



Doctoral Thesis

## **Hemodynamics in cerebral arteries and aneurysms comparative velocity investigations with 3D phase-contrast magnetic resonance angiography, laser doppler velocimetry and computational fluid dynamics**

**Author(s):**

Hollnagel, Dorothea Ilse

**Publication Date:**

2008

**Permanent Link:**

<https://doi.org/10.3929/ethz-a-005558419> →

**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. 17658

**Hemodynamics in Cerebral Arteries and Aneurysms  
– Comparative Velocity Investigations with  
3D Phase-Contrast Magnetic Resonance  
Angiography, Laser Doppler Velocimetry and  
Computational Fluid Dynamics**

A dissertation submitted to

ETH ZURICH

for the degree of

DOCTOR OF SCIENCES

presented by

DOROTHEA Ilse HOLLNAGEL

Diplom-Ingenieurin  
Technische Universität Darmstadt

born May 27th 1978

citizen of Germany

accepted on the recommendation of

Prof. Dr. Dimos Poulikakos

Prof. Dr. Spyros Kollias

Dr. Paul Summers

2008

# Abstract

In the western world, around 4 % of the population develop an intracranial cerebral aneurysm in their lifetime, i. e. about 300.000 people in Switzerland. Cerebral aneurysms involve the risk of rupture, and mortality and morbidity in patients with ruptured aneurysms is extremely high. Thus, aneurysms need to be treated before a rupture occurs. However, as all currently available treatments are high risk invasive procedures, it would be of great benefit to be able to predict the future behavior of an aneurysm to decide if treatment is necessary. In this case, it would again be beneficial to foresee the course and the outcome of the procedure before the intervention is started.

Velocity mapping with Phase-Contrast Magnetic Resonance Angiography (PC-MRA) is a non-invasive method for performing in vivo measurements on blood flow. Based on these measurements, a realistic patient-specific computer model can be generated. With this model, the flow through the aneurysm can be simulated under different conditions, e. g. before, during and after a potential treatment. To reinforce user confidence in the computer generated models, the accuracy of the PC-MRA data and subsequent modeling must be validated.

Therefore, in this work a steady and realistic transient flow field in a well-defined patient-specific silicone phantom was investigated. Velocity measurements were performed with PC-MRA in a 3 Tesla MR scanner and Laser-Doppler velocimetry (LDV) and compared to each other. The results were also compared to the velocities obtained through numerical simulations with computational fluid dynamics (CFD) in a computer model developed from the silicone phantom and under the same flow conditions. Velocities were mapped across the inlet, outlets and within the aneurysm by both measurement methods while the numerical simulations were performed within the entire geometry.

The results showed that at the achieved resolution, PC-MRA was qualitatively comparable with LDV and CFD, but showed notable quantitative differences while LDV and CFD agreed well. The accuracy of velocity quantification by PC-MRA was best in straight artery regions with the measurement plane being perpendicular to the main flow direction. The accuracy decreased in regions with disturbed flow and in cases where the measurement plane was not perpendicular to the main flow direction. Due to these findings, it is appropriate to use PC-MRA as inlet and outlet conditions for numerical simulations to calculate velocities and shear stresses in disturbed regions like aneurysms, rather than to derive these values from the full PC-MRA measured velocity field in these regions.

# Zusammenfassung

In der westlichen Bevölkerung bilden ungefähr 4 % der Menschen in ihrem Leben ein intrakranielles zerebrales Aneurysma, das entspricht 300.000 Menschen in der Schweiz. Bei zerebralen Aneurysmen besteht das Risiko, dass sie platzen und es dadurch zu einer Hirnblutung kommt. Die Mortalität und Morbidität bei diesen Patienten ist extrem hoch, weshalb Aneurysmen idealerweise vor der Blutung behandelt werden sollten. Da zurzeit alle möglichen Behandlungsarten invasiv und mit einem erheblichen Risiko verbunden sind, wäre es von grossem Nutzen, das zukünftige Verhalten eines Aneurysmas vorhersagen und damit entscheiden zu können, ob eine Behandlung notwendig ist. Ausserdem wäre es hilfreich, vor Beginn der Behandlung, den Ablauf und Ausgang des Eingriffs abschätzen zu können.

Mit der Phasenkontrast-Kernspintomographie (Phase-Contrast Magnetic Resonance Angiography, (PC-MRA)) können nicht-invasive Geschwindigkeitsmessungen des Blutflusses durchgeführt werden. Mit Hilfe der Messungen kann ein realistisches, patientenspezifisches Computermodell erstellt werden, in dem die Strömung durch das Aneurysma in verschiedenen Situationen simuliert werden kann, z. B. vor, während und nach einer eventuellen Behandlung. Um jedoch die Akzeptanz der Computersimulationen zu unterstützen, muss zunächst die Genauigkeit der PC-MRA-Messungen und der anschliessenden Modellierung und Simulation validiert werden.

In dieser Arbeit werden ein konstantes und ein instationäres Strömungsfeld in einem definierten patientenspezifischen Silikonmodell untersucht. Es werden Geschwindigkeitsmessungen sowohl mit PC-MRA in einem 3 Tesla Kernspintomographen als auch mit der Laser-Doppler Anemometrie (Laser-Doppler velocimetry (LDV)) durchgeführt und miteinander verglichen. Ausserdem werden die Messergebnisse mit den berechneten Geschwindigkeiten aus numerischen Simulationen (CFD) verglichen. Für diese wird aus dem Silikonmodell ein Computermodell entwickelt, in dem die Simulationen unter denselben Strömungsbedingungen wie die Messungen am Silikonmodell durchgeführt werden.

Die Ergebnisse bestätigen, dass PC-MRA mit der erreichten Auflösung qualitativ mit LDV und CFD vergleichbar ist, aber nennenswerte quantitative Unterschiede zeigt, während LDV und CFD gut übereinstimmen. Die Genauigkeit der PC-MRA Geschwindigkeitsmessungen ist in geraden Arterienabschnitten mit einer senkrecht zur Hauptströmung ausgerichteten Messebene am grössten. In Regionen mit unruhiger Strömung, in denen die Messebene nicht senkrecht zur Hauptströmung ausgerichtet werden kann, nimmt die Genauigkeit ab. Infolge dieser Erkenntnisse ist PC-MRA geeignet, als Ein- und Ausströmungsbedingung für numerische Simulationen verwendet zu werden, um Geschwindigkeiten und Scherspannungen in unruhigen Strömungsregionen, wie Aneurysmen, zu berechnen. Dagegen ist PC-MRA weniger geeignet, Messungen in diesen Regionen durchzuführen, um die Scherspannungen aus den so erhaltenen Geschwindigkeitsfeldern abzuleiten.