

Diss. ETH no 16010

PARALLEL MAGNETIC RESONANCE IMAGING:  
POTENTIAL AND LIMITATIONS AT HIGH FIELDS

A dissertation submitted to the  
SWISS FEDERAL INSTITUTE OF TECHNOLOGY ZURICH  
for the degree of  
DOCTOR OF SCIENCES

presented by **FLORIAN WIESINGER**  
Dipl.-Ing. Universität Linz  
born April 16<sup>th</sup>, 1975  
citizen of Austria

Zürich 2005  
accepted on the recommendation of  
Prof. Dr. Klaas P. Prüssmann, examiner  
Prof. Dr. Rüdiger Vahldieck, co-examiner  
Prof. Dr. Kâmil Uğurbil, co-examiner

# Summary

Over the past decades Magnetic Resonance Imaging (MRI) has been established as a vital tool for routine clinical diagnostics and basic medical research. In comparison to alternative imaging modalities, MRI stands out by its non-invasiveness and its exceptional versatility. In particular, by appropriate adjustment of sequence parameters, MRI can be used either for basic morphological imaging or for collecting a variety of subsidiary information, such as about blood flow, brain and muscle fiber architecture, and even brain activation. Besides these advantages MRI also faces major limitations, most notably an intrinsically low signal-to-noise ratio (SNR) and comparatively long scan times. These restrictions have been addressed quite effectively by means of sequence optimization and advances in gradient hardware. However, the associated incremental improvements have declined in the meantime, calling for alternative approaches for enhancing the sensitivity and speed of MRI. Two lines of technological developments have entered the scene during the past years: Firstly, parallel detection with multiple receiver coils has been explored as a means of performing multiple projections of the imaged object at once. With so-called parallel imaging methods the resulting information redundancy can be used to enable significant scan time shortening. Secondly, overcoming technical restrictions and initial skepticism, whole-body systems with very high field strengths ( $B_0$ ) ranging up to 8 T have been successfully installed as a means of boosting the baseline SNR yield. The present thesis is dedicated to analyzing the potential of these recent approaches from a conceptual perspective. Particular emphasis is laid upon the combination of parallel imaging and high field and the promising synergies of the joint approach.

In order for parallel imaging to permit full reconstruction of an image dataset, the factor of data acquisition reduction ( $R$ ) must be smaller than the factor of maximum data redundancy, which is given by the number of receiver coils. In the very beginning of parallel imaging it was hoped that the number of receiver coils may be the only restriction to scan acceleration. However, in the meantime it has been realized that the level of independence of the different image projections is also of major importance. It governs the conditioning of the parallel imaging reconstruction, and hence determines noise amplification in the final image. In

terms of physics, the sensitivity of a receiver array for MRI signal reception is governed by the radiofrequency (RF) fields of its coil elements. While at low  $B_0$  and/or small object sizes ( $L$ ), these RF fields are generally near-field dominated, with increasing  $B_0$  and/or  $L$ , RF wave behavior and associated interference effects increasingly come into play. Primarily due to these additional RF wave effects the potential performance of parallel imaging changes significantly with increasing  $B_0$ .

As a basic step towards identifying general performance characteristics of parallel imaging the idealized case of a complete coil array with infinitely many elements has been considered. In this way, the ultimately achievable SNR performance for both conventional and parallel imaging has been analyzed. Most importantly, the following fundamental performance characteristics have been identified: I.) Irrespective of the specific receiver coil array, the SNR yield in MRI faces fundamental physical restrictions. In particular, for parallel imaging there exists a certain critical reduction factor ( $R_{crit}$ ) beyond which SNR performance deteriorates exponentially. II.) This critical reduction factor depends on the RF wave regime. For common near-field conditions  $R_{crit}$  is constant and lies in the range between three and four. With onsetting wave behavior  $R_{crit}$  starts to increase continuously with  $B_0$  and  $L$ . By viewing these limitations from a wave-optical perspective, it was found that in the wave regime  $R_{crit}$  reflects the fundamental optical resolution barrier as established by Abbe and Rayleigh. The aliasing distance that can be readily resolved by parallel imaging is limited to half the wavelength of the coil's RF fields, thus determining  $R_{crit}$ . This is a consequence of the fact that, like in optics, in parallel imaging spatial encoding is achieved by exploiting spatial variation in the individual coils' signal sensitivities. In order to investigate whether or not the ultimate SNR limits can actually be reached, the SNR yield has also been studied for finite coil arrays. Doing so, it was found that with increasing number of coil elements the ultimate SNR can indeed be closely approximated with an imaging object of typical dimensions. However, the number of coil elements required varies significantly with the spatial location and the sort of RF wave behavior encountered. While for deep parts of the object and near-field conditions the ultimate SNR can be approached with relatively few coils, for superficial regions and wave behavior considerably more coils are required.

The theoretically predicted increase of parallel imaging performance with increasing  $B_0$  is expected to add considerably to the potential of high field MRI. In order to validate this promising result, the  $B_0$  dependence of parallel imaging has also been investigated experimentally. For studying the  $B_0$ -dependent behavior of the RF fields the framework of electrodynamic scaling has been developed. Based on adjusting electrodynamic object properties, this concept permits mimicking the effect of varying  $B_0$  without changing the scanner hardware. Using electrodynamic scaling, parallel imaging performance was investigated for  $B_0$  in the range

between 1 T and 12 T using only a single magnet with a  $B_0$  of 7 T. The results of these experiments were in excellent agreement with the previous numerical findings, hence confirming the theoretical analysis. With respect to the combination of high field strengths and parallel imaging an often voiced concern regards the potentially adverse effects of dielectric resonance. In the presence of dielectric resonance it may be expected that the RF fields of the receiver coils become predominantly determined by the object and hence less independent. As a result, dielectric resonance could drastically degrade parallel imaging performance. For testing this hypothesis, electrodynamic scaling has been applied to deliberately generate dielectric resonance at the relevant NMR frequency. With a lossless object the described detrimental effect was indeed observed. However, by introducing conductivity similar to that of human tissues the performance of parallel imaging was found to recover to regular values. From these findings it is concluded that for typical in-vivo conditions dielectric resonance is no major obstacle to parallel imaging.

When considering the individual characteristics of parallel detection and high-field effects it turns out that they are highly complementary in numerous regards. Jointly with the aforementioned intrinsic improvement of parallel imaging performance with increasing  $B_0$ , this complementarity constitutes a unique degree of synergy between the two approaches. While it has been shown that there are no fundamental obstacles to the combination, several technical challenges remain. In particular, the coil array concepts commonly used at lower  $B_0$  are not directly transferable to very high fields. Instead, so-called transmit/receive microstrip arrays have been devised to meet the specific high-field requirements and issues. In combination with an extended sensitivity calibration scheme the practical feasibility of parallel SENSE imaging was successfully demonstrated at a field strength as high as 7 T.

# Zusammenfassung

Im Laufe der letzten Jahrzehnte hat sich die Magnetresonanz (MR) Bildgebung zu einer äußerst erfolgreichen Untersuchungsmethode, für sowohl klinische Routine-diagnostik als auch medizinische Grundlagenforschung entwickelt. Die wichtigsten Vorteile dieses Verfahrens liegen in der nicht-invasiven Untersuchung, sowie dem recht breiten Anwendungsspektrum. So lässt sich mit nur geringfügigen Modifikationen das MR Verfahren erweitern von einer rein morphologischen Abbildung hin zur Untersuchung zusätzlicher Informationen, wie dem Blutfluss, der Faserorientierung von strukturiertem Gewebe, sowie der neuronalen Aktivität des Gehirns. Andererseits liegen die Schwachstellen dieser Methode in einem intrinsisch niedrigen Signal zu Rauschverhältnis (S/R), sowie einer vergleichsweise langen Messzeit. Diese Einschränkungen wurden in den vergangenen Jahren erfolgreich bekämpft mittels Messsequenzoptimierungen sowie Verbesserungen an der Gradienten Hardware. Während jedoch mittlerweile entsprechende Entwicklungen im Abklingen begriffen sind, hat sich das Hauptaugenmerk der methodologischen MR Forschung in Richtung zwei neuerer Ansätze verschoben: Erstens, die Verwendung von Spulenarrays mit mehreren, unabhängigen Empfangskanälen führt auf unterschiedlich ausgeleuchtete Projektionen des zu untersuchenden Objekts. Mittels paralleler Bildgebungsmethoden gelingt es die damit verbundene Informationsredundanz zugunsten von signifikanten Messzeitverkürzungen auszunützen. Zweitens, die Überwindung technischer Schwierigkeiten und konzeptioneller Bedenken führte zur erfolgreichen Inbetriebnahme von Ganzkörper Hochfeld MR Tomographen mit Feldstärken ( $B_0$ ) bis zu 8 Tesla. Im Vergleich zu konventionellen Geräten mit  $B_0$  in der Größenordnung von einem Tesla, gelingt es damit die S/R Ausbeute um ein Vielfaches zu steigern. Die vorliegende Arbeit widmet sich der konzeptionellen Untersuchung dieser neuen Methoden. Ein besonderer Schwerpunkt wurde dabei auf die Kombination von paralleler Bildgebung mit hohen Feldstärken, sowie den sich daraus ergebenden Synergien gelegt.

Eine grundlegende Voraussetzung für parallele Bildgebung besteht darin, dass die Verminderung der Datenakquisition, beschrieben durch den sogenannte Reduktionsfaktor, geringer sein muss als die Anzahl vorhandener Empfangsspulen. Diese Bedingung drückt aus, dass die Akquisitionsredundanz des Spulenarrays ausrei-

chen muss, um die ausgesparten Akquisitionsschritte prinzipiell rekonstruieren zu können. Während ursprünglich angenommen wurde, dass die Anzahl Spulen die einzige Limitation für parallele Bildgebung ist, hat man mittlerweile erkannt, dass auch die gegenseitige Orthogonalität der Einzelspulenbilder von zentraler Bedeutung ist. Schlussendlich bestimmt diese Orthogonalität die Konditionierung der Bildrekonstruktion und quantifiziert so die Rauschverstärkung während dem Rekonstruktionsschritt. Physikalisch ist die Ausleuchtung der einzelnen Empfangsspulen bestimmt durch die elektromagnetischen Radiofrequenz (RF) Felder im Sendebetrieb. Während für niedrige  $B_0$  und/oder kleine Objektabmessungen ( $L$ ) typischerweise Nahfeldanteile überwiegen, tritt für große Werte von  $B_0$  und/oder  $L$  zunehmend Wellenverhalten mit entsprechenden Interferenzerscheinungen auf. Es ist dieser Wechsel im RF Verhalten welcher zu Änderungen von paralleler Bildgebungsperformance mit zunehmender Feldstärke führt.

Als grundlegender Schritt zur Charakterisierung von paralleler Bildgebungsperformance wurde im Rahmen dieser Arbeit der virtuelle Fall eines Spulenarrays bestehend aus unendlich vielen Einzelspulen untersucht. Mit diesem Ansatz gelang es die ultimativen S/R Limitationen für sowohl konventionelle als auch parallele Bildgebung zu bestimmen. Die wichtigsten Resultate daraus sind: I.) Unabhängig von der Wahl eines speziellen Spulenarrays sind dem S/R physikalische Grenzen gesetzt. Speziell für parallele Bildgebung existiert ein kritischer Reduktionsfaktor ( $R_{krit}$ ), jenseits welchem sich die S/R Effizienz exponentiell verschlechtert. II.) Dieser kritische Reduktionsfaktor ist abhängig von der Art des auftretenden RF Wellenverhaltens. Während für gewöhnliche Nahfeld-Bedingungen  $R_{krit}$  konstant in der Größenordnung zwischen drei und vier liegt, beginnt mit einsetzendem Wellenverhalten  $R_{krit}$  linear mit  $B_0$  zu wachsen. Basierend auf optischen Überlegungen konnte gezeigt werden, dass diese Beschränkung von  $R_{krit}$  im Wellenregime in ursprünglichen Zusammenhang steht mit der bekannten wellenoptischen Auflösungsbarriere von Abbe und Rayleigh. Insbesondere ist also die mit  $R_{krit}$  assoziierte Aliasdistanz, welche letztlich mittels paralleler Bildrekonstruktionsalgorithmen aufgelöst werden muss, beschränkt auf die halbe RF Wellenlänge. Dieses Ergebnis trägt dem Umstand Rechnung, dass ähnlich wie in der Optik auch in der parallelen Bildgebung gegenseitige Variationen der Empfangsensitivitäten entscheidend sind. Weiters wurde berechnet inwieweit ultimative S/R Limitationen mit tatsächlichen Spulenarrays erreicht werden können. Dabei konnte gezeigt werden, dass mit zunehmender Spulenzahl das erreichte S/R tatsächlich sehr nahe an die ultimative Obergrenze heranreicht. Allerdings variiert die Anzahl erforderlicher Spulen stark mit dem Ort und dem auftretenden RF Wellenverhalten. Während für tiefer gelegene Positionen und Nahfeldbedingungen Konvergenz schon mit relativ wenigen Elementen erreicht werden kann, sind für oberflächennahe Orte und einsetzendem RF Wellenverhalten wesentlich mehr Spulen erforderlich.

Die theoretisch berechnete Verbesserung von paralleler Bildgebungsperformance mit zunehmender Feldstärke unterstreicht das Potential von Hochfeldsystemen. Um dieses vielversprechende Ergebnis zusätzlich abzustützen, wurde die  $B_0$ -Abhängigkeit der parallelen Bildgebung weiters noch experimentell untersucht. Dazu wurde die Methode der Elektrodynamischen Skalierung entwickelt, welche es einfach ermöglicht die  $B_0$ -Abhängigkeit von RF Feldern zu untersuchen. Durch gezielte Veränderung der dielektrischen Objekteigenschaften konnten so auf einem 7 Tesla MR Gerät parallele Bildgebung bei Feldstärken zwischen 1 Tesla und 12 Tesla experimentell untersucht werden. Die daraus erhaltenen Ergebnisse, stehen in exzellenten Einklang mit den theoretisch berechneten Vorhersagen. Ein betreffend der Kombination von paralleler Bildgebung und hohen Feldstärken häufig geäußerter Einwand bezieht sich auf das Auftreten von dielektrischen Resonanzen. Die gängige Hypothese dabei lautet, dass im Resonanzfalle die elektromagnetischen RF Felder hauptsächlich durch das Objekt, anstatt der Spule, bestimmt werden. Die unmittelbare Folge davon wäre, dass die Orthogonalität der Einzelspulenbilder abnimmt und sich parallele Bildgebungsperformance entsprechend verschlechtert. Um diese Hypothese zu untersuchen, wurden mittels Elektrodynamischer Skalierung dielektrische Eigenmoden an die MR Larmor Frequenz angepasst. Auf diese Weise konnte gezeigt werden, dass im verlustfreien Fall der erwähnte Effekt tatsächlich auftritt. Hingegen wenn man die Leitfähigkeit des Objekts nur geringfügig erhöht, verbessert sich parallele Bildgebungsperformance wieder hin zu regulären Werten. Basierend auf diesen Ergebnissen kann gefolgert werden, dass dielektrische Resonanz kein fundamentales Problem für parallele Bildgebung *in vivo* darstellen wird.

Betrachtet man grundlegende Eigenschaften von paralleler Bildgebung und hohen Feldstärken, stellt sich heraus, dass viele davon sich komplementär ergänzen. Zusammen mit der erwähnten intrinsischen Verbesserungen von paralleler Bildgebungsperformance unterstreicht dies die herausragende Synergie zwischen den beiden Konzepten. Während gezeigt werden konnte, dass aus der Kombination dieser Ansätze keine prinzipiellen Schwierigkeiten zu erwarten sind, führt diese andererseits doch zu Herausforderungen technischer Natur. Insbesondere erweisen sich herkömmliche Arraydesigns bei hohen Feldstärken als wenig brauchbar. Stattdessen haben sich so genannte Microstrip Spulenarrays, mit sowohl der Möglichkeit zum Senden als auch zum Empfangen, als vorteilhaft erwiesen. In Verbindung mit einer Erweiterung der herkömmlichen Sensitivitätskalibration konnte so die praktische Durchführbarkeit von paralleler SENSE Bildgebung bei einer Feldstärke von 7 Tesla erfolgreich demonstriert werden.