

Konstruktion eines Meßgerätes zur präzisen Analyse der Lungenfunktion beim Pferd in Ruhe und unter Belastung

Ch. Buess¹, R. Isler², K. A. von Plocki³, J. Auer⁴,
W. Guggenbühl¹

¹Institut für Elektronik, Eidg. Techn. Hochschule, CH-8092 Zürich
²Isler Bioengineering AG, Dahliastrasse 16, CH-8034 Zürich
³Schwarzwald-Tierklinik, Bühlstrasse 5, D-75387 Neublach
⁴Kant. Tierspital Zürich, Wintherthurer Strasse 260, CH-8000 Zürich

Einleitung

Eine präzise Analyse der Lungenfunktion wurde bis heute nicht in die klinische Untersuchung des Respirationsapparates beim Pferd miteinbezogen. Die Bestimmung der entsprechenden Lungenfunktionsparameter unter standardisierten Bedingungen kann z. B., in Ergänzung zur klinischen Untersuchung, eine eventuell vorhandene Lungeninsuffizienz protokollieren. Entsprechende Verfahren, die aufgrund des großen apparativen und methodischen Aufwandes bisher nicht in die Praxis eingeführt wurden, sind in der Literatur beschrieben. Grundlage dieser Verfahren bildet die Messung der Atemvolumina, die in der Regel mittels Atemmasken bestimmt werden. Dabei werden Druckdifferenzen in Abhängigkeit vom Strömungsverlauf (Fleisch, 1925, Drasche, 1968), thermoelektrische Effekte (Buck et al., 1968) oder die Rotation von Drehkörpern (Dräger, 1968) ausgenutzt. Ohne Atemmaske arbeitet die indirekte Impedanz-Spirometrie, wobei die elektrische Impedanz des Thorax dem Atemvolumen zugeordnet wird (Reinhard et al., 1971). Neuere Messungen werden auf Ultraschallbasis durchgeführt (Woakes et al., 1987, Buess et al., 1986). Das hier vorgestellte Meßgerät wird die objektive Erfassung der Lungenfunktion beim Pferd wesentlich vereinfachen und damit erstmals ermöglichen, daß solche Messungen unter Praxisbedingungen durchgeführt werden können.

Die Lungenfunktionsmessung beim Pferd stellt die folgenden Anforderungen an das verwendende Meßsystem:

- Die Strömungsgeschwindigkeit (in der Folge auch Flow genannt), Temperatur sowie Zusammensetzung der Atemgase müssen gemessen werden.
- Die Meßmethode sollte das Pferd in der Atmung nicht behindern, d. h., vor allem der Strömungswiderstand des Atemstromsensors sollte möglichst klein sein.
- Die ein- bzw. ausgeatmeten Gase unterliegen starken Temperatur- und Zusammensetzungsänderungen (CO₂,

Zusammenfassung

Die vorliegende Arbeit beschreibt die Konstruktion eines Meßgerätes zur präzisen Analyse der Lungenfunktion beim Pferd in Ruhe und Bewegung. Es wird die technische Realisation des auf Ultraschallbasis arbeitenden Gerätes vorgestellt, und es werden erste Anwendungen der Meßmethoden beschrieben. Das Hauptgewicht liegt auf der Beschreibung der Flow-Messung. Die integrierte Molmasseanalyse wird nur in kurzen Zügen angedeutet.

Summary

The present study describes the construction of a sophisticated analysing system of pulmonary function at rest and during exercise. Technical realisation of the ultrasound-based instrument and the first results of pulmonary function tests were discussed in the article. The main aspect is therefore the computerized flow measurement, whereas the integrated analysis system of the mole mass is briefly discussed.

O₂, H₂O); der Flow-Sensor muß deshalb Durchflußmengen unabhängig von diesen physikalischen Zustandsänderungen exakt erfassen.

- Der zu messende Flow hat einen außerordentlich hohen dynamischen Bereich. Um die Ruheatmung präzise zu erfassen, muß die Flow-Auflösung kleiner als 50 ml/s sein; Spitzen-Flows betragen etwa 80 l/s (Nielan et al.: 1992).
 - Die Bedienung und Kalibration der Meßeinrichtung sollte möglichst einfach sein.
 - Der Flow-Sensor muß leicht zu reinigen sein.
 - Die Flow-Messungen sollten durch Erschütterungen und Vibrationen des Sensors nicht beeinträchtigt werden.
 - Die ganze Einrichtung sollte transportabel sein.
 - Das System muß von den Pferden gut toleriert werden.
- Die vorliegende Arbeit beschreibt die technische Realisation sowie erste Resultate einer Meßeinrichtung, welche diese Anforderungen erfüllt. Zuerst wird das Funktionsprinzip des Meßgerätes vorgestellt, und anschließend werden erste Anwendungen der Meßmethode beschrieben. Eine Diskussion der neuen Meßmethodik sowie technische Daten des Meßsystems schließen die Arbeit ab. Das Hauptgewicht des Beitrags liegt in der Beschreibung der Flow-Messung. Die ebenfalls in das System integrierte Molmasseanalyse (d. h. eine Analyse der Gaszusammensetzung) sowie deren Verwendung kann nur in kurzen Zügen angedeutet werden, da eine umfassende Diskussion dieser neuen Meßtechnik den Rahmen dieser Arbeit sprengen würde.

Lungenfunktionsanalyse mittels Ultraschall-Laufzeitmessung

Die Bestimmung sämtlicher Lungenfunktionsparameter basiert auf einer präzisen Volumenmessung und somit auf einer exakten Messung des Flows. Zur Flow-Messung stehen heutzutage verschiedene Meßprinzipien zur Auswahl: Differentialdruckmeßgeräte, Hitzdrahtinstrumente, Turbinen sowie Ultraschallmeßgeräte (Buess et al., 1988). Bei dem hier beschriebenen System wird ein auf Ultraschall

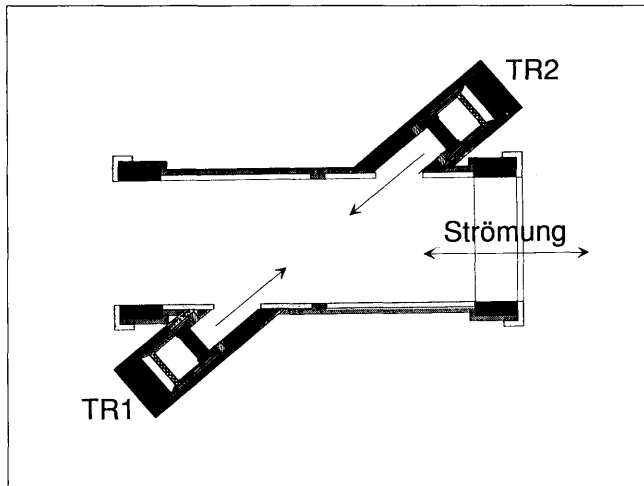


Abb. 1: Schematische Darstellung des Meßkopfes.

basierendes Meßverfahren verwendet. Dieses Prinzip zeigt gegenüber den anderen Verfahren starke Vorteile bezüglich Linearität, Gaszusammensetzungsabhängigkeit sowie Atemwiderstand.

Beschreibung des Meßprinzips

Die Flow-Messung des Systems basiert auf der absoluten Laufzeitmessung von Ultraschallimpulsen, welche mit bzw. gegen die Strömung wandern (Abb. 1). Schräg zum Meßkanal ist eine Schallübertragungsstrecke so angeordnet, daß Ultraschallwellen in einem Winkel von etwa 40° in die Strömung abgestrahlt werden können. Die beiden Elemente TR1 und TR2 dienen dabei als Sender und Empfänger von Ultraschallimpulsen. In Abständen von 2 bis 10 ms werden Impulse von TR1 nach TR2 bzw. von TR2 nach TR1 übertragen. Die jeweiligen Schall-Laufzeiten werden dabei mit hoher zeitlicher Auflösung gemessen. Sowohl die Durchflußmessung als auch die Molmasseermittlung des Gerätes basieren auf dieser präzisen Messung der Schall-Laufzeiten.

Befindet sich im Meßrohr ein stehendes Gasgemisch, so benötigen die Impulse von TR1 nach TR2 dieselbe Zeit wie in umgekehrter Richtung von TR2 nach TR1. Bewegt sich das Gas im Strömungskanal hingegen, so wird die Schallübertragung in einer Richtung schneller sein als in der

anderen. Aus der absoluten Messung der beiden Schall-Laufzeiten kann die Geschwindigkeit des strömenden Gases berechnet werden (Buess et al., 1986). Bei der Lungenfunktionsanalyse von besonderer Bedeutung ist die Tatsache, daß die aus den absoluten Laufzeiten berechnete Gasgeschwindigkeit dabei unabhängig von Temperatur, Zusammensetzung und Druck der Gase ist. Die Messung und exakte Auswertung der absoluten Schall-Laufzeiten unterscheidet den hier vorgestellten Ultraschall-Flow-Meter von anderen Flow-Meßgeräten, welche auf Ultraschallbasis beruhen. Letztere sind meist nicht unabhängig von der Gaszusammensetzung und damit auf eine entsprechende Korrektur angewiesen (Woakes et al., 1987).

Das Ultraschallmeßprinzip liefert Werte, welche über weite Bereiche der Flußgeschwindigkeit linear sind. Einzig bei niedrigsten Strömungsgeschwindigkeiten ergibt sich aufgrund des Umschlagens von laminarer zu turbulenter Strömung eine Nichtlinearität. Diese kleine Nichtlinearität wird im beschriebenen System automatisch korrigiert, wobei das verwendete Korrekturverfahren auf einem Algorithmus basiert, welcher von Yeh et al. (1987) beschrieben wurde.

Bei dem für Pferde entwickelten Sensor beträgt der Durchmesser des Strömungsrohrs 44 mm, der Sensortotraum etwa 240 ml. Die Auflösung der Durchflußmessung ist kleiner als 5 ml/s bei einem Vollausschlag von etwa 40 l/s. Das System erlaubt somit die präzise Messung der Atmung in Ruhe und unter Belastung. Da der Sensor üblicherweise nur an einer Seite der Maske (siehe unten) verwendet wird, beträgt der maximal meßbare Durchfluß etwa 80 l/s. Kleinere Sensoren mit erhöhter Flow-Auflösung und Totvolumen bis zu 2 ml sind ebenfalls verfügbar.

Neben der Berechnung der Flußgeschwindigkeit erlaubt das System ebenfalls die Messung der mittleren Molmasse der Gase im Strömungskanal und somit eine quantitative Aussage über die Gaszusammensetzung. Zu diesem Zweck wird die absolute Schall-Laufzeitmessung mit einer präzisen Messung der Gastemperatur entlang der Schallübertragungsstrecke kombiniert (Bues et al., 1991). Die Ansprechgeschwindigkeit der Molmassemessung ist dabei einzig durch die Ansprechzeit der Temperaturmessung begrenzt, welche im beschriebenen System etwa 10 ms beträgt.

Mechanische Konstruktion des Sensors

Bei der Konstruktion des Sensors (Abb. 1) wurde auf die folgenden Punkte besonderen Wert gelegt:

- möglichst kleiner Totraum und geringer Strömungswiderstand,
- Ultraschallsender/-empfänger ist vor Kontamination geschützt,
- solide und schutzisolierte Kabelführung zur Kontrolleinheit,
- Ultraschall- und Temperatursensoren sind leicht austauschbar,
- austauschbares Innenrohr zur einfachen Reinigung,
- möglichst geringes Gewicht des Sensors.

Aus Gründen der Signalverarbeitung befindet sich im Sensor selbst eine kleine Elektronik, welche zur Vorverstär-

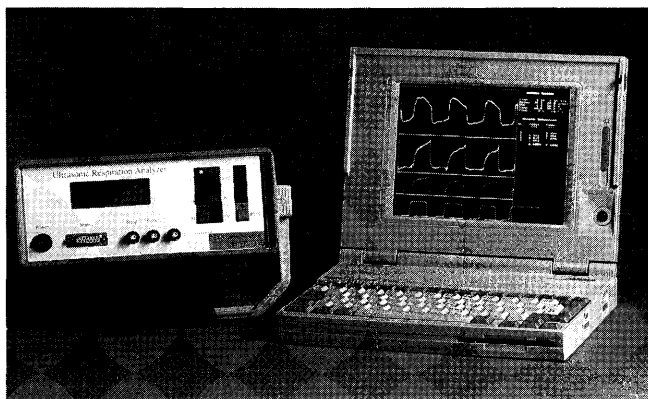


Abb. 2: Kontrolleinheit der Meßeinrichtung zusammen mit einem Notebook-PC (Compaq LITE 4/25c).

kung der Ultraschall- und Temperatursignale dient. In bestimmten Ausführungsvarianten enthält der Sensor zusätzlich noch eine integrierte Druckmessung, welche es ermöglicht, den durch Maske und Sensor hervorgerufenen Atemwiderstand zu berechnen. Unter Verwendung entsprechender Auswertsoftware kann dieser Sensor ebenso für Interpleuraldruckmessungen und somit auch für die Darstellung der Atemschleife (dynamisches Volumen-druckdiagramm) benutzt werden.

Kontrolleinheit und Datenauswertung

Der Durchflusssensor ist an eine Kontrolleinheit angeschlossen, welche die gesamte signalverarbeitende Elektronik enthält. Dies beinhaltet die Erzeugung der Ultraschall-sensordesignale sowie die Auswertung aller empfangenen Sensorsignale. Die gesamte Meßeinrichtung erlaubt 2 Einsatzarten:

1. Sensor und Kontrolleinheit können als autonomes Meßgerät verwendet werden: In diesem Fall werden die Meßgrößen (Flow, Volumenparameter, Temperatur, Molmasse usw.) auf dem integrierten Display angezeigt. Im weiteren stehen 3 Meßgrößen auch als kalibrierte analoge Ausgangssignale zur Verfügung.

2. Sensor und Kontrolleinheit können mit einem Computer verbunden werden (Abb. 2): In diesem Fall werden sämtliche Meßgrößen über eine schnelle serielle Datenverbindung in den Computer übertragen (Baudrate 115,2 kBaud). Mit Hilfe eines speziell für diesen Zweck entwickelten Programms können die Meßdaten auf dem Bildschirm dargestellt und wichtige Lungenfunktionsparameter berechnet werden. Das Programm beinhaltet sämtliche Funktionen zur detaillierten Analyse der gemessenen Daten. Unter anderem können die folgenden Größen berechnet werden: maximaler in- und expiratorischer Durchfluß V_{\max} (l/s), in- und expiratorisches Atemzugvolumen V_T (l), Atemfrequenz f (1/min), expiratorisches Atemminutenvolumen V_E (l/min), Atemzeitquotient (AZQ) usw.

Maske

Die Koppelung zwischen dem Atemsystem des Pferdes und dem Flow-Sensor erfolgt mit Hilfe einer speziell entwickelten Maske. Die aus dem durchsichtigen Kunststoff Polyethylenterephthalatglykol (PET/G) hergestellte Maske wird dem Pferd über die Nüstern gezogen. Mit Hilfe eines aufblasbaren Gummischlauches wird die Maske zum Pferd hin so abgedichtet, daß die gesamte ventilierte Luft durch die beidseitig angebrachten Öffnungen zirkuliert (Abb. 3). Mittels eines Schnellverschlusses wird der Flow-Sensor an einer der beiden Öffnungen befestigt. Zur Erzielung eines auf beiden Seiten gleich großen Atemwiderstandes wird auf der zweiten Seite ein Rohr mit demselben Durchmesser und derselben Länge angesetzt. Die Maske liegt nur auf dem Nasenbein auf. Somit werden die Nüstern auch bei hoher Atemfrequenz nicht in der Bewegungsfreiheit beeinträchtigt.

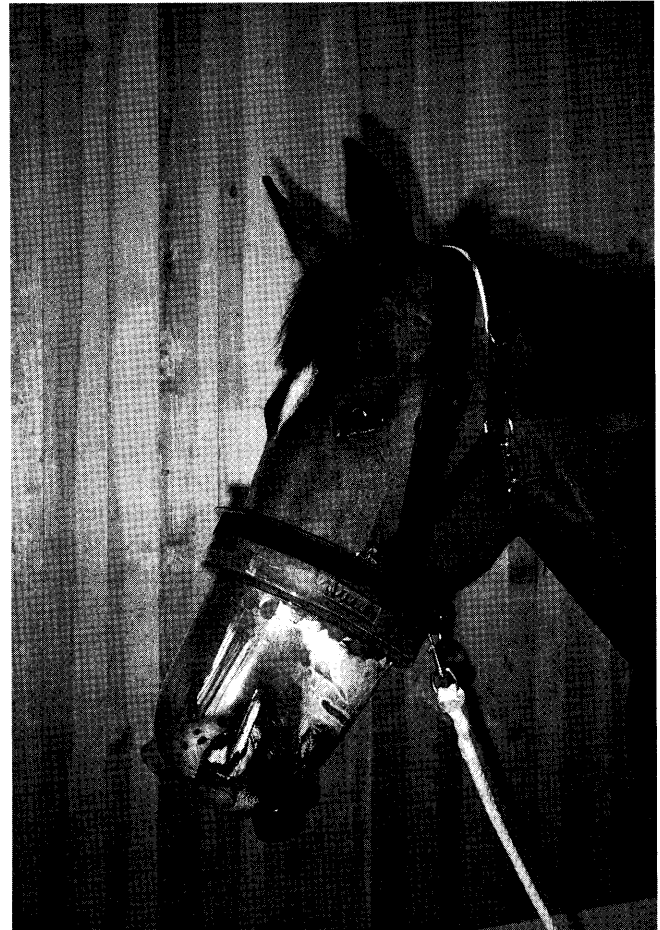


Abb. 3: Die zum System gehörende Maske an einem Pferd.

Linearitätstest

Der Durchflusssensor wurde über ein Rohr von 44 mm Durchmesser mit einer Luftpumpe (Volumen 11,94 l) verbunden. Die mittlere Flußgeschwindigkeit während der einzelnen Pumpenstöße variierte zwischen etwa 0,5 und 17 l/s, entsprechend einer Atemfrequenz von etwa 3 bis 100 Atemzügen pro Minute (Abb. 4). Bei den Versuchen mit etwa 17 l/s mittlerem Flow betrug der maximale Durchfluß etwa 40 l/s. Die Standardabweichung über alle 28 Versuche betrug 0,078 l (0,66 %). Dadurch kann gezeigt werden, daß der Sensor über weite Bereiche eine hohe Linearität aufweist.

Beispiel klinischer Anwendungen

Die Abb. 5 und 8 zeigen einige erste Anwendungen des Meßsystems an einem gesunden Pferd und einem Pferd mit Lungenemphysem. Da die Pferde vor den Lungenfunktionsmessungen aber nicht einer eingehenden klinischen Untersuchung unterzogen wurden, ist eine Interpretation der Kurven noch verfrüht. Die berechneten Ventilationsgrößen entsprechen den beschriebenen Werten in der Literatur (Scheunert/Trautmann, 1976; Hörnicke et al., 1987).

● Abb. 5 zeigt die Flow-Zeitkurve von 2 Atemzyklen eines klinisch gesunden Pferdes (Gewicht etwa 560 kg) in Atemruhelage. Das durchschnittliche expiratorische

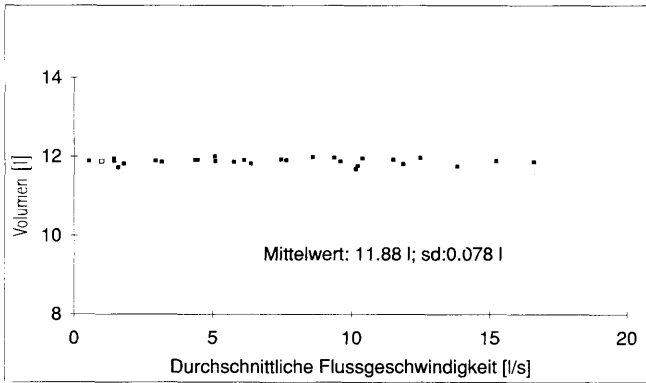


Abb. 4: Linearitätstest der Ultraschall-Flow-Messung.

Atemzugvolumen V_T betrug 6,06 l bei einer Atemfrequenz von 10 Atemzügen pro Minute (V_E 60,6 l/min).

● Abb. 6 zeigt einen einzelnen Atemzug desselben Pferdes nach Verabreichung von 10 ml Lobelin¹. Die Messung erfolgte unmittelbar nach Einsatz der verstärkten Atmung. Das expiratorische Atemzugvolumen V_T stieg auf 17,97 l bei einer Atemfrequenz von 25 Atemzügen pro Minute (V_E 449 l/min).

● Abb. 7 zeigt einen einzelnen Atemzug desselben Pferdes unter Belastung auf dem Laufband². Das Pferd wurde nach einer Aufwärmphase von 10 Minuten mit einer Trabgeschwindigkeit von 6 m/s und einer Steigung von 11 % belastet. Nach Erreichen einer konstanten Atemfrequenz wurden die folgenden Messungen erzielt: $V_T = 10,47$ l; $V_E = 1162$ l/min.

In der Abbildung wurden die einzelnen Flow-Meßwerte des Systems als Punkte hervorgehoben. Die relativ hohe Abtastrate von 200 Hz liefert selbst bei einer Atemfrequenz von >100 Atemzügen pro Minute noch genügend Meßpunkte, um eine präzise Atemzugangsanalyse zu ermöglichen.

● Abb. 8 zeigt die Flow-Kurve bei Ruheatmung eines Pferdes mit einem hochgradigen Lungenemphysem.

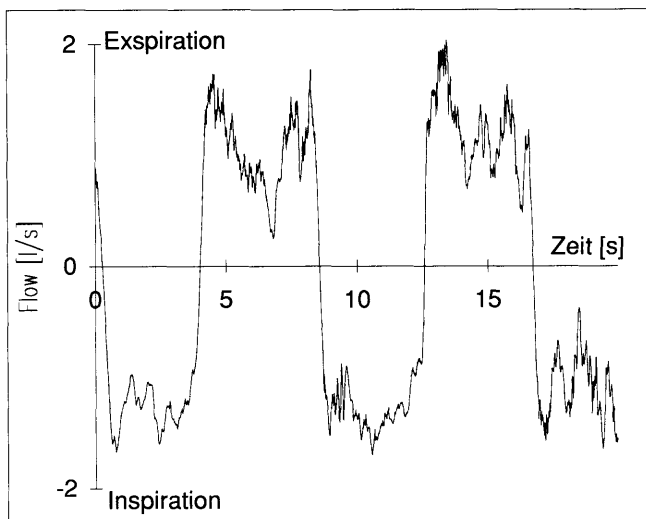


Abb. 5: Ruheatmung eines lungengesunden Pferdes (560 kg; linke Nüster).

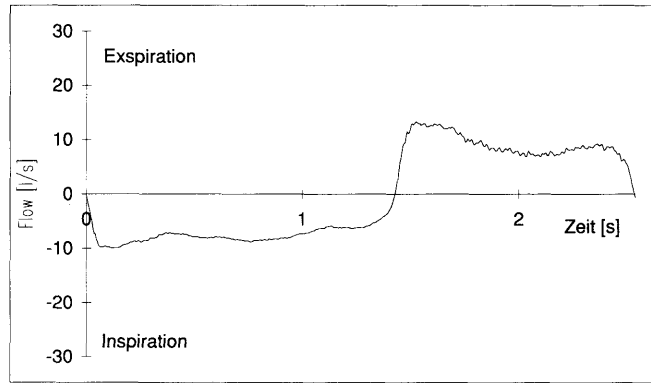


Abb. 6: Ein Atemzug der linken Nüster nach Verabreichung von 10 ml Lobelin.

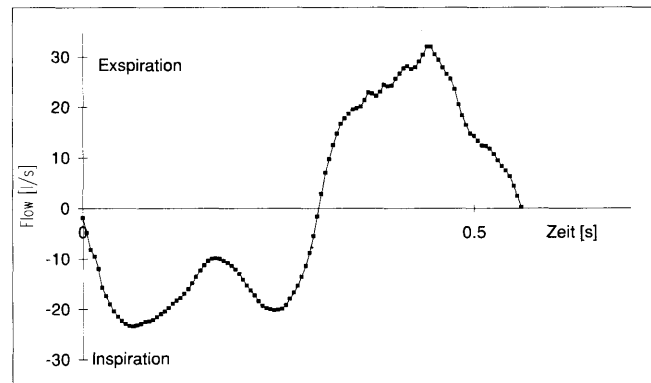


Abb. 7: Atmung der linken Nüster (Trab auf dem Laufband; 6 m/s bei 11 % Steigung).

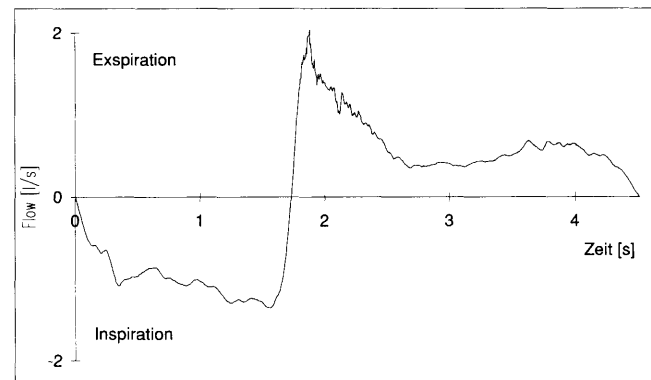


Abb. 8: Ruheatmung eines Pferdes mit chronischem Lungenemphysem (linke Nüster). Eine stark verlängerte Expirationszeit, die durch die charakteristisch verzögerte und verstärkte Abdominalatmung zustande kommt, kann klar erkannt werden.

Die Akzeptanz der Maske war bei unseren Versuchen nie ein Problem. Bei 5 gemessenen Pferden konnte keine Erhöhung der Atemfrequenz festgestellt werden. Bei 2 Pferden war die Atemfrequenz um 2 bis 5 Atemzüge pro Minute erhöht. Da die Maske den physiologischen Bedingungen des Pferdes angepaßt ist, ergibt sich kaum eine Behinderung; eine Sedierung war somit nie notwendig. Um den technischen Totraum so klein wie möglich zu halten, wird es hingegen notwendig sein, zumindest 2 verschiedene Größen von Masken herzustellen.

¹Lobelin HCL 0,5 %; Kantonsapotheke Zürich
²Mustang 2200; Kagra AG, CH-5615 Fahrwangen

Diskussion

Mit ersten Messungen konnte gezeigt werden, daß sich das beschriebene Atemanalyse-System auf Ultraschallbasis gut zur präzisen Bestimmung von Lungenfunktionsparametern bei Pferden in Ruhe und unter Belastung eignet. Das einseitige Messen bietet neben den meßtechnischen und wirtschaftlichen Vorteilen die Möglichkeit, daß einseitige Stenosen der Nasengänge erkannt werden können. Die Messungen müssen allerdings nacheinander an beiden Seiten durchgeführt werden. Weitere vergleichende Tests werden zeigen müssen, ob diese Meßanordnung korrekte Daten liefert. Ebenso müssen Normalwerte von lungengesunden, klinisch voruntersuchten Pferden aufgenommen werden. In einem weiteren Schritt sollen Patienten mit Atmungsbehinderung oder Leistungsverminderung untersucht werden.

Das beschriebene System bestimmt neben der primären Messung des Flows noch die Molmasse der strömenden Gase. Es ergaben sich somit weitere Anwendungsmöglichkeiten, welche über die Bestimmung rein volumetrischer Lungenfunktionsparameter hinausgehen. In Kombination mit der Molmassenmessung, oder mit Hilfe eines zusätzlichen Massenspektrographen, wird es möglich, die funktionelle Residualkapazität, den physiologischen Totraum, die alveoläre Ventilation sowie den respiratorischen Quotienten zu berechnen. In Kombination mit einer Druckmessung im Pleuralspalt (Spörri und Lehmann, 1964, Deegen und Klein, 1987, Attenburrow et al., 1990) können Atemschlaufen gezeichnet werden. Den Klinikern und Sportmedizinern stehen somit neue Möglichkeiten zur Verfügung, ihre Patienten oder Athleten spezifischer untersuchen zu können. Zusammenfassend kann festgestellt werden, daß der Ultraschall-Flow-Sensor eine präzise Atemmessung in Ruhe und unter Belastung erlaubt. In Kombination mit der integrierten Temperaturmessung kann ebenfalls die mittlere Molmasse der Gase bestimmt werden.

Literatur

- Attenburrow, D. P., Plack, F. C., und Portergerill, M. J. (1990): Impedance Plethysmographie, *Equine vet. J.* 22 (2), 114–117.
- Buck, W., Eickemeyer, J., und Friedrich, H. (1969): Über ein transistorisiertes Gerät zur Messung des Atemvolumens, *Elektromedizin* 14, 115–123.
- Buess, Ch., Pietsch, P., Guggenbühl, W., und Koller, E. A. (1986): Design and Construction of a Pulsed Ultrasonic Air Flowmeter. *IEEE Trans. Biomed. Eng.*, 33 (8), 768–774.
- Buess, Ch., Boutellier, U., und Koller, E. A. (1988): Pneumotachometers. J. Webster, editor, *Encyclopedia of Medical Devices and Instrumentation*, pages 2319–2324, John Wiley & Sons, Inc. Publishers.
- Buess, Ch., Burger, R., und Guggenbühl, W. (1991): Ultrasonic Respiration Analysis. In *IEEE/EMBS 13th Annual Intern. Conference*, pages 1597–1598, Orlando, USA, November 1991.
- Deegen, E., und Klein, H. J. (1987): Interpleuraldruckmessungen und Bronchospasmodietests mit einem transportablen Ösophagusdruckmeßgerät beim Pferd. *Pferdeheilkunde* 3 (Juli) 213–221.
- Drägerwerke Lübeck (1968): Das Registriervolumen, Prospekt 5722.
- Drasche, H. (1970): Telemetrie von Atemgrößen. In: Demling, Bachmann (Hrsg.), *Biotelemetrie* 164–180. Verlag Thieme, Stuttgart.
- Hörnigke, H., Weber, M., und Schweiker, W. (1987): Pulmonary Ventilation in Thoroughbred Horses at Maximum Performance. *Equine Exercise Physiology* 2, J. R. Gillespie, N. E. Robinson, ICEEP Publication, P. O. 1920, Davis, CA 95616.
- Nielan, G. J., Rehder, R. S., Ducharme, N. G., und Hackett, R. P. (1992): Measurement of Tracheal Static Pressure in Exercising Horses. *Veterinary Surgery*, 21, 6, 423–428.
- Reinhardt, H. J., Denac, M., und Spörri, H. (1972): Die Bestimmung des Atemvolumens durch Impedanzmessung beim Pferd. *Zbl. Vet. Med. a*, 19, 843–850.
- Scheunert, A., Trautmann, A. (1976): *Lehrbuch der Veterinärphysiologie*, Verlag Paul Parey.
- Spörri, H., und Lehmann, W. (1964): Zur Untersuchung der Lungenmechanik bei Großtieren, *Schw. Arch. Tierheilk.* 106, 698–714.
- Woakes, A. J., Butler, P. J., und Snow, D. H. (1987): The Measurement of Respiratory Airflow in Exercising Horses. *Equine Exercise Physiology* 2, J. R. Gillespie, N. E. Robinson, ICEEP Publications, P. O. 1920, Davis, CA 95616.
- Yeh, M. P., Gardner, R. M., Adams, T. D., und Yanowitz, F. G. (1982): Computerized Determination of Pneumotachometer Characteristics using a Calibrated Syringe. *J. Appl. Physiol.*, 53 (1), 280–285.

Appendix: Technische Daten des Meßgerätes

Meßbereich Flow (einseitig)	± 40	l/s
Meßauflösung Flow	0,005	l/s
Meßbereich Temperatur	0–50	°C
Meßauflösung Temperatur	0,1	°C
Meßbereich Druck	± 50	mbar
Meßauflösung Druck	0,05	mbar
Meßbereich Molmasse	20–48	g/mol
Meßauflösung Molmasse	0,01	g/mol
Durchmesser des Meßrohres	44	mm
Sensortotvolumen	245	ml
Meßgeschwindigkeit	100–540	Hz
Frequenzantwort Flow (± 1 dB)	0–100	Hz
Meßgenauigkeit Flow und Volumen	< 1,5	%
Meßverzögerung (alle Meßdaten)	3	Meßwerte
Ansprechzeit Flow und Volumen	1	Meßwert
Stromverbrauch (maximal)	43	W
Gewicht der Maske (komplett bestückt)	1,8	kg