

Diss. ETH no 16267

TOWARDS FAST AND ACCURATE
CARDIAC MAGNETIC RESONANCE
FLOW QUANTIFICATION

A dissertation submitted to the
SWISS FEDERAL INSTITUTE OF TECHNOLOGY ZURICH

for the degree of

DOCTOR OF TECHNICAL SCIENCES

presented by

Christof Baltes

Dipl. El. Ing.

born July 12th, 1974

citizen of Losheim am See, Saarland, Germany

accepted on the recommendation of

Prof. Dr. Peter Boesiger, examiner

Prof. Dr. Erik Morre Pedersen, co-examiner

Summary

Over the last several years, cardiovascular magnetic resonance (MR) imaging has benefited from a number of technical advances which have extended and improved clinical applications. The combination of several MR acquisition techniques in one examination allows for the assessment of cardiac morphology, flow and perfusion at rest and under pharmacological or physical stress. Among these techniques, cardiac MR blood flow quantification represents an important method for the assessment of cardiovascular diseases. High accuracy and reproducibility as well as short acquisition times are particularly desired for this method to increase measurement reliability and patient comfort.

The present thesis focuses on two MR techniques for blood flow assessment: phase-contrast (PC) velocity mapping providing a single velocity value per image voxel and Fourier velocity encoding (FVE) acquiring the velocity distribution in each voxel at the expense of longer scan times. Advanced methods are presented to increase accuracy and to shorten scan times of both free-breathing and breath-hold PC and FVE acquisitions.

Flow quantification in the coronary arteries requires very high spatial and temporal resolutions leading to scan times exceeding the subject's breathhold capabilities. For this reason, data collection is performed during free-breathing. During the scan, navigator echoes are acquired to monitor respiratory motion and to gate data acquisition to quiescent periods in the respiratory cycle. To reduce the effect of any residual motion components due to increasing temporal latency between navigator echo and actual data acquisition during the cardiac cycle, a retrospective correction algorithm is presented. It is demonstrated that the quality of both anatomical images and velocity maps is considerably improved after the proposed correction resulting in an increased accuracy of blood flow quantification.

In breath-hold acquisitions the total scan time is restricted by the

breath-hold capability of the subject frequently leading to compromises in spatial and/or temporal resolutions. To overcome this limitation, PC velocity mapping is combined with the recently proposed *k-t* BLAST/*k-t* SENSE methods. Both approaches allow for considerably accelerated data collections of dynamic image series. To investigate the accuracy of the accelerated acquisitions for flow quantification, different flow and image quality related measures are derived. It is demonstrated that *k-t* BLAST/*k-t* SENSE accelerated acquisitions provide excellent image quality and accurate flow values at considerably reduced scan times.

At high acceleration factors the accuracy of flow quantification using *k-t* BLAST/*k-t* SENSE accelerated acquisitions is compromised by slight temporal low-pass filtering. To address this shortcoming, the impact of large coil arrays on *k-t* SENSE accelerated acquisitions is investigated. It is shown that the accuracy of flow quantification improves with an increasing number of coil elements at high acceleration factors.

To significantly shorten scan times of FVE acquisitions the *k-t* BLAST/*k-t* SENSE methods are extended to accommodate the velocity dimension as additional encoding axis. It is shown that the unique ability of FVE to accurately detected peak blood flow velocities remains uncompromised even at high acceleration factors. Applying the *k-t* SENSE method, FVE scan times can be reduced down to breath-hold durations facilitating the detection of peak blood flow velocities in the ascending aorta of both volunteers and patients. The measured peak velocities are in good agreement with results obtained by echocardiography. Moreover, FVE allows for accurate peak velocity detection in cases where echocardiography fails due to poor acoustic window conditions.

Zusammenfassung

In Laufe der letzten Jahre hat die kardiovaskuläre Magnetresonanzbildgebung (MR) erheblich von einer Reihe technischer Fortschritte profitiert, welche ihre klinische Anwendung erweitert und verbessert haben. Die Kombination verschiedener MR-Aufnahmetechniken in einer einzigen Untersuchung erlaubt es, kardiale Morphologie, Blutfluß und Perfusion sowohl in Ruhe als auch unter pharmakologischem oder physischem Streß zu beurteilen. Unter diesen Techniken stellt die MR-Blutflußmessung am Herzen eine wichtige Methode für die Diagnose und die Einschätzung des Schweregrades von kardiovaskulären Erkrankungen dar. Sowohl hohe Genauigkeit und Präzision als auch kurze Akquisitionszeiten sind bei dieser Methode von besonderem Interesse, um Meßzuverlässigkeit und Patientenkomfort zu erhöhen.

Die vorliegende Arbeit konzentriert sich auf zwei MR-Techniken zur Blutflußmessung: Zum einen *phase-contrast* (PC) Geschwindigkeitsmessungen und zum anderen *Fourier velocity encoding* (FVE). PC-Geschwindigkeitsmessungen ergeben einen einzigen Geschwindigkeitswert pro Bildelement (Voxel), während FVE die Messung der Geschwindigkeitsverteilung in jedem Voxel auf Kosten längerer Meßzeiten erlaubt. Zur Erhöhung der Genauigkeit und zur Verkürzung der Meßzeit von PC- und FVE-Messungen werden erweiterte Methoden vorgestellt. Diese beziehen sich auf Datenakquisitionen, welche sowohl unter freier Atmung als auch während eines Atemstopps durchgeführt werden.

Für die Quantifizierung des Blutflusses in den Koronararterien ist eine sehr hohe räumliche und zeitliche Auflösung erforderlich. Dies führt jedoch zu Meßzeiten, welche die Atemstoppkapazität von Patient/innen überschreitet. Aus diesem Grund wird die Datenaufnahme während freiem Atmen durchgeführt. Während der Messung werden sogenannte *navigator* Echos aufgenommen, um die Atembewegung zu überwachen und die

Datenakquisition auf Ruheperioden im Atemzyklus zu beschränken. Um den Einfluß zurückgebliebener Bewegungskomponenten zu verringern, die aufgrund der wachsenden Latenzzeit zwischen *navigator* Echo und eigentlicher Datenakquisition während des Herzzyklus auftreten, wird ein Algorithmus zur retrospektiven Korrektur vorgestellt. Es wird gezeigt, daß nach der Korrektur die Qualität sowohl von anatomischen Bildern als auch von Geschwindigkeitskarten deutlich verbessert ist, was in einer erhöhten Genauigkeit der Blutflußquantifizierung resultiert.

In Atemstoppaufnahmen ist die Gesamtmeßzeit häufig durch die Atemstoppkapazität der Patient/innen begrenzt, was zu einer Beschränkung der räumlichen und/oder zeitlichen Auflösung führt. Um diese Beschränkung zu überwinden, werden die PC-Geschwindigkeitsmessungen mit den kürzlich vorgestellten *k-t* BLAST/*k-t* SENSE Methoden kombiniert. Beide Ansätze erlauben eine erhebliche Beschleunigung der Datenakquisition von dynamischen Bildserien. Um die Genauigkeit der beschleunigten Akquisition bei Flußmessungen zu untersuchen, werden verschiedene auf Blutfluß und Bildqualität bezogene Maße hergeleitet. Hierbei wird gezeigt, daß mittels *k-t* BLAST/*k-t* SENSE beschleunigte Akquisitionen bei beträchtlich verkürzter Meßzeit hervorragende Bildqualität und genaue Flußwerte liefern.

Bei der Anwendung von *k-t* BLAST/*k-t* SENSE mit hohen Beschleunigungsfaktoren ist die Genauigkeit der Flußquantifizierung durch leichte zeitliche Tief-Pass-Filterung beeinträchtigt. Um dieses Defizit zu bewältigen, wird der Einfluß von Spulenanordnungen mit vielen Elementen auf die *k-t* SENSE beschleunigte Akquisition untersucht. Es zeigt sich, daß bei hohen Beschleunigungsfaktoren die Genauigkeit der Flußquantifizierung für eine zunehmende Anzahl von Spulenelementen verbessert wird.

Um die Meßzeit von FVE Akquisitionen zu verringern, werden die *k-t* BLAST/*k-t* SENSE Methoden so erweitert, daß die Geschwindigkeitsdimension als zusätzliche Kodierrichtung miteinbezogen wird. Es wird gezeigt, daß die einzigartige Fähigkeit von FVE, die Spitzengeschwindigkeit des Blutflusses genau zu bestimmen, sogar bei hohen Beschleunigungsfaktoren unverändert bleibt. Durch die Verwendung der *k-t* SENSE Methode kann die Meßzeit für einen FVE Datensatz auf die Dauer eines Atemstopps reduziert werden. Dies ermöglicht die Bestimmung der Spitzengeschwindigkeit in der *Aorta ascendens* von Proband/innen und Patient/innen. Die gemessenen Spitzengeschwindigkeiten stimmen gut mit Echokardiographiewerten überein. Darüber hinaus erlaubt FVE die genaue Bestimmung

der Spitzengeschwindigkeit auch in Fällen, in denen die Echokardiographie aufgrund von schlechten akustischen Bedingungen versagt.