

## Intraventrikuläre Hämodynamik bei Herzerkrankungen

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

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

#### Kurzgefasst

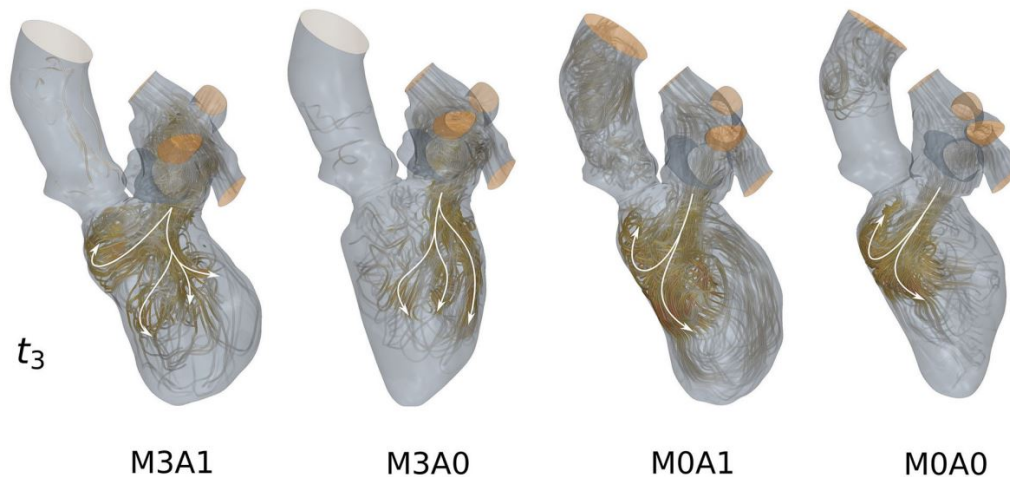
- Entwicklung von Modellierungsansätzen zur Simulation intraventrikulärer Hämodynamik
- Abweichende Strömungsmuster bei Klappenerkrankungen
- Strömungsmuster bei Geometrievariation mittels statistischer Formmodelle
- Fluid-Struktur-Interaktion

**Motivation** Kardiovaskuläre Erkrankungen gelten weltweit als führende Todesursache [1]. Insbesondere der linke Ventrikel ist großen Belastungen ausgesetzt und häufig von schwerwiegenden Erkrankungen betroffen. Manche dieser Erkrankungen korrelieren dabei mit intraventrikulären Strömungsmustern, weshalb verschiedene Strömungsgrößen als mögliche Parameter für Diagnose oder Therapieplanung diskutiert werden [2]. Häufige Krankheitsbilder sind Klappenerkrankungen, insbesondere die Aortenklappenstenose und die Mitralklappeninsuffizienz, welche die Ventilwirkung der Klappen 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. 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 [3]. 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. Mittels bildgebender Verfahren (Magnetresonanztomographie und Echokardiographie) können Geschwindigkeitsfelder des Blutflusses gemessen werden. Jedoch sind diese im Gegensatz zu Strömungssimulationen meist stark in Auflösung und Genauigkeit beschränkt. Weiterhin können mit der Modellierung über numerische

Strömungsmechanik patientenindividuelle Anatomien virtuell manipuliert werden und somit postoperative Zustände abgebildet und untersucht werden, oder synthetische Daten basierend auf statistischen Formmodellen analysiert werden [4]. Strömungssimulationen können bildgebende Verfahren demnach ergänzen und zu einem verbesserten Verständnis der Blutflussmuster im linken Ventrikel beitragen.

**Methoden** Die Berechnung der Hämodynamik soll durch das Lösen der dreidimensionalen, inkompressiblen, instationären Navier-Stokes Gleichungen auf bewegten Gittern (Ein-Wege-gekoppelte Fluid-Struktur-Interaktion) erfolgen. Blut soll dabei als Newton'sches Fluid sowie nicht Newton'sches Fluid nach dem Carreau-Yasuda Modell, dargestellt werden. Als Diskretisierungsmethode wird die Arbitrary-Lagrangian-Eulerian Methode verwendet. Sämtliche Simulationen werden mit dem kommerziellen Strömungslöser STAR-CCM+ (v. 15.02/16.04, Siemens PLM) durchgeführt. Das Rechengitter, an das aufgrund der teilweise großen Gitterdeformationen hohe Anforderungen bestehen, wird mit dem internen Vernetzungstool aus STAR-CCM+, erzeugt. Neben dem linken Ventrikel werden starre Geometrien des linken Vorhofs und der Aorta inkludiert. Dort werden jeweils physiologische Ein- und Ausflussrandbedingungen gesetzt. Mitralklappen- und Aortenklappen werden zunächst durch zweidimensionale, Dioden-artige Kreisscheiben modelliert, über die durch Variation eines Druckabfalls (Darcy-Gesetz) eine Ventilfunktion umgesetzt werden kann. Die Ventrikelgeometrien basieren auf linearen 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. Insbesondere die Darstellung der Mitralklappe soll verbessert und zu einer dreidimensionalen starren und anschließend bewegten Klappengeometrie erweitert werden, da der Mitralklappe ein großer Einfluss auf die diastolische intraventrikuläre Blutströmung zugeschrieben wird. Schlussendlich ist eine Zwei-Wege-gekoppelte Fluid-Struktur-Interaktion der Mitralklappe



**Abbildung 1:** Stromlinien von vier Fällen (M3A1: hohe Mitralklappeninsuffizienz (MI), Aneurysma; M3A0: hohe MI, kein Aneurysma; M0A1: keine MI, Aneurysma; M0A0: keine MI, kein Aneurysma) während der Diastase. Die weißen Pfeile deuten die Hauptströmungsrichtungen an. Abbildung abgewandelt von [5].

pe, mit Abaqus als Strukturmechanischen Löser, geplant. Bezüglich der Methodenentwicklung sollen ferner die Ein- und Ausflussrandbedingungen an die intraventrikuläre Strömung gekoppelt werden, um eine Ventrikulo-arterielle Kopplung abzubilden. Dazu werden Land Parameter Modellen an Ein- und Ausfluss integriert. Als letzten Punkt soll die Repräsentation der Ventrikelgeometrie über ein nicht-lineares statistisches Formmodell dargestellt werden und mittels statistischer Formmodellierung ebenfalls ein bewegtes linkes Atrium in die Simulationen integriert werden. Im Laufe der Modellentwicklung wird die Methodik auf unterschiedliche linke Ventrikel (gesund, krank, synthetisch) angewendet, um Unterschiede in der Hämodynamik zu analysieren. Dabei werden alle Erkenntnisse in Form von Veröffentlichungen verwertet. Insbesondere die Wirbelbildung, die energetische Effizienz und die ventrikuläre Auswaschung sollen im Mittelpunkt der Auswertungen stehen. Bisherige Analysen haben gezeigt, dass eine Mitralklappeninsuffizienz einen störenden Einfluss auf die Strömung im linken Ventrikel nimmt (höhere Energiedissipation, Störung diastolischer Wirbelbildung - Abbildung [1]) [4]. Ebenfalls wurde mittels statistischer Formmodellierung von sieben Kohorten pathologischer linker Ventrikel gezeigt, dass ventrikuläre Aneurysmen sowie pathologische Bewegungsmuster Einfluss auf die Auswaschung haben [5].

#### WWW

<https://icm.charite.de/en/>

#### 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 et al. Heart blood flow simulation: a perspective review. *BioMedical Engineering Online*. **15.101** (2016). doi:10.1186/s12938-016-0224-8
- [3] 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
- [4] L. Goubergrits, K. Vellguth, L. Obermeier, A. Schlieff et al. CT-Based Analysis of Left Ventricular Hemodynamics Using Statistical Shape Modeling and Computational Fluid Dynamics. *Frontiers in Cardiovascular Medicine*. **9** (2022). doi:10.3389/fcvm.2022.901902
- [5] L. Obermeier, K. Vellguth, A. Schlieff, L. Tautz et al. CT-Based Simulation of Left Ventricular Hemodynamics: A Pilot Study in Mitral Regurgitation and Left Ventricle Aneurysm Patients. *Frontiers in Cardiovascular Medicine*. **9** (2022). doi:10.3389/fcvm.2022.828556

#### Projektpartner

#### Förderung

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

#### DFG Fachgebiet

404-03