



Doctoral Thesis

## **Diffusion-weighted MRI volume selection, field monitoring and image reconstruction**

**Author(s):**

Wilm, Bertram Jakob

**Publication Date:**

2009

**Permanent Link:**

<https://doi.org/10.3929/ethz-a-005820836> →

**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. 18318

---

Diffusion-Weighted MRI  
—  
Volume Selection, Field Monitoring  
and Image Reconstruction

A dissertation submitted to the  
Swiss Federal Institute of Technology Zurich

for the degree of

Doctor of Sciences

presented by

**Bertram Jakob Wilm**

Dipl. inf. TUM  
born July 4<sup>th</sup>, 1979  
citizen of Germany

accepted on the recommendation of

Prof. Dr. Peter Boesiger  
Prof. Dr. Spyros Kollias

---

Zurich, 2009

# Summary

Diffusion-weighted imaging (DWI) is a powerful magnetic resonance imaging (MRI) technique to assess Brownian motion induced diffusion processes of water molecules in human tissue. DWI allows an indirect measurement of underlying tissue microstructure, enabling the investigation of pathologic changes on a microscopic level. In this context structural changes can be followed over the time course of a disease, thus providing a valuable tool to help understand the underlying pathologies, as well as to improve outcome prediction and medical treatment. At present, diffusion-weighted imaging is used as an important contribution in the diagnosis of acute ischemia and is currently being investigated for the diagnosis of a variety of other diseases.

One of the key-problems in DWI is the inherently low signal-to-noise ratio, which limits it to a relatively coarse image resolution, and noise contamination in the image reduces specificity and sensitivity of diagnoses based on DWI. The limited resolution restricts the application of this method to larger pathologies and complicates the distinction of pathologic and healthy tissue respectively, which again confines the specificity and sensitivity of the method. Additionally, DWI easily suffers from motion artifacts caused by minimal physiological motion such as cardiac pulsation and respiration. The so called "single-shot" methods are relatively robust against motion artifacts, but suffer from distortions that are induced by local variation in magnetic susceptibility. Moreover, eddy currents induced into the conducting components of the MR system that arise during the DWI sequence will also lead to image distortions. In both cases it is once again necessary to constrain the image resolution.

The present dissertation is dedicated to the development of new concepts

for improving acquisition techniques for DWI, in particular to increase the feasibility of DWI in the spinal cord. As compared to DWI in the brain, the small cross-sectional area of the spinal requires a particularly high image resolution. Additionally, image acquisition is also complicated by the inhomogeneous magnetic environment, and by the pulsatile motion of the cerebrospinal fluid around the cord and the spinal cord itself. In this context, the main focus was the implementation and investigation of an MRI sequence which enables a robust DWI of the spinal cord with adequate image quality. Similar to parallel imaging techniques, a reduction in field-of-view enables to shorten the acquisition duration for single-shot sequences, thereby achieving enhanced image resolution, substantially diminished susceptibility artifacts, and an increase in signal-to-noise ratio in the data. The method is currently employed in three clinical studies for investigating spinal cord multiple sclerosis, spinal cord trauma and for the detection of prostate carcinomas.

A second aim of this work was dedicated to solving the problem of image distortions that are caused by eddy-current induced field perturbations during the DW sequence. To tackle this problem on a general level, magnetic field monitoring was employed. The actual spatial-temporal field evolution can be measured during image acquisition using NMR probes that have been recently developed at the Institute of Biomedical Engineering. The field evolution data is incorporated into image reconstruction, allowing all deviations from the desired image encoding to be corrected without relying on prior knowledge or model-based approaches. In the course of this project, the NMR-probe hardware was enhanced to achieve robust and independent excitation of the probes, which enables assessment of the field evolution during the diffusion-weighted experiments. These measurements revealed new insights into the cause and the characteristics of the magnetic field deviations, specifically that the eddy-current induced fields have considerable contributions that are non-linear in space. To correct for the resulting image distortions, an algorithm was developed that allows direct integration of higher-order dynamic fields. This approach included difficulties not only in developing new formalisms to describe these fields, but also in the numerical complexity of the image reconstruction, which can no longer depend on time efficient algorithms used for Fourier-encoded imaging. The presented method contributes to the improvement of DWI in the spinal cord by directly enhancing image acquisition for spatially limited regions (focal anatomy), as well as by developing a general method to ac-

count for deviations from the desired image encoding in diffusion-weighted imaging. Future development of these methods, and combination with existing techniques, holds the potential to open up a wide range of advances in other areas of MR imaging and spectroscopy.

# Zusammenfassung

Die auf der Magnetresonanztomographie (MRT) basierende Diffusionsbildgebung ermöglicht es, die auf Grund der Brown'schen Bewegung stattfindenden Diffusionsprozesse von Wassermolekülen in menschlichem Gewebe zu erfassen. Indirekt können so Rückschlüsse auf das zugrunde liegende Gewebe gezogen werden. Insbesondere ermöglicht sie die Untersuchung von mikrostrukturellen Veränderungen, die im Zusammenhang mit verschiedensten Pathologien auftreten können. So ist die Diffusionsbildgebung unter anderem ein wichtiger diagnostischer Baustein bei akuter Ischämie (Schlaganfall) und wird derzeit für die Diagnostik vieler anderer Krankheitsbilder untersucht. Dabei können strukturelle Veränderungen während des zeitlichen Verlaufs von Krankheiten studiert bzw. überwacht werden. Die so gewonnenen Erkenntnisse leisten einen wertvollen Beitrag zum besseren Verständnis von Ursache, Prognose und Therapie dieser Krankheiten.

Eine der Hauptschwierigkeiten bei der Diffusionsbildgebung besteht darin, dass das inhärent niedrige Signal-zu-Rausch-Verhältnis in den Bild-daten nur eine relativ schlechte räumliche Auflösung zulässt. Verrauschte Daten vermindern die Spezifität und Sensitivität der auf Grundlage der Daten gestellten Diagnose. Die eingeschränkte Auflösung limitiert die Anwendung der Methode auf grössere Pathologien bzw. erschwert die Unterscheidung von gesundem und krankem Gewebe, was wiederum zu einer Einschränkung von Sensitivität bzw. Spezifität der Methode führt. Ein zweites Problem ist, dass abhängig von der gewählten Aufnahmetechnik auch schon minimale physiologische Bewegungen (bedingt durch Herzschlag und Atmung) zu Bildartefakten führen können. Sogenannte Single Shot-Akquisitionstechniken sind relativ robust gegenüber Bewegungsartefakten, allerdings kommt es hier häufig zu Bildverzerrungen, die durch

lokale Variation der magnetischen Suszeptibilität des Gewebes ausgelöst werden. Ausserdem können Wirbelströme, die im Zuge der Diffusionsgewichtung in leitfähige Teile des MR-Tomographen induziert werden, globale Bildverzerrungen verursachen. In beiden Fällen führt dies wieder zu einer Reduzierung der erreichbaren Bildauflösung.

Die vorliegende Dissertation beschäftigt sich mit der Entwicklung neuer Konzepte für die Aufnahme und Rekonstruktion von diffusionsgewichteten MR-Bildern.

Das Ziel war es, die Diffusionsbildgebung, die sonst vorwiegend im Gehirn angewendet wird, auch im Rückenmark zu etablieren. Durch die kleine Querschnittsfläche des Rückenmarks ist eine besonders hohe Auflösung der Bilder nötig, wobei die Aufnahme zusätzlich durch das inhomogene magnetische Umfeld und durch pulsatile Bewegung des Rückenmarks erschwert wird. Schwerpunkt der Arbeit bestand hierbei in der Entwicklung und Analyse einer MR-Sequenz, die eine robuste Aufnahme des Rückenmarks ermöglicht. Ähnlich zu den parallelen MRI-Verfahren, kann durch eine Einschränkung des abzubildenden Bildausschnittes eine Verkürzung der Akquisitionsdauer für Single Shot-Aufnahmen erreicht werden. Dadurch ermöglicht man eine Verbesserung der Bildauflösung, stark verringerte suszeptibilitätsbedingte Verzerrungen, sowie einer Erhöhung des Signal-zu-Rausch-Verhältnisses in den Daten. Die Methode wird derzeit in drei klinischen Studien zur Untersuchung von spinaler Multiple Sklerose und spinalem Trauma sowie zur Detektion von Prostatakarzinomen eingesetzt. Ein zweiter Schwerpunkt dieser Arbeit beschäftigt sich mit der Lösung der durch Wirbelströme verursachten Bildverzerrungen, welche auch die Diffusionsbildgebung in Rückenmark betrifft. Dabei kommt das sogenannte *Magnetfeld-Monitoring* zum Einsatz. Die Grundlage dafür schaffen NMR-Proben (nuclear magnetic resonance), die vor kurzem am Institut für Biomedizinische Technik der ETH entwickelt wurden. Diese ermöglichen die Messung der raumzeitlichen Feldentwicklung, die gleichzeitig mit der Bildakquisition stattfinden kann. Diese Daten werden dann zur Rekonstruktion der Bilder herangezogen. Anders als bei bisherigen Verfahren können alle Abweichungen von der angenommenen Bildkodierung miteinbezogen werden, ohne dabei auf Vorwissen bzw. modellbasierte Annahmen zurückgreifen zu müssen. Durch eine Weiterentwicklung der NMR-Proben-Hardware im Zuge dieser Dissertation, die eine robuste und unabhängige Anregung der Proben gestattet, konnten Feldevolutionen während der Dif-

fusionsbildgebungsexperimente erhoben werden. Dabei kamen neue Erkenntnisse über die Ursachen und Ausprägungen von Abweichungen gegenüber der gewünschten Bildkodierung zutage. So konnte gezeigt werden, dass die durch Wirbelströme induzierten Felder eine starke räumliche Nicht-Linearität aufweisen und einen erheblichen Teil der Bildverzerrungen verursachen. Um diese zu korrigieren, wurde ein Algorithmus entwickelt, der allgemein die Einbeziehung von zeitlich-dynamischen Feldern höherer räumlicher Ordnungen ermöglicht. Die Schwierigkeiten lagen dabei nicht nur in der Entwicklung neuer Formalismen zur Beschreibung und Integration dieser Felder, sondern auch in der numerischen Komplexität der Bildrekonstruktion, die nicht mehr auf effizienten Algorithmen für Fourierbasierte Bildkodierung zurückgreifen kann.

Die hier vorgestellten Methoden tragen zu einer Verbesserung der Diffusionsbildgebung im Rückenmark bei, einerseits durch direkte Verbesserung der Akquisition in örtlich beschränkten Regionen, andererseits durch ein generelles Verfahren zur Messung und Korrektur von Kodierungsabweichungen in diffusionsgewichteten Aufnahmen. Durch Weiterentwicklung und Kombination dieser Methoden mit anderen existierenden Verfahren bestehen weitreichende Möglichkeiten für zukünftige Verbesserung in vielen Bereichen der MR-Bildgebung und MR-Spektroskopie.