

**6. Workshop
Automatisierungstechnische
Verfahren für die Medizin vom
24.-25. März 2006 in Rostock-
Warnemünde**



**„Fuzzy-geregelte, protektive Beatmung bei akutem
Lungenversagen durch Identifikation von Öffnungs- und
Schließdrücken der Lunge“**

Henning Lüpschen, Steffen Leonhardt
Lehrstuhl für Medizinische Informationstechnik, Helmholtz-Institut, RWTH Aachen, Aachen,
Deutschland
E-Mail: luepschen@hia.rwth-aachen.de

Torsten Meier, Martin Großherr
Klinik für Anästhesiologie, Universitätsklinikum Schleswig-Holstein, Campus Lübeck,
Lübeck, Deutschland

Thorsten Leibecke
Klinik für Radiologie, Universitätsklinikum Schleswig-Holstein, Campus Lübeck, Lübeck,
Deutschland

Band: Abstracts der Vorträge des 6. Workshops der Automed 2006
Editors: T. Ellerbrock
ISBN: 3-86009-296-0
Pages: 22-23

Fuzzy-geregelte, protektive Beatmung bei akutem Lungenversagen durch Identifikation von Öffnungs- und Schließdrücken der Lunge

Henning Lüpschen^a, Torsten Meier^b, Martin Großherr^b, Thorsten Leibecke^c, Steffen Leonhardt^a

^a Lehrstuhl für Medizinische Informationstechnik
Helmholtz-Institut
RWTH Aachen
Pauwelsstr. 20
D-52074 Aachen

^b Klinik für Anästhesiologie
Universitätsklinikum Schleswig-Holstein
Campus Lübeck
Ratzeburger Allee 160
23538 Lübeck

^c Klinik für Radiologie
Universitätsklinikum Schleswig-Holstein
Campus Lübeck
Ratzeburger Allee 160
23538 Lübeck

luepschen@hia.rwth-aachen.de

EINLEITUNG

Beim akuten Lungenversagen („Acute Respiratory Distress Syndrome“, ARDS) handelt es sich um eine akute pulmonale Entzündungsreaktion mit konsekutiver Permeabilitätsstörung der Alveolen. Dies führt zu einer steifen, schwammartigen Lunge sowie interstitiellem und alveolärem Lungenödem, was sich durch eine Oxygenierungsstörung (arterielle Hypoxämie) bemerkbar macht. Die künstliche Beatmung mit erhöhtem Sauerstoffgehalt (F_{iO_2}) und angemessenem PEEP („Positive End-Expiratory Pressure“) wird zwingend erforderlich.

Das mechanische Verhalten der Lunge ändert sich im Krankheitsverlauf dramatisch: die abhängigen Bereiche der Lunge kollabieren (Atelektasen) aufgrund von Surfactantmangel („Surface Active Agents“: Lipidschicht, welche die Oberflächenspannung in den Lungenbläschen reduziert), so dass eine durch Hysterese gekennzeichnete Druck-Volumen-Kurve entsteht. Dieses Hystereseverhalten wird häufig mittels manueller Lungenöffnungsmanöver („Recruitment Maneuver“, RM) ausgenutzt, um die kollabierten Bereiche der Lunge wieder zu eröffnen, das Lungenödem und die auftretenden Scherkräfte zu verringern und eine hinreichende Sauerstoffversorgung des Patienten zu gewährleisten.

Die RM müssen individuell auf den jeweiligen Patienten abgestimmt und unter Umständen mehrmals am Tag bei kontinuierlicher Überwachung der Herz-Kreislauf-Funktionen durchgeführt werden. Dies spricht für den Einsatz neuartiger Sensorik wie beispielsweise der thorakalen elektrischen Impedanztomographie (EIT, [Holder2005]) und zudem für die Automatisierung solcher Öffnungsmanöver, welche im Rahmen dieser Arbeit mit Hilfe eines Fuzzy-Regler basierten medizinischen Expertensystems durchgeführt wurde.

MATERIALIEN UND METHODEN

Das Expertensystem besteht aus einem medizinisch zugelassenen Panel PC (POC-153, Advantech Co., Ltd.), einem elektronisch steuerbaren Beatmungsgerät (Servo 300, Fa. Siemens-Eléma), einem dynamischen Blutgasmonitor mit Paratrend 7+ Sensor (TrendCare

Satellite, Diametrics Medical Inc.), einem Patientenmonitor (Sirecust 1281, Fa. Siemens) und einem Kapnographen (CO_2SMO+ , Respironics Inc.), siehe Abbildung 1. Ergänzt wird das System durch einen EIT-Prototypen (EIT Evaluation Kit, Fa. Dräger Medical Deutschland GmbH, GoEMF II System, Universität Göttingen), der die Impedanzverteilung in einem von einer Elektrodenebene aufgespannten Körperquerschnitt und darauf basierend auch die regionale Verteilung von Ventilation in der Lunge bewertet.

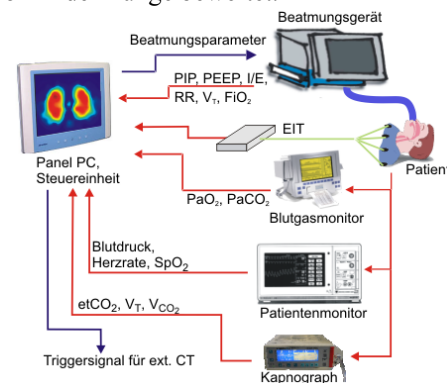


Abb. 1: Medizinisches Expertensystem „VentiLab“, welches automatische Öffnungsmanöver auf Basis einer Sensorfusion durchführt.

Dafür werden N Elektroden (hier: $N=16$) äquidistant um den Thorax angebracht, Wechselströme eingespeist und die resultierenden Spannungen gemessen. Durch iterative Approximation der Lösung des mathematisch schlecht-konditionierten nichtlinearen Randwertproblems kann die räumliche Verteilung der Leitfähigkeit im Körperinneren näherungsweise rekonstruiert werden. Die räumliche Auflösung liegt allerdings nur bei etwa 5-10% des Körperdurchmessers. Durch vereinfachende Linearisierung des Problems können allerdings hohe zeitliche Wiederholraten für die Rekonstruktion von bis zu 13 Bildern/Sekunde erzielt werden, so dass dynamische funktionale Lungeneigenschaften beobachtbar sind. Ihr Nutzen bei der Durchführung und Kontrolle der Lungenöffnungsmanöver wurde im Rahmen dieser Arbeit untersucht.

Ein solches spezielles Öffnungsmanöver ist das vierphasige „Open-Lung-Konzept“ [Lachmann1992], welches sich durch eine Identifikation der interindividuell verschiedenen Öffnungs- und Schließdrücke der Lunge auszeichnet. Ziel ist die optimale Sauerstoffversorgung des Patienten bei minimal möglichen Beatmungsdrücken, um das Herz-Kreislaufsystem nicht über Gebühr zu belasten. Die Automatisierung des Konzepts erfolgte durch ein als Zustandsmaschine aufgebautes Mamdani-Fuzzy-System, welches die einzelnen Phasen der Lungenöffnung übernimmt. Die sechs zustandsabhängigen Max-Min-Regler besitzen eine Regelbasis, die von etwa 50 „Wenn-dann“-Regeln erfahrener Mediziner abgeleitet ist. Als Regelgrößen dienen bei der hier vorgestellten Version der invasiv gemessene Sauerstoffpartialdruck (PaO_2) und dessen zeitliche Ableitung ($\Delta\text{PaO}_2/\Delta t$).

Die automatisierte RM-Regelung wurde in drei lavage-induzierten ARDS-Schweinemodellen im tierexperimentellen Versuch getestet und CT-Referenzbilder zeitlich parallel getriggert aufgenommen. Das EIT-System wurde zum einen bezüglich der funktionalen Visualisierung der RM und zum anderen bezüglich seines Potentials, zukünftig die invasive PaO_2 -Messung zu ersetzen, untersucht.

ERGEBNISSE

Das automatische Eröffnen der Lunge verlief in allen Fällen erfolgreich, die PaO_2 -Werte erreichten lungengesunde Werte und der anfänglich erhöhte Kohlendioxidpartialdruck PaCO_2 konnte erheblich reduziert werden. Die Tidalvolumina V_T verdoppelten sich bei druckkontrollierter Beatmung und konstantem $\Delta P = \text{PIP} - \text{PEEP} = 8 \text{ cmH}_2\text{O}$ (PIP steht für „Peak Inspiratory Pressure“), siehe Abbildung 2. Dies ist ein Zeichen für die Reduzierung der Atelektasen und des Lungenödems, da sich die Lungencompliance $C_{rs} = V_T/\Delta P$ erhöht.

Dies ist auch deutlich auf den zugehörigen CT-Bildern in Abbildung 3 zu erkennen. Auf den funktionalen EIT-Bildern, welche die Verteilung von Ventilation darstellen, ist eine Verschiebung von den bauchnahen zu den rücken nahen Regionen zu bemerken. In der globalen Impedanzkurve GI, die Pixelsumme über die fest skalierten differentiellen EIT-Bilder, sind die vier Phasen der Lungenöffnung gut zu erkennen. Die Tidalvariation korreliert linear mit dem Tidalvolumen V_T .

SCHLUSSFOLGERUNGEN

Die Automatisierung der Lungenöffnungsmanöver auf Basis von online PaO_2 -Messungen konnte erfolgreich umgesetzt werden. Die EIT-Bilder zeigen eine gute örtlich-funktionale Korrelation mit den CT-Bildern und liefern Hinweise über die individuellen Öffnungs- und Schließdrücke. Es empfiehlt sich die zukünftige Einbindung der EIT in den Regelkreis.

DANKSAGUNG

Wir danken Herrn E. Teschner von der Fa. Dräger Medical Deutschland GmbH für seine Unterstützung bei der Durchführung der Versuche.

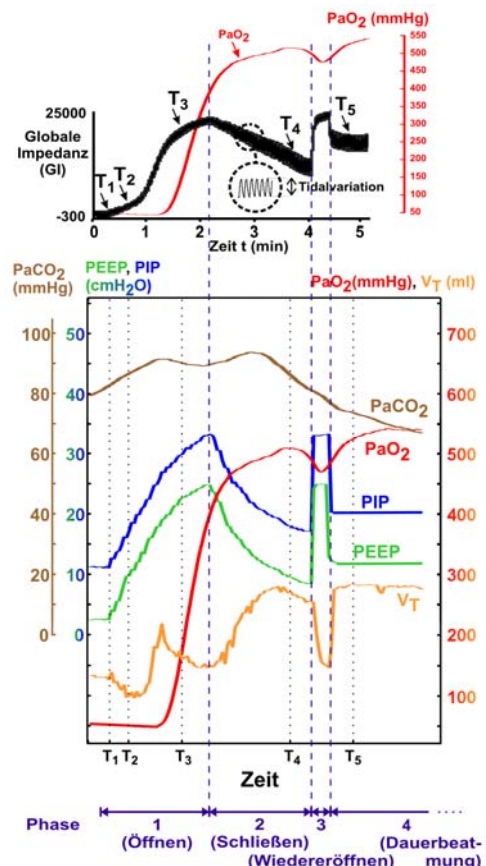


Abb. 2: Unten: Am Schwein gemessene Parameter der vier Phasen der automatisierten Lungenöffnung. Oben: Zugehörige Globale Impedanz-Kurve basierend auf den fest skalierten EIT-Daten (siehe auch Abb. 3).

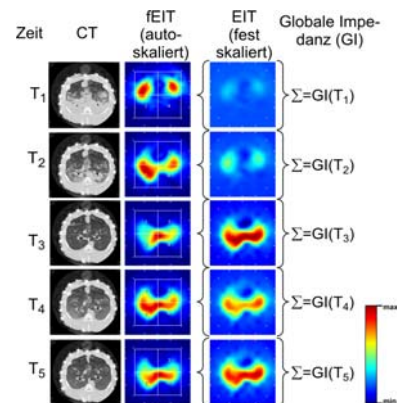


Abb. 3: CT-Scans, autoskalierte funktionale und fest skalierte differenzielle EIT-Bilder zu den Zeiten T_1 - T_5 .

LITERATURHINWEISE

[Holder2005]

D. S. Holder, editor; C. G. Orton, J. H. Nagel, J. G. Webster, series editors: in *Electrical Impedance Tomography – Methods, History and Applications*, Institute of Physics Publishing, Bristol and Philadelphia 2005

[Lachmann1992]

B. Lachmann, „Open the lung and keep the lung open“, *Intensive Care Med*, Vol 18, p 319-322, 1992