

# Individuell optimierte, automatisierte Lungenöffnung und PEEP-Titration auf Basis der elektrischen Impedanztomographie

Henning Luepschen<sup>1,3</sup>, Torsten Meier<sup>2</sup>, Anake Pomprapa<sup>3</sup>, Stefanie Konowalczyk<sup>3</sup>, Christian Putensen<sup>1</sup> und Steffen Leonhardt<sup>3</sup>

<sup>1</sup>Klinik und Poliklinik für Anästhesiologie und Operative Intensivmedizin, Universität Bonn, Deutschland

<sup>2</sup>Klinik für Anästhesiologie, Universität Schleswig-Holstein, Campus Lübeck, Deutschland

<sup>3</sup>Philips Lehrstuhl für Medizinische Informationstechnik, RWTH Aachen, Deutschland

Kontakt: Henning.Luepschen@hia.rwth-aachen.de

## Einleitung

Patienten, die sich in einem akuten Lungenversagen (ARDS, *Acute Respiratory Distress Syndrome*) befinden, leiden an einem lebensbedrohlichen, akuten Sauerstoffmangel (Hypoxämie) und Kohlendioxidüberschuss (Hyperkapnie) und an einer stark verminderten Dehnbarkeit des Atemsystems (also an einer reduzierten respiratorischen *Compliance* und somit funktionellen Residualkapazität, FRC). Grund hierfür sind u.a. Entzündungsreaktionen in der Lunge, die zu einem Lungenödem und vor allem in den tieferliegenden Regionen zu Lungenkollaps (Atektasen) führen [1].

Die Standard-Behandlung besteht in einer künstlichen Beatmung mit erhöhten Sauerstoffkonzentrationen ( $\text{FiO}_2$ ) gegen einen erhöhten Ausatemgegendruck (PEEP), um das atemzugweise Öffnen und Schließen von Lungenarealen und die damit einhergehenden hohen Scherkräfte (Atektotrauma) zu vermeiden. Die individuelle Einstellung des optimalen PEEP ist derzeit ein wichtiger Forschungsschwerpunkt [2] und bietet Raum für automatisierungstechnische Ansätze, da dieser sich über der Zeit und durch Eingriffe des Bedienpersonals rasch ändern kann [3].

Die bettseitige Bewertung des notwendigen PEEP ist derzeit nur indirekt möglich, doch mehren sich die Anzeichen, dass durch den Einsatz des bildgebenden Verfahrens der elektrischen Impedanztomographie (EIT) die PEEP-Bestimmung zukünftig erheblich vereinfacht werden wird [4].

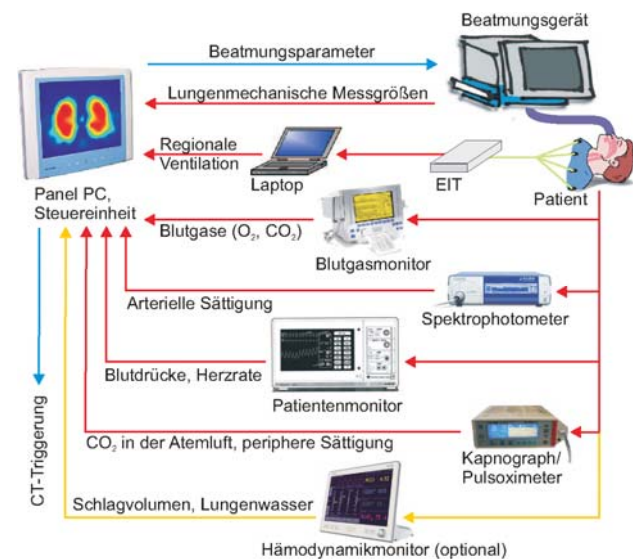
Im Rahmen dieser Arbeit wird nun erstmalig ein vollständig automatisiertes Lungenöffnungsmanöver im Tiermodell mit Hilfe eines Fuzzy-Logik basierten medizinischen Expertensystems vorgestellt, wobei zur Bewertung des Lungenzustands ausschließlich mittels EIT gewonnene Informationen verwendet werden.

## Methoden und Materialien

### Automatisierte Lungenöffnung

Das verwendete medizinische Expertensystem namens *VENTILAB* beinhaltet als Steuereinheit einen medizinisch zugelassenen Panel-PC (POC-153, Advantech Co. Ltd.), ein elektronisch regelbares Beatmungsgerät (Servo 300, Siemens-Elementa), einen kontinuierlich messenden Blutgassensor (TrendCare Satellite, Diametrics Medical Inc.) zur Referenzmessung, einen Patientenmonitor (Sirecust

1281, Siemens), einen Kapnographen (CO2SMO+, Respirationics, Inc.) und einen elektrischen Impedanztomograph-Prototypen (EIT Evaluation Kit GOE-MF2, Fa. Dräger Medical AG und Co. KGaA), welcher mittels Ethernet-Verbindung via Laptop mit der Steuereinheit verbunden ist, vgl. Abb. 1.



**Abb. 1:** Blockschaftbild des automatisierten medizinischen Expertensystems namens *VENTILAB*

Für ein automatisiertes Manöver müssen Klassifikatoren erzeugt werden, die den Öffnungszustand der Lunge bewerten. Der sog. LUNGE-AUF-Klassifikator testet die vollständige Rekrutierung aller kollabierten Lungenbereiche während eines Öffnungsmanövers nach Borges [5]. Der LUNGE-ZU-Klassifikator überprüft, ob die Lunge bei stufenweiser Reduktion des PEEP-Niveaus anfängt zu kollabieren [2]. Zur Auswahl der relevanten EIT-basierten Merkmale kamen statistische Verfahren wie bspw. die Diskriminanzanalyse zum Einsatz, mit welcher anhand einer in Vorversuchen erstellten Lernstichprobe, die wichtigsten Unterscheidungsmerkmale ermittelt werden konnte. Vor allem Verschiebungen des Ventilations-schwerpunktes  $Y_{\text{COG}}$  und  $X_{\text{COG}}$  [3] erwiesen sich als diskriminant. Die Gruppenzugehörigkeiten („Lunge ist zu“, „Lunge ist auf“) der Lernstichprobe wurden von technischen und medizinischen Experten a-priori festgelegt. Desweiteren wurde die Regelbasis der verwendeten Mamdani-Fuzzy-Klassifikatoren in Diskussion zwischen

den Expertengruppen beider Disziplinen erstellt und durch Multiplikatoren parametrierbar gemacht, welche während der Versuche zur Feinadjustierung dienen.

### Tierexperimentelle Untersuchungen

Nach Zustimmung der lokalen Tierschutzkommission in Lübeck wurden 3 dt. Hausschweine ( $34,3 \pm 4,5$  kg) mittels Lavage mit isotoner, erwärmter Kochsalzlösung in ein akutes Lungenversagen versetzt. Die EIT-Messungen erfolgten mit einer Framerate von 12,5 Hz und einer Stromeinspeisefrequenz von 50 kHz. Die Rekonstruktion der EIT-Bilder beruhte auf einem Rückprojektionsalgorithmus [3]. Zur Reduzierung der herzbedingten Störeinflüsse fand zudem ein Tiefpassfilter mit einer Grenzfrequenz von 55 Hz Anwendung. Die Elektroden wurden im unteren Brustbereich der Tiere platziert (EIT-Gürtel). Die Beatmung erfolgt druckkontrolliert mit 100% Sauerstoff und einer Atemfrequenz von  $25 \text{ min}^{-1}$ . Die Einatemphase war genauso lang wie die Ausatemphase (I:E=1:1).

### Ergebnisse

Abb. 2 zeigt ein erfolgreiches EIT-gestütztes Lungenöffnungsmanöver, bei dem zu Validierungszwecken jeweils auf stabile Sauerstoffpartialdrücke ( $\text{PaO}_2$ ) gewartet wurde. Nach der *Baseline*-Beatmung (PEEP =  $10 \text{ cmH}_2\text{O}$ ) und Reduktion des Tidalvolumens  $V_T$  auf 6-8 ml pro kg Körpergewicht, erfolgte eine stufenweise Erhöhung des Eröffnungsdrucks PIP bis  $50 \text{ cmH}_2\text{O}$  ausgehend von einem basalen PEEP von  $15 \text{ cmH}_2\text{O}$ . Nach 22 Minuten war die Lunge vollständig geöffnet, nach 30 Minuten das gesamte Manöver beendet. Die nachfolgende PEEP-

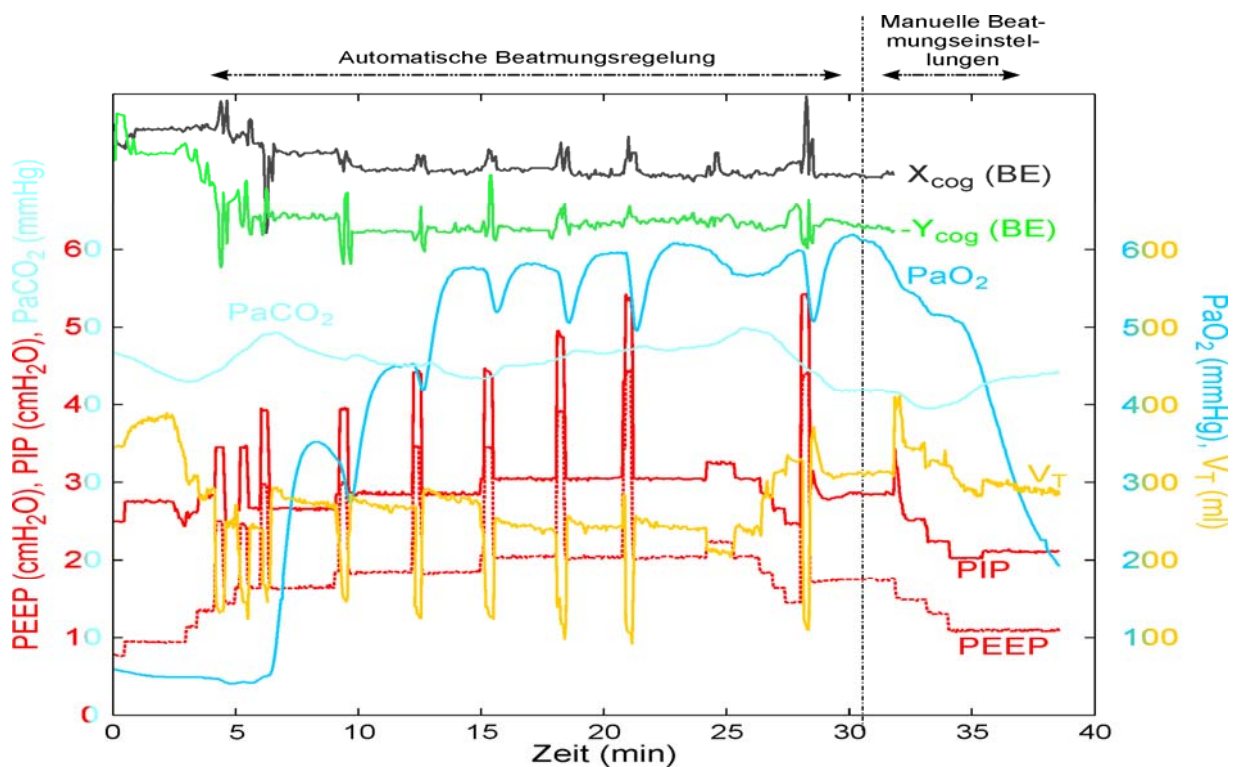
Titration ermittelte einen PEEP von  $16 \text{ cmH}_2\text{O}$  als ausreichend, um die Lunge offen zu halten. Mit einer abschließenden manuellen Titration war es möglich, die Korrektheit dieser automatischen Klassifikation nachzuweisen. In einem weiteren Versuch ohne Wartezeit auf stabile  $\text{PaO}_2$ -Werte konnte die Lunge innerhalb von nur 8 Minuten erfolgreich geöffnet werden (nicht dargestellt).

### Diskussion und Schlussfolgerungen

Erstmalig wurde im Rahmen dieser Arbeit ein EIT-Gerät mit Echtzeit-Datenauswertung in einen Beatmungsteststand integriert, mit dem es automatisiert möglich ist, Lungenöffnungsmanöver durchzuführen. In allen Versuchen arbeitete das System erfolgreich. Weiterführende Untersuchungen an Patienten, auch in Bezug auf die Robustheit des Verfahrens stehen noch aus.

### Literatur

- [1] GATTINONI, L. ; PESENTI, A.: The concept of "baby lung". In: *Intensive Care Med* 31 (2005), Nr. 6, S. 776-784
- [2] LACHMANN, B.: Open up the lung and keep it open. In: *Intensive Care Med* 18 (1992), S. 319-321
- [3] LUEPSCHEN, H. ; MEIER, T. ; LEONHARDT, S.: Optimierung der automatisierten Beatmung bei akutem Lungenversagen mit Hilfe der elektrischen Impedanztomographie. In: *at - Automatisierungstechnik* 55 (2007), Nr. 10, S. 522-530
- [4] GATTINONI, L. u.a.: Positive end-expiratory pressure. In: *Curr Opin Crit Care* 16 (2010), S. 39-44
- [5] BORGES, J. B. u.a.: Reversibility of lung collapse and hypoxemia in early acute respiratory distress syndrome. In: *Am J Respir Crit Care Med* 174 (2006), S.268-278



**Abb. 2:** Erfolgreiches automatisiertes Lungenöffnungsmanöver. Tidalvolumen  $V_T$ , Sauerstoffpartialdruck  $\text{PaO}_2$ , Kohlendioxidpartialdruck  $\text{PaCO}_2$ , oberer und unterer Beatmungsdruck (PIP und PEEP), Schwerpunkt-Indizes  $Y_{\text{COG}}$  und  $X_{\text{COG}}$ .