

Diss. ETH No. 21702

# Optimization of Cardiac-Cycle Synchronized Control for Ventricular Assist Devices

A dissertation submitted to  
ETH ZURICH

for the degree of  
Doctor of Sciences

presented by

**Raffael Amacher**

MSc ETH ME  
born August 19, 1985  
citizen of Bäretswil, ZH and Hasliberg, BE, Switzerland

accepted on the recommendation of  
Prof. Dr. Lino Guzzella, examiner  
Prof. Dr. med. Thierry Carrel, co-examiner

2014

# Abstract

Heart failure is one of the leading causes of death in the developed countries. The use of ventricular assist devices (VADs) is an option for treating patients with end-stage heart failure which is increasingly applied, while heart transplantation represents the gold standard therapy. The reason for the increased use is both due to a shortage of donor organs and the improvement of VAD technology. One important engineering task in the field is the feedback control of VADs. Besides the adaptation of the operating point of the pump to the physiological demand, a synchronization of the action of the VAD to the cardiac cycle has shown to have a significant effect on hemodynamics in previous research. This thesis aims at extending the state of knowledge in this specific area. This is realized by establishing an algorithm that synchronizes a VAD to the cardiac cycle based on the electrocardiogram while being robust to disturbances and arrhythmic events. The results of an *in vivo* study using a cardiac-cycle synchronized volume-displacement VAD are presented. These results indicate that controlling the timing of a volume-displacement VAD with respect to the cardiac cycle yields control over hemodynamic variables. Further, the previous research on cardiac-cycle synchronized actuation of turbodynamic VADs (tVADs) is summarized and a definition of the phase shift between such a device and the cardiac cycle is established that allows to compare the hemodynamic effects obtained by different research groups that applied such speed modulation strategies. Finally, a methodology is presented that allows for numerical optimization of cardiac-cycle synchronized speed profiles of a tVAD. It is demonstrated that the values of user-defined physiological objective functions can be further improved by using optimized speed profiles compared to the traditionally used square- or sine-wave speed profiles. The tools developed during the course of this thesis are thought to be appli-

## *Abstract*

cable to any type of VAD and are hopefully helpful to conduct further research in this field.

# Zusammenfassung

Herzinsuffizienz ist eine der häufigsten Todesursachen in den entwickelten Ländern. Die Implantation eines linksventrikulären Herzunterstützungssystems (Ventricular assist device; VAD) wird zunehmend zur Behandlung von Patienten mit Herzinsuffizienz im Endstadium angewandt, während die Herztransplantation der Goldstandard bleibt. Der Grund für diese Zunahme ist einerseits der Mangel an Spenderherzen für Transplantationen und andererseits die Verbesserung der Technologie im Bereich der VADs. Eine wichtige Engineering-Aufgabe besteht in der Regelung von VADs. Neben der laufenden Anpassung des Betriebspunktes der Blutpumpe an den physiologischen Bedarf hat die bisherige Forschung gezeigt dass ein synchroner Betrieb des VADs zum Herzzyklus einen signifikanten Effekt auf die Hämodynamik hat. Das Ziel der vorliegenden Dissertation ist es, den Stand des Wissens in letzterem Bereich zu erweitern. Dies wird realisiert durch die Entwicklung eines Algorithmus der mit Hilfe des Elektrokardiogramms die Synchronisierung eines VADs zum Herzzyklus ermöglicht, wobei der Algorithmus robust gegen Herzrhythmusstörungen ist. Die Resultate einer *in vivo* Studie werden gezeigt, in der ein nach dem Volumenverdrängungs-Prinzip arbeitendes, zum Herzzyklus synchronisiertes, VAD analysiert wird. Diese Resultate zeigen dass die zeitliche Koordinierung des VADs zum Herzzyklus eine kontrollierte Variation von hämodynamischen Parametern ermöglicht. Weiter werden die Resultate bisheriger Forschung bezüglich Herzzyklus-synchronisierter Aktuierung turbodynamischer VADs zusammengefasst. Eine Definition der Phasenverschiebung zwischen einer solchen Blutpumpe und dem Herzzyklus wird festgelegt, die es ermöglicht, die hämodynamischen Effekte die von verschiedenen Forschungsgruppen erzielt wurden miteinander zu vergleichen. Des weiteren wird eine Methodik präsentiert, die es erlaubt optimierte Drehzahlprofile für Herzzyklus-synchronisierte turbodynamische VADs numerisch zu berechnen. Es wird

## *Zusammenfassung*

gezeigt dass solche Drehzahlprofile die Werte von benutzerdefinierten, physiologisch motivierten, Gütekriterien im Vergleich zu traditionell verwendeten Drehzahlprofilen (Sinus- oder Rechteckspulsförmige Drehzahlprofile) weiter verbessert werden können. Die während dieser Arbeit entwickelten Ansätze sind so konzipiert dass sie für verschiedene Typen von VADs anwendbar sind und somit einen nützlichen Beitrag zur weiteren Forschung auf dem Gebiet liefern können.