

Dipl.Ing. (FH) Thorsten Kästel
Dr. sc. hum.

Steady-State Free Precession als Technik zur magnetresonanztomographischen Beurteilung spinaler Kompressionssyndrome vor und nach operativer Stabilisation mit Titan-Implantaten: Anatomie, Funktion, Artefakte

Promotionsfach: Neurologie (Neuroradiologie)
Doktormutter: Prof. Dr. rer. nat. S. Heiland

In der perioperativen Schnittbilddiagnostik von Schädigungen des Rückenmarks und der Spinalnerven bei orthopädischen Erkrankungen bzw. Verletzungen liefern radiologische Schnittbildverfahren, insbesondere die MRT, wichtige Informationen. Derzeit bietet die MRT jedoch noch unzureichende Hinweise darüber, ob Schäden transient oder permanent sind. Eine vielversprechende Technik wäre hier das "Diffusion Tensor Imaging" (DTI), welche sich bei der funktionellen Untersuchung des Gehirns etabliert hat. Die dabei verwendeten Sequenztechniken lassen sich jedoch nur schwer bei Untersuchungen im Rückenmark anwenden, da aufgrund der anatomischen Gegebenheiten (Knochen- Gewebeübergang, Spongiosa in den Wirbelkörpern) die Homogenität des Magnetfelds entlang der Wirbelsäule deutlich geringer ist als innerhalb des Schädels. Außerdem verfügen diese Sequenzen nicht über die räumliche Auflösung, die für die Untersuchung des Myelons bzw. der Spinalnerven benötigt wird. Durch das Einbringen metallischer Implantate bei Schädigungen der Wirbelsäule kommt es zudem noch bei den MR-Techniken, die für die DTI verwendet werden, zu großflächigen Artefakten, welche die Diagnostik unmöglich machen (Signalauslöschungen, Verzerrungen).

In dieser Arbeit sollte eine alternative MR-Technik etabliert werden, mit deren Hilfe eine Aussage über die Mikrostruktur des Rückenmarks und der Spinalnerven getroffen werden kann. Hierzu wurde in dieser Arbeit eine diffusionsgewichtete SSFP-Sequenz etabliert. Bei der hierfür verwendeten Basissequenz, der SSFP-Sequenz, handelt es sich um eine in der klinischen Routine etablierte Sequenz, die derzeit z.B. für die Innenohrdarstellung oder die Fetal-MRT eingesetzt wird. Durch zusätzliche Gradienten kann sie zur Erfassung der Brown'schen Molekularbewegung der Wassermoleküle sensitiviert werden.

Der erste Teil dieser Arbeit befasste sich mit der Parameteroptimierung der diffusionsgewichteten SSFP-Sequenz bei Wirbelsäulenuntersuchungen. Das Ziel war es, die effektive Diffusionsgewichtung der Sequenz in Abhängigkeit der verwendeten Diffusionsgradienten (Diffusionsmoment) zu bestimmen. Weiterhin sollte untersucht werden, inwiefern es mit dieser Sequenz möglich ist, eine Invariante der DTI, die Fraktionale Anisotropie des Gewebes, zu bestimmen. Hierzu wurden Phantomuntersuchungen mit der diffusionsgewichteten SSFP-Sequenz bei unterschiedlichen Diffusionsmomenten im Vergleich zu EPI-Sequenzen durchgeführt. Im Anschluss an die Phantommessungen wurde das optimierte Sequenzprotokoll bei 10 Probanden hinsichtlich Bildqualität getestet.

Die Ergebnisse zeigen, dass es möglich ist mit der hier vorgestellten diffusionsgewichteten SSFP-Sequenz Diffusions-MRT des Myelons und der Spinalnerven mit einer hohen räumlichen Auflösung durchzuführen. Die Sequenz ermöglicht darüber hinaus die Fraktionale

Anisotropie innerhalb der Nervenwurzelfasern zu quantifizieren. Die Fraktionale Anisotropie kann in der klinischen Diagnostik als Indikator für die Integrität der Nervenfasern dienen. Allerdings zeigen die *SSFP*-Aufnahmen mit zunehmendem Diffusionsmoment auch eine zunehmende Empfindlichkeit gegenüber Bewegungsartefakten. Eine Minimierung der Bewegungsartefakte durch zusätzliche Techniken wie Navigatorechos oder EKG-Triggerung könnte diese Bewegungsempfindlichkeit verringern. Des Weiteren ist die erzielte Diffusionssensitivierung relativ gering. Obwohl die *SSFP*-Sequenz gegenüber den Suszeptibilitätssprüngen im Bereich der normalen Wirbelsäule insensitiv ist, ergeben sich bei Patienten mit Metallimplantaten großflächige Banding-Artefakte im Nah- und Fernfeld der Implantate.

Daher wurde im zweiten Teil dieser Arbeit eine spezielle Technik ("Dephasing-based Artifact Reduction Technique", *DART*) entwickelt. Diese soll die durch Metallimplantate verursachten Bildartefakte reduzieren, um eine zuverlässige Diagnostik zu ermöglichen.

Das *DART*-Verfahren wurde zunächst in einer *SSFP*-Sequenz implementiert. Dazu wurde nach der Hochfrequenzanregung ein schwacher Gradient geschaltet. In Phantomexperimenten wurden die minimalen Dephasierungsmomente bestimmt, die für eine zuverlässige Artefaktunterdrückung benötigt werden. Diese Untersuchungen haben eine deutliche Reduktion der Hyperintensitäten um die Metallimplantate durch die *DART*-Technik gezeigt; ab einem Dephasierungsmoment von $40\text{mT/m}\cdot\text{ms}$ sind praktisch alle Banding-Artefakte beseitigt. Die hypointensen Bereiche innerhalb der Metallimplantate blieben von der *DART*-Technik jedoch unangetastet. Außerdem konnten wir den Mechanismus der *DART*-Technik aufklären: Durch eine Aufweitung des Phasenbands aufgrund des Dephasierungsgradienten "verschmieren" die stark phasenwinkelabhängigen Signale bei der *SSFP*-Sequenz (das sogenannte Banding) und es kommt zu einer Normalisierung der Signalintensität.

Die *DART*-Technik wurde nach ihrer Optimierung zur Messung von Patienten nach Spondylodese verwendet, um die Qualität der Artefaktunterdrückung in der klinischen Anwendung zu beurteilen. Es konnten gezeigt werden, dass mittels der *DART*-Technik, die für die Bildbeurteilung störenden Hyperintensitäten zu eliminiert werden können. Hierzu sind weder längere Messzeiten noch eine aufwändige Datennachverarbeitung nötig. Nachteile der Sequenz sind, dass die Hypointensitäten weiter unangetastet bleiben und, dass die Sequenzen bei steigendem Dephasierungsmoment zunehmend für Bewegungsartefakte sensitiv werden. Weiterhin sinkt mit steigendem Dephasierungsmoment die Signalintensität aufgrund von Diffusionseffekten.

In dieser Arbeit wurde gezeigt, dass die diffusionsgewichtete *SSFP*-Sequenz, die bislang in der Diagnose von Schädigungen des Myelons und der Spinalnerven keine Rolle gespielt hat, sowohl strukturelle als auch funktionelle Informationen über die Intaktheit dieser Strukturen liefern kann. Dabei handelt es sich bei der *SSFP*-Sequenz um eine sehr schnelle Sequenz, mit der bei angemessener Untersuchungszeit eine hohe räumliche Auflösung erreicht werden kann. Aufgrund dieser Vorteile ist die *SSFP*-Sequenz für den klinischen Alltag geeignet und kann zur Untersuchung des Myelons und peripherer Nerven Anwendung finden. Hier würde sich ebenfalls die hohe Auflösung der Sequenz als positiv erweisen, die man benötigt, um besonders kleine Nervenstrukturen sichtbar zu machen.