



Doctoral Thesis

Measurement Principles for a real-time Cardiac Volume Sensor

Author(s):

Dual, Seraina A.

Publication Date:

2019

Permanent Link:

<https://doi.org/10.3929/ethz-b-000339587> →

Rights / License:

[In Copyright - Non-Commercial Use Permitted](#) →

This page was generated automatically upon download from the [ETH Zurich Research Collection](#). For more information please consult the [Terms of use](#).

Diss. ETH No. 25665

Measurement Principles for a real-time Cardiac Volume Sensor

A thesis submitted to attain the degree of

DOCTOR OF SCIENCES of ETH ZURICH
(Dr. sc. ETH Zurich)

presented by

Seraina Anne Dual

MSc ETH Masch.-Ing.
born February 13, 1991
citizen of Zurich, Switzerland

accepted on the recommendation of
Prof. Dr. Mirko Meboldt, examiner
Prof. Dr. Steffen Leonhardt, co-examiner
Prof. Dr. Christopher Hayward, co-examiner
Dr. Marianne Schmid Daners, co-examiner

2019

Abstract

Patients suffering from heart failure cannot provide sufficient cardiac output for organ perfusion, such that effective medical treatment is required. Three therapies for the treatment of heart failure have been clinically established: pharmacological treatment, heart transplantation, and implantation of a left-ventricular assist device (LVAD). Despite the efficacy of these therapies, survival rates remain unsatisfactorily low. The continuous monitoring of hemodynamic parameters can improve survival, as it supports timely and effective clinical decision making. The hemodynamics of the healthy heart are very sensitive to the left-ventricular (LV) volume. Hence, the LV volume is a promising hemodynamic parameter for clinical decision making. In addition, an LV volume measurement could be used for physiological feedback control of an LVAD, presumably increasing his or her quality of life and reducing the probability of adverse events. The aim of this thesis was to identify key requirements for an LV volume sensor, investigate possible measurement principles and evaluate the three most promising sensor concepts in terms of their sensitivity and accuracy.

The LV volume cannot easily be measured remotely, because the requirements for a real-time portable sensor are highly complex. An LV volume sensor needs to be implemented in such a way that traumatic injury is avoided and the areas of foreign surfaces in the body are not increased. The sensor should be small enough to be safely implanted or attached to the body surface. The LV volume measurement should be continuous and robust to changes in heart geometry, posture or hematocrit. Computer tomography, magnetic resonance imaging, various forms of impedance measurement, pressure measurement, echocardiography and strain sensors have been proposed to estimate the LV volume. However, none of them meets all of the above requirements. An implantable, biocompatible and robust LV volume sensor remains to be developed.

Contents

Three concepts for the real-time LV volume measurement are proposed in this thesis: Acoustic resonance, ultrasonic distance and the QRS amplitude of the electrocardiogram. The concepts were evaluated in a testing environment suitable to their current stage of development: in-silico, in-vitro, in-vivo and in the setting of an experimental clinical study. All measurement principles were sensitive to the LV volume. The achievable LV volume accuracies were assessed using a Bland-Altman analysis. The accuracies for the acoustic concept could not be evaluated as the principle was only assessed in-silico and lacked the possibility to account for noise. The ultrasonic distance approach yielded estimation accuracies for the LV volume smaller than 20% in human heart phantoms in vitro. The QRS-amplitude in vivo measurement rendered LV volume estimation accuracies smaller than 20%. The experimental clinical study revealed a small, but significant correlation between the QRS amplitude on the body surface and the mean pulmonary arterial pressure.

The three concepts presented are all atraumatic, small enough, capable of real-time measurement and should be sufficiently robust as they can be placed close to the heart. The QRS amplitude is the most promising concept to be implemented in the near future, particularly because of the electrode size. The ultrasonic distance measurement is equally convincing in terms of accuracy, but requires more effort for miniaturization and efficient data processing. The influence of hemotocrit changes on both measurement principles should be investigated carefully in subsequent studies. In conclusion, continuous measurement of LV volume is possible and will likely increase survival rates in heart failure patients in the future.

Zusammenfassung

Bei einer Herzinsuffizienz ist das Herz nicht mehr in der Lage genügend Blut durch den Körper zu fördern. Dies zieht eine Unterversorgung der Organe nach sich und erfordert eine medizinische Behandlung. Drei Therapien haben sich zur Behandlung von Herzinsuffizienz etabliert: Die pharmakologische Behandlung, die Herztransplantation und die Implantation eines Herzunterstützungssystems (Kunstherz). Trotz der beeindruckenden Erfolge dieser Therapien, bleiben die Überlebensraten unbefriedigend niedrig. Der Einbezug von kontinuierlichen hämodynamischen Parametern könnte zu einer rechtzeitigen und effektiven klinischen Entscheidungsfindung beitragen und so die Überlebensraten weiter verbessern. Im gesunden Herzen ist das linksventrikuläre Volumen eine wichtige Determinante des Herzzeitvolumens. Ihre kontinuierliche Messung wäre nicht nur in der klinischen Entscheidungsfindung hilfreich, sondern würde auch eine Anpassung von Kunstherzen an den physiologischen Bedarf des Patienten ermöglichen. Das Ziel dieser Arbeit war es die wichtigsten Anforderungen für einen linksventrikulären Volumensensor zu identifizieren, eine Reihe von Messprinzipien zu evaluieren und die drei Haupttechnologien bezüglich ihrer Genauigkeit und Sensitivität zu validieren.

Die Anforderungen an einen tragbaren, echtzeitfähigen Sensor, welcher das linksventrikuläre Volumen kontinuierlich misst, sind sehr komplex. Ein solcher Sensor muss implementiert werden, ohne dass traumatische Verletzungen entstehen oder der Körper mit zusätzlichen Fremdoberflächen exponiert wird. Der Sensor soll klein genug sein, um gefahrlos implantiert oder auf der Körperoberfläche befestigt zu werden. Die Volumensensor soll kontinuierlich messen können und sein Signal gegenüber Veränderungen der Herzgeometrie, der Körperhaltung oder des Hämatokrits robust sein. Eine Vielzahl von Technologien wurde bereits für die Messung des linksventrikulären Volumens vorgeschlagen: Computertomographie, Magnetresonanztomographie, verschiedene Formen der Impedanzmessung, Druckmessung, Echokardio-

Contents

graphie und Dehnungsmessung. Diese erfüllen jedoch jeweils die oben genannten Anforderungen nicht vollständig. Ein Volumensensor, welcher biokompatibel, implantierbar und robust ist existiert daher noch nicht.

Diese Arbeit umfasst die Untersuchung von drei Konzepten zur linksventrikuläre Volumenmessung: Akustische Resonanz, Ultraschall-Distanzmessung und Elektrokardiographie. Die zugrunde liegenden physikalischen Messprinzipien wurden untersucht und im nächsten Schritt die Sensorkonzepte hinsichtlich Sensitivität und Genauigkeit der LV Volumenmessung validiert. Die Konzepte wurden jeweils in einer für den aktuellen Entwicklungsstand geeigneten Testumgebung evaluiert: *in silico*, *in-vitro*, *in-vivo* und im Rahmen einer experimentellen klinischen Studie. Alle drei Messprinzipien zeigten eine Sensitivität bezüglich des linksventrikulären Volumen. Die Genauigkeit der Messungen wurde mittels einer Bland-Altman-Analyse bewertet. Die Genauigkeit des akustischen Konzepts konnte nicht bewertet werden, da das Prinzip ohne Einbezug von Störgrößen in der Simulation evaluiert wurde. Die Bestimmung der Genauigkeit der Ultraschall-Distanzmessung *in-vitro* in nachgebildeten Silikonherzen ergab eine Genauigkeit von unter 20%. Die Elektrokardiographie erreichte ebenfalls eine Genauigkeit des linksventrikulären Volumens von weniger als 20% *in vivo*. Darüber hinaus zeigte die experimentelle klinische Studie eine schwache, aber signifikante Korrelation zwischen pulmonären Mitteldruck und dem linksventrikulären Volumen.

Die drei vorgestellten Konzepte sind alle atraumatisch, klein genug und echtzeitfähig sind. Die Elektrokardiographie ist das vielversprechendste Konzept, da es in naher Zukunft umgesetzt werden könnte, insbesondere aufgrund einer relativ einfachen Integration von Elektroden in ein Implantat ist relativ einfach. Die Ultraschall-Distanzmessung überzeugt auch in punkto Genauigkeit, erfordert aber einen höheren Aufwand im Bezug auf Miniaturisierung und effiziente Datenverarbeitung. Der Einfluss von Hämotokritänderungen auf beide Messprinzipien sollte in Zukunft sorgfältig untersucht werden. Zusammenfassend ist eine kontinuierliche Messung des linksventrikulären Volumens möglich und wird sich so hoffentlich positiv auf die Überlebensraten von Menschen mit Herzinsuffizienz auswirken.