

Tierärztliche Hochschule Hannover

**Einfluss der „Open-Lung-Concept“-Beatmung auf
die Herz-Kreislauf- und Lungenfunktion
während einer Injektionsnarkose beim Pferd**

INAUGURAL – DISSERTATION
zur Erlangung des Grades
eines Doktors der Veterinärmedizin
- Doctor medicinae veterinariae -
(Dr. med. vet.)

vorgelegt von
Tilman Bringewatt
Ostercappeln

Hannover 2009

Wissenschaftliche Betreuung: Prof. Dr. B. Ohnesorge
Klinik für Pferde

1. Gutachter: Prof. Dr. B. Ohnesorge
2. Gutachter: Prof. Dr. S. Kästner

Tag der mündlichen Prüfung: 15.05.2009

Meinen Eltern

1	Einleitung	11
2	Literatur	13
2.1	Auswirkungen der Allgemeinanästhesie auf die Lungenfunktion	13
2.1.1	Medikation.....	13
2.1.1.1	Xylazin	13
2.1.1.2	Ketamin.....	14
2.1.1.3	Diazepam.....	14
2.1.1.4	Guaifenesin.....	15
2.1.1.5	TIVA und „Triple-Drip“	16
2.1.2	Beatmungsgasgemisch.....	18
2.2	Auswirkungen der Lagerung auf die Lungenfunktion	19
2.2.1	Lungenfunktion am stehenden Pferd	19
2.2.2	Lagerungsbedingte Lungenfunktionsstörungen	20
2.2.2.1	Mechanische Behinderung.....	21
2.2.2.2	Störung des pulmonalen Ventilations-/Perfusionsverhältnisses... ..	22
2.2.2.3	Zunahme des intrapulmonalen Rechts-links-Shuntvolumens	22
2.2.2.4	Intraoperative Entstehung von Atelektasen – mögliche Mechanismen.....	23
2.2.2.4.1	Kompressionsatelektasen.....	23
2.2.2.4.2	Resorptionsatelektasen	24
2.2.2.5	Totraumventilation	25
2.3	Ventilation während der Allgemeinanästhesie.....	25
2.3.1	Einfluss des Sauerstoffanteils im Atemgasgemisch	26
2.3.2	Spontanatmung.....	27
2.3.3	Beatmungsschemata	27
2.3.3.1	Kontrollierte Beatmung mit IPPV.....	28
2.3.3.2	Das Open-Lung-Concept	28
2.3.4	Unerwünschte Wirkungen der Beatmung.....	29
2.4	Narkosekomplikationen.....	30
2.4.1	Intraoperative Narkosekomplikationen	30
2.5	Monitoring	31
2.5.1	Die Atmung	32
2.5.2	Herz und Kreislauf.....	33
2.5.3	Reflexe.....	34

2.5.4	Postoperatives Monitoring.....	34
3	Material und Methode.....	36
3.1	Patientenmaterial	36
3.1.1	Einteilung der Patienten in Gruppen	36
3.2	Versuchsaufbau	37
3.2.1	Präoperative Untersuchungen und Narkosevorbereitungen	37
3.2.2	Narkoseprämedikation und Induktion der Allgemeinanästhesie.....	37
3.2.3	Lagerung der Probanden	38
3.2.4	Narkoseerhaltung und narkosebegleitende Maßnahmen.....	39
3.2.5	Spontanatmung und Beatmung der Probanden.....	39
3.2.6	Intraoperatives Monitoring.....	42
3.2.6.1	Herzfrequenz	42
3.2.6.2	Arterieller Blutdruck.....	42
3.2.6.3	Positiver inspiratorischer und endexpiratorischer Druck	43
3.2.6.4	Inspiratorische Sauerstoffkonzentration	43
3.2.6.5	Arterielle Blutgaswerte und Säure-Basenparameter	44
3.2.6.6	Endexpiratorische Kohlendioxidkonzentration und Atemfrequenz.....	44
3.2.6.7	Alveolärer Totraum	44
3.3	Statistische Auswertung	45
4	Ergebnisse.....	46
4.1	Alter und Gewicht der Probanden	46
4.2	Art der Eingriffe, Lagerung der Probanden und Dauer der Eingriffe.....	46
4.3	Präoperative Säure-Basen- und Blutgasparameter.....	47
4.4	Einfluss der Beatmung auf die intraoperativ erfassten Parameter	48
4.4.1	Arterieller Sauerstoffpartialdruck.....	48
4.4.2	Arterieller Kohlendioxidpartialdruck.....	50
4.4.3	pH-Wert.....	51
4.4.4	Herzfrequenz.....	52
4.4.5	Mittlerer arterieller Blutdruck	53
4.4.6	Atemfrequenz.....	54
4.4.7	Arterielle Sauerstoffsättigung	55
4.4.8	Endexpiratorische Kohlendioxidkonzentration.....	56
4.4.9	Alveolärer Totraum.....	57

4.4.10	Zeitlich unabhängige Auswertung der Mittelwerte	58
4.5	Nicht ausgewertete Probanden	59
4.5.1	Hypoxämie	59
4.5.2	Umlagerung intra operationem	60
5	Diskussion	61
5.1	Diskussion der Methode	61
5.1.1	Patientenauswahl und deren Einteilung in Gruppen	61
5.1.2	Narkoseführung	61
5.1.3	Messverfahren	63
5.1.4	Beatmungstechnik	64
5.1.5	Postoperatives Monitoring	65
5.2	Diskussion der Ergebnisse	66
5.2.1	Arterieller Sauerstoffpartialdruck	66
5.2.2	Arterieller Kohlendioxidpartialdruck und pH-Wert	67
5.2.3	Mittlerer arterieller Blutdruck	69
5.2.4	Atemfrequenz	70
5.2.5	Arterielle Sauerstoffsättigung	71
5.2.6	Alveolärer Totraum und endexpiratorische Kohlendioxidkonzentration	71
5.2.7	Ausschluss von Probanden	73
5.2.8	Zusammenfassende Diskussion und Ausblick	74
6	Zusammenfassung	76
7	Summary	78
8	Literaturverzeichnis	80

Abkürzungsverzeichnis

Abkürzung	Einheit	Bedeutung
A.		Arteria
$p_{(A-a)}O_2$		Alveolo-arterielle Sauerstoffdifferenz
Abb.		Abbildung
AF		Atemfrequenz
bzw.		beziehungsweise
°C		Grad Celsius
cm		Zentimeter
cm H ₂ O		Zentimeter Wassersäule
CO ₂		Kohlendioxid
CT		Computer-Tomographie
EKG		Elektrokardiogramm
EtCO ₂	mmHg	Endexpiratorische Kohlendioxidkonzentration
FiO ₂		Inspiratorische Sauerstoff-Fraktion
FRC	l	funktionelle Residualkapazität
g		Gramm
h		Stunde
Hb		Hämoglobin
HF		Herzfrequenz
IPPV		Intermittierende positive Druckbeatmung
J		Jahr
kg		Kilogramm
KGW	kg	Körpergewicht
l		Liter
m		Meter
max		Maximum
mg		Milligramm
min		Minute
ml		Milliliter
mm		Millimeter

Abkürzungsverzeichnis

mmHg		Millimeter Quecksilbersäule
mod.		modifiziert
mOLC		modifiziertes Open-Lung-Concept
O ₂		Sauerstoff
OLC		Open-Lung-Concept
p		Fehlerwahrscheinlichkeit
Δ p		Druckdifferenz
p _a CO ₂	mmHg	arterieller Kohlendioxidpartialdruck
p _a O ₂	mmHg	arterieller Sauerstoffpartialdruck
p _A O ₂	mmHg	alveolärer Sauerstoffpartialdruck
p _B	mmHg	Barometrischer Druck
PEEP	cm H ₂ O	Positiver end-expiratorischer Druck
PIP	cm H ₂ O	Positiver Inspirationsdruck
p _{H₂O}	mmHg	Wasserdampfdruck
S		Standardabweichung
S _a O ₂	%	Arterielle Sauerstoffsättigung
SO ₂	%	Sauerstoffsättigung
t		Zeit
Tab.		Tabelle
TIVA		Total intravenöse Anästhesie
V.		Vena
V _D	l	Volumen des anatomischen Totraums
V _{Dalv}	l	Volumen des alveolären Totraums
V _T	l	Atemzugvolumen
V _{Talv}	l	Alveolärer Anteil des Atemzugvolumens
vs.		versus
ZNS		Zentralnervensystem
\bar{x}		arithmetisches Mittel

1 Einleitung

Beim Pferd besteht trotz der Weiterentwicklung von Anästhetika und Anästhesieverfahren im Vergleich zum Menschen ein erheblich größeres Narkoserisiko. Studien haben ergeben, dass dieses Risiko bei total intravenösen Allgemeinanästhesien (TIVA) deutlich geringer ist (0,31%) als bei Inhalationsnarkosen (0,99%) (JOHNSTON et al. 2002). Jedoch war während einer total intravenösen Anästhesie die Narkosedauer im Allgemeinen kürzer, und die Art der Eingriffe beschränkte sich meist auf elektive Eingriffe. Außerdem beruhen diese Zahlen auf Ergebnissen aus größeren Kliniken, während aus der tierärztlichen Praxis keine Zahlen vorliegen. Doch vor allem die in der Studie von JOHNSTON et al. (2002) verwendete TIVA aus Xylazin, Ketamin und Guaifenesin wird oft in der Praxis unter Feldbedingungen wegen ihrer einfachen Anwendung und der geringen kardiovaskulären Nebenwirkungen eingesetzt. Im Vergleich zum Menschen und zum Kleintier wird das Narkoserisiko und die Zahl der Narkosekomplikationen durch Faktoren wie das hohe Körpergewicht, ein beeinträchtigter pulmonaler Gasaustausch und das spezifische Verhalten des Pferdes als Fluchttier während der Aufstehphase erhöht.

In früheren Studien konnte der pulmonale Gasaustausch mittels eines modifizierten Open-Lung-Concepts während einer Inhalationsnarkose sowohl bei Risiko- als auch bei Elektiveingriffen verbessert werden (HOPSTER 2007; SCHULTE-BAHRENBURG 2008; SCHÜRMAN et al. 2008). Grund dafür scheint die Eröffnung durch Atelektasen verschlossener Lungenareale zu sein, die beim Pferd intraoperativ eine große Rolle spielen. Unter einem „Open-Lung-Concept“ versteht man die Eröffnung der Lunge durch sogenannte Rekrutierungsmanöver, bei denen durch hohe inspiratorische Spitzendrücke (PIP) die Lunge eröffnet wird und gleichzeitig nach der Expiration die Lungenalveolen durch einen positiv endexpiratorischen Druck (PEEP) offen gehalten werden. Damit soll das Kollabieren von Alveolen vermieden werden, das bei der intermittierenden positiven Druckbeatmung (IPPV) nicht verhindert werden kann, da kein PEEP verwendet wird.

In der Humanmedizin gilt ein Sauerstoffgehalt im Trägergasgemisch von 35-40% heute als optimal, um Resorptionsatelektasen und erneute Bildung dieser nach Rekrutierungsmanövern zu vermeiden (ROTHEN et al. 1995a; AGARWAL et al. 2002). Diese Ergebnisse konnten beim Pferd jedoch nur teilweise bestätigt werden,

da vor allem Kompressionsatelektasen hier vergleichsweise eine größere Rolle als Resorptionsatelektasen spielen (SCHULTE-BAHRENBURG 2008). Dennoch war beim Vergleich der Verwendung von reinem Sauerstoff mit 21% Sauerstoff beim Pferd während einer total intravenösen Anästhesie ein signifikant größeres Shuntvolumen nachzuweisen (MARNTTELL et al. 2005).

Ziel dieser Studie war die Verbesserung der Lungenfunktion während einer Injektionsnarkose beim Pferd. Dabei sollten die Vorteile einer Injektionsnarkose, insbesondere hinsichtlich einer besseren kardiovaskulären Situation mit den Vorteilen der mOLC-Beatmung kombiniert werden. Als Vergleichsgruppen dienten Probanden, die während der Injektionsnarkose konventionell IPPV beatmet wurden oder spontan atmeten.

2 Literatur

2.1 Auswirkungen der Allgemeinanästhesie auf die Lungenfunktion

Die verschiedenen Arten der Allgemeinanästhesie führen häufig zu einer zentralen Atemdepression und damit zu einer Zurückhaltung von Kohlendioxid und somit zur Hyperkapnie. Außerdem kommt es häufig zu einer Hypoxämie, die zum einen durch die Allgemeinanästhesie selbst, jedoch hauptsächlich durch die Lagerung des Pferdes in Seiten- oder Rückenlage verursacht wird (TAYLOR u. CLARKE 2007).

2.1.1 Medikation

Alle Anästhetika beeinflussen unterschiedlich stark die Lungenfunktion und führen zu einer Atemdepression und damit zu einer Abnahme des Atemminutenvolumens. Zusätzlich wirken fast allen Sedativa und Anästhetika kreislaufdepressiv. Um die Dosierungen der Anästhetika und damit auch die Nebenwirkungen zu minimieren, geht man heute dazu über, verschiedene Anästhetika miteinander zu kombinieren (ROBINSON 1991; SCHATZMANN 1995).

Durch bereits vor der Allgemeinanästhesie bestehende Erkrankungen, insbesondere von Lunge, Herz-Kreislauf-System, Leber und Nieren und den damit verbundenen Arzneimittelverabreichungen, können sich zusätzlich Komplikationen während der Sedierung und der Allgemeinanästhesie ergeben (ROBINSON 1991).

2.1.1.1 Xylazin

Xylazin ist aus der Gruppe der α_2 -Adrenozeptor-Agonisten der am häufigsten verwendete Vertreter. Die Hauptwirkungen sind eine dosisabhängige Sedierung bzw. Hypnose, eine Analgesie und eine zentrale Muskelrelaxation, sowie dosisabhängig eine blutdrucksenkende oder -steigende und eine sekretionshemmende Wirkung (LÖSCHER et al. 2006).

Als Nebenwirkungen werden initiale Blutdruckerhöhung gefolgt von einer Blutdrucksenkung, Bradykardie, Atemdepression und AV-Blöcke zweiten Grades beschrieben. Selten können zusätzlich Erregungserscheinungen, besonders nach intravenöser Applikation, auftreten. Des Weiteren kann durch den Einsatz von Xylazin eine Hypoinsulinämie und daraus resultierend eine Hyperglykämie und eine mögliche osmotische Diurese entstehen (THURMON et al. 1982; TRIM u.

HANSON 1986). Die übliche Dosierung beträgt je nach gewünschtem Effekt 0,5 – 1 mg/kg KGW i.v. und die Eliminationshalbwertszeit beträgt beim Pferd dosisabhängig ca. 40-60 Minuten (SCHATZMANN 1995).

Xylazin wird häufig in der Prämedikation vor Allgemeinanästhesien verwendet (MUIR et al. 1978; GLITZ et al. 2001; TAYLOR u. CLARKE 2007). Außerdem bewirkt Xylazin als postoperativ verabreichtes Sedativum ein besseres und ruhigeres Aufstehverhalten (GLITZ et al. 2001).

2.1.1.2 Ketamin

Ketamin wird auch als dissoziatives Anästhetikum bezeichnet, da es eine Dissoziation zwischen dem limbischen und dem thalamischen System bewirkt (MARTYN 1987). Dadurch können einerseits kataleptische Zustände und andererseits eine starke Analgesie und Anästhesie beobachtet werden (LÖSCHER et al. 2006).

Im Gegensatz zu anderen Anästhetika fehlt eine atem- und kreislaufdepressive Wirkung und es wirkt am Herzen positiv ino- und chronotrop, so dass es auch bei kreislaufdepressiven Patienten mit erhöhtem Narkoserisiko angewendet werden kann.

Die für eine Narkose notwendige Muskelrelaxation wird nicht durch Ketamin erreicht, daher wird eine starke Sedation durch einen α_2 -Adrenozeptor-Agonisten oder eine Kombination mit Muskelrelaxantien empfohlen (SCHATZMANN 1995; LÖSCHER et al. 2006).

Die Dosierung bei der intravenösen Applikation von Ketamin wird mit 2-2,5 mg/kg KGW angegeben (BROCK u. HILDEBRAND 1990; HALL u. CLARKE 1991a; TRIM 1993; SCHATZMANN 1995; DOHERTY u. VALVERDE 2006; TAYLOR u. CLARKE 2007) und die Eliminationshalbwertszeit beträgt beim Pferd ca. 40-60 Minuten (LÖSCHER et al. 2006).

2.1.1.3 Diazepam

Diazepam gehört zu der Gruppe der Benzodiazepine und wird beim Pferd in Kombination mit Xylazin und Ketamin zur Narkoseeinleitung verwendet. Es hat das früher hierfür verwendete Guaifenesin weitgehend verdrängt (LÖSCHER et al. 2006).

In Kombination mit Xylazin und Ketamin wirkt es dem durch das Ketamin erhöhten Muskeltonus entgegen und verstärkt zusätzlich die muskelrelaxierende Wirkung von Xylazin.

Wie alle Benzodiazepine hat auch Diazepam kaum negative Wirkungen auf den Kreislauf und die Atmung. Es wirkt hypnotisch, sedativ, anxiolytisch, antikonvulsiv und muskelrelaxierend aufgrund seiner Wirkungen auf das limbische System (SHINI 2000). Bei der intravenösen Applikation hoher Dosen kann es aufgrund der muskelrelaxierenden Wirkung zu einer Atemdepression sowie zu einem Blutdruckabfall kommen (LÖSCHER et al. 2006). Die Eliminationshalbwertszeit liegt beim Pferd bei 2,5-21,6 Stunden (MUIR et al. 1982) bei einer Dosierung von 0,05 mg/kg KGW i.v. (BROCK u. HILDEBRAND 1990; TRIM 1993; SHINI 2000; DOHERTY u. VALVERDE 2006; TAYLOR u. CLARKE 2007).

2.1.1.4 Guaifenesin

Guaifenesin ist ein zentrales Muskelrelaxans und wirkt zentral muskelrelaxierend, sedativ/hypnotisch, leicht analgetisch und antipyretisch (LÖSCHER et al. 2006). Der Wirkmechanismus basiert auf einer Blockierung von Interneuronen und unterbricht selektiv die motorischen Synapsen im Rückenmark und Hirnstamm. Zusätzlich wird eine analgetische und durch die Depression des Gehirnstammes sedative Wirkung beschrieben (SCHATZMANN 1995).

Ein Vorteil liegt in der geringen kardiovaskulären und respiratorischen Depression. Des Weiteren erleichtert die Gabe von Guaifenesin die Intubation durch eine gute Relaxation der Pharynx- und Larynxmuskulatur und zeichnet sich im Allgemeinen auch durch eine gute Aufstehphase aus (MUIR et al. 2007).

Ein Nachteil bei der Anwendung von Guaifenesin besteht in der Akkumulation des Wirkstoffes bei längerer Applikation. Die Gefahr einer vermehrt ataktischen, verlängerten und unkontrollierten Aufstehphase steigt. Aus diesem Grund sollte es möglichst nicht zum Ablegen verwendet werden, um eine Reduzierung der insgesamt applizierten Dosis zu erreichen (TAYLOR u. CLARKE 2007). Des Weiteren sind Fälle von aseptischen Thrombosen und Thrombophlebitiden bei Applikation von hoch konzentrierten Lösungen beschrieben (SCHATZMANN et al. 1978; GRANDY u. MCDONELL 1980; HERSCHL et al. 1992; MUIR et al. 2007).

Die Eliminationshalbwertszeit beim Pferd liegt bei einer Dosierung von 90-120 mg/kg KGW i.v. bei 60-90 Minuten (BROCK u. HILDEBRAND 1990; LÖSCHER et al. 2006).

2.1.1.5 TIVA und „Triple-Drip“

Der „Triple-Drip“ ist eine häufig verwendete Form der „total intravenösen Anästhesie“ (TIVA). Unter dem „Triple-Drip“ versteht man im Allgemeinen die Kombination eines α_2 -Adrenozeptor-Agonisten mit Ketamin und Guaifenesin. Er wird in der Regel für kleinere Eingriffe mit einer Dauer von bis zu 90 Minuten genutzt (BETTSCART-WOLFENSBERGER 2006). Aufgrund der kardiovaskulären und respiratorischen Depression von Inhalationsanästhetika wird er aber auch für länger andauernde Narkosen immer häufiger genutzt.

Die Vorteile der TIVA liegen vor allem in der minimalen Hemmung des Herz-Kreislauf-Systems und des Respirationstraktes, aber auch gute Operationsbedingungen, ruhige Aufstehphasen und die Suppression der endokrinen Stressantwort werden beschrieben (MCCARTY et al. 1990; YOUNG et al. 1993; LUNA et al. 1996; TAYLOR et al. 1998; SPADAVECCHIA et al. 1999; TAYLOR u. CLARKE 2007). Im Vergleich zu Inhalationsanästhesien mit Halothan waren intraoperativ ein unterschiedlich hoher Grad von Nystagmus, aktive Palpebralreflexe sowie vereinzelt Schluckreflexe zu beobachten (YOUNG et al. 1993; MCMURPHY et al. 2002; MUIR 2009).

Aufgrund der kumulativen Effekte von Ketaminmetaboliten und hoher Dosen von Guaifenesin sollte einerseits die Narkosedauer nicht länger als 120 Minuten betragen und andererseits sollte die Verabreichung von Guaifenesin zur Narkoseinduktion vermieden werden (BETTSCART-WOLFENSBERGER 2006).

Im Gegensatz zu Inhalationsnarkotika, bei denen sich unverzüglich ein Gleichgewicht zwischen der inhalierten, im ZNS befindlichen und der ausgeatmeten alveolären Konzentration des Wirkstoffes einstellt, ist bei der TIVA die Wirkstoffkonzentration im ZNS ein Resultat aus verschiedenen Vorgängen. Dazu gehört die komplexe Verteilung in den verschiedenen Organen, die Verstoffwechslung, vor allem in der Leber, und die Elimination aktiver Verbindungen in der Niere (LEVIONNOIS 2007). Ein Problem stellt daher die Bestimmung der Plasmakonzentration des Wirkstoffes dar, da diese abhängig von Akkumulation und Sättigung des Eliminationsmechanismus des Anästhetikums Schwankungen unterliegt. Daher unterliegt das Wissen über Intensität und Wirkungsdauer nur einem Schätzwert des Anästhesisten und diese Ungenauigkeit wird noch mit der Anwendungsdauer gesteigert (LEVIONNOIS 2007).

Um das Risiko der Wirkstoffakkumulation zu verringern, wird empfohlen im Verlauf der Allgemeinanästhesie die Infusionsrate zu reduzieren. Für eine genaue Applikation der Wirkstoffe sind Spritz- oder Infusionspumpen erforderlich (DOHERTY u. VALVERDE 2006). So kann dem Nachteil der schlechteren Steuerbarkeit einer TIVA entgegengewirkt werden und eine gleichmäßige Plasmakonzentration aufrechterhalten werden. Für diese Indikation wurden neue Applikationsmethoden für die intravenöse Anästhesie entwickelt. Dazu zählt die Technik der so genannten „Target controlled infusion“, bei der eine computergesteuerte Spritzpumpe durch vorausgegangene pharmokinetische Studien die Infusionsrate berechnet, die für die Aufrechterhaltung einer vorgewählten Plasmakonzentration erforderlich ist (SCHRAAG et al. 2000). Somit erfolgt eine Dosierung von Zielkonzentrationen vergleichbar mit Inhalationsanästhetika. Zusätzlich wird die Gefahr einer Über- oder Unterdosierung vermieden und die Einstellung der gewünschten Narkosetiefe kann optimiert werden. Diese Technik wird jedoch zurzeit hauptsächlich in der Humanmedizin eingesetzt, wäre aber in Zukunft auch für die Anwendung in der Veterinärmedizin denkbar.

In der Literatur werden verschiedene Mischungen der Triple-Drip-Lösungen beschrieben. So kann Xylazin durch andere α_2 -Adrenozeptor-Agonisten ersetzt werden, in den meisten Fällen durch Detomidin (TAYLOR et al. 1995; LUNA et al. 1996; TAYLOR et al. 1998), aber auch durch Romifidin (MCMURPHY et al. 2002). Die Guaifenesin-Konzentration variiert zwischen 5 und 15 %, so dass im Falle einer Anwendung einer 15%igen Guaifenesin-Lösung diese möglichst zusammen mit einer Infusionslösung, wie zum Beispiel einer Ringer-Infusionslösung, infundiert werden sollte um das Risiko einer Thrombophlebitis zu minimieren (GRANDY u. MCDONELL 1980).

Bei Verwendung eines „Triple-Drip“ bestehend aus Xylazin, Ketamin und Guaifenesin werden in verschiedenen Studien je nach Anästhesiedauer und Autor unterschiedliche Dosierungen verwendet. Guaifenesin wird mit einer Infusionsrate zwischen 125 und 208 mg/kg/h, Ketamin mit einer Rate von 2,6 bis 5 mg/kg/h und Xylazin mit einer Geschwindigkeitsrate von 1,25 bis 2,08 mg/kg/h appliziert (GREENE et al. 1986; YOUNG et al. 1993; LIN et al. 1994; SPADAVECCHIA et al. 1999; MUIR et al. 2000; TAYLOR u. CLARKE 2007).

Die Anwendung des „Triple-Drip“ ist sehr vielseitig und kann bei den verschiedensten Eingriffen wie orthopädischen Eingriffen, Weichteiloperationen, Kopfoperationen

(YOUNG et al. 1993), Kastration (TAYLOR et al. 1998), abdominaler Kryptorchidektomie (MUIR et al. 2000) und Dystokie (LIN et al. 1994) eingesetzt werden.

Im direkten Vergleich zu einer Halothananästhesie werden ein signifikant höherer p_aO_2 und eine signifikant niedrigere Herzfrequenz und p_aCO_2 beschrieben (YOUNG et al. 1993). Daneben konnte auch eine Senkung des Hämatokritwertes, der Hämoglobinkonzentration, der Erythrozytenkonzentration und ein Anstieg des Glukoseplasmaspiegels beobachtet werden (YOUNG et al. 1993). Durch den Einsatz eines α_2 -Adrenozeptor-Agonisten entsteht eine Hypoinsulinämie und daraus resultierend eine Hyperglykämie und eine mögliche osmotische Diurese (THURMON et al. 1982; TRIM u. HANSON 1986; YOUNG et al. 1993; TAYLOR u. CLARKE 2007).

Neben den oben beschriebenen Kombinationen werden noch andere Kombinationen wie beispielsweise eine Ketamin-Climazolam, Midazolam-Ketamin-Medetomidin oder eine Kombination von Propofol mit verschiedenen Sedativa und Analgetika verwendet (BETTSCHEART-WOLFENSBERGER et al. 1996; LUNA et al. 1996; BETTSCHEART-WOLFENSBERGER et al. 2001; EDNER et al. 2002; BETTSCHEART-WOLFENSBERGER et al. 2003; BETTSCHEART-WOLFENSBERGER 2006; UMAR et al. 2006; WETTSTEIN et al. 2006; UMAR et al. 2007; YAMASHITA et al. 2007).

2.1.2 Beatmungsgasgemisch

Während bei einer Inhalationsnarkose allein aus technischer Sicht die Verwendung von Trägergasen in Kombination mit einem Inhalationsanästhetikum obligat ist, ist sie bei der Injektionsnarkose notwendig, wenn ein Atemsystem eingesetzt wird. Vor allem unter Feldbedingungen werden Pferde in Allgemeinanästhesie häufig nicht intubiert, so dass diese Raumluft einatmen. Unter Klinikbedingungen sind eine Applikation von reinem Sauerstoff, einer Mischung von reinem Sauerstoff mit Raumluft oder eine Applikation von Raumluft möglich.

In humanmedizinischen Studien wird eine Atemgasmischung mit einem Sauerstoffanteil von 30-35 % (NUNN et al. 1998) bis 40 % empfohlen (AGARWAL et al. 2002; BAUM 2004), doch ist dieser Anteil variabel auf die speziellen Bedürfnisse des Patienten einzustellen. Ein hoher inspiratorischer Sauerstoffanteil im Gasgemisch hat den Vorteil einer Abnahme der Anzahl von Wundinfektionen bei

abdominalen chirurgischen Eingriffen (GREIF et al. 2000) und einer kontrovers diskutierten Abnahme von postoperativen Nebenwirkungen wie Nausea und Vomitus (GREIF et al. 1999; GOLL et al. 2001; JORIS et al. 2003; PURHONEN et al. 2003a; PURHONEN et al. 2003b). Ein großer Nachteil besteht in der Begünstigung in der Bildung von Atelektasen (NEUMANN et al. 1999; AGARWAL et al. 2002). Bei Pferden in Rückenlage wird ein signifikanter Anstieg der Lungenventilation bei Insufflation von Raumluft anstatt reinem Sauerstoff beschrieben (STEGMANN u. LITTLEJOHN 1987). Bei spontan atmenden Pferden, die einen hohen Sauerstoffanteil im Gasgemisch hatten, ist außerdem eine vermehrte Hypoventilation und ein größerer Ventilations-Perfusions-Gradient festgestellt worden im Vergleich zu Pferden, die einen geringen Sauerstoffanteil im Gasgemisch hatten (CUVELLIEZ et al. 1990; MARNTELL et al. 2005).

Jedoch konnten die oft in humanmedizinischen Studien postulierten negativen Effekte einer hohen Sauerstoffkonzentration nicht immer bei der Anwendung beim Pferd nachgewiesen oder ausgeschlossen werden (SCHULTE-BAHRENBURG 2008).

2.2 Auswirkungen der Lagerung auf die Lungenfunktion

Aufgrund der Einschränkung von Thorax- und Diaphragmabewegungen durch eine Lagerung der narkotisierten Pferde in Seiten- und Rückenlage entsteht eine Hypoventilation mit ihren Folgeerscheinungen, wie eine CO₂-Retention, die zu einer respiratorischen Azidose führen kann. Außerdem kann bei einer Hypoventilation von Raumluft eine Hypoxämie entstehen (SCHATZMANN 1995). Dabei sind Pferde in Rückenlage stärker beeinträchtigt als in Seitenlage (SCHATZMANN et al. 1982; NYMAN et al. 1988; DAY et al. 1995; TAYLOR u. CLARKE 2007). Hier ist es vornehmlich der p_aO₂, der durch die Lagerung beeinflusst wird, wo hingegen der p_aCO₂ vor allem durch die Art der Beatmung beeinflusst wird (SCHATZMANN 1995).

2.2.1 Lungenfunktion am stehenden Pferd

Die Aufgabe des respiratorischen Systems ist die Oxygenierung des Blutes durch die Alveolen. Der Sauerstoff der eingeatmeten Luft gelangt durch die Ventilation in die Lungenalveolen. Von dort diffundiert er in die Lungenkapillaren und wird von den

Erythrozyten aufgenommen und zu den Gewebekapillaren transportiert, die die umgebenden Zellen mit Sauerstoff versorgen.

Aufgrund der hydrostatischen Kräfte innerhalb der Lunge ist beim stehenden Pferd vor allem ein Blutfluss in cranioventrale Richtung festgestellt worden (DOBSON et al. 1985) und unten liegende Bezirke der Lunge werden vermehrt durchblutet (GROS 2000). Andererseits wird ursächlich das druckpassive Verhalten der Lungengefäße beschrieben. Durch einen steigenden Gefäßinnendruck tritt eine Vasodilatation der betroffenen Gefäße ein und unten liegende, vorher nicht durchblutete Kapillaren, werden rekrutiert, während bei den oben liegenden das Gegenteil eintritt (GROS 2000).

Im Allgemeinen besteht beim stehenden Pferd ein ausgeglichenes Perfusions-Ventilationsverhältnis mit nur einem geringem pulmonalen Shunt (HEDENSTIERNA et al. 1987). Es konnte gezeigt werden, dass bei einer Minderbelüftung eines Teils der Lunge die sympathische und parasympathische Innervation im Gegensatz zum sogenannten Euler-Liljestrand-Mechanismus eine untergeordnete Rolle spielt (FLYNN et al. 1985; FORSTER et al. 1990). Dieser Reflex reguliert den Gefäßtonus in Abhängigkeit von der Ventilation bzw. dem Sauerstoffpartialdruck. Er wird auch als hypoxische pulmonale Vasokonstriktion bezeichnet, da durch diese eine effiziente Vasoregulation und damit eine Vermeidung von Shunts erreicht wird.

2.2.2 Lagerungsbedingte Lungenfunktionsstörungen

Die Funktion des respiratorischen Systems wird zum einen durch Applikation von Anästhetika und Sedativa und zum anderen durch die Lagerung des gesunden Pferdes beeinträchtigt (NYMAN et al. 1988; ROBINSON 1991). Dies macht sich durch einen deutlich reduzierten p_aO_2 bemerkbar. Dabei sind die Pferde in Rückenlage häufig schlechter oxygeniert als Pferde in Seitenlage (DE MOOR et al. 1974; NYMAN et al. 1988; NYMAN u. HEDENSTIERNA 1989).

Um den Effekt der Lagerung auf die Ventilation zu untersuchen, wurden Ponies in mehreren Studien so trainiert, dass sie sich bei vollem Bewusstsein in Seitenlage begaben und diese Position dann beibehielten. Während einige Autoren (RUGH et al. 1984) keine statistisch signifikanten Änderungen der Lungenfunktionsparameter nachweisen konnten und deswegen den größten Einfluss der Ventilationseinschränkung in der Allgemeinanästhesie den Medikamenten zuschrieben, ergaben im Gegensatz dazu andere Studien einen deutlichen Abfall

des Sauerstoffpartialdrucks und einen Anstieg der alveolo-arteriellen Sauerstoffdruckdifferenz. So konnte bei Verbringung der Tiere in Brustlage eine Verbesserung bzw. eine Verschlechterung bei Verbringung in Seitenlage beobachtet werden (HALL 1979, 1984; GLEED u. DOBSON 1988).

2.2.2.1 Mechanische Behinderung

Durch die Lagerung des anästhesierten Pferdes in Seiten- oder Rückenlage kommt es zu einer eingeschränkten Beweglichkeit des Thorax und der Atemmuskulatur und daraus resultierend zu einer Hypoventilation (SCHMIDT-OECHTERING 1993c; DAY et al. 1995).

Während bei in Rückenlage gelagerten Pferden vor allem der Gastrointestinaltrakt auf das Zwerchfell drückt und somit die Atmung behindert wird, schiebt sich beim in Seitenlage befindlichen Pferd das Diaphragma vor und komprimiert so die unten liegende Lungenhälfte. Dies konnte radiographisch durch eine Verkleinerung und Verdichtung der Lunge gezeigt werden (MCDONELL et al. 1979).

Durch den Druck des Gastrointestinaltraktes, vor allem bei der Lagerung des Pferdes auf dem Rücken, kommt es zu einer Überdehnung der Muskelfasern des Zwerchfells über die Optimallänge hinaus (BENSON et al. 1982), welches zu einer Belastung der Atemfunktion des Diaphragmas führt.

Als eine weitere Folge der Lagerung des Pferdes wird eine Abnahme der funktionellen Residualkapazität (FRC) beschrieben (ROBINSON 1991). Dadurch kommt es zu einer Annäherung an das Residualvolumen, welches nach maximaler Ausatmung noch in den Atemwegen verbleibt. Ab einer gewissen Reduktion der FRC kommt es zu einer Unterschreitung der „Closing-capacity“. Diese Größe kann als Schwelle zur Kollapsneigung angesehen werden (HEDENSTIERNA et al. 1976). Hinzu kommt der Verschluss kleiner Atemwege, die nicht von einem Knorpelgerüst gestützt werden und einen Durchmesser von unter 1 mm haben. Dieses bezeichnet man als „Airway-closure-Phänomen“ (D. B. CRAIG 1981). Die so abgekoppelten Alveolen stehen so höchstens noch eingeschränkt für den Sauerstoffaustausch zur Verfügung, da diese entweder kollabieren oder Luft einschließen. Je höher der Sauerstoffanteil ist, der eingeschlossen ist, desto schneller wird der Sauerstoff in die Blutbahn resorbiert und es entstehen schneller Atelektasen (AGARWAL et al. 2002). Daher werden diese auch als Resorptionsatelektasen bezeichnet.

2.2.2.2 Störung des pulmonalen Ventilations-/Perfusionsverhältnisses

Die Verteilung des pulmonalen Blutflusses erfolgt beim stehenden Pferd entlang eines vertikalen Gradienten aufgrund der Effekte der Gravitation (DOBSON et al. 1985). Oben liegende Lungenbezirke sind weniger durchblutet als unten liegende, aber trotzdem wird die Durchblutung je nach Bedarf durch reflektorische Änderungen gesteuert. Da in der Lunge ein Niederdrucksystem besteht, ist die Perfusion der Lunge nicht nur vom arteriellen und venösen Pulmonaldruck abhängig, sondern auch und vor allem von der Schwerkraft (ROBINSON 1991).

Für einen guten Gasaustausch ist das Verhältnis zwischen Ventilation und Perfusion in der Lunge elementar. Daher wird dieses Verhältnis beim stehenden Pferd durch den Euler-Liljestrand-Mechanismus, auch hypoxische pulmonale Vasokonstriktion genannt, angepasst (GROS 2000; MARLIN 2006; SOMMER et al. 2008). Durch die Lagerung werden diese Kontrollmechanismen negativ beeinflusst, wobei die Rückenlage sich stärker auswirkt als die Seitenlage (MOENS et al. 1995).

Beim stehenden Pferd findet man im Allgemeinen eine gute Übereinstimmung zwischen Ventilation und Perfusion und keinen bestimmten Bezirk, der ein weites Ventilations-/Perfusionsverhältnis hat (HEDENSTIERNA et al. 1987). Jedoch wurden während einer Allgemeinanästhesie sowohl Lungenareale mit erhöhtem als auch mit erniedrigtem Perfusions-/Ventilationsgradienten erkannt. Oben liegende Lungenbezirke werden gut belüftet, aber schlecht durchblutet und unten liegende werden schlecht belüftet aber dafür gut durchblutet (HEDENSTIERNA et al. 1987).

2.2.2.3 Zunahme des intrapulmonalen Rechts-links-Shuntvolumens

Intrapulmonale Rechts-links-Shunts sind gekennzeichnet durch eine fehlende Oxygenierung des venösen Blutes in Lungenkompartimenten, die gut durchblutet, aber nicht ventiliert sind. Daher wird dieser Zustand auch als funktioneller Shunt bezeichnet (GROS 2000). Sie sind die Folge eines großen Ventilations-/Perfusionsgradienten, die vor allem in den unten liegenden Lungenarealen zu finden sind (DOBSON et al. 1985). Aufgrund des fehlenden Gasaustausches in den betroffenen Lungenkompartimenten ist die Blutzusammensetzung gleich dem gemischt-venösen Blut. Die Entstehung dieser Shunts wird hervorgerufen durch das Kollabieren von Alveolen oder wenn diese durch eine mechanische Obstruktion nicht ventiliert werden (ROBINSON 1991).

Beim stehenden Pferd wurde ein Shuntanteil von etwa 5 % festgestellt (HEDENSTIERNA et al. 1987).

Bei einem anästhesierten Pferd beträgt der Shuntanteil abhängig von der Lagerung 20 % (Seitenlage) bis 34 % (Rückenlage) (NYMAN u. HEDENSTIERNA 1989). Dies hat eine Hypoxämie zur Folge. In einer Studie zeigten 35 % der in Rückenlage gelagerten Pferde und 20 % der in Seitenlage gelagerten Pferde am Ende der Allgemeinanästhesie eine arterielle Hypoxämie ($p_aO_2 < 60$ mmHg) (DAY et al. 1995). Beide Lungenhälften werden jedoch unabhängig von der Lagerung gleichmäßig mit Blut versorgt (DOBSON et al. 1985; NYMAN u. HEDENSTIERNA 1989), obwohl gezeigt werden konnte, dass das am weitesten unten gelegene Lungenkompartiment bei der Seitenlagerung weniger ventilert ist und kleiner erscheint (MCDONELL et al. 1979). Außerdem scheint eine positive Korrelation zwischen dem Körpergewicht des Pferdes und dem Auftreten von Shunts (STEGMANN u. LITTLEJOHN 1987) sowie des p_aO_2 (MANSEL u. CLUTTON 2008) bei sich in Rückenlage befindenden Tiere zu bestehen.

Schon nach etwa 20 Minuten nach Verbringen der Tiere in Rücken- oder Seitenlage konnten röntgendichte Areale mittels Computertomographie diagnostiziert werden, die als atelektatische Bereiche interpretiert wurden (NYMAN et al. 1990). Von den Autoren wurde ein Zusammenhang zwischen der gemessenen respiratorischen Insuffizienz bzw. des eingeschränkten Gasaustausches und der Größe der röntgendichten Bereiche erkannt und daher eine Korrelation zwischen den Atelektasen und der Hypoxämie geschlussfolgert. Bei der histologischen Untersuchung der atelektatischen Bereiche zeigte sich eine Gefäßstauung mit Diffusion von Blut in die Alveolen. Dies kann auch Ausdruck eines erhöhten Gefäßinnendrucks sein (NYMAN et al. 1990).

2.2.2.4 Intraoperative Entstehung von Atelektasen – mögliche Mechanismen

2.2.2.4.1 Kompressionsatelektasen

Das Diaphragma fungiert als Grenze zwischen den beiden Körperhöhlen Thorax und Abdomen. Im Thorax ist der endexpiratorische Druck niedriger als im Abdomen. Durch den Muskeltonus des Zwerchfells wird dieser Druckunterschied aufrechterhalten. Während einer Allgemeinanästhesie ist der Muskeltonus gesenkt,

so dass der abdominale endexpiratorische Druck sich dem intrathorakalen angleicht. Dadurch können Kompressionsatelektasen zustande kommen.

Als indirekter Beweis werden Allgemeinanästhesien mit Ketamin angesehen, da dieser Wirkstoff die Funktion und den Tonus der Atemmuskulatur aufrechterhält und Ventilation und Perfusion der Lunge weniger beeinträchtigt waren (TOKICS et al. 1987b).

In einer anderen Studie wurde durch die Stimulation des Nervus phrenicus während einer Allgemeinanästhesie das Zwerchfell angespannt und so die Anzahl und Größe der Atelektasen unter iso-volumetrischen Bedingungen reduziert (HEDENSTIERNA et al. 1994).

2.2.2.4.2 Resorptionsatelektasen

Im Gegensatz zu Kompressionsatelektasen kommen Resorptionsatelektasen vor allem durch hohe Sauerstoffgehalte im Gasgemisch zustande (ROTHEN et al. 1995b; BENOIT et al. 2002; SUTTNER u. BOLDT 2005). Eine Abnahme der pulmonalen Verschlusskapazität, bei der es durch eine Abnahme des transpulmonalen Drucks zu einem plötzlichen Verschluss der terminalen Atemwege kommt, führt in den Alveolen zum Einschluss von Atemgas (MAX u. DEMBINSKI 2000). Je nach Zusammensetzung des Gasgemisches erfolgt ein unterschiedlich schnelles Auftreten von Atelektasen. Da Sauerstoff im Gegensatz zu Stickstoff eine höhere Blutlöslichkeit besitzt und damit schneller in den Alveolen resorbiert wird, bewirken hohe Sauerstoffkonzentrationen eine schnellere Atelektasenbildung (JOYCE et al. 1993; ROTHEN et al. 1995a; BENOIT et al. 2002; SUTTNER u. BOLDT 2005).

Beim Pferd hingegen scheinen Resorptionsatelektasen im Gegensatz zu Kompressionsatelektasen eine geringere Rolle zu spielen und der Sauerstoffanteil im Gasgemisch nicht entscheidend für eine Atelektasenbildung zu sein (SCHULTE-BAHRENBURG 2008). Die Bedeutung von Resorptionsatelektasen beim Pferd ist noch nicht weiter untersucht worden, doch vermutet man, dass eher Kompressionsatelektasen und ein Missverhältnis von Ventilation und Perfusion verantwortlich sind für einen gestörten Gasaustausch (SCHULTE-BAHRENBURG 2008). Dagegen sind MARNTELL et al. (2005) unschlüssig, welcher Atelektasentyp eine größere Rolle für das Auftreten von pulmonalen Shunts spielt.

2.2.2.5 Totraumventilation

Im Falle von Ventilationsstörungen während einer Allgemeinanästhesie können Alveolarbereiche auftreten, die ventiliert, aber nicht perfundiert sind. In diesen Fällen findet kein Gasaustausch statt und der funktionelle Totraum vergrößert sich. Dieser setzt sich aus zwei Teilen zusammen, dem anatomischen und dem alveolären Totraum (BURCHARDI 1982; GROS 2000; SILBERNAGL 2001).

Bei einer erhöhten funktionellen Totraumventilation ist der Gasaustausch für Kohlendioxid messbar gestört, daher ist eine Berechnung mittels der Parameter $p_a\text{CO}_2$ und EtCO_2 möglich (WHITESELL et al. 1981; BURCHARDI 1982). Ein Grund für eine Vergrößerung des alveolären Totraums kann eine ungleiche Verteilung des Blutflusses in der Lunge sein (SEVERINGHAUS u. STUPFEL 1957).

In einer Studie von MOENS (1989) war der alveoläre Totraum positiv korreliert mit dem Gewicht der Probanden, der Lagerung in Rückenlage, einer Beatmung mittels IPPV und der Anästhesiedauer. Die Pferde, die künstlich mittels IPPV beatmet wurden, hatten einen hochsignifikant größeren alveolären Totraum als die spontan atmenden Probanden. Aber auch das Körpergewicht des Pferdes hatte einen hochsignifikanten Einfluss auf den alveolären Totraum (MOENS 1989). Keinen Einfluss auf die Größe des alveolären Totraums hat die inspiratorische Sauerstoffkonzentration im Atemgasgemisch beim Pferd (SCHULTE-BAHRENBURG 2008).

Eine humanmedizinische Studie von WHITESELL et al. (1981) beschreibt eine positive Korrelation zwischen der Größe des alveolären Totraums und einer Lungenerkrankung, dem Alter, dem Allgemeinbefinden und dem systolischen Blutdruck.

2.3 Ventilation während der Allgemeinanästhesie

Um eine sichere Allgemeinanästhesie zu erzeugen, ist die Aufrechterhaltung einer physiologischen Atmung ein entscheidender Gesichtspunkt (MUIR et al. 2007). Hilfsmaßnahmen mittels Beatmung sollen einer Hypoventilation vorbeugen und zusätzlich das Atemminutenvolumen stabilisieren oder erhöhen. Die einzige zwingende Indikation für eine Beatmung stellt die Apnoe dar (HUBBELL 1991b). Andere Indikationen sind ein Absinken des Atemzugvolumens oder der Atemfrequenz auf weniger als vier Atemzüge pro Minute, sowie ein Anstieg des

Kohlendioxidpartialdrucks auf über 75 mmHg und eine insuffiziente Oxygenierung des arteriellen Blutes (HUBBELL 1991b; TAYLOR u. CLARKE 2007). Dabei variieren bei verschiedenen Autoren die oberen bzw. unteren Grenzwerte zur Beatmung für den arteriellen Sauerstoffpartialdruck zwischen <60 und <100 mmHg und die für den arteriellen Kohlendioxidpartialdruck zwischen >55 und >75 mmHg (HUBBELL 1991b; SCHATZMANN 1995; TAYLOR u. CLARKE 2007).

2.3.1 Einfluss des Sauerstoffanteils im Atemgasgemisch

Bei einem Großteil der Allgemeinanästhesien unter Feldbedingungen steht nur der in Raumlufte enthaltene Sauerstoffanteil von 21 % zur Verfügung. Um jedoch den mit Raumlufte erreichten arteriellen Sauerstoffpartialdruck zu erhöhen, müsste Sauerstoff der Inspirationslufte hinzugefügt werden. Dies ist bei Allgemeinanästhesien unter Klinikbedingungen leicht durchführbar, so dass oft reiner Sauerstoff als Trägergas verwendet wird. Jedoch hat dies nicht nur Vorteile, so dass einige Untersuchungen dazu durchgeführt wurden.

Bei einer Beatmung von Pferden nach einem modifizierten „Open-Lung-Concept“ (HOPSTER 2007; SCHULTE-BAHRENBURG 2008) von Risikopatienten in Rückenlage konnte ein ähnlicher Oxygenierungsindex, errechnet aus dem Quotienten p_aO_2/FiO_2 , bei Sauerstoffkonzentrationen von 35% und 90% erreicht werden. Ein signifikant schlechterer Oxygenierungsindex wurde mit 55% erzielt (SCHULTE-BAHRENBURG 2008). Während einer Anästhesie mit dissoziativen Anästhetika bei Pferden war die Entwicklung von pulmonalen Shunts unter Spontanatmung signifikant erhöht, wenn die Pferde 95 % Sauerstoff eingeatmet haben im Gegensatz zur Einatmung von Raumlufte mit einem durchschnittlichem Sauerstoffgehalt von 21 % (MARNTALL et al. 2005). Diese Resultate decken sich mit den Erkenntnissen humanmedizinischer Studien, bei denen ein Sauerstoffgehalt von 40 % bei gesunden Patienten als ideal angesehen wird, da ein Gehalt von 100 % vermehrt zu Atelektasen führt (ROTHEN et al. 1995a; AGARWAL et al. 2002) sowie zu einer höheren Neigung zur Bildung von arteriell-venösen Shunts (ROTHEN et al. 1995a). Besonders nach Rekrutierungsmanövern ist beim Menschen der Sauerstoffanteil entscheidend für die Zeitdauer bis zum Wiederauftreten von Atelektasen. Bei einem O_2 -Gehalt von 100% geschieht das nach fünf Minuten, bei einem O_2 -Gehalt von 40% jedoch erst nach 40 Minuten (ROTHEN et al. 1995a). Aber nicht nur während der Narkoseerhaltung sind Effekte verschiedener

Sauerstofffraktionen sichtbar. Bei der Narkoseinduktion sind bei einem O₂-Anteil von 100% die Shuntfraktion und die Atelektasenbildung signifikant höher als bei einem O₂-Anteil von 30% (ROTHEN et al. 1996). Ohne Präoxygenierung vor der Intubation der Probanden schien keine Atelektasenbildung aufzutreten, während bei einer Sauerstoffinsufflation von 100% diese auftraten (ROTHEN et al. 1995b; REBER et al. 1996). Doch nicht nur bei der Intubation, sondern auch vor der Extubation fördert ein Sauerstoffanteil von 100% die Atelektasenbildung (BENOIT et al. 2002). Alle gewonnenen Ergebnisse zeigen den hohen Stellenwert der angewandten Sauerstofffraktion im Beatmungsgasgemisch (MAGNUSSON u. SPAHN 2003).

2.3.2 Spontanatmung

Durch Anästhetika kann die Atemfunktion stark reduziert werden. Diese atemdepressive Wirkung wird vor allem bei Inhalationsanästhetika beschrieben (LÖSCHER et al. 2006; TAYLOR u. CLARKE 2007). Daher kann es bei bestimmten Anästhetika-Konzentrationen zu einer deutlichen Reduktion des Atemminutenvolumens und damit zu ungenügender Aufnahme und Elimination des Anästhetikums kommen (MUIR et al. 2007).

Ein großer Vorteil der spontanen Atmung gegenüber der künstlichen Beatmung besteht in der geringeren kreislaufdepressiven Wirkung. Da bei der physiologischen Inspiration ein Unterdruck im Thorax besteht, wirkt dieser unterstützend auf den venösen Rückfluss zum Herzen (HUBBELL 1991b; SCHMIDT-OECHTERING 1993c) und erhöht die Herzauswurfleistung, was durch den Frank-Starling-Mechanismus erklärbar ist (TAYLOR u. CLARKE 2007). Dieser bewirkt am Herzen bei steigender Vorlast durch eine Vordehnung des Myokards eine gleichzeitige Erhöhung des Schlagvolumens (HARMEYER 2000; SILBERNAGL 2001).

2.3.3 Beatmungsschemata

Um eine Ventilation während der Allgemeinanästhesie aufrechtzuerhalten oder ggf. das Atemminutenvolumen zu erhöhen, kann eine künstliche Beatmung notwendig sein (HUBBELL 1991b; SCHMIDT-OECHTERING 1993c). Diese ist vor allem notwendig, wenn eine Hyperkapnie auftritt (SCHMIDT-OECHTERING 1993c).

2.3.3.1 Kontrollierte Beatmung mit IPPV

Eine der einfachsten Beatmungsformen ist das manuelle rhythmische Komprimieren des Atembeutels, das aber routinemäßig mit einem Respirator durchgeführt wird (HALL u. CLARKE 1991a). Diese Beatmungsform wird als „intermittent positive pressure ventilation“ (IPPV), zu deutsch „intermittierende positive Druckbeatmung“, bezeichnet (SCHATZMANN 1995). Bei dieser Beatmung wird aktiv ein inspiratorischer Druck aufgebaut. Die Expiration erfolgt passiv durch die Elastizität des Brustkorbes. Die IPPV gehörte in der Humanmedizin zu den Standardverfahren in der Anästhesie, wird aber heute nur noch in seltenen Fällen eingesetzt. Dagegen gehört sie in der Veterinärmedizin immer noch zu den häufig angewandten Beatmungstechniken.

Bei der IPPV-Beatmung bei erwachsenen Großpferden werden endinspiratorische Drücke von 25-30 cm H₂O, eine Atemfrequenz von 5-8 pro Minute und ein Atemzugvolumen von 10-15 ml/kg KGW empfohlen (WEAVER u. WALLEY 1975; STEFFEY 1981; SCHATZMANN 1995; TAYLOR u. CLARKE 2007). Je höher der endinspiratorische Druck ist, desto größer ist die Gefahr negativer Auswirkungen auf das Herz-Kreislaufsystem, wie eine verringerte Herzauswurfleistung und ein Absinken des Blutdrucks (MIZUNO et al. 1994; TAYLOR u. CLARKE 2007). Außerdem sind weder eine signifikante Erhöhung der arteriellen Oxygenierung noch eine Reduktion des Rechts-links-Shunts während einer kontrollierten Beatmung zu beobachten (NYMAN u. HEDENSTIERNA 1989).

In einer humanmedizinischen Studie konnte sogar gezeigt werden, dass sich die quantitative Ausprägung von Atelektasen bei der kontrollierten Beatmung nicht von der bei der spontanen Atmung unterscheidet (TOKICS et al. 1987a).

2.3.3.2 Das Open-Lung-Concept

Das Konzept der offenen Lunge und des Offenhaltens der Lunge wurde entwickelt, um eine verbesserte alveoläre Rekrutierung und Lungenbelüftung zu erreichen (AGRO et al. 2004). Das Ventilationskonzept basiert auf dem Gesetz von La Place und soll helfen, atelektatische Lungenbezirke durch eine Erhöhung des Atemwegspitzendrucks aktiv zu öffnen, um anschließend durch einen PEEP die Alveolen offen zu halten (LACHMANN 1992; BÖHM et al. 1999; BÖHM u. BANGERT 2000; PAPADAKOS u. LACHMANN 2007).

Die ursprüngliche Ventilationsstrategie basiert auf einer individuellen Titration des end-expiratorischen Drucks für jeden Patienten. Dies wurde jedoch in späteren Studien für eine höhere Praktikabilität standardisiert und feste Druckwerte wurden vorgegeben (ROTHEN et al. 1995a; TUSMAN et al. 1999; TUSMAN et al. 2004). Beim Menschen wurden die positiven Effekte dieser Beatmungsstrategie nachgewiesen. So erkannte man einerseits eine höhere Effizienz einer Beatmung beim sich in Allgemeinanästhesie befindlichen Patienten (TUSMAN et al. 2004) und andererseits eine verbesserte arterielle Oxygenierung, einen optimierten Gasaustausch und eine signifikant verbesserte Compliance der Lunge (TUSMAN et al. 1999; PAPADAKOS u. LACHMANN 2002). Beim Pferd konnten diese positiven Effekte in gleichem Maße nachgewiesen werden, insbesondere beim Risikopatienten (HOPSTER 2007; SCHÜRMAN et al. 2008).

2.3.4 Unerwünschte Wirkungen der Beatmung

Durch die mechanische Beatmung des Pferdes können verschiedene unerwünschte Nebenwirkungen auftreten. Diese entstehen vor allem durch die veränderten Druckverhältnisse im Thorax. Im Gegensatz zur Spontanatmung wird bei der künstlichen Beatmung durch den Überdruck der venöse Rückstrom zum Herzen reduziert, was zu einer Abnahme des Herzzeitvolumens führt. Dies wiederum hat eine schlechtere Lungenperfusion zur Folge (MORGAN et al. 1967; SCHMIDT-OECHTERING 1993c; SCHATZMANN 1995).

Außerdem wird diskutiert, ob als Folge einer Abnahme des $p_a\text{CO}_2$ und die dadurch reduzierte Ausschüttung von Katecholaminen und die damit einhergehende verringerte Stimulation des Sympathikus eine Verringerung des Herzzeitvolumens verursacht wird (WAGNER et al. 1990; KHANNA et al. 1995). Eine weitere Folge der Hyperventilation und einer arteriellen Hypokapnie ist eine mögliche cerebrale Ischämie, da die Gehirndurchblutung wesentlich über die Kohlendioxidspannung gesteuert wird (SCHMIDT-OECHTERING 1993c).

Durch hohe Beatmungsdrücke bei der künstlichen Beatmung kann es durch Überdehnung und Überblähung der Alveolen zu einer Lungenparenchymschädigung kommen (BURCHARDI u. SYDOW 1994). Außerdem wird durch wiederholtes Kollabieren und erneutes Aufblähen der Alveolen die Flüssigkeitsbalance zwischen der alveolokapillären Membran gestört. Daher sollte mit möglichst geringen

Beatmungsdrücken und einer Beatmungstechnik, die die Alveolen wiedereröffnet und offen hält, gearbeitet werden (VERBRUGGE u. LACHMANN 1999).

2.4 Narkosekomplikationen

Die Zahl von Narkosekomplikationen und perioperativen Todesfällen unterliegt großen Schwankungen. So wird beim Menschen die perioperative Todesrate mit ca. 1/10000 (LUNN u. MUSHIN 1982), beim Hund mit 1/1000 (DYSON et al. 1998) und beim Pferd mit 1,6 - 2,1/100 (JOHNSTON et al. 2002; JOHNSTON et al. 2004) angegeben.

Insbesondere beim Pferd spielen viele Faktoren eine Rolle. So sind Kolikoperationen besonders risikoreich und haben einen schwerwiegenden Einfluss auf die Todesrate. Nimmt man die Kolikoperationen aus der Statistik heraus, liegt die durchschnittliche perioperative Todesrate bei ca. 0,9 % (JOHNSTON et al. 2002). Auch die Art der Allgemeinanästhesie scheint einen Einfluss auf die Komplikationsrate zu haben, da bei total intravenösen Anästhesien die Todesrate auf 0,31% sinkt (JOHNSTON et al. 2002). Ohne dass allerdings in dieser Studie die Inhalationsnarkose und die TIVA direkt miteinander verglichen wurden, wurde unter anderem die Narkosezeit nicht analysiert, obwohl bei längerer Anästhesiedauer und Operationszeit das Narkoserisiko steigt (JOHNSTON et al. 1995).

Die am häufigsten vorkommenden Zwischenfälle, die zum Tod der Pferde führen können, sind intraoperative Herz-Kreislaufversagen, sowie Frakturen und Myopathien, die sich während der Aufstehphase manifestieren. Eine Ursache von Frakturen sind Muskelschäden, die auf eine ungenügende Oxygenierung der Muskulatur aufgrund von Kreislaufinsuffizienzen und Hypoxien zurückzuführen sind (GRANDY et al. 1987; JOHNSTON et al. 2004).

2.4.1 Intraoperative Narkosekomplikationen

Bei den Komplikationen kann zwischen zwei Gruppen von Zwischenfällen unterschieden werden, kardiovaskuläre und respiratorische Probleme. Beide können im schlimmsten Fall zum Tod des Patienten führen.

Viele Anästhetika wirken depressiv auf das Gehirn und somit auch auf die Medulla oblongata und das Atemzentrum. Dadurch sinken die Atemfrequenz und das

Atemminutenvolumen mit einer daraus resultierenden Hypoventilation oder sogar Apnoe (MUIR 1991).

Häufig ist eine unzureichende Überwachung der Grund für eine unbemerkte oder nicht behandelte Ateminsuffizienz, die so eine der Hauptgründe für das Versterben des Patienten während einer Allgemeinanästhesie darstellt (ALEF u. OECHTERING 1998). Beim erwachsenen Pferd tritt ein Atemstillstand nicht nur häufig nach längerer Ateminsuffizienz, sondern vor allem auch als sekundäre Folge eines nicht beachteten Kreislaufversagens auf (SCHATZMANN 1995).

In den meisten Fällen ist ein Kreislaufversagen multifaktoriell bedingt und kann verschiedene Gründe haben. Zu diesen zählen Hypovolämie, Vasodilatation und ein inadäquates Herzminutenvolumen (CLARKE 1993). Außerdem kann ein Kreislaufversagen von Hypoxien und von Störungen im Herzrhythmus und der peripheren Gefäßregulation ausgehen (SCHATZMANN 1995).

Der Herzstillstand ist definiert als das plötzliche und unerwartete Versagen der Herz-Kreislauf-Funktion. Er führt zum klinischen Tod, der eine Phase darstellt, in der eine Wiederbelebung möglich ist (SCHMIDT-OECHTERING 1993a).

Die drei Hauptarten des Herzstillstands sind ventrikuläre Fibrillation, Asystolie und elektromechanische Dissoziation. Die meisten Fälle scheinen idiopathisch bedingt zu sein und der Herzstillstand kann ohne jede Vorwarnung eintreten (TAYLOR u. CLARKE 2007). Beim Kammerflimmern liegt eine hochfrequente asynchrone Erregung und Kontraktion der Kammermuskulatur vor, deren Entwicklung durch eine Hyperkaliämie, Hyperkalzämie oder eine Ischämie begünstigt werden kann (LANG 1979). Die elektromechanische Dissoziation, auch elektromechanische Entkopplung genannt, ist eine Sonderform des Kreislaufstillstandes, bei der trotz normaler elektrischer Aktivität des Herzens, keine Auswurfleistung in Form eines Pulses erbracht wird. Unter einer Asystolie versteht man den völligen Ausfall von Erregungsbildung und -leitung (LANG 1979).

2.5 Monitoring

Die Patientenüberwachung beim Pferd nimmt einen immer wichtiger werdenden Stellenwert ein. Dies liegt auch an den immer häufiger vorhandenen technischen Hilfsmitteln, die aus der Humanmedizin übernommen werden. Um Nebenwirkungen von Sedativa und Anästhetika so früh wie möglich entgegenwirken zu können, ist eine engmaschige und frequente Überwachung intra- und postoperativ nötig.

Während der Allgemeinanästhesie sind sowohl die Narkosetiefe mittels Kontrolle der Atmung, der Reflexe und des Muskeltonus als auch die Vitalparameter wie Herzfrequenz und mittlerer arterieller Blutdruck zu überwachen.

2.5.1 Die Atmung

Da fast alle Anästhetika die Atmung beeinträchtigen, ist die Überwachung der Atmung wichtig, um die beiden Hauptaufgaben sicherzustellen: die Versorgung des Organismus mit Sauerstoff und die Abgabe von Kohlendioxid. Die Voraussetzung dafür ist ein ausreichendes Atemminutenvolumen. Im Falle respiratorischer Insuffizienzen kann es schon nach wenigen Minuten zu irreversiblen Schädigungen kommen (SCHMIDT-OECHTERING 1993b).

Um eine gute Überwachung der Ventilation zu gewährleisten, kann auch ohne teures Equipment die Atemfrequenz und die Qualität der Atmung mittels Beobachtung der Brustwand und des Atembeutels beurteilt werden. Eine niedrige Atemfrequenz oder eine Apnoe können so leicht erkannt werden, jedoch kann keine gesicherte Aussage über den pulmonalen Gasaustausch, im speziellen über eine Hypoxie oder eine Hyperkapnie vorgenommen werden (TAYLOR u. CLARKE 2007). Dafür stehen nicht invasive Methoden wie die Kapnographie und die Pulsoxymetrie zur Verfügung. Diese können aber nicht die arterielle Blutgasanalyse ersetzen (HALL u. CLARKE 1991b; SCHMIDT-OECHTERING 1993b). Bei dieser werden pH-Wert, p_aO_2 , p_aCO_2 , sowie die arterielle Sauerstoffsättigung bestimmt, so dass diese eine gute Einschätzung des pulmonalen Gasaustausches und somit eine Anpassung der Ventilation und des Sauerstoffangebots zulässt. So kann auch eine Hypoxämie zuverlässig diagnostiziert und therapiert werden. Durch die arterielle Blutgasanalyse lässt sich unter anderem das Ausmaß des bei anästhesierten Pferden vorkommenden Ventilations-Perfusions-Missverhältnisses bestimmen, da der arterielle Gehalt an CO_2 im Allgemeinen höher ist als der expiratorisch ermittelte (HUBBELL 1991a; TAYLOR u. CLARKE 2007). Diese beiden Werte, $EtCO_2$ und p_aCO_2 korrelieren sowohl bei spontan atmenden Pferden als auch bei mechanisch ventilierten Pferden positiv miteinander (DOBSON et al. 1985; CRIBB 1988). Außerdem lässt sich beim Menschen und beim Pferd der alveoläre Totraum mittels der Berechnung $V_{Dalv}/V_{Talv} = ((p_aCO_2 - EtCO_2) / p_aCO_2) \times 100$ abschätzen (CRIBB 1988; MARINO u. SUTIN 2007). Die Beziehung zwischen dem Sauerstoffpartialdruck und der Sauerstoffsättigung wird durch die Bindungskurve beschrieben. Der obere flache Teil der Bindungskurve

dient physiologisch als Hypoxygenationsschutz bei Variationen des Sauerstoffpartialdrucks, der untere steile Verlauf beschreibt eine effektive Ent- bzw. Aufsättigung. Bei einem Sauerstoffpartialdruck über 100 mmHg kommt es zu keiner Veränderung der Sättigungskurve. Die Lage der Bindungskurve beschreibt die Hämoglobin-Sauerstoff-Affinität, welche die Stärke der Bindung zwischen Hämoglobin und O₂ bedeutet. Verschiebt sich die Bindungskurve nach links, nimmt die Hb-O₂-Affinität zu (erschwerter O₂-Abgabe) und umgekehrt bedeutet eine Rechtsverschiebung eine Hb-O₂-Affinitätsabnahme (erleichterter O₂-Abgabe). Vor allem kann ein erniedrigter pH-Wert, aber auch ein erhöhter arterieller Kohlendioxidpartialdruck diese Kurve nach rechts verschieben. Des Weiteren kann die Kurve durch die Temperatur und die 2,3-Diphosphoglyzeratkonzentration verschoben werden. Eine Rechtsverschiebung bedeutet, dass ein höherer pO₂ nötig ist, um die gleiche Sauerstoffsättigung zu erlangen. Dieser Effekt wird auch Bohr-Effekt genannt (GROS 2000; MARINO u. SUTIN 2007).

2.5.2 Herz und Kreislauf

Die Kontrolle des Pulses ist eine einfache und nichtinvasive Methode, die Herzleistung mittels Frequenz, Rhythmus und Füllungszustand zu beurteilen (SCHMIDT-OECHTERING 1993b).

Um die Herzfrequenz und den Rhythmus des Herzens zu beurteilen, wird ein Elektrokardiogramm eingesetzt, welches jedoch zur Erkennung von Herzmuskelstörungen infolge von Perfusions- und Sauerstoffmangel nur eingeschränkt geeignet ist (HUBBELL 1991a; SCHATZMANN 1995). Intraoperative Herzstillstände im Sinne einer Störung der Pumpfunktion können außerdem nicht zeitnah registriert werden, da die QRS-Komplexe meistens erst nach einer gewissen Zeit nach Aussetzen der Pumpfunktion ausfallen und die Nulllinie erreicht wird (TAYLOR u. CLARKE 2007).

Neben der Kontrolle des Pulses und der Atmung ist die Messung des Blutdrucks ein wesentlicher Bestandteil der Überwachung bei Pferden in Allgemeinanästhesie. Zum einen kann dieser indirekt mittels Blutdruckmanschette an einer Gliedmaße oder an der Schweifrübe gemessen werden, jedoch ist diese oszillometrische Methode beim Pferd wenig zuverlässig. Zum anderen kann der Blutdruck direkt mittels arteriellen Verweilkatheters ermittelt werden, indem dieser durch ein flüssigkeitsgefülltes Schlauchsystem mit einem Druckaufnehmer verbunden wird. Dort wird die im

Schlauch weitergeleitete arterielle Druckwelle in elektrische Signale umgewandelt (SCHMIDT-OECHTERING 1993b; TAYLOR u. CLARKE 2007). Neben dem systolischen und diastolischen Blutdruck wird besonders der mittlere Blutdruck zur Beurteilung der Gewebepfusion bewertet. Dieser sollte nicht unter 60 mmHg fallen (HUBBELL 1991a; DOHERTY u. VALVERDE 2006; TAYLOR u. CLARKE 2007), da sonst das Risiko einer postoperativen Myopathie ansteigt.

2.5.3 Reflexe

Die Überprüfung von Nystagmus und des Korneal- und Palpebralreflexes können zur Einschätzung der Narkosetiefe herangezogen werden (HUBBELL 2007). Jedoch muss beachtet werden, dass die jeweilige Reflexantwort durch die Art der verwendeten Anästhetika stark verändert werden kann (SCHMIDT-OECHTERING 1993b). So ist unter anderem bei der total intravenösen Anästhesie durch die Verwendung von Ketamin ein Blinzeln des Auges, eine zentrale Bulbusposition, eine gesteigerte okulogyrische Aktivität und Lakrimation trotz ausreichender Narkosetiefe möglich. Daher müssen die Reflexe differenziert zur Inhalationsnarkose betrachtet werden (HUBBELL 1991a; DOHERTY u. VALVERDE 2006).

2.5.4 Postoperatives Monitoring

Die postoperative Phase beginnt mit dem Applikationsende des Anästhetikums und endet mit dem sicheren Stand des Pferdes. Sie hat ein hohes Gefahrenpotential aufgrund von möglichen Verletzungen, Frakturen und Myopathien und besitzt einen großen Einfluss auf die perioperative Todesrate (SCHATZMANN 1995; DOHERTY u. VALVERDE 2006).

Während der Aufstehphase kann die Atemfrequenz und die Atemzugtiefe anhand der Atembewegungen des Pferdes bewertet werden. Zusätzlich kann bis zur Extubation der periphere Puls palpiert werden und so die Herzfrequenz bestimmt werden. Anhand der Pulsqualität können jedoch nur bedingt Rückschlüsse auf den peripheren Blutdruck gezogen werden. Außerdem kann die Farbe der Schleimhäute sowie die kapilläre Füllungszeit beurteilt werden. Nach Verlassen der Aufwachbox ist eine Kontrolle der Herz-Kreislaufparameter nicht ohne erheblichen technischen Aufwand möglich. Die Analyse von Säure-Basenparametern ist bis zur Extubation durch Punktion einer der Äste der A. facialis möglich. Um die Qualität der

Aufstehphase möglichst objektiv beurteilen zu können gibt es verschiedene Systeme, die eine Scorewertung der Qualität sowie eine Erfassung des zeitlichen Ablaufs beinhalten. Unter der Qualität der Aufstehversuche werden die Koordination dieser sowie das Verhalten in Seiten- und Brustlage und im Stehen zusammengefasst (GLITZ et al. 2001). Verschiedene Faktoren beeinflussen die Anzahl und die Qualität der Aufstehversuche. Zu diesen Faktoren zählen die verwendeten Anästhetika, die Lagerung in der Aufwachbox und die Narkosedauer.

3 Material und Methode

3.1 Patientenmaterial

Für die durchgeführten Untersuchungen wurden 42 Patienten der Klinik für Pferde der Stiftung Tierärztliche Hochschule Hannover ausgewählt, an denen elektive chirurgische Eingriffe in Allgemeinanästhesie erfolgten.

Das Körpergewicht der Probanden lag über 400 kg mit einem Alter von 2-20 Jahren. Alle Probanden hatten ein ungestörtes Allgemeinbefinden, welches durch eine klinische Allgemeinuntersuchung präoperativ untersucht wurde.

Diese Patienten wurden in drei Gruppen zu jeweils 14 Pferden eingeteilt. Nach zufälliger Zuordnung eines Probanden in eine der drei Gruppen wurde der nächste Proband mit vergleichbarer Art des Eingriffs und ähnlichem Gewicht einer der beiden anderen Gruppen zugeordnet.

3.1.1 Einteilung der Patienten in Gruppen

42 Pferde wurden auf die drei Gruppen randomisiert über eine Zufallsliste verteilt. Jeweils ein Drittel der gesamten Probanden atmete spontan, ein Drittel wurde mit der konventionellen intermittierenden positiven Druckbeatmung und ein Drittel nach dem modifizierten „Open-Lung-Concept“ beatmet.

mOLC-Beatmung – Gruppe A

14 Probanden wurden mittels modifiziertem „Open-Lung-Concept“ beatmet. So wurden ein konstanter PEEP von 10-12 cm H₂O und ein positiver endinspiratorischer Druck von 25-30 cm H₂O für die Ventilation verwendet. Zusätzlich erfolgte eine aktive Rekrutierung der Lunge mittels Rekrutierungsmanöver, welches im Folgenden noch genauer beschrieben wird.

IPPV-Beatmung – Gruppe B

Weitere 14 Probanden wurden mit der intermittierenden Druckbeatmung und einem je nach Gewicht des Pferdes variierenden positiv endinspiratorischem Druck von 25-30 cm H₂O beatmet.

Spontanatmung – Gruppe C

14 Probanden dieser Studie wurden der Gruppe C zugeordnet und atmeten spontan.

3.2 Versuchsaufbau

3.2.1 Präoperative Untersuchungen und Narkosevorbereitungen

Jeder Proband wurde vor dem Eingriff einer allgemeinen klinischen Untersuchung unterzogen. Je nach Krankheitsbild des Patienten wurde eine entsprechende spezielle Untersuchung angeschlossen.

Bei allen Patienten erfolgte zusätzlich eine Untersuchung des venösen Blutbildes mit maschineller Bestimmung (Sysmex KX-21, Sysmex Deutschland GmbH, Norderstedt) des Hämatokritwertes (HKT [%]) und der Auszählung der Leukozytenzahl (WBC [G/L]) sowie der Bestimmung des Gesamt-Protein-Gehalts (GE [g/l]) per analogem Hand-Refraktometer (Euromex Microscopen B.V., Arnheim, Niederlande).

Um die Lungenfunktion und den Säure-Basen-Haushalt der Probanden zu untersuchen, wurde bei jedem Probanden die A. carotis communis dextra ca. 7-10 cm dorsal der Apertura thoracis cranialis punktiert. Nach Entnahme der arteriellen Blutprobe mit einem heparinisierten Kapillarröhrchen wurden mittels eines stationären Blutgasanalysegeräts AVL omni 995 (AVL Medizintechnik, Bad Homburg) Blutgasparameter und Säure-Basenparameter bestimmt.

Der Hautbereich der rechten oder linken V. jugularis im Bereich des Übergangs vom oberen zum mittleren Halsdrittel wurde auf einer Fläche von 4-5 x 2 cm rasiert und mit einer desinfizierenden Lösung vorbereitet. Danach wurde in die entsprechende V. jugularis ein Venenverweilkatheter (Braun EquiCath Fast Flow[®], B.Braun Melsungen AG, Melsungen) eingebracht.

3.2.2 Narkoseprämedikation und Induktion der Allgemeinanästhesie

Alle Pferde erhielten zur Prämedikation Xylazin (Xylazin 2%, CP-Pharma Handelsgesellschaft mbH, Burgdorf) intravenös in einer Dosierung von 0,8 mg/kg Körpergewicht. Im Anschluss wurde den Probanden vor der Narkoseinduktion mit Wasser das Maul ausgespült, um eine Aspiration von Futterresten zu vermeiden.

Zur Narkoseinduktion wurden die Pferde in einen an drei Seiten geschlossenen Ablegestand geführt. An der vierten Seite befand sich eine Schwenktür, die während des Ablegevorgangs von Hilfspersonen geschlossen gehalten wurde. Der Ablegestand ist mit einem rutschfesten Gummibelag ausgestattet.

Nach Erreichen einer ausreichenden Sedationstiefe mit Hängenlassen des Kopfes erfolgte die Induktion der Narkose mit 2,2 mg/kg KGW Ketamin (Narketan® 10, Vétoquinol GmbH, Ravensburg) und 0,05 mg/kg KGW Diazepam (Diazepam AbZ 10mg Ampullen®, AbZ Pharma GmbH, Blaubeuren) intravenös.

Nach der Einleitung wurden die Pferde in Seitenlage verbracht, um direkt im Anschluss nach Einsetzen eines Maulgatters einen Endotrachealtubus einführen zu können. Der Durchmesser des Tubus wurde je nach Pferdegröße gewählt und variierte zwischen 20 und 30 mm. Der Cuff des Endotrachealtubus wurde nach Überprüfen der korrekten Lage mit einem Druck von ca. 40 cm H₂O geblockt, um ein Abdichten der Trachea zu gewährleisten.

An allen vier Gliedmaßen wurden Nylonschlaufen angelegt, in den Kranhaken gehängt und das Pferd auf den OP-Tisch gehoben. Zur Polsterung wurde zwischen OP-Tisch und dem Patienten eine aufblasbare Gummimatte gelegt. Hals und Kopf wurden separat mit aufblasbaren Gummimatten gepolstert.

Im Anschluss an die Lagerung wurde das Pferd an die Infusionsgeräte, das Narkose- und Beatmungsgerät (Vet.-Tec. Modell JAVC-2000 J. D. Medical Distributing Company, Phoenix, USA, Eickemeyer Medizintechnik für Tierärzte KG, Tuttlingen) und an einen Anästhesiemonitor (Kardiokap 5, Datex-Ohmeda GmbH, Duisburg) angeschlossen.

3.2.3 Lagerung der Probanden

Seitenlage:

Je nach Eingriff wurden die Pferde in die rechte oder linke Seitenlage verbracht, die Gliedmaßen aus dem Kran ausgehängt und in einer physiologischen Stellung fixiert. Dabei wurde das unten liegende Vorderbein nach vorne gezogen, um einer Schädigung des Nervus radialis der unten liegenden Seite vorzubeugen. Kopf und Hals wurden in leichter Anwinkelung gelagert.

Rückenlage:

Bei Eingriffen, die in Rückenlage erfolgten, wurde der OP-Tisch im Schulter- und Hinterhandbereich mit Seitenaufzügen versehen. Nach dem Aushängen der Gliedmaßen aus dem Kran wurden diese in einer angewinkelten Position belassen. Eine Ausnahme stellten die Eingriffe an Gelenken dar, bei denen die betroffenen Gliedmaßen an Metallstangen gehängt wurden.

Der Kopf und der Hals wurden in Halbschräglage nach rechts oder links gelagert.

3.2.4 Narkoseerhaltung und narkosebegleitende Maßnahmen

Im Anschluss an die Narkoseinduktion wurde die Allgemeinanästhesie durch eine Injektionsnarkose aufrechterhalten. Intravenös wurde Ringer-Laktat-Lösung (Ringer Ecobag[®] click, B.Braun Melsungen AG, Melsungen) mit 10 ml/kg/h und Hydroxythethylstärke (Hemohe[®] 10%, B.Braun Melsungen AG, Melsungen) mit 1 ml/kg/h appliziert. Zu dieser Infusion wurde per volumetrischer Infusionspumpe (Infusomat[®] fmS, B.Braun Melsungen AG, Melsungen) ein „Triple-Drip“ verabreicht, der mit 500 ml 15 %igem Guaifenesin (Myolaxin[®], Vétoquinol GmbH, Ravensburg), 40 ml Xylazin (Xylazin 2%, CP-Pharma Handelsgesellschaft mbH, Burgdorf) und 32 ml Ketamin (Narketan[®] 10, Vétoquinol GmbH, Ravensburg) angemischt wurde. Dies entspricht einem Wirkstoffgehalt von 75 g Guaifenesin, 3,2 g Ketamin und 0,8 g Xylazin. Diese Mischung wurde mit einer Geschwindigkeit von 1 ml/kg/h appliziert. Dies bedeutet 131,1 mg/kg/h Guaifenesin, 5,6 mg/kg/h Ketamin und 1,4 mg/kg/h Xylazin. Außerdem wurde bei einem Abfall des mittleren arteriellen Blutdrucks unter 70 mmHg per Spritzenpumpe (perfusor[®] compact, B.Braun Melsungen AG, Melsungen) Dobutamin (Dobutamin-ratiopharm[®], ratiopharm GmbH, Ulm) nach Bedarf verwendet. Wenn eine Narkosezeit von 90 Minuten überschritten wurde, wurde die Narkoseerhaltung auf Isofluran umgestellt und diese bis zum Ende der Allgemeinanästhesie so weitergeführt.

Am Narkosegerät wurde die Frischgaszufuhr aus Sauerstoff und Raumluft so eingestellt, dass in der eingeatmeten Fraktion ein Sauerstoffanteil von 35% vorhanden war.

Die Probanden, die randomisiert für eine Beatmung mittels PEEP oder IPPV ausgewählt wurden, wurden mit einem im Narkosegerät integrierten Respirator (modifizierter Bird Mark 7 Servo-Respirator, Eickemeyer Medizintechnik für Tierärzte KG, Tuttlingen) kontrolliert beatmet. Der Beginn der kontrollierten Beatmung erfolgte unmittelbar nach Anschließen an das Narkosegerät.

3.2.5 Spontanatmung und Beatmung der Probanden

Die Pferde der Gruppe C_{spontan} wurden für die genaue Mischung des Sauerstoffanteils in der einzuatmenden Luft an das Narkosegerät angeschlossen. Bei einer Atemfrequenz unter zwei Atemzügen pro Minute und einem p_aCO₂ von

über 65 mmHg wurden die Pferde so lange manuell beatmet, bis die Atemfrequenz wieder bei mindestens 3 pro Minute und der $p_a\text{CO}_2$ wieder unter 65 mmHg gefallen war. Bei einer Sauerstoffsättigung im arteriellen Blut von unter 90% wurde der Sauerstoffanteil im Gasgemisch auf 45% erhöht, so dass die Messung abgebrochen werden musste aufgrund der nicht aussagekräftigen Messwerte und die Pferde von der Auswertung ausgeschlossen wurden.

Die zur Beatmung ausgewählten Probanden wurden mittels eines Servorespirators (modifizierter Bird Mark 7 Servo-Respirator, Eickemeyer Medizintechnik für Tierärzte KG, Tuttlingen) ventiliert. Am Überdruckventil des Respirators war ein PEEP-Ventil integriert. Mit diesem Ventil lässt sich der zu applizierende PEEP auf 0 bis 40 cm H_2O stufenlos einstellen und am Anästhesiemonitor ablesen.

Bei den Probanden der Gruppe B_{IPPV} wurde ein endexpiratorischer Druck von 0 cm H_2O , ein endinspiratorischer Druck von 25 – 30 cm H_2O und eine Atemfrequenz von 5-6 Atemzügen pro Minute eingestellt, abhängig vom $p_a\text{CO}_2$.

Ein Drittel der Probanden wurde der Gruppe A_{mOLC} zugeordnet und nach einem modifizierten „Open-Lung-Concept“ beatmet, bei dem ein PEEP von 10 cm H_2O und ein PIP von 25-30 cm H_2O eingestellt wurde. Bei $p_a\text{O}_2$ -Werten von unter 140 mmHg wurde die Lunge als unzureichend geöffnet angesehen und daher die Lunge des Pferdes rekrutiert. Ein Rekrutierungsmanöver stellte sich derart dar, dass der maximale inspiratorische Druck in drei aufeinander folgenden Atemzügen Druckamplituden von 60 cm H_2O , dann 80 cm H_2O und schließlich wieder 60 cm H_2O erreichte. Konnte bis zum folgenden Messintervall kein Sauerstoffpartialdruck von mindestens 140 mmHg erreicht werden, wurde dieses Rekrutierungsmanöver wiederholt. Nach dem Rekrutierungsmanöver wurden wieder die vorher verwendeten Einstellungen übernommen. Der Grenzwert zur Rekrutierung der Lunge wurde über die Formel $p_a\text{O}_2 = (p_B - p_{\text{H}_2\text{O}}) \times \text{FiO}_2 - (p_a\text{CO}_2 / 0,8)$ abzüglich 30 % ($\pm 3\%$) für den $p_a\text{O}_2$ in Anlehnung an die Studien von SCHULTE-BAHRENBURG (2008), SCHÜRMAN et al. (2008) und HOPSTER (2007) berechnet. In der Formel ist p_B der barometrische Druck, $p_{\text{H}_2\text{O}}$ der Wasserdampfdruck und 0,8 ist der respiratorische Quotient, der den Anteil der Kohlendioxidexkretion an der Sauerstoffaufnahme in der Lunge beschreibt (ROBINSON 2009). Die Subtraktion von 30% ($\pm 3\%$) wurde aufgrund der bei jedem Probanden zu erwartenden Einschränkungen des pulmonalen Gasaustauschs in Allgemeinanästhesie vorgenommen.

Tab. 3.1 Richtwerte der Beatmungsdrücke, die am Anästhesiemonitor mit Hilfe der Spirometrie abgelesen werden

	Gruppe A _{mOLC}	Gruppe B _{IPPV}	Gruppe C _{spontan}
PEEP	10 – 12 cm H ₂ O	0 cm H ₂ O	—
PIP	25 – 30 cm H ₂ O	25 – 30 cm H ₂ O	—
Δ p	15 – 20 cm H ₂ O	25 – 30 cm H ₂ O	—
Rekrutierung der Lunge PIP _{max} → 60/80/60 cm H ₂ O	bei p _a O ₂ - Werten von unter 140 mmHg	—	—

Bei den mit dem modifizierten OLC und per IPPV beatmeten Probanden wurde das Atemminutenvolumen so gewählt, dass der p_aCO₂ möglichst zwischen 30 und 50 mmHg lag. Um einen besseren und schnelleren Übergang am Ende der Ventilation in die Spontanatmung zu erreichen, wurden etwa 10 Minuten vor dem absehbaren Narkoseende die Atemfrequenz und der PIP reduziert, um den p_aCO₂ zu erhöhen. Nach dem Umhängen auf Spontanatmung musste das Pferd mindestens zwei tiefe Atemzüge selbstständig gemacht haben. War dies nicht der Fall, wurde das Pferd zwei Mal pro Minute bis zum Einsetzen der Spontanatmung manuell beatmet. Im Anschluss daran wurde das Pferd in die Aufwachbox gebracht und durch den Endotrachealtubus mit 15 l/min reinem Sauerstoff insuffliert. Die Extubation wurde erst nach Wiedereinsetzen des Schluckreflexes durchgeführt. Anschließend wurde Sauerstoff über einen Schlauch zur O₂-Insufflation über den ventralen Nasengang verabreicht. Außerdem erhielten alle Pferde, bei denen die Narkose länger als 90 Minuten andauerte, nach Einsetzen des Schluckreflexes 0,2 mg/kg KGW Xylazin (Xylazin 2%, CP-Pharma Handelsgesellschaft mbH, Burgdorf) intravenös. Bei allen Patienten wurde die gesamte Aufstehphase überwacht.

3.2.6 Intraoperatives Monitoring

Um intraoperativ Parameter wie Herzfrequenz, arterieller Blutdruck, Atemfrequenz, Beatmungsdrücke, Atemminutenvolumen und in- und expiratorische Sauerstoff- und Kohlendioxidkonzentrationen zu bestimmen, wurden diese Werte kontinuierlich mit einem Narkosemonitor (Kardiokap 5, Datex-Ohmeda GmbH, Duisburg) überwacht und in einem speziellen standardisierten Narkoseprotokoll elektronisch aufgezeichnet.

Zusätzlich wurden alle zehn Minuten arterielle Blutproben genommen, um Blutgasparameter und den pH-Wert zu bestimmen. Auch diese Werte wurden in dem Protokoll aufgezeichnet.

Die Auswertung der Werte begann 20 Minuten nach dem Einleiten der Anästhesie und endete entweder nach 90 Minuten Narkosezeit oder beim Verbringen des Pferdes in die Aufwachbox, wenn die Narkosezeit unter 90 Minuten betrug.

3.2.6.1 Herzfrequenz

Um die Herzfrequenz und mögliche Arrhythmien zu bestimmen, wurde ein EKG mit bipolarer Brustwandableitung permanent am Narkosemonitor dargestellt und in Intervallen von zehn Minuten aufgezeichnet.

Für die Ableitung wurde eine Elektrode im Bereich zwischen den beiden Skapulohumeralgelenken angeklemt und die anderen beiden im Bereich der rechten oder linken Drosselrinne in der Halsmitte.

3.2.6.2 Arterieller Blutdruck

Nach der Lagerung des Pferdes auf dem OP-Tisch und des Anschlusses an das Narkosegerät und den Narkosemonitor wurde über der A. facialis ein etwa 3 x 2 cm großer Bereich rasiert und steril vorbereitet. Danach wurde perkutan ein Verweilkatheter (Vasocan[®] Braunüle[®], B.Braun Melsungen AG, Melsungen) herzwärts in die A. facialis oder einen ihrer Äste oder in die A. metatarsa dorsalis III eingebracht und mit Klebeband oder mit einem Cyanacrylatklebstoff fixiert (TAYLOR u. CLARKE 2007). Danach erfolgte eine kontinuierliche Blutdruckmessung, bei der der mittlere, der systolische und der diastolische Blutdruck gemessen wurden.

Nach Einbringen des arteriellen Katheters wurde ein präkalibrierter Druckwandler (DTX[®] Plus Druckwandler, Becton Dickinson GmbH, Heidelberg) auf Höhe der

Herzbasis am Pferd fixiert und ein Nullabgleich gegen den atmosphärischen Druck durchgeführt. Zwischen Druckwandler und Katheter wurden ein Dreiwegehahn und ein druckresistenter Verbindungsschlauch befestigt. Das gesamte Druckmesssystem wurde vor jeder Benutzung und nach jeder Blutentnahme mit heparinierter Kochsalz-Lösung und einem Druck von ca. 300 mmHg gespült.

Die arteriellen Blutdrücke wurden permanent am Narkosemonitor angezeigt und der mittlere arterielle Blutdruck wurde in Intervallen von zehn Minuten protokolliert.

3.2.6.3 Positiver inspiratorischer und endexpiratorischer Druck

In der Gruppe B_{IPPV} wurde je nach Körpergewicht des Pferdes ein PIP von 25-30 cm H₂O und ein PEEP von 0 cm H₂O eingestellt. Der PIP wurde außerdem abhängig von dem p_aCO₂ so gewählt, dass ein CO₂-Wert von 30 bis 50 mmHg gewährleistet wurde.

Bei Pferden, die nach dem modifizierten „Open-Lung-Concept“ beatmet wurden, wurde ein PEEP von ca. 10 cm H₂O eingestellt und der PIP, wie oben bei der IPPV-Beatmung beschrieben, eingestellt. Eine Ausnahme bildeten die Rekrutierungsmanöver mit wechselnden Drücken von 60-80 cm H₂O.

Zwischen Y-Stück und Endotrachealtubus befand sich ein spirometrisches Messgerät, ein nach MOENS modifiziertes Pitot-Rohr (Horse-lite), welches vor Beginn der Studie mittels 3 Liter Eichpumpe in Anlehnung an die Studie von MOENS et al. (2009) kalibriert worden war (Umrechnungsfaktor 6,5). Der modifizierte Messkopf war über Druckschläuche mit dem Druckwandler im Narkosemonitor verbunden. Die Beatmungsdrücke wurden über das Spirometer gemessen, kontinuierlich auf dem Narkosemonitor dargestellt und in Intervallen von zehn Minuten aufgezeichnet.

3.2.6.4 Inspiratorische Sauerstoffkonzentration

Die inspiratorische und die expiratorische Sauerstoffkonzentration wurden durch eine paramagnetische Messzelle, die in den Narkosemonitor integriert war, ermittelt. Die Messzelle war mit dem Y-Stück des Narkosesystems über einen Probenschlauch verbunden. Die Werte wurden kontinuierlich am Narkosemonitor angezeigt und in zehnminütigen Abständen im Narkoseprotokoll aufgezeichnet.

3.2.6.5 Arterielle Blutgaswerte und Säure-Basenparameter

Die Blutproben für die Blutgasmessung wurden per Dreiwegehahn über denselben Zugang wie für die invasive Blutdruckmessung gewonnen. Die Proben wurden im Abstand von zehn Minuten entnommen und mit einem stationären Blutgasanalysegerät (AVL 995, AVL Medizintechnik, Bad Homburg) ausgewertet. Durch optische Sensoren wurden so der pH, der p_aO_2 und der p_aCO_2 bestimmt. Außerdem wurden vom Gerät über einen internen Logarithmus der Basenüberschuss, der Bicarbonatgehalt und die Sauerstoffsättigung des Blutes errechnet sowie die Temperatur der Blutgasproben korrigiert.

3.2.6.6 Endexpiratorische Kohlendioxidkonzentration und Atemfrequenz

Um den arteriellen und den alveolären Kohlendioxidpartialdruck miteinander vergleichen zu können und dadurch den alveolären Totraum berechnen zu können, wurde zur kapnographischen Bestimmung des CO_2 -Gehalts im Gasgemisch während In- und Expiration im Pitot-Rohr Gasproben entnommen. Diese wurden mittels Infrarotspektroskopie von der kapnographischen Einheit des Narkosemonitors ausgewertet, permanent angezeigt und in Intervallen von zehn Minuten im Narkoseprotokoll aufgezeichnet. Außerdem konnte auf diesem Wege auch die Atemfrequenz bestimmt und protokolliert werden.

3.2.6.7 Alveolärer Totraum

Mit dem durch die arterielle Blutgasanalyse gewonnenen Parameter p_aCO_2 und dem durch Kapnographie ermittelten Wert $EtCO_2$, konnte der Anteil der alveolären Totraumventilation in Prozent über die Gleichung $V_{Dalv}/V_{Talv} = ((p_aCO_2 - EtCO_2) / p_aCO_2) \times 100$ berechnet werden (CLUTTON 2007; MARINO u. SUTIN 2007). Die im Abstand von zehn Minuten errechneten Werte wurden anschließend protokolliert.

3.3 Statistische Auswertung

Zur statistischen Auswertung aller ermittelten Parameter wurde das Statistikprogramm SAS® Version 9.1 (SAS Institute Inc., Cary, North Carolina, USA) verwendet. Die Überprüfung auf Normalverteilung erfolgte mit Hilfe des „Shapiro-Wilks“-Tests sowie visueller Beurteilung der QQ-Plots.

Für alle Messwerte wurde eine deskriptive Statistik mit Berechnung der arithmetischen Mittelwerte sowie der Standardabweichung durchgeführt. Für die Berechnung des linearen Modells wurde die Prozedur MIXED eingesetzt. Bis zu einer Narkosedauer von 60 Minuten konnten alle Probanden verwendet werden, an späteren Messzeitpunkten konnten nicht alle Probanden mit eingeschlossen werden, da bei einigen die Narkosedauer kürzer als 90 Minuten andauerte. Jedoch waren zu jedem Zeitpunkt und in jeder Gruppe mindestens acht, in der Gruppe A_{MOLC} mindestens zehn Probanden vorhanden.

Zur Überprüfung des Einflusses der Parameter Zeit und Beatmungstechnik wurde eine zweifaktorielle Varianzanalyse mit Berücksichtigung der Wechselwirkungen sowie multipler Mittelwertvergleiche mit dem „tukey post hoc tests“ über den gesamten Narkosezeitraum berechnet. Neben der Auswertung der Verlaufskurven wurde auch eine zeitlich unabhängige Auswertung der Mittelwerte der intraoperativ gemessenen Parameter mittels einfacher Varianzanalyse durchgeführt.

Für die zweifaktorielle Varianzanalyse wurden die ermittelten Parameter in Abständen von zehn Minuten für das intraoperative Monitoring verglichen.

Tab. 3.2 Fehlerwahrscheinlichkeit

Signifikanzniveau	Fehlerwahrscheinlichkeit
schwach signifikant	$p \leq 0,05$
signifikant	$p \leq 0,01$
hoch signifikant	$p \leq 0,001$

In den Abbildungen wurden für jede Gruppe und jeden Messzeitpunkt Mittelwerte und Standardabweichungen dargestellt. Unter den Ergebniskurven wurden die signifikanten Unterschiede je nach Signifikanz mit unterschiedlichen Symbolen bzw. Linienarten gekennzeichnet. Für signifikante Unterschiede während mehrerer Zeitintervalle wurden durchgehende Linien verwendet.

4 Ergebnisse

4.1 Alter und Gewicht der Probanden

Zwischen den Probanden der drei Gruppen bestehen bezüglich des Alters und des Gewichtes keine signifikanten Unterschiede.

Tab. 4.1 Mittelwerte, Standardabweichungen und errechnete Fehlerwahrscheinlichkeiten der demographischen Daten der Gruppen A_{mOLC}, B_{IPPV} und C_{spontan}.

	Gruppe mOLC	Gruppe IPPV	Gruppe spontan	Fehlerwahrscheinlichkeit p	
Alter der Probanden $\bar{x} \pm S$ in [J]	7,13 $\pm 7,09$	4,5 $\pm 2,71$	7,64 $\pm 5,40$	A vs. B	p = 0,2
				A vs. C	p = 0,8
				B vs. C	p = 0,13
Gewicht der Probanden $\bar{x} \pm S$ in [kg]	536 $\pm 70,8$	522 $\pm 52,8$	521 $\pm 73,1$	A vs. B	p = 0,59
				A vs. C	p = 0,58
				B vs. C	p = 0,98

4.2 Art der Eingriffe, Lagerung der Probanden und Dauer der Eingriffe

Bei 12 der 42 untersuchten Probanden betrug die Narkosezeit weniger als 90 Minuten. So dauerten die Narkosen bei 7 von den 12 Pferden 80 Minuten, bei 3 Pferden 70 Minuten und bei 2 Pferden 60 Minuten. Die Art des Eingriffs und die Lagerung der Probanden sind in Tab. 4.2 ersichtlich.

Tab. 4.2 Art der Eingriffe, Lagerung und Anzahl der Probanden bei den jeweiligen Eingriffen

Art des Eingriffs	Lagerung	Anzahl der Probanden
Wundchirurgie	Seitenlage	15
Athroskopie	Rückenlage	9
Hengstkastration	Rückenlage	6
Laryngoplastik	Seitenlage	3
Computertomographie	Rückenlage	3
Enucleatio bulbi	Seitenlage	3

4.3 Präoperative Säure-Basen- und Blutgasparameter

Bei der Auswertung der präoperativen Blutgasparameter pH, p_aO_2 und p_aCO_2 sind keine signifikanten Unterschiede innerhalb der drei Gruppen feststellbar. Eine Ausnahme stellt die arterielle Sauerstoffsättigung dar, bei der sich die Gruppe $C_{spontan}$ schwach signifikant ($p < 0,05$) von der Gruppe B_{IPPV} unterscheidet. Die Unterschiede zwischen den Gruppen A_{mOLC} und B_{IPPV} sowie zwischen A_{mOLC} und $C_{spontan}$ sind nicht signifikant.

Tab. 4.3 Präoperative Säure-Basen- und Blutgasparameter der Gruppen A_{mOLC} , B_{IPPV} und $C_{spontan}$ mit Mittelwerten, Standardabweichungen und errechneten Fehlerwahrscheinlichkeiten

	Gruppe A_{mOLC}	Gruppe B_{IPPV}	Gruppe $C_{spontan}$	Fehlerwahrscheinlichkeit p	
p_aO_2 $\bar{X} \pm S$ in [mmHg]	95,9 ± 8,7	90,7 ± 6,6	95,1 ± 4,9	A vs. B	p = 0,054
				A vs. C	p = 0,78
				B vs. C	p = 0,10
p_aCO_2 $\bar{X} \pm S$ in [mmHg]	45,1 ± 4,1	46,4 ± 3,5	44,0 ± 2,6	A vs. B	p = 0,31
				A vs. C	p = 0,40
				B vs. C	p = 0,07
S_aO_2 $\bar{X} \pm S$ in [%]	97,4 ± 0,9	97,0 ± 0,6	97,7 ± 1,0	A vs. B	p = 0,21
				A vs. C	p = 0,30
				B vs. C	p = 0,025*
<ph </ph $\bar{X} \pm S$	7,39 ± 0,03	7,40 ± 0,02	7,40 ± 0,02	A vs. B	p = 0,31
				A vs. C	p = 0,35
				B vs. C	p = 0,93

4.4 Einfluss der Beatmung auf die intraoperativ erfassten Parameter

4.4.1 Arterieller Sauerstoffpartialdruck

Die Mittelwerte des p_{aO_2} der Probanden der Gruppe A_{mOLC} liegen im gesamten Verlauf des Messzeitraumes hochsignifikant über den Werten der Gruppe $C_{spontan}$ ($p < 0,001$). Zudem liegen die Mittelwerte des Sauerstoffpartialdrucks von Probanden der Gruppe A_{mOLC} nach 20 Minuten Narkosedauer schwach signifikant ($p < 0,05$), nach 30, 40 und 60 Minuten signifikant ($p < 0,01$) und zu den übrigen Zeitpunkten hoch signifikant ($p < 0,001$) über denen der Gruppe B_{IPPV} .

Die Mittelwerte des p_{aO_2} der Probanden aller Gruppen verlaufen weitgehend parallel und es bestehen keine signifikanten Unterschiede zwischen den Werten der Gruppen B_{IPPV} und $C_{spontan}$. Die zeitlich unabhängige Auswertung der Mittelwerte erbrachte einen hochsignifikanten Unterschied der Gruppe A_{mOLC} gegenüber den anderen Gruppen (siehe Tab. 4.4 S. 58).

Um Werte des arteriellen Sauerstoffpartialdrucks über 140 mmHg zu erlangen, waren in der Gruppe A_{mOLC} im Durchschnitt 3,4 Rekrutierungen der Lunge nötig. Bei drei Pferden konnte während der gesamten Messdauer trotz Rekrutierungsmanöver ein Partialdruck von 140 mmHg p_{aO_2} nicht erreicht werden. Außerdem lag der Mittelwert des p_{aO_2} bei 8 von 14 Pferden aus der Gruppe A_{mOLC} unter 140 mmHg.

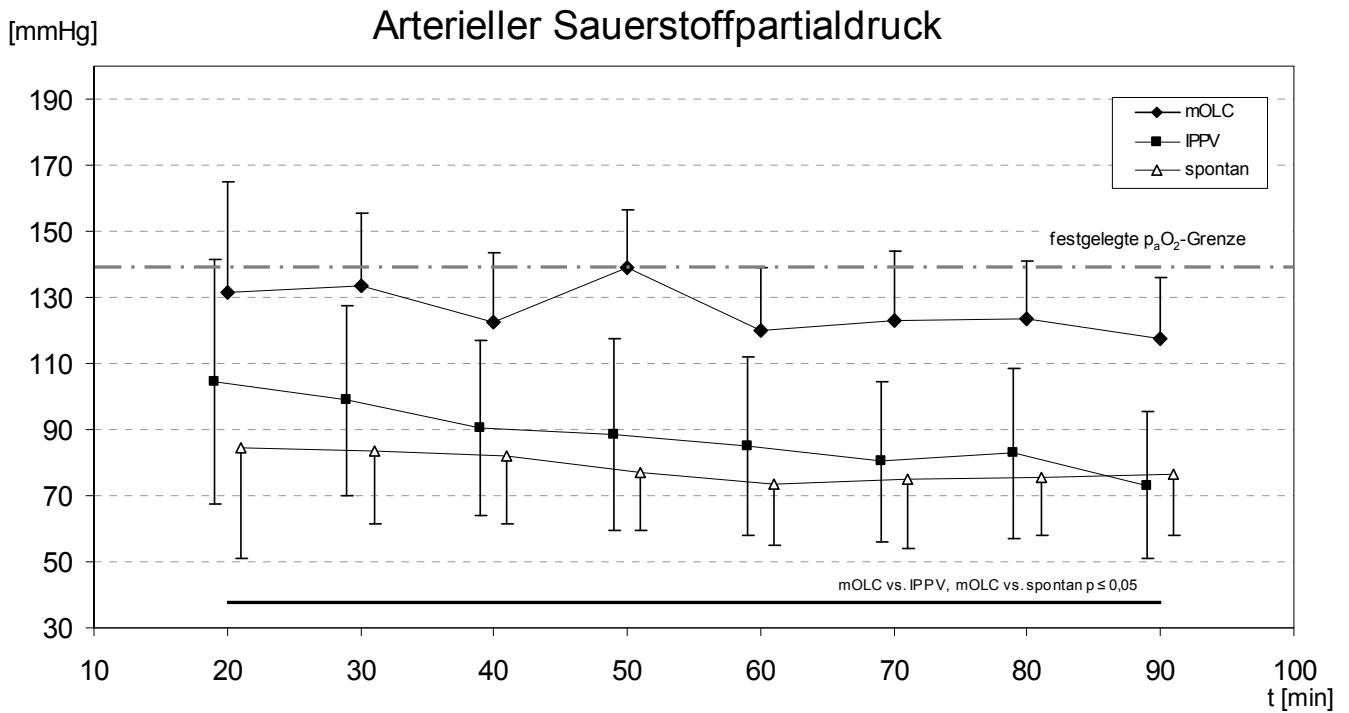


Abb. 4.1 Verlauf des arteriellen Sauerstoffpartialdrucks (Mittelwerte \pm Standardabweichung) über die Narkosezeit im Vergleich einer Beatmung mit dem modifizierten „Open-Lung-Concept“, einer IPPV-Beatmung und spontan atmenden Pferden.

Balken = signifikanter Unterschied

— . — . = festgelegte p_aO_2 -Grenze

4.4.2 Arterieller Kohlendioxidpartialdruck

Die Mittelwerte des $p_a\text{CO}_2$ in den Gruppen A_{mOLC} und B_{IPPV} liegen über den gesamten Messzeitraum dicht beieinander und unterscheiden sich nur zum Zeitpunkt 50 Minuten schwach signifikant voneinander ($p < 0,05$). Beide Kurven verlaufen annähernd parallel zur Verlaufskurve der Gruppe C_{spontan} . Die Mittelwerte des $p_a\text{CO}_2$ der Gruppe C_{spontan} sind über den gesamten Messzeitraum hoch signifikant größer als die der Gruppen A_{mOLC} und B_{IPPV} ($p < 0,001$).

Außerdem zeigt sich in der Gruppe C_{spontan} eine steigende Tendenz der Mittelwerte zum Ende des Messzeitraums. Wenn man jedoch die zeitlich unabhängige Auswertung der Mittelwerte betrachtet, so fällt ein signifikant höherer $p_a\text{CO}_2$ in der Gruppe C_{spontan} auf als in den beiden anderen Gruppen (siehe Tab. 4.4 S. 58).

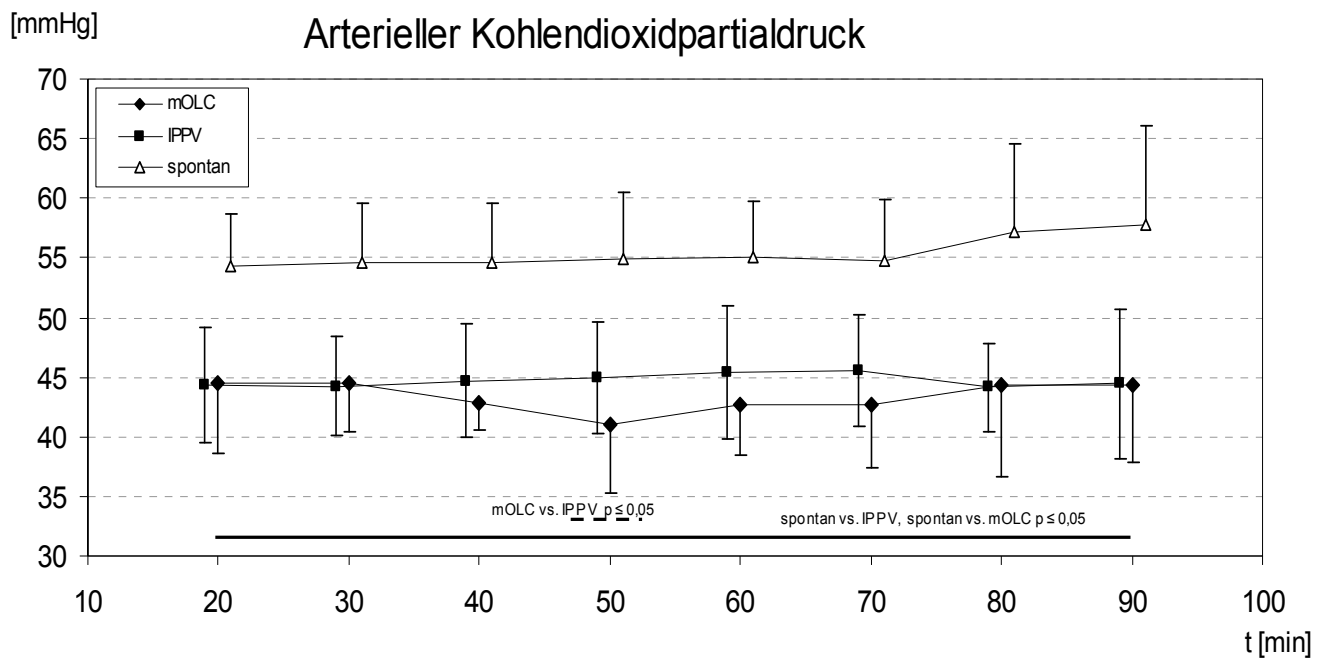


Abb. 4.2 Verlauf des arteriellen Kohlendioxidpartialdrucks (Mittelwerte \pm Standardabweichung) über die Narkosezeit im Vergleich einer Beatmung mit dem modifizierten „Open-Lung-Concept“, einer IPPV-Beatmung und spontan atmenden Pferden. Balken = signifikanter Unterschied

4.4.3 pH-Wert

Die Verlaufskurven der Mittelwerte aller Gruppen verlaufen annähernd parallel zueinander. Die Mittelwerte der Gruppen A_{mOLC} und B_{IPPV} überschneiden sich mehrfach und liegen über den gesamten Zeitraum, aber auch zeitlich unabhängig (siehe Tab. 4.4 S. 58), hochsignifikant über denen der Gruppe $C_{spontan}$ ($p < 0,001$). In der Letzteren stellt sich die Ergebniskurve leicht abfallend zum Ende der Messungen hin dar. Zusätzlich fällt bei den Messwerten der Gruppe $C_{spontan}$ eine leichte respiratorische Azidose auf.

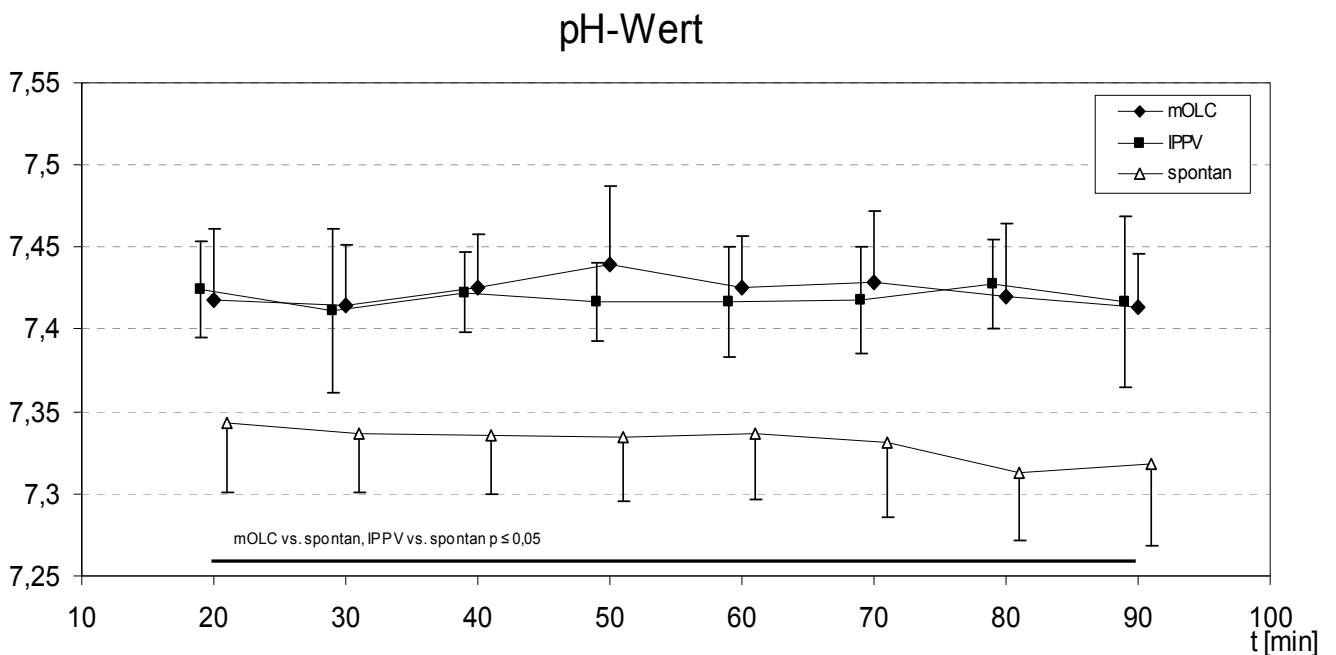


Abb. 4.3 Verlauf des pH-Werts (Mittelwerte \pm Standardabweichung) über die Narkosezeit im Vergleich einer Beatmung mit dem modifizierten „Open-Lung-Concept“, einer IPPV-Beatmung und spontan atmenden Pferden.

Balken = signifikanter Unterschied

4.4.4 Herzfrequenz

Die Mittelwerte der Herzfrequenz unterscheiden sich zu keinem Zeitpunkt statistisch signifikant voneinander. Während die Mittelwerte der Gruppe A_{mOLC} annähernd konstant auf einem Niveau sind, steigen die Mittelwerte der Gruppen B_{IPPV} und der Gruppe $C_{spontan}$ im Verlauf der Narkosezeit an. Innerhalb der Gruppe B_{IPPV} kommt es von Beginn der Messungen an bis zum Narkoseende zu einem hoch signifikanten Anstieg der Verlaufskurve ($p < 0,001$).

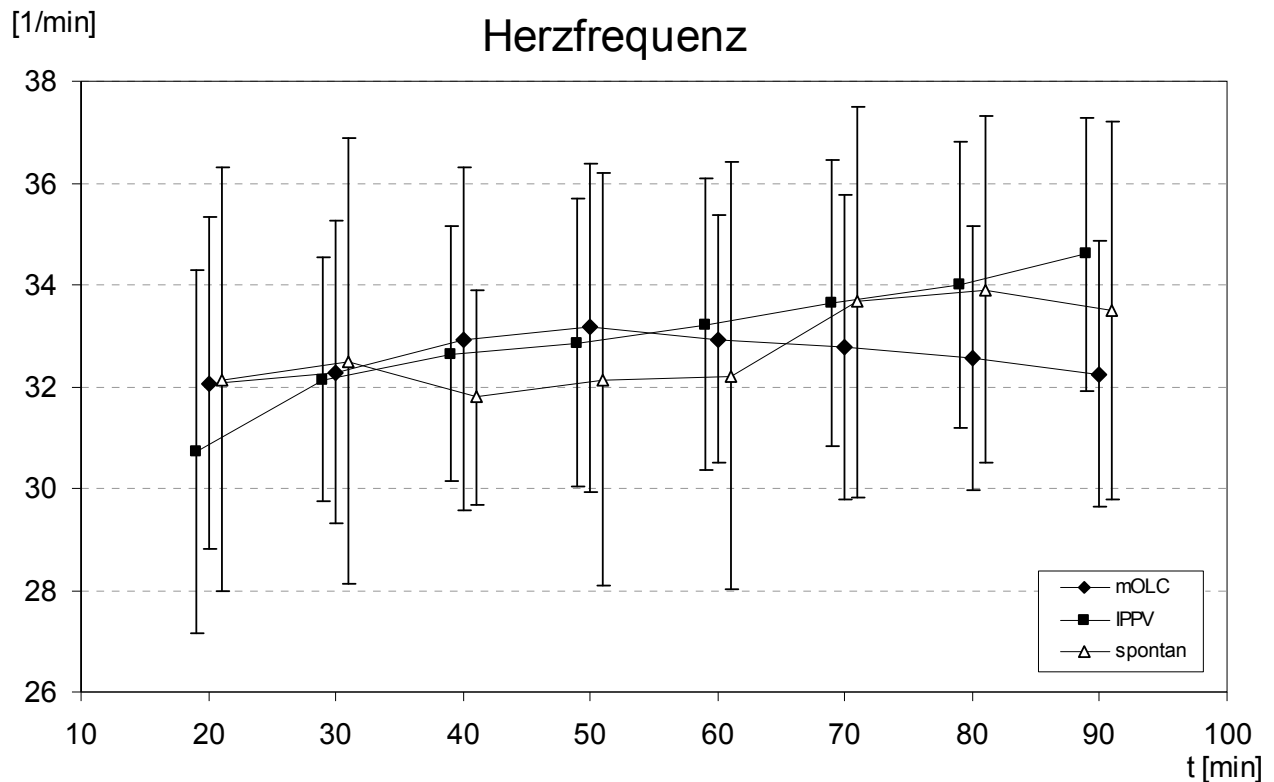


Abb. 4.4 Verlauf der Herzfrequenz (Mittelwerte \pm Standardabweichung) über die Narkosezeit im Vergleich einer Beatmung mit dem modifizierten „Open-Lung-Concept“, einer IPPV-Beatmung und spontan atmenden Pferden.

4.4.5 Mittlerer arterieller Blutdruck

Die Ergebniskurven des mittleren arteriellen Blutdrucks verlaufen nahezu parallel und überschneiden sich zu keinem Zeitpunkt. Zwischen den Gruppen B_{IPPV} und A_{mOLC} bestehen bis zum Zeitpunkt 50 Minuten signifikante ($p < 0,01$) und bis zum Ende der Messungen zum Zeitpunkt 90 Minuten schwach signifikante ($p < 0,05$) Unterschiede. Diese Tendenz bestätigt sich bei der zeitlich unabhängigen Auswertung der Mittelwerte, bei der die Gruppe A_{mOLC} einen hoch signifikant niedrigeren mittleren arteriellen Blutdruck aufweist als die Gruppe B_{IPPV} und einen signifikant geringeren Blutdruck als die Gruppe $C_{spontan}$ (siehe Tab. 4.4 S. 58).

Bei der Auswertung innerhalb der Probandengruppen besteht bei allen Gruppen ein hoch signifikanter Abfall des mittleren arteriellen Blutdrucks über die Zeit ($p < 0,001$).

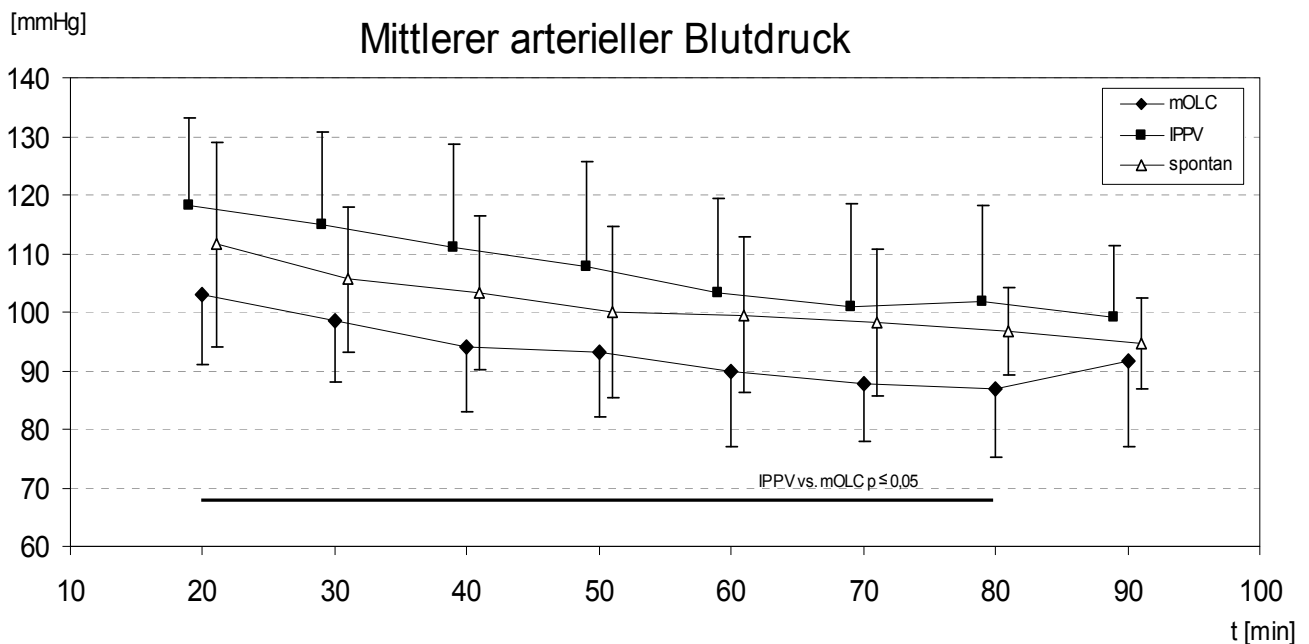


Abb. 4.5 Verlauf des mittleren arteriellen Blutdrucks (Mittelwerte \pm Standardabweichung) über die Narkosezeit im Vergleich einer Beatmung mit dem modifizierten „Open-Lung-Concept“, einer IPPV-Beatmung und spontan atmenden Pferden.

Balken = signifikanter Unterschied

4.4.6 Atemfrequenz

Die Kurven der Mittelwerte der Gruppen A_{mOLC} und B_{IPPV} verlaufen dicht beieinander und überschneiden sich mehrfach. Sie verlaufen annähernd konstant auf einem Niveau und liegen während des gesamten Messzeitraumes unter denen der Gruppe $C_{spontan}$. In dieser Gruppe ist ein wellenförmiger Kurvenverlauf sichtbar mit Höhepunkten am Anfang des Messzeitraumes und nach 50-60 Minuten.

Die Mittelwerte der Gruppe $C_{spontan}$ unterscheiden sich zu den Zeitpunkten 20 und 70-90 Minuten signifikant von denen der Gruppe A_{mOLC} ($p < 0,01$). Zu den Zeitpunkten 30 und 40 Minuten sind diese Unterschiede schwach signifikant ($p < 0,05$) und zu den Messzeitpunkten 50 und 60 Minuten hoch signifikant ($p < 0,001$). Bei der zeitlich unabhängigen Auswertung der Mittelwerte fällt auch eine hoch signifikant höhere Atemfrequenz in der Gruppe $C_{spontan}$ auf im Vergleich mit den anderen Gruppen (siehe Tab. 4.4 S. 58).

Die Mittelwerte der Atemfrequenz der Gruppe $C_{spontan}$ liegen über nahezu dem gesamten Messzeitraum signifikant über denen der Gruppe B_{IPPV} ($p < 0,01$). Nur zum Zeitpunkt 80 Minuten ergibt sich ein hoch signifikanter Unterschied ($p < 0,001$).

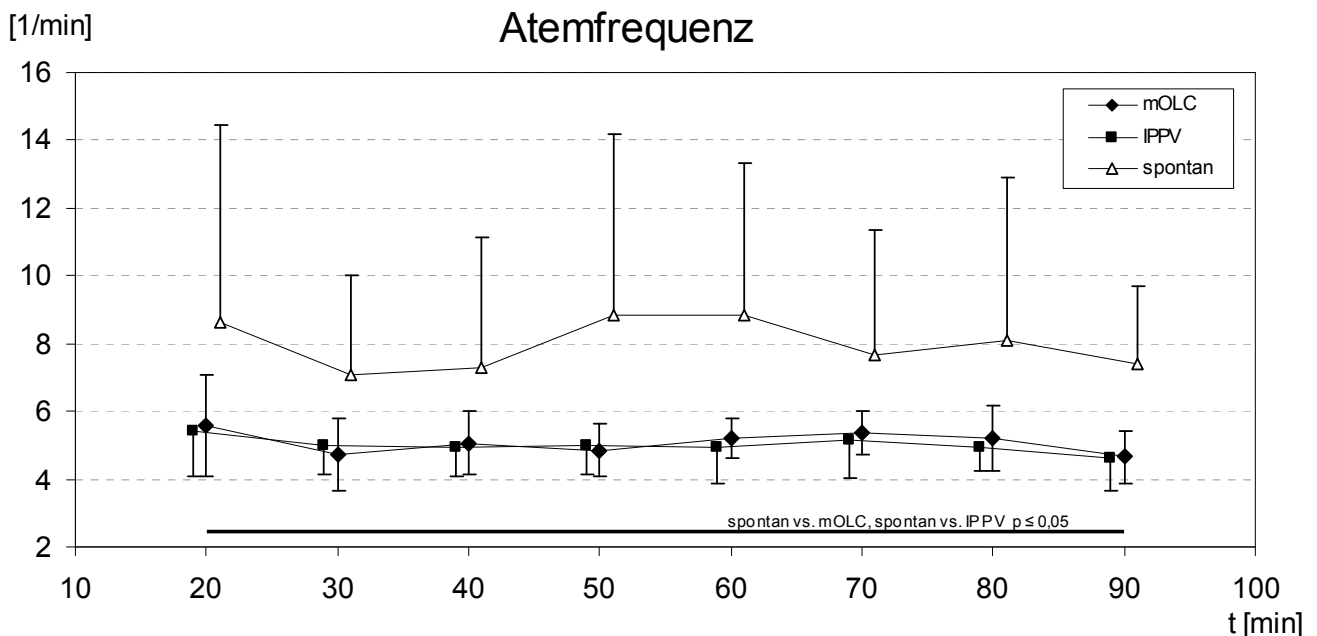


Abb. 4.6 Verlauf des Atemfrequenz (Mittelwerte \pm Standardabweichung) über die Narkosezeit im Vergleich einer Beatmung mit dem modifizierten „Open-Lung-Concept“, einer IPPV-Beatmung und spontan atmenden Pferden.

Balken = signifikanter Unterschied

4.4.7 Arterielle Sauerstoffsättigung

Die Verlaufskurven der drei Gruppen sind nahezu parallel. Der Vergleich der Gruppe A_{mOLC} mit der Gruppe $C_{spontan}$ ergibt zu den Zeitpunkten 20, 30 und 40 Minuten einen signifikanten ($p < 0,01$) und ab dem Zeitpunkt 50 Minuten einen hoch signifikanten Unterschied ($p < 0,001$). Ähnlich dazu verhalten sich die Mittelwerte, die zeitlich unabhängig ausgewertet wurden, wie in Tab. 4.4 (S. 58) beschrieben, nämlich eine signifikant höhere Sättigung im arteriellen Blut der Gruppe A_{mOLC} als in der Gruppe der spontan atmenden Pferde.

Die Messwerte der Gruppe B_{IPPV} weisen zu den Zeitpunkten 20, 60, 70 und 80 eine schwach signifikante Differenz gegenüber den Werten der Gruppe $C_{spontan}$ auf ($p < 0,05$).

Vergleicht man die Verlaufskurven der Gruppen A_{mOLC} und B_{IPPV} , so fällt auf, dass die Mittelwerte der Gruppe A_{mOLC} beim Zeitpunkt 50 schwach signifikant ($p < 0,05$) und beim Zeitpunkt 90 hoch signifikant ($p < 0,001$) über denen der Gruppe B_{IPPV} liegen.

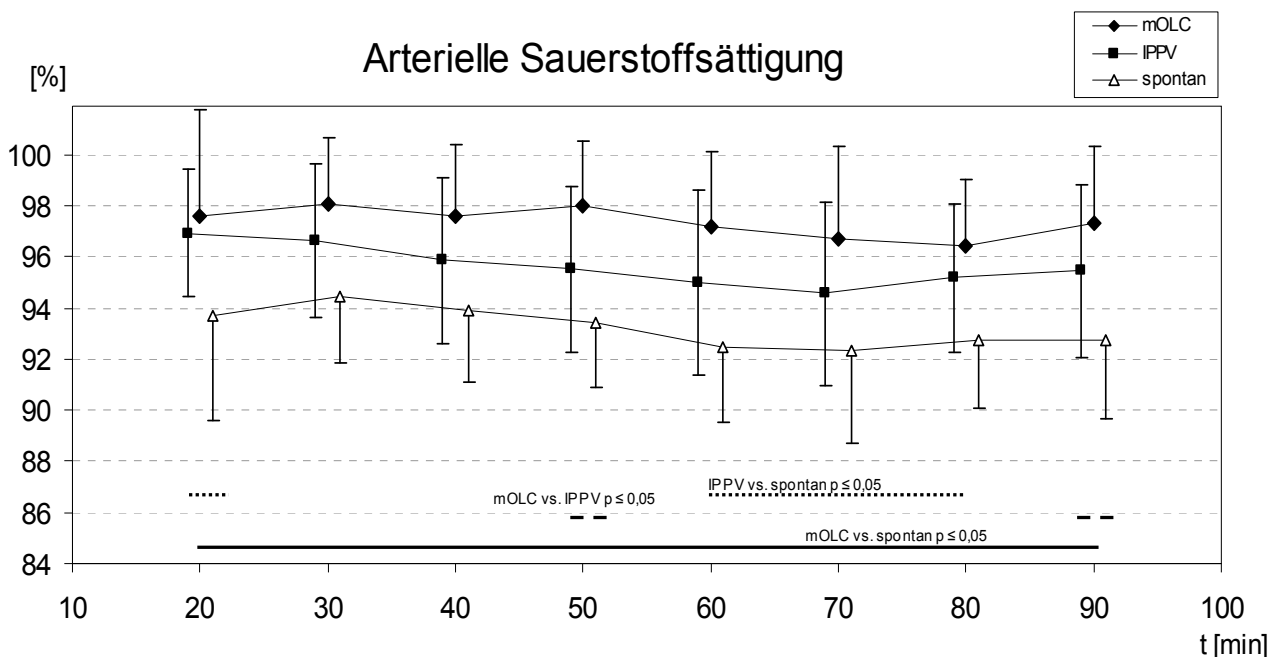


Abb. 4.7 Verlauf der arteriellen Sauerstoffsättigung (Mittelwerte \pm Standardabweichung) über die Narkosezeit im Vergleich einer Beatmung mit dem modifizierten „Open-Lung-Concept“, einer IPPV-Beatmung und spontan atmenden Pferden.

Balken = signifikanter Unterschied

4.4.8 Endexpiratorische Kohlendioxidkonzentration

Die Mittelwerte der endexpiratorischen Kohlendioxidkonzentration der Gruppen A_{mOLC} und B_{IPPV} liegen während des gesamten Messzeitraumes dicht beieinander und überschneiden sich mehrfach.

Wie in Abb. 4.8 ersichtlich wird, unterscheiden sich die Mittelwerte der Gruppe $C_{spontan}$ zu jedem Zeitpunkt hoch signifikant von denen der beiden anderen Gruppen ($p < 0,001$).

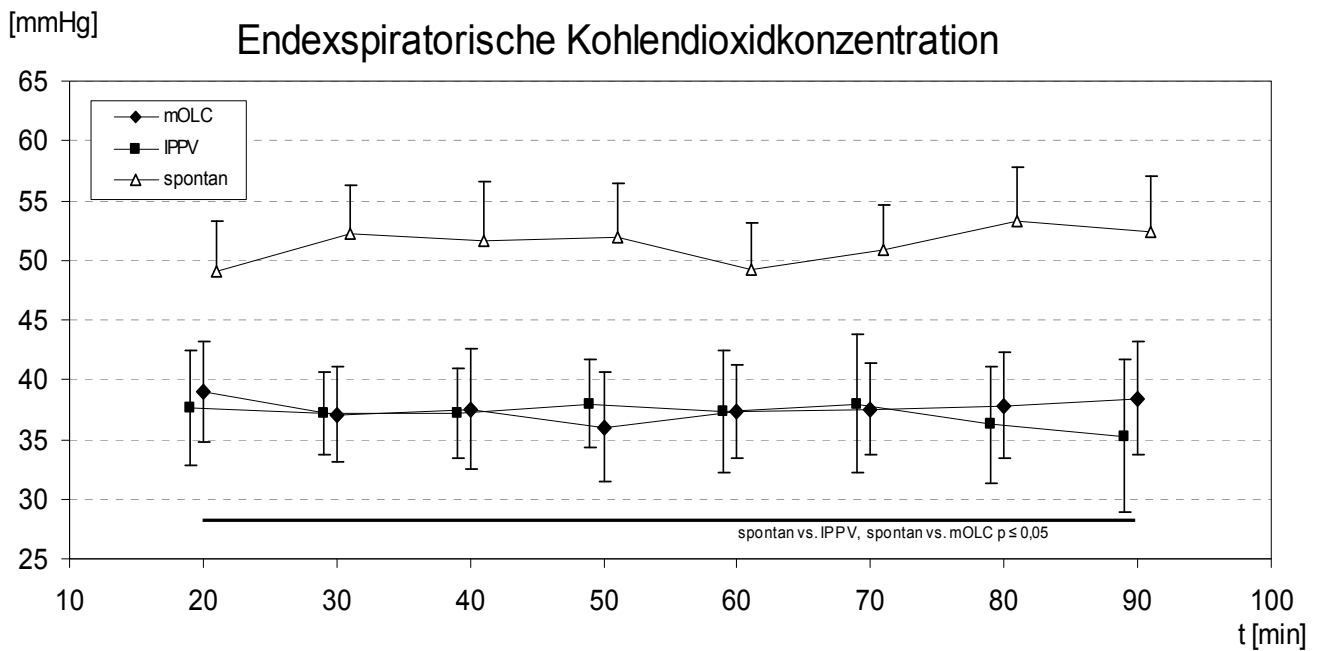


Abb. 4.8 Verlauf des endexpiratorischen Kohlendioxidgehalts (Mittelwerte \pm Standardabweichung) über die Narkosezeit im Vergleich einer Beatmung mit dem modifizierten „Open-Lung-Concept“, einer IPPV-Beatmung und spontan atmenden Pferden.

Balken = signifikanter Unterschied

4.4.9 Alveolärer Totraum

Zwischen den Ergebniskurven der drei untersuchten Gruppen besteht nur wenig Interaktion. Zwischen den Gruppen B_{IPPV} und C_{spontan} ergeben in den Zeiträumen 30 bis 50 Minuten signifikante ($p < 0,01$), und 70 bis 90 Minuten schwach signifikante Unterschiede ($p < 0,05$).

Zum Zeitpunkt 30 Minuten unterscheiden sich die Mittelwerte der Gruppen A_{mOLC} und C_{spontan} hochsignifikant ($p < 0,001$), und zum Zeitpunkt 50 Minuten schwach signifikant voneinander ($p < 0,05$).

Die Mittelwerte der Gruppe A_{mOLC} bewegen sich während der gesamten Narkosedauer auf einem Niveau. Eine leicht ansteigende Tendenz zeigt die Ergebniskurve der Gruppe B_{IPPV}, bei der sich der erste Messwert bei 20 Minuten statistisch auffällig ($p = 0,058$) von dem bei 90 Minuten unterscheidet.

Die Ergebniskurve der Gruppe C_{spontan} unterliegt einigen Schwankungen mit drei Höhepunkten bei 20, 60 und 90 Minuten Narkosedauer.

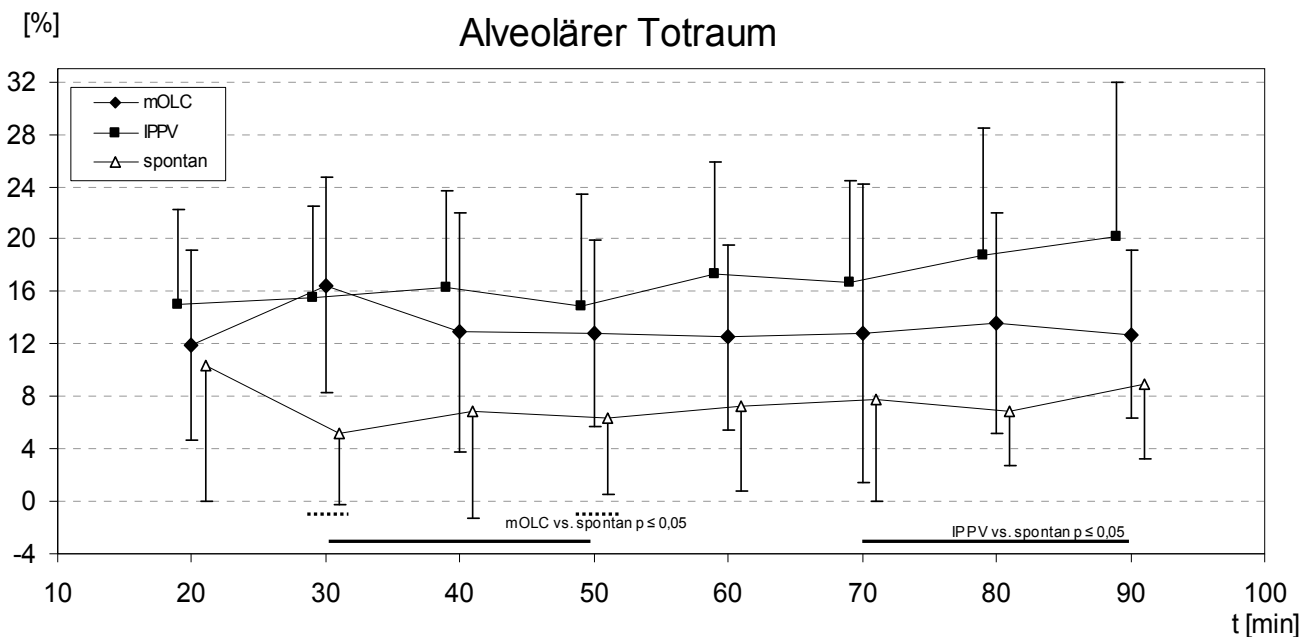


Abb. 4.9 Verlauf des Anteils des Alveolären Totraums am funktionellen Totraum (Mittelwerte \pm Standardabweichung) über die Narkosezeit im Vergleich einer Beatmung mit dem modifizierten „Open-Lung-Concept“, einer IPPV-Beatmung und spontan atmenden Pferden.

Balken = signifikanter Unterschied

4.4.10 Zeitlich unabhängige Auswertung der Mittelwerte

Neben der Auswertung der Verlaufskurven mittels zweifaktorieller Varianzanalyse wurde auch eine zeitlich unabhängige Auswertung der Mittelwerte der intraoperativ gemessenen Parameter mittels einfacher Varianzanalyse durchgeführt. Das Ergebnis ist in Tabelle Tab. 4.4 dargestellt.

Tab. 4.4 Zeitlich unabhängige Auswertung der Mittelwerte

	Gruppe A _{mOLC}	Gruppe B _{IPPV}	Gruppe C _{spontan}	Fehlerwahrscheinlichkeit p	
				A vs. B	A vs. C
Herzfrequenz der Probanden $\bar{X} \pm S$ in [1/min]	32,6 ± 0,39	33,0 ± 1,20	32,7 ± 0,82	A vs. B	p = 0,4
				A vs. C	p = 0,7
				B vs. C	p = 0,5
Atemfrequenz der Probanden $\bar{X} \pm S$ in [1/min]	5,1 ± 0,32	5,0 ± 0,23	8,0 ± 0,73	A vs. B	p = 0,25
				A vs. C	p = 0,0005
				B vs. C	p = 0,0004
Mittl. art. Blutdruck der Probanden $\bar{X} \pm S$ in [mmHg]	93,1 ± 5,47	107,1 ± 6,99	101,2 ± 5,45	A vs. B	p = 0,00027
				A vs. C	p = 0,0026
				B vs. C	p = 0,013
pH der Probanden $\bar{X} \pm S$	7,42 ± 0,01	7,42 ± 0,01	7,33 ± 0,01	A vs. B	p = 0,3
				A vs. C	p = 0,0001
				B vs. C	p = 0,0002
p_aO₂ der Probanden $\bar{X} \pm S$ in [mmHg]	126,4 ± 7,49	88,0 ± 10,07	78,5 ± 4,26	A vs. B	p = 0,0002
				A vs. C	p = 0,00002
				B vs. C	p = 0,05
p_aCO₂ der Probanden $\bar{X} \pm S$ in [mmHg]	43,3 ± 1,25	44,7 ± 0,54	55,4 ± 1,28	A vs. B	p = 0,06
				A vs. C	p = 0,003
				B vs. C	p = 0,002
S_aO₂ der Probanden $\bar{X} \pm S$ in [%]	97,4 ± 0,59	95,3 ± 1,39	93,2 ± 0,76	A vs. B	p = 0,02
				A vs. C	p = 0,005
				B vs. C	p = 0,03
EtCO₂ der Probanden $\bar{X} \pm S$ in [mmHg]	37,6 ± 0,90	37,1 ± 0,92	51,3 ± 1,50	A vs. B	p = 0,07
				A vs. C	p = 0,003
				B vs. C	p = 0,002
Alveolärer Totraum der Probanden $\bar{X} \pm S$ in [%]	13,2 ± 0,01	16,9 ± 0,02	7,9 ± 0,02	A vs. B	p = 0,004
				A vs. C	p = 0,002
				B vs. C	p = 0,0002

4.5 Nicht ausgewertete Probanden

Zusätzlich zu den 42 Probanden, die zu den vorliegenden Ergebnissen beigetragen haben, wurden die Messergebnisse von elf Pferden, die ursprünglich in die Auswertung mit einfließen sollten, nicht für die Auswertung berücksichtigt.

4.5.1 Hypoxämie

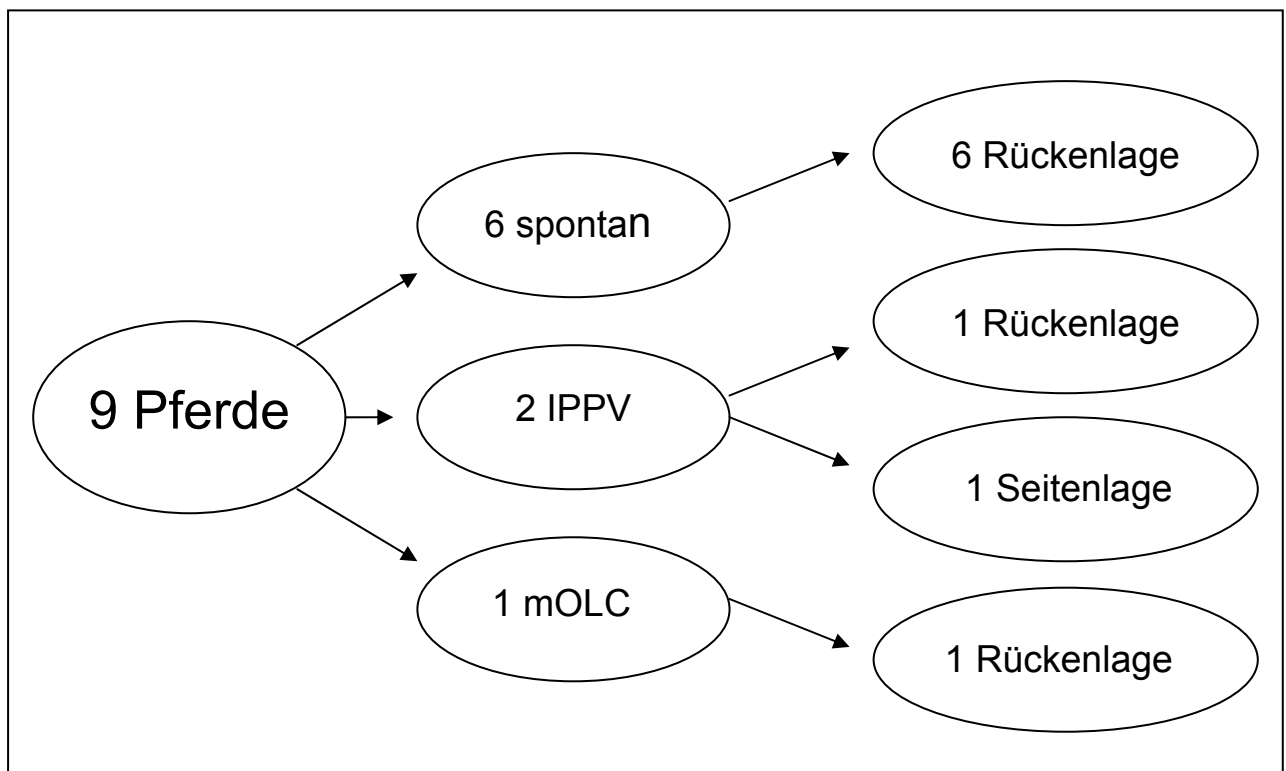


Abb. 4.10 Aufgrund einer Hypoxämie nicht auswertbare Probanden

Bei neun Probanden trat intraoperativ eine Hypoxämie auf mit einer arteriellen Sauerstoffsättigung von weniger als 90%. Von diesen neun Pferden befanden sich acht in Rückenlage und eins in linker Seitenlage. Bei sechs dieser Probanden war die arterielle Sauerstoffsättigung bereits zu Beginn der Messungen unter 90%. Bei den anderen Patienten trat dieses erst im weiteren Verlauf der Narkose auf.

Sechs dieser Patienten atmeten spontan, zwei wurden mittels IPPV beatmet und eins mittels modifiziertem „Open-Lung-Concepts“. Auffällig war, dass bei keinem der Probanden aufgrund seiner präoperativ bestimmten arteriellen Sauerstoffwerte eine Korrelation zu den intraoperativ gemessenen arteriellen Sauerstoffwerten bestand.

Somit entwickelten insgesamt sechs von zwanzig ursprünglich für die Gruppe C_{spontan} ausgewählten Pferde (30%) eine Hypoxämie.

Als Konsequenz wurde die Sauerstoffkonzentration im Gasgemisch erhöht und die Probanden wurden von der Auswertung ausgeschlossen. Die übrigen gemessenen Parameter dieser Probanden waren unauffällig.

4.5.2 Umlagerung intra operationem

Zwei der nicht in die Auswertung mit eingeschlossenen Probanden wurden während der Allgemeinanästhesie von Rückenlage in Seitenlage verbracht. Der Grund dafür war eine veränderte Situation des chirurgischen Eingriffs, die eine Veränderung der Lagerung erforderlich machte.

5 Diskussion

5.1 Diskussion der Methode

5.1.1 Patientenauswahl und deren Einteilung in Gruppen

Die Auswahl der Patienten und ihre Einteilung in die drei Gruppen erfolgten randomisiert. Je nach Lagerung und Art des Eingriffs wurden die Probanden nach dem Zufallsprinzip in eine Gruppe eingeteilt. Der nächste identisch gelagerte und von der Art des Eingriffs ähnliche Patient wurde dann den verbleibenden zwei Gruppen zufällig zugeteilt und die Einteilung des dritten ähnlichen Patienten erfolgte in die noch verbleibende Gruppe. Somit wurde gewährleistet, dass in jeder Gruppe die gleiche Anzahl gleichartiger Eingriffe untersucht werden konnte. Die Zielsetzung der Auswahl gleichartiger Eingriffe wurde zum einen wegen der ähnlichen Schmerzhaftigkeit und dessen Auswirkung auf die Herz-Kreislaufparameter und zum anderen aufgrund der dann gegebenen gleichen Lagerung der Patienten gewählt. Daher konnte aufgrund der gleichmäßigen Verteilung in dieser Studie der Einfluss von Lagerung oder Art des Eingriffs auf die untersuchten Parameter minimiert werden.

Das Ziel der gleichmäßigen Verteilung der Pferde wurde hinsichtlich des Körpergewichts erreicht, zudem sind die Gruppen A_{mOLC} und $C_{spontan}$ hinsichtlich des Alters der Pferde sehr ausgeglichen. Die Probanden der Gruppe B_{IPPV} sind im Durchschnitt 2,5 bis 3 Jahre jünger als in den anderen Gruppen, jedoch besteht kein signifikanter Unterschied zu den anderen Gruppen. In wieweit dieser Altersunterschied Auswirkungen auf die ermittelten Ergebnisse hat, kann nicht zufrieden stellend beantwortet werden. Bei jungen Pferden werden im Allgemeinen ein höherer p_aO_2 , ein höherer p_aCO_2 sowie eine niedrigere Alveolo-arterielle Sauerstoffdifferenz beobachtet (AGUILERA-TEJERO et al. 1998). Eine mögliche Auswirkung auf den mittleren arteriellen Blutdruck wird in Kapitel 5.2.3 diskutiert.

5.1.2 Narkoseführung

Nach der Sedierung der Probanden mit Xylazin erfolgte die Narkoseeinleitung mit Ketamin und Diazepam. Die Narkoseprämedikation mit einem α_2 -Agonisten und die Narkoseinduktion mittels Ketamin und Diazepam ist aufgrund relativ geringer kardiovaskulärer Nebenwirkungen vielfach benutzt (TAYLOR u. CLARKE 2007) und

die Verwendung ist mit einem vergleichsweise geringen Risiko behaftet (JOHNSTON et al. 1995).

Die zur Erhaltung der Narkose verwendete Kombination von Xylazin, Ketamin und Guaifenesin wird vor allem bei Allgemeinanästhesien unter Feldbedingungen aber auch bei größeren Eingriffen unter Klinikbedingungen eingesetzt. Die Vorteile dieser Kombination liegen in der geringen kardiovaskulären und respiratorischen Depression, den guten Operationsbedingungen und der im Allgemeinen ruhigen Aufstehphase (TAYLOR u. CLARKE 2007). Der Nachteil dieser Kombination ist die Akkumulation von Ketamin und Guaifenesin, daher wird eine Narkosedauer von maximal 90 bis 120 Minuten empfohlen (BETTSCHEIT-WOLFENBERGER 2006; TAYLOR u. CLARKE 2007). Es kann außerdem zu einer verlängerten und leicht ataktischen Aufstehphase kommen, so dass die maximale Narkosedauer nicht überschritten werden sollte. Um diesem Problem entgegen zu wirken, wurden bei den Probanden, bei denen die Narkosedauer von 90 Minuten überschritten wurde, die Narkoseerhaltung intraoperativ von einer Injektionsnarkose auf eine Inhalationsnarkose mittels Isofluran umgestellt. Während des Anflutens des Isoflurans kam es bei den Patienten oft zu einem Blutdruckabfall unter 70 mmHg, so dass in einigen Fällen die Gabe von Dobutamin notwendig war. Dieser Effekt war durch die bekannte kardiodepressive Komponente des Isoflurans zu erwarten (SCHATZMANN 1995; DOHERTY u. VALVERDE 2006; LÖSCHER et al. 2006) und wurde nicht weiter ausgewertet.

In dieser Studie wurde die Mischung aus Guaifenesin, Ketamin und Xylazin mittels volumetrischer Infusionspumpe mit gleich bleibender Dosierung während der gesamten 90 Minuten in Allgemeinanästhesie verabreicht, um für jeden Probanden identische Voraussetzungen zu schaffen. Diese Prozedur lieferte zwar damit aussagekräftige Ergebnisse, jedoch war eine individuelle Dosierung entsprechend des jeweiligen Patienten und seiner Narkosetiefe nicht zu gewährleisten. Bei einigen Pferden wäre vermutlich eine geringere Dosierung möglich gewesen, jedoch gab es bei keinem Patienten Anzeichen für eine zu tiefe Narkose, da bei jedem Patienten der Lidschlussreflex noch erhalten war. Im Falle einer zu geringen Narkosetiefe mit Anzeichen eines Nystagmus oder sogar Bewegungen der Probanden wäre eine Bolusinjektion von Ketamin oder Thiopental erfolgt. Jedoch war eine solche Intervention bei keinem Patienten nötig.

Im Vergleich mit Studien anderer Autoren sind die in dieser Studie verwendeten Dosierungen von Guaifenesin und Xylazin ähnlich, jedoch ist die hier verabreichte Ketamin-Dosis von 5,6 mg/kg/h im Vergleich höher (GREENE et al. 1986; YOUNG et al. 1993; LIN et al. 1994; SPADAVECCHIA et al. 1999; MUIR et al. 2000; TAYLOR u. CLARKE 2007). Diese bewährte sich aber in einigen Vorversuchen zu dieser Studie, so dass die Dosierung für die hier durchgeführten Messungen übernommen wurde. Die Verabreichung des „Triple-Drip“ mittels Infusionspumpe stellte sich als sehr präzise und vorteilhafte Applikationsart heraus, da hier die Geschwindigkeit nicht über Augenmaß bestimmt wurde, sondern maschinell. Die exakte Applikation durch eine computergesteuerte Infusion wurde in anderen Studien schon mehrfach beschrieben (TAYLOR et al. 1995; SPADAVECCHIA et al. 1999; WETTSTEIN et al. 2006; YAMASHITA et al. 2007; BRAUN et al. 2009). Ein Nachteil der hier verwendeten Wirkstoffkombination besteht in der schlechteren Steuerbarkeit von Injektionsnarkosen im Vergleich zu Inhalationsnarkosen. Durch die konstante Infusion kann dem entgegengewirkt und Schwankungen in der Narkosetiefe vermieden werden.

5.1.3 Messverfahren

Im Narkoseprotokoll wurden die Parameter Herzfrequenz, Atemfrequenz, mittlerer arterieller Blutdruck, FiO_2 , EtCO_2 , sowie die Säure-Basen- und Blutgasparameter pH-Wert, arterieller Sauerstoffpartialdruck, arterieller Kohlendioxidpartialdruck und arterielle Sauerstoffsättigung dokumentiert. Dies erfolgte in Intervallen von zehn Minuten, so dass kurzfristige Schwankungen innerhalb dieses Zeitraumes nicht berücksichtigt werden konnten.

Die Herz-Kreislaufparameter wurden mit einem Narkosemonitor erfasst, und die arterielle Blutgasanalyse wurde mit einem stationären Blutgasanalysegerät durchgeführt. Diese Methode der Blutgasanalyse ist als Referenzmethode zur Überprüfung des Gasaustausches und damit auch zur Anpassung der Beatmung an diesen anerkannt (SCHATZMANN 1983; DOHERTY u. VALVERDE 2006).

Bei der Gruppe der spontan atmenden Pferde konnte es infolge von niedrigen Atemfrequenzen, die zeitweilig unter 3 Atemzüge pro Minute lagen, zu Messungenauigkeiten bei diesem Parameter kommen. Grund dafür ist die dann nicht ausreichende Frequenz der Probennahme der paramagnetischen Messzelle. In

diesem Fall wurde die Atemfrequenz manuell ausgezählt, um aussagekräftige Werte protokollieren zu können.

Um die arterielle Blutgasanalyse durchführen zu können, mussten Blutproben mittels Dreiweghahn am arteriellen Katheter genommen werden. Zur Vermeidung einer Verlegung des Katheters mit geronnenem Blut wurde dieser nach jeder Probenentnahme mit heparinierter Kochsalzlösung gespült. Damit keine Vermischung von Kochsalzlösung und Probenblut zustande kam, wurden die ersten zwanzig Tropfen vor Entnahme der Blutprobe verworfen. Dennoch können eine geringe Vermischung und daher auch eine geringe Verfälschung der Blutgaswerte nicht sicher ausgeschlossen werden.

5.1.4 Beatmungstechnik

Direkt nach dem Anschließen der Probanden an das Narkosesystem wurde eine Trägergasflussrate von 8 l/min eingestellt. Nach etwa zehn Minuten und Einstellung eines Sauerstoffanteils im Gasgemisch von 35% wurde diese auf ca. 10 ml/kg/min (TAYLOR u. CLARKE 2007) reduziert. Wenn die Trägergasrate ausreichend eingestellt war und keine Undichtigkeiten im Narkosesystem auftraten, konnte die Sauerstoffkonzentration stabil gehalten werden.

Die Probanden der Gruppe B wurden mittels positiv intermittierender Druckbeatmung beatmet. Dabei wurde ein inspiratorischer Druck zwischen 25-35 cm H₂O je nach Körpergewicht des Probanden am Manometer eingestellt und aufgrund der höheren Messgenauigkeit mittels Spirometer überprüft. Je nach p_aCO₂-Konzentration wurden der inspiratorische Druck oder die Atemfrequenz entsprechend angepasst.

Ein modifiziertes „Open-Lung-Concept“ wurde als Beatmungsregime bei Probanden der Gruppe A angewendet. Dabei wurde ein PEEP von 10-12 cm H₂O festgesetzt und nicht individuell, wie vielfach in der Literatur empfohlen (AGRO et al. 2004; WETTSTEIN et al. 2006; PAPADAKOS u. LACHMANN 2007), austitriert. Diese vereinfachte Durchführung dieser Beatmungsmethode hat sich in vorherigen Studien als wirkungsvoll erwiesen (HOPSTER 2007; SCHULTE-BAHRENBURG 2008). Als Kriterium für eine geöffnete Lunge wurde ein optimaler Gasaustausch gesehen, der durch den arteriellen Sauerstoffpartialdruck beurteilt wurde. Als Grenzwert für ein Rekrutierungsmanöver wurde ein p_aO₂ von 140 mmHg festgelegt. Ein Unterschreiten dieses Grenzwertes wird als ein Zeichen einer nicht vollständig geöffneten Lunge bewertet. Der Grenzwert von 140 mmHg basiert auf der Annahme, dass der p_aO₂

nahezu linear mit dem FiO_2 ansteigt. Aufgrund einiger klinischer und mathematischer humanmedizinischer Studien (WHITELEY et al. 2002; KARBING et al. 2007) ist der Verlauf für eine Pferdelage mit vergrößertem Shuntvolumen und einem Missverhältnis von Ventilation und Perfusion, welches vor allem bei Pferden in Rückenlage vorliegt (NYMAN u. HEDENSTIERNA 1989), jedoch zu bezweifeln.

Daher wurde kein rein lineares Modell für die Berechnung des unteren Grenzwertes für eine ausreichende Öffnung der Lunge verwendet, sondern es wurde ein Anteil von 30% abgezogen, da für das Pferd Orientierungswerte oder Vergleichskurven für den Verlauf des p_aO_2 im Verhältnis zum FiO_2 bislang fehlen.

Bei einigen Probanden gestalteten sich die Rekrutierungsmanöver mit einer Steigerung des P_{Peak} bis auf 80 cm H_2O ohne die Betätigung des Sauerstoffbypasses (30 l/min O_2) problematisch. Da aber das Mischverhältnis bei dieser Zufuhr von großen Mengen Sauerstoff und Raumluft nicht immer exakt eingehalten werden konnte, traten in einigen Fällen unmittelbar nach der Rekrutierung geringe Schwankungen des Sauerstoffanteils von 35% auf. Diese wurde so schnell wie möglich wieder ausgeglichen, um weiterhin aussagekräftige Messergebnisse zu erhalten.

5.1.5 Postoperatives Monitoring

Um die postoperative Phase auszuwerten und aussagekräftige Ergebnisse zu erhalten, ist eine Vereinheitlichung der Narkoseführung eine zwingende Voraussetzung dafür. Da in dieser Studie aber ein Grossteil der Probanden eine Narkosezeit von 90 Minuten überschritten hat, wurden diese Pferde danach auf eine Narkoseerhaltung mittels Isofluran umgestellt. Denn um eine Akkumulation der Wirkstoffe Ketamin und Guaifenesin zu vermeiden, sollte eine Narkosezeit von 90 Minuten nicht überschritten werden (BETTSCHEART-WOLFENSBERGER 2006). Aufgrund der veränderten Nebenwirkungen der verwendeten Anästhetika auf pulmonale und kardiovaskuläre Parameter sind somit aussagekräftige Ergebnisse zur Bewertung der Aufstehphase in dieser Studie nicht möglich gewesen.

5.2 Diskussion der Ergebnisse

5.2.1 Arterieller Sauerstoffpartialdruck

Die vorliegenden Untersuchungsergebnisse und ihre Darstellung (s. Abb. 4.1, S. 49) zeigen, dass mittels einer Beatmung nach einem modifizierten „Open-Lung-Concept“ während einer Allgemeinanästhesie des Pferdes eine signifikant bessere Oxygenierung des arteriellen Blutes erreicht werden kann als mittels konventioneller IPPV-Beatmung oder Spontanatmung.

Bei den meisten Patienten der Gruppe A_{mOLC} zeigte sich, dass unabhängig von der Lagerung und Art des Eingriffs eine höhere Oxygenierung im Vergleich mit den anderen Gruppen erreicht werden konnte. Somit konnten die oft in der Literatur für eine ungenügende Oxygenierung beschriebenen Atelektasen (NYMAN et al. 1990) durch Rekrutierungsmanöver zusammen mit einem PEEP verhindert bzw. therapiert werden (NYMAN et al. 1987; LEVIONNOIS et al. 2006; HOPSTER 2007; SCHÜRMAN et al. 2008). Während nur bei zwei Patienten keine Rekrutierungsmanöver zur Erreichung der festgelegten p_aO_2 -Grenze von 140 mmHg benötigt wurden, war die Wiedereröffnung der Lunge bei den restlichen dazu erforderlich.

In der Literatur wird der Einsatz eines alleinigen PEEP von 10 cm H_2O kontrovers diskutiert. Während WILSON u. McFEELY (1991) und HEINRICHS (1992) einen signifikanten Anstieg des p_aO_2 durch eine Vergrößerung der Alveolen und damit auch eine Vergrößerung der Oberfläche für den Gasaustausch beobachten konnten, beschreibt die Mehrzahl der Autoren keine oder lediglich eine tendenzielle Verbesserung (NYMAN u. HEDENSTIERNA 1988; WILSON u. SOMA 1990; PAURITSCH 1997).

Der Sauerstoffpartialdruck der Gruppe B_{IPPV} lag bis auf den letzten Messzeitpunkt immer über dem der Gruppe $C_{spontan}$, ohne dass jedoch ein signifikanter Unterschied zwischen diesen Gruppen bestand. Die beobachtete Tendenz deckt sich auch mit der Studie von DAY et al. (1995), in der durch eine Beatmung mittels IPPV höhere Sauerstoffpartialdrücke erreicht werden konnten als bei spontan atmenden Pferden. Im Gegensatz dazu fielen in der vorliegenden Studie zwei Pferde trotz einer IPPV-Beatmung intraoperativ mit einer Hypoxämie auf. Dafür kann das kleinere Herzschlagvolumen verantwortlich sein, das durch den positiven Druck im Thorax und den dadurch ausgeübten Druck auf die großen Blutgefäße verringert ist. Der reduzierte venöse Rückfluss führt zu einer reduzierten Lungenperfusion und zu einer

Beeinträchtigung des p_aO_2 (BERGMANN u. NECEK 1982; SCHMIDT-OECHTERING 1993c).

Im direkten Vergleich der Anwendung des Open-Lung-Concepts mit 35% Sauerstoff wurden in der Studie von SCHULTE-BAHRENBURG (2008) höhere p_aO_2 erreicht als in dieser Studie. Ein möglicher Grund dafür liegt in der Verwendung von Dobutamin, welches die Lungenperfusion und den Lungenarteriendruck nachweislich erhöht (GASTHUYS et al. 1991b; GEHLEN et al. 2006; C. A. CRAIG et al. 2007) und damit möglicherweise auch den pulmonalen Gasaustausch verbessert (WETMORE et al. 1987).

5.2.2 Arterieller Kohlendioxidpartialdruck und pH-Wert

Die beiden Parameter p_aCO_2 und pH-Wert stehen in direktem Zusammenhang miteinander, da durch den arteriellen Kohlendioxidpartialdruck der pH-Wert des Blutes über die Henderson-Hasselbalch-Gleichung maßgeblich beeinflusst wird.

Während einer künstlichen Beatmung wird versucht, eine Entgleisung des Säure-Basen-Haushaltes zu verhindern und den Kohlendioxidpartialdruck zwischen 35 und 45 mmHg konstant zu halten (HUBBELL 1991b; SCHATZMANN 1995; MUIR et al. 2007). In der Gruppe $C_{spontan}$ lag der p_aCO_2 über den gesamten Messzeitraum signifikant über dem der anderen Gruppen. Vermutlich wird die Lunge durch die Lagerung und den Druck des Gastrointestinaltraktes auf das Diaphragma in ihrer Funktion eingeschränkt, so dass nur ein geringes Atemzugvolumen möglich ist und somit trotz hoher Atemfrequenz ein höherer p_aCO_2 durch eine vermehrte Totraumventilation und vermehrte Atelektasenbildung vorliegt. Auch lag dies an der bei der Spontanatmung benötigten Reizschwelle zum Auslösen des Atemreflexes. Die Reizschwelle des Atemzentrums wird bei der künstlichen Beatmung bewusst ausgeschaltet, so dass die p_aCO_2 -Werte in diesen beiden Gruppen etwa 10 mmHg niedriger waren als in der Gruppe $C_{spontan}$ (SCHMIDT-OECHTERING 1993c; SCHATZMANN 1995).

Außerdem liegen die Mittelwerte des p_aCO_2 bei den spontan atmenden Pferden über dem Referenzbereich für den arteriellen Kohlendioxidpartialdruck im Gegensatz zu den anderen Gruppen, bei denen die Mittelwerte im oberen Teil des physiologischen Referenzbereiches liegen. Ursächlich dafür scheint der durch die Beatmung vorgegebene Wert des p_aCO_2 von ca. 40-45 mmHg, um ein selbstständiges Atmen

der Probanden zu verhindern und somit eine exakte künstliche Beatmung durchführen zu können zum Erreichen aussagekräftiger Messwerte.

Kohlendioxid kann bei den verschiedenen Spezies direkte und indirekte Effekte haben. Beim Menschen führt es direkt zu einer Myokarddepression (MONROE et al. 1960) und zu einer Vasodilatation der peripheren Arteriolen (MAS et al. 2000). Durch den sinkenden pH-Wert im Blut und in den Zellen kann es zu einer Veränderung der Funktion der Herzmuskelzellen und damit zu einer Myokarddepression kommen. Dagegen führt eine milde Hyperkapnie beim Pferd indirekt zu einer Verbesserung der kardiovaskulären Funktion, indem das sympathische System aktiviert und so der systemische arterielle Blutdruck und die Myokardkontraktilität erhöht werden (WAGNER et al. 1990; KHANNA et al. 1995; TAYLOR 1998). Damit stellt sich die Frage, ob der mittlere arterielle Blutdruck eher durch einen erhöhten $p_a\text{CO}_2$ oder durch den fehlenden Einfluss einer künstlichen Beatmung bei spontan atmenden Pferden höher ist als bei mittels „Open-Lung-Concept“-beatmeten Pferden. Dem entgegen stehen jedoch Studien, die zeigen konnten, dass beatmete hyperkapnische Pferde eine ähnliche Herz-Kreislauffunktion aufweisen wie spontan atmende Pferde (MIZUNO et al. 1994; KHANNA et al. 1995; PICEK 2008). Zudem konnte in einer Studie von WAGNER et al. (1990) gezeigt werden, dass eine Hyperkapnie bei beatmeten Pferden eine verbesserte kardiovaskuläre Funktion hervorruft als bei beatmeten normokapnischen Pferden, was vermutlich auf einen Anstieg an zirkulierenden Katecholaminen durch den Anstieg des $p_a\text{CO}_2$ zurückzuführen ist. Die vermehrt zirkulierenden Katecholamine können einerseits die Herzkontraktilität und den Herzauswurf steigern, andererseits können sie das Risiko von Arrhythmien erhöhen und zu einer generalisierten Stressantwort führen. Die mittleren Blutdruckwerte der Gruppe C_{spontan} sind trotz signifikant höherem $p_a\text{CO}_2$ niedriger als die Werte der Gruppe B_{IPPV} . Daraus lässt sich ableiten, dass in dieser Studie der Kohlendioxidpartialdruck keinen erkennbaren Einfluss auf den mittleren arteriellen Blutdruck hat.

Der pH-Wert der Gruppe C_{spontan} lag während des gesamten Messzeitraumes signifikant unter dem der Gruppen A_{mOLC} und B_{IPPV} . Zu erklären ist dieses Ergebnis durch den oben beschriebenen rechnerischen Zusammenhang zwischen dem hohen $p_a\text{CO}_2$ in der Gruppe C_{spontan} und dem respiratorisch bedingten pH-Wert.

Bei den Probanden der Gruppe C_{spontan} lagen die Mittelwerte des pH-Wertes konstant zwischen 7,3 und 7,35 und damit geringfügig unter dem Referenzbereich. Unter

Berücksichtigung der $p_a\text{CO}_2$ -Werte lag in dieser Gruppe eine leichte respiratorische Azidose vor (MUIR et al. 2007). Diese kann einerseits durch eine Hypoventilation und andererseits infolge einer gestörten Diffusion, beispielsweise bei Vorliegen eines Lungenödems, entstehen (GÄBEL 2000). Bei den Probanden der Gruppe C_{spontan} lag wahrscheinlich eine Hypoventilation und somit auch ein erhöhter $p_a\text{CO}_2$ vor. Jedoch konnte keine Überprüfung dieser Hypothese erfolgen, da aufgrund technischer Probleme eine spirometrische Messung nicht möglich war.

Da durch das eingesetzte Xylazin die atemstimulierende Wirkung von CO_2 verringert und der Grenzwert für die CO_2 -Stimulation im Atemzentrum erhöht wird, kommt es bei den spontan atmenden Probanden zu erhöhten Kohlendioxidwerten und damit zu einer respiratorischen Azidose (SCHATZMANN 1995). Xylazin als α_2 -Adrenozeptor-Agonist bewirkt an den präsynaptischen Nervenendigungen eine Hemmung der Freisetzung von Noradrenalin und je nach Dosis kommt es zu einer geringen Atemdepression (EBERT et al. 2002; LÖSCHER 2002).

5.2.3 Mittlerer arterieller Blutdruck

In verschiedenen Studien konnte gezeigt werden, dass künstlich beatmete Pferde gegenüber spontan atmenden Pferden eine schlechtere kardiovaskuläre Funktion aufweisen (HODGSON et al. 1986; EDNER et al. 2005). Auffällig bei der Betrachtung der Ergebniskurve der Gruppe A_{mOLC} ist der geringere mittlere Blutdruck während des gesamten Messzeitraumes im Vergleich zu dem der anderen Gruppen. Durch den Einfluss dieses Beatmungskonzeptes kommt es zu einer kardiovaskulären Depression, die durch den erhöhten intrathorakalen Druck verursacht wird. Durch die Rekrutierungsmanöver und die damit einhergehenden, höheren Spitzendrücke wird der Kreislauf in größerem Ausmaß als bei der konventionellen Beatmung beeinträchtigt. So komprimiert der artifiziell erzeugte positive Druck im Thorax große Gefäße wie V. cava caudalis, V. cava cranialis und Aorta und senkt so die Vor- und Nachlast am Herzen. Außerdem korreliert der Anstieg des inspiratorischen Drucks positiv mit dem Widerstand des Blutflusses durch die Lungengefäße. Folglich wird in der Diastole der linke Ventrikel des Herzens weniger gefüllt, was zu einer Blutdruckabsenkung führen kann (LEVIONNOIS et al. 2006; WETTSTEIN et al. 2006).

In jeder Gruppe ist ein Abfall des mittleren arteriellen Blutdrucks über den Messzeitraum zu erkennen. Diese Beobachtung deckt sich mit anderen Studien

(GREENE et al. 1986; SCHATZMANN 1995). Der kontinuierliche Blutdruckabfall im Verlauf der Narkose wird anscheinend durch die Anästhetika und Sedativa verursacht und nicht durch die einzelnen Beatmungsschemata, da alle Gruppen tendenziell in gleichem Maße abfallen. Denn vor allem durch den Einsatz von α_2 -Adrenozeptor-Agonisten entweder als Bolusinjektion oder als Gabe einer hohen Konzentration kommt es initial zum Blutdruckanstieg, jedoch wird sekundär durch die Wirkung der zentralen Effekte ein Blutdruckabfall hervorgerufen. Eine Anpassung der Dosierung der Anästhetika an die Narkosetiefe, die aufgrund der Gefahr der Akkumulation und verzögerten Elimination vor allem von Ketamin und Guaifenesin notwendig wäre, wurde in dieser Studie nicht durchgeführt. Vielmehr wurde der „Triple-Drip“ permanent bis zum Ende der Messungen konstant per volumetrischer Infusionspumpe appliziert. Durch die gewisse Anflutungszeit der Narkosemittel kam es durch die konstante Infusion anscheinend zu einer Vertiefung der Narkose im Verlauf der Messung, so dass eine kardiodepressive Wirkung mit zunehmender Narkosedauer deutlich wurde. Diese Wirkung wurde zur Erlangung aussagekräftiger Messwerte bei allen Gruppen akzeptiert, weil sich die mittleren Blutdruckwerte in allen Gruppen im physiologischen Bereich bewegten und eine regelmäßige Kontrolle der Reflexe eine Narkosetiefe im chirurgischen Toleranzstadium ergab. Aus den Ergebnissen lässt sich ableiten, dass eine Anpassung der Dosierung während einer neunzigminütigen Injektionsnarkose in den meisten Fällen nicht notwendig ist.

Um die Herz-Kreislaufsituation exakter beurteilen zu können wären invasive Messmethoden, wie Herzkatheteruntersuchungen mit einer Thermo- oder Lithiumdilution, nötig. Da aber ausschließlich Patienten der Klinik für die Versuche verwendet wurden, wurden weitere Messungen aufgrund erhöhter Risiken nicht durchgeführt.

5.2.4 Atemfrequenz

Durch die Lagerung des Pferdes in Seiten- und Rückenlage wird die Funktion der Lunge durch den Druck des Darmkonvoluts auf das Zwerchfell beeinträchtigt. Dadurch wird das Pferd bei Spontanatmung gezwungen, die daraus resultierende Verringerung der Atemzugtiefe durch eine höhere Atemfrequenz zu kompensieren. In der vorliegenden Studie erwies sich die mittlere Atemfrequenz der Gruppe C_{spontan} als signifikant höher als in den Gruppen A_{mOLC} und B_{IPPV} , weil in diesen Gruppen die Atemfrequenz durch den Respirator mit dem Ziel der Eukapnie eingestellt wurde.

Doch trotz der signifikant höheren Atemfrequenz der Probanden der Gruppe C_{spontan} lagen die Mittelwerte des $p_a\text{CO}_2$ über denen der anderen Gruppen. Dies lässt auf ein geringeres Atemzugvolumen schließen.

5.2.5 Arterielle Sauerstoffsättigung

In allen Gruppen verlaufen die Ergebniskurven der arteriellen Sauerstoffsättigung ähnlich zu den Kurven des arteriellen Sauerstoffpartialdrucks und haben ein ähnliches Absinken der berechneten Werte zum Narkoseende hin. Jedoch sind die Kurven nur ähnlich, da die O_2 -Bindungskurve einen sigmoiden Verlauf mit einer Plateaubildung zeigt (GROS 2000). Eine Rechtsverschiebung der Sättigungskurve ist durch den Bohr-Effekt erklärbar (GROS 2000) und scheint in der Gruppe C_{spontan} vorzuliegen, da in dieser Gruppe einerseits der pH-Wert erniedrigt und andererseits der $p_a\text{CO}_2$ erhöht ist verglichen mit den anderen Gruppen. Je größer der Bohr-Effekt ausgeprägt ist, desto geringer ist die Affinität von Hämoglobin zu Sauerstoff und der Sauerstoff kann leichter in das Gewebe abgegeben werden, er wird aber auch gleichzeitig schlechter in der Lunge aufgenommen (MCDONELL u. KERR 2007). Somit kann bei einerseits hohen Gehalten an Kohlendioxid im arteriellen Blut und andererseits einer vergleichsweise niedrigen Sauerstoffsättigung, wie hier in der Gruppe C_{spontan} zu beobachten, trotzdem ein vergleichsweise hoher Sauerstoffpartialdruck vorliegen. Dies wird in dieser Studie bestätigt und bedeutet, dass die Bewertung der $S_a\text{O}_2$ nur mit Berücksichtigung des $p_a\text{CO}_2$ erfolgen sollte. Außerdem ist wegen der Form und Rechtsverschiebung der Bindungskurve eine Hypoxämie anhand der arteriellen Sauerstoffsättigung bei spontan atmenden Pferden intra operationem nicht zufrieden stellend zu beurteilen, daher sollte in diesem Fall der arterielle Sauerstoffpartialdruck betrachtet werden.

5.2.6 Alveolärer Totraum und endexpiratorische Kohlendioxidkonzentration

In der Studie von CRIBB et al. (1988) besteht eine statistisch signifikante Korrelation zwischen EtCO_2 und $p_a\text{CO}_2$, die auch bei den hier vorliegenden Ergebnissen reproduzierbar ist. In dieser Studie und in nur einigen Studien anderer Autoren (MOENS 1989; SCHULTE-BAHRENBERG 2008) wird die Auswirkung einer Allgemeinanästhesie und artifizierlicher Ventilation beim Pferd untersucht, so dass Ergebnisse zum Vergleich mit dieser Studie rar sind.

Da in der hier vorliegenden Studie kein signifikanter Unterschied zwischen den Gruppen A_{mOLC} und B_{IPPV} hinsichtlich des alveolären Totraums erkennbar ist, findet anscheinend eine Störung der Kapillarperfusion durch eine Überblähung der Lunge (BURCHARDI 1982) nicht in dem Maße statt, um den Totraum zu erhöhen oder eine Vermehrung der Lungenareale mit einem gestörten Perfusions-/Ventilationsquotienten zu bewirken. Diese Vermutung wird unterstützt durch die Studie von SCHULTE-BAHRENBURG (2008), bei der es durch die Anwendung des modifizierten „Open-Lung-Concepts“ zu keiner Vergrößerung des alveolären Totraums zu kommen scheint.

Ein möglicher Zusammenhang besteht anscheinend zwischen der Druckdifferenz Δp und der Größe des alveolären Totraums. Δp liegt in der Gruppe B_{IPPV} um 10 cm H_2O höher als in der Gruppe A_{mOLC} . Korrelierend dazu ist auch der alveoläre Totraum bei einer IPPV-Beatmung größer als bei einer mOLC-Beatmung. Ein Grund dafür liegt wie schon oben beschrieben in der nicht zueinander proportionalen Vergrößerung einerseits des Alveolardrucks und andererseits des Pulmonalarteriendrucks. Je größer Δp , desto mehr kommt es zu einer unphysiologischen Beeinflussung der Lunge und damit auch zu einer gewissen Beeinträchtigung im Gasaustausch. Jedoch wird der durch die Vergrößerung des alveolären Totraums reduzierte Gasaustausch durch die Rekrutierungsmanöver wieder kompensiert.

Weiter besteht ein signifikant größerer alveolärer Totraum in der Gruppe B_{IPPV} verglichen mit der Gruppe $C_{spontan}$. Durch einen Anstieg des Alveolardrucks werden die Lungenkompartimente vergrößert, in denen ein Blutfluss nicht möglich ist und der Pulmonalarteriendruck nicht proportional dazu mit ansteigt. So entstehen Bereiche der Lunge, in denen der Alveolardruck größer ist als der Pulmonalarteriendruck. Diese Druckdifferenz kann der Blutfluss nicht überwinden, so dass es zu nicht perfundierten Kompartimenten kommt. Damit ergibt sich durch dieses Phänomen ein vergrößerter alveolärer Totraum. Einen ähnlichen Effekt wie die künstliche Beatmung stellt die Lagerung des Pferdes in Allgemeinanästhesie dar, bei der es auch zur Bildung nicht durchbluteter Lungenkompartimente kommt. Man konnte sowohl bei Pferden in Seitenlage als auch bei Pferden in Rückenlage einen signifikant negativen Einfluss einer IPPV-Beatmung feststellen (MOENS 1989). Da in dieser Studie in jeder Gruppe die gleiche Anzahl gleich gelagerter Pferde untersucht wurde, muss davon ausgegangen werden, dass die Lagerung hier keinen Einfluss auf das

Ergebnis hat. Vielmehr scheint die Beatmungsform hier verantwortlich für die Differenzen in den Ergebnissen zu sein.

Bei der Auswertung des alveolären Totraums fiel auf, dass dieser nur in der Gruppe B_{IPPV} zum Ende der Narkose hin leicht ansteigt. Dieser Anstieg ist zwar statistisch auffällig ($p = 0,058$), aber nicht signifikant. Diese Beobachtung deckt sich mit vorherigen Untersuchungen, bei denen auch keine signifikante Vergrößerung des alveolären Totraums im Verlauf der Narkose zu erkennen war (CRIBB 1988).

5.2.7 Ausschluss von Probanden

Elf Probanden, die ursprünglich für die Studie vorgesehen waren und die Einschlusskriterien erfüllten, mussten im Verlauf der Narkose für die Auswertung ausgeschlossen werden. Zwei dieser Probanden in Rückenlage mussten umgelagert werden, da sich intra operationem herausstellte, dass der Operationsbereich nur in Seitenlage zugänglich war und dadurch nicht vergleichbare Messwerte zu erwarten waren.

Da sich aber eine Änderung der Lagerung der Probanden auf die Herz-Kreislauf-, Lungen- und Säure-Basen-Parameter auswirkt (HALL 1979; MCDONELL et al. 1979; GLEED u. DOBSON 1988; NYMAN et al. 1988; NYMAN u. HEDENSTIERNA 1989; GASTHUYS et al. 1991a; BRAUN et al. 2009), hätten diese zwei Probanden keine aussagekräftigen Messwerte geliefert.

Bei den verbleibenden neun Probanden manifestierte sich intraoperativ eine ausgeprägte Hypoxämie, so dass bei diesen Patienten die Sauerstoffkonzentration im Atemgasgemisch über die in der Studie vorgegebene Konzentration von 35 % erhöht werden musste. Acht von den neun Probanden befanden sich in Rückenlage und sechs von neun atmeten spontan, während zwei konventionell mittels IPPV beatmet wurden. Somit wurden ursprünglich zwanzig Pferde für die Gruppe C_{spontan} ausgewählt und 30 % dieser entwickelten im Narkoseverlauf eine Hypoxämie. Die Verteilung der nicht auswertbaren Probanden lässt darauf schließen, dass sich eine Hypoxämie eher bei spontan atmenden Pferden in Rückenlage manifestiert, als bei Pferden, die sich in Seitenlage befinden und künstlich ventiliert werden. Ein möglicher Grund dafür sind veränderte Ventilations-/Perfusions-Missverhältnisse mit einer Zunahme des intrapulmonalen Shuntvolumens und verstärktem Auftreten von Atelektasen (NYMAN u. HEDENSTIERNA 1989; NYMAN et al. 1990). Eine weitere Studie hat gezeigt, dass auch im Verlauf einer Narkose der arterielle

Sauerstoffpartialdruck bei Pferden in Rückenlage schneller als bei Patienten in Seitenlage sinkt (DAY et al. 1995). In der vorliegenden Studie wurde nur eines der neun ausgeschlossenen Pferde mittels mod. „Open-Lung-Concept“ beatmet, so dass diese Beatmungsform eine verbesserte Sauerstoffversorgung auch bei gefährdeten Patienten bewirken könnte. Jedoch können aus der kleinen hier vorliegenden Stichprobengröße keine gesicherten Aussagen über den Einfluss bei den hypoxämischen Probanden gemacht werden.

5.2.8 Zusammenfassende Diskussion und Ausblick

In dieser Studie konnte belegt werden, dass mit einer Beatmung nach dem modifizierten „Open-Lung-Concept“ beim Pferd eine bessere Oxygenierung im Vergleich zur konventionellen Beatmung und zu spontan atmenden Patienten erreicht werden kann. Diese Optimierung im pulmonalen Gasaustausch durch dieses Beatmungskonzept geht jedoch mit einer Beeinträchtigung des Herz-Kreislaufsystems bei präoperativ klinisch allgemeingesunden Pferden einher. Im Vergleich mit einer Studie, die als Narkoseerhaltung ein Inhalationsnarkotikum wie Isofluran verwendete (HOPSTER 2007), waren in der vorliegenden Studie durch die Verwendung eines „Triple-Drip“ bestehend aus Guaifenesin, Ketamin und Xylazin, deutlich höhere Werte des mittleren arteriellen Blutdrucks zu erreichen. So mussten keine Maßnahmen gegen eine Hypotension ergriffen werden und die kreislaufdepressiven Rekrutierungsmanöver konnten wie in der Studie von WETTSTEIN et al. (2006) ohne maßgeblichen Blutdruckabfall durchgeführt werden.

Da sich diese Studie auf die Untersuchung elektiver Eingriffe beschränkte, bei denen das Allgemeinbefinden ungestört war, wäre der Vergleich mit Risikopatienten interessant.

Außerdem bestätigt diese Studie, dass eine konventionelle IPPV-Beatmung nicht in der Lage ist den Sauerstoffgehalt im arteriellen Blut signifikant zu verbessern und in erster Linie zur Therapie einer Hyperkapnie geeignet ist.

Es kann nach den Ergebnissen in dieser Studie gesagt werden, dass 35 % Sauerstoff im Allgemeinen ausreichend sind für eine arterielle Sauerstoffsättigung von über 90%. Ob das in der Humanmedizin als Goldstandard angesehene Gasmisch mit 40% Sauerstoff für Allgemeinanästhesien bei Pferden übertragbar ist, bleibt unklar, da der Einfluss von Resorptionsatelektasen noch nicht ausreichend untersucht wurde.

Da bei einigen Pferden, die spontan atmeten, eine Hypoxämie ($S_aO_2 < 90\%$) vor allem bei langen Narkosen auftrat, scheint es sinnvoll, Pferde in Allgemeinanästhesie unter Feldbedingungen mit Sauerstoff zu versorgen um eine Hypoxämie zu vermeiden. So kann in vielen Fällen die Gewebeoxygenierung verbessert werden, die vor allem bei Patienten in Rückenlage beeinträchtigt ist (NYMAN u. HEDENSTIERNA 1989). Eine Sauerstoffinsufflation wäre auch mit einfacher Ausstattung durchführbar. Eine weitere Indikation dafür besteht in der verbesserten Wundheilung bei Inhalation von einem Gasgemisch mit 80% Sauerstoff intra- und 2 Stunden postoperativ (GREIF et al. 2000). Da dies eine humanmedizinische Studie ist und Vergleichbares noch nicht beim Pferd untersucht worden ist, wären Studien mit Berücksichtigung dieser Indikation in Zukunft denkbar.

Für eine Optimierung von Injektionsnarkosen unter Feldbedingungen ist nach den hier vorliegenden Ergebnissen eine Sauerstoffinsufflation empfehlenswert. Interessant für zukünftige Studien wäre die Untersuchung von Beatmungsschemata in Verbindung mit anderen Anästhetika für die total intravenöse Anästhesie, bei denen ein Antagonisieren möglich ist, um die Aufstehphase zu optimieren. So könnte man den Vorteil der geringen kardiovaskulären Depression der meisten Injektionsanästhetika weiterhin ausnutzen, um eine total intravenöse Anästhesie auch bei länger dauernden Eingriffen anwenden zu können ohne eine unkoordinierte und verlängerte Aufstehphase zu provozieren.

6 Zusammenfassung

Tilman Bringewatt

Einfluss der „Open-Lung-Concept“-Beatmung auf die Herz-Kreislauf- und Lungenfunktion während einer Injektionsnarkose beim Pferd

Ziel dieser Arbeit ist es, den Einfluss einer Beatmung nach dem „Open-Lung-Concept“ auf die intraoperativen Herz-Kreislauf- und Lungenparameter während einer total intravenösen Anästhesie mit einem Gasgemisch mit 35% Sauerstoff zu untersuchen.

Die Untersuchungen wurden an 42 Warmblutpferden mit einem Körpergewicht über 400 kg und einem Alter von 2-20 Jahren durchgeführt. Die Gruppeneinteilung erfolgte randomisiert in drei Gruppen mit jeweils 14 Pferden. Nach zufälliger Zuordnung eines Probanden in eine der drei Gruppen wurden die nächsten beiden Probanden mit vergleichbarer Art des Eingriffs und ähnlichem Gewicht randomisiert den beiden anderen Gruppen zugeordnet.

Die Probanden der Gruppe A wurden mittels modifizierten „Open-Lung-Concepts“ beatmet, die der Gruppe B konventionell mit IPPV und die der Gruppe C atmeten spontan.

Bei allen Probanden erfolgte eine Narkoseprämedikation mit Xylazin (0,8 mg/kg KGW i.v.) und anschließend die Narkoseeinleitung mit Ketamin (2,2 mg/kg KGW i.v.) und Diazepam (0,05 mg/kg KGW i.v.). Die Narkoseerhaltung erfolgte durch eine konstante Applikation einer Mischung aus Xylazin, Ketamin und Guaifenesin mittels volumetrischer Infusionspumpe mit einer Geschwindigkeit von 1 ml/kg/h, was einer Dosierung von 131,1 mg/kg/h Guaifenesin, 5,6 mg/kg/h Ketamin und 1,4 mg/kg/h Xylazin entspricht. Alle Probanden waren an ein Narkosesystem angeschlossen und erhielten ein Raumluft-Sauerstoffgemisch mit 35% Sauerstoff.

Der ausgewertete Zeitraum begann ab der 20. Minute nach Narkoseeinleitung. Folgende Parameter wurden ermittelt und in Abständen von 10 Minuten aufgezeichnet: Herzfrequenz, Atemfrequenz, mittlerer arterieller Blutdruck, endexpiratorische Kohlendioxidkonzentration, inspiratorische Sauerstoffkonzentration, alveolärer Totraum, der positiv inspiratorische Druck, der

positiv endexpiratorische Druck, sowie arterielle Blutgaswerte und Säure-Basenparameter wie arterieller Sauerstoffpartialdruck, arterieller Kohlendioxidpartialdruck, arterielle Sauerstoffsättigung und pH-Wert.

Die Auswertung der intraoperativ ermittelten Parameter ergab einen signifikant höheren arteriellen Sauerstoffpartialdruck der Gruppe A_{mOLC} gegenüber den Gruppen B_{IPPV} und $C_{spontan}$. Auch die arterielle Sauerstoffsättigung der Gruppe A_{mOLC} unterschied sich während der Narkose signifikant von der der Gruppe $C_{spontan}$. Beide Parameter lassen auf eine verbesserte Oxygenierung bei Probanden schließen, die mittels modifizierten „Open-Lung-Concepts“ beatmet wurden. Somit kann auch bei einer Sauerstoffkonzentration von 35% im Atemgasgemisch der Sauerstoffpartialdruck und die Sauerstoffsättigung im arteriellen Blut verbessert werden. Außerdem bewegten sich die anderen Lungenparameter im physiologischen Referenzbereich, so dass dieses Beatmungskonzept keinen negativen Einfluss auf die restlichen gemessenen Lungenparameter hat.

Gleichzeitig konnte gezeigt werden, dass diese Beatmungsform nur geringe Beeinträchtigungen der Herz-Kreislauffunktion hervorruft, so dass der einzugehende Kompromiss zwischen einer kardiovaskulären Depression auf der einen Seite und einem verbessertem pulmonalen Gasaustausch auf der anderen Seite gering erscheint. Jedoch zeigte sich, dass Pferde während einer IPPV-Beatmung oder einer Spontanatmung einen signifikant höheren mittleren arteriellen Blutdruck aufwiesen als Pferde, die nach dem mod. „Open-Lung-Concept“ beatmet wurden.

Neun Pferde konnten aufgrund einer intraoperativ aufgetretenen Hypoxämie nicht in die Auswertung mit einfließen, weil die Hypoxämie durch eine Erhöhung des Sauerstoffanteils im Gasgemisch oder durch künstliche Beatmung therapiert werden musste. Da acht der neun Pferde sich in Rückenlage befanden, schien bei einigen spontan atmenden Pferden ein ungenügender pulmonaler Gasaustausch in Rückenlage vorzuliegen, so dass bei diesen Probanden eine Beatmung oder eine Sauerstoffinsufflation nötig wurde.

Nach denen in dieser Studie gewonnen Erkenntnissen ist eine künstliche Beatmung mittels modifizierten „Open-Lung-Concepts“ und eine Sauerstoffinsufflation empfehlenswert. Zumindest letztere ist auch ohne erheblichen Aufwand unter Feldbedingungen durchführbar und würde die Sauerstoffkonzentration im arteriellen Blut verbessern.

7 Summary

Influence on cardiovascular and pulmonary function of horses using a modified “Open-Lung-Concept” during general anaesthesia maintained by total intravenous anaesthesia

The aim of this study was to evaluate the influence of a modified “Open-Lung-Concept” on cardiovascular and pulmonary parameters during total intravenous anaesthesia with inhalation of 35% oxygen in air.

Forty-two adult warmblood horses weighing more than 400 kg were included in this study. They were randomly divided into three groups of 14 horses. After one patient was assigned to one group, the following horse with similar weight undergoing similar surgical intervention was placed into one of the remaining groups.

Horses of group A were ventilated using a modified “Open-Lung-Concept”, those of group B using a conventional IPPV-Ventilation and horses of group C were breathing spontaneously.

All horses were premedicated with xylazine (0.8 mg/kg BW i.v.) and anaesthesia was induced with ketamine (2.2 mg/kg BW i.v.) and diazepam (0.05 mg/kg BW i.v.). Anaesthesia was maintained for 90 minutes by an infusion of guaifenesin (131.1 mg/kg/h), ketamine (5.6 mg/kg/h) and xylazine (1.4 mg/kg/h). All patients were intubated and were breathing a mixture of 35% oxygen in air.

Measurement of the following parameters started 20 minutes after induction of anaesthesia and were recorded in ten minutes intervals: heart rate, respiratory rate, mean arterial blood pressure, end-tidal carbon dioxide concentration, inspired fraction of oxygen, alveolar dead space, positive inspiratory pressure, positive end-expiratory pressure, acid-base-status, arterial blood pH, arterial partial oxygen pressure, arterial partial carbon dioxide pressure and arterial oxygen saturation.

The arterial partial oxygen pressure was significantly higher in horses of group A_{mOLC} compared to horses of group B_{IPPV} and $C_{spontaneous}$. In addition the arterial oxygen saturation in group A_{mOLC} was significantly higher than in group $C_{spontaneous}$. Both parameters indicate an improved oxygenation of horses that were ventilated using the modified “Open-Lung-Concept” despite the low concentration of inhaled 35% oxygen in air. The remaining respiratory parameters were within the reference range

and therefore no negative effect of the mOLC on the remaining lung parameters could be detected. However, a significant higher mean arterial blood pressure could be accounted during IPPV-Ventilation and spontaneous ventilation compared to ventilation with the modified “Open-Lung-Concept”. So there is a compromise when using the modified “Open-Lung-Concept” between a little impairment of the cardiovascular function and an improved pulmonary gas exchange.

Nine additional horses were excluded from the study because of severe hypoxaemia during anaesthesia. These horses were treated by increasing the inhaled oxygen concentration and by artificial ventilation. Eight of these nine horses were in dorsal recumbency and six of them were breathing spontaneously. Confirming that, dorsal recumbency causes a reduction of pulmonary gas exchange.

In conclusion, ventilation of horses using a modified “Open-Lung-Concept” with inhalation of 35% oxygen in air can be recommended during total intravenous anaesthesia. Insufflation of oxygen can be applied even under field conditions and is likely to improve arterial partial pressure of oxygen.

8 Literaturverzeichnis

AGARWAL, A., P. K. SINGH, S. DHIRAJ, C. M. PANDEY u. U. SINGH (2002):
Oxygen in air (FiO₂ 0.4) improves gas exchange in young healthy patients during
general anesthesia.
Canadian Journal of Anaesthesia 49, 1040-1043.

AGRO, F., G. BARZOI, D. J. DOYLE u. A. MANIERI (2004):
Reduction in pulmonary shunt using the Open Lung Concept.
Anaesthesia 59, 625-626.

AGUILERA-TEJERO, E., J. C. ESTEPA, I. LOPEZ, R. MAYER-VALOR u. M.
RODRIGUEZ (1998):
Arterial blood gases and acid-base balance in healthy young and aged horses.
Equine Veterinary Journal 30, 352-354.

ALEF, M. u. G. OECHTERING (1998):
[Reflections on anesthetic risk].
Tierärztliche Praxis Ausgabe Kleintiere Heimtiere 26, 302-314.

BAUM, J. A. (2004):
The carrier gas in anaesthesia: nitrous oxide/oxygen, medical air/oxygen and pure
oxygen.
Current Opinion Anaesthesiology 17, 513-516.

BENOIT, Z., S. WICKY, J. F. FISCHER, P. FRASCAROLO, C. CHAPUIS, D. R.
SPAHN u. L. MAGNUSSON (2002):
The effect of increased FIO₂ before tracheal extubation on postoperative atelectasis.
Anesthesia and Analgesia 95, 1777-1781.

BENSON, G. J., M. MANOHAR, S. K. KNELLER, J. C. THURMON u. E. P.
STEFFEY (1982):
Radiographic Characterization of Diaphragmatic Excursion in Halothane-
Anesthetized Ponies - Spontaneous and Controlled Ventilation Systems.
American Journal of Veterinary Research 43, 617-621.

BERGMANN, H. u. S. NECEK (1982):
Die Beatmung.
In: H. BENZER, R. FREY, W. HÜGIN und O. MAYRHOFER
Anaesthesiologie, Intensivmedizin und Reanimatologie
Springer-Verlag, Berlin ; Heidelberg ; New York, S. 338-368.

BETTSCHART-WOLFENSBERGER, R. (2006):
Modern Injection Anesthesia for Horses.
In: J. A. AUER, STICK, J. A.
Equine Surgery
S. 223-226.

BÖHM, S. H. u. K. BANGERT (2000):

Prävention und Therapie anästhesiebedingter Atelektasen.
Anaesthesist 49, 345-348.

BÖHM, S. H., F. SUAREZ-SIPMANN u. B. LACHMANN (1999):

Das Konzept der offenen Lunge.
Intensivmedizin und Notfallmedizin 36, 31-34.

BRAUN, C., C. M. TRIM u. R. B. EGGLESTON (2009):

Effects of changing body position on oxygenation and arterial blood pressures in foals anesthetized with guaifenesin, ketamine, and xylazine.
Veterinary Anaesthesia and Analgesia 36, 18-24.

BROCK, N. u. S. V. HILDEBRAND (1990):

A comparison of xylazine-diazepam-ketamine and xylazine-guaifenesin-ketamine in equine anesthesia.
Veterinary Surgery 19, 468-474.

BURCHARDI, H. (1982):

Pathophysiologie und Diagnostik der Lungenfunktion in Anaesthesie und Intensivmedizin.

In: H. BENZER, R. FREY, W. HÜGIN und O. MAYRHOFER

Anaesthesiologie, Intensivmedizin und Reanimatologie
5. , Springer-Verlag, Berlin ; Heidelberg ; New York, S. 275-368.

BURCHARDI, H. u. M. SYDOW (1994):

Artificial ventilation: some unresolved problems.
European Journal of Anaesthesiology 11, 53-63.

CLARKE, K. W. (1993):

Anaesthetic emergencies.

In: G. U. SCHMIDT-OECHTERING

Neue Aspekte der Veterinäranaesthesie und Intensivtherapie
Paul Parey, S. 129-134.

CLUTTON, R. E. (2007):

Gas exchange in horses.

In: B. MCGORUM, P. DIXON, N. ROBINSON und J. SCHUMACHER

Equine Respiratory Medicine and Surgery

1. Aufl., Saunders Elsevier, Edinburgh, London, New York, Oxford, Philadelphia, St. Louis, Sydney, Toronto, S. 45-54.

CRAIG, C. A., S. C. HASKINS u. S. V. HILDEBRAND (2007):

The cardiopulmonary effects of dobutamine and norepinephrine in isoflurane-anesthetized foals.

Veterinary Anaesthesia and Analgesia 34, 377-387.

CRAIG, D. B. (1981):

Postoperative recovery of pulmonary function.

Anesthesia and Analgesia 60, 46-52.

- CRIBB, P. H. (1988):
Capnographic Monitoring during Anesthesia with Controlled Ventilation in the Horse.
Veterinary Surgery 17, 48-52.
- CUVELLIEZ, S. G., S. W. EICKER, C. MCLAUCHLAN u. D. B. BRUNSON (1990):
Cardiovascular and respiratory effects of inspired oxygen fraction in halothane-anesthetized horses.
American Journal of Veterinary Research 51, 1226-1231.
- DAY, T. K., J. S. GAYNOR, W. W. MUIR, R. M. BEDNARSKI u. D. E. MASON (1995):
Blood-Gas Values during Intermittent Positive Pressure Ventilation and Spontaneous Ventilation in 160 Anesthetized Horses Positioned in Lateral or Dorsal Recumbency.
Veterinary Surgery 24, 266-276.
- DE MOOR, A., P. DESMET u. F. VERSCHOOTEN (1974):
Influence of change of body position on arterial oxygenation and acid-base status in the horse in lateral recumbency, anaesthetized with halothane and efficiency of postanaesthetic oxygen administration.
Zentralblatt für Veterinärmedizin A 21, 525-531.
- DOBSON, A., R. D. GLEED, R. E. MEYER u. B. J. STEWART (1985):
Changes in blood flow distribution in equine lungs induced by anaesthesia.
Quarterly Journal of Experimental Physiology 70, 283-297.
- DOHERTY, T. u. A. VALVERDE (2006):
Manual of Equine Anesthesia & Analgesia.
1. Aufl., Blackwell Publishing Ltd, Oxford.
- DYSON, D. H., M. G. MAXIE u. D. SCHNURR (1998):
Morbidity and mortality associated with anesthetic management in small animal veterinary practice in Ontario.
Journal of the American Animal Hospital Association 34, 325-335.
- EBERT, U., H.-H. FREY u. R. SCHULZ (2002):
Pharmakologie des zentralen Nervensystems (ZNS).
In: H.-H. FREY und W. LÖSCHER
Lehrbuch der Pharmakologie und Toxikologie für die Veterinärmedizin
Enke Verlag, Stuttgart, S. 87-138.
- EDNER, A., G. NYMAN u. B. ESSEN-GUSTAVSSON (2005):
The effects of spontaneous and mechanical ventilation on central cardiovascular function and peripheral perfusion during isoflurane anaesthesia in horses.
Veterinary Anaesthesia and Analgesia 32, 136-146.
- FLYNN, C., H. V. FORSTER, L. G. PAN u. G. E. BISGARD (1985):
Effect of hilar nerve denervation on breathing and arterial PCO₂ during CO₂ inhalation.
Journal of Applied Physiology 59, 807-813.

FORSTER, H. V., L. G. PAN, C. FLYNN u. G. E. BISGARD (1990):
Attenuated Hering-Breuer inflation reflex 4 years after pulmonary vagal denervation in ponies.
Journal of Applied Physiology 69, 2163-2167.

GÄBEL, G. (2000):
Säure-Basen-Haushalt.
In: W. VON ENGELHARDT, BREVES, G.
Physiologie der Haustiere
1. Aufl., S. 295-302.

GASTHUYS, F., A. DE MOOR u. D. PARMENTIER (1991a):
Haemodynamic effects of change in position and respiration mode during a standard halothane anaesthesia in ponies.
Zentralblatt für Veterinärmedizin A 38, 203-211.

GASTHUYS, F., A. DE MOOR u. D. PARMENTIER (1991b):
Influence of dopamine and dobutamine on the cardiovascular depression during a standard halothane anaesthesia in dorsally recumbent, ventilated ponies.
Zentralblatt für Veterinärmedizin A 38, 494-500.

GEHLEN, H., A. WEICHLER, K. BUBECK, B. OHNESORGE, E. DEEGEN u. P. STADLER (2006):
Effects of two different dosages of dobutamine on pulmonary artery wedge pressure, systemic arterial blood pressure and heart rate in anaesthetized horses.
Journal of Veterinary Medicine Series a-Physiology Pathology Clinical Medicine 53, 476-480.

GLEED, R. D. u. A. DOBSON (1988):
Improvement in arterial oxygen tension with change in posture in anaesthetised horses.
Research Journal of Veterinary Sciences 44, 255-259.

GLITZ, F., K. LORBER, T. VON OPPEN, K. BUBECK, C. P. BARTMANN u. E. DEEGEN (2001):
Aufstehverhalten von Pferden nach Inhalationsnarkose mit und ohne postanästhetischer Sedierung mit Xylazin (Rompun(R)).
Pferdeheilkunde 17, 165-+.

GOLL, V., O. AKCA, R. GREIF, H. FREITAG, C. F. ARKILIC, T. SCHECK, A. ZOEGGELER, A. KURZ, G. KRIEGER, R. LENHARDT u. D. I. SESSLER (2001):
Ondansetron is no more effective than supplemental intraoperative oxygen for prevention of postoperative nausea and vomiting.
Anesthesia and Analgesia 92, 112-117.

GRANDY, J. L. u. W. N. MCDONELL (1980):
Evaluation of concentrated solutions of guaifenesin for equine anesthesia.
Journal of the American Veterinary Medical Association 176, 619-622.

GRANDY, J. L., E. P. STEFFEY, D. S. HODGSON u. M. J. WOLINER (1987):
Arterial hypotension and the development of postanesthetic myopathy in halothane-anesthetized horses.
American Journal of Veterinary Research 48, 192-197.

GREENE, S. A., J. C. THURMON, W. J. TRANQUILLI u. G. J. BENSON (1986):
Cardiopulmonary effects of continuous intravenous infusion of guaifenesin, ketamine, and xylazine in ponies.
American Journal of Veterinary Research 47, 2364-2367.

GREIF, R., O. AKCA, E. P. HORN, A. KURZ u. D. I. SESSLER (2000):
Supplemental perioperative oxygen to reduce the incidence of surgical-wound infection. Outcomes Research Group.
New England Journal of Medicine 342, 161-167.

GREIF, R., S. LACINY, B. RAPF, R. S. HICKLE u. D. I. SESSLER (1999):
Supplemental oxygen reduces the incidence of postoperative nausea and vomiting.
Anesthesiology 91, 1246-1252.

GROS, G. (2000):
Atmung.
In: W. VON ENGELHARDT, BREVES, G.
Physiologie der Haustiere
1. Aufl., S. 217-253.

HALL, L. W. (1979):
Oxygenation of pulmonary vein blood in conscious and anaesthetised ponies.
Equine Veterinary Journal 11, 71-75.

HALL, L. W. (1984):
Cardiovascular and pulmonary effects of recumbency in two conscious ponies.
Equine Veterinary Journal 16, 89-92.

HALL, L. W. u. K. W. CLARKE (1991a):
Anaesthesia of the horse.
In: L. W. HALL und K. W. CLARKE
Veterinary Anaesthesia
Baillière Tindall, London, S. 191-235.

HALL, L. W. u. K. W. CLARKE (1991b):
Patient monitoring and clinical measurement.
In: L. W. HALL und K. W. CLARKE
Veterinary Anaesthesia
Baillière Tindall, London, S. 16-36.

HARMEYER, J. (2000):
Herz.
In: W. VON ENGELHARDT, BREVES, G.
Physiologie der Haustiere
1. Aufl., S. 136-170.

HEDENSTIERNA, G., G. MCCARTHY u. M. BERGSTROM (1976):
Airway closure during mechanical ventilation.
Anesthesiology 44, 114-123.

HEDENSTIERNA, G., G. NYMAN, C. KVART u. B. FUNKQUIST (1987):
Ventilation-Perfusion Relationships in the Standing Horse - an Inert-Gas Elimination
Study.
Equine Veterinary Journal 19, 514-519.

HEDENSTIERNA, G., L. TOKICS, H. LUNDQUIST, T. ANDERSSON, A.
STRANDBERG u. B. BRISMAR (1994):
Phrenic nerve stimulation during halothane anesthesia. Effects of atelectasis.
Anesthesiology 80, 751-760.

HEINRICHS, W. (1992):
[Positive end-expiratory pressure (PEEP)].
Anaesthetist 41, 653-669.

HERSCHL, M. A., C. M. TRIM u. E. A. MAHAFFEY (1992):
Effects of 5% and 10% guaifenesin infusion on equine vascular endothelium.
Veterinary Surgery 21, 494-497.

HODGSON, D. S., E. P. STEFFEY, J. L. GRANDY u. M. J. WOLINER (1986):
Effects of spontaneous, assisted, and controlled ventilatory modes in halothane-
anesthetized geldings.
American Journal of Veterinary Research 47, 992-996.

HOPSTER, K. (2007)
Einfluss einer Beatmung nach dem "Open-Lung-Concept" während der
Allgemeinanästhesie des Pferdes auf die intra- und postoperative Lungenfunktion. .
Klinik für Pferde der Stiftung Tierärztliche Hochschule Hannover, Inaugural-
Dissertation.

HUBBELL, J. A. (1991a):
Monitoring.
In: W. W. MUIR, HUBBELL, J. A. E.
Equine Anesthesia
Mosby Year Book, S. 153-179.

HUBBELL, J. A. (1991b):
Oxygen Supplementation and Ventilatory Assist Devices.
In: W. W. MUIR, HUBBELL, J.A.E.
Equine Anesthesia
Mosby Year Book, S. 401-418.

HUBBELL, J. A. (2007):
Horses.
In: W. J. TRANQUILLI, J. C. THURMON und K. A. GRIMM
Lumb & Jones' veterinary anesthesia and analgesia
Blackwell Publishing, Ames, S. 717-730.

JOHNSTON, G. M., J. K. EASTMENT, P. M. TAYLOR u. J. L. WOOD (2004):
Is isoflurane safer than halothane in equine anaesthesia? Results from a prospective multicentre randomised controlled trial.
Equine Veterinary Journal 36, 64-71.

JOHNSTON, G. M., J. K. EASTMENT, J. L. N. WOOD u. P. M. TAYLOR (2002):
The confidential enquiry into perioperative equine fatalities (CEPEF): mortality results of Phases 1 and 2.
Veterinary Anaesthesia and Analgesia 29, 159-170.

JOHNSTON, G. M., P. M. TAYLOR, M. A. HOLMES u. J. L. WOOD (1995):
Confidential enquiry of perioperative equine fatalities (CEPEF-1): preliminary results.
Equine Veterinary Journal 27, 193-200.

JORIS, J. L., N. J. POTH, A. M. DJAMADAR, D. I. SESSLER, E. E. HAMOIR, T. R. DEFECHEREUX, M. R. MEURISSE u. M. L. LAMY (2003):
Supplemental oxygen does not reduce postoperative nausea and vomiting after thyroidectomy.
British Journal of Anaesthesia 91, 857-861.

JOYCE, C. J., A. B. BAKER u. R. R. KENNEDY (1993):
Gas uptake from an unventilated area of lung: computer model of absorption atelectasis.
Journal of Applied Physiology 74, 1107-1116.

KARBING, D. S., S. KJAERGAARD, B. W. SMITH, K. ESPERSEN, C. ALLEROD, S. ANDREASSEN u. S. E. REES (2007):
Variation in the PaO₂/FiO₂ ratio with FiO₂: mathematical and experimental description, and clinical relevance.
Critical Care 11, R118.

KHANNA, A. K., W. N. MCDONELL, D. H. DYSON u. P. M. TAYLOR (1995):
Cardiopulmonary effects of hypercapnia during controlled intermittent positive pressure ventilation in the horse.
Canadian Journal of Veterinary Research 59, 213-221.

LACHMANN, B. (1992):
Open up the Lung and Keep the Lung Open.
Intensive Care Medicine 18, 319-321.

LANG, F. (1979):
Pathophysiologie, Pathochemie: e. Einf.
Enke Verlag, Stuttgart.

LEVIONNOIS, O. (2007):
Anaesthesia in the horse - Injection- or inhalation narcosis?
Praktische Tierarzt 88, 250-254.

- LEVIONNOIS, O., I. IFF u. Y. P. S. MOENS (2006):
Successful treatment of hypoxemia by an alveolar recruitment maneuver in a horse during general anaesthesia for colic surgery.
Pferdeheilkunde 22, 333-336.
- LIN, H. C., S. S. WALLACE, R. L. ROBBINS, I. W. HARRISON u. J. C. THURMON (1994):
A case report on the use of guaifenesin-ketamine-xylazine anesthesia for equine dystocia.
Cornell Veterinary Journal 84, 61-66.
- LÖSCHER, W. (2002):
Pharmakologie des vegetativen (autonomen) Nervensystems.
In: H.-H. FREY und W. LÖSCHER
Lehrbuch der Pharmakologie und Toxikologie für die Veterinärmedizin
Enke Verlag, Stuttgart, S. 33-86.
- LÖSCHER, W., F. R. UNGEMACH u. R. KROKER (2006):
Pharmakotherapie bei Haus- und Nutztieren.
7. Aufl., Parey Medizinverlag, Stuttgart.
- LUNA, S. P., P. M. TAYLOR u. M. J. WHEELER (1996):
Cardiorespiratory, endocrine and metabolic changes in ponies undergoing intravenous or inhalation anaesthesia.
Journal of Veterinary Pharmacology and Therapeutics 19, 251-258.
- LUNN, J. N. u. W. W. MUSHIN (1982):
Mortality associated with anesthesia.
Anaesthesia 37, 856.
- MAGNUSSON, L. u. D. R. SPAHN (2003):
New concepts of atelectasis during general anaesthesia.
British Journal of Anaesthesia 91, 61-72.
- MANSEL, J. C. u. R. E. CLUTTON (2008):
The influence of body mass and thoracic dimensions on arterial oxygenation in anaesthetized horses and ponies.
Veterinary Anaesthesia and Analgesia 35, 392-399.
- MARINO, P. L. u. K. M. SUTIN (2007):
The ICU book.
3. Aufl., Lippincott Williams & Wilkins, Philadelphia.
- MARLIN, D. J., VINCENT, T. L. (2006):
Pulmonary Blood Flow.
In: B. MCGORUM, P. DIXON, N. ROBINSON und J. SCHUMACHER
Equine Respiratory Medicine and Surgery
1. Aufl., Saunders Elsevier, Edinburgh, London, New York, Oxford, Philadelphia, St. Louis, Sydney, Toronto, S. 33-44.

- MARNTTELL, S., G. NYMAN u. G. HEDENSTIERNA (2005):
High inspired oxygen concentrations increase intrapulmonary shunt In anaesthetized horses.
Veterinary Anaesthesia and Analgesia 32, 338-347.
- MARTYN, J. A. (1987):
Burn care protocols: administration of ketamine. Ketamine pharmacology and therapeutics.
Journal of Burn Care & Rehabilitation 8, 146-148.
- MAS, A., P. SAURA, D. JOSEPH, L. BLANCH, F. BAIGORRI, A. ARTIGAS u. R. FERNANDEZ (2000):
Effect of acute moderate changes in Paco(2) on global hemodynamics and gastric perfusion.
Critical Care Medicine 28, 360-365.
- MAX, M. u. R. DEMBINSKI (2000):
[Pulmonary gas exchange in anesthesia].
Anaesthetist 49, 771-783.
- MCCARTY, J. E., C. M. TRIM u. D. FERGUSON (1990):
Prolongation of anesthesia with xylazine, ketamine, and guaifenesin in horses: 64 cases (1986-1989).
Journal of the American Veterinary Medical Association 197, 1646-1650.
- MCDONELL, W. N., L. W. HALL u. L. B. JEFFCOTT (1979):
Radiographic Evidence of Impaired Pulmonary-Function in Laterally Recumbent Anesthetized Horses.
Equine Veterinary Journal 11, 24-32.
- MCDONELL, W. N. u. C. L. KERR (2007):
Respiratory System.
In: W. J. TRANQUILLI, J. C. THURMON und K. A. GRIMM
Lumb & Jones' veterinary anesthesia and analgesia
Blackwell Publishing, Ames, S. 117-152.
- MCMURPHY, R. M., L. E. YOUNG, D. J. MARLIN u. K. WALSH (2002):
Comparison of the cardiopulmonary effects of anesthesia maintained by continuous infusion of romifidine, guaifenesin, and ketamine with anesthesia maintained by inhalation of halothane in horses.
American Journal of Veterinary Research 63, 1655-1661.
- MIZUNO, Y., H. AIDA, H. HARA u. T. FUJINAGA (1994):
Cardiovascular effects of intermittent positive pressure ventilation in the anesthetized horse.
Journal of Equine Veterinary Science 56, 39-44.
- MOENS, Y. (1989):
Arterial-alveolar carbon dioxide tension difference and alveolar dead space in halothane anaesthetised horses.
Equine Veterinary Journal 21, 282-284.

MOENS, Y., P. GOOTJES, J. C. IONITA, E. HEINONEN u. U. SCHATZMANN (2009):

In vitro validation of a Pitot-based flow meter for the measurement of respiratory volume and flow in large animal anaesthesia.

Veterinary Anaesthesia and Analgesia 36, 209-219.

MOENS, Y., E. LAGERWEIJ, P. GOOTJES u. J. POORTMAN (1995):

Distribution of inspired gas to each lung in the anaesthetised horse and influence of body shape.

Equine Veterinary Journal 27, 110-116.

MONROE, R. G., G. FRENCH u. J. L. WHITTENBERGER (1960):

Effects of hypocapnia and hypercapnia on myocardial contractility.

American Journal of Physiology 199, 1121-1124.

MORGAN, B. C., E. W. CRAWFORD, T. F. HORNBEIN, W. E. MARTIN u. W. G. GUNTHEROTH (1967):

Hemodynamic effects of changes in arterial carbon dioxide tension during intermittent positive pressure ventilation.

Anesthesiology 28, 866-873.

MUIR, W. W. (1991):

Anesthetic Complications and Cardiopulmonary Resuscitation in the Horse.

In: W. W. MUIR, HUBBELL, J.A.E.

Equine Anesthesia

Mosby Year Book, S. 461-484.

MUIR, W. W. (2009):

Intravenous Anesthetic Drugs.

In: W. W. MUIR, HUBBELL, J.A.E.

Equine Anesthesia

Saunders Elsevier, St. Louis, S. 243-259.

MUIR, W. W., J. A. HUBBELL, R. M. BEDNARSKI u. R. T. SKARDA (2007):

Handbook of Veterinary Anesthesia.

4. Aufl., Mosby Elsevier

American Journal of Physiology.

MUIR, W. W., P. LERCHE, J. T. ROBERTSON, J. A. HUBBELL, W. BEARD, T. MILLER, B. BADGLEY u. V. BOTHWELL (2000):

Comparison of four drug combinations for total intravenous anesthesia of horses undergoing surgical removal of an abdominal testis.

Journal of the American Veterinary Medical Association 217, 869-873.

MUIR, W. W., R. A. SAMS, R. H. HUFFMAN u. J. S. NOONAN (1982):

Pharmacodynamic and Pharmacokinetic Properties of Diazepam in Horses.

American Journal of Veterinary Research 43, 1756-1762.

- MUIR, W. W., R. T. SKARDA u. W. SHEEHAN (1978):
Evaluation of xylazine, guaifenesin, and ketamine hydrochloride for restraint in horses.
American Journal of Veterinary Research 39, 1274-1278.
- NEUMANN, P., H. U. ROTHEN, J. E. BERGLUND, J. VALTYSSON, A. MAGNUSSON u. G. HEDENSTIERNA (1999):
Positive end-expiratory pressure prevents atelectasis during general anaesthesia even in the presence of a high inspired oxygen concentration.
Acta Anaesthesiologica Scandinavica 43, 295-301.
- NUNN, J. F., N. A. BERGMAN u. A. J. COLEMAN (1998):
Factors influencing the arterial oxygen tension during anaesthesia with artificial ventilation.
British Journal of Anaesthesia 80, 860-876.
- NYMAN, G., C. FROSTELL, G. HEDENSTIERNA, B. FUNKQUIST, C. KVART u. H. BLOMQVIST (1987):
Selective Mechanical Ventilation of Dependent Lung Regions in the Anesthetized Horse in Dorsal Recumbency.
British Journal of Anaesthesia 59, 1027-1034.
- NYMAN, G., B. FUNKQUIST u. C. KVART (1988):
Postural effects on blood gas tension, blood pressure, heart rate, ECG and respiratory rate during prolonged anaesthesia in the horse.
Zentralblatt für Veterinärmedizin A 35, 54-62.
- NYMAN, G., B. FUNKQUIST, C. KVART, C. FROSTELL, L. TOKICS, A. STRANDBERG, H. LUNDQUIST, B. LUNDH, B. BRISMAR u. G. HEDENSTIERNA (1990):
Atelectasis causes gas exchange impairment in the anaesthetised horse.
Equine Veterinary Journal 22, 317-324.
- NYMAN, G. u. G. HEDENSTIERNA (1988):
Comparison of conventional and selective mechanical ventilation in the anaesthetized horse. Effects on central circulation and pulmonary gas exchange.
Zentralblatt für Veterinärmedizin A 35, 299-314.
- NYMAN, G. u. G. HEDENSTIERNA (1989):
Ventilation-perfusion relationships in the anaesthetised horse.
Equine Veterinary Journal 21, 274-281.
- PAPADAKOS, P. J. u. B. LACHMANN (2002):
The open lung concept of alveolar recruitment can improve outcome in respiratory failure and ARDS.
Mount Sinai Journal of Medicine 69, 73-77.
- PAPADAKOS, P. J. u. B. LACHMANN (2007):
The open lung concept of mechanical ventilation: the role of recruitment and stabilization.
Critical Care Clinics 23, 241-250.

PAURITSCH, K. (1997)

PEEP-Beatmung mit positivem endinspiratorischem Druckplateau während Risikonarkosen bei Kolikpferden.

Klinik für Pferde der Stiftung Tierärztliche Hochschule Hannover, Inaugural-Dissertation.

PICEK, S. C. (2008)

Vergleich der kardiovaskulären Funktion bei spontan atmenden und künstlich beatmeten Pferden unter Isofluran/Medetomidin-Anästhesie.

Departement für Pferde, Abteilung Anästhesiologie der Vetsuisse Fakultät der Universität Zürich, Inaugural-Dissertation.

PURHONEN, S., M. NISKANEN, M. WUSTEFELD, P. MUSTONEN u. M. HYNYNEN (2003a):

Supplemental oxygen for prevention of nausea and vomiting after breast surgery. *British Journal of Anaesthesia* 91, 284-287.

PURHONEN, S., M. TURUNEN, U. M. RUOHOAHO, M. NISKANEN u. M. HYNYNEN (2003b):

Supplemental oxygen does not reduce the incidence of postoperative nausea and vomiting after ambulatory gynecologic laparoscopy.

Anesthesia and Analgesia 96, 91-96, table of contents.

REBER, A., G. ENGBERG, G. WEGENIUS u. G. HEDENSTIERNA (1996):

Lung aeration - The effect of pre-oxygenation and hyperoxygenation during total intravenous anaesthesia.

Anaesthesia 51, 733-737.

ROBINSON, N. E. (1991):

The Respiratory System.

In: W. W. MUIR, HUBBELL, J.A.E.

Equine Anesthesia

Mosby Year Book, St. Louis, S. 7-38.

ROBINSON, N. E. (2009):

The Respiratory System.

In: W. W. MUIR, HUBBELL, J.A.E.

Equine Anesthesia

Saunders Elsevier, St. Louis, S. 11-36.

ROTHEN, H. U., B. SPORRE, G. ENGBERG, G. WEGENIUS, M. HOGMAN u. G. HEDENSTIERNA (1995a):

Influence of Gas-Composition on Recurrence of Atelectasis after a Reexpansion Maneuver during General-Anesthesia.

Anesthesiology 82, 832-842.

ROTHEN, H. U., B. SPORRE, G. ENGBERG, G. WEGENIUS, A. REBER u. G. HEDENSTIERNA (1995b):

Prevention of Atelectasis during General-Anesthesia.

Lancet 345, 1387-1391.

ROTHEN, H. U., B. SPORRE, G. ENGBERG, G. WEGENIUS, A. REBER u. G. HEDENSTIERNA (1996):

Atelectasis and pulmonary shunting during induction of general anaesthesia - Can they be avoided?

Acta Anaesthesiologica Scandinavica 40, 524-529.

SCHATZMANN, U. (1983):

Respiratory Complications during General-Anesthesia in the Horse.

Berliner Und Munchener Tierärztliche Wochenschrift 96, 311-312.

SCHATZMANN, U. (1995):

Sedation und Anästhesie des Pferdes.

Blackwell Wissenschafts-Verlag, Berlin, Berlin.

SCHATZMANN, U., M. KOEHLI, F. DUDAN, W. ROHR u. R. S. JONES (1982):

Effect of postural changes on certain circulatory and respiratory values in the horse.

American Journal of Veterinary Research 43, 1003-1005.

SCHATZMANN, U., P. TSCHUDI, J. P. HELD u. B. MUHLEBACH (1978):

Investigation of Action and Hemolytic Effect of Glyceryl Guaiacolate in Horse.

Equine Veterinary Journal 10, 224-228.

SCHMIDT-OECHTERING, G. U. (1993a):

Kardiopulmonale Reanimation.

In: G. U. SCHMIDT-OECHTERING

Neue Aspekte der Veterinäranaesthesie und Intensivtherapie

Paul Parey, S. 237-240.

SCHMIDT-OECHTERING, G. U. (1993b):

Patientenüberwachung beim Pferd.

In: G. U. SCHMIDT-OECHTERING

Neue Aspekte der Veterinäranaesthesie und Intensivtherapie

Paul Parey, S. 208-214.

SCHMIDT-OECHTERING, G. U. (1993c):

Spontanatmung und Beatmung beim Pferd.

In: G. U. SCHMIDT-OECHTERING

Neue Aspekte der Veterinäranaesthesie und Intensivtherapie

Paul Parey, S. 192-199.

SCHRAAG, S., J. FLASCHAR u. M. GEORGIEFF (2000):

[Target controlled infusion (TCI)--status and clinical perspectives].

Anästhesiologie Intensivmedizin Notfallmedizin Schmerztherapie 35, 12-20.

SCHULTE-BAHRENBERG, S. (2008)

Einfluss einer "Open-Lung-Concept" Beatmung bei unterschiedlichen Raumluft-Sauerstoff-Gemischen während der Allgemeinanaesthesie auf die intra- und postoperative Lungenfunktion des Pferdes.

Klinik für Pferde der Stiftung Tierärztliche Hochschule Hannover, Inaugural-Dissertation.

SCHÜRMAN, P., K. HOPSTER, K. ROHN, E. DEEGEN u. B. OHNESORGE (2008):

Optimized gas exchange during inhalant anaesthesia in horses using "open lung concept" ventilation.

Pferdeheilkunde 24, 236-241.

SEVERINGHAUS, J. W. u. M. STUFFEL (1957):

Alveolar dead space as an index of distribution of blood flow in pulmonary capillaries.

Journal of Applied Physiology 10, 335-348.

SHINI, S. (2000):

A review of diazepam and its use in the horse.

Journal of Equine Veterinary Science 20, 443-449.

SILBERNAGL, S., DESPOPOULOS, A. (2001):

Taschenatlas der Physiologie.

55. Aufl., Thieme Verlag, Stuttgart, New York.

SOMMER, N., A. DIETRICH, R. T. SCHERMULY, H. A. GHOFrani, T. GUDERMANN, R. SCHULZ, W. SEEGER, F. GRIMMINGER u. N. WEISSMANN (2008):

Regulation of hypoxic pulmonary vasoconstriction: basic mechanisms.

European Respiratory Journal 32, 1639-1651.

SPADAVECCHIA, C., N. SCHMUCKER u. U. SCHATZMANN (1999):

Investigations into injection anesthesia (TIVA) of the horse with ketamine/guaifenesin/xylazin: experiences with computerized pump infusion.

Praktische Tierarzt 80, 118-+.

STEFFEY, E. P. (1981):

Mechanical ventilation of the anesthetized horse.

Veterinary Clinics of North America-Large Animal Practice 3, 97-110.

STEGMANN, G. F. u. A. LITTLEJOHN (1987):

The effect of lateral and dorsal recumbency on cardiopulmonary function in the anaesthetised horse.

Journal of the South African Veterinary Association 58, 21-27.

SUTTNER, S. u. J. BOLDT (2005):

[Routine use of high inspired oxygen concentration -- con].

Anästhesiologie Intensivmedizin Notfallmedizin Schmerztherapie 40, 354-357.

TAYLOR, P. M. (1998):

Effects of hypercapnia on endocrine and metabolic responses to anaesthesia in ponies.

Research Journal of Veterinary Sciences 65, 41-46.

TAYLOR, P. M. u. K. W. CLARKE (2007):

Handbook of Equine Anaesthesia. .

2. Aufl., Saunders Elsevier, London.

TAYLOR, P. M., J. J. KIRBY, D. J. SHRIMPTON u. C. B. JOHNSON (1998):
Cardiovascular effects of surgical castration during anaesthesia maintained with halothane or infusion of detomidine, ketamine and guaifenesin in ponies.
Equine Veterinary Journal 30, 304-309.

TAYLOR, P. M., S. P. LUNA, J. W. SEAR u. M. J. WHEELER (1995):
Total intravenous anaesthesia in ponies using detomidine, ketamine and guaifenesin: pharmacokinetics, cardiopulmonary and endocrine effects.
Research Journal of Veterinary Sciences 59, 17-23.

THURMON, J. C., C. NEFF-DAVIS, L. E. DAVIS, R. A. STOKER, G. J. BENSON u. T. F. LOCK (1982):
Xylazine hydrochloride-induced hyperglycemia and hypoinsulinemia in thoroughbred horses.
Journal of Veterinary Pharmacology and Therapeutics 5, 241-245.

TOKICS, L., G. HEDENSTIERNA, A. STRANDBERG, B. BRISMAR u. H. LUNDQUIST (1987a):
Lung Collapse and Gas-Exchange during General-Anesthesia - Effects of Spontaneous Breathing, Muscle Paralysis, and Positive End-Expiratory Pressure.
Anesthesiology 66, 157-167.

TOKICS, L., A. STRANDBERG, B. BRISMAR, H. LUNDQUIST u. G. HEDENSTIERNA (1987b):
Computerized tomography of the chest and gas exchange measurements during ketamine anaesthesia.
Acta Anaesthesiologica Scandinavica 31, 684-692.

TRIM, C. M. (1993):
Induction of anaesthesia.
In: G. U. SCHMIDT-OECHTERING
Neue Aspekte der Veterinäranaesthesie und Intensivtherapie
Paul Parey, S. 176-181.

TRIM, C. M. u. R. R. HANSON (1986):
Effects of xylazine on renal function and plasma glucose in ponies.
Veterinary Record 118, 65-67.

TUSMAN, G., S. H. BOHM, G. F. V. DE ANDA, J. L. DO CAMPO u. B. LACHMANN (1999):
'Alveolar recruitment strategy' improves arterial oxygenation during general anaesthesia.
British Journal of Anaesthesia 82, 8-13.

TUSMAN, G., S. H. BOHM, F. SUAREZ-SIPMANN u. E. TURCHETTO (2004):
Alveolar recruitment improves ventilatory efficiency of the lungs during anesthesia.
Canadian Journal of Anaesthesia 51, 723-727.

- VERBRUGGE, S. J. u. B. LACHMANN (1999):
Mechanisms of ventilation-induced lung injury: physiological rationale to prevent it.
Monaldi Archives for Chest Disease 54, 22-37.
- WAGNER, A. E., R. M. BEDNARSKI u. W. W. MUIR, 3RD (1990):
Hemodynamic effects of carbon dioxide during intermittent positive-pressure ventilation in horses.
American Journal of Veterinary Research 51, 1922-1929.
- WEAVER, B. M. u. R. V. WALLEY (1975):
Ventilation and cardiovascular studies during mechanical control of ventilation in horses.
Equine Veterinary Journal 7, 9-15.
- WETMORE, L. A., F. J. DERKSEN, C. A. BLAZE u. G. E. EYSTER (1987):
Mixed venous oxygen tension as an estimate of cardiac output in anesthetized horses.
American Journal of Veterinary Research 48, 971-976.
- WETTSTEIN, D., Y. MOENS, N. JAEGGIN-SCHMUCKER, S. H. BÖHM, H. U. ROTHEN, M. MOSING, S. B. KÄSTNER u. U. SCHATZMANN (2006):
Effects of an alveolar recruitment maneuver on cardiovascular and respiratory parameters during total intravenous anesthesia in ponies.
American Journal of Veterinary Research 67, 152-159.
- WHITELEY, J. P., D. J. GAVAGHAN u. C. E. W. HAHN (2002):
Variation of venous admixture, SF6 shunt, Pa-O₂, and the Pa-O₂/F-IO₂ ratio with F-IO₂.
British Journal of Anaesthesia 88, 771-778.
- WHITESELL, R., C. ASIDDAO, D. GOLLMAN u. J. JABLONSKI (1981):
Relationship between arterial and peak expired carbon dioxide pressure during anesthesia and factors influencing the difference.
Anesthesia and Analgesia 60, 508-512.
- WILSON, D. V. u. A. M. MCFEELY (1991):
Positive End-Expiratory Pressure during Colic Surgery in Horses - 74 Cases (1986-1988).
Journal of the American Veterinary Medical Association 199, 917-921.
- WILSON, D. V. u. L. R. SOMA (1990):
Cardiopulmonary effects of positive end-expiratory pressure in anesthetized, mechanically ventilated ponies.
American Journal of Veterinary Research 51, 734-739.
- YAMASHITA, K., T. P. WIJAYATHILAKA, T. KUSHIRO, M. A. UMAR, K. TAGUCHI u. W. W. MUIR (2007):
Anesthetic and cardiopulmonary effects of total intravenous anesthesia using a midazolam, ketamine and medetomidine drug combination in horses.
Journal of Equine Veterinary Science 69, 7-13.

YOUNG, L. E., D. H. BARTRAM, M. J. DIAMOND, A. S. GREGG u. R. S. JONES (1993):
Clinical evaluation of an infusion of xylazine, guaifenesin and ketamine for maintenance of anaesthesia in horses.
Equine Veterinary Journal 25, 115-119.

Danksagung

Mein erster Dank gilt Herrn Prof. Dr. Bernd Ohnesorge für das Überlassen des interessanten Themas und die hervorragende Betreuung bei der Fertigstellung dieser Arbeit.

Besonders bedanken möchte ich bei Herrn Dr. Klaus Hopster für die Hilfe bei der Durchführung und die konstruktive Korrektur dieser Arbeit.

Ein herzliches Dankeschön geht an Herrn Dr. K. Rohn aus dem Institut für Biometrie, Epidemiologie und Informationsverarbeitung, der mir bei allen statistischen Fragestellungen und Problemen zur Seite stand.

Außerdem gilt mein Dank Frau Prof. Dr. Sabine Kästner für die wertvollen Ratschläge bei der Planung dieser Arbeit.

Vielen Dank auch an Sabine für ihre immer sehr geduldige und fachkundige Beratung in allen computerrelevanten Fragestellungen und für die Einarbeitung in die Anästhesie. Danke auch an Anna für die Hilfe bei der Übersetzung der Zusammenfassung in die englische Sprache.

Danken möchte ich auch meinen Doktorandenkollegen für die unterhaltsamen Stunden und die konstruktive Zusammenarbeit.

Vielen Dank an Kirsten für die engagierte Korrektur und die jederzeit gewährte liebevolle moralische Unterstützung.

Der größte Dank gebührt aber meinen Eltern, die mich immer unterstützt haben und ohne die diese Dissertation nicht zustande gekommen wäre.