

Intraventrikuläre Hämodynamik bei Herzerkrankungen

Untersuchung intraventrikulärer Hämodynamik mittels Fluid-Struktur-Interaktion und statistischen Formmodellen

L. Goubergrits, J. Brüning, L. Obermeier, Institut für kardiovaskuläre Computer-assistierte Medizin, Charité – Universitätsmedizin Berlin

Kurzgefasst

- Entwicklung von Modellierungsansätzen zur Simulation intraventrikulärer Hämodynamik
- Abweichende Strömungsmuster bei Klappenerkrankungen
- Strömungsmuster bei Geometrievariation mittels statistischer Formmodelle
- Fluid-Struktur-Interaktion

Motivation Kardiovaskuläre Erkrankungen gelten weltweit als führende Todesursache [1]. Insbesondere die linke Hälfte des Herzens (Ventrikel) ist großen Belastungen ausgesetzt und daher öfter von schwerwiegenden Erkrankungen betroffen [2]. Manche dieser Erkrankungen korrelieren dabei mit Strömungsmustern im Ventrikel, weshalb verschiedene Strömungsgrößen als mögliche Parameter für Diagnose oder Therapieplanung diskutiert werden [3]. Häufige Krankheitsbilder sind Klappenerkrankungen, insbesondere die Aortenklappenstenose und die Mitralklappeninsuffizienz, welche die Ventilwirkung der Klappen zumeist beeinflussen. Die Mitralklappeninsuffizienz beschreibt eine Undichtigkeit der Mitralklappe, welche ein Zurückströmen von Blut aus dem Ventrikel in den Vorhof zur Folge hat. Sie führt zu einem gewissen Pendelvolumen, welches vom Herzmuskel zusätzlich beschleunigt werden muss. Die Aortenklappenstenose beschreibt eine Verengung der Aortenklappe, welche das Rückströmen aus der Hauptschlagader in den linken Ventrikel verhindert und in einem erhöhten Widerstand, den der Herzmuskel überwinden muss, resultiert. Beide Krankheitsbilder haben damit Einfluss auf intraventrikulär günstige Strömungsmuster. Ebenfalls nehmen unterschiedliche geometrische Ausprägungen der Ventrikel Einfluss auf die Strömung. So wurde bei ventrikulärer Dilatation (Vergrößerung) eine veränderte intraventrikuläre Wirbelausbildung beobachtet, welche mit erhöhter Energiedissipation assoziiert wird [4]. Eine möglichst genaue Kenntnis der Blutflussmuster im linken Ventrikel, sowohl in gesunden Fällen, bei diversen Krankheitsbildern sowie nach geplanten

Eingriffen ist daher von großem klinischem Interesse. Auch wenn einige bildgebende Verfahren wie die Magnetresonanztomographie und die Echokardiographie bereits in der Lage sind Geschwindigkeitsvektoren im Patienten zu messen, sind diese im Gegensatz zu Strömungssimulationen meist stark in Auflösung und Genauigkeit eingeschränkt. Weiterhin können mittels numerischer Strömungsmechanik patientenindividuelle Anatomien virtuell manipuliert werden um postoperativer Zustände abbilden und untersuchen zu können. Strömungssimulationen hingegen können diese Messverfahren demnach ergänzen und zu einem verbesserten Verständnis der Blutflussmuster im linken Ventrikel, sowohl in gesunden Fällen, bei diversen Krankheitsbildern sowie nach geplanten Eingriffen, beitragen.

Methoden Die Berechnung der Hämodynamik soll durch das Lösen der dreidimensionalen, inkompressiblen, instationären, laminaren Navier-Stokes Gleichungen auf bewegten Gittern (Ein-Wege-gekoppelte Fluid-Struktur-Interaktion) erfolgen. Blut soll dabei als Newton'sches Fluid modelliert werden. Als Diskretisierungsmethode wird die Arbitrary-Lagrangian-Eulerian Methode verwendet. Sämtliche Simulationen werden mit dem kommerziellen Strömungslöser STAR-CCM+ (v. 15.02, Siemens PLM) durchgeführt. Das Rechengitter, an das aufgrund der teilweise großen Gitterdeformationen hohe Anforderungen bestehen, wird ebenfalls mit dem internen Vernetzungstool aus STAR-CCM+, erzeugt. Neben dem linken Ventrikel werden ebenfalls Geometrien des linken Vorhofs und der Aorta inkludiert. Dort werden jeweils physiologische Ein- und Ausflussrandbedingungen gesetzt. Mitralklappen- und Aortenklappen werden durch zweidimensionale, diodenartige Kreisscheiben modelliert, über die durch Variation eines Druckabfalls (Darcy-Gesetz) eine Ventilkfunktion umgesetzt werden kann. Die Ventrikelgeometrien selbst basieren auf statistischen Formmodellen. Durch Superposition sogenannter Formmoden können damit verschiedene Ventrikelgeometrien erzeugt werden. Aus den zugrundeliegenden Geometrien wird ebenfalls das jeweilige Gitterdeformationsfeld hergeleitet.

Ziele Ziel des HLRN-Vorhabens ist eine systematische Analyse der intraventrikulären Strömung bei verschiedenen Ventrikelgeometrien und Klappenerkrankungen sowie die Weiterentwicklung der zugrundeliegenden Modellierungsansätze. Insbeson-

dere die Wirbelausbildung, die energetische Effizienz und die ventrikuläre Auswaschung sollen im Mittelpunkt der Auswertungen stehen. Es wird erwartet, dass Klappenerkrankungen (Mitralklappeninsuffizienz und -stenose, Aortenklappeninsuffizienz und -stenose sowie deren Kombinationen) hier einen störenden Einfluss nehmen, der wiederum andere Erkrankungen nach sich ziehen kann. Auch von Geometrievariationen wird erwartet, dass sie einen klinisch relevanten Einfluss auf die intraventrikuläre Hämodynamik nehmen. In Vorarbeiten wurde bereits eine erhöhte Energiedissipation (Abbildung 1) sowie eine schlechtere Auswaschung (Abbildung 2) bei einem dilatierten Ventrikel mit Mitralklappeninsuffizienz im Vergleich zu einem gesunden Ventrikel beobachtet.

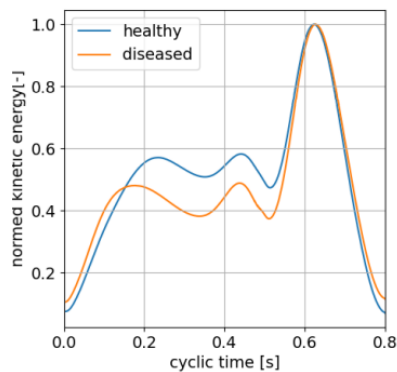


Abbildung 1: Normierte kinetische Energie gemittelt über vier Zyklen im gesunden und erkrankten Ventrikel. Es ist ersichtlich, dass im gesunden Fall während der diastolischen Phase (0 bis 0.5s) durch verringerte Wirbeldissipation ein höheres Energieniveau gehalten werden kann.

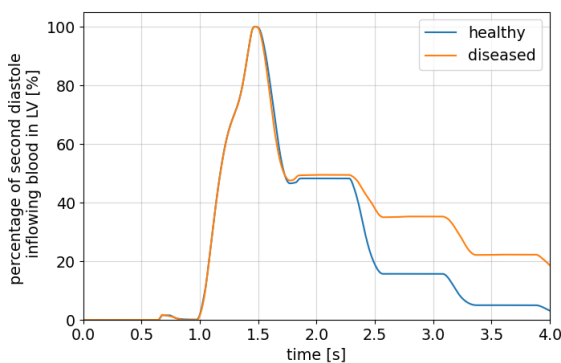


Abbildung 2: Darstellung des im zweiten Zyklus eingeströmten Blutes im Zeitverlauf. Im gesunden Fall wird das Blut schneller wieder ausgeworfen, womit eine geringe Gefahr der Thrombenbildung durch Stagnation des Blutes assoziiert wird.

Die intraventrikulären Strömungsmuster sollen in Abhängigkeit unterschiedlicher ventrikulärer Geometrieausprägungen systematisiert werden. Zudem soll

die Annahme einer laminaren Strömung im Ventrikel durch den Vergleich mit LES Simulationen überprüft werden. Ebenfalls soll der zweidimensionale Modellierungsansatz der Klappen mit Simulationen abgeglichen werden, bei welchen eine bidirektionale Fluid-Struktur-Interaktion zur Berechnung der Bewegung dreidimensionaler Klappen verwendet wird. Die Erkenntnisse werden in Form von Veröffentlichungen verwertet, bei denen einzelne Krankheitsbilder und Geometrievariationen beleuchtet und verglichen werden.

WWW

https://icm.charite.de/forschung/labor_fuer_biofluidmechanik/

Weitere Informationen

- [1] WHO, *Cardiovascular Diseases* URL: <https://www.who.int/health-topics/cardiovascular-diseases/> (accessed: 26.06.2020)
- [2] S.N. Doost, D. Ghista, B. Su, L. Zhong, Y.S. Morsi. Heart blood flow simulation: a perspective review. *BioMedical Engineering Online*. **15.101** (2016). doi:10.1186/s12938-016-0224-8
- [3] P.G. Walker, G.B. Cranney, R.Y. Grimes, J. DeLatore, J. Rectenwald, G.M. Pohost, A.P. Yoganathan. Three-dimensional reconstruction of the flow in a human left heart by using magnetic resonance phase velocity encoding. *Annals of Biomedical Engineering*. **24.S1**, pp. 139–147 (1995). doi:10.1007/BF02771002
- [4] C.J. Carlhäll, A. Bolger. Passing Strange: Flow in the Failing Ventricle. *Circulation: Heart Failure*. **3.2**, pp. 326–331 (2010). doi:10.1161/CIRCHEARTFAILURE.109.911867

Projektpartner

Förderung

Fluid-Structure-Interaction Modelling of the Heart Hemodynamics using Statistical Shape Models (DFG Schwerpunktprogramm 2311)