

**2. Workshop  
Automatisierungstechnische  
Verfahren für die Medizin vom  
25. bis 26. Feb. 1999 in  
Darmstadt**



**„Regelung des CO<sub>2</sub>-Partialdrucks während der künstlichen  
Beatmung“**

S. Leonhardt, E. Seoane, A. Kron  
Institut für Automatisierungstechnik, TU Darmstadt, Darmstadt, Deutschland  
E-Mail:sleonhardt@iat.tu-darmstadt.de

S. Böhm  
Abteilung für Anästhesie, Erasmus Universität Rotterdam, Rotterdam, Niederlande

S. Scholz  
Anästhesiologische Klinik, Universität Gießen, Gießen, Deutschland

ISBN: 318318317x  
Pages: 30-31

# Regelung des CO<sub>2</sub>-Partialdrucks während der künstlichen Beatmung

S. Leonhardt<sup>1</sup>, S. Böhm<sup>2</sup>, E. Seoane<sup>1</sup>, A. Kron<sup>1</sup> und S. Scholz<sup>3</sup>

<sup>1</sup> Institut für Automatisierungstechnik, TU Darmstadt,

<sup>2</sup> Abt. für exp. Anästhesiologie, U Rotterdam,

<sup>3</sup> Anästhesiologische Klinik, U Gießen

email : sleonhardt@iat.tu-darmstadt.de

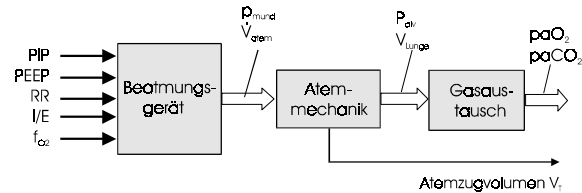
## Einleitung

Während der künstlichen Beatmung wird die natürliche Regelung des arteriellen CO<sub>2</sub>-Partialdrucks (paCO<sub>2</sub>) durch die Sedierung außer Funktion gesetzt. Bei den meisten beatmeten Patienten reicht es in der Regel aus, den paCO<sub>2</sub> im Rahmen einer arteriellen Blutgasanalyse gelegentlich zu überprüfen. Unter bestimmten Umständen jedoch kann der paCO<sub>2</sub> weit außerhalb des Normbereichs von 35 ... 40 mm Hg liegen.

Einer dieser Zustände ist das akute Lungenversagen (*adult respiratory distress syndrome*, ARDS). Diese Erkrankung ist u.a. durch eine Störung des *surfactant*-Systems der Lunge gekennzeichnet, die zu einer erniedrigten Dehnbarkeit und zu einer reduzierten Gasaustauschfläche der Lunge führt ([1]). Dabei ist der Sauerstoffpartialdruck (paO<sub>2</sub>) im Blut erniedrigt und gleichzeitig der paCO<sub>2</sub> erhöht. Eine mögliche Therapie besteht in einer druckgestützten Kompensation des *surfactant*-Mangels ([2,3]). Aufgrund der temporär hohen Tidalvolumen kann es nun allerdings zu einer größeren Auswaschung von CO<sub>2</sub> kommen. Im Rahmen dieser Arbeit wurde ein neuartiges computergestütztes Fuzzy-Verfahren entwickelt, um derartige Störungen des CO<sub>2</sub>-Haushaltes durch automatische Veränderung der Beatmungsparameter auszuregulieren. Der Einsatz von Fuzzy Logik und Regelungstechnik in der Beatmung ist nicht prinzipiell neu. Erste, sehr einfache Ansätze zur Fuzzy-Regelung der Ventilation sind in [4] beschrieben, allerdings wurde der Gasaustausch nicht betrachtet. Chapman et al. ([5]) beschreiben einen nichinvasiven PID-Regler zur Regelung der endtidalen CO<sub>2</sub>-Konzentration im Atemgas.

## Fuzzy-Regelkonzept

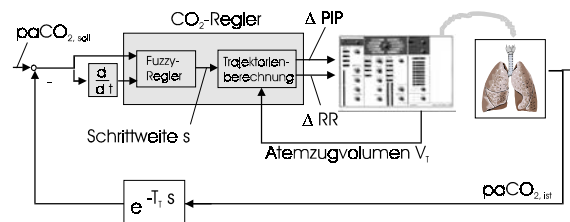
Ein Beatmungsgerät besitzt im Wesentlichen fünf Stellgrößen, den Beatmungsspitzenwert PIP, den endexpiratorischen Druck PEEP, die Atemfrequenz RR, das Inspirations- zu Expirationsverhältnis I/E und die Sauerstoffkonzentration f<sub>O<sub>2</sub></sub>, vgl. Bild 1. Bei dem im Rahmen dieser Experimente eingesetzten Beatmungsgerät konnten PIP und RR über eine analoge Schnittstelle elektronisch gesteuert werden. Obwohl grundsätzlich möglich, wurden PEEP und I/E innerhalb dieser Studie nicht verändert.



**Bild 1:** Aktor und Regelstrecke als Blockschaltbild

Generell gilt, daß eine Erhöhung der Atemfrequenz zu einem verstärkten Auswaschen von CO<sub>2</sub> und zu einem sinkenden paCO<sub>2</sub> führt. Durch eine Vergrößerung des Atemzugvolumens (auch "Tidalvolumen" genannt) wird ebenfalls mehr CO<sub>2</sub> pro Atemzug ausgewaschen und der paCO<sub>2</sub> gesenkt. Hierbei hängt das Tidalvolumen V<sub>T</sub> direkt von der Druckdifferenz PIP-PEEP ab.

Um Lungenschäden durch Überdehnung zu vermeiden, sollte bei einer paCO<sub>2</sub>-Regelung das Atemzugvolumen V<sub>T</sub> in tolerablen Bereichen gehalten werden. Daher wurde ein "hybrides" Regler-Konzept entwickelt. Über einen Satz von Fuzzy-Regeln wird zunächst die "Schrittweite" *s* berechnet, vgl. Bild 2.

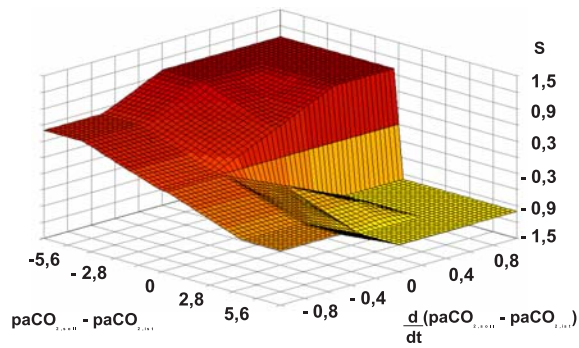


**Bild 2:** Mehrgrößen-Konzept zur Fuzzy-Regelung von paCO<sub>2</sub> und V<sub>T</sub>. Der Servo 300 fungiert als Aktor.

Diese Schrittweite bestimmt letztlich den aktuellen Aktionsradius im Raum der Stellsignale und es gilt

$$s = \sqrt{\Delta PIP^2 + \Delta RR^2} \leq 1 \quad (1)$$

Zur Illustration ist in Bild 3 das sich aus den Fuzzy-Regeln ergebende Kennfeld für *s* als Funktion von paCO<sub>2,soll</sub> - paCO<sub>2,ist</sub> und ihrer Ableitung dargestellt. Die Bestimmung von Δ PIP und Δ RR wird anschließend über eine Polynom-basierte Trajektorienberechnung durchgeführt, in die das aktuelle Tidalvolumen V<sub>T</sub> und z.B. der Gesundheitszustand des Patienten über weitere Fuzzy-Kennlinien einbezogen werden.

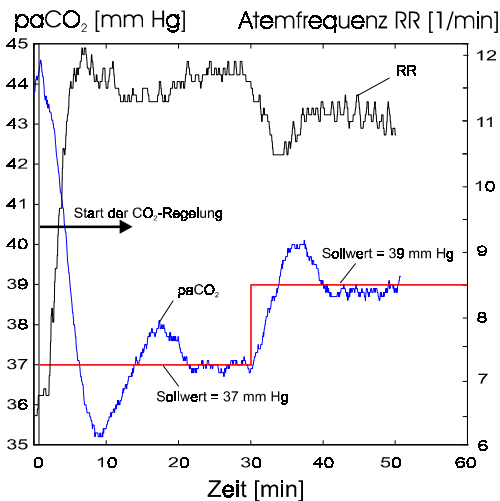


**Bild 3** : Fuzzy-Kennfeld für die Bestimmung der Schrittweite  $s$

Als Sensor fungiert ein arterieller Blutgaskatheter (Paratrend 7+, Fa. Diametrix), mit dem sowohl der  $\text{paCO}_2$  als auch  $\text{paO}_2$  und pH gemessen werden können. Ein Nachteil dieses Meßgerätes ist die inhärente Totzeit  $T_T$  von ca. 90 s, vgl. Bild 2. Um Grenzyklen zu vermeiden, wurden Stelleingriffe nur alle 2 min durchgeführt. Die Meßwerterfassung erfolgte allerdings mit einer Abtastzeit  $T_0 = 3$  s.

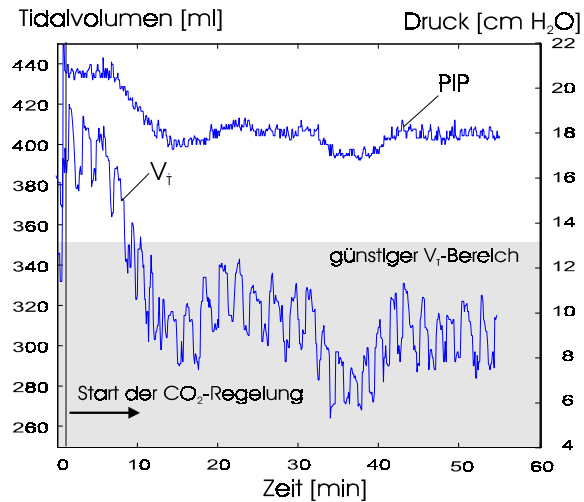
### Ergebnisse

In Bild 4 und 5 sind die Ergebnisse einer  $\text{CO}_2$ -Regelung bei einem Versuchstier gezeigt (Schwein, 25 kg). Bei  $t = 1$  min wurde die  $\text{CO}_2$ -Regelung aktiviert, bei  $t = 30$  min erfolgt ein Sollwert-Sprung von  $\text{paCO}_{2,\text{soll}} = 37$  mm Hg auf  $\text{paCO}_{2,\text{soll}} = 39$  mm Hg.



**Bild 4** : Fuzzy-Regelung des  $\text{paCO}_2$  im Tierversuch (gesundes Schwein, 25 kg). PEEP = 8 mm Hg, I/E = 50 %

Man erkennt, daß der Regler auf die anfänglich hohe und zunehmende  $\text{paCO}_2$ -Abweichung vom Sollwert durch eine rasche Erhöhung von RR und von PIP (und damit auch von  $V_T$ ) reagiert. Nachdem der  $\text{paCO}_2$  zu fallen beginnt, wird der PIP abgesenkt, um  $V_T$  in den "günstigen Bereich" (10 ... 14 ml/kg) zu bringen und die Lunge mechanisch zu schonen.



**Bild 5** : Fuzzy-Regelung von  $V_T$  bei Versuchstier.

Die anschließende Ausregelung des Sollwertsprungs bei  $t = 30$  min erfolgt überwiegend durch Senken der Atemfrequenz. Der PIP wird vom Regler kaum verändert. Dadurch verläßt  $V_T$  den "günstigen" Bereich nicht mehr.

### Zusammenfassung und Ausblick

Es wurde ein computergestütztes Fuzzy-System zur invasiven Regelung des  $\text{CO}_2$ -Partialdrucks im Blut vorgestellt. Die tierexperimentellen Studien belegen die Funktionsfähigkeit des Konzeptes. Entsprechende klinische Studien sind derzeit im Gange.

### Literatur

- [1] Krafft, P., Fridrich, P., Pernerstorfer, T., Fitzgerald, R.D., Koc, D., Schneider, B., Hammerle, A.F. und Steltzer, H., "The Acute Respiratory Distress Syndrome: Definitions, Severity and Clinical Outcome", *Intensive Care Medicine*, Vol. 22 (1996), pp. 519-529.
- [2] Lachmann, B., "Open the lung and keep the lung open", *Intensive Care Medicine*, Vol. 18 (1992), pp. 319-322
- [3] Leonhardt, S., Böhm, S. und Lachmann, B., "Optimierung der Beatmung beim akuten Lungenversagen durch Identifikation physiologischer Kenngrößen", *Automatisierungstechnik (at)*, Vol. 46 (1998), No. 11, pp. 532-539.
- [4] Vasil'eva, O.I., Ionov, I.P., Kantor, P.S. und Ul'yanov, S.V., "Dual Control of the Artificial Ventilation with use of a Fuzzy Controller in the Feedback Circuit", *Biomedical Engineering*, Vol. 23 (1989), pp. 7 - 17.
- [5] Chapman, F.W., Newell, J.C. and Roy, R.J., "A Feedback Controller for Ventilator Therapy", *Annals of Biomedical Engineering*, Vol. 13 (1985), pp. 359-372.