

# Modellierung und Simulation von pneumatisch getriebenen Herzunterstützungssystemen als Grundlage für den Reglerentwurf

Alexander Sievert<sup>1</sup>, Olaf Simanski<sup>1</sup>, Wolfgang Drewelow<sup>1</sup>, Andreas Arndt<sup>2</sup>, Bernhard Lampe<sup>1</sup>

<sup>1</sup>Institut für Automatisierungstechnik, Universität Rostock, Rostock, Deutschland

<sup>2</sup>Berlin Heart GmbH, Berlin, Deutschland

Kontakt: alexander.sievert@uni-rostock.de

## Einleitung

Aufgrund des stetig zunehmenden Bedarfs an Herzunterstützungssystemen (VADs - Ventricular Assist Devices) und der konsequenten Weiterentwicklung der verfügbaren Geräte kommt auch der Weiterentwicklung der eingesetzten Regelungskonzepte eine wachsende Bedeutung zu. Dies wird dadurch begünstigt, dass der Einsatz von VADs in den letzten Jahren von einer reinen Brückenlösung bis zur Transplantation eines Spenderorgans, hin zum dauerhaften, längerfristigen Therapieeinsatz erweitert wurde. Grundlage einer effektiven, sicheren Steuerung eines VADs ist die genaue Kenntnis der physikalischen und physiologischen Prozesse. Die Entwicklung der Steuerungs- bzw. Regelalgorithmen für ein VAD wird durch das Vorhandensein eines Modells erleichtert [1]. Der vorliegende Beitrag behandelt die Modellierung der pulsatilen Blutpumpe - pneumatisch angetrieben durch das EXCOR-System, Berlin Heart GmbH, Berlin (Abb. 1).



Abbildung 1 EXCOR VAD mit EXCOR Antriebseinheit

## Methoden und Materialien

### Vorarbeiten

Ein Modell bestehend aus EXCOR-System und Blutpumpe (VAD) wurde bereits mittels der objektorientierten Modellierungssprache Modelica/ Dymola erarbeitet [2]. Dabei war die Zielsetzung eine möglichst exakte Abbildung aller auftretenden physikalischen Effekte.

### Zielstellung für die Modellierung

Um als Grundlage für eine modellbasierte Regelkreissynthese und Regelung genutzt werden zu können, sollte das Modell möglichst eine einfache Struktur aufweisen. Das vorhandene Dymola-Modell weist für diesen Zweck eine zu hohe Komplexität auf. Durch Modellreduktion soll das EXCOR-System durch ein Differentialgleichungssystem möglichst niedriger Ordnung beschrieben werden, um dessen physikalisches Verhalten ausreichend exakt abzubilden.

### Vorgehensweise

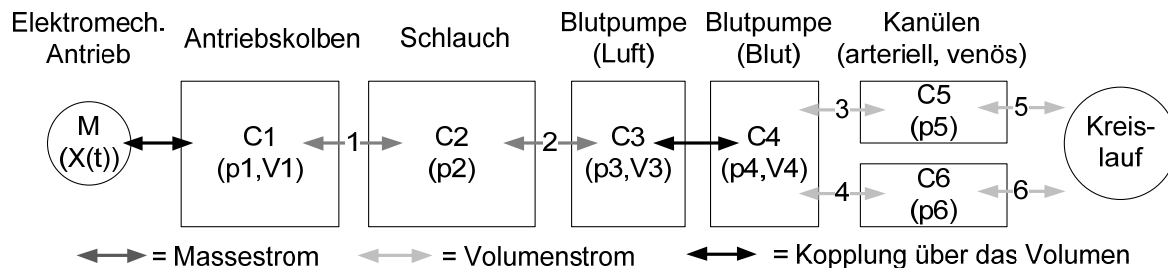
Grundlage der Modellierung bildet die Analyse des physikalischen Modells des EXCOR-Systems. Dabei wurde das komplexe System durch thematisch getrennte Bereiche substituiert - den elektro-mechanischen, den pneumatischen und den hydraulischen Teil. Um eine mathematische Beschreibung dieser Komponenten zu ermöglichen, wurden die Analogien zu den elektrotechnischen Grundelementen Widerstand, Induktivität und Kapazität gesucht. Dieses Vorgehen wird in Gleichung (1) exemplarisch für die Kapazität eines Luftschlauches gezeigt. Die Differentialgleichung (1) beschreibt die Änderung des Druckes ( $\dot{p}$ ) in Abhängigkeit des auftretenden Massenstromes ( $\dot{m}$ ).

$$\dot{p} = \frac{R \cdot T}{V + p \cdot K_S} * \dot{m} \quad (1)$$

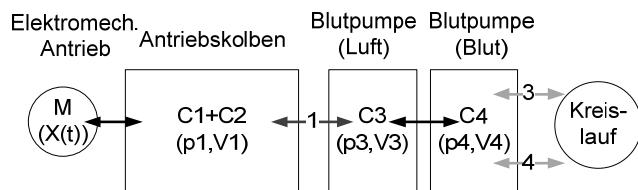
$R$  ... Gaskonstante,  $T$  ... Temperatur,  $V$  ... Volumen

$K_S$  ... Elastizitätskonstante

Nachdem jede Komponente mathematisch beschrieben wurde, können die einzelnen Gleichungen in Matlab® Simulink umgesetzt und das Gesamtsystem simuliert werden. Unter der Zielvorgabe einer möglichst geringen Komplexität wurde untersucht, ob das entwickelte Modell Potential für Vereinfachungen hat oder die Konzentration von Parametern erlaubt. Unter dem Aspekt der geforderten ausreichend exakten Abbildung des tatsächlichen Prozessverhaltens, wurde das Modell aus Abb. 2 in die vereinfachte Variante in Abb. 3 überführt. Dabei wurde die Kapazität des Luftschlauches mit der des Kolbenantriebes zusammengefasst und die Kapazität der Blutkanülen vernachlässigt.



**Abbildung 2** Komplexe Modellvariante des EXCOR-Systems



**Abbildung 3** Vereinfachtes Modell des EXCOR-Systems

Da es sich bei einigen der Parameter um teils theoretisch berechnete bzw. experimentell bestimmte Werte handelt, und bestimmte Parameter stark konzentriert wurden, ist eine Optimierung dieser notwendig. Da eine manuelle Optimierung sehr aufwendig ist und nicht sicherstellt, dass die bestmögliche Lösung gefunden wird, wird hier auf Matlab® Tools zurückgegriffen. Ein entwickeltes, vollautomatisiertes Skript optimiert mittels `fminsearch` schrittweise einzelne Parameter der festgelegten Modellstruktur und führt abschließend eine Gesamtoptimierung durch, um einen Abgleich mit den realen Messwerten zu realisieren. Da es sich bei einem pneumatisch-hydraulischen System wie EXCOR um ein hochdynamisches System handelt, ist eine Optimierung für einen einzelnen Arbeitspunkt nicht ausreichend, so dass dieses im entwickelten Algorithmus berücksichtigt werden musste.

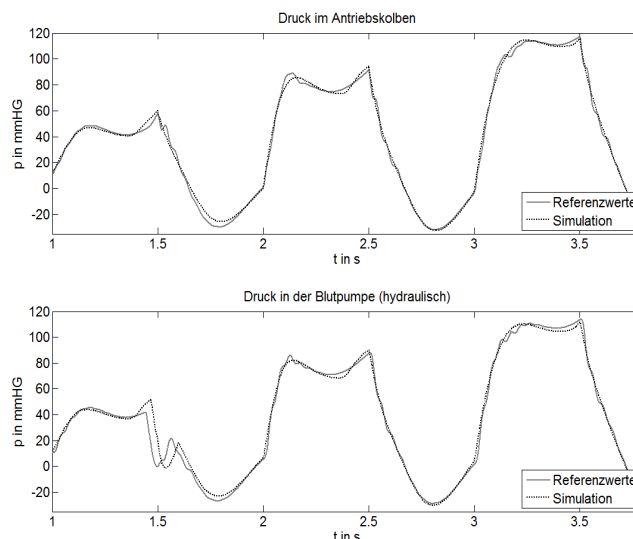
## Ergebnisse

Um die Qualität des entworfenen Modells zu beurteilen, muss ein Vergleich zu Referenzwerten herangezogen werden. Da durch die Vorarbeiten bereits ein gegen reale Messwerte validiertes Modell vorlag, konnte dieses als Referenz genutzt werden. Abb. 4 zeigt exemplarisch für einen Arbeitspunkt den Vergleich zwischen dem entwickelten, stark vereinfachten Modell und den Referenzwerten. Die Grafik zeigt die für einen Reglerentwurf interessanten zeitlichen Druckverläufe in der Antriebseinheit und der künstlichen Blutpumpe. Eine Validierung der hier beispielhaft gezeigten Resultate wurde über den gesamten Arbeitsbereich mit den gleichen positiven Ergebnissen durchgeführt.

## Diskussion

Prinzipiell kann das reale Systemverhalten des EXCOR-Systems simuliert werden, wobei kleinere Effekte aufgrund der Vereinfachung und Konzentrierung gewisser

Komponenten nicht nachgebildet sind. Dies ist für die meisten Nutzungsszenarien auch nicht erforderlich. Falls im Detail exaktere Modellvorhersagen notwendig sind, wurde ein erweitertes Modell erstellt. Dieses beinhaltet die Kapazität der Kanülen, wodurch die Komplexität steigt und sich die Ordnung des Differentialgleichungssystems von 5 auf 7 erhöht.



**Abbildung 4** Vereinfachtes Modell des EXCOR-Systems

## Schlussfolgerungen

Die Ergebnisse der Modellbildung eines VADs, in diesem Fall des EXCOR-Systems, haben gezeigt, dass auch mit einem stark vereinfachten Modell das Prozessverhalten ausreichend genau nachgebildet werden kann. Aufgrund der geringen Komplexität eignet sich dieses als Grundlage für die Entwicklung modellbasierter Steuerungs- und Regelungskonzepte um neue innovative Softwarelösungen für VADs zu schaffen.

## Literatur

- [1] WEISS, WJ. ; CYSYK, J. ; ROSENBERG, G: *Simulation of a pneumatic driver for a pediatric ventricular assistant device.* ASAIO J 56: 95, 2010
- [2] BÖHME, T. ; ARNDT, A.: *Modelling and Simulation of a Pulsatile Pneumatically Actuated Ventricular Assistant Device.* 44. Jahrestagung der DGBMT und 3-Länder-Tagung D-A-CH (angenommen), 2010