationsflow [l/sek]	0,46	0,01	0,49	0,01	0,48	0,01	0,49	0,01	0,50	0,01
Inspirationszeit [sek]	1,25	0,09	1,86	0,04	2,37	0,06	2,90	0,04	6,20	0,10
Expirationszeit [sek]	2,96	0,05	2,05	0,08	2,47	0,06	2,95	0,03	4,22	0,03
Atemfrequenz /min	14,26	0,25	15,35	0,43	12,40	0,06	10,25	0,04	5,76	0,07
Atemzugvolumen [ml]	0,58	0,05	0,90	0,03	1,14	0,03	1,41	0,01	3,12	0,06
Atemminutenvolumen [l/min]	8,28	0,58	13,88	0,35	14,18	0,37	14,46	0,13	17,97	0,24
gastraler Flow [l/min]	0,85	0,06	0,91	0,05	0,97	0,08	1,22	0,08	3,75	0,05
Pul Comp [l/mbar]	0,06		0,06		0,06		0,06		0,06	
Pul Resist [mbar*l⁻¹*sek]	16,00		16,00		16,00		16,00		16,00	
Umschaltdruck [cm H₂O]	20,00		25,00		30,00		35,00		40,00	
Inspirationsdruck [cm H ₂ O]	20,01	0,14	23,60	0,09	26,85	0,09	31,26	0,05	35,05	0,18
PEEP [cm H ₂ O]	5,68	0,03	5,54	0,09	2,62	0,08	3,04	0,10	3,17	0,02
Inspirationsflow [l/sek]	0,45	0,01	0,48	0,01	0,49	0,01	0,50	0,01	0,50	0,01
Inspirationszeit [sek]	0,94	0,04	1,39	0,05	1,87	0,07	2,72	0,03	6,08	0,06
Expirationszeit [sek]	2,15	0,04	3,06	0,04	2,37	0,06	3,13	0,03	4,53	0,03
Atemfrequenz /min	19,42	0,41	13,48	0,14	14,15	0,25	10,25	0,10	5,65	0,02
Atemzugvolumen [ml]	0,43	0,02	0,67	0,03	0,91	0,02	1,35	0,02	3,06	0,03
Atemminutenvolumen [l/min]	8,28	0,19	9,01	0,41	12,91	0,23	13,83	0,13	17,30	0,17
gastraler Flow [l/min]	0,86	0,01	0,98	0,02	1,02	0,02	1,27	0,02	7,19	0,62

Tab. 22: Oxylator[®] Typ I automatischer Modus / NIV

	Mittel	SD	Mittel	SD	Mittel	SD	Mittel	SD	Mittel	SD
Pul Comp [l/mbar]	0,02		0,02		0,02		0,02		0,02	
Pul Resist [mbar*l⁻¹*sek]	8,00		8,00		8,00		8,00		8,00	
Umschaltdruck [cm H₂O]	20,00		25,00		30,00		35,00		40,00	
Inspirationsdruck [cm H ₂ O]	19,34	0,26	23,28	0,08	26,73	0,24	30,96	0,15	33,99	0,24
PEEP [cm H ₂ O]	5,14	0,21	2,54	0,10	2,41	0,12	2,71	0,04	3,04	0,11
Inspirationsflow [l/sek]	0,44	0,01	0,46	0,01	0,45	0,00	0,46	0,01	0,47	0,01
Inspirationszeit [sek]	0,47	0,03	0,62	0,04	0,74	0,05	1,07	0,07	1,81	0,10
Expirationszeit [sek]	1,09	0,03	0,78	0,05	0,88	0,03	1,09	0,06	1,05	0,09
Atemfrequenz /min	38,68	1,00	42,90	1,46	37,05	0,62	27,91	1,33	21,01	0,93
Atemzugvolumen [ml]	0,21	0,01	0,28	0,02	0,33	0,02	0,49	0,03	0,86	0,05
Atemminutenvolumen [l/min]	7,93	0,38	12,21	0,79	12,38	0,66	13,53	0,49	18,04	0,65
gastraler Flow [l/min]	1,10	0,04	1,14	0,01	1,28	0,01	1,55	0,01	9,57	0,99
Pul Comp [l/mbar]	0,02		0,02		0,02		0,02		0,02	
Pul Resist [mbar*l⁻¹*sek]	16,00		16,00		16,00		16,00		16,00	
Umschaltdruck [cm H₂O]	20,00		25,00		30,00		35,00		40,00	
Inspirationsdruck [cm H ₂ O]	19,79	0,19	23,92	0,59	26,98	0,17	31,09	0,19	35,32	0,78
PEEP [cm H ₂ O]	5,52	0,13	5,46	0,12	2,75	0,09	2,81	0,14	3,71	0,22
Inspirationsflow [l/sek]	0,44	0,01	0,46	0,00	0,46	0,01	0,46	0,00	0,47	0,01
Inspirationszeit [sek]	0,42	0,03	0,53	0,04	0,80	0,02	0,96	0,05	3,43	0,24
Expirationszeit [sek]	1,04	0,04	1,18	0,09	0,84	0,06	1,10	0,23	1,28	0,04
Atemfrequenz /min	41,12	1,20	35,07	1,02	36,65	0,91	29,44	3,14	12,76	0,67
Atemzugvolumen [ml]	0,19	0,01	0,24	0,02	0,37	0,01	0,44	0,02	1,60	0,11
Atemminutenvolumen [l/min]	7,63	0,50	8,60	0,92	13,57	0,64	12,96	1,14	20,35	0,41
gastraler Flow [l/min]	1,27	0,03	1,41	0,02	1,46	0,06	1,54	0,03	11,78	0,89

Tab. 22: Oxylator[®] Typ I automatischer Modus / NIV (Fortsetzung)

	Mittel	SD	Mittel	SD	Mittel	SD	Mittel	SD	Mittel	SD
Pul Comp [l/mbar]	0,10		0,10		0,10		0,10		0,10	
Pul Resist [mbar*l⁻¹*sek]	2,00		2,00		2,00		2,00		2,00	
Umschaltdruck [cm H₂O]	20,00		25,00		30,00		35,00		40,00	
Inspirationsdruck [cm H ₂ O]			24,20	0,09	28,05	0,14	31,77	0,14	34,74	0,38
PEEP [cm H ₂ O]			3,31	0,09	3,17	0,08	3,37	0,14	3,78	0,18
Inspirationsflow [l/sek]			0,56	0,01	0,55	0,01	0,56	0,01	0,56	0,00
Inspirationszeit [sek]			3,24	0,05	4,33	0,05	5,28	0,05	6,15	0,06
Expirationszeit [sek]			4,23	0,05	5,43	0,06	6,23	0,06	6,90	0,17
Atemfrequenz /min			8,03	0,10	6,14	0,04	5,22	0,00	4,59	0,08
Atemzugvolumen [ml]			1,81	0,03	2,39	0,03	2,93	0,03	3,43	0,06
Atemminutenvolumen [l/min]			14,54	0,28	14,64	0,17	15,30	0,16	15,76	0,03
gastraler Flow [l/min]			0,96	0,00	1,09	0,01	1,27	0,02	3,90	0,08
Pul Comp [l/mbar]	0,06		0,06		0,06		0,06		0,06	
Pul Resist [mbar*l⁻¹*sek]	8,00		8,00		8,00		8,00		8,00	
Umschaltdruck [cm H₂O]	20,00		25,00		30,00		35,00		40,00	
Inspirationsdruck [cm H ₂ O]			25,44	0,16	28,84	0,19	31,62	0,13	35,65	0,74
PEEP [cm H ₂ O]			5,18	0,30	3,73	0,06	3,43	0,03	3,76	0,07
Inspirationsflow [l/sek]			0,54	0,01	0,54	0,00	0,54	0,01	0,53	0,00
Inspirationszeit [sek]			1,66	0,05	2,10	0,00	2,60	0,00	5,67	0,25
Expirationszeit [sek]			2,60	0,07	2,54	0,05	2,98	0,05	4,07	0,06
Atemfrequenz /min			14,09	0,38	12,93	0,15	10,76	0,10	6,17	0,20
Atemzugvolumen [ml]			0,90	0,03	1,14	0,01	1,39	0,01	3,00	0,13
Atemminutenvolumen [l/min]			12,62	0,18	14,72	0,14	14,97	0,26	18,51	0,25
gastraler Flow [l/min]			1,03	0,03	1,09	0,01	1,28	0,03	6,73	0,48
Pul Comp [l/mbar]	0,06		0,06		0,06		0,06		0,06	
Pul Resist [mbar*l⁻¹*sek]	16,00		16,00		16,00		16,00		16,00	
Umschaltdruck [cm H₂O]	20,00		25,00		30,00		35,00		40,00	
Inspirationsdruck [cm H ₂ O]			24,09	0,30	28,22	0,16	31,73	0,14	35,27	0,15
PEEP [cm H ₂ O]			4,41	0,16	4,72	0,15	3,51	0,19	3,91	0,08
Inspirationsflow [l/sek]			0,54	0,00	0,54	0,00	0,55	0,01	0,55	0,00
Inspirationszeit [sek]			1,22	0,04	1,74	0,05	2,34	0,05	6,07	0,29
Expirationszeit [sek]			2,36	0,05	3,04	0,11	2,90	0,07	4,20	0,00
Atemfrequenz /min			16,76	0,21	12,56	0,35	11,45	0,12	5,80	0,20
Atemzugvolumen [ml]			0,66	0,03	0,94	0,03	1,28	0,03	3,34	0,16
Atemminutenvolumen [l/min]			11,09	0,48	11,80	0,35	14,63	0,31	19,60	0,46
gastraler Flow [l/min]			0,97	0,01	1,15	0,01	1,44	0,02	8,48	0,13

Tab. 23: Oxylator[®] Typ II automatischer Modus / NIV

	Mittel	SD	Mittel	SD	Mittel	SD	Mittel	SD	Mittel	SD
Pul Comp [l/mbar]	0,02		0,02		0,02		0,02		0,02	
Pul Resist [mbar*l⁻¹*sek]	8,00		8,00		8,00		8,00		8,00	
Umschaltdruck [cm H₂O]	20,00		25,00		30,00		35,00		40,00	
Inspirationsdruck [cm H ₂ O]			24,16	0,14	29,16	0,11	31,62	0,17	34,57	0,37
PEEP [cm H ₂ O]			4,45	0,17	3,50	0,05	3,35	0,06	3,62	0,08
Inspirationsflow [l/sek]			0,51	0,01	0,52	0,00	0,50	0,00	0,52	0,01
Inspirationszeit [sek]			0,50	0,00	0,78	0,04	0,90	0,00	1,54	0,05
Exspirationszeit [sek]			0,88	0,04	0,94	0,05	1,04	0,05	1,14	0,09
Atemfrequenz /min			43,52	1,47	34,90	0,88	30,95	0,86	22,39	0,38
Atemzugvolumen [ml]			0,25	0,00	0,40	0,02	0,45	0,00	0,80	0,04
Atemminutenvolumen [l/min]			11,01	0,44	14,10	0,77	13,98	0,46	17,95	1,19
gastraler Flow [l/min]			1,29	0,00	1,35	0,03	1,77	0,02	9,94	0,28
Pul Comp [l/mbar]	0,02		0,02		0,02		0,02		0,02	
Pul Resist [mbar*l⁻¹*sek]	16,00		16,00		16,00		16,00		16,00	
Umschaltdruck [cm H₂O]	20,00		25,00		30,00		35,00		40,00	
Inspirationsdruck [cm H ₂ O]			24,51	0,14	28,22	0,22	31,71	0,21	35,75	0,33
PEEP [cm H ₂ O]			4,98	0,25	4,45	0,14	3,49	0,10	3,76	0,22
Inspirationsflow [l/sek]			0,54	0,00	0,54	0,00	0,55	0,00	0,55	0,00
Inspirationszeit [sek]			0,56	0,09	0,70	0,00	0,86	0,05	2,82	0,68
Exspirationszeit [sek]			0,82	0,04	1,10	0,00	1,02	0,04	1,20	0,00
Atemfrequenz /min			43,60	2,60	33,33	0,00	31,93	0,78	15,34	3,10
Atemzugvolumen [ml]			0,30	0,05	0,38	0,00	0,47	0,03	1,55	0,37
Atemminutenvolumen [l/min]			13,05	1,37	12,60	0,00	15,03	0,75	22,88	2,05
gastraler Flow [l/min]			1,55	0,04	1,73	0,03	1,71	0,03	14,29	0,00

Tab. 23: Oxylator[®] Typ II automatischer Modus / NIV (Fortsetzung)

	Mittel	SD	Mittel	SD	Mittel	SD	Mittel	SD	Mittel	SD
Pul Comp [l/mbar]	0,10		0,10		0,10		0,10		0,10	
Pul Resist [mbar*l⁻¹*sek]	2,00		2,00		2,00		2,00		2,00	
Umschaltdruck [cm H₂O]	20,00		25,00		30,00		35,00		40,00	
Inspirationsdruck [cm H ₂ O]	17,80	0,59	18,30	0,56						
PEEP [cm H ₂ O]	0,00	0,00	0,00	0,00						
Inspirationsflow [l/sek]	0,46	0,01	0,48	0,00						
Inspirationszeit [sek]	1,88	0,04	1,78	0,08						
Expirationszeit [sek]	3,10	0,10	3,08	0,11						
Atemfrequenz /min	12,05	0,32	12,36	0,44						
Atemzugvolumen [ml]	0,86	0,02	0,86	0,04						
Atemminutenvolumen [l/min]	10,42	0,18	10,59	0,26						
gastraler Flow [l/min]	0,57	0,03	0,58	0,01						
Pul Comp [l/mbar]	0,06		0,06		0,06		0,06		0,06	
Pul Resist [mbar*l⁻¹*sek]	8,00		8,00		8,00		8,00			
Umschaltdruck [cm H₂O]	20,00		25,00		30,00		35,00		40,00	
Inspirationsdruck [cm H ₂ O]	20,65	0,18	24,81	0,23	28,37	0,49	29,48	0,32		
PEEP [cm H ₂ O]	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00		
Inspirationsflow [l/sek]	0,42	0,01	0,47	0,01	0,48	0,00	0,48	0,01		
Inspirationszeit [sek]	1,08	0,04	1,48	0,04	1,90	0,12	2,06	0,11		
Expirationszeit [sek]	3,92	0,08	3,50	0,21	3,12	0,04	2,94	0,11		
Atemfrequenz /min	12,00	0,17	12,07	0,52	11,95	0,20	12,00	0,17		
Atemzugvolumen [ml]	0,45	0,02	0,69	0,02	0,91	0,07	1,00	0,06		
Atemminutenvolumen [l/min]	5,39	0,28	8,32	0,39	10,85	0,62	11,96	0,63		
gastraler Flow [l/min]	0,51	0,02	0,64	0,01	0,69	0,04	0,73	0,02		
Pul Comp [l/mbar]	0,06		0,06		0,06		0,06		0,06	
Pul Resist [mbar*l⁻¹*sek]	16,00		16,00		16,00		16,00		16,00	
Umschaltdruck [cm H₂O]	20,00		25,00		30,00		35,00		40,00	
Inspirationsdruck [cm H ₂ O]	21,16	0,10	24,85	0,25	28,66	0,07	30,65	0,53		
PEEP [cm H ₂ O]	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00		
Inspirationsflow [l/sek]	0,45	0,01	0,46	0,00	0,47	0,01	0,49	0,00		
Inspirationszeit [sek]	0,96	0,05	1,16	0,09	1,76	0,05	1,98	0,08		
Expirationszeit [sek]	4,00	0,07	3,82	0,24	3,24	0,17	2,98	0,04		
Atemfrequenz /min	12,10	0,13	12,07	0,53	12,02	0,47	12,10	0,28		
Atemzugvolumen [ml]	0,43	0,03	0,53	0,04	0,83	0,02	0,97	0,04		
Atemminutenvolumen [l/min]	5,18	0,32	6,44	0,58	10,02	0,30	11,68	0,27		
gastraler Flow [l/min]	0,31	0,02	0,54	0,02	0,67	0,02	0,77	0,03		

Tab. 24: Oxylator[®] Typ I manueller Modus / NIV

	Mittel	SD	Mittel	SD	Mittel	SD	Mittel	SD	Mittel	SD
Pul Comp [l/mbar]	0,02		0,02		0,02		0,02		0,02	
Pul Resist [mbar*l⁻¹*sek]	8,00		8,00		8,00		8,00		8,00	
Umschaltdruck [cm H₂O]	20,00		25,00		30,00		35,00		40,00	
Inspirationsdruck [cm H ₂ O]	20,55	0,43	24,77	0,17	29,20	0,45	33,16	0,21	36,81	0,22
PEEP [cm H ₂ O]	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
Inspirationsflow [l/sek]	0,39	0,00	0,41	0,01	0,42	0,00	0,42	0,01	0,43	0,00
Inspirationszeit [sek]	0,40	0,00	0,54	0,05	0,70	0,10	0,96	0,05	1,90	0,07
Expirationszeit [sek]	4,60	0,07	4,42	0,11	4,30	0,10	4,08	0,13	3,02	0,16
Atemfrequenz /min	12,00	0,17	12,10	0,28	12,01	0,30	11,91	0,27	12,21	0,51
Atemzugvolumen [ml]	0,16	0,00	0,22	0,02	0,29	0,04	0,41	0,02	0,82	0,03
Atemminutenvolumen [l/min]	0,16	0,00	2,70	0,23	3,52	0,46	4,85	0,31	9,97	0,32
gastraler Flow [l/min]	0,27	0,04	0,28	0,01	0,36	0,00	0,51	0,03	2,79	0,10
Pul Comp [l/mbar]	0,02		0,02		0,02		0,02		0,02	
Pul Resist [mbar*l⁻¹*sek]	16,00		16,00		16,00		16,00		16,00	
Umschaltdruck [cm H₂O]	20,00		25,00		30,00		35,00		40,00	
Inspirationsdruck [cm H ₂ O]	20,39	0,37	23,59	0,37	28,48	0,05	32,86	0,13	34,63	0,37
PEEP [cm H ₂ O]	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
Inspirationsflow [l/sek]	0,37	0,00	0,39	0,00	0,42	0,05	0,42	0,01	0,45	0,01
Inspirationszeit [sek]	0,40	0,00	0,42	0,04	0,64	0,05	0,86	0,05	1,56	0,05
Expirationszeit [sek]	4,64	0,11	4,58	0,19	4,32	0,08	4,18	0,11	3,46	0,05
Atemfrequenz /min	11,91	0,27	12,01	0,44	12,10	0,13	11,91	0,27	11,95	0,11
Atemzugvolumen [ml]	0,15	0,00	0,16	0,02	0,27	0,03	0,36	0,02	0,70	0,03
Atemminutenvolumen [l/min]	1,75	0,03	1,96	0,19	3,27	0,31	4,34	0,21	8,32	0,30
gastraler Flow [l/min]	0,23	0,01	0,38	0,02	0,39	0,02	0,52	0,01	3,00	0,10

Tab. 24: Oxylator[®] Typ I manueller Modus / NIV (Fortsetzung)

	Mittel	SD	Mittel	SD	Mittel	SD	Mittel	SD	Mittel	SD
Pul Comp [l/mbar]	0,10		0,10		0,10		0,10		0,10	
Pul Resist [mbar*l⁻¹*sek]	2,00		2,00		2,00		2,00		2,00	2,00
analog Umschaltdruck [cm H₂O]	20,00		25,00		30,00		35,00		40,00	
Inspirationsdruck [cm H ₂ O]	19,21	0,05	22,31	0,07	26,32	0,13	32,02	0,08	32,16	0,59
PEEP [cm H ₂ O]	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
Inspirationsflow [l/sek]	0,48	0,00	0,70	0,00	0,74	0,01	0,77	0,00	0,80	0,00
Inspirationszeit [sek]	2,76	0,05	2,18	0,04	2,78	0,04	3,70	0,00	4,10	0,00
Expirationszeit [sek]	4,78	0,04	3,86	0,05	4,26	0,05	6,38	0,05	8,00	0,00
Atemfrequenz /min	7,96	0,06	9,93	0,09	8,52	0,07	5,96	0,03	4,96	0,00
Atemzugvolumen [ml]	1,32	0,03	1,52	0,03	2,05	0,03	2,85	0,00	3,28	0,00
Atemminutenvolumen [l/min]	10,54	0,17	15,12	0,25	17,44	0,25	16,97	0,08	16,26	0,00
gastraler Flow [l/min]	0,43	0,00	0,61	0,01	0,78	0,02	0,68	0,07	3,36	0,05
Pul Comp [l/mbar]	0,06		0,06		0,06		0,06		0,06	
Pul Resist [mbar*l⁻¹*sek]	8,00		8,00		8,00		8,00		8,00	
analog Umschaltdruck [cm H₂O]	20,00		25,00		30,00		35,00		40,00	
Inspirationsdruck [cm H ₂ O]	19,00	0,08	24,14	0,09	27,27	0,15	33,16	0,11	31,22	0,50
PEEP [cm H ₂ O]	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
Inspirationsflow [l/sek]	0,43	0,00	0,66	0,01	0,67	0,00	0,72	0,00	0,88	0,01
Inspirationszeit [sek]	1,42	0,04	1,00	0,00	1,36	0,05	1,80	0,00	1,74	0,11
Expirationszeit [sek]	2,60	0,00	1,90	0,00	2,42	0,04	3,22	0,04	3,76	0,11
Atemfrequenz /min	14,93	0,16	20,69	0,00	15,87	0,19	11,95	0,11	10,91	0,28
Atemzugvolumen [ml]	0,61	0,02	0,66	0,01	0,91	0,03	1,30	0,00	1,53	0,10
Atemminutenvolumen [l/min]	9,11	0,18	13,57	0,11	14,42	0,47	15,49	0,14	16,70	0,88
gastraler Flow [l/min]	0,47	0,00	0,60	0,01	0,63	0,00	0,79	0,00	4,63	0,27
Pul Comp [l/mbar]	0,06		0,06		0,06		0,06		0,06	
Pul Resist [mbar*l⁻¹*sek]	16,00		16,00		16,00		16,00		16,00	
analog Umschaltdruck [cm H₂O]	20,00		25,00		30,00		35,00		40,00	
Inspirationsdruck [cm H ₂ O]	18,31	0,10	22,23	0,43	28,83	0,08	33,33	0,19	33,74	0,80
PEEP [cm H ₂ O]	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
Inspirationsflow [l/sek]	0,41	0,00	0,49	0,00	0,69	0,00	0,68	0,00	0,88	0,00
Inspirationszeit [sek]	1,20	0,00	1,30	0,10	1,00	0,00	1,58	0,04	1,82	0,04
Expirationszeit [sek]	2,14	0,05	2,48	0,08	1,90	0,00	2,74	0,05	3,68	0,05
Atemfrequenz /min	17,97	0,29	15,89	0,55	20,69	0,00	13,89	0,14	10,91	0,16
Atemzugvolumen [ml]	0,49	0,01	0,64	0,05	0,69	0,00	1,07	0,03	1,60	0,04
Atemminutenvolumen [l/min]	8,88	0,11	10,10	0,55	14,23	0,09	14,88	0,39	17,52	0,30
gastraler Flow [l/min]	0,49	0,00	0,60	0,55	0,71	0,00	0,80	0,01	5,65	0,23

Tab. 25: Medumat[®] in Analogeinstellung automatischer Modus / NIV

	Mittel	SD	Mittel	SD	Mittel	SD	Mittel	SD	Mittel	SD
Pul Comp [l/mbar]	0,02		0,02		0,02		0,02		0,02	
Pul Resist [mbar*l⁻¹*sek]	8,00		8,00		8,00		8,00		8,00	
analog Umschaltdruck [cm H₂O]	20,00		25,00		30,00		35,00		40,00	
Inspirationsdruck [cm H ₂ O]	17,52	0,03	25,87	0,33	28,88	0,22	33,59	0,49	36,46	0,79
PEEP [cm H ₂ O]		0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
Inspirationsflow [l/sek]	0,42	0,00	0,63	0,00	0,70	0,01	0,73	0,01	0,87	0,00
Inspirationszeit [sek]	0,60	0,00	0,50	0,00	0,50	0,00	0,70	0,00	0,94	0,05
Expirationszeit [sek]	1,00	0,00	1,00	0,00	1,10	0,00	1,20	0,00	1,72	0,04
Atemfrequenz /min	37,50	0,00	40,00	0,00	37,50	0,00	31,58	0,00	22,56	0,47
Atemzugvolumen [ml]	0,25	0,00	0,31	0,00	0,35	0,00	0,51	0,00	0,82	0,05
Atemminutenvolumen [l/min]	9,45	0,00	12,56	0,09	13,05	0,10	16,05	0,12	18,44	0,86
gastraler Flow [l/min]	0,49	0,00	0,67	0,01	0,75	0,01	0,96	0,00	5,44	0,13
Pul Comp [l/mbar]	0,02		0,02		0,02		0,02		0,02	
Pul Resist [mbar*l⁻¹*sek]	16,00		16,00		16,00		16,00		16,00	
analog Umschaltdruck [cm H₂O]	20,00		25,00		30,00		35,00		40,00	
Inspirationsdruck [cm H ₂ O]	18,93	0,23	22,66	0,20	29,43	0,04	33,55	0,22	35,12	0,57
PEEP [cm H ₂ O]	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
Inspirationsflow [l/sek]	0,45	0,00	0,45	0,01	0,64	0,00	0,64	0,00	0,94	0,01
Inspirationszeit [sek]	0,50	0,00	0,62	0,04	0,48	0,04	0,68	0,04	0,74	0,13
Expirationszeit [sek]	1,00	0,00	1,24	0,05	1,12	0,04	1,28	0,04	2,20	0,14
Atemfrequenz /min	40,00	0,00	32,28	0,96	37,56	1,67	30,63	0,86	20,50	1,55
Atemzugvolumen [ml]	0,23	0,00	0,28	0,02	0,31	0,03	0,44	0,03	0,69	0,13
Atemminutenvolumen [l/min]	9,00	0,00	9,08	0,51	11,47	0,75	13,36	0,75	14,09	2,00
gastraler Flow [l/min]	0,65	0,01	0,72	0,00	0,85	0,00	1,01	0,01	5,52	0,44

Tab. 25: Medumat[®] in Analogeinstellung automatischer Modus / NIV (Fortsetzung)

	Mittel	SD	Mittel	SD	Mittel	SD	Mittel	SD	Mittel	SD
Pul Comp [l/mbar]	0,10		0,10		0,10		0,10		0,10	
Pul Resist [mbar*l⁻¹*sek]	2,00		2,00		2,00		2,00		2,00	
analog Umschaltdruck [cm H₂O]	20,00		25,00		30,00		35,00		40,00	
Inspirationsdruck [cm H ₂ O]	17,56	0,24								
PEEP [cm H ₂ O]	0,00	0,00								
Inspirationsflow [l/sek]	0,51	0,01								
Inspirationszeit [sek]	1,80	0,07								
Expirationszeit [sek]	3,24	0,05								
Atemfrequenz /min	11,91	0,21								
Atemzugvolumen [ml]	0,91	0,04								
Atemminutenvolumen [l/min]	10,84	0,29								
gastraler Flow [l/min]	0,37	0,02								
Pul Comp [l/mbar]	0,06		0,06		0,06		0,06		0,06	
Pul Resist [mbar*l⁻¹*sek]	8,00		8,00		8,00		8,00			
analog Umschaltdruck [cm H₂O]	20,00		25,00		30,00		35,00		40,00	
Inspirationsdruck [cm H ₂ O]	14,95	0,26	20,07	0,09	28,13	0,09				
PEEP [cm H ₂ O]	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00				
Inspirationsflow [l/sek]	0,22	0,00	0,35	0,00	0,49	0,01				
Inspirationszeit [sek]	1,82	0,04	1,82	0,04	1,82	0,04				
Expirationszeit [sek]	3,20	0,00	3,20	0,00	2,96	0,05				
Atemfrequenz /min	11,95	0,11	11,95	0,11	12,55	0,12				
Atemzugvolumen [ml]	0,40	0,02	0,64	0,02	0,90	0,02				
Atemminutenvolumen [l/min]	4,83	0,17	7,66	0,13	11,29	0,27				
gastraler Flow [l/min]	0,37	0,02	0,39	0,02	0,53	0,01				
Pul Comp [l/mbar]	0,06		0,06		0,06		0,06		0,06	
Pul Resist [mbar*l⁻¹*sek]	16,00		16,00		16,00		16,00		16,00	
analog Umschaltdruck [cm H₂O]	20,00		25,00		30,00		35,00		40,00	
Inspirationsdruck [cm H ₂ O]	14,54	0,07	16,86	0,08	23,38	0,05	27,49	0,27		
PEEP [cm H ₂ O]	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00		
Inspirationsflow [l/sek]	0,20	0,01	0,25	0,01	0,37	0,01	0,45	0,00		
Inspirationszeit [sek]	1,80	0,00	1,80	0,00	2,00	0,00	1,96	0,05		
Expirationszeit [sek]	3,22	0,04	3,20	0,00	3,20	0,00	3,18	0,04		
Atemfrequenz /min	11,95	0,11	12,00	0,00	11,54	0,00	11,68	0,21		
Atemzugvolumen [ml]	0,35	0,01	0,44	0,01	0,74	0,01	0,88	0,21		
Atemminutenvolumen [l/min]	4,22	0,11	5,31	0,12	8,54	0,16	10,25	0,14		
gastraler Flow [l/min]	0,35	0,00	0,41	0,01	0,47	0,16	0,59	0,02		

Tab. 26: Medumat[®] in Analogeinstellung manueller Modus / NIV

	Mittel	SD	Mittel	SD	Mittel	SD	Mittel	SD	Mittel	SD
Pul Comp [l/mbar]	0,02		0,02		0,02		0,02		0,02	
Pul Resist [mbar*l⁻¹*sek]	8,00		8,00		8,00		8,00		8,00	
analog Umschaltdruck [cm H₂O]	20,00		25,00		30,00		35,00		40,00	
Inspirationsdruck [cm H ₂ O]	13,70	0,24	17,09	0,08	20,68	0,10	24,59	0,13	36,52	0,37
PEEP [cm H ₂ O]	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
Inspirationsflow [l/sek]	0,08	0,00	0,11	0,01	0,14	0,00	0,19	0,00	0,42	0,01
Inspirationszeit [sek]	1,78	0,04	1,80	0,00	1,80	0,00	1,76	0,05	1,82	0,04
Expirationszeit [sek]	3,24	0,05	3,18	0,11	3,22	0,04	3,26	0,05	2,94	0,05
Atemfrequenz /min	11,95	0,11	12,05	0,27	11,95	0,11	11,95	0,11	12,61	0,15
Atemzugvolumen [ml]	0,13	0,00	0,20	0,02	0,25	0,01	0,34	0,01	0,76	0,03
Atemminutenvolumen [l/min]	1,60	0,04	2,43	0,17	2,97	0,12	4,04	0,10	9,59	0,41
gastraler Flow [l/min]	0,38	0,00	0,54	0,03	0,58	0,00	4,04	0,10	4,35	0,11
Pul Comp [l/mbar]	0,02		0,02		0,02		0,02		0,02	
Pul Resist [mbar*l⁻¹*sek]	16,00		16,00		16,00		16,00		16,00	
analog Umschaltdruck [cm H₂O]	20,00		25,00		30,00		35,00		40,00	
Inspirationsdruck [cm H ₂ O]	15,73	0,07	18,58	0,17	23,24	0,14	28,06	0,33	37,86	1,65
PEEP [cm H ₂ O]	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
Inspirationsflow [l/sek]	0,09	0,00	0,12	0,01	0,15	0,00	0,20	0,00	0,47	0,01
Inspirationszeit [sek]	1,60	0,00	1,74	0,05	1,78	0,11	1,82	0,08	1,72	0,08
Expirationszeit [sek]	3,04	0,05	3,26	0,05	3,00	0,12	2,96	0,05	3,28	0,04
Atemfrequenz /min	12,93	0,15	12,00	0,17	12,55	0,12	12,55	0,12	12,05	0,20
Atemzugvolumen [ml]	0,15	0,01	0,22	0,01	0,26	0,01	0,36	0,02	0,80	0,03
Atemminutenvolumen [l/min]	1,90	0,08	2,59	0,10	3,30	0,18	4,57	0,18	9,62	0,25
gastraler Flow [l/min]	0,42	0,00	0,41	0,02	0,57	0,01	0,64	0,01	4,70	0,10

Tab. 26: Medumat[®] in Analogeinstellung manueller Modus / NIV (Fortsetzung)

Versuchsaufbau	NIV				IV				
	Mittel	SD	Mittel	SD		Mittel	SD	Mittel	SD
Pul Comp [l/mbar]	0,10		0,10			0,10		0,10	
Pul Resist [mbar*l⁻¹*sek]	2,00		2,00			2,00		2,00	
Inspirationsdruck [cm H ₂ O]	11,23	0,02	17,63	0,04		11,22	0,04	18,42	0,11
PEEP [cm H ₂ O]	0,00	0,00	0,00	0,00		0,00	0,00	0,00	0,00
Inspirationsflow [l/sek]	0,29	0,00	0,57	0,01		0,27	0,00	0,50	0,00
Inspirationszeit [sek]	1,70	0,00	1,80	0,04		1,60	0,00	1,80	0,00
Expirationszeit [sek]	2,96	0,02	3,21	0,02		3,06	0,05	3,22	0,04
Atemfrequenz /min	12,88	0,06	11,98	0,13		12,88	0,15	11,95	0,11
Atemzugvolumen [ml]	0,49	0,01	1,03	0,02		0,43	0,00	0,90	0,00
Atemminutenvolumen [l/min]	6,30	0,13	12,29	0,16		5,56	0,07	10,76	0,09
gastraler Flow [l/min]	0,34	0,01	0,45	0,02					
Pul Comp [l/mbar]	0,06		0,06			0,06		0,06	
Pul Resist [mbar*l⁻¹*sek]	8,00		8,00			8,00		8,00	
Inspirationsdruck [cm H ₂ O]	15,02	0,02	26,29	0,05		15,38	0,02	28,57	0,14
PEEP [cm H ₂ O]	0,00	0,00	0,00	0,00		0,00	0,00	0,00	0,00
Inspirationsflow [l/sek]	0,28	0,00	0,55	0,00		0,27	0,00	0,49	0,00
Inspirationszeit [sek]	1,67	0,03	1,81	0,02		1,70	0,07	1,80	0,00
Expirationszeit [sek]	2,98	0,03	3,20	0,00		2,96	0,05	3,20	0,00
Atemfrequenz /min	12,90	0,00	11,98	0,05		12,88	0,15	12,00	0,00
Atemzugvolumen [ml]	0,46	0,01	0,99	0,02		0,46	0,02	0,88	0,00
Atemminutenvolumen [l/min]	5,99	0,16	11,88	0,15		5,87	0,24	10,58	0,00
gastraler Flow [l/min]	0,37	0,01	0,52	0,02					
Pul Comp [l/mbar]	0,06		0,06			0,06		0,06	
Pul Resist [mbar*l⁻¹*sek]	16,00		16,00			16,00		16,00	
Inspirationsdruck [cm H ₂ O]	15,66	0,04	27,30	0,42		16,05	0,07	31,44	0,25
PEEP [cm H ₂ O]	0,00	0,00	0,00	0,00		0,00	0,00	0,00	0,00
Inspirationsflow [l/sek]	0,28	0,00	0,50	0,00		0,27	0,00	0,49	0,00
Inspirationszeit [sek]	1,69	0,02	1,99	0,02		1,70	0,00	1,82	0,04
Expirationszeit [sek]	2,98	0,04	3,20	0,00		2,94	0,05	3,20	0,00
Atemfrequenz /min	12,85	0,08	11,56	0,05		12,93	0,15	11,95	0,11
Atemzugvolumen [ml]	0,47	0,01	1,00	0,01		0,46	0,00	0,89	0,02
Atemminutenvolumen [l/min]	6,08	0,11	11,50	0,08		5,94	0,07	10,66	0,16
gastraler Flow [l/min]	0,40	0,01	0,57	0,02					

Tab. 27: Medumat[®] mit Standardeinstellungen

Versuchsaufbau	NIV				IV				
	Mittel	SD	Mittel	SD		Mittel	SD	Mittel	SD
Pul Comp [l/mbar]	0,02		0,02			0,02		0,02	
Pul Resist [mbar*l⁻¹*sek]	8,00		8,00			8,00		8,00	
Inspirationsdruck [cm H ₂ O]	26,49	0,15	34,41	0,47		29,52	0,23	62,08	0,41
PEEP [cm H ₂ O]	0,00	0,00	0,00	0,00		0,00	0,00	0,00	0,00
Inspirationsflow [l/sek]	0,27	0,00	0,60	0,05		0,25	0,00	0,44	0,01
Inspirationszeit [sek]	1,79	0,02	1,64	0,14		1,82	0,04	1,84	0,05
Expirationszeit [sek]	2,99	0,02	3,35	0,09		2,96	0,05	3,18	0,04
Atemfrequenz /min	12,55	0,07	12,05	0,43		12,55	0,12	11,95	0,11
Atemzugvolumen [ml]	0,49	0,01	0,99	0,16		0,46	0,02	0,82	0,03
Atemminutenvolumen [l/min]	6,11	0,15	11,88	1,61		5,76	0,24	9,76	0,31
gastraler Flow [l/min]	0,63	0,02	5,00	0,36					
Pul Comp [l/mbar]	0,02		0,02			0,02		0,02	
Pul Resist [mbar*l⁻¹*sek]	16,00		16,00			16,00		16,00	
Inspirationsdruck [cm H ₂ O]	26,73	0,15	34,06	0,67		30,09	0,14	65,22	0,52
PEEP [cm H ₂ O]	0,00	0,00	0,00	0,00		0,00	0,00	0,00	0,00
Inspirationsflow [l/sek]	0,27	0,00	0,51	0,02		0,24	0,00	0,44	0,00
Inspirationszeit [sek]	1,79	0,02	1,63	0,19		1,80	0,07	1,82	0,08
Expirationszeit [sek]	2,98	0,03	3,36	0,20		2,96	0,05	3,20	0,07
Atemfrequenz /min	12,58	0,07	12,02	0,11		12,61	0,15	11,95	0,11
Atemzugvolumen [ml]	0,48	0,01	0,83	0,12		0,43	0,02	0,80	0,04
Atemminutenvolumen [l/min]	6,04	0,16	10,01	1,40		5,44	0,18	9,57	0,40
gastraler Flow [l/min]	0,76	0,02	5,41	0,37					

Tab. 27: Medumat[®] mit Standardeinstellungen (Fortsetzung)

Versuchsaufbau	NIV					IV				
	Mittel	SD	Mittel	SD		Mittel	SD	Mittel	SD	
Pul Comp [l/mbar]	0,10		0,10			0,10		0,10		
Pul Resist [mbar*l⁻¹*sek]	2,00		2,00			2,00		2,00		
Inspirationsdruck [cm H ₂ O]	11,61	0,25	15,74			13,02	0,26	17,56	0,92	
PEEP [cm H ₂ O]	0,00	0,00	0,80			0,00	0,00	0,52	0,27	
Inspirationsflow [l/sek]	0,43	0,01	0,49			0,38	0,01	0,49	0,01	
Inspirationszeit [sek]	1,14	0,05	2,08			1,27	0,09	1,96	0,19	
Expirationszeit [sek]	3,72	0,24	2,76			3,77	0,27	3,03	0,18	
Atemfrequenz /min	12,36	0,50	12,41			11,95	0,86	12,05	0,61	
Atemzugvolumen [ml]	0,49	0,01	1,03			0,49	0,04	0,97	0,09	
Atemminutenvolumen [l/min]	6,03	0,35	12,74			5,81	0,37	11,63	0,69	
gastaler Flow [l/min]	0,24	0,01	0,49							
Pul Comp [l/mbar]	0,06		0,06			0,06		0,06		
Pul Resist [mbar*l⁻¹*sek]	8,00		8,00			8,00		8,00		
Inspirationsdruck [cm H ₂ O]	14,82	0,38	22,33	0,35		17,73	0,24	25,82	0,78	
PEEP [cm H ₂ O]	0,00	0,00	0,83	0,33		0,00	0,00	0,49	0,08	
Inspirationsflow [l/sek]	0,36	0,02	0,43	0,01		0,34	0,01	0,50	0,01	
Inspirationszeit [sek]	1,38	0,04	2,46	0,17		1,26	0,10	1,99	0,11	
Expirationszeit [sek]	3,56	0,25	2,60	0,07		3,72	0,10	2,98	0,10	
Atemfrequenz /min	12,17	0,62	11,87	0,42		12,05	0,28	12,08	0,41	
Atemzugvolumen [ml]	0,50	0,02	1,06	0,05		0,43	0,03	1,00	0,07	
Atemminutenvolumen [l/min]	6,07	0,31	12,53	0,39		5,13	0,35	12,11	0,52	
gastaler Flow [l/min]	0,34	0,00	0,72	0,01						
Pul Comp [l/mbar]	0,06		0,06			0,06		0,06		
Pul Resist [mbar*l⁻¹*sek]	16,00		16,00			16,00		16,00		
Inspirationsdruck [cm H ₂ O]	15,93	0,93	25,86	0,87		20,71	1,46	30,64	1,22	
PEEP [cm H ₂ O]	0,00	0,00	0,70	0,16		0,00	0,00	0,59	0,11	
Inspirationsflow [l/sek]	0,35	0,01	0,49	0,01		0,43	0,01	0,50	0,01	
Inspirationszeit [sek]	1,42	0,13	2,18	0,11		1,09	0,11	1,80	0,08	
Expirationszeit [sek]	3,36	0,32	2,90	0,32		3,96	0,17	3,22	0,06	
Atemfrequenz /min	12,59	0,77	11,86	0,84		11,89	0,34	11,96	0,22	
Atemzugvolumen [ml]	0,49	0,04	1,06	0,05		0,47	0,05	0,89	0,04	
Atemminutenvolumen [l/min]	6,18	0,65	12,55	0,77		5,57	0,58	10,67	0,39	
gastaler Flow [l/min]	0,38	0,01	0,82	0,02						

Tab. 28: Smart Bag[®] mit Standardzielsetzung

Versuchsaufbau	NIV					IV				
	Mittel	SD	Mittel	SD			Mittel	SD	Mittel	SD
Pul Comp [l/mbar]	0,02		0,02				0,02		0,02	
Pul Resist [mbar*l⁻¹*sek]	8,00		8,00				8,00		8,00	
Inspirationsdruck [cm H ₂ O]	25,38	0,49	35,17	0,24			31,36	1,23	54,59	1,06
PEEP [cm H ₂ O]	0,00	0,00	0,26	0,27			0,00	0,00	0,97	0,04
Inspirationsflow [l/sek]	0,27	0,02	0,33	0,01			0,28	0,01	0,33	0,01
Inspirationszeit [sek]	1,90	0,25	3,04	0,21			1,46	0,20	2,28	0,10
Expirationszeit [sek]	3,10	0,29	2,04	0,30			3,43	0,15	2,59	0,22
Atemfrequenz /min	12,04	0,76	11,83	0,55			12,29	0,44	12,35	0,66
Atemzugvolumen [ml]	0,51	0,04	1,01	0,08			0,41	0,07	0,76	0,04
Atemminutenvolumen [l/min]	6,18	0,57	11,94	1,05			5,05	0,69	9,39	0,43
gastaler Flow [l/min]	0,59	0,02	4,62	0,06						
Pul Comp [l/mbar]	0,02		0,02				0,02		0,02	
Pul Resist [mbar*l⁻¹*sek]	16,00		16,00				16,00		16,00	
Inspirationsdruck [cm H ₂ O]	24,88	0,80	35,81	0,22			31,87	6,04	55,01	0,48
PEEP [cm H ₂ O]	0,00	0,00	0,40	0,09			0,00	0,00	0,69	0,19
Inspirationsflow [l/sek]	0,29	0,01	0,37	0,02			0,35	0,01	0,37	0,02
Inspirationszeit [sek]	1,80	0,19	2,72	0,15			1,46	0,15	2,35	0,12
Expirationszeit [sek]	3,32	0,25	2,08	0,08			3,64	0,10	2,57	0,08
Atemfrequenz /min	11,74	0,52	12,52	0,56			11,78	0,44	12,20	0,30
Atemzugvolumen [ml]	0,52	0,04	1,01	0,09			0,51	0,06	0,86	0,06
Atemminutenvolumen [l/min]	6,15	0,49	12,57	0,67			6,04	0,56	10,48	0,60
gastaler Flow [l/min]	0,81	0,02	4,55	0,12						

Tab. 28: Smart Bag[®] mit Standardzielsetzung (Fortsetzung)

Versuchsaufbau	NIV				IV				
	Mittel	SD	Mittel	SD		Mittel	SD	Mittel	SD
Pul Comp [l/mbar]	0,10		0,10			0,10		0,10	
Pul Resist [mbar*l⁻¹*sek]	2,00		2,00			2,00		2,00	
Inspirationsdruck [cm H ₂ O]	11,73	0,35	17,28	0,70		13,80	0,35	18,03	1,10
PEEP [cm H ₂ O]	0,00	0,00	0,00	0,00		0,00	0,00	0,00	0,00
Inspirationsflow [l/sek]	0,40	0,01	0,67	0,02		0,43	0,01	0,48	0,01
Inspirationszeit [sek]	1,30	0,09	1,56	0,09		1,22	0,07	1,87	0,13
Expirationszeit [sek]	3,52	0,16	3,46	0,09		3,85	0,18	3,09	0,16
Atemfrequenz /min	12,47	0,55	11,96	0,31		11,84	0,37	12,10	0,26
Atemzugvolumen [ml]	0,53	0,05	1,05	0,09		0,53	0,03	0,89	0,06
Atemminutenvolumen [l/min]	0,53	0,55	12,57	0,86		6,27	0,45	0,89	0,77
gastraler Flow [l/min]	0,18	0,02	0,38	0,02					
Pul Comp [l/mbar]	0,06		0,06			0,06		0,06	
Pul Resist [mbar*l⁻¹*sek]	8,00		8,00			8,00		8,00	
Inspirationsdruck [cm H ₂ O]	15,98	0,33	23,62	1,14		20,45	0,75	25,22	0,25
PEEP [cm H ₂ O]	0,00	0,00	0,00	0,00		0,00	0,00	0,00	0,00
Inspirationsflow [l/sek]	0,37	0,03	0,49	0,01		0,44	0,01	0,51	0,01
Inspirationszeit [sek]	1,32	0,13	2,18	0,28		1,10	0,05	2,02	0,06
Expirationszeit [sek]	3,46	0,34	2,78	0,13		3,91	0,04	3,05	0,14
Atemfrequenz /min	12,58	0,73	12,13	0,71		11,98	0,20	11,85	0,43
Atemzugvolumen [ml]	0,49	0,05	1,07	0,15		0,48	0,03	1,02	0,03
Atemminutenvolumen [l/min]	6,16	0,97	12,89	1,10		5,80	0,24	1,02	0,32
gastraler Flow [l/min]	0,23	0,02	0,62	0,02					
Pul Comp [l/mbar]	0,06		0,06			0,06		0,06	
Pul Resist [mbar*l⁻¹*sek]	16,00		16,00			16,00		16,00	
Inspirationsdruck [cm H ₂ O]	17,32	1,14	26,73	1,11		19,84	0,41	28,55	1,18
PEEP [cm H ₂ O]	0,00	0,00	0,00	0,00		0,00	0,00	0,00	0,00
Inspirationsflow [l/sek]	0,37	0,02	0,51	0,01		0,40	0,01	0,45	0,01
Inspirationszeit [sek]	1,24	0,13	2,08	0,16		1,20	0,22	2,18	0,08
Expirationszeit [sek]	3,58	0,36	2,92	0,13		3,74	0,18	2,91	0,19
Atemfrequenz /min	12,51	0,98	12,02	0,61		12,16	0,38	11,80	0,41
Atemzugvolumen [ml]	0,46	0,06	1,05	0,07		0,47	0,07	0,98	0,02
Atemminutenvolumen [l/min]	5,78	0,88	12,62	0,46		5,74	0,80	11,57	0,52
gastraler Flow [l/min]	0,29	0,01	0,67	0,02					

Tab. 29: Ambu[®] Mark III[®] mit Standardzielsetzung

Versuchsaufbau	NIV					IV				
	Mittel	SD	Mittel	SD		Mittel	SD	Mittel	SD	
Pul Comp [l/mbar]	0,02		0,02			0,02		0,02		
Pul Resist [mbar*l⁻¹*sek]	8,00		8,00			8,00		8,00		
Inspirationsdruck [cm H ₂ O]	25,14	0,72	35,38	0,23		30,84	0,86	53,89	0,95	
PEEP [cm H ₂ O]	0,00	0,00	0,00	0,00		0,00	0,00	0,00	0,00	
Inspirationsflow [l/sek]	0,28	0,02	0,43	0,02		0,31	0,01	0,41	0,01	
Inspirationszeit [sek]	1,96	0,15	2,50	0,19		1,38	0,10	2,04	0,13	
Expirationszeit [sek]	3,02	0,40	2,68	0,36		3,70	0,17	2,92	0,17	
Atemfrequenz /min	12,13	1,10	11,66	1,07		11,83	0,53	12,11	0,49	
Atemzugvolumen [ml]	0,56	0,05	1,08	0,09		0,43	0,03	0,84	0,05	
Atemminutenvolumen [l/min]	6,72	0,59	12,60	0,89		5,08	0,29	10,21	0,42	
gastraler Flow [l/min]	0,56	0,02	4,59	0,04						
Pul Comp [l/mbar]	0,02		0,02			0,02		0,02		
Pul Resist [mbar*l⁻¹*sek]	16,00		16,00			16,00		16,00		
Inspirationsdruck [cm H ₂ O]	25,27	0,53	35,79	0,36		31,71	1,54	54,83	1,01	
PEEP [cm H ₂ O]	0,00	0,00	0,00	0,00		0,00	0,00	0,00	0,00	
Inspirationsflow [l/sek]	0,28	0,02	0,40	0,02		0,30	0,01	0,37	0,01	
Inspirationszeit [sek]	1,80	0,25	2,64	0,15		1,46	0,05	2,38	0,10	
Expirationszeit [sek]	3,50	0,16	2,34	0,30		3,64	0,15	2,82	0,13	
Atemfrequenz /min	11,37	0,84	12,11	0,94		11,77	0,37	11,54	0,26	
Atemzugvolumen [ml]	0,50	0,08	1,06	0,09		0,44	0,02	0,88	0,03	
Atemminutenvolumen [l/min]	5,64	0,66	12,75	0,93		5,23	0,20	10,16	0,50	
gastraler Flow [l/min]	0,71	0,02	4,55	0,08						

Tab. 29: Ambu[®] Mark III[®] mit Standardzielsetzung (Fortsetzung)

	Mittel	SD	Mittel	SD	Mittel	SD	Mittel	SD	Mittel	SD
Pul Comp [l/mbar]	0,10		0,10		0,10		0,10		0,10	
Pul Resist [mbar*I⁻¹*sek]	2,00		2,00		2,00		2,00		2,00	
analog Umschaltdruck [cm H₂O]	20,00		25,00		30,00		35,00		40,00	
Inspirationsdruck [cm H ₂ O]	19,63	0,04	22,75	0,14	23,85	0,08	23,46	0,02	23,30	0,02
PEEP [cm H ₂ O]	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
Inspirationsflow [l/sek]	0,52	0,00	0,46	0,01	0,49	0,01	0,47	0,00	0,49	0,01
Inspirationszeit [sek]	2,75	0,06	3,62	0,04	3,85	0,10	4,00	0,00	3,95	0,06
Expirationszeit [sek]	5,87	0,06	4,26	0,05	5,27	0,06	7,27	0,06	7,30	0,00
Atemfrequenz /min	6,98	0,00	7,61	0,08	6,57	0,11	5,33	0,03	5,34	0,03
Atemzugvolumen [ml]	1,43	0,03	1,68	0,04	1,90	0,05	1,89	0,02	1,93	0,02
Atemminutenvolumen [l/min]	9,92	0,21	12,79	0,17	12,53	0,22	10,08	0,11	10,29	0,10
gastraler Flow [l/min]	0,45	0,01	0,66	0,01	0,74	0,00	0,83	0,00	1,82	0,04
Pul Comp [l/mbar]	0,06		0,06		0,06		0,06		0,06	
Pul Resist [mbar*I⁻¹*sek]	8,00		8,00		8,00		8,00		8,00	
analog Umschaltdruck [cm H₂O]	20,00		25,00		30,00		35,00		40,00	
Inspirationsdruck [cm H ₂ O]	19,29	0,07	22,76	0,04	25,55	0,11	29,22	0,06	32,92	0,07
PEEP [cm H ₂ O]	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
Inspirationsflow [l/sek]	0,52	0,00	0,51	0,00	0,50	0,00	0,52	0,01	0,53	0,00
Inspirationszeit [sek]	1,10	0,00	1,66	0,05	2,18	0,00	2,64	0,05	3,53	0,06
Expirationszeit [sek]	3,14	0,05	2,14	0,05	2,38	0,04	3,13	0,05	5,90	0,00
Atemfrequenz /min	14,15	0,18	15,79	0,00	13,16	0,16	10,39	0,17	6,35	0,05
Atemzugvolumen [ml]	0,57	0,00	0,84	0,03	1,09	0,03	1,38	0,03	1,87	0,03
Atemminutenvolumen [l/min]	8,10	0,10	13,32	0,52	14,40	0,27	14,39	0,28	11,95	0,15
gastraler Flow [l/min]	0,40	0,00	0,70	0,00	0,70	0,00	0,85	0,00	1,63	0,01
Pul Comp [l/mbar]	0,06		0,06		0,06		0,06		0,06	
Pul Resist [mbar*I⁻¹*sek]	16,00		16,00		16,00		16,00		16,00	
analog Umschaltdruck [cm H₂O]	20,00		25,00		30,00		35,00		40,00	
Inspirationsdruck [cm H ₂ O]	18,75	0,05	23,01	0,13	26,94	0,08	30,59	0,05	33,26	0,15
PEEP [cm H ₂ O]	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
Inspirationsflow [l/sek]	0,46	0,00	0,48	0,01	0,52	0,01	0,53	0,00	0,51	0,00
Inspirationszeit [sek]	0,96	0,05	1,50	0,00	1,90	0,00	2,36	0,05	3,60	0,00
Expirationszeit [sek]	2,44	0,05	3,14	0,05	2,40	0,00	3,50	0,00	8,15	0,07
Atemfrequenz /min	17,65	0,37	12,93	0,15	13,95	0,00	10,24	0,10	5,11	0,03
Atemzugvolumen [ml]	0,44	0,02	0,73	0,01	0,98	0,01	1,25	0,03	1,84	0,00
Atemminutenvolumen [l/min]	7,82	0,34	9,39	0,20	13,68	0,15	12,81	0,18	9,38	0,06
gastraler Flow [l/min]	0,38	0,00	0,54	0,00	0,86	0,00	0,93	0,01	9,38	0,02

Tab. 30: Evita 2, PEEP 0

	Mittel	SD	Mittel	SD	Mittel	SD	Mittel	SD	Mittel	SD
Pul Comp [l/mbar]	0,02		0,02		0,02		0,02		0,02	
Pul Resist [mbar*l⁻¹*sek]	8,00		8,00		8,00		8,00		8,00	
analog Umschaltdruck [cm H₂O]	20,00		25,00		30,00		35,00		40,00	
Inspirationsdruck [cm H ₂ O]	17,17	0,19	20,09	0,24	23,51	0,21	28,15	0,25	32,88	0,06
PEEP [cm H ₂ O]	17,17	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
Inspirationsflow [l/sek]	0,43	0,01	0,45	0,00	0,45	0,00	0,43	0,00	0,45	0,00
Inspirationszeit [sek]	0,50	0,00	0,54	0,05	0,74	0,05	1,00	0,07	1,70	0,10
Exspirationszeit [sek]	1,10	0,00	0,78	0,04	0,82	0,04	1,06	0,05	1,12	0,11
Atemfrequenz /min	37,50	0,00	45,49	1,47	38,50	1,37	29,14	0,78	21,28	0,33
Atemzugvolumen [ml]	0,21	0,00	0,24	0,03	0,33	0,03	0,43	0,03	0,77	0,05
Atemminutenvolumen [l/min]	7,99	0,10	10,99	0,99	12,86	0,79	12,58	0,77	16,28	1,00
gastraler Flow [l/min]	0,46	0,00	0,76	0,00	0,78	0,00	0,88	0,00	5,23	0,14
Pul Comp [l/mbar]	0,02		0,02		0,02		0,02		0,02	
Pul Resist [mbar*l⁻¹*sek]	16,00		16,00		16,00		16,00		16,00	
analog Umschaltdruck [cm H₂O]	20,00		25,00		30,00		35,00		40,00	
Inspirationsdruck [cm H ₂ O]	18,32	0,28	21,90	0,18	25,23	0,16	29,18	0,14	35,66	0,73
PEEP [cm H ₂ O]	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
Inspirationsflow [l/sek]	0,44	0,01	0,48	0,01	0,48	0,00	0,49	0,00	0,45	0,01
Inspirationszeit [sek]	0,42	0,04	0,50	0,00	0,66	0,05	0,80	0,00	3,14	0,05
Exspirationszeit [sek]	0,98	0,04	1,30	0,07	0,96	0,05	1,26	0,05	1,48	0,08
Atemfrequenz /min	42,95	2,18	33,37	1,31	37,12	1,95	29,14	0,78	12,99	0,24
Atemzugvolumen [ml]	0,18	0,02	0,24	0,00	0,32	0,03	0,39	0,00	1,43	0,02
Atemminutenvolumen [l/min]	7,83	0,46	7,94	0,33	11,73	0,65	11,38	0,36	18,52	0,46
gastraler Flow [l/min]	0,58	0,00	0,60	0,00	0,90	0,01	0,92	0,00	14,17	0,57

Tab. 30: Evita 2, PEEP 0 (Fortsetzung)

	Mittel	SD	Mittel	SD	Mittel	SD	Mittel	SD	Mittel	SD
Pul Comp [l/mbar]	0,10		0,10		0,10		0,10		0,10	
Pul Resist [mbar*l⁻¹*sek]	2,00		2,00		2,00		2,00		2,00	
analog Umschaltdruck [cm H₂O]	20,00		25,00		30,00		35,00		40,00	
Inspirationsdruck [cm H ₂ O]	19,93	0,14	22,71	0,04	24,65	0,07	23,32	0,05	23,47	0,04
PEEP [cm H ₂ O]	2,27	0,03	2,16	0,09	2,24	0,07	2,30	0,06	2,01	0,03
Inspirationsflow [l/sek]	0,47	0,00	0,44	0,01	0,46	0,00	0,45	0,01	0,45	0,01
Inspirationszeit [sek]	2,40	0,00	3,60	0,00	3,85	0,06	3,95	0,06	4,00	0,00
Expirationszeit [sek]	6,20	0,00	4,10	0,00	5,30	0,00	7,30	0,00	7,27	0,06
Atemfrequenz /min	6,98	0,00	9,57	3,97	6,57	0,04	5,34	0,03	5,33	0,03
Atemzugvolumen [ml]	1,13	0,00	1,58	0,03	1,77	0,03	1,79	0,02	1,81	0,02
Atemminutenvolumen [l/min]	7,87	0,00	15,09	5,99	11,58	0,10	9,52	0,11	9,59	0,05
gastraler Flow [l/min]	0,55	0,00	0,71	0,01	0,78	0,01	0,87	0,01	1,81	0,01
Pul Comp [l/mbar]	0,06		0,06		0,06		0,06		0,06	
Pul Resist [mbar*l⁻¹*sek]	8,00		8,00		8,00		8,00		8,00	
analog Umschaltdruck [cm H₂O]	20,00		25,00		30,00		35,00		40,00	
Inspirationsdruck [cm H ₂ O]	19,40	0,05	22,88	0,08	25,73	0,13	29,45	0,07	33,04	0,04
PEEP [cm H ₂ O]	2,05	0,15	1,88	0,09	1,79	0,09	2,20	0,09	1,63	0,09
Inspirationsflow [l/sek]	0,49	0,01	0,48	0,01	0,48	0,01	0,49	0,00	0,50	0,00
Inspirationszeit [sek]	1,14	0,05	1,66	0,05	2,14	0,05	2,64	0,05	3,53	0,06
Expirationszeit [sek]	3,10	0,07	2,12	0,04	2,50	0,00	3,15	0,06	5,90	0,00
Atemfrequenz /min	14,15	0,18	15,87	0,19	12,93	0,15	10,39	0,17	6,35	0,05
Atemzugvolumen [ml]	0,56	0,03	0,80	0,02	1,02	0,03	1,29	0,03	1,77	0,03
Atemminutenvolumen [l/min]	7,97	0,42	12,64	0,24	13,17	0,22	13,30	0,16	11,27	0,14
gastraler Flow [l/min]	0,51	0,00	0,78	0,00	0,77	0,00	0,94	0,00	1,72	0,02
Pul Comp [l/mbar]	0,06		0,06		0,06		0,06		0,06	
Pul Resist [mbar*l⁻¹*sek]	16,00		16,00		16,00		16,00		16,00	
analog Umschaltdruck [cm H₂O]	20,00		25,00		30,00		35,00		40,00	
Inspirationsdruck [cm H ₂ O]	18,60	0,14	23,20	0,07	27,11	0,05	30,88	0,03	33,50	0,14
PEEP [cm H ₂ O]	2,17	0,08	2,03	0,11	2,25	0,18	2,53	0,10	2,00	0,16
Inspirationsflow [l/sek]	0,43	0,00	0,45	0,00	0,49	0,01	0,50	0,00	0,48	0,00
Inspirationszeit [sek]	0,98	0,08	1,54	0,05	1,96	0,05	2,36	0,05	3,60	0,00
Expirationszeit [sek]	2,40	0,00	3,14	0,05	2,36	0,05	3,50	0,00	8,10	0,00
Atemfrequenz /min	17,76	0,44	12,82	0,23	13,89	0,14	10,24	0,10	5,13	0,00
Atemzugvolumen [ml]	0,42	0,04	0,69	0,02	0,95	0,02	1,18	0,03	1,73	0,00
Atemminutenvolumen [l/min]	7,44	0,49	8,88	0,22	13,23	0,22	12,03	0,16	8,86	0,00
gastraler Flow [l/min]	0,50	0,00	0,62	0,01	0,94	0,00	1,05	0,01	1,77	0,02

Tab. 31: Evita 2, PEEP 2

	Mittel	SD	Mittel	SD	Mittel	SD	Mittel	SD	Mittel	SD
Pul Comp [l/mbar]	0,02		0,02		0,02		0,02		0,02	
Pul Resist [mbar*l⁻¹*sek]	8,00		8,00		8,00		8,00		8,00	
analog Umschaltdruck [cm H₂O]	20,00		25,00		30,00		35,00		40,00	
Inspirationsdruck [cm H ₂ O]	16,89	0,30	20,51	0,19	23,99	0,18	28,61	0,13	32,90	0,14
PEEP [cm H ₂ O]	1,56	0,06	1,17	0,15	2,27	0,10	1,96	0,04	2,37	0,10
Inspirationsflow [l/sek]	0,37	0,01	0,43	0,01	0,42	0,00	0,41	0,00	0,44	0,01
Inspirationszeit [sek]	0,54	0,05	0,52	0,04	0,72	0,04	1,04	0,05	1,66	0,09
Exspirationszeit [sek]	1,08	0,04	0,80	0,00	0,84	0,09	1,02	0,04	1,16	0,05
Atemfrequenz /min	37,06	0,99	45,49	1,47	38,57	2,40	29,14	0,78	21,29	0,64
Atemzugvolumen [ml]	0,20	0,02	0,23	0,02	0,30	0,02	0,43	0,03	0,72	0,05
Atemminutenvolumen [l/min]	7,48	0,70	10,24	0,47	11,71	0,82	12,48	0,58	15,40	0,69
gastraler Flow [l/min]	0,58	0,00	0,84	0,00	0,89	0,01	1,00	0,01	5,73	0,06
Pul Comp [l/mbar]	0,02		0,02		0,02		0,02		0,02	
Pul Resist [mbar*l⁻¹*sek]	16,00		16,00		16,00		16,00		16,00	
analog Umschaltdruck [cm H₂O]	20,00		25,00		30,00		35,00		40,00	
Inspirationsdruck [cm H ₂ O]	18,80	0,19	22,49	0,26	25,74	0,12	29,45	0,19	37,37	0,63
PEEP [cm H ₂ O]	1,65	0,15	2,37	0,15	2,20	0,11	2,53	0,10	2,16	0,05
Inspirationsflow [l/sek]	0,43	0,00	0,45	0,00	0,45	0,01	0,46	0,01	0,43	0,00
Inspirationszeit [sek]	0,48	0,08	0,56	0,05	0,66	0,05	0,80	0,00	3,34	0,09
Exspirationszeit [sek]	0,90	0,10	1,26	0,05	0,92	0,08	1,24	0,05	1,28	0,08
Atemfrequenz /min	43,52	1,47	32,98	0,78	38,06	1,99	29,43	0,78	13,00	0,36
Atemzugvolumen [ml]	0,21	0,04	0,25	0,03	0,30	0,03	0,36	0,00	1,44	0,04
Atemminutenvolumen [l/min]	8,99	1,62	8,27	0,81	11,40	1,04	10,74	0,33	18,66	0,35
gastraler Flow [l/min]	0,69	0,01	0,78	0,01	1,02	0,01	1,05	0,01	15,32	0,43

Tab. 31: Evita 2, PEEP 2 (Fortsetzung)

	Mittel	SD	Mittel	SD	Mittel	SD	Mittel	SD	Mittel	SD
Pul Comp [l/mbar]	0,10		0,10		0,10		0,10		0,10	
Pul Resist [mbar*I⁻¹*sek]	2,00		2,00		2,00		2,00		2,00	
analog Umschaltdruck [cm H₂O]	20,00		25,00		30,00		35,00		40,00	
Inspirationsdruck [cm H ₂ O]	19,80	0,12	22,79	0,10	24,21	0,25	23,67	0,09	23,52	0,04
PEEP [cm H ₂ O]	4,24	0,07	3,84	0,02	4,03	0,00	4,51	0,09	4,23	0,01
Inspirationsflow [l/sek]	0,50	0,00	0,46	0,01	0,49	0,01	0,47	0,00	0,48	0,00
Inspirationszeit [sek]	2,42	0,04	3,68	0,04	3,85	0,06	4,00	0,00	4,00	0,00
Expirationszeit [sek]	6,18	0,05	4,00	0,00	5,30	0,00	7,23	0,06	7,27	0,06
Atemfrequenz /min	6,98	0,00	7,82	0,05	6,57	0,04	5,34	0,03	5,33	0,03
Atemzugvolumen [ml]	1,21	0,02	1,71	0,03	1,88	0,02	1,88	0,00	1,91	0,02
Atemminutenvolumen [l/min]	8,50	0,17	13,36	0,23	12,25	0,04	10,04	0,05	10,23	0,05
gastraler Flow [l/min]	0,64	0,00	0,78	0,00	0,86	0,00	0,95	0,00	1,87	0,01
Pul Comp [l/mbar]	0,06		0,06		0,06		0,06		0,06	
Pul Resist [mbar*I⁻¹*sek]	8,00		8,00		8,00		8,00		8,00	
analog Umschaltdruck [cm H₂O]	20,00		25,00		30,00		35,00		40,00	
Inspirationsdruck [cm H ₂ O]	19,52	0,09	23,29	0,05	25,74	0,13	29,76	0,07	33,00	0,11
PEEP [cm H ₂ O]	3,31	0,11	3,57	0,19	3,74	0,07	4,12	0,10	3,94	0,14
Inspirationsflow [l/sek]	0,51	0,01	0,51	0,00	0,51	0,01	0,52	0,01	0,53	0,01
Inspirationszeit [sek]	1,10	0,00	1,70	0,00	2,16	0,09	2,62	0,04	3,53	0,06
Expirationszeit [sek]	3,12	0,04	2,10	0,00	2,48	0,04	3,15	0,06	5,90	0,00
Atemfrequenz /min	14,22	0,15	15,79	0,00	12,93	0,15	10,39	0,17	6,38	0,00
Atemzugvolumen [ml]	0,56	0,01	0,87	0,00	1,09	0,05	1,35	0,02	1,86	0,04
Atemminutenvolumen [l/min]	7,91	0,09	13,69	0,00	14,13	0,49	14,04	0,13	11,73	0,16
gastraler Flow [l/min]	0,59	0,00	0,86	0,00	0,83	0,01	1,03	0,01	1,82	0,03
Pul Comp [l/mbar]	0,06		0,06		0,06		0,06		0,06	
Pul Resist [mbar*I⁻¹*sek]	16,00		16,00		16,00		16,00		16,00	
analog Umschaltdruck [cm H₂O]	20,00		25,00		30,00		35,00		40,00	
Inspirationsdruck [cm H ₂ O]	19,24	0,06	23,60	0,16	27,58	0,09	31,18	0,02	33,46	0,02
PEEP [cm H ₂ O]	3,79	0,10	4,07	0,07	3,94	0,06	4,33	0,11	4,24	0,16
Inspirationsflow [l/sek]	0,49	0,01	0,48	0,00	0,52	0,01	0,53	0,00	0,51	0,00
Inspirationszeit [sek]	0,84	0,05	1,50	0,00	2,00	0,00	2,32	0,04	3,60	0,00
Expirationszeit [sek]	2,54	0,05	3,14	0,05	2,30	0,00	3,50	0,00	8,35	0,35
Atemfrequenz /min	17,75	0,24	12,93	0,15	13,95	0,00	10,30	0,09	5,02	0,15
Atemzugvolumen [ml]	0,41	0,03	0,72	0,01	1,03	0,01	1,23	0,03	1,84	0,00
Atemminutenvolumen [l/min]	7,25	0,49	9,27	0,18	14,40	0,15	12,63	0,23	9,22	0,27
gastraler Flow [l/min]	0,62	0,00	0,73	0,00	1,05	0,01	1,16	0,05	1,82	0,04

Tab. 32: Evita 2, PEEP 4

	Mittel	SD	Mittel	SD	Mittel	SD	Mittel	SD	Mittel	SD
Pul Comp [l/mbar]	0,02		0,02		0,02		0,02		0,02	
Pul Resist [mbar*l⁻¹*sek]	8,00		8,00		8,00		8,00		8,00	
analog Umschaltdruck [cm H₂O]	20,00		25,00		30,00		35,00		40,00	
Inspirationsdruck [cm H ₂ O]	17,44	0,18	21,00	0,22	24,26	0,27	29,37	0,15	33,16	0,37
PEEP [cm H ₂ O]	3,37	0,19	3,20	0,02	3,81	0,05	3,79	0,08	4,07	0,16
Inspirationsflow [l/sek]	0,40	0,01	0,45	0,01	0,44	0,01	0,47	0,00	0,45	0,01
Inspirationszeit [sek]	0,46	0,05	0,52	0,04	0,76	0,05	0,90	0,00	1,76	0,09
Exspirationszeit [sek]	1,08	0,04	0,80	0,00	0,82	0,04	1,16	0,05	1,08	0,08
Atemfrequenz /min	39,00	1,37	45,49	1,47	38,00	1,12	29,14	0,78	21,15	0,84
Atemzugvolumen [ml]	0,19	0,02	0,23	0,02	0,33	0,02	0,42	0,00	0,80	0,05
Atemminutenvolumen [l/min]	7,22	0,64	10,53	0,59	12,58	0,81	12,38	0,42	16,89	0,81
gastraler Flow [l/min]	0,70	0,00	0,97	0,00	0,98	0,01	1,11	0,01	6,10	0,05
Pul Comp [l/mbar]	0,02		0,02		0,02		0,02		0,02	
Pul Resist [mbar*l⁻¹*sek]	16,00		16,00		16,00		16,00		16,00	
analog Umschaltdruck [cm H₂O]	20,00		25,00		30,00		35,00		40,00	
Inspirationsdruck [cm H ₂ O]	19,30	0,16	22,67	0,37	26,05	0,17	29,74	0,16	35,24	0,29
PEEP [cm H ₂ O]	3,61	0,15	3,97	0,13	3,88	0,10	4,51	0,09	4,20	0,11
Inspirationsflow [l/sek]	0,44	0,00	0,48	0,01	0,49	0,01	0,45	0,00	0,46	0,01
Inspirationszeit [sek]	0,54	0,05	0,62	0,04	0,68	0,04	0,96	0,05	3,24	0,15
Exspirationszeit [sek]	0,88	0,08	1,22	0,04	0,94	0,05	1,10	0,00	1,48	0,04
Atemfrequenz /min	42,37	2,55	32,63	0,96	37,12	1,95	29,14	0,78	12,72	0,44
Atemzugvolumen [ml]	0,24	0,02	0,30	0,02	0,33	0,02	0,43	0,03	1,50	0,06
Atemminutenvolumen [l/min]	10,05	0,98	9,79	0,64	12,24	0,60	12,63	0,45	19,10	0,09
gastraler Flow [l/min]	0,84	0,01	0,92	0,01	1,16	0,01	1,13	0,01	14,86	0,32

Tab. 32: Evita 2, PEEP 4 (Fortsetzung)

	Mittel	SD	Mittel	SD	Mittel	SD	Mittel	SD	Mittel	SD
Pul Comp [l/mbar]	0,10		0,10		0,10		0,10		0,10	
Pul Resist [mbar*I⁻¹*sek]	2,00		2,00		2,00		2,00		2,00	
analog Umschaltdruck [cm H₂O]	20,00		25,00		30,00		35,00		40,00	
Inspirationsdruck [cm H ₂ O]	20,51	0,05	23,09	0,04	24,86	0,07	24,28	0,04	24,07	0,04
PEEP [cm H ₂ O]	6,14	0,05	5,92	0,01	6,53	0,08	5,97	0,04	6,14	0,05
Inspirationsflow [l/sek]	0,50	0,00	0,46	0,00	0,49	0,00	0,47	0,00	0,48	0,01
Inspirationszeit [sek]	2,53	0,05	3,60	0,00	3,90	0,08	4,05	0,06	4,00	0,00
Expirationszeit [sek]	6,07	0,06	4,10	0,00	5,27	0,06	7,20	0,10	7,27	0,06
Atemfrequenz /min	6,98	0,08	7,79	0,00	6,55	0,08	5,33	0,05	5,33	0,03
Atemzugvolumen [ml]	1,26	0,03	1,65	0,02	1,91	0,04	1,90	0,03	1,91	0,02
Atemminutenvolumen [l/min]	8,84	0,12	12,83	0,14	12,51	0,20	10,18	0,13	10,15	0,16
gastraler Flow [l/min]	0,76	0,01	0,87	0,00	0,96	0,00	1,00	0,02	2,01	0,01
Pul Comp [l/mbar]	0,06		0,06		0,06		0,06		0,06	
Pul Resist [mbar*I⁻¹*sek]	8,00		8,00		8,00		8,00		8,00	
analog Umschaltdruck [cm H₂O]	20,00		25,00		30,00		35,00		40,00	
Inspirationsdruck [cm H ₂ O]	19,90	0,09	23,87	0,07	26,80	0,06	30,22	0,22	32,88	0,07
PEEP [cm H ₂ O]	5,30	0,17	5,62	0,02	5,59	0,02	5,56	0,11	5,44	0,07
Inspirationsflow [l/sek]	0,51	0,00	0,51	0,00	0,51	0,00	0,52	0,00	0,53	0,00
Inspirationszeit [sek]	1,18	0,08	1,70	0,00	2,12	0,08	2,64	0,05	3,50	0,00
Expirationszeit [sek]	3,04	0,09	2,10	0,00	2,52	0,04	3,15	0,06	5,90	0,00
Atemfrequenz /min	14,22	0,15	15,79	0,00	12,93	0,25	10,39	0,17	6,38	0,00
Atemzugvolumen [ml]	0,60	0,04	0,87	0,00	1,08	0,04	1,37	0,02	1,86	0,00
Atemminutenvolumen [l/min]	8,52	0,61	13,69	0,00	13,98	0,34	14,18	0,13	11,84	0,00
gastraler Flow [l/min]	0,71	0,00	0,96	0,00	0,94	0,01	1,13	0,01	1,92	0,03
Pul Comp [l/mbar]	0,06		0,06		0,06		0,06		0,06	
Pul Resist [mbar*I⁻¹*sek]	16,00		16,00		16,00		16,00		16,00	
analog Umschaltdruck [cm H₂O]	20,00		25,00		30,00		35,00		40,00	
Inspirationsdruck [cm H ₂ O]	19,59	0,14	24,37	0,11	28,88	0,15	30,89	0,04	33,68	0,20
PEEP [cm H ₂ O]	6,18	0,13	5,87	0,11	6,75	0,02	6,11	0,05	6,14	0,09
Inspirationsflow [l/sek]	0,45	0,01	0,48	0,00	0,52	0,01	0,52	0,00	0,52	0,00
Inspirationszeit [sek]	0,98	0,04	1,50	0,00	1,94	0,05	2,40	0,00	3,50	0,00
Expirationszeit [sek]	2,42	0,04	3,14	0,05	2,38	0,04	3,44	0,05	8,20	0,00
Atemfrequenz /min	17,65	0,00	12,93	0,15	13,89	0,14	10,27	0,10	5,13	0,00
Atemzugvolumen [ml]	0,45	0,02	0,72	0,01	1,00	0,02	1,25	0,00	1,82	0,00
Atemminutenvolumen [l/min]	7,85	0,40	9,27	0,18	13,90	0,19	12,82	0,12	9,33	0,00
gastraler Flow [l/min]	0,75	0,40	0,85	0,00	1,20	0,01	1,27	0,01	1,98	0,03

Tab. 33: Evita 2, PEEP 6

	Mittel	SD	Mittel	SD	Mittel	SD	Mittel	SD	Mittel	SD
Pul Comp [l/mbar]	0,02		0,02		0,02		0,02		0,02	
Pul Resist [mbar*l⁻¹*sek]	8,00		8,00		8,00		8,00		8,00	
analog Umschaltdruck [cm H₂O]	20,00		25,00		30,00		35,00		40,00	
Inspirationsdruck [cm H ₂ O]	18,50	0,24	21,78	0,25	25,15	0,18	30,03	0,13	33,25	0,14
PEEP [cm H ₂ O]	5,52	0,16	5,14	0,02	6,01	0,07	6,27	0,12	6,21	0,14
Inspirationsflow [l/sek]	0,41	0,01	0,46	0,00	0,44	0,00	0,43	0,00	0,46	0,00
Inspirationszeit [sek]	0,50	0,00	0,52	0,04	0,82	0,04	1,02	0,04	1,72	0,04
Exspirationszeit [sek]	1,12	0,04	0,80	0,00	0,80	0,00	1,06	0,05	1,12	0,04
Atemfrequenz /min	37,06	0,99	45,49	1,47	37,06	0,99	28,86	0,64	20,99	0,40
Atemzugvolumen [ml]	0,21	0,00	0,24	0,02	0,36	0,02	0,44	0,02	0,80	0,03
Atemminutenvolumen [l/min]	7,67	0,00	10,86	0,54	13,42	0,49	12,71	0,60	16,79	0,39
gastraler Flow [l/min]	0,88	0,01	1,10	0,01	1,15	0,01	1,29	0,00	6,91	0,09
Pul Comp [l/mbar]	0,02		0,02		0,02		0,02		0,02	
Pul Resist [mbar*l⁻¹*sek]	16,00		16,00		16,00		16,00		16,00	
analog Umschaltdruck [cm H₂O]	20,00		25,00		30,00		35,00		40,00	
Inspirationsdruck [cm H ₂ O]	20,74	0,16	23,44	0,19	27,55	0,35	30,06	0,09	35,73	0,50
PEEP [cm H ₂ O]	5,74	0,05	5,75	0,14	6,21	0,04	5,61	0,12	5,88	0,06
Inspirationsflow [l/sek]	0,47	0,00	0,47	0,00	0,51	0,00	0,45	0,01	0,46	0,00
Inspirationszeit [sek]	0,42	0,04	0,58	0,04	0,68	0,04	0,90	0,07	3,26	0,05
Exspirationszeit [sek]	1,02	0,04	1,24	0,05	0,94	0,05	1,14	0,05	1,38	0,05
Atemfrequenz /min	41,71	1,56	32,98	0,78	37,12	1,95	29,43	0,78	12,97	0,14
Atemzugvolumen [ml]	0,20	0,02	0,27	0,02	0,35	0,02	0,41	0,03	1,50	0,03
Atemminutenvolumen [l/min]	8,22	0,70	8,99	0,68	12,79	0,46	12,01	0,66	19,39	0,28
gastraler Flow [l/min]	1,16	0,01	1,12	0,01	1,53	0,01	1,28	0,02	14,58	0,61

Tab. 33: Evita 2, PEEP 6 (Fortsetzung)

F. Literaturverzeichnis

Amato MB, Barbas CS, Medeiros DM, Magaldi RB, Schettino GP, Lorenzi-Filho G, Kairalla RA, Deheinzelin D, Munoz C, Oliveira R (1998): Effect of a protective-ventilation strategy on mortality in the acute respiratory distress syndrome. *N Engl J Med* 338(6), 347-54

Ambrosino N (1996): Noninvasive mechanical ventilation in acute respiratory failure. *Eur Respir J* 9(4), 795-807

Antonelli M, Conti G, Rocco M, Bufi M, De Blasi RA, Vivino G, Gasparetto A, Meduri GU (1998): A comparison of noninvasive positive-pressure ventilation and conventional mechanical ventilation in patients with acute respiratory failure. *N Engl J Med* 339(7), 429-35

Appendini L, Patessio A, Zanaboni S, Carone M, Gukov B, Donner CF, Rossi (1994): Physiologic effects of positive end-expiratory pressure and mask pressure support during exacerbations of chronic obstructive pulmonary disease. *AAm J Respir Crit Care Med*. 149(5), 1069-76

Becker H F, Rossaint R, Schönhofer B, Walmrath D, Welte T, Burchardi H, Hamm C, Karg O, Karzai W, Kilger E et al. (2003): Statuserhebung zur invasiven und nicht-invasiven Beatmung auf deutschen Intensivstationen. *Intensivmed* 40, 225-232

Benhamou D, Girault C, Faure C, Portier F, Muir JF (1992): Nasal mask ventilation in acute respiratory failure. Experience in elderly patients. *Chest* 102(3), 912-7

Bott J, Carroll MP, Conway JH, Keilty SE, Ward EM, Brown AM, Paul EA, Elliott MW, Godfrey RC, Wedzicha JA et al. (1993): Randomised controlled trial of nasal ventilation in acute ventilatory failure due to chronic obstructive airways disease. *Lancet* 341(8860), 1555-7

Bowman FP, Menegazzi JJ, Check BD, Duckett TM (1995): Lower esophageal sphincter pressure during prolonged cardiac arrest and resuscitation. *Ann Emerg Med* 26(2), 216-9

British Thoracic Society Standards of Care Committee (2002): Non-invasive ventilation in acute respiratory failure. *Thorax* 57(3), 192-211

Brochard L (2000): Non-invasive ventilation for acute exacerbations of COPD: a new standard of care. *Thorax* 55(10), 817-8

Brochard L, Mancebo J, Wysocki M, Lofaso F, Conti G, Rauss A, Simonneau G, Benito S, Gasparetto A, Lemaire F, et al. (1995): Noninvasive ventilation for acute exacerbations of chronic obstructive pulmonary disease. *N Engl J Med* 333(13), 817-22

Brock-Utne JG, Downing JW (1986): The lower oesophageal sphincter and the anaesthetist. *S Afr Med J* 70(3), 170-1

Burchardi H, Kuhlen R, Schönhofer B, Müller E, Criée CP, Welte T (2002): Non-invasive ventilation. Consensus statement on indications, possibilities and use in acute respiratory insufficiency. *Anaesthesist* 51(1), 33-41

Cai H, Gong H, Zhang L, Wang Y, Tian Y (2007): Effect of low tidal volume ventilation on atelectasis in patients during general anesthesia: a computed tomographic scan. *J Clin Anesth* 19(2), 125-9

Chu EK, Whitehead T, Slutsky AS (2004): Effects of cyclic opening and closing at low- and high-volume ventilation on bronchoalveolar lavage cytokines. *Crit Care Med* 32(1), 168-74

Cohen IL, Booth FV (1994): Cost containment and mechanical ventilation in the United States. *New Horiz* 2(3), 283-90

Cotton BR, Smith G (1984): The lower oesophageal sphincter and anaesthesia. *Br J Anaesth* 56(1), 37-46

David M, Bodenstern M, Markstaller K (2010): Protektive Beatmungstherapie. *Anaesthesist* 59, 595-606

Davis K Jr, Johannigman JA, Johnson RC Jr, Branson RD (1995): Lung compliance following cardiac arrest. *Acad Emerg Med* 2(10), 874-8

de Latorre F, Nolan J, Robertson C, Chamberlain D, Baskett P (2001): European Resuscitation Council Guidelines 2000 for Adult Advanced Life Support. A statement from the Advanced Life Support Working Group 1 and approved by the Executive Committee of the European Resuscitation Council. *Resuscitation* 48 (2001), 211–221

Deutsche Gesellschaft für Pneumologie und Beatmungsmedizin e. V. (2008): S3 – Leitlinie Nichtinvasive Beatmung als Therapie der akuten respiratorischen Insuffizienz.

Díaz GG, Alcaraz AC, Talavera JC, Pérez PJ, Rodriguez AE, Cordoba FG, Hill NS (2005): Noninvasive positive-pressure ventilation to treat hypercapnic coma secondary to respiratory failure. *Chest* 127(3), 952-60

Döriges V, Ocker H, Neubert E, Schumann T, Wenzel V (2001): Notfall-Atemwegs-Management – eine vergleichende Untersuchung verschiedener Strategien bei ungesichertem Luftweg. *Wien Klin Wochensch.* 113(5-6), 186-93

Dreyfuss D, Basset G, Soler P, Saumon G (1985): Intermittent positive-pressure hyperventilation with high inflation pressures produces pulmonary microvascular injury in rats. *Am Rev Respir Dis* 132(4), 880-4

Engelmann L (2000): Das Open-lung-Konzept. *Anaesthetist* 49, 1046–1053

Epstein SK, Vuong V (1999): Lack of influence of gender on outcomes of mechanically ventilated medical ICU patients. *Chest* 116(3), 732-9

Esteban A, Alía I, Ibañez J, Benito S, Tobin MJ (1994): Modes of mechanical ventilation and weaning. A national survey of Spanish hospitals. The Spanish Lung Failure Collaborative Group. *Chest* 106(4), 1188-93

Fagon JY, Chastre J, Hance AJ, Montravers P, Novara A, Gibert C (1993): Nosocomial pneumonia in ventilated patients: a cohort study evaluating attributable mortality and hospital stay. *Am J Med* 94(3), 281-8

Gillespie DJ, Marsh HM, Divertie MB, Meadows JA 3rd (1986): Clinical outcome of respiratory failure in patients requiring prolonged (greater than 24 hours) mechanical ventilation. *Chest* 90(3), 364-9

Girault C, Daudenthun I, Chevron V, Tamion F, Leroy J, Bonmarchand G (1999): Noninvasive ventilation as a systematic extubation and weaning technique in acute-on-chronic respiratory failure: a prospective, randomized controlled study. *Am J Respir Crit Care Med* 160(1), 86-92

Girault C, Briel A, Hellot MF, Tamion F, Woinet D, Leroy J, Bonmarchand G (2003): Non-invasive mechanical ventilation in clinical practice: a 2-year experience in a medical intensive care unit. *Crit Care Med* 31(2), 552-9

Guidelines for cardiopulmonary resuscitation and emergency cardiac care. Emergency Cardiac Care Committee and Subcommittees, American Heart Association. Part II. Adult basic life support. *JAMA* 1992 268(16), 2184-98

Gunnarsson L, Tokics L, Gustavsson H, Hedenstierna G (1991): Influence of age on atelectasis formation and gas exchange impairment during general anaesthesia. *Br J Anaesth* 66(4), 423-32

Hamm M, Schulz A, Kloche M, Niedermeyer J, Meissner E (1999): Nichtinvasive Beatmung bei akuter respiratorischer Insuffizienz. *Intensivmed* 36, 156-162

Handley AJ, Koster R, Monsieurs K, Perkins GD, Davies S, Bossaert L (2006): Lebensrettende Basismaßnahmen für Erwachsene und Verwendung automatisierter externer Defibrillatoren. Abschnitt 2 der Leitlinien zur Reanimation 2005 des European Resuscitation Council. *Notfall+Rettungsmedizin* (2006), 9:10-25

Hedenstierna G, Baehrendtz S, Klingstedt C, Santesson J, Söderborg B, Dahlborn M, Bindslev L (1984): Ventilation and perfusion of each lung during differential ventilation with selective PEEP. *Anesthesiology* 61(4), 369-76

Herold G: Innere Medizin. Herold, Köln 2004

Ho KM, Wong K (2006): A comparison of continuous and bi-level positive airway pressure non-invasive ventilation in patients with acute cardiogenic pulmonary oedema: a meta-analysis. *Crit Care* 10(2), R49

Hoffmann B, Welte T (1997): Non-invasive positive pressure Ventilation (NIPPV) bei der akuten respiratorischen Insuffizienz als Alternative zur orotrachealen Intubation. *Intensivmed* 34, 409-415

Hong CM, Xu DZ, Lu Q, Cheng Y, Pisarenko V, Doucet D, Brown M, Aisner S, Zhang C, Deitch EA et al. (2010): Low tidal volume and high positive end-expiratory pressure mechanical ventilation results in increased inflammation and ventilator-associated lung injury in normal lungs. *Anesth Analg* 110(6),1652-60

Joshi N, Localio AR, Hamory BH (1992): A predictive risk index for nosocomial pneumonia in the intensive care unit. *Am J Med* 93(2), 135-42

Keenan SP, Sinuff T, Cook DJ, Hill NS (2003): Which patients with acute exacerbation of chronic obstructive pulmonary disease benefit from noninvasive positive-pressure ventilation? A systematic review of the literature. *Ann Intern Med* 138(11) , 861-70

Kindgen-Milles D, Buhl R, Gabriel A, Böhner H, Müller E (2000): Nasal continuous positive airway pressure: A method to avoid endotracheal reintubation in postoperative high-risk patients with severe nonhypercapnic oxygenation failure. *Chest* 117(4), 1106-11

Larsen R: Anästhesie. 8. Auflage; Urban & Fischer Verlag, München 2002

Larsen R, Ziegenfuß T: Beatmung: Grundlagen und Praxis. 3. Auflage; Springer-Verlag, Berlin 2004

Lawes EG, Baskett PJ (1987): Pulmonary aspiration during unsuccessful cardiopulmonary resuscitation. *Intensive Care Med* 13(6), 379-82

Lenique F, Habis M, Lofaso F, Dubois-Randé JL, Harf A, Brochard L (1997): Ventilatory and hemodynamic effects of continuous positive airway pressure in left heart failure. *Am J Respir Crit Care Med* 155(2), 500-5

Lind JF, Crispin JS, McIver DK (1968): The effect of atropine on the gastroesophageal sphincter. *Can J Physiol Pharmacol* 46(2), 233-8

Lindberg P, Gunnarsson L, Tokics L, Sekher E, Lundquist H, Brismar B, Hedenstierna G (1992): Atelectasis and lung function in the postoperative period. *Acta Anaesthesiol Scand* 36(6), 546-53

Liston R, Deegan PC, McCreery C, Costello R, Maurer B, McNicholas WT (1995): Haemodynamic effects of nasal continuous positive airway pressure in severe congestive heart failure. *Eur Respir J* 8(3), 430-5

Masip J, Roque M, Sánchez B, Fernández R, Subirana M, Expósito JA (2005): Noninvasive ventilation in acute cardiogenic pulmonary edema: systematic review and meta-analysis. *JAMA* 294(24), 3124-30

Mathru M, Esch O, Lang J, Herbert ME, Chaljub G, Goodacre B, van Sonnenberg E (1996): Magnetic resonance imaging of the upper airway. Effects of propofol anesthesia and nasal continuous positive airway pressure in humans. *Anesthesiology* 84(2), 273-9

Mehta S, Jay GD, Woolard RH, Hipona RA, Connolly EM, Cimini DM, Drinkwine JH, Hill NS (1997): Randomized, prospective trial of bilevel versus continuous positive airway pressure in acute pulmonary edema. *Crit Care Med* 25(4), 620-8

Melker RJ (1986): Alternative methods of ventilation during respiratory and cardiac arrest. *Circulation* 74, IV63-5

Nava S, Evangelisti I, Rampulla C, Compagnoni ML, Fracchia C, Rubini F (1997): Human and financial costs of noninvasive mechanical ventilation in patients affected by COPD and acute respiratory failure. *Chest* 111(6), 1631-8

Nava S, Ambrosino N, Clini E, Prato M, Orlando G, Vitacca M, Brigada P, Fracchia C, Rubini F (1998): Noninvasive mechanical ventilation in the weaning of patients with respiratory failure due to chronic obstructive pulmonary disease. A randomized, controlled trial. *Ann Intern Med* 128(9), 721-8

Neumann P, Berglund JE, Mondéjar EF, Magnusson A, Hedenstierna G (1998): Effect of different pressure levels on the dynamics of lung collapse and recruitment in oleic-acid-induced lung injury. *Am J Respir Crit Care Med* 158(5 Pt 1), 1636-43

Ocker H, Wenzel V, Schmucker P, Dörge V (2001): Effectiveness of various airway management techniques in a bench model simulating a cardiac arrest patient. *J Emerg Med* 20(1), 7-12

Oczensky W: Atem – Atemhilfen. 8. Auflage; Georg Thieme Verlag, Stuttgart 2008

Osterwalder JJ, Schuhwerk W (1998): Effectiveness of mask ventilation in a training mannikin. A comparison between the Oxylator EM100 and the bag-valve device. Resuscitation 36(1), 23-7

Pelosi P, Rocco PR (2007): Airway closure: the silent killer of peripheral airways. Crit Care 11(1),114

Pelosi P, Ravagnan I, Giurati G, Panigada M, Bottino N, Tredici S, Eccher G, Gattinoni L (1999): Positive end-expiratory pressure improves respiratory function in obese but not in normal subjects during anesthesia and paralysis. Anesthesiology 91(5),1221-31

Peter JV, Moran JL, Phillips-Hughes J, Warn D (2002): Noninvasive ventilation in acute respiratory failure--a meta-analysis update. Crit Care Med 30(3), 555-62

Peter JV, Moran JL, Phillips-Hughes J, Graham P, Bersten AD (2006): Effect of non-invasive positive pressure ventilation (NIPPV) on mortality in patients with acute cardiogenic pulmonary oedema: a meta-analysis. Lancet 367(9517), 1155-63

Phoenix SI, Paravastu S, Columb M, Vincent JL, Nirmalan M (2009): Does a higher positive end expiratory pressure decrease mortality in acute respiratory distress syndrome? A systematic review and meta-analysis. Anesthesiology 110(5),1098-105

Pinhu L, Whitehead T, Evans T, Griffiths M (2003): Ventilator associated lung injury. Lancet 361, 332-340

Plant PK, Owen JL, Elliott MW (2000): Early use of non-invasive ventilation for acute exacerbations of chronic obstructive pulmonary disease on general respiratory wards: a multicentre randomised controlled trial. Lancet 355(9219), 1931-5.

Plant PK, Owen JL, Parrott S, Elliott MW (2005): Cost effectiveness of ward based non-invasive ventilation for acute exacerbations of chronic obstructive pulmonary disease: economic analysis of randomised controlled trial. BMJ. 2003 May 3;326(7396):956.

Power I, Kam P: Principles of physiology for the anaesthetist, 2. Auflage; Oxford University Press Inc., New York 2008

Rathgeber J: Grundlagen der maschinellen Beatmung. Hrsg. v. Züchner K; 1. Auflage; Aktiv Druck und Verlag, Ebelsbach 1999

Rehder K, Sessler AD, Rodarte JR. (1977): Regional intrapulmonary gas distribution in awake and anesthetized-paralyzed man. *J Appl Physiol.* 42(3), 391-402

Rello J, Ollendorf DA, Oster G, Vera-Llonch M, Bellm L, Redman R, Kollef MH; VAP Outcomes Scientific Advisory Group (2002): Epidemiology and outcomes of ventilator-associated pneumonia in a large US database. *Chest* 122(6), 2115-21

Riede U-N, Schaefer H-E: Allgemeine und spezielle Pathologie, 4. Auflage; Georg Thieme Verlag, Stuttgart 1999

Roessler M, Kill C (2010): Nicht invasive Beatmung in der präklinischen Notfallmedizin. *Notf.med. up2date* 5(4): 297-312

Rossaint R, Werner C, Zwißler B: Die Anästhesiologie. 2. Auflage; Springer Medizin Verlag, Heidelberg 2008

Rothen HU, Sporre B, Engberg G, Wegenius G, Hedenstierna G (1998): Airway closure, atelectasis and gas exchange during general anaesthesia. *Br J Anaesth* 81(5), 681-6

Scala R, Naldi M, Archinucci I, Coniglio G, Nava S (2005): Noninvasive positive pressure ventilation in patients with acute exacerbations of COPD and varying levels of consciousness. *Chest* 128(3), 1657-66

Schmidt RF, Thews G: Physiologie des Menschen. 27. Auflage; Springer-Verlag, Berlin 1995

Servera E, Pérez M, Marín J, Vergara P, Castaño R (1995): Noninvasive nasal mask ventilation beyond the ICU for an exacerbation of chronic respiratory insufficiency. *Chest* 108(6), 1572-6

Slutsky AS (1999): Lung injury caused by mechanical ventilation. *Chest* 116 (1 Suppl), 9-15

Stock MC, Downs JB, Gauer PK, Alster JM, Imrey PB (1985): Prevention of postoperative pulmonary complications with CPAP, incentive spirometry, and conservative therapy. *Chest* 87(2):151-7

Timmermann A, Russo SG, Eich C, Roessler M, Braun U, Rosenblatt WH, Quintel M (2007): The out-of-hospital esophageal and endobronchial intubations performed by emergency physicians. *Anesth Analg.* 2007 Mar; 104(3):619-23

Timmermann A, Byhan C, Wenzel V, Eich C, Piepoh T, Bernhard M, Döriges V (2012): Handlungsempfehlung für das präklinische Atemwegsmanagement. *Anästh Intensivmed*; 53, 294-308

Tokics L, Hedenstierna G, Strandberg A, Brismar B, Lundquist H (1987): Lung collapse and gas exchange during general anesthesia: effects of spontaneous breathing, muscle paralysis, and positive end-expiratory pressure. *Anesthesiology* 66(2), 157-67

Updike G, Mosesso VN Jr, Auble TE, Delgado E (1998): Comparison of bag-valve-mask, manually triggered ventilator, and automated ventilator devices used while ventilating a nonintubated mannikin model. *Prehosp Emerg Care* 2(1), 52-5

Väisänen IT, Räsänen J (1987): Continuous positive airway pressure and supplemental oxygen in the treatment of cardiogenic pulmonary edema. *Chest* 92(3), 481-5

Vanner RG, Pryle BJ, O'Dwyer JP, Reynolds F (1992): Upper oesophageal sphincter pressure and the intravenous induction of anaesthesia. *Anaesthesia* 47(5), 371-5

Vassilakopoulos T, Zakyntinos S, Roussos Ch (1996): Respiratory muscles and weaning failure. *Eur Respir J* 9(11), 2383-400

Villar J, Herrera-Abreu MT, Valladares F, Muros M, Pérez-Méndez L, Flores C, Kacmarek RM (2009): Experimental ventilator-induced lung injury: exacerbation by positive end-expiratory pressure. *Anesthesiology* 110(6),1341-7

Vitacca M, Ambrosino N, Clini E, Porta R, Rampulla C, Lanini B, Nava S (2001): Physiological response to pressure support ventilation delivered before and after extubation in patients not capable of totally spontaneous autonomous breathing. *Am J Respir Crit Care Med* 164(4), 638-41

Wahba RW (1991): Perioperative functional residual capacity. *Can J Anaesth* 38(3), 384-400

Weiler N, Heinrichs W, Dick W (1995): Assessment of pulmonary mechanics and gastric inflation pressure during mask ventilation. *Prehosp Disaster Med* 10(2):101-5

Welte T, Hoffmann B (1999): Noninvasive ventilation in critically ill patients. I. Mechanism of action and current scientific evidence. *Dtsch Med Wochenschr* 124(46), 1385-8

Wenzel V, Lindner KH, Prengel AW (1997): Ventilation during cardiopulmonary resuscitation (CPR). A literature study and analysis of ventilation strategies. *Anaesthetist* 46(2), 133-41

Wenzel V, Idris AH, Banner MJ, Kubilis PS, Band R, Williams JL Jr, Lindner KH (1998 a): Respiratory system compliance decreases after cardiopulmonary resuscitation and stomach inflation: impact of large and small tidal volumes on calculated peak airway pressure. *Resuscitation* 38(2), 113-8

Wenzel V, Idris AH, Banner MJ, Kubilis PS, Williams JL Jr (1998 b): Influence of tidal volume on the distribution of gas between the lungs and stomach in the nonintubated patient receiving positive-pressure ventilation. *Crit Care Med* 26(2), 364-8

Wenzel V, Idris AH, Dörge V, Stallinger A, Gabrielli A, Lindner KH (2000): Ventilation in the unprotected airway. *Bailliere`s Clinical Anaesthesiology* Vol. 14 (3), 511-526

Wetterslev J, Hansen EG, Roikjaer O, Kanstrup IL, Heslet L (2001): Optimizing perioperative compliance with PEEP during upper abdominal surgery: effects on perioperative oxygenation and complications in patients without preoperative cardiopulmonary dysfunction. *Eur J Anaesthesiol* 18(6):358-65.

Winans CS (1972): Alteration of lower esophageal sphincter characteristics with respiration and proximal esophageal balloon distention. *Gastroenterology* 62(3), 380-8

Winck JC, Azevedo LF, Costa-Pereira A, Antonelli M, Wyatt JC (2006): Efficacy and safety of non-invasive ventilation in the treatment of acute cardiogenic pulmonary edema--a systematic review and meta-analysis. *Crit Care*. 2006; 10(2):R69

Wysocki M, Tric L, Wolff MA, Millet H, Herman B (1995): Noninvasive pressure support ventilation in patients with acute respiratory failure. A randomized comparison with conventional therapy. *Chest* 107(3), 761-8

Danksagung

Mein tiefer Dank gilt Herrn Prof. Dr. med. Onnen Mörer für die Möglichkeit, diese Dissertation beginnen, durchführen und auch beenden zu können, sowie für seine intensive und geduldige Unterstützung.

Ebenso bin ich Herrn Dr. rer. nat. Klaus Züchner zu großem Dank verpflichtet, der mir stets zur Seite stand und mir bei dieser umfangreichen Arbeit eine besondere Hilfe war.

Nicht zuletzt möchte ich mich bei den Mitarbeitern der ehemaligen Anästhesie-Technik bedanken, allen voran bei Herrn Thomas Schulze, der mir bei EDV-Fragen tatkräftig geholfen hat und auch bei Herrn Wilfried Fraatz für die Beratung bei technischen Problemen.

Weiterhin danke ich Frau Zapf, ehemalige Mitarbeiterin der Medizinischen Statistik Göttingen, die mich bei der Erstellung der statistischen Datenerhebung unterstützt hat.