

# Hat die klinische MRI-Bildgebung mit 7 Tesla eine Zukunft?

Johnannes T. Heverhagen

Universitätsinstitut für Diagnostische, Interventionelle und Pädiatrische Radiologie, Inselspital, Bern

Die Magnetresonanztomographie (MRI) ist eine der medizinischen Innovationen des letzten Jahrhunderts mit grosser Bedeutung und weitreichenden Auswirkungen in der gesamten Medizin. Die MRI hat sich heute neben der reinen morphologischen Bildgebung auch in der neurofunktionellen Untersuchung des zentralen Nervensystems, der funktionellen kardialen Bildgebung und vielen weiteren Bereichen der nichtinvasiven Diagnostik etabliert. Auch die Lungenbildgebung, lange Zeit von der Computertomographie (CT) dominiert, rückt immer weiter in den Fokus der MRI-Bildgebung.

## Warum steigt die Magnetfeldstärke stetig?


Die Grundlage der MR-Bildgebung besteht in dem hohen konstanten, externen Magnetfeld, in das die Patienten eingebracht werden. Dieses führt zur Ausrichtung von Wasserstoffprotonen im Körper entlang des Magnetfelds, die zur Bildgebung genutzt werden können. Dieses Prinzip erklärt auch, warum die Feldstärke der klinisch eingesetzten Magnete seit der Einführung der MRI im Jahr 1978 durch Mansfield und Lauterburg stetig steigt. Zunächst waren 0,5- und 1,0-Tesla-Magneten Standard. Diese wurden bald durch sogenannte Hochfeldgeräte mit 1,5 Tesla ersetzt, die auch heute noch den grössten Anteil an den weltweit aufgestellten klinischen Scannern haben. Seit einigen Jahren steigt allerdings auch der Anteil der 3-Tesla-Magneten stetig. Schon heute ist es abzusehen, dass diese bald den grössten Anteil der klinischen Geräte darstellen werden.

Bereits in den 90er Jahren des letzten Jahrhunderts installierten einige wenige Gruppen unter hohem technischem Aufwand Scanner mit Feldstärken von 7 beziehungsweise 8 Tesla [1–7]. Auch deren Anzahl hat in den letzten Jahren, vor allem durch den Einstieg der grossen Hersteller in die Entwicklung, deutlich zugenommen. Heute sind mehr als 60 dieser Geräte weltweit im Einsatz. Der Hauptvorteil höherer Feldstärken liegt darin, dass die Anzahl der zur Bildgebung beitragenden Protonen linear mit der Feldstärke steigt [8, 9]. Bei einem Wechsel von 1,5 auf 3 Tesla verdoppelt sich das Signal, bei einer weiteren Steigerung auf 7 Tesla wird dieses noch einmal um mehr als das Doppelte verstärkt. Dieses starke Signal erlaubt es nicht nur, schönere Bilder anzufertigen, sondern erhöht auch die räumliche Auflösung und damit die Visualisierung von feineren morphologischen Strukturen. Ausserdem werden die Geschwindigkeit gesteigert, die Untersuchungszeit verkürzt und die spektrale Auflösung erhöht. Zusätzlich zu diesen Vorteilen hat sich gezeigt, dass die Bildgebung bei solch hohen Feldstärken

neue Kontraste ermöglicht [5, 10, 11]. Auf diese Weise können nun Strukturen visualisiert werden, die vorher nicht sichtbar waren. Die Anwendungen im zentralen Nervensystem sind vielfältig, und – wie so oft in der MRI – bereits früh gut belegt [12–15]. Es haben sich aber bereits weitere Anwendungsgebiete herauskristallisiert. Im Folgenden werden zwei Beispiele angeführt.

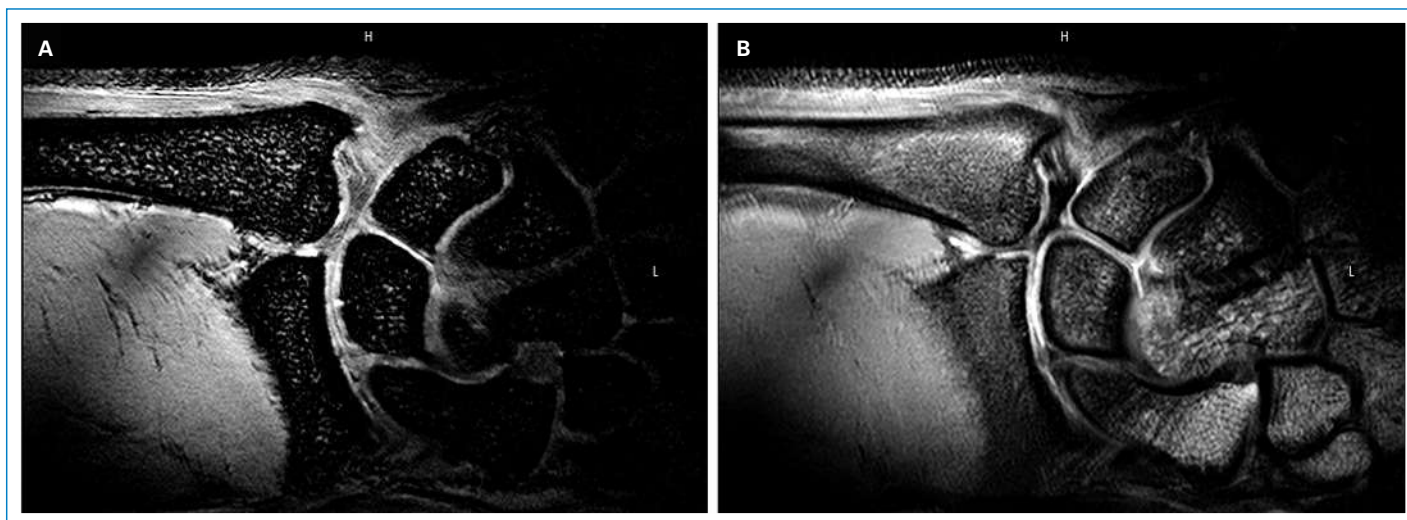
## Muskuloskelettales System

Die obere und untere Extremität sowie deren grössere und kleinere Gelenke sind ideale anatomische Regionen für die Ultrahochfeldbildgebung. Zum einen sind die betroffenen Untersuchungsregionen räumlich begrenzt und können somit einfach von einer relativ kleinen Empfangsspule umgeben werden. Zum anderen ist es relativ einfach, diese Regionen zu immobilisieren, so dass Bewegungsartefakte keine Rolle spielen. Eines der grössten Bedürfnisse der muskuloskelettalen Bildgebung ist die räumlich hoch aufgelöste Darstellung von knöchernen und ligamentären Strukturen. Dies lässt sich aufgrund des hohen Signal-Rausch-Verhältnisses (SNR) der Ultrahochfeldbildgebung einfach bewerkstelligen. Gleichzeitig können Probleme, die im Körperstamm auftreten, wie zum Beispiel inhomogenes Eindringen der RF-Strahlung, hohe Suszeptibilitätsartefakte an Luft-Gewebe-Grenzen oder inhomogene Magnetfelder, in diesen Bereichen leicht umgangen oder unterdrückt werden.

Vor allem die grossen Gelenke wie Knie und Ellbogen, aber auch die kleineren Gelenke, wie Hand- oder Fussgelenk, wurden in der Vergangenheit ausführlich untersucht (Abb. 1 ) [16–19]. Dabei zeigte sich für alle Untersuchungstechniken ein deutlicher Gewinn im SNR und Träger-Rausch-Verhältnis (CNR) und daraus folgend eine deutlich detailliertere Darstellung der Strukturen. Dies hat insbesondere zur Folge, dass strukturelle Defekte oder Schwächen im Vergleich zu anderen Untersuchungen deutlich früher festgestellt werden können. Die heutige Auflösung der Ultrahochfeldgeräte übertrifft sogar bereits die Auflösung der CT. Mit Hilfe spektroskopischer Methoden konnte zusätzlich gezeigt werden, dass Reparaturprozesse resp. frühe Erkrankungsstadien in ihrem Verlauf erkannt und verfolgt werden können, bevor sie sich in morphologischen Veränderungen niederschlagen. Dies gilt sowohl für Knorpel als auch Muskelgewebe [20–22].

Insgesamt hat sich der Wert der Ultrahochfeldbildgebung im muskuloskelettalen Bereich, insbesondere an den Extremitäten, heute bereits deutlich gezeigt. Zahlreiche Studien haben die Vorteile im klinischen Einsatz bewiesen.

Der Autor hat keine finanziellen oder anderen Interessenkonflikte im Zusammenhang mit diesem Beitrag deklariert.



**Abbildung 1**

(A) 3-D-gradientenecho- und (B) 2-D-protonendichtegewichtete Spinecho-Aufnahmen des Handgelenks eines 34-jährigen männlichen Probanden.

Die Aufnahmen wurden jeweils in ca. 5 Minuten akquiriert. Die räumliche Auflösung beträgt hierbei  $0,09 \times 0,09 \text{ mm}^2$  in der Schicht. Die Schichtdicke beträgt  $0,5 \text{ mm}$  für die 3-D-Aufnahme und  $0,8 \text{ mm}$  für die 2-D-Aufnahme. Diese hohe räumliche Auflösung erlaubt die hervorragende Visualisierung von feinsten Knorpel- und Knochenstrukturen (Prof. P. Schmalbrock, Wright Center of Innovation, The Ohio State University).

Der Einsatz in der klinischen Routine wird aktuell lediglich durch die geringe Verfügbarkeit dieser Geräte limitiert.

## MR-Angiographie

Die MR-Angiographie (MRA) ist eine Methode, die ebenfalls immens vom ansteigenden magnetischen Feld profitiert. Dies zeigte sich bereits in zahlreichen klinischen Studien mittels 3-Tesla-MRA [23]. Dabei führt insbesondere die Möglichkeit der höheren räumlichen Auflösung zu einer verbesserten Analyse von anatomischen und pathologischen Details. Hinzu kommt, dass wegen der verlängerten T1-Zeit das umgebende, stationäre Gewebe im Vergleich zum Blut deutlich stärker unterdrückt wird [24].

Die Ultrahochfeld-MRA wurde zunächst in den intrakraniellen Gefässen evaluiert und verbessert (Abb. 2) [24, 25]. Dort hat sie heute das Potential zur klinischen Anwendung. Mit der Verbesserung der Spulentechnik kamen zunehmend auch extrakranielle Gefässgebiete in den Fokus der Untersuchungen. Zunächst wurden die relativ einfach zu analysierenden Karotiden und unteren Extremitäten untersucht [26, 27]. In zahlreichen Studien wurden mittlerweile auch die Koronarien sowie die Nierenarterien dargestellt [28, 29].

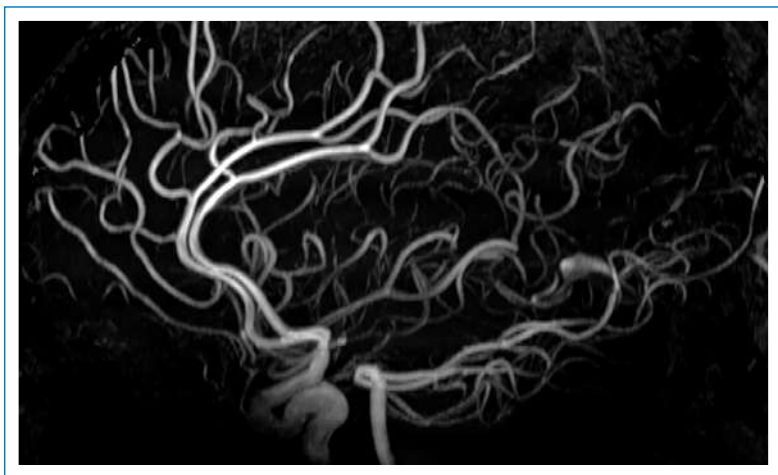
Die Gabe von Kontrastmittel wird bei Ultrahochfeld-techniken nahezu obsolet. Zahlreiche Autoren haben gezeigt, dass die Time-of-flight-MRA der kontrastverstärkten MRA zumindest gleichwertig ist [25, 27, 29]. Es ergibt sich damit ein grosses klinisches Potential insbesondere bei niereninsuffizienten Patienten.

## Nachteile, Limitationen und Nebenwirkungen

Die Erhöhung der Feldstärke steigert die Kosten dieser Technologie deutlich. Zum einen ist der Konstruktions-

und Materialaufwand höher, da es mit steigender Feldstärke zunehmend schwieriger wird, das Magnetfeld im Inneren des MR-Tomographen homogen zu halten. Zum anderen steigen die Kosten für die supportiven Einrichtungen, wie zur Abschirmung des Magnetfelds, zur Magnetkühlung sowie zur Unterbringung des Scanners. Die 7-Tesla-Scanner der frühen Generation wogen mehr als 30 Tonnen und benötigten Stahlabschirmungen des Magnetfelds mit einem Gesamtgewicht zwischen 200 und 400 Tonnen. Durch zahlreiche technische Entwicklungen liessen sich diese Anforderungen und damit auch die Kosten stark reduzieren.

Ein weiterer Nachteil ist die vermehrte Artefaktanfälligkeit. Die höhere Feldstärke führt leichter zu Inhomogenitäten im Grundmagnetfeld. Dazu kommt, dass die Anregungspulse des MR-Scanners bei diesen Feldstärken schlechter in den Körper eindringen können und es somit zu Inhomogenitäten im Anregungsfeld des Scanners kommt. Auch haben Suszeptibilitätsartefakte, wie sie zum Beispiel an Luft-Gewebe-Grenzen oder im Bereich von Metallimplantaten vorkommen, grössere Auswirkungen. All diese Effekte können die Bildqualität und damit auch die diagnostische Genauigkeit einschränken. Zusätzlich muss bedacht werden, dass bei höheren Feldstärken auch mehr Energie durch die Anregungspulse im Körper deponiert wird. Um Schäden zu vermeiden, wurde die maximale eingestrahelte Energie begrenzt. Dies schränkt gleichzeitig die Leistungsfähigkeit der MR-Scanner ein. All diese Nachteile und Limitationen haben in der Vergangenheit dazu geführt, dass neue innovative Technologien entwickelt wurden, um die Einschränkungen auszugleichen. Solche Entwicklungen kommen häufig dem gesamten Feld der MRT zugute. Dazu kommen Synergieeffekte insbesondere bei hohen Feldstärken zum Tragen. Ein Beispiel hierfür ist die sogenannte Parallel-Transmittechnologie, die es erlaubt, mehrere Schichten gleichzeitig anzuregen und damit vor allem auch bei hohen Feldstärken eine homogenere Bildausleuchtung zu erhalten.



**Abbildung 2**

Maximum-Intensitäts-Projektion einer nichtkontrastverstärkten Time-of-flight-7-Tesla-MR-Angiographie der arteriellen Hirngefäße eines 36-jährigen männlichen Patienten. Die räumliche Auflösung der einzelnen Bilder beträgt  $0,22 \times 0,22 \times 0,6 \text{ mm}^3$ , die Aufnahmezeit betrug ca. 10 Minuten. Die Gefäße stellen sich bis weit in die Peripherie mit hohem Kontrast dar.

Einige Patienten haben allerdings mit den Auswirkungen der höheren Feldstärke auf den Organismus zu kämpfen. So kommt es beispielsweise bei einigen Patienten zu Übelkeit und Schwindel. Die Ursache ist noch nicht geklärt. Es wird vermutet, dass Eisenablagerungen im Innenohr, die im Magnetfeld mobilisiert werden, dazu führen. Weitere Nebenwirkungen der Hochfeldtechnologie sind bisher nicht bekannt. Durch die höhere Feldstärke nimmt auch die Gefahr durch metallische Gegenstände im Untersuchungsraum zu. Mit steigender Feldstärke steigt nicht nur die Anziehungskraft auf diese Objekte, sondern auch die Entfernung, in welcher die Objekte noch signifikant angezogen werden.

### Indikation und Preise

Die Indikation für solche Untersuchungen ist heute noch rein wissenschaftlich. Im Rahmen der neurodegenerativen Erkrankungen gibt es bereits heute Indikationen, wie zum Beispiel die Alzheimer-Diagnostik, in der die Ultrahochfeld-MRI den Standard der nichtinvasiven Diagnostik bildet. Weitere Indikationen entstehen, wenn die Ultrahochfeldtechnologie die einzige ist, die es erlaubt, die Patienten sicher zu untersuchen, zum Beispiel native Angiographien bei niereninsuffizienten Patienten. Zudem erscheint es sinnvoll, diese Systeme bei Frage-

stellungen, die nicht zwingend solche Feldstärken benötigen, einzusetzen. Dies geschieht bereits heute mit 3-Tesla-Systemen, zum Beispiel bei Abdomenuntersuchungen, obwohl eine Feldstärke von 1,5 Tesla ausreicht. Allerdings ist nicht zu erwarten, dass die Krankenkassenvergütung steigen wird. Sowohl für die speziellen Ultrahochfeld- als auch für die allgemeinen MRI-Indikationen werden sich die Vergütungen wohl weiterhin an den heute geltenden Standards orientieren. So hat sich beim Übergang von Scannern mit 1 Tesla auf 1,5 oder 3 Tesla an der Vergütung nichts geändert. Für Patienten und Zuweiser verspricht dies für die Zukunft neue diagnostische Möglichkeiten mittels Ultrahochfeld-MRI, die vor allem für die Diagnose neurodegenerativer Erkrankungen eine Rolle spielen werden. Hier muss der Stand der Wissenschaft ständig im Auge behalten und die Wertigkeit der Technologie immer wieder neu abgeschätzt werden. Zusätzlich werden an den Standorten dieser Geräte vermehrt Patienten mit anderen Indikationen klinisch untersucht. Für die Patienten gibt es keine Nachteile. Die Kosten sollten durch die Krankenkassen übernommen werden, entsprechend den Kosten für normale MRI.

### Zusammenfassung

Ultrahochfeld-MRI (>7 Tesla) sind heute bereits in geringem Mass an hochspezialisierten, universitären Zentren vorhanden. Die Zahl dieser Geräte wird sich weiter erhöhen und ihr Preis damit langsam sinken. Zurzeit sind die Indikationen für klinische Untersuchungen auf die neurodegenerativen Erkrankungen beschränkt. Es ist allerdings zu erwarten, dass sich dies in den nächsten Jahren ändern wird; die Vorteile dieser Technologie werden zumindest an den hochspezialisierten Zentren mehr Patienten zur Verfügung stehen.

---

#### Korrespondenz:

Prof. Dr. med. Dr. Johannes T. Heverhagen  
 Inselspital, Universitätsspital Bern  
 Universitätsinstitut für Diagnostische,  
 Interventionelle und Pädiatrische Radiologie (DIPR)  
 Freiburgstrasse 10  
 CH-3010 Bern  
[Johannes.Heverhagen\[at\]insel.ch](mailto:Johannes.Heverhagen[at]insel.ch)

---

#### Literatur

Die vollständige nummerierte Literaturliste finden Sie unter [www.medicalforum.ch](http://www.medicalforum.ch).