



**PHILIPS**

Compressed SENSE

Klinische  
MR-Anwendung

# Compressed SENSE

## **Die richtige Geschwindigkeit. Jederzeit.**

Liesbeth Geerts-Ossevoort, PhD; Elwin de Weerd, PhD; Adri Duijndam, PhD; Gert van Ijperen, PhD; Hans Peeters, PhD; Mariya Doneva, PhD; Marco Nijenhuis; Alan Huang, PhD

Die Magnetresonanztomographie (MRT) musste sich von Anfang an der Problematik der Geschwindigkeit stellen. Heute ist die Notwendigkeit schneller MR-Untersuchungen, ohne dabei die Bildqualität zu beeinträchtigen, noch dringender geworden, da ein Anstieg chronischer Erkrankungen zu einem zunehmenden Einsatz der MRT geführt hat. In Kombination mit sinkenden Erstattungen hat sich daraus die Notwendigkeit für einen Paradigmenwechsel in der Effizienz ergeben.<sup>[1,2]</sup> In diesem White Paper werden die Hauptprinzipien von Compressed SENSE erläutert sowie erklärt, wie durch diese Technologie ein Paradigmenwechsel in der Effizienz eingeleitet wird. Außerdem wird darauf eingegangen, wie Compressed SENSE um die Bildqualität herum entwickelt wurde und wie die Technologie die Effizienz bei der klinischen Magnetresonanztomographie verbessert.

# Warum ist es wichtig, die Effizienz zu steigern?

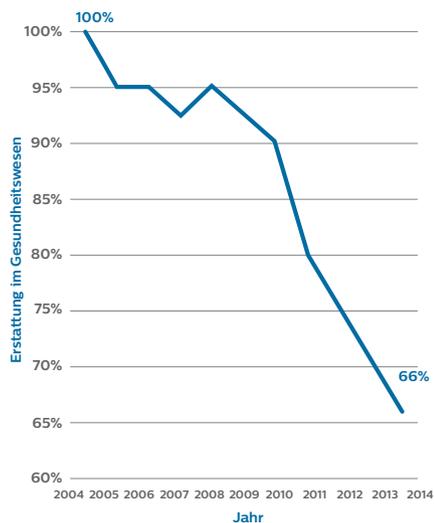
Die weltweiten Ausgaben im Gesundheitssektor steigen mit einer erschreckenden Geschwindigkeit. In den USA wird erwartet, dass die Ausgaben im Gesundheitssektor bis 2025 auf 20% des Bruttoinlandsprodukts (BIP) steigen werden. In China sind die Ausgaben im Gesundheitssektor zwischen 2010 und 2015 bereits mit einer durchschnittlichen jährlichen Wachstumsrate von 15% angestiegen und sollen bis 2020/2021 auf \$ 1 Billion wachsen.<sup>[3, 4]</sup> Dieser Trend hat zu einer wertgebundenen Erstattung im Gesundheitswesen geführt, bei der Erstattungen auf Behandlungsausgängen anstatt auf Verfahren basieren. Eine vor Kurzem durchgeführte Umfrage hat gezeigt, dass Gesundheitsdienstleister und Kostenträger in den USA damit rechnen, dass bis 2020 wertgebundene Erstattungen volumenbasierte Erstattungen übertreffen werden.<sup>[5]</sup> Dieser Wechsel erfordert eine bessere Versorgung zu geringeren Kosten.

Ein Weg, auf diese Problematik einzugehen, besteht in der Beschleunigung von Scans. Durch die parallele Bildgebungstechnologie SENSE, die nach der Einführung der dStream Plattform zu dS-SENSE weiterentwickelt wurde, wurde die MR-Bilderfassung stark beschleunigt. Dabei wird eine Unterabtastung der Daten durchgeführt und mithilfe von Spulen-Sensitivitätsinformationen das vollständige Bild wiederhergestellt. Trotz dieser und anderer Vorteile sind weitere Beschleunigungen erforderlich.

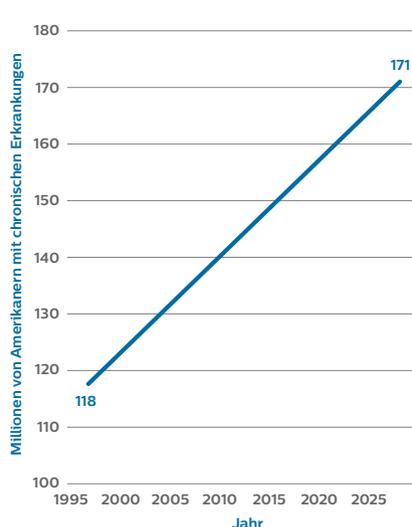
Dank jüngster Fortschritte in der Compressed Sensing-Technologie lässt sich die Scan-Dauer im Vergleich zu beschleunigten Scans mit klassischer paralleler Bildgebung weiter verringern. Mit Compressed Sensing als Grundstein und der Essenz von SENSE stellt Philips Compressed SENSE vor: Die richtige Geschwindigkeit. Jederzeit.

„Wir können die pro Patient erforderliche Zeit verringern. Indem wir bei einer Untersuchung Compressed SENSE zu mehreren Sequenzen hinzufügen, können wir unsere Untersuchungen um 20 bis 40% beschleunigen und das ist sehr gut für die Patienten.“

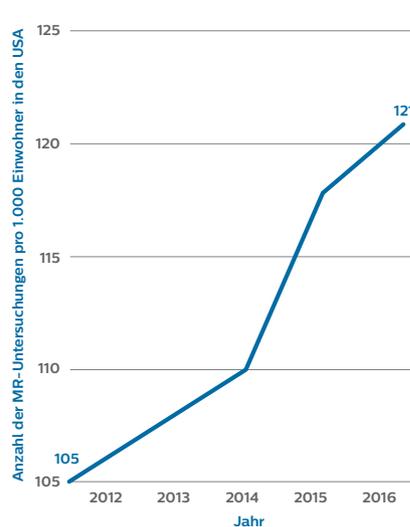
Dr. Sabine Sartoretti  
Kantonsspital, Schweiz



Verringerung der Erstattung im Gesundheitswesen<sup>[3]</sup>



Anstieg von chronischen Erkrankungen<sup>[1]</sup>



Anstieg der Anzahl der MR-Verfahren<sup>[2]</sup>

## Wie kann Compressed SENSE von Philips einen Paradigmenwechsel in der Effizienz ermöglichen?

Compressed SENSE wurde auf Grundlage von Compressed Sensing entwickelt, einem bahnbrechenden Ansatz zur Beschleunigung der Bildgebung. In dieser Technologie sind auch Komponenten von SENSE von Philips integriert, wodurch scharfe Bilder für alle 2D- und 3D-Scans in allen Anatomien mit allen anatomischen Kontrasten geliefert werden.

### Was ist Compressed Sensing?

Bei Compressed Sensing handelt es sich um eine Signalverarbeitungstechnik, die darauf aufgebaut ist, dass Signale redundante Informationen enthalten. Compressed Sensing wurde von David Donoho entwickelt<sup>[6]</sup>. Zur gleichen Zeit zeigten auch Emmanuel Candès, Terence Tao et al.<sup>[7,8]</sup> das gleiche Prinzip. Der anfängliche Beweis dafür, dass Bilddaten komprimiert werden können, stammt aus der digitalen Fotografie. Um auf das Problem der Speicherung von großen digitalen Bilddateien einzugehen, wurde mehrere Bildkomprimierungstechniken wie JPEG entwickelt. Dass Bilder ohne Detailverlust komprimiert werden können, hat zu der spannenden Frage geführt, ob dies auch andersherum möglich ist: Wenn all die Daten zum Speichern der relevanten Informationen nicht notwendig sind, warum sollten sie erfasst werden?

Bei der Magnetresonanztomographie, bei der die Erfassungsdauer von den Relaxationseigenschaften und der Protonendichte des Gewebes bestimmt wird, lautet die relevante Frage bezüglich Compressed Sensing: Kann ein vollständiges Bild aus stark unterabgetasteten Daten im k-Raum rekonstruiert werden? Diese Frage wurde von Lustig et al.<sup>[9]</sup> und bald danach von mehreren Forschungsgruppen für sehr spezifische Anwendungen beantwortet. Obwohl sich diese Studien auf jeweils eine einzelne Erfassungs- und Kontrastart beschränkten, haben sie gezeigt, dass die Erfassungsdauer bei nahezu gleichbleibender Bildqualität verringert werden kann.

### Bedingungen für Compressed Sensing in der klinischen Praxis

Compressed Sensing beschäftigt sich mit der gesamten Kette an Erfassungsstrategien, Signalverarbeitung und Rekonstruktion. Im

Allgemeinen kann Compressed Sensing in der klinischen Praxis unter den folgenden vier Bedingungen genutzt werden:

- Das Muster der Unterabtastung muss rauschähnliche, inkohärente Artefakte fördern.
- Die Daten müssen entweder direkt oder in einer Transformationsdomäne dünn besetzt („sparse“) sein.
- Kombination mit aktueller paralleler Bildgebungstechnologie, um weitere Beschleunigungseffekte bei Phased-Array-Spulen zu nutzen
- Es muss eine Implementierung der iterativen Rekonstruktion vorliegen, die die Datenkonsistenz und dünne Besetzung ausgleicht.

### Wie profitiert Compressed Sensing von einem Abtastmuster, das inkohärente Artefakte fördert?

Wenn Daten vollständig abgetastet werden, sind alle Informationen zur Rekonstruktion des Bildes verfügbar (Abbildung 1A). Eine Unterabtastung der Daten ist eine Möglichkeit zur Beschleunigung des Scans. Die Art der Unterabtastung der Daten gibt die Art der Artefakte vor, die in den Bildern vorkommen können. Wenn die Daten einheitlich unterabgetastet werden (wie bei SENSE und anderen parallelen Bildgebungstechnologien), sind regelmäßige Rückfaltungsartefakte das Ergebnis (Abbildung 1B). Bei Compressed Sensing ist es schwierig, wenn nicht sogar unmöglich, diese strukturierten Artefakte vom Signal zu trennen (Abbildung 1C). Daher profitiert Compressed Sensing von einem Abtastschema, bei dem Artefakte inkohärent über das Bild verteilt sind. Dies kann durch eine inkohärente Unterabtastung mit variabler Dichte erreicht werden (Abbildung 1D). Da sich die meiste Energie des MR-Signals im Zentrum des k-Raums befindet, wird das Abtastmuster so angepasst, dass das Zentrum dichter abgetastet wird als das Umfeld, um die typischen nicht einheitlichen Abtastmuster zu erreichen, die für gewöhnlich für Compressed Sensing verwendet werden.

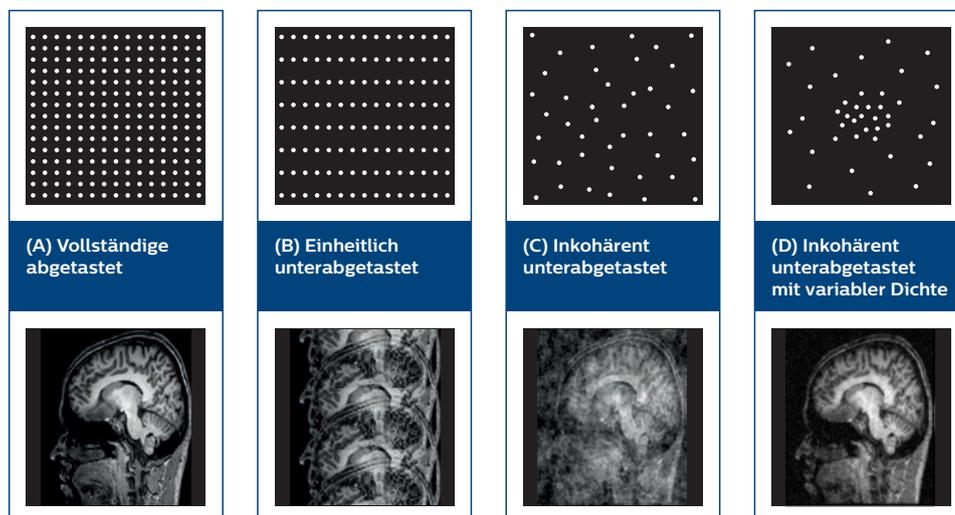


Abbildung 1. Verschiedene Abtastmuster und die resultierenden Bilder.

**Wie profitiert Compressed Sensing von dünn besetzten Daten?**  
 „Sparsity“ bedeutet allgemein „sehr wenig von allem, Seltenheit“; Bäume sind z.B. in der Wüste selten. In der Bildgebung bezieht sich Sparsity auf Bilder mit vielen schwarzen Pixeln (Nullpixeln) und wenigen grauen oder weißen Pixeln (wie bei der Magnetresonanztomographie (MRA)). Bei Compressed Sensing ist Sparsity wichtig, weil es in einer dünn besetzten Umgebung relativ einfach ist, die wichtigen Informationen zu erkennen und den Rest zu ignorieren. Am Wüstenbeispiel: Es ist relativ einfach, einen bestimmten Baum in der Wüste auszumachen, wohingegen dies im Urwald schwierig wäre.

Im Allgemeinen sind MR-Bilder von Natur aus nicht dünn besetzt – die meisten Pixel in einem MR-Bild sind nicht schwarz, sondern enthalten viele Schwarz-Grau-Weiß-Stufen. In der Compressed Sensing-Technologie führt die Transformation eines Bilds in eine andere Domäne – z.B. die Wavelet-Domäne – dazu, dass das Bild dünn besetzt wird. Es ist wichtig zu verstehen, dass alle Informationen, die von einer zur anderen Domäne übertragen werden, erhalten bleiben. In der Wavelet-Domäne werden die Bildinformationen auf verschiedenen räumlichen Ebenen dargestellt, ähnlich wie bei einem Bild, das mit verschiedenen Filterbreiten bandpassgefiltert werden kann. Da die Informationen in dieser Domäne dünn besetzt sind, werden die Bildinformationen effizienter erfasst, und es kann somit mehr Zeit gespart werden. In Abbildung 2 wird ein Histogramm eines Bilds nach einer Wavelet-Transformation gezeigt. Hier ist es einfacher, die Pixel zu erkennen, die eventuell zu wichtigen Informationen im Bild beitragen.

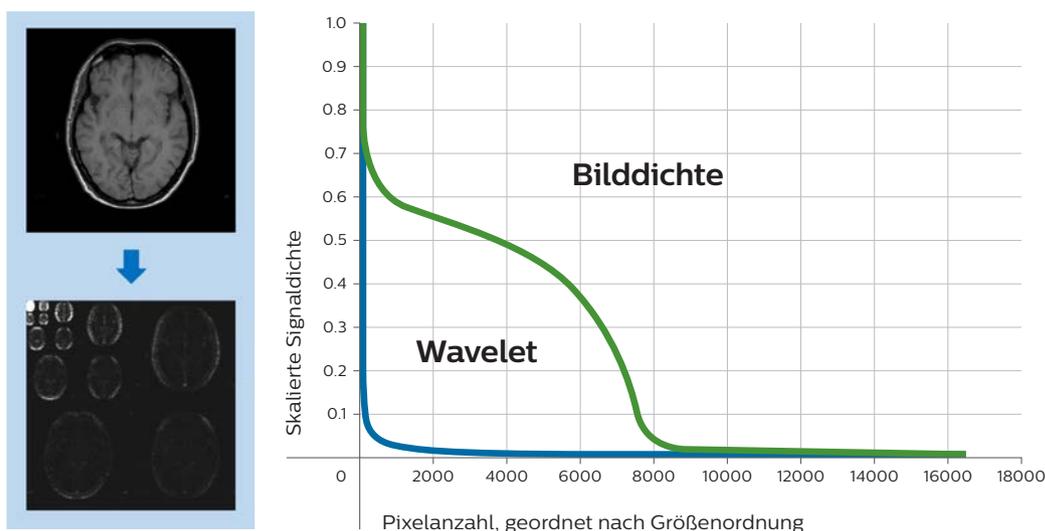


Abbildung 2. Darstellung der Anzahl der Pixel, die relevante/Nicht-Nullpixelinformationen enthalten.<sup>[10]</sup>

**Wie können Phased-Array-Spulen zur weiteren Beschleunigung wirksam eingesetzt werden?**

Die Entwicklung von Phased-Array-Spulen Anfang der 1990er Jahre ermöglichte die erste Welle paralleler Bildgebungstechnologien (SENSE, GRAPPA, ARC). Dabei war es mit SENSE möglich, die Scan-Dauer um bis zu das 6-Fache für 2D-Sequenzen und 9-Fache für 3D-Sequenzen zu verringern.<sup>[11]</sup> Diese Techniken hatten allerdings ihre Einschränkungen. Parallele Bildgebungstechnologien auf Grundlage der Erfassung von Auto-Kalibrierkurven sind in Bezug auf die Beschleunigung begrenzt, wenn die zusätzlichen erfassten Referenzlinien beginnen, die Erfassungsdauer bei hohen Beschleunigungen zu dominieren. Zusätzlich sind alle parallelen Bildgebungstechnologien durch den g-Faktor begrenzt. Um einen Paradigmenwechsel in der Effizienz zu erzeugen, muss neue Compressed Sensing-Technologie mit aktueller Hardware und parallelen Bildgebungstechnologien kompatibel sein.

**Wie profitiert Compressed Sensing von iterativer Rekonstruktion?**

Bei der klassischen MR-Rekonstruktion wird eine Reihe von Geradengleichungen gelöst, bei denen die Anzahl der Messwerte höher als die Anzahl der Unbekannten ist. Bei der Verwendung von SENSE (oder einer anderen parallelen Bildgebungstechnologie) enthalten die Geradengleichungen Informationen über die Spulensensitivitäten, im Wesentlichen wird aber immer noch ein lineares Set an Gleichungen gelöst. Dies ist sehr einfach und schnell.

Beim Compressed Sensing wird der k-Raum stark und unregelmäßig unterabgetastet. In diesem Fall ist es effizienter, einen iterativen Rekonstruktionsalgorithmus zu verwenden. Es gibt außerdem nicht ausreichend Messwerte, um alle Unbekannten zu lösen. Aus mathematischer Sicht impliziert dies, dass wir viele Lösungen haben, die sich für die Daten eignen könnten. Die Herausforderung ist daher, die richtige Lösung unter denen zu finden, die sich für die gemessenen Daten eignen.

An dieser Stelle kommt die Sparsity-Einschränkung zum Tragen: Die Grundannahme bei Compressed Sensing besteht darin, dass aus allen möglichen Lösungen die richtige Lösung die mit der dünnsten Besetzung ist. Diese Annahme ergibt Sinn, da Rauschen sehr dicht besetzt ist. Daher bedeutet die Suche nach der Lösung mit der dünnsten Besetzung eine Suche nach einer Lösung, bei der alle (Pseudo-)Rauschkomponenten abwesend sind.

Die Suche nach der Lösung mit der dünnsten Besetzung ist kein einstufiger Ansatz. Nach der Auswahl eines Kandidaten (oder einer anfänglichen Einschätzung) für die Lösung mit der dünnsten Besetzung muss geprüft werden, ob sie den Messdaten entspricht (Datenkonsistenzprüfung). Für gewöhnlich ist eine Reihe von Wiederholungen erforderlich, um die optimale Lösung in Bezug auf die Balance zwischen einer dünn besetzten Lösung (niedrige rauschähnliche Erscheinung) und einer Lösung zu finden, die den Messdaten entspricht (Datenkonsistenz).

## Wie liefert Compressed SENSE von Philips Bildqualität?

Compressed SENSE von Philips liefert schnelle Ergebnisse ohne Einbußen bei der Bildqualität. Die Kombination der Stärken von SENSE und Compressed Sensing führt zu einer robusten Technik, die alle routinemäßigen klinischen 2D- und 3D-MR-Anwendungen bei nahezu gleichbleibender Bildqualität bis zu 50% beschleunigen kann.

### Auf welche Art ist Compressed SENSE von Philips einzigartig?

Der Nutzen von Compressed SENSE von Philips liegt in seiner Vielseitigkeit, der Kombination mit Phased-Array-Spulen und aktueller paralleler Bildgebungstechnologie, Automatisierung und Optimierung der Rekonstruktionsgeschwindigkeit.

#### Vielseitigkeit

Viele Compressed Sensing-Lösungen konzentrieren sich auf Sparsity in der Zeitbereichsanalyse. Im Gegensatz dazu konzentriert sich Compressed SENSE von Philips auf Sparsity im räumlichen Bereich. Infolgedessen eignet es sich für alle Anatomien und alle anatomischen Bildkontraste und somit auch als Lösung für routinemäßige klinische Untersuchungen. Es kann auf häufig verwendete Kontrastsequenzen angewendet werden, einschließlich T1, T2, PCA, MRA u.a., sowie auf quantitative Techniken, einschließlich mDIXON-Quant und T2-Darstellungen. Es unterstützt verschiedene Erfassungstechniken wie mDIXON-XD und FFE, TFE, SE, TSE (in Kombination mit Vorpulsen wie Fettsuppression und REST-Slabs) sowie sowohl 2D- als auch 3D-Erfassungs-Slabs. Compressed SENSE kann auch verwendet werden, um dynamische Scans für 4D-Erfassungen zu verkürzen.

Weil das ursprüngliche Signal-Rausch-Verhältnis (SNR) und die Kontrast- und Erfassungsstrategie (2D vs. 3D) die Beschleunigung beeinträchtigen, erreichen nicht alle Sequenzen den gleichen Beschleunigungsfaktor. Besonders ein kontrastreicher 3D-Scan mit

hohem SNR kann mehr beschleunigt werden als ein kontrastarmer 2D-Scan mit niedrigem SNR. Compressed SENSE von Philips setzt bei der Bildqualität an, wodurch die Entwicklung dieser Technologie für alle Anatomien und anatomischen Kontraste ermöglicht wurde.

#### Kombination mit Phased-Array-Spulen und paralleler Bildgebung

Einige Compressed Sensing-Lösungen in der MR-Branche erfordern häufig die Erfassung von Auto-Kalibrierkurven, was zu einem weniger flexiblen Abtastschema führt. Um Beschleunigungsstufen zu erreichen, die denen von Technologien (wie SENSE) entsprechen, bei denen die Erfassung von Auto-Kalibrierkurven nicht erforderlich ist, muss die nicht auf SENSE basierende Compressed Sensing-Methode Abstriche beim Abtastschema machen. Dies führt eine diskontinuierliche Abtastdichte ein und führt zu einer niedrigen Abtastdichte der peripheren k-Raumkurven. In diesem Fall erscheinen die Bilder entweder unscharf, enthalten strukturiertes Rauschen, das die Bildqualität verringert (Abbildung 3) oder eignen sich nicht für bestimmte Anatomien, Kontraste und Sequenzen.

„ Mit Compressed SENSE profitieren unsere Patienten von erheblich kürzeren Atemanhaltephasen.“

Masakazu Iwamoto, RT  
Hakodate Neurosurgical Hospital, Japan

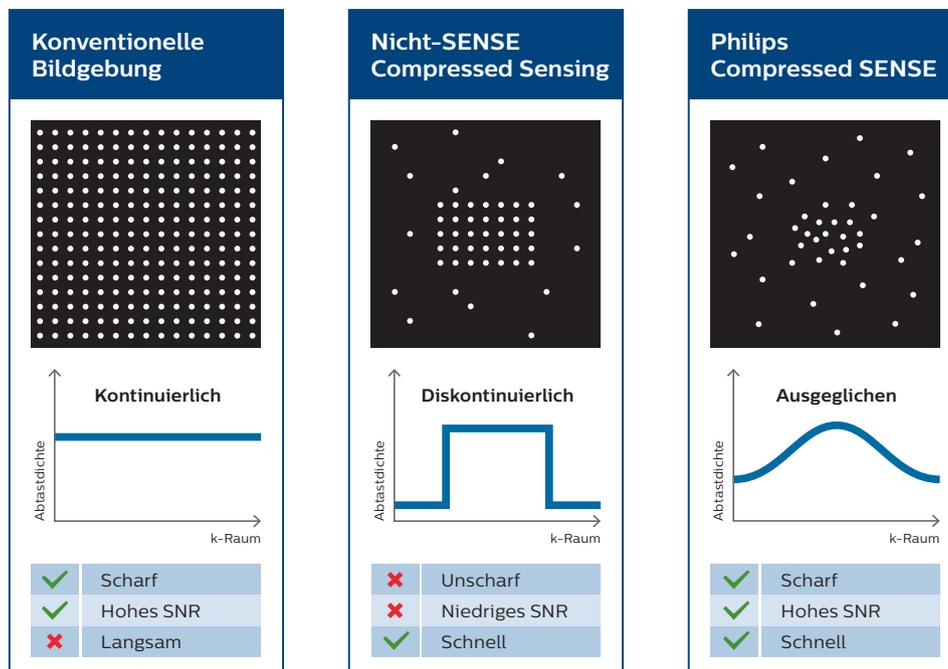


Abbildung 3. Verschiedene Erfassungsstrategien, deren Abtastdichte im k-Raum und die resultierenden Bildqualitäts- und Scan-Dauereigenschaften.

### Automatisierung

Darüber hinaus ist die Implementierung von Compressed SENSE voll automatisch sowohl bei der Erstellung des Abtastmusters als auch beim Ausgleich zwischen Konsistenz und den Sparsity-Einschränkungen.

Das auf SENSE basierende, ausgeglichene Abtastmuster wird automatisch mithilfe eines inkohärent unterabtasteten Schemas mit variabler Dichte optimiert, das das Zentrum des k-Raums dichter als die Peripherie abtastet. Das Abtastschema minimiert außerdem automatisch andere Artefaktquellen, wie Wirbelströme und Patientenbewegung.

Ein voll automatischer Ausgleich zwischen Datenkonsistenz und Daten-Sparsity hängt von der Anatomie, dem Bildkontrast, dem Beschleunigungsfaktor und den verwendeten Empfangsspulen ab.

### Optimierung der Rekonstruktionsgeschwindigkeit

Die Rekonstruktionszeit kann die Effizienz stark beeinflussen und sie hängt von einer Reihe verschiedener Faktoren ab wie der Anzahl der Spulenelemente, Auflösung und Abdeckung, dem Compressed SENSE Faktor und der Verwendung einer Rekonstruktionskompression. Ein 3D-T1W-TFE-Hirnsan, der mit einer dS Kopf 32-Spule mit isotroper Auflösung von 1 mm und einem Compressed SENSE Faktor von 4,5 erfasst wurde, besitzt z.B. eine Rekonstruktionszeit von 37 Sekunden, wohingegen eine 2D-PDW-TSE-Sequenz, die mit der dS Knie 8-Spule mit einer Auflösung von  $0,3 \times 0,3 \times 3,0$  mm (auf  $0,16 \times 0,16 \times 3,0$  mm rekonstruiert) und einem Compressed SENSE Faktor von 5 erfasst wurde, eine Rekonstruktionszeit von 72 Sekunden auf allen unseren mit dSync seit 2014 gelieferten Systemen besitzt. Um klinisch relevante Rekonstruktionszeiten mit Compressed SENSE zu erreichen, wurde jeder Schritt des Rekonstruktionsprozesses optimiert:

1. Die automatische Ableitung des Wavelet-Grenzwerts führt zu einer schnelleren Annäherung und sie ist der Hauptgrund für die Rekonstruktionsgeschwindigkeit und Robustheit von Compressed SENSE. Der Algorithmus wurde außerdem optimiert, um die Anzahl der Wiederholungen zu verringern, wodurch wiederum die Rekonstruktionszeit erheblich reduziert wurde.
2. Bei der Compressed SENSE Rekonstruktion werden alle Vorteile der dSync-Rekonstruktionsplattform mit optimierter paralleler Datenverarbeitung und der integrierten Optimierung bis zu den untersten Rechenfunktionen genutzt.
3. Die Rekonstruktionskompression wurde für Compressed SENSE optimiert, besonders für die 3D-Bildgebung, um bei gleichbleibender Bildqualität kürzere Rekonstruktionen und eine geringere Speicherprägung zu ermöglichen.

### Wie einfach ist die Verwendung von Compressed SENSE von Philips?

Compressed SENSE von Philips ist äußerst benutzerfreundlich. Es sind für die Verwendung von Compressed SENSE lediglich drei Parameter erforderlich (Abbildung 4).

Die Umsetzung von neuen klinischen MR-Techniken kann häufig zeitintensiv sein. In der Radiologie muss sich der Radiologe sicher sein, dass die neue Technik das Auswerten der Bilder nicht beeinträchtigt. Der MR-Anwender muss mit der Technik vertraut genug sein, um sie auf Protokolle anzuwenden. Compressed SENSE wurde unter Beachtung der Bedürfnisse von Radiologen und MR-Anwendern entwickelt und ist äußerst benutzerfreundlich:

1. Compressed SENSE aktivieren.
2. Den gewünschten Compressed SENSE Beschleunigungsfaktor (Reduktion der Dauer) auf einer Skala von 1 bis 32 auswählen.
3. Die bevorzugte Rauschunterdrückungsstärke auswählen (keine, schwach, mittel, stark oder Systemstandard).

SENSE	nein
C-SENSE	ja
Verringerung	10
Rauschunterdrückung	Systemstandard

Abbildung 4. Einfache, intuitive Benutzeroberfläche von Compressed SENSE von Philips

Der Beschleunigungsfaktor ist das Verhältnis zwischen der Anzahl der k-Raumkurven eines vollständig erfassten Bildes und einem mit Compressed SENSE erfassten Bild. Die optimale Abtaststrategie wurde auf Grundlage der Parameter für die Sequenzeingabe und des Beschleunigungsfaktors entwickelt.

Die Rauschunterdrückungsstärke legt den Regulierungsparameter (siehe  $\lambda_2$  in der technischen Information) fest, der die Datenkonsistenz und Sparsity-Einschränkung ausgleicht. Mit dieser Option kann der Anwender die bevorzugte Bildanzeige auswählen: Mit einer schwachen Rauschunterdrückungseinstellung rekonstruierte Bilder erscheinen verrauschter als mit mittlerer oder starker Einstellung rekonstruierte Bilder.

Um Compressed SENSE noch benutzerfreundlicher zu machen, gibt es ExamCards, die gebrauchsfertig und einsatzbereit für alle Routine-Scans geliefert werden, einschließlich Scans von Gehirn, Kopf/Hals, Wirbelsäule, MSK (Schulter, Ellbogen, Handgelenk, Hüfte, Knie und Fuß), Herz, Brust, Körper (einschließlich Leber, Prostata und Uterus) und MRA.

„Compressed SENSE erhöht die Untersuchungseffizienz durch eine kürzere Scan-Dauer ohne Veränderungen bei der Bildqualität.“

Sachi Fukushima, RT  
Kurashiki Central Hospital, Japan

### Was sind die Grundlagen der SENSE Technologie?

In Abbildung 5 wird die Funktionsweise der SENSE Technologie dargestellt.<sup>[11]</sup> Bei SENSE handelt es sich um eine parallele Bildgebungstechnologie, die im Bildgebungsbereich verwendet wird. Aus der Gleichung können die folgenden Eingabebelemente abgeleitet werden:

- [p] – das zu rekonstruierende Bild
- [m<sub>d,i</sub>] – die für ein bestimmtes Spulenelement gemessenen Daten nach Rauschdekorrelation
- [E] – der unterabgetastete Fourier-Operator, wie vom Abtastmuster definiert

- [S<sub>d,i</sub>] – die Spulensensitivität für ein bestimmtes Spulenelement nach Rauschdekorrelation, mit dem SENSE Referenzscan erfasst
- [λ<sub>1</sub>] – Regulierungsfaktor für den Ausgleich zwischen Datenkonsistenz und Vorkenntnissen des Bildinhalts
- [R] – Bild mit grober Auflösung von der integrierten Körperspule, mit dem SENSE Referenzscan erfasst. Es wird zur Beschränkung der Lösung während des Regulierungsprozesses verwendet.

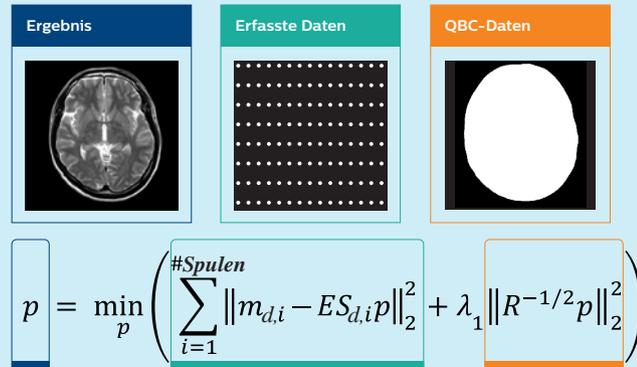


Abbildung 5. Visualisierung der SENSE Technologie von Philips (für Schicht 1).

### Wie baut Compressed SENSE von Philips auf SENSE auf?

In Abbildung 6 wird die Funktionsweise der Compressed SENSE Technologie dargestellt. Wie im Haupttext beschrieben, baut die Compressed SENSE Technologie auf der Compressed Sensing-Theorie und der SENSE Technologie auf, indem ein ausgeglichenes inkohärentes unterabgetastetes Erfassungsschema mit variabler Dichte und eine iterative Rekonstruktion eingesetzt werden, um ein inverses Problem mit einer Sparsity-Einschränkung zu lösen. Von der Gleichung können die folgenden Eingabebelemente abgeleitet werden:

- [p] – das zu rekonstruierende Bild
- [m<sub>d,i</sub>] – die für ein bestimmtes Spulenelement gemessenen Daten nach Rauschdekorrelation
- [E] – der unterabgetastete Fourier-Operator, wie vom Abtastmuster definiert
- [S<sub>d,i</sub>] – die Spulensensitivität für ein bestimmtes Spulenelement nach Rauschdekorrelation, mit dem SENSE Referenzscan erfasst

- [λ<sub>1</sub>] – Regulierungsfaktor für den Ausgleich zwischen Datenkonsistenz und Vorkenntnissen des Bildinhalts
- [R] – Daten mit grober Auflösung von der integrierten Körperspule, mit dem SENSE Referenzscan erfasst. Es wird zur Beschränkung der Lösung während des Regulierungsprozesses verwendet.
- [λ<sub>2</sub>] – Regulierungsfaktor, um die Sparsity-Einschränkung und Datenkonsistenz in der iterativen Lösung auszugleichen
- [Ψ] – Sparsity-Transformation in die Wavelet-Domäne

Falls die Sparsity-Einschränkung (rote Box) in der Compressed SENSE Gleichung fehlt, entsteht eine Reduktion auf die SENSE Lösung. Diese weist darauf hin, dass die Vorkenntnisse der Rauschdekorrelation, Regulierung und Spulensensitivitäten verwendet werden, um das optimale SNR als Ausgangspunkt zu liefern, wodurch zusätzliche Beschleunigungsfunktionen über Sparsity-Einschränkung zur Verfügung stehen.

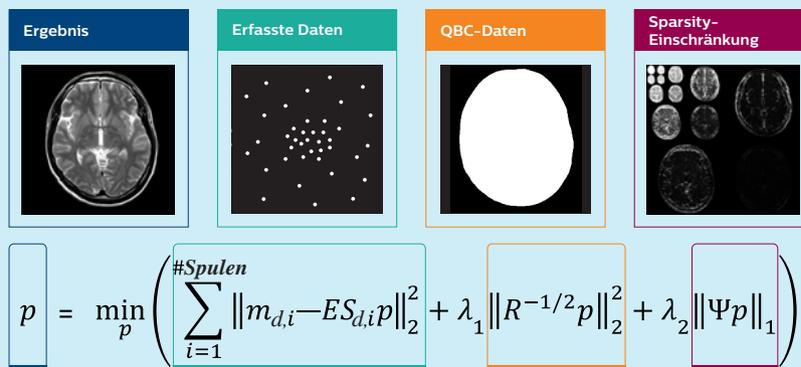


Abbildung 6. Visualisierung der Compressed SENSE Technologie von Philips (für Schicht 1).

## Was sind die klinischen Vorteile von Compressed SENSE?

Mit Compressed SENSE von Philips werden die Effizienz und Präzision erhöht sowie der Patientenkomfort verbessert.

### Erhöhte Effizienz

Compressed SENSE von Philips ermöglicht eine Beschleunigung um bis zu 50% bei gleichbleibender Auflösung und nahezu gleicher Bildqualität wie beim Scannen mit der parallelen Bildgebung dS-SENSE. Durch die Zeiteinsparung kann die Effizienz erhöht werden, indem mehr Patienten pro Tag untersucht werden können. Außerdem wird Patienten mit beeinträchtigten Blutgefäßen durch die Verkürzung von Scans mit Atemanhaltephase die Untersuchung erleichtert. In den folgenden Beispielen wird dargestellt, wie Compressed SENSE die gesamte MR-Untersuchung verkürzen kann.

### Erhöhte Präzision

Compressed SENSE kann zur Erstellung von Bildern mit hoher Auflösung mit der gleichen Scan-Dauer verwendet werden, die aktuell für Untersuchungen verwendet wird, um die Diagnosesicherheit zu erhöhen. Davon können die verschiedensten klinischen Bereiche profitieren. Compressed SENSE ermöglicht bei Mammographien eine höhere Auflösung mit einer ähnlichen Scan-Dauer sowie eine höhere Auflösung für 3D PelvisVIEW T2 und eTHRIVE mit einer ähnlichen Scan-Dauer und nahezu gleichbleibender Bildqualität. Außerdem sind schnelle isotrope 3D-Bilder im Submillimeterbereich (0,7 mm oder weniger) in weniger als 5 Minuten möglich. Dafür werden PD-, T1-, T2- und SPAIR-Erfassungstechniken mit nahezu gleichbleibender Bildqualität verwendet, um Diagnosen für schwierige Patienten und Anatomien zu stellen.

### Verbesserter Patientenkomfort

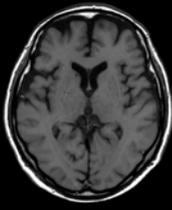
Compressed SENSE von Philips wurde unter Beachtung der Patientenbedürfnisse entwickelt. Durch schnellere Untersuchungen werden Angstzustände verringert<sup>[13-17]</sup>, besonders bei den 35% der Patienten mit Klaustrophobie oder großer Angst vor dem MR-Scanner.<sup>[18]</sup> Compressed SENSE von Philips verringert die im MR-Scanner verbrachte Zeit für den Patienten. Weiterhin hat eine interne, multizentrische Studie gezeigt, dass es über 50% der Patienten schwierig fanden, die Luft anzuhalten. Compressed SENSE verringert die Atemanhaltephase. Zusätzlich wird die SAR verringert, was für den Patienten besser ist. Der wahre Test jeder Bildgebungstechnologie besteht darin, wie sie die Diagnosestellung beeinflusst, und die sehr gute Bildqualität durch Compressed SENSE ermöglicht eine sichere Diagnose, die eine positive Patientenversorgung unterstützt.

” Compressed SENSE ermöglicht eine erhöhte Auflösung in 3D PelvisVIEW (durch Verringerung der Schichtdicke um das 2-Fache). Mit MPR konnten wir detaillierte anatomische Strukturen und Läsionen viel deutlicher erkennen.“

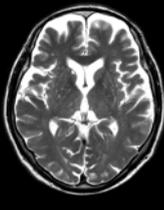
Dr. Tomohiro Namimoto, Fachgebiet der abdominalen Diagnostik  
Kumamoto University Hospital, Japan

## Komplette Untersuchungen des Gehirns beinahe 2× schneller bei nahezu gleicher Bildqualität

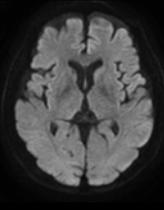
### Ohne Compressed SENSE



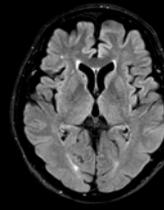
T1W SE  
0,9 × 1,3 × 5,0 mm  
02:35 min



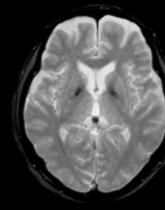
T2W TSE  
0,6 × 0,7 × 5,0 mm  
02:04 min



DWI (b1000)  
1,8 × 1,4 × 5,0 mm  
00:45 min



T2W FLAIR  
1,0 × 1,2 × 5,0 mm  
02:12 min

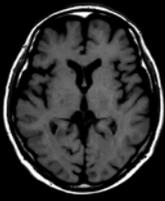


T2W FFE  
0,9 × 1,1 × 5,0 mm  
01:15 min

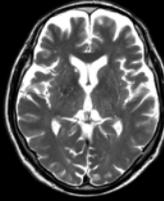


3D MRA  
0,7 × 1,3 × 1,4 mm  
07:11 min

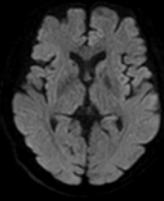
### Mit Compressed SENSE



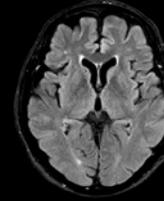
T1W SE  
0,9 × 1,3 × 5,0 mm  
01:14 min



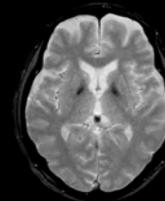
T2W TSE  
0,6 × 0,7 × 5,0 mm  
01:30 min



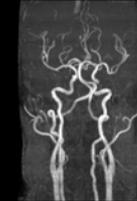
DWI (b1000)  
1,8 × 1,4 × 5,0 mm  
00:45 min



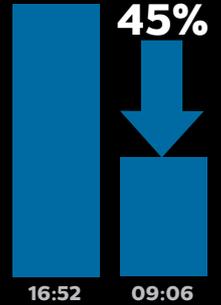
T2W FLAIR  
1,0 × 1,2 × 5,0 mm  
01:30 min



T2W FFE  
0,9 × 1,1 × 5,0 mm  
00:49 min



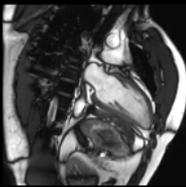
3D MRA  
0,7 × 1,3 × 1,4 mm  
03:06 min



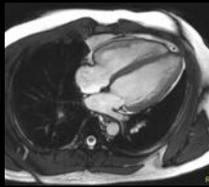
Alle Bilder werden auf einem Ingenia 1.5T CX erfasst.

## Komplette Herz-Untersuchungen beinahe 2× schneller bei nahezu gleicher Bildqualität

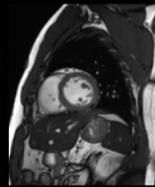
### Ohne Compressed SENSE



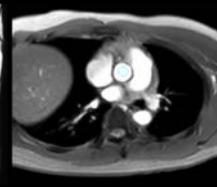
bTFE 2-Kammer  
1,97 × 1,71 × 8,0 mm  
8,3 s



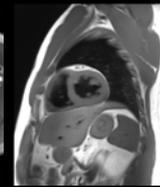
bTFE 4-Kammer  
1,97 × 1,71 × 8,0 mm  
8,3 s



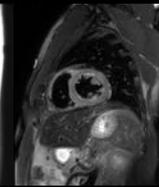
bTFE-Kurzachse  
1,97 × 1,71 × 8,0 mm  
8,3 s



QFlow  
2,5 × 2,5 × 8,0 mm  
19,4 s

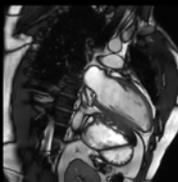


T1 TSE BB  
1,29 × 1,85 × 8,0 mm  
12,0 s

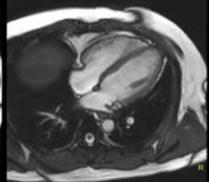


T2 TSE SPIR BB  
1,29 × 1,65 × 8,0 mm  
12,9 s

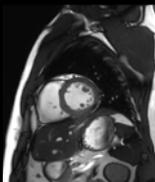
### Mit Compressed SENSE



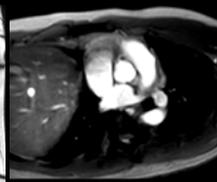
bTFE 2-Kammer  
1,97 × 1,71 × 8,0 mm  
4,5 s



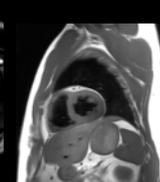
bTFE 4-Kammer  
1,97 × 1,71 × 8,0 mm  
4,5 s



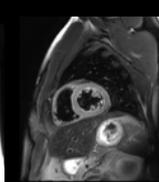
bTFE-Kurzachse  
1,97 × 1,71 × 8,0 mm  
4,5 s



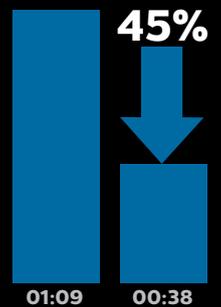
QFlow  
2,5 × 2,5 × 8,0 mm  
9,1 s



T1 TSE BB  
1,29 × 1,85 × 8,0 mm  
8,4 s



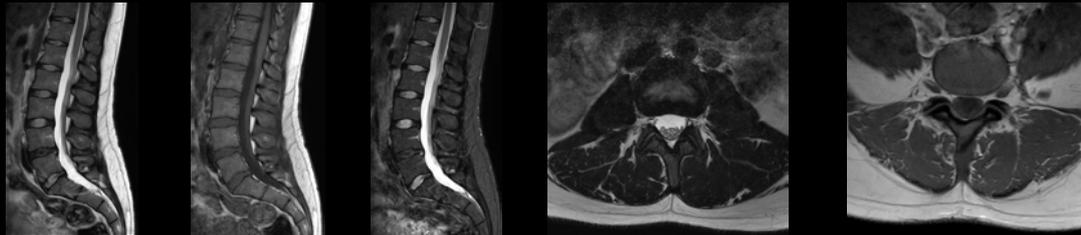
T2 TSE SPIR BB  
1,29 × 1,65 × 8,0 mm  
7,3 s



Alle Bilder werden auf einem Ingenia 3.0T erfasst.

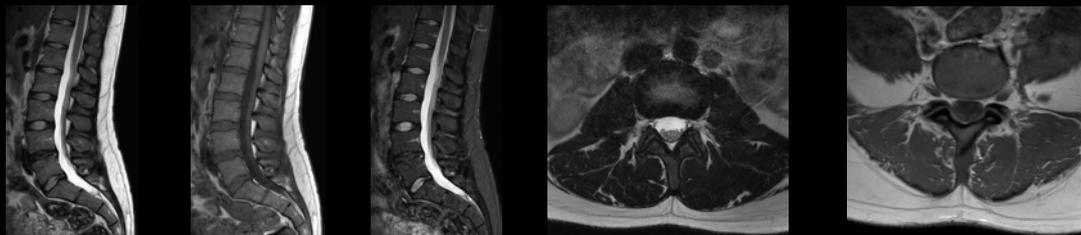
## Komplette Untersuchungen der Wirbelsäule um 25% schneller bei nahezu gleicher Bildqualität

Ohne Compressed SENSE



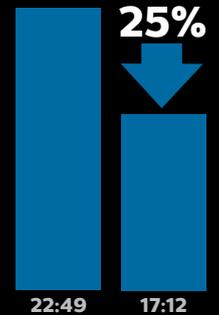
T1W TSE 0,9 × 0,8 × 4,0 mm 04:16 min	T2W TSE 0,8 × 0,9 × 4,0 mm 04:12 min	STIR TSE 1,0 × 1,0 × 4,0 mm 05:16 min	T2W TSE 0,6 × 0,8 × 4,0 mm 03:35 min	T1W TSE 0,7 × 0,9 × 4,0 mm 05:30 min
--	--	---	--	--

Mit Compressed SENSE



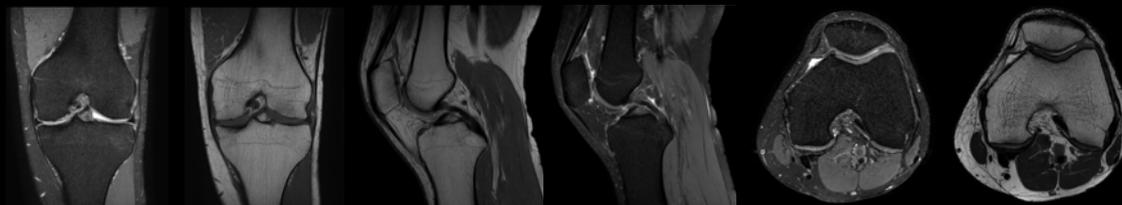
T1W TSE 0,9 × 0,8 × 4,0 mm 03:34 min	T2W TSE 0,8 × 0,9 × 4,0 mm 03:00 min	STIR TSE 1,0 × 1,0 × 4,0 mm 03:38 min	T2W TSE 0,6 × 0,8 × 4,0 mm 02:23 min	T1W TSE 0,7 × 0,9 × 4,0 mm 04:37 min
--	--	---	--	--

Alle Bilder werden auf einem Ingenia 3.0T erfasst.



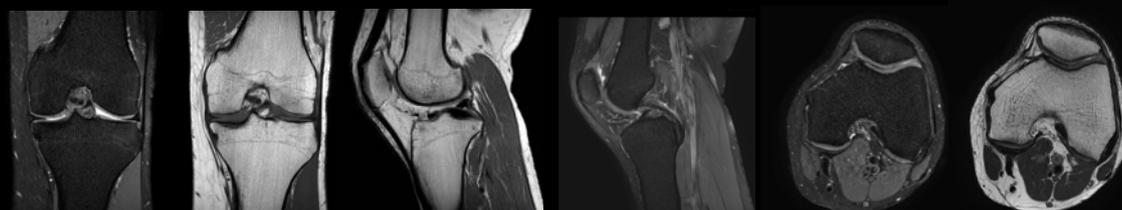
## Komplette MSK-Untersuchungen um 25% schneller bei nahezu gleicher Bildqualität

Ohne Compressed SENSE



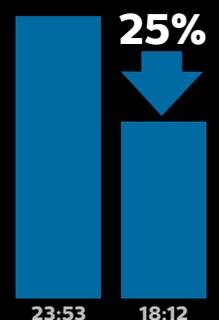
PDW SPAIR 0,4 × 0,5 × 2,5 mm 03:25 min	T1W TSE 0,3 × 0,4 × 2,5 mm 02:23 min	PDW TSE 0,3 × 0,4 × 2,5 mm 03:55 min	PDW SPAIR 0,4 × 0,4 × 2,5 mm 04:25 min	T2W SPAIR 0,4 × 0,5 × 1,5 mm 04:59 min	T2W TSE 0,4 × 0,5 × 1,5 mm 04:29 min
--	--	--	--	--	--

Mit Compressed SENSE



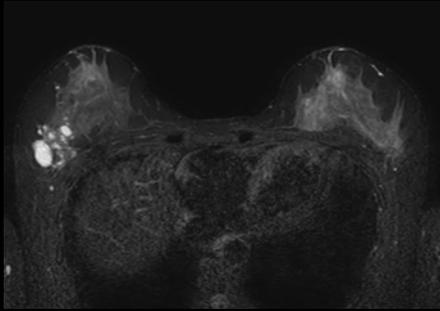
PDW SPAIR 0,4 × 0,5 × 2,5 mm 01:42 min	T1W TSE 0,3 × 0,4 × 2,5 mm 01:56 min	PDW TSE 0,3 × 0,4 × 2,5 mm 03:25 min	PDW SPAIR 0,4 × 0,4 × 2,5 mm 03:42 min	T2W SPAIR 0,4 × 0,5 × 1,5 mm 04:11 min	T2W TSE 0,4 × 0,5 × 1,5 mm 02:59 min
--	--	--	--	--	--

Alle Bilder werden auf einem Ingenia 3.0T erfasst.



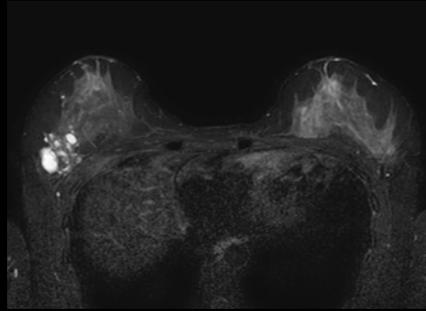
## Beschleunigung bei 2D-Scans. Jederzeit.

Ohne Compressed SENSE



2D STIR TSE  
Ingenia 1.5T  
0,99 × 1,46 × 3,0 mm  
03:39 min

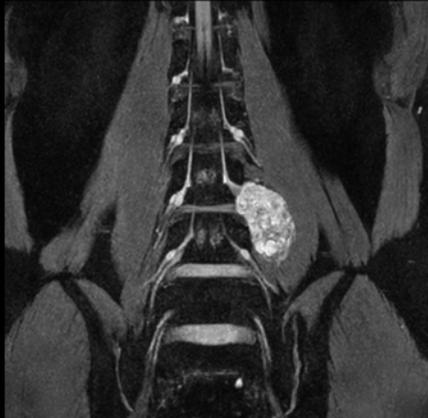
Mit Compressed SENSE



2D STIR TSE  
Ingenia 1.5T  
0,99 × 1,26 × 3,0 mm  
02:52 min

## Beschleunigung bei 3D-Scans. Jederzeit.

Ohne Compressed SENSE



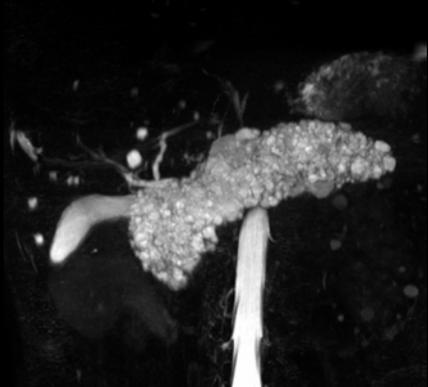
3D T2 TFE  
Ingenia 1.5T  
0,98 × 0,98 × 1,0 mm  
03:52 min

Mit Compressed SENSE



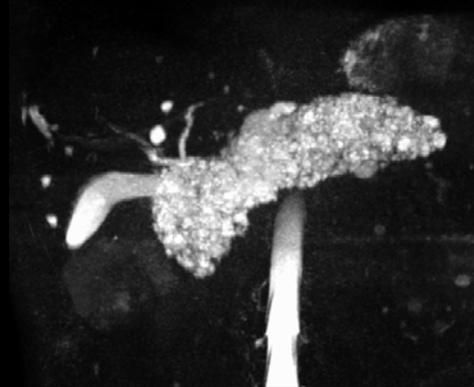
3D T2 TFE  
Ingenia 1.5T  
0,98 × 0,98 × 1,0 mm  
02:53 min

Ohne Compressed SENSE



3D MRCP  
Ingenia 3.0T CX  
0,97 × 0,67 × 2,0 mm  
03:21 min

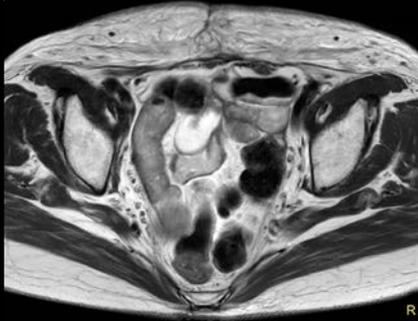
Mit Compressed SENSE



3D MRCP  
Ingenia 3.0T CX  
0,97 × 0,76 × 2,0 mm  
00:45 min

## Beschleunigung bei 2D-Scans. Jederzeit.

Ohne Compressed SENSE



T2W TSE  
Ingenia 3.0T CX  
0,6 × 0,8 × 5,0 mm  
01:44 min

Mit Compressed SENSE



T2W TSE  
Ingenia 3.0T CX  
0,63 × 0,72 × 5,0 mm  
01:07 min

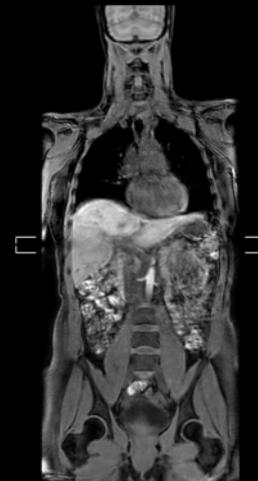
## Beschleunigung bei 3D-Scans. Jederzeit.

Ohne Compressed SENSE



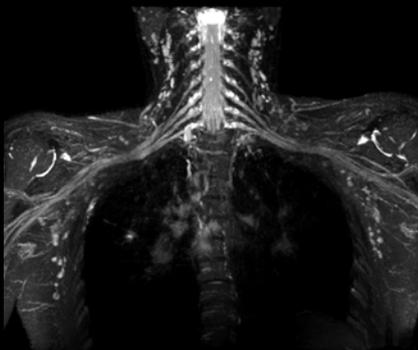
mDIXON XD FFE WB  
Ingenia 1.5T  
4,27 × 4,27 × 4,4 mm  
32 s (16 s/Station)

Mit Compressed SENSE



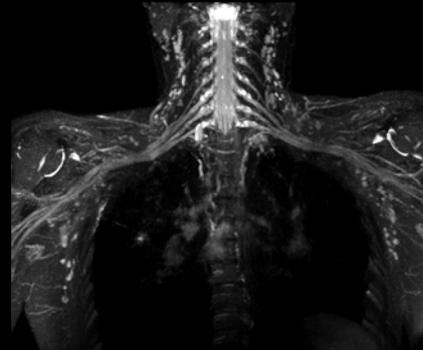
mDIXON XD FFE WB  
Ingenia 1.5T  
4,27 × 4,27 × 4,4 mm  
16 s (8 s/Station)

Ohne Compressed SENSE



3D NerveVIEW  
Ingenia 3.0T  
1,2 × 1,2 × 2,0 mm  
06:16 min

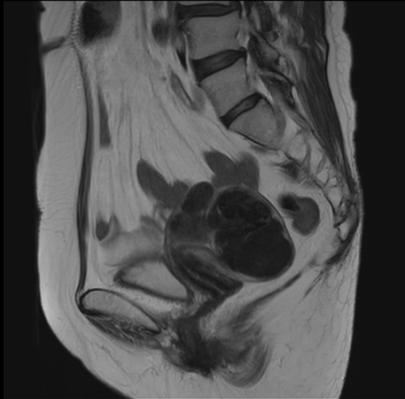
Mit Compressed SENSE



3D NerveVIEW  
Ingenia 3.0T  
1,2 × 1,2 × 2,0 mm  
04:22 min

## Präzision bei 2D-Scans. Jederzeit.

Ohne Compressed SENSE



2D T2W TSE  
Ingenia 1.5T  
0,82 × 0,86 × 5,0 mm  
03:42 min

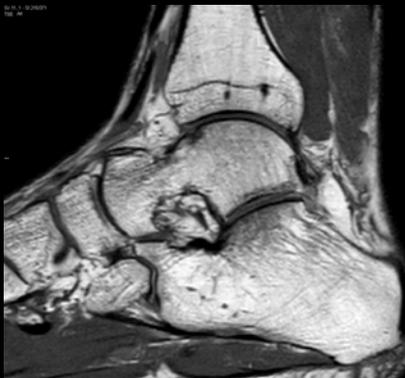
Mit Compressed SENSE



2D T2W TSE  
Ingenia 1.5T  
0,82 × 0,82 × 2,5 mm  
03:23 min

## Präzision bei 3D-Scans. Jederzeit.

Ohne Compressed SENSE



3D PDW MSK VIEW  
Ingenia 1.5T  
0,58 × 0,58 × 0,58 mm  
04:49 min

Mit Compressed SENSE



3D PDW MSK VIEW  
Ingenia 1.5T  
0,5 × 0,5 × 0,5 mm  
04:46 min

Ohne Compressed SENSE



3D T2W PelvisVIEW  
Ingenia 1.5T  
0,98 × 0,98 × 2,0 mm  
04:12 min

Mit Compressed SENSE



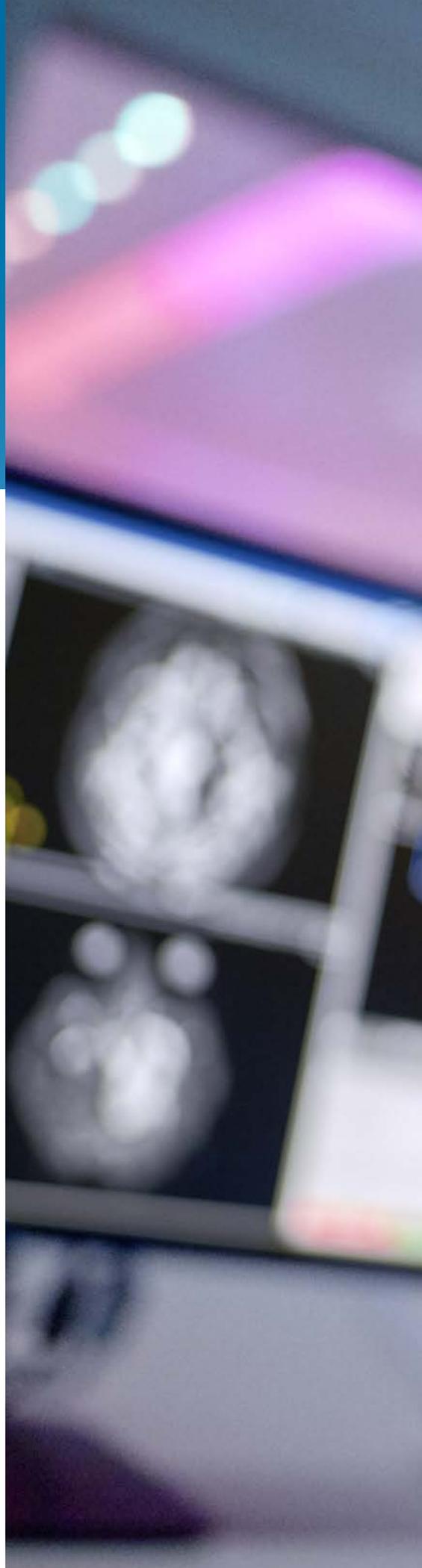
3D T2W PelvisVIEW  
Ingenia 1.5T  
0,98 × 1,03 × 1,0 mm  
04:16 min

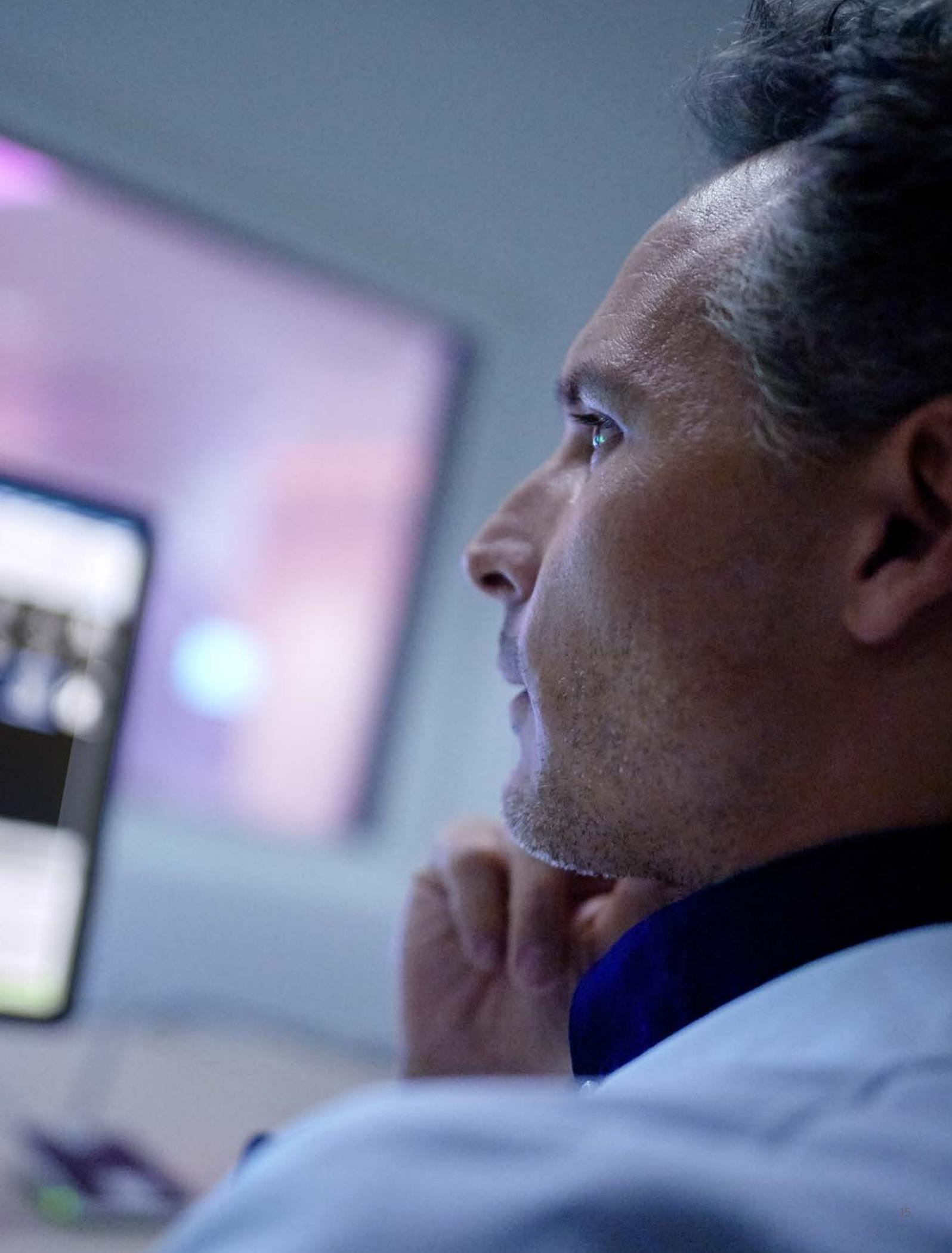
## Fazit

Compressed SENSE von Philips ist für alle Anatomien und anatomischen Kontraste, 2D- und 3D-Sequenzen, mehrere Scantechniken und Feldstärken von 1.5 T und 3.0 T geeignet. Dies wird durch auf SENSE basierende, ausgeglichene Abtastung ermöglicht und erzeugt einen Paradigmenwechsel in der Effizienz, wodurch MR-Abteilungen auf die Herausforderungen von sinkenden Erstattungen und den zunehmenden Einsatz der MRT eingehen können. Durch die Beschleunigung von vollständigen Patientenuntersuchungen werden Möglichkeiten für Krankenhäuser geschaffen, Wartelisten zu verkürzen, täglich mehr Patienten zu untersuchen, Bewegungsartefakte zu verringern und den Patientenkomfort zu erhöhen. Durch die Möglichkeit, Bilder mit höherer Auflösung mit der gleichen Scan-Dauer zu erstellen, kann die Diagnosesicherheit erhöht werden. Compressed SENSE verbessert den Patientenkomfort und ermöglicht es Klinikteams und Personal, sich auf den Patienten zu konzentrieren.

## Literaturverweise

1. Wu, Shin-Yi and Anthony Green. Projection of Chronic Illness Prevalence and Cost Inflation. RAND Corporation; October 2000.
2. OECD, Magnetic resonance imaging (MRI) exams (indicator). <https://data.oecd.org/healthcare/magnetic-resonance-imaging-mri-exams.htm>. Zugriff 31. Oktober 2017.
3. NHE Fact Sheet. Centers for Medicare & Medicaid Services. <https://www.cms.gov/research-statistics-data-and-systems/statistics-trends-and-reports/nationalhealthexpenddata/nhe-fact-sheet.html>. Veröffentlicht am 14. Juni 2017. Zugriff 31. Oktober 2017.
4. Frost & Sullivan. 2016 China Hospital Outlook: Rapid growth, reforms, and privatization transforming China's hospital sector. September 2016.
5. <https://revcycleintelligence.com/news/survey-value-based-reimbursement-to-eclipse-ffs-by-2020>. Veröffentlicht am 14. Juni 2016. Zugriff 31. Oktober 2017.
6. Donoho D. Compressed sensing. IEEE Trans Inf Theory 2006; 52: 1289–1306.
7. Candès EJ, Romberg JK, Tao T. Stable signal recovery from incomplete and inaccurate measurements. Commun Pur Appl Math 2006; 59:1207–1223.
8. Candès, Emmanuel J.; Romberg, Justin K.; Tao, Terence (2006). "Robust Uncertainty Principles: Exact Signal Reconstruction from Highly Incomplete Fourier Information" . IEEE Trans. Inf. Theory. 52 (8): 489–509.
9. Lustig M, Donoho D, Pauly JM. Sparse MRI: The application of compressed sensing for rapid MR imaging. Magnetic Resonance in Medicine. 2007;58(6):1182-95.
10. Hollingsworth, K.G. Reducing acquisition time in clinical MRI by data undersampling and compressed sensing reconstruction. Physics in Medicine & Biology. 2015; 60:R297-322.
11. Peeters H, et al. Next generation parallel imaging with dS SENSE technology. The Netherlands: Philips Healthcare; 2017 Mar. Report No: 4522 991 13591.
12. Pruessmann KP, Weiger M, Scheidegger MR, Boesiger P. SENSE: Sensitivity encoding for fast MRI. Magn. Reson Med. 1999;42(5):952-962.
13. Enhancing the patient experience of imaging. The Netherlands: Philips Healthcare; 2017 Oct. Report No: 4522 991 31021.
14. Quirk ME et al. Anxiety in patients undergoing MR imaging. Radiology. 1989;170(2):463–6.
15. Katz RC, Wilson L, Frazer N. Anxiety and its determinants in patients undergoing magnetic resonance imaging. J Behav Ther Exp Psychiatry. 1994;25(2):131–4.
16. McIsaac HK et al. Claustrophobia and the magnetic resonance imaging procedure. J Behav Med. 1998;21(3):255–68.
17. Brennan SC et al. Anxiety and panic during magnetic resonance scans. Lancet. 1988;2(8609):512.
18. Meléndez, J. Carlos, and Ernest McCrank. "Anxiety-related reactions associated with magnetic resonance imaging examinations." Jama 270.6 (1993): 745–747.







**Diese Unterlagen sind nicht für die Verteilung in den USA bestimmt.**

© 2018 Koninklijke Philips N.V. Alle Rechte vorbehalten. Änderung der Spezifikationen vorbehalten. Marken sind das Eigentum von Koninklijke Philips N.V. oder der jeweiligen Inhaber.

4522 991 31823 \* JAN 2021

**So erreichen Sie uns**  
Bitte besuchen Sie uns unter  
[www.philips.de/healthcare](http://www.philips.de/healthcare).  
[healthcare.deutschland@philips.com](mailto:healthcare.deutschland@philips.com)