

Eingebettete Rezirkulationsmessung für eine ECLA-Therapie

Jan Kühn¹, Lorenz Vaitl¹, André Stollenwerk¹, Christian Brendle², Marian Walter², Steffen Leonhardt², Stefan Kowalewski¹, Rolf Rossaint³, Rüdger Kopp⁴ und Thorsten Janisch⁴

¹RWTH Aachen, Informatik 11 - Embedded Software, Aachen, Deutschland

²RWTH Aachen, Philips Lehrstuhl für Medizinische Informationstechnik, Aachen, Deutschland

³RWTH Aachen Universitätsklinikum, Klinik für Anästhesiologie, Aachen, Deutschland

⁴RWTH Aachen Universitätsklinikum, Klinik für Operative Intensivmedizin und Intermediate Care, Aachen, Deutschland

Kontakt: kuehn@embedded.rwth-aachen.de

Einleitung

Im Rahmen unserer Forschung wird die extrakorporale Lungenunterstützung (ECLA - extracorporeal lung assist) vor dem Hintergrund der Automatisierung untersucht. Diese Therapie dient der Unterstützung von Patienten mit akutem Lungenversagen (ARDS – acute respiratory distress syndrome) durch künstliche Beatmung und einen extrakorporalen Blutkreislauf.

Im untersuchten Szenario wird dem Patienten über eine Vene Blut entnommen und über eine näher am Herzen gelegene Vene zurückgegeben. Den Blutfluss erzeugt eine Diagonalblutpumpe, die das Blut durch einen Membranoxygenator befördert, in dem ein Gasaustausch ähnlich der Lunge realisiert wird.

Dabei hängt die Effizienz des Verfahrens u.a. von der Positionierung der Kanülen ab [1]. Ein gewisser Anteil des extrakorporal oxygenierten Blutes rezirkuliert über die körperinterne venöse Shuntstrecke, ohne den Patientenkreislauf auf dem gewünschten Weg zu passieren, da es gegen die natürliche Flußrichtung direkt wieder von der Entnahmekanüle angesaugt wird (Abb. 1).

Diese Arbeit stellt ein eingebettetes System zur Messung

stellte automatische Messung reagiert auf die Injektion und berechnet die Rezirkulationsrate. Basierend auf der Messung kann eine Neupositionierung der Kanülen vorgenommen werden. Die so erreichte Steigerung der Effizienz des Gasaustausches kann den Patienten entlasten.

Stand der Technik

Die Messung von körperinternen Flüssen wie das Herzminutenvolumen durch Indikatorverdünnung (Ficksches Prinzip) sind seit mehr als hundert Jahren bekannt.

Dementsprechend nutzen auch Verfahren zur Bestimmung der Rezirkulation Marker, die bei der Rückgabekanüle injiziert werden und sich auf den Rezirkulationspfad und den normalen Patientenkreislauf aufteilen. Ein gängiges Verfahren ist die Thermodilution, die auch in Patientenmonitoren zur Bestimmung des Herzzeitvolumens verwendet wird [2]. Dabei wird ein kalter Kochsalzlösungsbolus injiziert und seine Verdünnung betrachtet. Im Gegensatz dazu wurden auch Dilutionsmessungen auf Basis von Ultraschallsensoren [3] oder optischen Sensoren erforscht [4]. Ein Ansatz, der nicht auf Dilution per Markerinjektion basiert, ist die Messung der Sauerstoffsättigung zur Berechnung der Rezirkulation [5].

Methoden und Materialien

Für das hier vorgestellte System wurde die Thermodilution verwendet, welche im medizinischen Alltag etabliert ist. Die verwendete Sensorik ist für die Platzierung in Patientenblut geeignet und erhöht die Kontaktfläche zum heparinisierten Blut in Bezug auf Blutschädigung und Gerinselformung nur unerheblich. Demgegenüber sind die anderen beim Stand der Technik genannten Verfahren nicht invasiv in Bezug auf die Sensortechnologie.

Zur in-vitro Kalibrierung des Verfahrens wurde ein Mock-Loop entwickelt, der den Patienten und die Rezirkulationsstrecke durch eine Kreislaufstrecke mit Reservoir und durch eine Shuntstrecke annähert. Bei den verwendeten Temperatursensoren handelt es sich um einen Injektatssensor und einen Pulmonar-Arteriellen-Katheter zur Herzzeitvolumenmessung (HZV) mit einem PICO₂ Patientenmonitor (PULSION Medical Systems SE, München, Deutschland). Beide basieren auf temperaturabhängigen Widerständen, die über eine Messschaltung an ein Mikrocontrollerboard angebunden sind. Der Testaufbau entspricht in den wesentlichen Komponenten dem

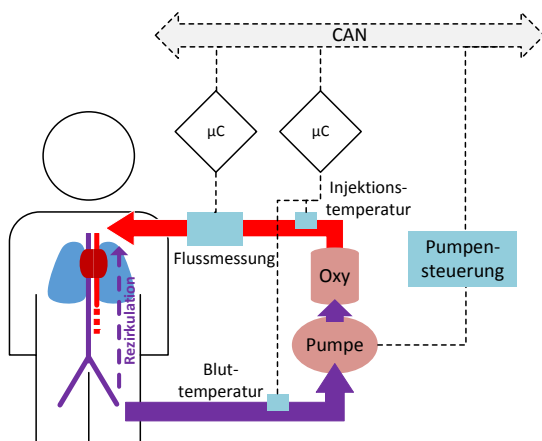


Abb. 1: Extrakorporaler Kreislauf mit venöser Entnahme im Beinbereich und venöser Rückgabe in Herznähe.

der Rezirkulation vor, welche dazu benutzt werden kann, die Positionierung der Kanülen zu verbessern. Die vorge-

extrakorporalen Kreislauf. Er enthält einen Oxygenator (Hilite 7000, Medos Medizintechnik AG, Heilbronn, Deutschland), eine Diagonalblutpumpe (Deltastream DP2, Medos) und einen Ultraschall-Flusssensor (HT110, Transonic Systems Inc., Ithaca, USA). Hierbei wurden zusätzliche Sensoren zur Flussmessung (B.I.O-TECH e.K., Vilshofen, Deutschland) in den Kreislauf eingebracht, die eine direkt Bestimmung des Flusses durch die Shuntstrecke erlauben und somit für den Testaufbau einen Goldstandard liefern. Das Verfahren ist bis auf die Injektion vollständig automatisiert und reagiert auf die Injektion des Bolus. Der Abfall der Injektionstemperatur wird detektiert und danach ein negativer Ausschlag am anderen Sensor erwartet. Die Rezirkulation wird gemäß Gleichung (1) bestimmt, die im Gegensatz zu [2] den zeitlichen Verlauf extrakorporalen Flusses miteinbezieht.

$$R = K \cdot \frac{\int_{t_{inj}}^{t_{rez}} Q_{ex} \Delta T(t) dt}{V_{inj} \cdot (T_B - T_{inj})} \quad (1)$$

Dabei bezeichnet Q_{ex} den extrakorporalen Blutfluss, $\Delta T(t)$ die Differenz zur vorhergegangenen Bluttemperatur T_B durch die kalte Kochsalzlösung, V_{inj} das Volumen des injizierten Bolus und T_{inj} dessen Temperatur.

Als Flüssigkeit wurde Wasser verwendet, das in Bezug auf die Wärmekapazität von Blut als eine ausreichend genaue Näherung angenommen wird, aber ein anderes fluiddynamisches Verhalten aufweist. Wie aus der HZV bekannt wird ein exponentieller Verlauf angenommen, der durch verschiedene Einflüsse gestört wird [6]. Demzufolge wurde für die detektierte Temperatur ein exponentieller Fit verwendet, um Störungen des Temperaturverlaufes auszugleichen.

Ergebnisse

Die Rezirkulation wird im Folgenden in Prozent vom extrakorporalen Fluss angegeben. Es wurden extrakorporale Flüsse von 1,5 L/min bis 6 L/min, Boli zw. 10 ml und 20 ml mit Temperaturen zwischen 1°C und 10°C sowie Rezirkulationsraten zwischen 0 % und 80 % betrachtet. In Abb. 2 wurde die Differenz zwischen dem direkt gemessenen Verhältnis des Flusses über die Shuntstrecke und dem Gesamtfluss und dessen Bestimmung über das Dilutionsverfahren dargestellt. Verglichen wurden die Ergebnisse der Temperaturrohdaten und der Korrektur mittels exponentiellem Fit für verschiedene Rezirkulationsraten. Die Abweichung des Verfahrens im in-vitro Mock-Loop ist für Rezirkulationsraten zwischen 10 % und 30 % und Boli von 20 ml im Mittel zuverlässig kleiner als 1 % mit einer hier detektierten maximalen Abweichung von 6 %. Bei größeren Rezirkulationsraten und kleineren Boli sind die Abweichungen im Mittel im Bereich einiger Prozente. Die Messungen zeigen auch, dass das Simulationssetup relativ großen Störeinflüssen unterliegt, wie sie in klinischen Anwendungen nicht vorkommen sollten. Prinzipiell kann das Verfahren auch für den pulsatile Pumpenbetrieb verwendet werden, wozu

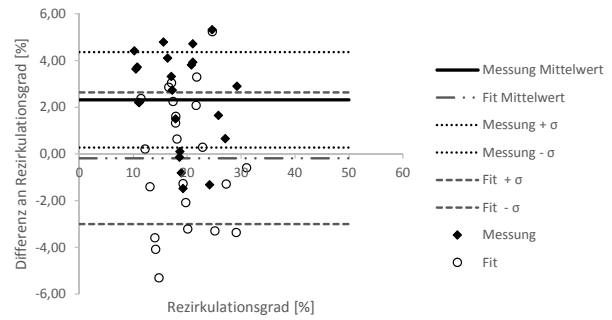


Abb. 2: Bland-Altman-Plot mit Vergleich der Berechnung über die rohen Messdaten und über die gefittete Funktion.

aber noch keine ausreichende Menge an Daten erfasst wurden. Zur weiteren Evaluation des Verfahrens ist der Einsatz in in-vivo ECLA-Versuchen mit Schweinen geplant.

Schlussfolgerungen

Das System erlaubt die automatische Messung der Rezirkulation nach Injektion eines kalten Markers. Für ein präzises Ergebnis müssen mehrere Messungen gemittelt werden, wie bei der etablierten HZV üblich. In-vivo ermöglicht das System eine relative Messung zur Optimierung der Kanülenposition.

Literatur

- [1] ABRAMS, Darryl ; BACCHETTA, Matthew ; BRODIE, Daniel: Recirculation in venovenous extracorporeal membrane oxygenation. In: *ASAIO Journal* 61 (2015), Nr. 2, S. 115–121
- [2] SREENAN, Con ; OSIOVICH, Horacio ; CHEUNG, Po-Yin ; LEMKE, Robert P.: Quantification of recirculation by thermodilution during venovenous extracorporeal membrane oxygenation. In: *Journal of Pediatric Surgery* 35 (2000), Nr. 10, S. 1411–1414
- [3] DARLING, Edward M. ; CROWELL, Tracy ; SEARLES, Bruce E.: Use of dilutional ultrasound monitoring to detect changes in recirculation during venovenous extracorporeal membrane oxygenation in swine. In: *ASAIO Journal* 52 (2006), Nr. 5, S. 522–524
- [4] HESTER, Robert L. ; ASHCRAFT, Delmon ; CURRY, Edna ; BOWER, John: Non-invasive Determination of Recirculation in the Patient on Dialysis. In: *ASAIO Journal* 38 (1992), Nr. 3, S. M190–M193
- [5] CORNISH, J.D. ; CLARK, Reese H.: Principles and practice of venovenous extracorporeal membrane oxygenation. In: *Journal of Intensive Care Medicine* 11 (1996), Nr. 6, S. 289–301
- [6] REUTER, Daniel A. ; HUANG, Cecil ; EDRICH, Thomas ; SHERMAN, Stanton K. ; ELTZSCHIG, Holger K.: Cardiac output monitoring using indicator-dilution techniques: basics, limits, and perspectives. In: *Anesthesia & Analgesia* 110 (2010), Nr. 3, S. 799–811

Danksagung

Diese Arbeit wurde von der Deutschen Forschungsgemeinschaft gefördert (DFG - PAK 138/2).