

Optimierung des pulmonalen Gasaustausches während der Pferdenarkose durch Beatmung nach dem "Open Lung Concept"

Philipp Schürmann¹, Klaus Hopster¹, Karl Rohn², Eckehard Deegen¹ und Bernhard Ohnesorge¹

Klinik für Pferde¹ und Institut für Biometrie, Epidemiologie und Informationsverarbeitung² der Stiftung Tierärztliche Hochschule Hannover

Zusammenfassung

Ziel der vorliegenden Arbeit war eine Optimierung des pulmonalen Gasaustausches während der Pferdenarkose mit intermittierender positiver Druckbeatmung (IPPV) durch Rekrutierung atelektatischer Areale mittels Überdruckmanöver und Unterbindung erneuter Atelektasenbildung mittels positivem endexpiratorischen Drucks (PEEP). Dazu wurden aus 30 Warmblutpferden mit einem Körpergewicht von mindestens 450 kg, die in der Klinik für Pferde der Tierärztlichen Hochschule Hannover auf Grund einer akuten Kolikerkrankung einer Laparotomie in der Medianen unterzogen wurden, zwei randomisierte Gruppen zu je 15 Tieren gebildet (Kontrollgruppe versus Open-Lung-Concept-Gruppe (OLC-Gruppe)). Die Narkose-Prämedikation (0,5 - 0,8 mg/kg KGW Xylazin i.v.), Einleitung (0,05 mg/kg Diazepam und 2,2 mg/kg KGW Ketamin i.v.) und Aufrechterhaltung (Inhalationsnarkose: Isofluran in 100 % Sauerstoff) erfolgte in beiden Gruppen identisch. Der Vergleich zwischen den Behandlungsgruppen erfolgte mittels Varianzanalyse mit post hoc multiplen Mittelwertvergleichen an allen über fünf Minuten gemittelten Messzeitpunkten. Ausgewertet wurde ab der 30. Minute nach Narkoseeinleitung bis zum Ende der jeweiligen Narkose. Hierbei wurden folgende Parameter aufgezeichnet und ausgewertet: arterieller Sauerstoffpartialdruck (PaO_2), Sauerstoffsättigung (SpO_2), arterieller Kohlendioxidpartialdruck (PaCO_2), arterieller Blutdruck, Herzfrequenz, Körpertemperatur, pH-Wert, Bikarbonat, Basenüberschuss, endinspiratorischer Beatmungsdruck (P_{peak}), endexpiratorischer Beatmungsdruck (PEEP), Druckamplitude zwischen In- und Expiration (ΔP), Atemzugvolumen, Atemminutenvolumen, Atemfrequenz, Compliance, inspiratorische Sauerstoffkonzentration (FiO_2) und inspiratorische Isoflurankonzentration. Bei der Auswertung des PaO_2 zeigten sich hochsignifikante Unterschiede zwischen den Gruppen. Die Mittelwerte des PaO_2 lagen bei der OLC-Gruppe zwischen 300 und 450 mmHg, wohingegen sie bei der Kontrollgruppe bei Werten zwischen 100 und 240 mmHg schwankten. Eine negative Beeinflussung der übrigen und während der Narkose überwachten Parameter bei der OLC-Gruppe im Vergleich zur Kontrollgruppe war nicht festzustellen. Die hohen PaO_2 -Werte bei einer Beatmung nach dem „Open-Lung-Concept“ beim anästhesierten Pferd deuten darauf hin, dass sich mit dieser Technik atelektatische Lungenregionen rekrutieren lassen und ein erneutes Kollabieren mittels eines individuellen PEEP verhindert werden kann. Hierbei erfolgt keine nachteilige Beeinträchtigung der Hämodynamik. Somit führt die Beatmung in Anlehnung an das Open-Lung-Concept über die Öffnung von Atelektasen zu einer signifikanten Verbesserung der alveolären Lungenventilation während der Narkose.

Schlüsselwörter: Pferd, Kolikpatienten, Allgemeinnarkose, Beatmung, Open-Lung-Concept, Anästhesiologie

Optimized gas exchange during inhalant anaesthesia in horses using „open lung concept“ ventilation

The purpose of this study was an optimization of the pulmonary gas exchange during equine anaesthesia with intermittent positive pressure ventilation (IPPV) by recruitment of atelectatic lung areas with recruitment maneuvers and preventing a new collapse of the reopened lung areas by positive end-expiratory pressure (PEEP). 30 horses with a minimum bodyweight of 450 kg, which were submitted to colic surgery, were divided into two randomized groups each consisting of fifteen horses (control group versus open-lung-concept (OLC) group). The premedication (0.5 - 0.8 mg/kg bw xylazine intravenous), induction (0.05 mg/kg diazepam and 2.2 mg/kg bw ketamine intravenous) and maintenance (inhalation anaesthesia with isoflurane in 100% oxygen) of anaesthesia were identical in both groups. The effect of the two treatment levels (OLC vs. conventional) during time of narcosis on parameters determined (PaO_2 (or Horrorwitz-Index)) were compared using two-way analysis with Tukey's post-hoc test for multiple comparisons of estimates. Statistical evaluation has been carried out from 30 minutes after anesthetization to finish of narcosis. The following parameters were recorded and analyzed: arterial blood gases (PaO_2 , PaCO_2), oxygen saturation (SpO_2), arterial blood pressure, heart rate, body temperature, acid-base status (pH, HCO_3^- -BE), end-inspiratory pressure (P_{peak}), end-expiratory pressure (PEEP), tidal volume, tidal volume per minute, respiratory rate, compliance, inspiratory oxygen concentration and isoflurane concentration. Analysis of PaO_2 showed significant differences between groups. The mean values of the PaO_2 of the OLC group ranged between 300 and 450 mmHg whereas in the control group they ranged between 100 and 240 mmHg. A negative influence on other monitored parameters was not detected in the OLC-group in comparison to the control group. Ventilation of horses in colic surgery using the "open-lung-concept" is able to recruit atelectatic lung areas and keep them open by adaption of an individual PEEP. A negative influence on other monitored parameters during the anaesthesia was not detected. This means that using the "open-lung concept" leads to a most significant improvement in the oxygen partial pressure during the anaesthesia.

Keywords: horse, colic, anaesthesia, ventilation, open-lung concept

Einleitung

Mit einer Mortalitätsrate von 1,6 % (8 % für Kolikpatienten und 0,9% für anderweitig erkrankte Pferde (Johnston et al. 2004)) ist die Narkose des Pferdes im Vergleich zur Humanmedizin

(narkoseassoziierte Mortalität 0,0001% (Lunn 1982)) um ein Vielfaches risikoreicher. Bei Risikopatienten, z.B. Pferden mit abdominaler Kolik, die einer medianen Laparotomie in Rückenlage unterzogen werden, zeigt sich, dass in vielen Fällen

trotz kontrollierter künstlicher Beatmung mit intermittierender Anwendung eines positiven Atemwegsdrucks (IPPV) und hoher O_2 -Konzentration im Narkosegas ($FiO_2 > 90\%$) eine partielle respiratorische Insuffizienz auftritt (Day et al. 1995). So deuten scheinbar physiologische O_2 -Partialdrücke ($PaO_2 \sim 100$ mmHg) unter den genannten Narkosegaskonzentrationen auf eine Ventilations-Perfusionsstörung hin, die im erheblichen Maße auf entstandenen Atelektasen beruht (Nyman et al. 1990a). Während man einer Hyperkapnie in aller Regel durch Steigerung des Atemzugvolumens (Erhöhung des endinspiratorischen Beatmungsdrucks P_{peak}) und des Atemminutenvolumens begegnen kann, führt dieses Vorgehen in Bezug auf den PaO_2 nur kurz- bis mittelfristig zu einer verbesserten Oxygenierung. Des Weiteren besteht die Gefahr durch Hyperventilation über die Normokapnie hinausgehend, eine Hypokapnie mit entsprechenden negativen Folgen (zerebrale Minderperfusion, Blutdruckabfall) zu erzeugen. Eine zu große inspiratorische Druckamplitude (ΔP) über mehrere Minuten oder sogar Stunden hat zudem ein Überblähen der noch belüfteten Alveolen zur Folge. Weiterhin ist bei zu großem ΔP eine Abnahme der Surfactantkonzentration beschrieben; das wiederum erhöht die Oberflächenspannung in den Alveolen und forciert so eine Ausbreitung der Atelektasen (Parker et al. 1993, Toci-no und Westcott 1996). Auch die CPPV (continuous positive pressure ventilation), d.h. eine Kombination aus IPPV-Beatmung mit einem positiven end-expiratorischen Druck (PEEP), führte bisher zu keiner befriedigenden Verbesserung der Lungenfunktion (Nyman und Hedenstierna 1988, Pauritsch 1997).

In der vorliegenden Studie soll geprüft werden, ob mit Hilfe der Beatmung nach dem „Open-Lung-Concept“ Ventilationsstörungen und daraus resultierende Gasaustauschstörungen vermieden bzw. stark gemindert werden können und sich so Hypoxämien bei Erhaltung der Normokapnie vermeiden lassen. Dafür sollen - in Anlehnung an die Humanmedizin (Lachmann 1992, Tusman et al. 1999, van Kaam et al. 2004) - kollabierte Alveolen durch Eröffnungsmanöver mit erhöhten Atemwegsdrücken rekrutiert und ihr erneutes Kollabieren durch das Anlegen eines individuellen PEEP verhindert werden. Der arterielle Sauerstoffpartialdruck dient hier als Globalparameter zur Überwachung einer gelungenen Rekrutierung der gesamten Lunge (Böhm und Bangert 2000).

Material und Methoden

Es wurden aus 30 Warmblutpferden mit einem Körpergewicht von mindestens 450 kg, die in der Klinik für Pferde aufgrund

einer akuten Kolikerkrankung einer Laparotomie in der Medianen unterzogen wurden, randomisiert zwei Gruppen zu je 15 Tieren gebildet (Kontrollgruppe versus Open-Lung-Concept-Gruppe). Narkose Prämedikation (0,5-0,8 mg/kg KGW Xylazin i.v.), Einleitung (0,05 mg/kg Diazepam und 2,2 mg/kg KGW Ketamin i.v.) und Aufrechterhaltung der Narkose (Inhalationsnarkose: Isofluran in 100% Sauerstoff) erfolgte in beiden Gruppen identisch.

Nach Einleitung der Narkose und Lagerung wurden alle Pferde an das Inhalationsgerät für Pferde „Vet.-Tec. Model JAVC-2000“¹ angeschlossen und kontrolliert beatmet (Tab. 1). Die Beatmung erfolgte bei der Kontrollgruppe über den gesamten Narkosezeitraum mittels IPPV-Beatmung. Die OLC-Gruppe wurde für die ersten 30 Minuten nach dem Ablegen, mit Ausnahme eines PEEP von 10 cmH₂O, analog zur Kontrollgruppe ventiliert. Anschließend wurde mittels Rekrutierungsmanövern der individuelle PEEP eingestellt.

Die Parameter arterieller Blutdruck, Herzfrequenz, EKG, Körpertemperatur, expiratorisches Atemzugvolumen, expiratorisches Minutenatemvolumen, Atemfrequenz, endinspiratorischer Beatmungsdruck, PEEP, inspiratorische Isoflurankonzentration und inspiratorische Sauerstoffkonzentration wurden permanent mittels des Narkosemonitors „Kardiocap 5“² überwacht und über die serielle Schnittstelle des Monitors auf einem PC im Intervall von zehn Sekunden mit der Software Datex-Ohmeda S/5 Collect gespeichert.

Die Atemfrequenz, das Atemzugvolumen, das Atemminutenvolumen und der endinspiratorische Beatmungsdruck sowie der PEEP wurden mittels Spirometrie gemessen. Der modifizierte Messkopf des Pneumotachographen nach MOENS für Großtiere (Horse-lite) wurde zwischen Trachealtubus und Y-Stück des Narkosesystems platziert und über Probenschläuche mit dem Narkosemonitor verbunden. Die Berechnung der Atemvolumina erfolgte durch zeitliche Integration der Atemstromstärke. Die Blutgasmessung wurde kontinuierlich intraarteriell mittels eines Paratrend 7[®]-Sensor³ nach Kalibrierung mit dem TrendCare-Monitor⁴ durchgeführt. Die Sensorspitze mit optischen Sensoren für die Messung von pH, PaO_2 und $PaCO_2$ sowie ein Thermoelement für die Temperaturmessung lag ca. 8 cm herzwärts in der A. facialis und wurde über das Drucksystem der Blutdruckmessung mit heparinierter NaCl-Lösung gespült. In unterschiedlichen Abständen erfolgte über arterielle Einzelproben ein Abgleich der Sensorwerte mit dem stationären Analysegerät AVL 995⁵ und gegebenenfalls eine Rekalibrierung des Sensors.

Tab 1 Beatmungsparameter während der Narkose bei laparotomierten Pferden für die Kontrollgruppe während der gesamten Narkosedauer und der OLC-Gruppe ab der 30. *Ventilation-parameter during anaesthesia in horses ventilated by using the IPPV (from the beginning of anaesthesia) or the OCL-ventilation (from 30th minute after beginning)*

Parameter	Kontrollgruppe	OLC-Gruppe
Atemfrequenz	6-8 /min	10-20 /min
Verhältnis Inspiration / Expiration	1:2	1:1
Max. endinspiratorischer Beatmungsdruck	30-45 cm H ₂ O	30-45 cmH ₂ O
PEEP	entfällt	15-25 cmH ₂ O
Beatmungsdruckamplitude	30-45 cmH ₂ O	10-25 cmH ₂ O
Rekrutierungsmanöver	entfällt	max. 80 cmH ₂ O
Tidalvolumen	1,5-2 l/100 kg KGW	0,5-1,5 l/100 kg KGW
Minutenatemvolumen	10-15 l/100 kg KGW/min ⁻¹	10-15 l/100 kg KGW/min ⁻¹
Sauerstoffflussrate	15 ml/kg KGW/min ⁻¹	15 ml/kg KGW/min ⁻¹

Mit den Maßnahmen der Beatmung nach dem Open-Lung-Concept wurde 30 Minuten nach Narkoseinduktion begonnen. Nach Erhöhung des PEEP auf 20 ± 5 cm H₂O erfolgte das erste Rekrutierungsmanöver, bei dem für zwei Atemzüge der endinspiratorische Druck (P_{peakRM}) um 10 cm H₂O erhöht und der P_{peak} der übrigen Atemzüge im angegebenen Bereich von 30-45 cm H₂O gehalten wurde (Abb.1). Stieg der kontinuierlich gemessene PaO₂ innerhalb von 2 Minuten nach diesem Manöver nicht merklich an, erfolgte das zweite Rekrutierungsmanöver, indem der P_{peakRM} des vorangegangenen Rekrutierungsmanövers um weitere 10 cm H₂O für zwei Atemzüge heraufgesetzt wurde. Rekrutierungsmanöver mit jeweiliger Erhöhung von Ppeak um weitere 10 cm H₂O wurden in der zuvor beschriebenen Form solange durchgeführt, bis eine optimale Oxygenierung ($\text{PaO}_2 > 400$ mmHg) erzielt war. Dies wurde als Anzeichen einer maximalen Öffnung der Alveolen gewertet. Als obere Grenze für den maximalen Druck bei Rekrutierungsmanövern wurde ein Wert von 80 cm H₂O vom Respirator erreicht.

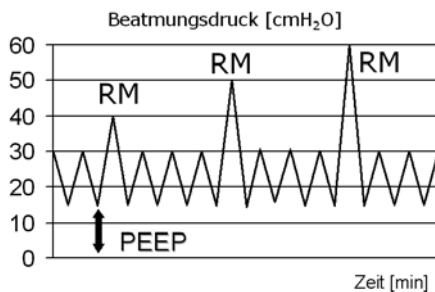


Abb 1 Schematische Darstellung des Beatmungsdruckverlaufes während der Lungenrekrutierung; RM: Rekrutierungsmanöver, PEEP: positiver end-expiratorischer Druck
Schematic description of the ventilation-pressure process during lung recruitment; RM: recruitment-maneuver, PEEP: positive end-expiratory pressure

Fiel der PaO₂ nach einem RM nach kurzem Anstieg wieder ab wurde der PEEP erhöht und erneut ein RM durchgeführt, bis eine optimale Oxygenierung vorlag. Ging mit der Steigerung des PEEP ein dauerhafter Abfall des mittleren arteriellen Blutdruckes einher wurde der PEEP reduziert und eine suboptimale Oxygenierung zugunsten der Hämodynamik in Kauf genommen. Konnte hingegen eine optimale Oxygenierung erreicht werden, so wurde dann sowohl der Ppeak als auch der PEEP schrittweise reduziert, ohne dass sich die Druckamplitude (ΔP_{Insp}) entscheidend änderte. Erfolgte ein Absinken des PaO₂ wurde der PEEP auf die letzte Einstellung vor dem Absinken eingestellt und erneut ein RM durchgeführt.

Ca. zehn Minuten vor Narkoseende wurde bei der Kontrollgruppe die Atemfrequenz vermindert (von ca. 8/min auf ca. 4/min), um durch die Steigerung des arteriellen PaCO₂ das Wiedereinsetzen der Spontanatmung des Pferdes am Ende der Narkose zu erreichen. Bei der OLC-Gruppe wurde ein Ansteigen des PaCO₂ durch die Reduzierung des Ppeak und somit des Atemzug- sowie Minuteatmolumens erreicht.

Die Isofluranerhaltungskonzentration wurde bis zum Narkoseende beibehalten, um ein zu frühes Aufwachen der Patienten noch während des Transportes in die Narkosebox zu ver-

hindern. In der gepolsterten Aufwachbox wurde den Patienten via Endotrachealtubus reiner Sauerstoff insuffliert (15 l/min). Nachdem die Pferde deutlichen Schluckreflex zeigten, wurde extubiert, ein Schlauch zur O₂-Insufflation in den ventralen Nasengang geschoben und die Aufwachphase überwacht.

Statistische Auswertung

Für alle Parameter wurden die Modellresiduen in den beiden Narkosegruppen durch visuelle Beurteilung der QQ-Plots sowie dem Shapiro-Wilk Test auf Normalverteilung überprüft. Der Einfluss der zwei Narkosegruppen (OLC-Beatmung vs. IPPV-Beatmung) während der Narkose auf die untersuchten Parameter (PaO₂ etc.) wurde mittels einer zweifaktoriellen Varianzanalyse mit unabhängigen Messungen zwischen den Narkosegruppen und Messwiederholungen während der Narkosezeit (repeated measurements) geprüft. Einzelvergleiche zwischen den beiden Beatmungsverfahren an den Messzeitpunkten (jeweils über 5 Minuten gemittelt, s. Abb. 2) wurden mit Tukey's post hoc test für multiple Mittelwertvergleiche durchgeführt. Die versuchsbezogene Irrtumswahrscheinlichkeit von max. 5% wird durch entsprechende alpha-Adjustierung eingehalten.

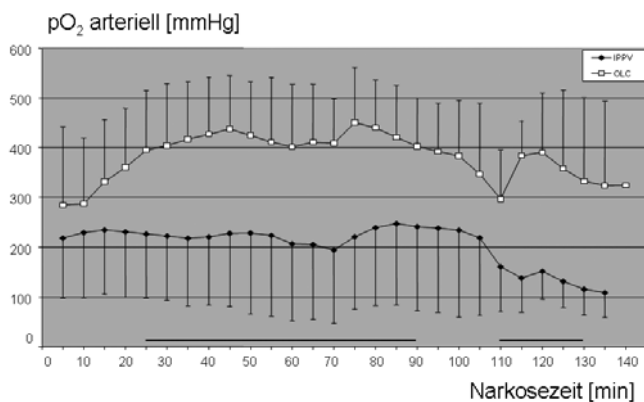
Die statistische Auswertung der Messwerte erfolgte mit der Software SAS, Version 9.1 für Windows⁶. Für die Analyse des linearen Modells wurde die Prozedur MIXED benutzt. Ein signifikanter Unterschied lag bei einem adjustierten p-Wert (Irrtumswahrscheinlichkeit) 0,05 vor.

Ergebnisse

Die Entwicklung des Sauerstoffpartialdrucks über den zeitlichen Verlauf zeigte, dass in den Zeiträumen der 25. bis 95. Minute und von der 115. bis zur 130. Minute die Mittelwerte der OLC-beatmeten Probanden hochsignifikant ($p=0,0001$) über denen der Probanden der Kontrollgruppe lagen (Abb. 2). In den Rekrutierungsmanövern waren in der überwiegenden Zahl der Fälle Beatmungsdrücke von mindestens 60 bis 80 cmH₂O erforderlich, um eine Erhöhung des PaO₂ um mehr als 30 mmHg zu erzielen (Eröffnungsdruck, s. Tab. 2). Die Sauerstoffsättigung der Probanden der OLC-Gruppe war ab der 10. Minute nach Narkosebeginn höher als bei den Probanden der Kontrollgruppe, es lag jedoch nur zum Zeitpunkt Minute 75 ein schwach signifikanter Unterschied ($p = 0,0103$) vor. Ansonsten ergaben sich keine signifikanten Unterschiede. Die Analyse der Mittelwerte des Kohlendioxidpartialdrucks erbrachte bei 75 Minuten und zwischen 85 und 115 Minuten nach Narkosebeginn ein schwach signifikant bis signifikant höheren Kohlendioxidpartialdruck in der OLC-Gruppe. Über den Narkoseverlauf sanken die Mittelwerte des pH-Werts beider Gruppen kontinuierlich ab. Dabei lag das Niveau der Kontrollgruppe in dem Zeitraum von 75 bis 110 Minuten schwach signifikant bis signifikant über dem der OLC-Gruppe.

Der mittlere arterielle Blutdruck fiel in einigen Fällen direkt im Anschluss an ein RM für den Zeitraum von weniger als einer Minute um bis zu 15 mm Hg, stieg aber unmittelbar wieder auf seinen Ausgangswert und blieb stabil (Abb. 3). Es konnte zwi-

Abb. 2: Verlauf des Sauerstoffpartialdrucks (Mittelwerte) über die Narkosezeit im Vergleich einer OLC-Beatmung mit einer IPPV-Beatmung (schwarzer Balken: hochsignifikanter Unterschied; $p < 0,001$)
Process of the PaO₂ (means) during anaesthesia comparing olc-ventilation with IPPV-ventilation; black bar = high significant differences ($p < 0,001$).

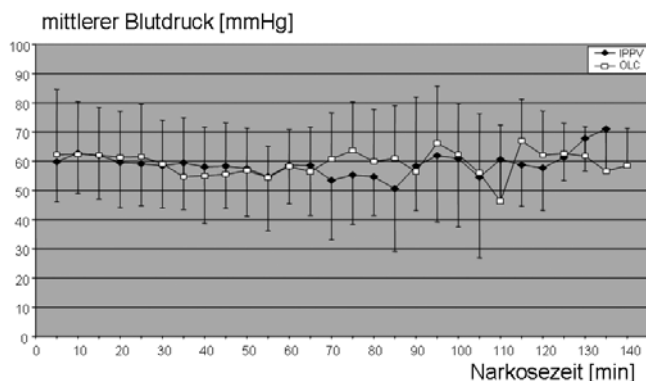


schen den beiden Gruppen kein signifikanter Unterschied in Bezug auf den mittleren arteriellen Blutdruck festgestellt werden.

Auch im Hinblick auf die Herzfrequenz und die Körpertemperatur ergaben sich keine signifikanten Unterschiede zwischen den Gruppen und über den zeitlichen Verlauf.

Die Analyse der Beatmungsparameter zeigt, dass zu den Auswertungszeitpunkten 20, 35, 55, 60, 70-95, 115, 120 und 135 Minuten die Druckamplitude zwischen In- und Expiration bei der OLC-Gruppe schwach bis hochsignifikant kleiner war als bei der Kontrollgruppe. Daraus ergab sich für die OLC-Gruppe ein bis auf bei den Messpunkten 45, 125, 130, 140 und 145 Minuten signifikant kleineres Tidalvolumen als bei der Kontrollgruppe. Die Auswertung des Atemminutenvolumens erbrachte jedoch keine signifikanten Unterschiede, da über den gesamten Überwachungszeitraum die Atemfrequenz bei der OLC-Gruppe größer war als bei der Kontrollgruppe. Der Verlauf der Mittelwerte der inspiratorischen Sauerstoffkonzentration und der inspiratorischen Isoflurankonzentration war bei beiden Gruppen parallel und erbrachte keine statistisch signifikanten Unterschiede.

Abb 3 Verlauf des Blutdrucks (Mittelwerte) über die Narkosezeit im Vergleich einer OLC-Beatmung mit einer IPPV-Beatmung
Process of the mean arterial bloodpressure (means) during anaesthesia comparing olc-ventilation with IPPV-ventilation.



Diskussion

Hypoxämie und Hyperkapnie sind häufige respiratorische Funktionsstörungen während der Allgemeinanästhesie beim Pferd (Klein 1990, Nyman et al. 1988, Muir und Hubbell 1991, Schatzmann 1995). Diese während der Narkose stattfindenden pulmonalen Gasaustauschstörungen sind in Rückenlage besonders stark ausgeprägt, weil dann zwerchfellnahe Lungenareale durch den voluminösen Gastrointestinaltrakt zusätzlich komprimiert werden (Klein 1990, McDonnell 1981, Schmidt-Oechtering und Alef 1993). Bei wachen und spontan atmenden Tieren wird durch die in regelmäßigen Abständen durchgeführte Seufzeratmung die Atelektasenbildung verhindert (Breves und Engelhard 2000, Schatzmann 1995). Da während der Allgemeinanästhesie dieser Reflex unterdrückt wird und insbesondere bei der kontrollierten Beatmung bislang nur mit einheitlichen Atemzugvolumina beatmet wurde, kommt es in dieser Situation zu ausgeprägten atelektatischen Bereichen (Nyman et al. 1990, Nyman und Hedenstierna 1989, Stegmann 1986).

In bisherigen Untersuchungen konnte gezeigt werden, dass durch die Anwendung der kontrollierten Beatmung zwar eine Hyperkapnie vermieden werden konnte, eine Hypoxämie jedoch selten beeinflussbar war (Hodgson et al. 1986, Schatzmann 1995, Wagner et al. 1990). Dabei führt die kontrollierte IPPV-Beatmung mit oder ohne PEEP entweder zu keiner signifikanten Erhöhung des PaO₂ oder beeinträchtigte den Kreislauf auf Grund der hämodynamischen Nebenwirkungen so stark, dass der hieraus resultierende negative Effekt die Vorteile des erhöhten PaO₂ wieder aufgehoben hat (Hodgson et al. 1986, Wagner et al. 1990, Wilson und Soma 1990). Andere bislang erfolgreich durchgeführte experimentelle Beatmungsformen wie die kontrollierte Beatmung zwerchfellnaher Lungenbezirke mit selektivem PEEP sind aufgrund der technischen Voraussetzungen für ihre Durchführung noch nicht in der Routinepraxis anwendbar (Muir und Hubbell 1991, Moens et al. 1992, Moens et al. 1994, Moens et al. 1995, Nyman und Hedenstierna 1988, Nyman und Hedenstierna 1989).

In der vorliegenden Arbeit wurde untersucht, ob mit der Beatmung nach dem „Open-Lung-Concept“ während Risikonarkosen beim Pferd der pulmonale Gasaustausch verbessert werden kann. Hierbei wird durch die Rekrutierung von atelektatischen Lungenregionen mittels der Anwendung von Rekrutierungsmanövern in Form von intermittierenden Beatmungsdruckerhöhungen bzw. Tidalvolumenvergrößerungen das für den Gasaustausch verfügbare Lungenvolumen vergrößert. Ein erneutes Kollabieren der Alveolen wird durch einen individuellen endexpiratorischen Beatmungsdruck (PEEP) verhindert. Der arterielle PaO₂ diente hier als Globalparameter zur Überwachung einer gelungenen Rekrutierung der gesamten Lunge (Böhm und Bangert 2000).

Die Überwachung der Blutgase erfolgte in dieser Studie beim Pferd erstmals mit Hilfe des Blutgasmonitors TrendCare® kontinuierlich intraarteriell. Ein Abgleich mit Einzelprobenmessungen zeigte eine hohe Übereinstimmung und die Anwendbarkeit des Systems beim Pferd in Allgemeinanästhesie. Leider ist das Gerät nicht mehr im Handel verfügbar.

Die Untersuchungsergebnisse zeigen, dass mittels Beatmung nach dem „Open-Lung-Concept“ bei Pferderisikonarkosen mit

Tab 2 Abhängigkeit des PaO₂ von den Rekrutierungsmanövern (RM) mit verschiedenen Eröffnungsdrücken. *Dependency of the PaO₂ on recruitment maneuver (RM) with different opening pressures.*

RM [cmH ₂ O]	kein Anstieg des PaO ₂	Anstieg PaO ₂ <30 mmHg	Anstieg PaO ₂ >30 mmHg	Gesamt
	Anzahl der RM			
30	1			1
40		4		4
50	5	1	5	11
60		6	6	12
70	4	6	10	20
80	1	6	15	22
Gesamt	11	23	36	70

Sauerstoffpartialdrücken von über 400 mmHg eine erheblich höhere Oxygenierung des arteriellen Blutes erzielt werden kann als mit konventioneller IPPV-Beatmung. Dieses hohe PaO₂-Niveau deutet auf eine nahezu vollständig rekrutierte Lunge und einen ungestörten Gasaustausch hin, während man davon ausgehen muss, dass bei einem FiO₂ von ca. 90 % ein PaO₂ von unter 400 mmHg auf Ventilationsstörungen und besonders auf Atelektasen beruht. Diese Aussage wird durch die Arbeiten mit selektivem PEEP (Moens et al. 1992, Moens et al. 1994) sowie durch die Visualisierung mit Hilfe eines Computertomographen, der die Lunge und ihre nicht belüfteten Bereiche darstellt, untermauert (Nyman et al. 1990).

Maßgeblicher Effekt der OLC-Beatmung ist die Rekrutierung von Lungenkapazität für den Gasaustausch, so dass neben einer effizienten Oxygenierung auch eine ausreichende CO₂-Abatmung ermöglicht wird. Im Hinblick auf den CO₂-Austausch lässt sich mit dem Beatmungsmodus nach dem OLC allerdings eine bei IPPV häufig zu beobachtende Hypokapnie vermeiden. Voraussetzung hierfür ist die Möglichkeit, die Atemfrequenz steigern und das Atemvolumen senken zu können, um ein gleichbleibendes Atemminutenvolumen aufrecht halten zu können. Auf diese Weise wird die funktionelle Totraumventilation so weit erhöht, dass ein gesteigerter Verbleib von CO₂ im Blut erfolgt. Um das Einsetzen der Spontanatmung zu unterstützen, wurde mit Hilfe dieser Modulation ein höherer PaCO₂ gegen Ende der Narkose angestrebt und auch erreicht. Diese Methode der OLC-Beatmung scheint zunächst bisherigen Regeln bei der kontrollierten Beatmung zu widersprechen. So wird einer Hypoxämie nicht durch geringe Atemfrequenzen mit hohen Atemzugvolumina entgegengewirkt, sondern durch erhöhte Atemfrequenz mit geringen Atemzugvolumen, also einer Modulation der Totraumventilation. Die damit verbundene Steigerung der Totraumventilation wirkt sich, wie die vorliegenden Daten zeigen, bei einem FIO₂ von 90 % nicht nachteilig auf die Oxygenierung aus.

Um ein Rekollabieren der eröffneten Lungenalveolen zu verhindern, erwiesen sich PEEP-Werte je nach Patient und Erkrankungsbild zwischen 15 und 28 cmH₂O als effizient. Es zeigte sich, dass besonders schwere Tiere oder aber Tiere mit hochgradigem Meteorismus einen höheren PEEP benötigen. So könnte der bei diesen Tieren vorhandene hohe vizerale Druck eine Eröffnung der Atelektasen verhindert haben. Möglicherweise war auch der Eröffnungsdruck von 80 cmH₂O für eine weitestgehende Rekrutierung nicht ausreichend oder ein Rekollabieren konnte durch den gesenkten PEEP nicht verhindert werden. Dies steht im Einklang mit Untersuchungen, bei denen adipöse oder besonders rundbauchige Pferde in Rückenlage

signifikant geringere PaO₂ aufwiesen als normalgewichtige oder schlanke Pferde (Moens et al. 1995, Schatzmann 1995). Durch die Haltung eines PEEP war die Druckamplitude zwischen In- und Expiration bei der OLC-Gruppe hochsignifikant niedriger als bei der Kontrollgruppe und sank im Verlauf der Narkose bei der OLC-Gruppe. Eine geringe Druckamplitude kann dabei als vorteilhaft angesehen werden, da das Lungengewebe so mechanisch weniger stark irritiert wird. Die Abnahme der Druckamplitude während der Narkose dürfte zum einen auf die individuell erforderliche Anhebung des PEEP, zum anderen aber auch auf eine Verbesserung der Compliance zurückzuführen sein, da bei einer rekrutierten Lunge für das gleiche Atemzugvolumen ein geringerer P_{peak} benötigt wird.

Als wichtiger Indikator für die Herz-Kreislauf-Situation wird die permanente direkte Messung des intraarteriellen Blutdrucks besonders bei Risikonarkosen angesehen (Schatzmann 1995, Schmidt-Oechtering und Alef 1993, Taylor und Clarke 1999). Zur Auswertung gelangte in dieser Arbeit der mittlere arterielle Blutdruck, da er im Gegensatz zum systolischen und diastolischen Druck mit zunehmender Entfernung zum Herzen nur geringgradig abfällt und somit dem mittleren Druck in der Aorta weitestgehend entspricht (Gilly und Fitzal 1995). Es zeigte sich weder hinsichtlich dieses Wertes noch im Hinblick auf die kreislaufunterstützende Maßnahmen ein signifikanter Unterschied zwischen OLC- und IPPV-Kontrollgruppe. Lediglich unmittelbar bei der Durchführung von Rekrutierungsmanövern fiel in einigen Fällen der mittlere arterielle Blutdruck für 30 bis 60 Sekunden um bis zu 15 mmHg ab. Nach spätestens einer Minute waren jedoch die Werte des Ausgangsniveaus wieder erreicht. Die OLC-Beatmung erscheint daher im Hinblick auf die Kreislaufbeeinträchtigung nicht nachteilig im Vergleich zur IPPV-Beatmung. Ob sich diesbezügliche Unterschiede im Vergleich zur Spontanatmung ergäben, müsste allerdings weitergehend untersucht werden.

In der vorliegenden Arbeit konnte gezeigt werden, dass mit dem „Open-Lung-Concept“ im Vergleich zur reinen IPPV-Beatmung eine hochsignifikante Verbesserung der Oxygenierung bei Risikopatienten in Rückenlage während der Narkose erreicht werden konnte. Eine nachteilige Beeinflussung des arteriellen Blutdruckes trat nur sehr vereinzelt auf. Diese konnte aber in allen Fällen innerhalb kürzester Zeit durch eine individuelle Anpassung der Beatmungsparameter behoben werden. Wie die Ergebnisse zeigen, beruht ein gestörter Gasaustausch beim Pferd in Narkose größtenteils auf Atelektasen. Die bisherige IPPV-Beatmung ist nur begrenzt dazu geeignet, der Entstehung von Atelektasen entgegen zu wirken, bzw. nicht geeignet, bestehende Atelektasen zu beheben. Mit der

OLC-Beatmung hingegen lassen sich Atelektasen rekrutieren. Die bereits beschriebene Modulation der Totraumventilation und die daraus resultierende Steuerbarkeit des PaCO₂ bei gleichzeitiger optimaler Oxygenierung bietet den Vorteil, für die Dauer der Narkose die Normokapnie beizubehalten und ein unmittelbares Einsetzen der Spontanatmung am Ende der maschinellen Beatmung zu ermöglichen. Inwieweit die Beatmung nach dem „Open-Lung-Concept“ weitere Vorteile in Bereichen wie z.B. der Wundheilung oder der postanästhetischen Lungenfunktion bietet, und wie sich diese Beatmungsform bei elektiven Eingriffen bewähren kann, müssen weitere Untersuchungen zeigen. Ob die OLC-Beatmung geeignet ist, die Rate von Narkosezwischenfällen und postnarkotischen Komplikationen zu senken, kann nur durch Anwendung der Methodik bei einer großen Patientenzahl geprüft werden.

Herstelleradressen

- ¹ J. D. Medical Distributing Company, Phoenix, USA, Fa. Eickemeyer)
- ² Datex-Ohmeda GmbH, Duisburg
- ^{3,4} Diametrics Medical Ltd., High Wycombe, UK
- ⁵ AVL Medizintechnik, Bad Homburg
- ⁶ SAS Institute, Cary, North Carolina, USA

Literatur

- Böhm S. H. und Bangert K. (2000) Prävention und Therapie anästhesiebedingter Atelektasen. *Anaesthesist* 49, 345-348
- Day T. K., Gaynor J. S., Muir W. W. III, Bednarski R. M. und Mason D. E. (1995) Blood gas values during intermittent positive pressure ventilation and spontaneous ventilation in 160 anesthetized horses positioned in lateral or dorsal recumbency. *Vet. Surg.* 24, 266-276
- Gilly H. und Fitzal S. (1995) Principles and practise in invasive arterial blood pressure measurement. *Anaesthesist* 44, 931-52
- Breves G. und von Engelhard W. (2000) Physiologie der Haustiere, Enke im Hippokrates Verlag GmbH, Stuttgart
- Hodgson D. S., Steffey E. P., Grandy J. L. und Woliner M. J. (1986) Effects of spontaneous, assisted, and controlled ventilatory modes in halothane-anesthetized geldings. *Am. J. Vet. Res.* 47, 992-996
- Johnston G. M., Eastment J. K., Taylor P. M. und Wood J. L. N. (2004) Is isoflurane safer than halothane in equine anaesthesia? Results from a prospective multicentre randomised controlled trial. *Equine Vet. J.* 36, 64-71
- Klein L. (1990) Anesthetic complications in the horse 337. *Vet. Clin. North Am. Equine Pract.* 6, 665-692
- Lachmann B. (1992) Open up the lung and keep the lung open. *Intensive Care Med.* 18, 319-321
- Lunn J. N. und Muir W. W. (1982) Mortality Associated with Anaesthesia. *Anaesthesia* 37, 856
- McDonnell W. N. (1981) General anesthesia for equine gastrointestinal and obstetric procedures. *Vet. Clin. North Am. Large. Anim. Pract.* 3, 163-194
- Moens Y., Gooijes P. und Lagerweij E. (1992) A tracheal tube-in-tube technique for functional separation of the lungs in the horse. *Equine Vet. J.* 24, 103-106
- Moens Y., Lagerweij E., Gooijes P. und Poortman J. (1994) Differential artificial ventilation in anesthetized horses positioned in lateral recumbency. *Am. J. Vet. Res.* 55, 1319-1326
- Moens Y., Lagerweij E., Gooijes P. und Poortman J. (1995) Distribution of inspired gas to each lung in the anaesthetised horse and influence of body shape. *Equine Vet. J.* 27, 110-116
- Muir W. W. und J. A. E. Hubbell (1991) Oxygen supplementation and ventilatory assist devices, *Equine anesthesia*, Mosby Year Book, St. Louis
- Nyman G., Funkquist B. und Kvarn C. (1988) Postural effects on blood gas tension, blood pressure, heart rate, ECG and respiratory rate during prolonged anaesthesia in the horse. *Zentralbl. Veterinarmed. A.* 35, 54-62
- Nyman G., Funkquist B., Kvarn C., Frostell C., Tokics L., Strandberg A. Lundquist H., Lundh B., Brismar B. und Hedenstierna G. (1990) Atelectasis causes gas exchange impairment in the anaesthetised horse. *Equine Vet. J.* 22, 317-324
- Nyman G. und Hedenstierna G. (1988) Comparison of conventional and selective mechanical ventilation in the anaesthetized horse. Effects on central circulation and pulmonary gas exchange. *Zentralbl. Veterinarmed. A.* 35, 299-314
- Nyman G. und Hedenstierna G. (1989) Ventilation-perfusion relationships in the anaesthetised horse. *Equine Vet. J.* 21, 274-281
- Parker J. C., Hernandez L. A. und Peevy K. J. (1993) Mechanisms of ventilator-induced lung injury. *Crit Care Med.* 21, 131-143
- Pauritsch K. (1997): PEEP-Beatmung mit positivem endinspiratorischem Druckplateau während Risikonarkosen bei Kolikpferden. *Med. vet. Diss. Hannover*
- Schatzmann U. (1995) Sedation und Anästhesie des Pferdes. Blackwell Wissenschafts-Verlag, Berlin-Wien
- Schmidt-Oechtering G. U. und M. Alef (1993) Neue Aspekte der Veterinärnarkose und Intensivtherapie. Verlag Paul Parey, Berlin, Hamburg
- Stegmann G. F. (1986) Pulmonary function in the horse during anaesthesia: a review. *J. S. Afr. Vet. Assoc.* 57, 49-53
- Taylor P. M. und Clarke K. W. (1999) *Handbook of Equine Anaesthesia*. W.B. Saunders Company LTD, London, Edinburgh, New York, Philadelphia, Sydney Toronto
- Tocino I. und Westcott J. L. (1996) Barotrauma. *Radiol. Clin. North Am.* 34, 59-81
- Tusman G., Bohm S. H., Vazquez de Anda G. F., do Campo J. L. und Lachmann B. (1999) Alveolar recruitment strategy' improves arterial oxygenation during general anaesthesia. *Br. J. Anaesth.* 82, 8-13
- Van Kaam A. H., Haitsma J. J., De Jaegere A., van Alderen W. M., Kok J. H. und Lachmann B. (2004) Open lung ventilation improves gas exchange and attenuates secondary lung injury in a piglet model of meconium aspiration. *Crit. Care Med.* 32, 443-449
- Wagner A. E., Bednarski R. M. und Muir W. W. I. (1990) Hemodynamic effects of carbon dioxide during intermittent positive-pressure ventilation in horses. *Am. J. Vet. Res.* 51, 1922-1929
- Wilson D. V. und Soma L. R. (1990) Cardiopulmonary effects of positive end-expiratory pressure in anesthetized, mechanically ventilated ponies. *Am. J. Vet. Res.* 51, 734-739

Prof. Bernhard Ohnesorge
Tierärztliche Hochschule Hannover
Klinik für Pferde
Bischofsholer Damm 15
30173 Hannover
bernhard.ohnesorge@tiho-hannover.de