

DISS. ETH Nr. 12390

Blutflussmessungen in Gefässbifurkationen und distal zu künstlichen Herzklappen mittels der Magnetresonanztchnik

ABHANDLUNG

zur Erlangung des Titels
eines Doktors der Naturwissenschaften
der

**EIDGENÖSSISCHEN TECHNISCHEN HOCHSCHULE
ZÜRICH**

vorgelegt von

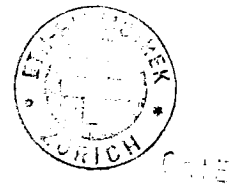
René Michael Botnar

Diplom Physiker

geboren am 26. Januar 1965

Bundesrepublik Deutschland

Angenommen auf Antrag von
Prof. Dr. Peter Bösigler, Referent
Prof. Dr. Erik Morre Pedersen, Korreferent



Zürich 1997

Zusammenfassung

Mittels der Magnetresonanztomographie können Funktionsstörungen des Herz-Kreislaufsystems aufgrund unterschiedlicher Messgrößen, wie z.B. Blutflussraten, Gewebedurchblutung oder Herzwandbewegung, erfasst werden. Daher ist die Magnetresonanztomographie von grossem klinischen Interesse und könnten zu einem besseren Verständnis des kardio-vaskulären Systems führen.

In der vorliegende Arbeit stand die Entwicklung und die Anwendung von neuen Pulssequenzen zur Erfassung von Blutflussgeschwindigkeiten in Gefässstrukturen mit komplexen Flussverhältnissen, wie sie z.B. distal zu künstlichen Herzklappen und in Gefässbifurkationen beobachtet werden, im Vordergrund. Um ein besseres Verständnis für die Fehlerquellen zu bekommen, die zu Quantifizierungsfehler der lokalen Blutflussgeschwindigkeiten führen, wurden MR-Blutflusseperimente mittels numerischer Simulationen untersucht. Anhand der Simulationsergebnisse wurden die MR-Sequenzen optimiert.

Es konnte gezeigt werden, dass Phasenkontrastsequenzen mit kurzen Echozeiten besonders gut zur Reduktion von Flussquantifizierungsfehler und von geometrischen Abbildungsfehler geeignet sind. In dieser Arbeit wurden die früher am Institut entwickelte FAcE-Technik (FID Acquired Echo) und eine modifizierte Partial-Echotechnik zur Flussbestimmung verwendet. Die FAcE-Technik wurde für Vektorflussmessungen in der Karotisbifurkation eingesetzt. Aufgrund der kurzen Echozeiten konnten Flussquantifizierungsfehler erheblich reduziert werden. Im Falle von Blutflussmessungen distal zu mechanischen Herzklappen wurde jedoch die Partial-Echotechnik vorgezogen. Aufgrund der grösseren Robustheit der Rekonstruktion war sie bei Messungen nahe des Herzens zuverlässiger als die FAcE-Technik.

Für die Auswertung der grossen Datenmengen, die bei Blutflussmessungen anfallen, wurde ein benutzergesteuertes Auswertungsprogramm entwickelt. Gefässkonturen konnten für jede Herzphase manuell eingezeichnet werden; aus den Pixelwerten innerhalb der Konturen werden hämodynamischen Größen, wie der mittlere Fluss, die mittlere Blutflussgeschwindigkeit, der mittlere Rückfluss, der Leckfluss oder das Schliessvolumen einer Herzklappe automatisch berechnet.

Ein Vergleich zwischen MR-Geschwindigkeitsmessungen mit Ergebnissen aus der Lösung der Navier-Stokes Gleichungen zeigte sowohl für das axiale als auch das transversale Geschwindigkeitsmuster (Sekundärströmung) gute Übereinstimmungen. Die Messungen wurden an einem Karotisbifurkationsmodell durchgeführt. Ein Vergleich der in-vitro Resultate mit Geschwindigkeitsmessungen an einem in-vivo Gefäss zeigten in beiden Fällen hohe Blutflussgeschwindigkeiten an der Gefässstrennwand und niedrige bis retrograde Geschwindigkeiten an der Gefässausseiwand. Die Sekundärströmungen wiesen dagegen deutliche Unterschiede auf. Im in-vivo Gefäss wurde ein einzelner Vortex und, im planaren Bifurkationsmodell wurden zwei entgegengesetzt rotierende Vortices beobachtet.

Blutflussgeschwindigkeitsmessungen distal zu mechanischen Herzklappen zeigten konstruktionsspezifische Geschwindigkeitsmuster, die, verglichen mit Strömungsfeldern distal zu nativen Herzklappen, deutlich höhere Spitzengeschwindigkeiten aufwiesen. Distal zu mechanischen Herzklappen konnte sowohl ein verändertes Rückflussverhalten, ein stark verändertes axiales Geschwindigkeitsprofil als auch ein höheres Schliessvolumen beobachtet werden. Diese Beobachtung verdeutlichen das Potential von Magnetresonanzgeschwindigkeitsmessung für die Untersuchung biomechanischer und

fluidynamischer Eigenschaften nativer und künstlicher Herzklappen. MR-Geschwindigkeitsmessungen könnten daher zur Optimierung neuer Herzklappenpräparate oder zur Diagnose von Herzklappenfunktionsstörungen verwendet werden.

In der vorliegenden Arbeit konnte gezeigt werden, dass Magnetresonanzblutflussmessungen das Potential haben sich in der kardio-vaskulären Grundlagenforschung und zu etablieren.

Summary

Magnetic resonance imaging allows the assessment of quantitative cardio-vascular parameters, such as blood flow velocity, tissue perfusion or heart wall motion. This capability is today of great clinical interest and may lead to a better understanding of the cardio-vascular system.

The present work dealt with the development and application of appropriate and accurate pulse sequences for the assessment of vectorial blood velocity patterns distal to native and prosthetic heart valves and within arterial bifurcations. Numerical simulations were performed for a thorough understanding of blood flow quantification errors due to the blood flow itself and due to the breathing motion. Based on this knowledge the pulse sequences were optimized with respect to the accuracy of the flow velocity and with respect to misalignment artifacts of blood vessels.

It could be shown that two sequences both based on a partial echo acquisition scheme allowed a reduction of flow quantification and misalignment errors. One of them is the FAcE-technique (FID Acquired Echo) previously developed at the institute. The second is a partial echo technique based on zeropadding of the missing samples. The FAcE-technique was used for vector flow measurements in the carotid bifurcation in volunteers. Due to its extremely short echo time it allowed to reduce flow quantification errors to a great extent. In case of blood flow measurements distal to the aortic valve or distal to mechanical heart valves in the aortic position the partial echo technique was favored. Due to its robustness it was more reliable for measurements close to the heart and therefore the slight increase in echo time was tolerable.

For an easy and interactive analysis of flow velocity data a software package was developed. It allowed to manually extract the vessel contours for each heart phase and to calculate different hemodynamic quantities such as the mean flow rate, the mean flow velocity, the mean retrograde flow rate, the leakage flow or the closing volume of a heart valve.

A comparison between magnetic resonance flow velocity measurements in a bifurcation model and numerical simulations showed a good agreement for axial as well as for vector flow patterns. Comparison of the in-vitro results with blood flow measurements in the human carotid bifurcation revealed for both high velocities at the flow divider wall and slow velocities at the opposite outer wall. The secondary flow patterns of both measurements, however differed significantly. In the human carotid bifurcation a single vortex was measured whereas in the model two counter rotating vortices could be observed.

Blood velocity measurements distal to mechanical heart valves revealed design specific velocity patterns, with significant higher peak flow velocities compared to native aortic valves. Distal to mechanical heart valves an altered reverse flow behavior a double peak velocity pattern and a higher closing volume were observed. These findings show the potential of MR blood flow measurements for the assessment of biomechanical and fluiddynamic properties of prosthetic heart valves. MR velocity mapping therefore could be used for optimization of fluiddynamic properties of prosthetic heart valves and for the assessment of heart valve diseases.

In the presented work the potential of magnetic resonance blood flow measurements for cardio-vascular applications could be demonstrated.