



Doctoral Thesis

## Principles and applications of sensitivity encoded magnetic resonance imaging

**Author(s):**

Weiger, Markus

**Publication Date:**

2000

**Permanent Link:**

<https://doi.org/10.3929/ethz-a-003925584> →

**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. 13674

**Principles and Applications of  
Sensitivity Encoded Magnetic Resonance Imaging**

A thesis submitted for the degree of

DOCTOR OF NATURAL SCIENCES

to the

SWISS FEDERAL INSTITUTE OF TECHNOLOGY ZURICH

presented by

Markus Weiger

Dipl.-Phys. Universität Würzburg

born December 26, 1967

citizen of Germany

accepted on the recommendation of

Prof. Dr. P. Bösigler, examiner

Dr. P. Börnert, co-examiner

Zürich 2000

## Summary

Nuclear magnetic resonance imaging (MRI) is nowadays a well established technique for clinical diagnostics of numerous diseases. MRI has the advantage of providing images with excellent soft tissue contrast, and compared with conventional x-ray methods it is clearly superior in terms of health risk due to the use of non-ionizing radiation. However, one main drawback of MRI is the limited data acquisition speed due to the serial fashion of spatial encoding using magnetic field gradients. In many important and rapidly growing fields of MRI, however, one faces dynamic processes that have to be imaged at high temporal resolution. Applications such as cardiovascular imaging, functional imaging of the brain, or interventional MRI are strongly affected by this limitation.

Therefore, in conventional cardiac MRI a segmented way of data acquisition over several cardiac cycles has to be used, and respiratory motion is reduced by breath-holding or gating techniques. These approaches are concessions to the limited speed of MRI and much effort has been put into developing means of imaging the heart in real-time. However, the scan times are still too long when using gradient encoding. Another important example is contrast-enhanced magnetic resonance angiography (MRA) for imaging the vascular system. For optimally enhanced signal of the vessels of interest, data acquisition must be restricted to the first pass of the bolus of the injected contrast agent. When imaging the abdominal vasculature, a further limitation of scan time is the longest possible breath-hold time. Due to these restrictions of the scan duration, the spatial resolution of such scans is limited and therefore lower than in conventional x-ray angiography.

In order to overcome the limitations of gradient encoding, tremendous developments improving the hardware of MRI systems were made during the last decade, resulting in a considerable increase of acquisition speed and image quality. However, to date, further improvements are doubted due to technical and physiological limits.

Therefore, in the last years, increasing attention has been paid on concepts for parallel encoding in MRI based on the inhomogenous spatial sensitivity of receive coils. If multiple coils are operated in parallel as a coil array, gradient encoding may be reduced, resulting in shorter scan times. Early approaches to this idea have not achieved practical

relevance for technical as well as theoretical reasons. Only the recent SMASH technique enabled scan time reduction in in vivo imaging.

In this work, new concepts for signal encoding by means of receiver sensitivity are presented, that have been named 'SENSitivity Encoding' (short: SENSE). A generalised reconstruction for such hybrid encoded data was derived, enabling the use of arbitrary sampling schemes and sensitivity profiles. For the delicate problem of coil sensitivity determination a practically feasible solution is presented. The most practical case, which is Cartesian sampling, was investigated in detail including an analytical description of the specific properties of the signal-to-noise-ratio (SNR) in SENSE.

The SNR in a sensitivity encoded experiment strongly depends on the specific coil array used. SENSE images acquired with conventional coil arrays may show high local noise levels. Therefore the SNR behaviour in dependence on the coil arrangement was investigated and new criteria of designing coil arrays were derived, that differ significantly from the rules applicable to conventional arrays. For cardiac imaging a dedicated SENSE coil array was realized. The comparison with a conventional cardiac array shows considerable improvements in the SNR of sensitivity encoded images. Furthermore, the performance in conventionally encoded imaging is not degraded.

SENSE was verified in phantom and in vivo experiments. In cardiovascular applications the encoding efficiency was increased by factors up to three. In cardiac-real time imaging sensitivity encoding permitted obtaining images of the beating heart even at very high heart rates without appreciable degradation of image quality due to motion. In contrast-enhanced MRA, SENSE was utilized either for improved spatial resolution or higher temporal resolution of dynamic studies.

The investigations show the high potential of sensitivity encoding to considerably reduce scan time in MRI. A large variety of applications will benefit from the new technique. It is likely that higher SENSE reduction will be possible with larger numbers of independent receiver channels. However, further research is needed to investigate this key question of sensitivity encoding.

# Zusammenfassung

Die Kernspintomographie - oder Magnetresonanzbildgebung (MRI, magnetic resonance imaging) - ist heutzutage eine weitverbreitete Verfahren zur klinischen Diagnose zahlreicher Krankheiten. MRI hat den Vorteil, Abbildungen mit hervorragendem Weichteil-Kontrast zu erzeugen, und ist auch aus gesundheitlichen Gründen den konventionellen Röntgen-Methoden vorzuziehen, da nicht-ionisierende Strahlung verwendet wird. Ein bedeutender Nachteil von MRI ist jedoch die begrenzte Geschwindigkeit der Datenakquisition, die aus der seriellen Natur räumlicher Kodierung mittels magnetischer Feldgradienten folgt. In vielen, rasch expandierenden Gebieten von MRI ist man jedoch mit dynamischen Prozessen konfrontiert, die mit hoher zeitlicher Auflösung abgebildet werden müssen. Anwendungen wie die kardiovaskuläre Bildgebung, die funktionelle Bildgebung im Gehirn oder die interventionelle Bildgebung sind durch diese Einschränkungen stark beeinträchtigt.

Daher müssen bei der konventionellen MRI am Herzen die Daten über mehrere Herzschläge verteilt aufgenommen werden, wobei die Atembewegung durch Atemanhalten oder Gating-Techniken reduziert wird. Diese Methoden sind Konzessionen an die begrenzte Schnelligkeit von MRI, weshalb sehr viel unternommen wurde, um Herzbildgebung in Echtzeit zu ermöglichen. Mit reiner Gradientenkodierung sind die Messzeiten jedoch nach wie vor zu lang. Ein weiteres wichtiges Anwendungsbeispiel ist die kontrastmittel-verstärkte Magnetresonanz-Angiographie (MRA) zur Abbildung des Gefäßsystems. Um die optimale Signalverstärkung der relevanten Gefäße zu erhalten, muss die Datenakquisition während des ersten Durchgangs des Bolus des eingespritzten Kontrastmittels erfolgen. Bei der Abbildung der abdominalen Gefäße stellt die längstmögliche Dauer, den Atem anzuhalten, eine weitere Einschränkung dar. Wegen dieser Messzeitlimitationen ist die räumliche Auflösung solcher Messungen begrenzt und daher geringer als bei konventioneller Röntgen-Angiographie.

Um die Beschränkungen des Gradientenkodierens zu reduzieren, wurden im letzten Jahrzehnt beachtliche Entwicklungen zur Verbesserung der Hardware von MRI-Systemen gemacht, woraus eine beträchtliche Erhöhung der Akquisitionsgeschwindigkeit und der Bildqualität folgten. Aus technischen und physiologischen

Gründen sind heutzutage weitere Verbesserungen jedoch fraglich. Daher wurde in den letzten Jahren das Augenmerk zunehmend auf Konzepte parallelen Kodierens bei MRI gerichtet, welche auf der inhomogenen räumlichen Sensitivität von Empfangsspulen beruhen. Werden mehrere Spulen parallel als Spulenarray betrieben, kann die Gradientenkodierung reduziert werden, was zu kürzeren Messzeiten führt. Frühe Ansätze zu dieser Idee erlangten aufgrund technischer und konzeptioneller Schwierigkeiten keine praktische Bedeutung. Erst das kürzlich vorgestellte SMASH-Verfahren ermöglichte eine Reduzierung der Messzeit bei In-vivo Messungen.

In der vorliegenden Arbeit werden neue Konzepte zur Kodierung des Signals mittels der Empfängersensitivitäten vorgestellt, die zusammenfassend 'SENSitivity Encoding' (kurz: SENSE) genannt wurden. Es wurde eine generalisierte Rekonstruktion solcher hybrid-kodierter Daten entwickelt, die die Verwendung beliebiger Sampling-Muster und Sensitivitätsprofile ermöglicht. Für das heikle Problem der Sensitivitäten-Bestimmung wird eine praktisch anwendbare Lösung vorgestellt. Der praktisch einfachste Fall – das Kartesische Sampling – wurde im Detail untersucht einschliesslich einer analytischen Beschreibung der speziellen Eigenschaften des Signal-zu-Rausch-Verhältnisses (SNR, signal-to-noise-ratio) bei SENSE.

Das SNR eines sensitivitäts-kodierten Experiments hängt stark vom verwendeten Spulenarray ab. SENSE-Bilder, die mit konventionellen Spulenarrays aufgenommen werden, können lokal starkes Rauschen aufweisen. Daher wurde das Verhalten des Rauschens in Abhängigkeit von der Spulen-Anordnung untersucht, und neue Design-Kriterien wurden abgeleitet, die beträchtlich von den Regeln für konventionelle Arrays abweichen. Für die Herzbildgebung wurde ein dediziertes SENSE-Spulenarray realisiert. Der Vergleich mit einem konventionellen Array zeigt deutliche Verbesserungen beim SNR sensitivitäts-kodierter Bilder. Darüberhinaus ist die Qualität bei konventioneller Bildgebung nicht beeinträchtigt.

SENSE wurde in Phantom- und In-vivo-Messungen verifiziert. Bei kardiovaskulären Anwendungen wurde die Kodier-Effizienz bis um einen Faktor drei erhöht. Bei der Herzbildgebung in Echtzeit ermöglichte Sensitivity Encoding, das schlagende Herz auch bei sehr hohen Schlagzahlen ohne nennenswerte Einbussen der Bildqualität abzubilden. Bei der kontrastmittel-verstärkten MRA wurde SENSE sowohl zum Erzielen verbesserter räumlicher Auflösung, also auch höherer zeitlicher Auflösung in dynamischen Studien eingesetzt.

Die Untersuchungen demonstrieren das grosse Potential des Sensitivity Encoding, die Messzeit bei MRI deutlich zu reduzieren. Viele verschiedene Anwendungen werden von der neuen Technik profitieren. Es ist anzunehmen, dass höhere SENSE-Reduktion mit einer grösseren Anzahl unabhängiger Empfangskanäle möglich sein wird. Die Beantwortung dieser Kernfrage des Sensitivity Encoding gibt Anlass zu zukünftiger Forschungsarbeit.