

**Lukas Diedrich**

# Validierung der raumzeitlichen Genauigkeit von Verfahren der Echtzeit-MRT

**Bachelorarbeit**

# BEI GRIN MACHT SICH IHR WISSEN BEZAHLT



- Wir veröffentlichen Ihre Hausarbeit, Bachelor- und Masterarbeit
- Ihr eigenes eBook und Buch - weltweit in allen wichtigen Shops
- Verdienen Sie an jedem Verkauf

Jetzt bei [www.GRIN.com](http://www.GRIN.com) hochladen  
und kostenlos publizieren



## **Bibliografische Information der Deutschen Nationalbibliothek:**

Die Deutsche Bibliothek verzeichnet diese Publikation in der Deutschen Nationalbibliografie; detaillierte bibliografische Daten sind im Internet über <http://dnb.d-nb.de/> abrufbar.

Dieses Werk sowie alle darin enthaltenen einzelnen Beiträge und Abbildungen sind urheberrechtlich geschützt. Jede Verwertung, die nicht ausdrücklich vom Urheberrechtsschutz zugelassen ist, bedarf der vorherigen Zustimmung des Verlanges. Das gilt insbesondere für Vervielfältigungen, Bearbeitungen, Übersetzungen, Mikroverfilmungen, Auswertungen durch Datenbanken und für die Einspeicherung und Verarbeitung in elektronische Systeme. Alle Rechte, auch die des auszugsweisen Nachdrucks, der fotomechanischen Wiedergabe (einschließlich Mikrokopie) sowie der Auswertung durch Datenbanken oder ähnliche Einrichtungen, vorbehalten.

## **Impressum:**

Copyright © 2016 GRIN Verlag, Open Publishing GmbH  
ISBN: 9783668251861

## **Dieses Buch bei GRIN:**

<http://www.grin.com/de/e-book/335122/validierung-der-raumzeitlichen-genauigkeit-von-verfahren-der-echtzeit-mrt>

**Lukas Diedrich**

**Validierung der raumzeitlichen Genauigkeit von Verfahren der Echtzeit-MRT**

## **GRIN - Your knowledge has value**

Der GRIN Verlag publiziert seit 1998 wissenschaftliche Arbeiten von Studenten, Hochschullehrern und anderen Akademikern als eBook und gedrucktes Buch. Die Verlagswebsite [www.grin.com](http://www.grin.com) ist die ideale Plattform zur Veröffentlichung von Hausarbeiten, Abschlussarbeiten, wissenschaftlichen Aufsätzen, Dissertationen und Fachbüchern.

### **Besuchen Sie uns im Internet:**

<http://www.grin.com/>

<http://www.facebook.com/grincom>

[http://www.twitter.com/grin\\_com](http://www.twitter.com/grin_com)

TECHNISCHE UNIVERSITÄT ILMENAU

FAKULTÄT FÜR INFORMATIK UND AUTOMATISIERUNG

VALIDIERUNG DER RAUMZEITLICHEN  
GENAUIGKEIT VON VERFAHREN DER  
ECHTZEIT-MRT

**Bachelorthesis**

zur Erlangung des akademischen Grades

**Bachelor of Science**

vorgelegt von

LUKAS DIEDRICH

Ilmenau, 2016

## *Danksagung*

Meine fachlichen und sozialen Kompetenzen konnte ich im Verlauf dieses Praktikums weitreichend verbessern. Dies verdanke ich hauptsächlich der ausgezeichneten Arbeitsatmosphäre und natürlich meinen Kollegen.

An dieser Stelle möchte ich mich bei allen Angestellten der „Biomedizinischen NMR Forschungs GmbH“ für die aufschlussreiche Zeit bedanken.

Besonderer Dank gilt Dr. Klaus-Dietmar Merboldt, der mich bei der Ausarbeitung meines Themas jederzeit unterstützt hat.

Nicht zuletzt möchte ich mich bei Prof. Dr. Jens Frahm für die Möglichkeit dieses Praktikums und viele wichtige Ratschläge bedanken.

## Abstract

Magnetic resonance imaging (MRI) is a noninvasive modality for diagnostic imaging, which is widely available for clinical applications. Recent advances in real-time MRI allow for the recording of MRI movies at high temporal resolution. The approach combines radially encoded gradient-echo MRI sequences with pronounced data undersampling and image reconstruction by regularized nonlinear inversion (NLINV). Real-time MRI for the first time visualizes arbitrary physiologic processes in the human body.

The aim of this study was to evaluate the spatiotemporal acuity of real-time MRI sequences and to identify the limits of temporal fidelity. This is accomplished with use of an experimental setting which realizes rapid rotations of small objects within the MRI system. The results are based on extensive measurements with systematic variations of acquisition and reconstruction parameters in order to cover a wide spectrum of real-time MRI applications. The development of a MATLAB program enabled a largely automated analysis of the experimental results.

In general, the motion phantom helped to confirm a high spatial and temporal accuracy of real-time image reconstructions by NLINV. In special cases, the results were complemented by computer simulations which served to assign the source of image artifacts to the choice of specific acquisition parameters.

In more detail, it was shown that a high spatiotemporal acuity is achieved, if the displacement of the object from frame to frame does not exceed  $\frac{1}{3}$  of its size (for small objects relative to the field-of-view). This acuity is neither affected by a variation of the temporal or spatial resolution, nor by the degree of data undersampling. When studying gradient-echo sequences with different MRI contrasts, balanced SSFP versions turned out to be particularly sensitive to a perturbation of the state of equilibrium due to motion. The implementation of motion-compensating gradients proved only to be reasonable when longer echo times are required. Better results are achieved for the shortest possible echo times without motion compensation.

For the iterative NLINV reconstruction the use of a higher number of Newton steps led to slightly better results. It was also feasible to reconstruct images without temporal regularization depending on the size and motion of the object and the ratio of stationary to moving signals. However, this observation is exclusively due to the special design of the motion phantom, because temporal regularization is unavoidable for all real-time MRI applications



in vivo. The parallel execution of computational tasks within one process (multithreading) did not affect the results. On the other hand, post-processing of image series by a temporal median filter generally compromised the temporal acuity. For small objects rotating at high velocities the median filter only could reach acceptable results for a temporal resolution of at least 18 ms and an object displacement which does not exceed  $\frac{1}{5}$  of its diameter.

## Zusammenfassung

Die Magnetresonanz-Tomographie (MRT) ist ein nichtinvasives bildgebendes Verfahren, das klinisch weit verbreitet ist und zur Diagnose zahlreicher Krankheitsbilder genutzt wird. Seit kurzem ermöglicht die Echtzeit-MRT die Aufnahme von MRT-Filmen mit hoher zeitlicher Auflösung. Das Verfahren kombiniert schnelle Gradientenechosequenzen mit stark unterabgetasteter radialer Ortskodierung und Bildrekonstruktion durch regularisierte nichtlineare Inversion (NLINV). Die Echtzeit-MRT kann erstmalig beliebige bewegte Vorgänge im menschlichen Körper abbilden.

Die vorliegende Arbeit verfolgte das Ziel, mithilfe eines experimentellen Aufbaus, der im MRT-System schnelle Rotationsbewegungen kleiner Objekte realisiert, die raumzeitliche Genauigkeit der Echtzeit-MRT zu untersuchen und die Grenzen einer verlässlichen Abbildung festzulegen. Dazu wurden zahlreiche Messreihen durchgeführt, bei denen systematisch verschiedene Parameter der Datenaufnahme und Bildrekonstruktion variiert wurden, um ein weites Spektrum verschiedener Anwendungsbereiche der Echtzeit-MRT abzudecken. Ein zu diesem Zweck implementiertes MATLAB-Programm ermöglichte eine weitgehend automatisierte Auswertung der Messergebnisse.

Insgesamt konnte mit Hilfe des Bewegungsphantoms eine hohe raumzeitliche Genauigkeit der durch NLINV rekonstruierten Bilder nachgewiesen werden. In besonderen Fällen wurden die Ergebnisse mit Hilfe einer Computer-Simulation bestätigt, mit der die Bildfehler der Echtzeit-MRT dem Einfluss ausgewählter Sequenzparameter zugewiesen werden konnten.

Im Einzelnen wurde gezeigt, dass eine hohe raumzeitliche Genauigkeit gegeben ist, sofern die Objektverschiebung von Bild zu Bild höchstens  $\frac{1}{3}$  dessen Größe beträgt (bei kleinen Objekten relativ zum Messfeld). Diese Genauigkeit wird weder durch eine Variation der zeitlichen oder räumlichen Auflösung der Einzelbilder, noch durch verschieden starke Unterabtastungen beeinflusst. Bei der Untersuchung unterschiedlicher Bildkontraste stellte sich für die balanced SSFP-Variante eine besonders hohe Empfindlichkeit gegenüber Störungen des Gleichgewichtszustandes durch Bewegung heraus. Eine Bewegungskompensation durch Magnetfeldgradienten zeigte sich nur sinnvoll bei Aufnahmen, die längere Echozeiten verlangen. Bessere Ergebnisse konnten grundsätzlich mit sehr kurzen Echozeiten unter Verzicht auf die Bewegungskompensation erreicht werden.

Eine erhöhte Anzahl der für die iterative NLINV-Berechnung verwendeten Newton-Schritte

föhrt zu geringfügig besseren Ergebnissen. Darüber hinaus war es aufgrund der speziellen Konfiguration des Phantoms möglich, die für die *in vivo*-Anwendungen der Echtzeit-MRT unverzichtbare zeitliche Regularisierung der NLINV-Berechnung abzuschalten, und zwar in Abhängigkeit von Größe und Bewegungsart des zu untersuchenden Objektes sowie vom Verhältnis von statischem zu bewegtem Gewebe. Die parallele Bearbeitung von Ausführungssträngen innerhalb des Rekonstruktionsprozesses (*multithreading*) zeigte dagegen keinen Einfluss. Die Verwendung eines nachgeschalteten zeitlichen Median-Filters für die Bildserien erwies sich in der Regel als schädlich. Für kleine Objekte mit hoher Geschwindigkeit konnte der Median-Filter nur bei einer hohen zeitlichen Auflösung von mindestens 18 ms pro Bild und einer Objektverschiebung von höchstens  $\frac{1}{5}$  des Durchmessers akzeptable Ergebnisse erzielen.

# Inhaltsverzeichnis

Danksagung	i
Abstract	ii
Zusammenfassung	iv
<b>1 Einleitung und Motivation</b>	<b>1</b>
<b>2 Grundlagen der Magnetresonanz-Tomografie</b>	<b>4</b>
2.1 Kernmagnetische Resonanz . . . . .	5
2.2 Anregung und Relaxation . . . . .	6
2.3 Kartesische Ortskodierung . . . . .	9
2.3.1 Schichtauswahl . . . . .	10
2.3.2 Frequenzkodierung . . . . .	11
2.3.3 Phasenkodierung . . . . .	12
2.4 Der k-Raum . . . . .	13
2.5 Magnetresonanz-Signale . . . . .	15
2.5.1 Freier Induktionszerfall . . . . .	15
2.5.2 Gradientenecho . . . . .	16
<b>3 Echtzeit-Magnetresonanz-Tomografie</b>	<b>19</b>
3.1 FLASH-Sequenz . . . . .	20
3.1.1 Spoiled SSFP . . . . .	22
3.1.2 Refocused SSFP . . . . .	22
3.1.3 Balanced SSFP . . . . .	23
3.2 Radiale Ortskodierung . . . . .	24
3.3 Bildrekonstruktion . . . . .	26
3.3.1 Parallele Bildgebung . . . . .	26