

Dr. rer. nat. Dipl. Phys. Steffen Sammet
Dr. med.

Diffusionsgewichtete Magnetresonanztomographie des menschlichen Gehirns bei 7T

Promotionsfach: Radiologie
Doktorvater: Prof. Dr. med. Dr. h.c. Michael V. Knopp

In dieser Arbeit wurde diffusionsgewichtete Magnetresonanztomographie (MRT) und Diffusionstensorbildgebung des menschlichen Gehirns in-vivo an einem 7 T Ganzkörper- Ultrahochfeld-MR-Tomographen untersucht.

Nach Zustimmung der lokalen Ethikkommission wurden 15 Probanden mit Hilfe diffusionsgewichteter MR-Bildgebung bei 7 T untersucht. Diffusionsgewichtete MR-Bildgebung ist nicht-invasiv, sie verwendet keine ionisierende Strahlung und benötigt keine Kontrastmittel. Diffusionsgewichtete Magnet Resonanz Tomographie (MRT) misst die Diffusion von Wassermolekülen im Gewebe. In der radiologischen Diagnostik wird diffusionsgewichtete MRT zur Untersuchung von Diffusionsdefekten im Gewebe insbesondere bei neurologischen Erkrankungen verwendet. Eine Variante der diffusionsgewichteten MRT, die sogenannte Diffusionstensorbildgebung (DTI), misst zusätzlich die Gewebswasserdiffusion in verschiedenen Raumrichtungen und erlaubt die Rekonstruktion von Nervenfasern und deren Verläufe im Gehirn. Diffusionsgewichtete MRT ist aufgrund der Aufnahmetechnik durch ein niedriges Signal-Rausch-Verhältnis und eine hohe Artefaktanfälligkeit charakterisiert. Die Magnetresonanztomographie entwickelte sich in den letzten 20 Jahren rasant und durch eine Verbesserung der gesamten Hardware ist es heute möglich, auch bei Magnetfeldern über 3 T kontrastreiche und radiologisch verwertbare MR-Bilder zu gewinnen. Bei hohen Magnetfeldern profitiert die Aufnahme von MR-Bildern von einem hohen Signal-Rausch-Verhältnis, da das Signal-Rauschverhältnis mit der Magnetfeldstärke ansteigt. Ein hohes Signal-Rausch-Verhältnis kann direkt in eine kürzere Messzeit oder in eine höhere örtliche Auflösung umgesetzt werden. Dadurch ist es möglich, bei MR-Untersuchungen den Patienten lange Untersuchungszeiten zu ersparen bzw. für die radiologische Diagnostik detailreicherer Aufnahmen zu gewinnen. Jedoch ist diffusionsgewichtete MRT bei ultrahohen Magnetfeldstärken aufgrund der Artefaktanfälligkeit limitiert. Bei ultrahohen Magnetfeldern treten insbesondere bei der Verwendung der schnellen EPI-Singleshot-Aufnahmetechnik verstärkt Bildartefakte auf.

In dieser Arbeit wurden daher Lösungen zur Verbesserung diffusionsgewichteter MR-Bildgebung bei 7 T aufgezeigt. Die Verwendung von Shimming, Wirbelstromkompensation, EPI-Verzeichnungskorrekturen, der parallelen Bildgebungstechnik SENSitivity Encoding (SENSE) und die Vergrößerung der Anzahl der Diffusionsgradientenraumrichtungen bei ultra-hohen Magnetfeldern verbessert die Bildqualität diffusionsgewichteter MR-Bilder signifikant und

ermöglicht die Aufnahme diagnostisch verwertbare MR-Bilder. Die aufgezeigten Verbesserungen der diffusionsgewichteten MR-Bildgebung bei 7 T ermöglichte auch die Nervenbahnrekonstruktionen (Fibertracking) aus Ultrahochfeld DTI-Datensätzen in-vivo im Gehirn von Probanden und Patienten.

Es zeigte sich, dass diffusionsgewichtete MR-Bildgebung bei ultrahohen Magnetfeldern von Signalaufnahmen des MR-Signals mit multiplen parallelen MR-Spulen profitiert. Die Verwendung der parallelen Bildgebungstechnik SENSE (SENSitivity Encoding) erlaubte, durch eine Unterabtastung des k-Raums, eine schnellere Aufnahme von MR-Bildern und zusätzlich eine Reduktion der Bildartefakte. Erst durch die Verwendung von SENSE war es möglich diagnostisch verwertbare Parameterbilder zu berechnen, die pixelweise die den Apparent Diffusion Coefficient (ADC) und die Fraktionelle Anisotropie (FA) darstellen. ADC- und FA-Parameterbilder werden in der radiologischen Diagnostik verwendet, um Rückschlüsse auf die Struktur des Gewebes zu ziehen, in dem das Wasser diffundiert. ADC und FA sind in Arealen mit Pathologien verändert, da sich die Beweglichkeit der Wasser-Moleküle erhöht oder vermindert.

Es wurden ADC Werte in grauer und weißer Substanz des menschlichen Gehirns in-vivo bestimmt. Hierbei zeigten statistische Tests, dass die mittleren ADC Werte von grauer und weißer Substanz von gesunden Probanden bei 7 T signifikant unterschiedlich sind.

DTI Datensätze können zur nicht-invasiven Rekonstruktion von Nervenfaserverläufen im Gehirn mit Hilfe von Fibertrackingtechniken verwendet werden. Bei Fibertrackingtechniken wird die Hauptdiffusionsrichtung, die die Orientierung der Nervenfasern widerspiegelt, benutzt werden, um den Verlauf von Nervenbahnen zu rekonstruieren. Üblich sind hierbei Darstellungen dreidimensionaler Linien in unterschiedlichen Farbkodierungen für die verschiedenen Raumrichtungen.

Auch das in-vivo Fibertrackingverfahren bei 7 T profitiert von der Verwendung der parallelen Bildgebungstechnik SENSE. In einer Probandenstudie wurde gezeigt, dass SENSE mit einem Akzellerationsfaktor $SENSE=4$ bei Verwendung einer 16-Kanal Kopfspule Störungen in der Nervenbahnrekonstruktion im menschlichen Gehirn auf ein Minimum zu reduziert und ein adäquates Signal-Rausch-Verhältnis zulässt. In einem Tumorpatienten gelang es bei Verwendung von SENSE DTI-Datensätzen bei 7 T den Verlauf von intakten Nervenfasern darzustellen und intraoperativ durch Neurochirurgen zu bestätigen.

Im Rahmen dieser Arbeit wurde ebenfalls analysiert welche Komponenten Nachverarbeitungsprogramme für diffusionsgewichtete ultrahochfeld MR-Datensätze enthalten sollten. Nachverarbeitungsprogramme für DWI- und DTI-Datensätze sind z.B. für die Bestimmung von Diffusionsparametern, Statistiken und Fibertracking notwendig. Eine Analyse bei unter-

schiedlichen DTI-Nachverarbeitungsprogrammen zeigte, dass keines, der sich im Moment auf dem Markt befindlichen Programmen, zur Analyse von diffusionsgewichteten Ultrahochfeld-MR-Datensätzen eine umfassende Nachverarbeitung ermöglicht, so dass zur Nervenbahnrekonstruktion verschiedene Auswertemodule oder selbstgeschriebene Software verwendet werden müssen.

Diffusionsgewichtete MR-Bildgebung und Fibertracking des menschlichen Gehirns sind auch in vivo bei 7 T in der radiologischen Diagnostik möglich, wenn verbesserte Aufnahmetechniken zur Bildakquisition und eine aufwändige Bildnachverarbeitung verwendet werden.