



Doctoral Thesis

## **Anatomically accurate hemodynamic simulations in the aorta and the coronary arteries**

**Author(s):**

Boutsianis, Evangelos

**Publication Date:**

2007

**Permanent Link:**

<https://doi.org/10.3929/ethz-a-005409510> →

**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. 16996

**ANATOMICALLY ACCURATE HEMODYNAMIC  
SIMULATIONS IN THE AORTA AND THE CORONARY  
ARTERIES**

A dissertation submitted to the

SWISS FEDERAL INSTITUTE OF TECHNOLOGY ZURICH

for the degree of

DOCTOR OF SCIENCES

presented by

EVANGELOS BOUTSIANIS

Dipl. Naval Architect & Marine Engineer  
National Technical University of Athens  
born on June 22<sup>nd</sup>, 1975, citizen of Hellas

accepted on the recommendation of

Prof. Dr. Dimos Poulidakos, examiner

Prof. Dr. Gábor Székely, co-examiner

Dr. Yiannis Ventikos, co-examiner

Zurich, 2007

## ZUSSAMMENFASSUNG

Die beinahe epidemische Ausbreitung von Herz-Kreislauf-Erkrankungen in der westlichen Welt gefährdet die Volksgesundheit und erfordert, zusammen mit der kontinuierlich steigenden Lebenserwartung, neue Behandlungs- und Diagnosemethoden. Wissenschaftler unterschiedlicher Forschungsrichtungen arbeiten zusammen, um den Einfluss biochemischer und mechanischer Parameter auf komplexe biologische Systeme – wie zum Beispiel die Aorta und die Herzkranzgefäße – zu beurteilen. Miteinander in Zusammenhang stehende Forschung erfolgt parallel auf dem Gebiet der medizinischen Bildgebung und der rechnergestützten Blutflussberechnung. Die hier vorliegende Dissertation behandelt die Hauptprobleme, welche im Zusammenhang mit auf spezifische Patienten geschneiderten Simulationen des Blutflusses in Aneurysmen und Herzkranzgefässen stehen. Um die Anatomie der untersuchten Strukturen möglichst genau abzubilden, wurde auf die neuesten Methoden der medizinischen Bildgebung zugegriffen. Diese Genauigkeit hat ihre Kosten, unter welche unter anderem physiologische und pathologische Randbedingungen, das Einbeziehen der Bewegung und der Deformation der zu berechnenden Domäne, die Benützung von fortgeschrittenen Gitterherstellungsmethoden und experimentelle Bestätigung der Berechnungen fallen.

Es wurde eine Methode für das Abbilden von analytisch oder experimentell bestimmten Geschwindigkeitsprofilen auf realistische Schnittebenen der zu berechnenden Domäne basierend auf der Schwarz Christoffel Transformation entwickelt. Solche Interpolationsmethoden werden gebraucht, da die experimentellen und auf dem Computer zu simulierenden Domänen nie ganz genau ausgerichtet sind. Zudem ist es selten möglich, das Geschwindigkeitsprofil am Rand der Domäne mit bildgebenden Verfahren exakt zu bestimmen, so dass aus den integrierten Werten analytisch ein Profil berechnet werden muss. Die hier vorgestellte Methode erlaubt dann die Transformation von analytisch berechenbaren Geschwindigkeitsfeldern aus einer Domäne in eine weitere, in welcher solche Berechnungen nicht möglich sind.

Es wurde zudem aufgezeigt, dass die pulsierende Bewegung des Blutes in grossen Teilgebieten der Herzkranzgefäße berechnet werden kann. Nachdem die Anatomie der ersten Zweige der linken vorderen absteigenden Kranzarterie mittels Computertomographie (CT) erfasst wurde, konnten wir die ungleichmässige Verteilung der Schubspannungen an der

Arterienwand sowie das Geschwindigkeits- und Druckfeld berechnen. In Gebieten mit gestörtem Fluss und hohem Wirbelanteil konnte eine starke örtliche und zeitliche Variation der Schubspannungsverteilung auf der Arterienwand festgestellt werden. Es wird angenommen, dass solche Zustände das Entstehen von Arteriosklerose fördern, welche wiederum Erkrankungen der Herzkranzgefäße zugrunde liegen.

Eine der Eigenschaften der Herzkranzgefäße ist deren starke Bewegung und Deformation, die durch die Pumpbewegung des Herzens entsteht. Es wurde gezeigt, dass weder die Bewegung der Arterien noch deren kapazitative Erweiterung einen signifikanten Einfluss auf die Wandschubspannung und deren zeitliche Ableitung hat. Bei physiologischer, pulsierender Bluteinfluss-Randbedingung bewirken kapazitative Effekte eine Phasenverschiebung zwischen Geschwindigkeit und Schubspannung, beeinflussen aber die örtliche Verteilung der Minima nicht. Das Miteinbeziehen der Deformation der Herzkranzgefäße und somit derer kapazitativen Effekte wurde erst durch modernste Mehrschicht-CT-Technik ermöglicht und stellt in dieser Form die erste solche Untersuchung überhaupt dar.

Der Validierung der Computersimulationen wurde ein hoher Stellenwert gegeben, indem in einem exakten Modell eines Aneurysmas der Bauchorta experimentell die stationären Flussbedingungen erforscht wurden. Die Daten für das durchsichtige Modell wurden mittels CT gewonnen und durch Rapid Prototyping in dieses Modell aus Silikon umgewandelt. Die Geschwindigkeitsmessungen wurden mittels dreidimensionaler Particle Tracking Velocimetry durchgeführt. Es wurde gleichzeitig eine Methode für die Generierung eines hybriden Gitters für solch komplizierte Flüsse entwickelt. Somit wurde es möglich, das Experiment in der Simulation mit hoher Genauigkeit nachzuvollziehen und zu zeigen, dass Computersimulationen für die Berechnung von Blutströmungen im menschlichen Körper auf der Ebene der Arterien geeignet sind.

## SUMMARY

The nearly epidemic expansion of cardiovascular diseases in westernized societies along with the continuous increase of life expectancy rates pose a serious threat to public health and generate the need for novel and more efficient methods of treatment and diagnosis. Several disciplines have joined forces in order to assess the influence of both bio-chemical and mechanical parameters upon complex biomechanical systems, such as the aorta and the coronaries. Related research evolves in parallel within the fields of medical imaging and computational hemodynamics. The presented research results focused on major issues that are encountered in patient specific computational hemodynamics studies in the coronary arteries and in cases of abdominal aortic aneurysms. Extensive use of modern medical imaging technologies was made throughout this work to ensure the anatomical accuracy of these investigations. The utilization of anatomically accurate computational domains comes at a cost, including the need for appropriate physiological or pathological boundary conditions, the incorporation of moving and deforming computational domains, the need for advanced grid generation strategies and finally the need for experimental cross-validation of the generated computational results.

A method for mapping analytical or experimentally determined velocity profiles on realistic boundary cross-sections was formulated on the properties of the Schwarz Christoffel transformation. The need for the development of such interpolation methods arises from the fact that the computational and experimental domains are seldom aligned. In the absence of detailed velocity information the remaining alternative is the adaptation of analytical and usually axis-symmetric velocity profiles based solely on integrated volumetric flux information. The proposed technique permitted the transfer of velocity information between domains of identical topology but of different shape. We were able to circumvent interpolation problems arising from the shape variance of the source and target boundary domains by utilizing the conformal transformation to map one domain onto the other in its entirety.

The feasibility of simulating pulsatile blood flow within large sections of the coronary vasculature was also shown. By utilizing CT to acquire the anatomy of the first few branches of the left anterior descending coronary artery, we managed to reproduce the irregular distributions of wall shear stress, velocity and pressure that are typical of such irregular

continuously branching geometries. Conditions of disturbed and highly vortical flow correlated well with sites of increased wall shear stress temporal and spatial variations. These conditions are widely believed to favor the development of atherosclerosis, which precedes coronary artery disease. From a clinical perspective, the quantification of the blood flux distribution within the various sections of the coronary vasculature is of paramount importance.

One of the distinguishing features of the coronary arteries is that they undergo movement and deformation during the cardiac cycle due to their attachment to the moving myocardium. It was shown that the inclusion of both coronary motion and capacitance did little to change the overall bounds of the wall shear stress distribution and its temporal gradient. Under physiological pulsatile inflow conditions, the inclusion of capacitance causes a phase change to the wall shear stress time history without affecting the localization of its minima. In a utilized branchless model of a right coronary artery, these effects intensified in the distal portion partially amplified by the absence of outflow into the myocardium. Finally, this was the first known application of multi-slice CT imaging in the acquisition of coronary compliance data at several time instances within the cardiac cycle. Modern cardiac CT technology may prove sufficient for the determination of anatomy, motion and compliance information.

The question of validation was emphatically addressed by a combined computational and experimental steady flow investigation within an anatomically accurate model of an abdominal aortic aneurysm. Modern CT and rapid prototyping technologies were successfully combined to construct a silicone replica of patient specific anatomy suitable for experimental flow investigations. Velocity vector measurements were acquired by particle tracking velocimetry, an inherently three dimensional technique, under averaged physiological resting boundary conditions. A hybrid unstructured grid generation strategy, specifically suited to such irregular geometries, was developed in parallel and allowed the generation of highly accurate and grid independent computational fluid dynamics simulations in the same geometrical model and under identical boundary conditions. The results confirmed the agreement between the numerical and experimental simulations by successfully quantifying the large recirculation zones that characterize aneurismal flow, indicating the suitability of both approaches.