



Siemens Healthineers Historical Institute

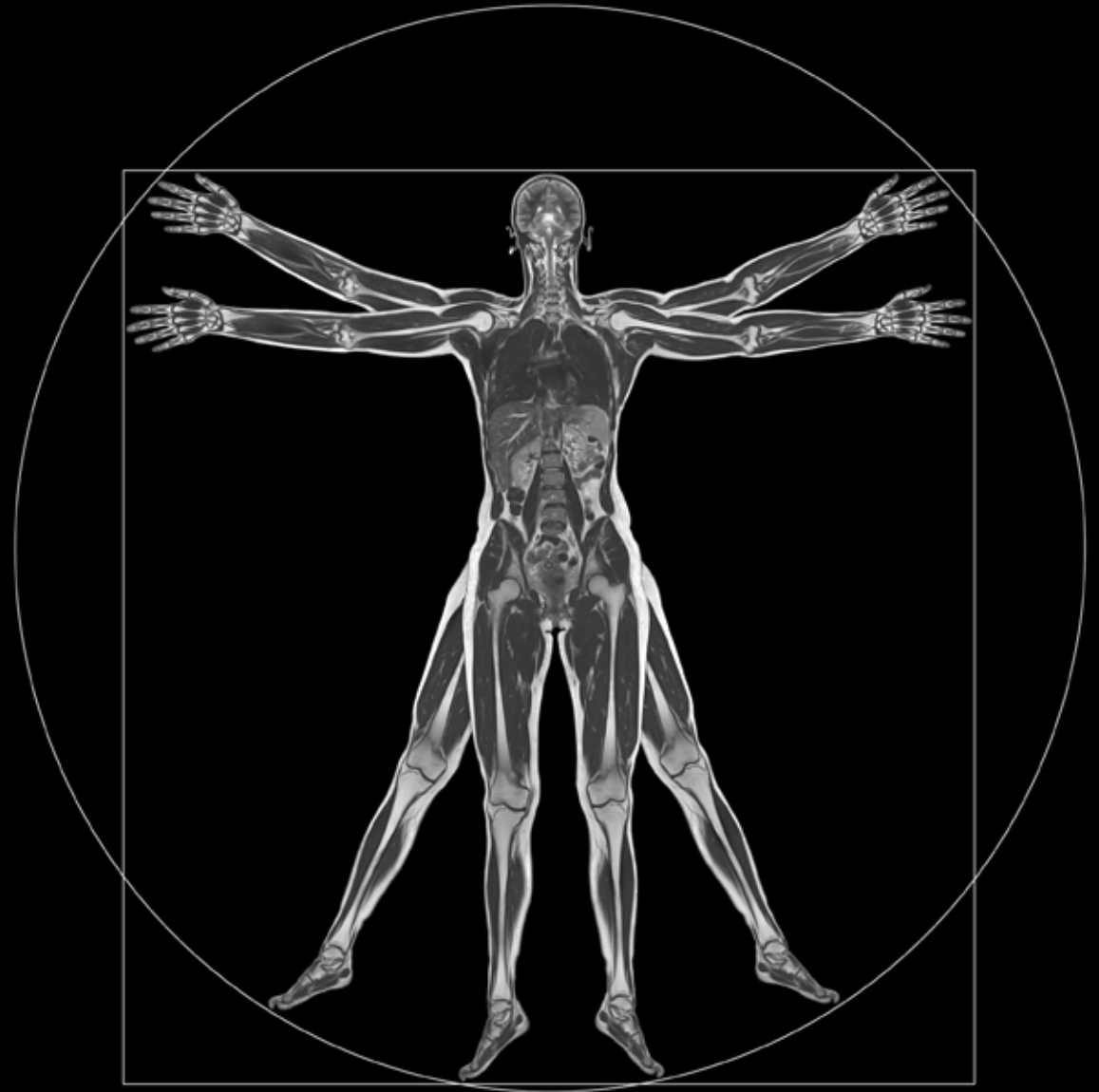
Die Geschichte der Magnetresonanztomographie bei Siemens Healthineers

Siemens Healthineers Historical Institute

Die Geschichte der Magnetresonanztomographie bei Siemens Healthineers

Inhalt

Kern-Gedanken	3
Der Kompass in unserem Körper	4
Die Harmonie einer Wissenschaft	10
„Und flupps, schaltete sich der Magnet aus“	22
Die Reise nach Neuland	32
Der Durchbruch	42
Enter the Matrix	52
Neue Freiheiten	64



Kern-Gedanken

Der Magnetismus begleitet uns durch unser Leben. Die unsichtbare Kraft faszinierte viele von uns bereits als Kinder, etwa als wir vergeblich versuchten, die Waggonen unserer Holzeisenbahn aneinander zu hängen. Warum stoßen sich die Waggonen ab, wenn sie falschherum stehen? Was zieht sie zueinander, wenn sie richtigerum stehen? Auch als Erwachsene nutzen wir täglich Dinge, die ohne die Kraft des Magnetismus nicht funktionieren würden. Alle Elektromotoren – etwa in Mixern, Bohrmaschinen oder elektrischen Zahnbürsten – werden mithilfe von Magneten angetrieben. Alltagsgegenstände wie Computer, Lautsprecher, Telefone, Mikrowellenherde, Parkplatzschranken oder Geldautomaten wären ohne Magnettechnik in ihrer heutigen Form nicht möglich. Zu den besonders beeindruckenden Anwendungen zählen Magnetschwebbahnen, der Teilchenbeschleuniger *Large Hadron Collider* am Europäischen Kernforschungszentrum CERN – und das flexibelste bildgebende Verfahren der Medizin: die Magnetresonanztomographie (MRT).

Die Magnetresonanztomographie – im deutschsprachigen Raum auch unter dem Namen Kernspintomographie bekannt – nimmt unter den bildgebenden Verfahren der Medizin in vielerlei Hinsicht eine besondere Rolle ein. Bereits der Grundgedanke hinter der MRT klingt eigenartig und faszinierend zugleich:

Die Eigenschaften bestimmter Atomkerne lassen sich nutzen, um detaillierte Bilder aus dem Inneren des menschlichen Körpers zu erzeugen.

Als diese Grundidee im Laufe der 1970er und 1980er Jahre verwirklicht wird, stehen die Pioniere der Magnetresonanztomographie jedoch vor völlig neuen Herausforderungen. Denn die Erfahrungen aus der Entwicklung von Röntgengeräten, Ultraschall-Systemen, Computertomographen oder nuklearmedizinischen Scannern helfen in den Anfangsjahren der MRT oft kaum oder gar nicht weiter. Es stellen sich völlig neue Fragen: Was müssen Menschen beachten, die in der Nähe starker Magnetfelder

arbeiten? Sind Luftschläuche mit Membranen die einzige Möglichkeit mit Patient*innen zu sprechen, die während der Untersuchung in der „Röhre“ liegen? Und was haben Straßenbahnen und Aufzüge mit MRT-Untersuchungen zu tun?

Wer als Pionier an der Umsetzung neuer Ideen arbeitet, muss oft unkonventionelle Methoden nutzen, um Herausforderungen zu meistern. Die Geschichte der Magnetresonanztomographie bei Siemens Healthineers ist voller ungewöhnlicher Einfälle. Hinter jedem MR-System stecken viele spannende, oft lehrreiche oder gar amüsante Anekdoten. Dieses Buch erzählt von den Menschen hinter dieser beeindruckenden Technologie, den rasanten Fortschritten und prägenden Innovationen. In der Zeit zwischen der Arbeit am Prototyp des ersten MAGNETOM in einer kleinen Holzhütte in Erlangen und den aktuellen Systemen der neuen Generation wurden viele große Meilensteine erreicht. Doch zunächst werfen wir einen Blick auf die grundlegende Technik der Magnetresonanztomographie. Wie ist es möglich, mithilfe von Magneten in das Innere unseres Körpers zu blicken?

Der Kompass in unserem Körper

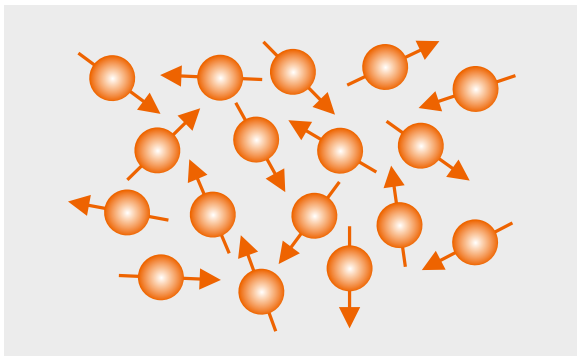
Eine kurze Einführung in die Grundlagen der Magnetresonanztomographie

Unser Körper besteht zu rund 65 Prozent aus Wasser, das wiederum aus winzigen Teilchen zusammengesetzt ist: aus Wasserstoff- und Sauerstoffatomen. Der Atomkern des Wasserstoffs besteht für gewöhnlich aus einem positiv geladenen Proton. Das Proton besitzt einen Spin, das heißt, es dreht sich wie ein Planet permanent um die eigene Achse. Elektrische Ladungen, die sich bewegen, erzeugen um sich herum ein Magnetfeld. Der Kernspin ist also die physikalische Grundlage für die Magnetresonanztomographie. In Materie zeigen die Drehachsen der Wasserstoffkerne im Allgemeinen gleichmäßig in alle möglichen Richtungen und heben ihre magnetischen Wirkungen gegenseitig auf. Deshalb ist der menschliche Körper, wie fast alle Stoffe, nicht magnetisch. Befindet sich unser Körper jedoch in der Nähe eines starken Magnetfelds, richten sich seine Wasserstoff-

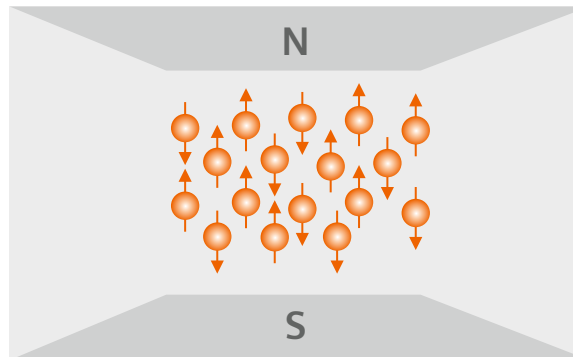
kerne in der Richtung dieses Feldes aus, ähnlich wie eine Kompassnadel im Magnetfeld der Erde – und dieses Phänomen lässt sich mithilfe der Magnetresonanztomographie medizinisch nutzen.

Nimmt beispielsweise eine Patientin auf der Liege des Magnetresonanztomographen Platz und wird in die Tunnelöffnung gefahren, richten sich die Wasserstoffatome ihres Körpers entlang des externen Magnetfeldes aus. In diesem Zustand kreiseln die Wasserstoffatome der Patientin gleichmäßig im Magnetfeld und erzeugen dadurch eine konstante Magnetisierung des Körpers. Das Grundprinzip der Magnetresonanztomographie besteht darin, dieses Gleichgewicht der Spins gezielt zu stören. Dazu sendet der MRT kurze und hochfrequente Wellen, sogenannte HF-Pulse, die auf der gleichen Frequenz

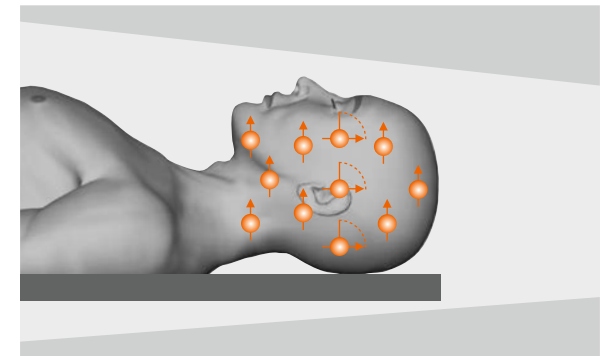
liegen wie die Spins. Der HF-Puls muss in Resonanz mit den Protonen treten. Das heißt, die Radiowellen müssen auf der gleichen Wellenlänge schwingen wie die Drehbewegung der Protonen, um mit ihnen in Wechselwirkung zu treten. Daher der Begriff *Resonanz* in Magnetresonanztomographie. Nach jeder Störung durch einen HF-Puls kehren die Spins relativ schnell in ihren ursprünglichen Zustand zurück. Dieser Vorgang, der in der Physik *Relaxation* genannt wird, lässt sich mit hochempfindlichen Empfangsspulen messen und räumlich zuordnen. Ein Computer rechnet die Messwerte um und erzeugt daraus Tomographien, zu Deutsch: Schnittbilder. Diese Tomographien bilden das Innere des Körpers in dünnen Schichten ab, die von Mediziner*innen zwei- oder dreidimensional am Bildschirm betrachtet werden können.



Die Achsen der Wasserstoffatome des Körpers zeigen in alle möglichen Richtungen und heben ihre magnetischen Wirkungen dadurch gegenseitig auf



Wasserstoffatome besitzen durch den Kernspin magnetische Eigenschaften



Im MRT richten sich die Wasserstoffkerne in die Richtung des Magnetfeldes aus



Die Hauptkomponenten eines Magnetresonanztomographen

Das Herzstück: der Magnet

Prinzipiell ist die Nutzung der Magnetresonanz auch im Magnetfeld der Erde möglich, beispielsweise zur Entdeckung unterirdischer Ölfelder. Denn eine völlig zufällige Orientierung der Spins in alle möglichen Raumrichtungen tritt nur im absolut feldfreien Raum auf. Zur klinischen Bildgebung sind jedoch zehntausendfach stärkere Magnetfelder nötig. Der Magnet eines MRT-Systems mit 3 Tesla zum Beispiel erzeugt ein Feld, das etwa 66.000-mal stärker ist als das Magnetfeld der Erde. Die Einheit Tesla bezeichnet genau genommen die magnetische Flussdichte. Umgangssprachlich hat sich dafür jedoch die Bezeichnung „Feldstärke“ eingebürgert, also die Stärke des Magnetfeldes – auch wenn diese Benennung physikalisch nicht korrekt ist. Je stärker das Magnetfeld, desto besser das sogenannte Signal-zu-Rausch-Verhältnis. Das heißt, das vom MRT gemessene Signal hebt sich deutlicher vom Hintergrundrauschen ab. Dieses Rauschen besteht aus unerwünschten Bildpunkten, deren Helligkeit vom eigentlichen Bildinhalt abweicht. Durch den Zusammenhang mit dem Signal-zu-Rausch-Verhältnis wirkt sich die Feldstärke auf die mögliche Bildauflösung aus, auf die Untersuchungszeiten und auf den Bildkontrast, also auf den Unterschied zwischen dunklen und hellen Bildpunkten.

Neben der erwünschten Feldstärke erzeugt der Magnet auch ein unerwünschtes Streufeld: Im Raum um den Magnetresonanztomographen entsteht

ein Magnetfeld, das nicht zur Erzeugung des Bildes benötigt wird. Dieses Streufeld wirkt sich auf magnetische Gegenstände im und um den Untersuchungsraum aus. Sowohl der Magnet als auch der Untersuchungsraum müssen deshalb abgeschirmt werden. Ältere Abschirmungen waren aus Eisen und der Magnet wog damit bis zu 38 Tonnen. Moderne MRT-Anlagen sind mit speziellen Spulen abgeschirmt und wiegen in der Regel zwischen 4 und 7 Tonnen. Für die Bildqualität eines Magnetresonanztomographen ist neben der Feldstärke unter anderem auch die Verteilung der Kraftwirkung im Magnetfeld von enormer Bedeutung. Die Kraftverteilung lässt sich als magnetische Feldlinien darstellen. Ein Magnetfeld, das überall die gleiche Feldstärke besitzt, nennt man *homogen*. Die Feldlinien eines homogenen Magnetfeldes verlaufen parallel.

Die für die Magnetresonanztomographie nötigen starken Magnetfelder werden in der Regel mit sogenannten supraleitenden Magneten erzeugt. Supraleitend bedeutet, dass die Niob-Titan-Drähte der Magnetspulen bei einer Temperatur von minus 269 Grad Celsius keinen elektrischen Widerstand mehr besitzen. Um die tiefe Temperatur aufrecht zu erhalten, müssen die Spulen bei fast allen Systemen von mehreren Hundert Litern flüssigem Helium umgeben sein. Helium ist ein ungiftiges Edelgas und die einzige Substanz, die bei normalem Druck selbst am absoluten Nullpunkt bei minus 273,15 Grad Celsius nicht fest wird. Im Magnetresonanztomographen

wirkt das Helium ähnlich wie eine Thermoskanne: Die Wärmeübertragung zwischen Inhalt und Umgebung verringert sich. Doch wie eine Thermoskanne isoliert auch die Helium-Ummantelung nicht perfekt. Mit der Zeit verdampft das Edelgas durch die Wärme der Umgebung. Ältere MRT-Systeme verbrauchten bis zu 0,5 Liter Helium pro Stunde, nach rund sechs Wochen musste das Edelgas nachgefüllt werden. Bei modernen Systemen jedoch verdampft im normalen Betrieb kein oder kaum Helium, für gewöhnlich reicht heute weniger als eine Nachfüllung pro Jahr (Zero boil-off-Technologie). Im Vergleich zu herkömmlichen Elektromagneten haben supraleitende Magnete zahlreiche Vorteile: Unter anderem wird keine Stromzufuhr mehr benötigt, nachdem die Spulen einmal mit Strom geladen wurden. Es entsteht keine Wärme, die abgeführt werden muss. Ein Magnetfeld eines supraleitenden Magneten ist also rund um die Uhr stabil, ohne dabei elektrischen Strom zu verbrauchen. Durch das im Vergleich zu anderen Magneten stärkere Magnetfeld richten sich mehr Protonen parallel zum Feld aus, was zu einem besseren Signal-zu-Rausch-Verhältnis führt und damit zu einer höheren Auflösung der Untersuchungsbilder.

Vom Signal zum Bild: die Gradienten-Technik

Die Signale aus dem Körper im Magnetfeld müssen ihrem Ursprungsort exakt zugeordnet werden. Dazu erzeugt das sogenannte Gradientensystem in den

drei Raumrichtungen weitere Magnetfelder, die das Hauptmagnetfeld überlagern. Ein Gradient ist also eine Änderung des Magnetfeldes in einer bestimmten Richtung. Die Spulen, die die Gradienten erzeugen, lassen sich tausende Male pro Sekunde an- und ausschalten. Dadurch wird im Raum eine Schicht erzeugt, die dem Abschnitt des Körpers entspricht, der untersucht werden soll. Außerhalb dieser Schicht bleiben die Kernspins vom HF-Puls unbeeinflusst. Durch diesen Messvorgang werden Rohdaten erzeugt, die bei der Berechnung des Bildes die Ortskoordinaten beisteuern.

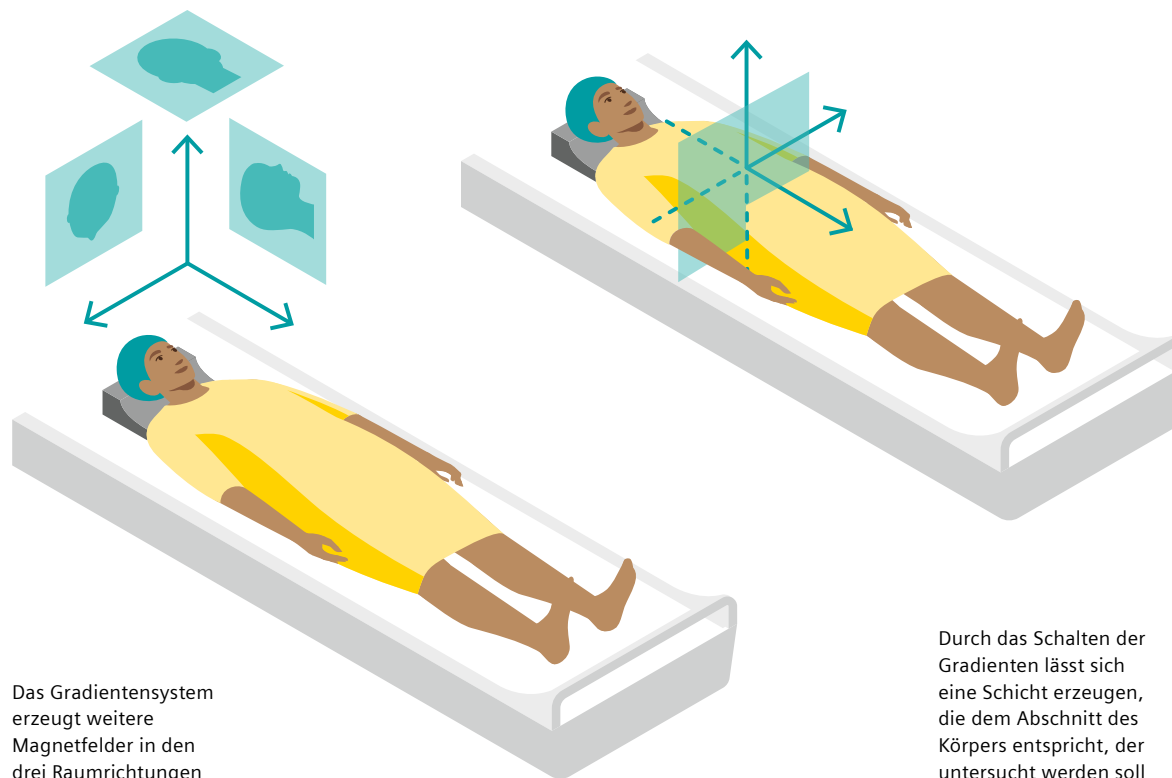
Das schnelle Schalten der Gradientenspulen ist die Ursache für die teilweise sehr lauten Geräusche des Magnetresonanztomographen. Die Spulen sind in Kunststoffstrukturen eingelassen, die im Inneren des Magnettunnels direkt um den Patienten oder die Patientin angeordnet sind. Da die Gradientenfelder stärker sein müssen als das Hauptmagnetfeld, werden die Spulen innerhalb von Mikrosekunden mit sehr hohen Stromstärken an- und ausgeschaltet. Dabei wirken enorme Kräfte auf die Kunststoffstrukturen und die Spulen. Das Gradientensystem vibriert, was sich je nach Frequenz beispielsweise als Hämmern, Klopfen oder Brummen äußert.

Senden und empfangen: das Hochfrequenz-System und die Sequenzen

Die Kernspins im Körper der Patient*innen werden durch gepulste magnetische Hochfrequenzfelder angeregt. Zunächst sendet die HF-Spule das Signal zur Anregung der Spins, dann schaltet sie innerhalb weniger Mikrosekunden auf Empfang, um die „Antwort“ der Atome zu erfassen. Eine Mikrosekunde entspricht 0,000001 Sekunden. Eine Körperspule mit großem Messfeld ist fest in den Magnetresonanztomographen integriert. Je nach untersuchter Körperregion kommen zusätzliche Sonderspulen zum Einsatz, deren Form auf die entsprechende Region abgestimmt ist. Zur Untersuchung größerer Körperregionen werden heute sogenannte Array-Spulen verwendet. Dabei handelt es sich um Spulen mit mehreren kleineren Spulenelementen, die sich entsprechend der Untersuchungsanordnung kombinieren lassen.

Der Magnetresonanztomograph regt die Spins durch sogenannte Puls-Sequenzen an. Vereinfacht zusammengefasst: Das System aktiviert die verschiedenen Gradientenspulen zu unterschiedlichen Zeitpunkten während der Messung, sendet den HF-Puls zur Anregung der Kernspins und empfängt das „Echo“ der Resonanz. Je nach gewünschter Bildqualität müssen diese Schritte viele Male wiederholt werden. Je mehr Resonanzsignale der MRT aus dem Körper empfängt, desto höher die Bildqualität. Die Wahl der Puls-Sequenz beeinflusst die Aussagekraft der Bilder; denn die Einstellungen wirken sich unmittelbar auf den Kontrast und die Auflösung der Bilder aus. Bei gleicher Hardware lassen sich viele verschiedene Puls-Sequenzen software-gesteuert erzeugen.

Unterschiedliche Gewebearten senden je nach Puls-Sequenz verschiedene Signale, die auf dem Ergebnisbild in unterschiedlichen Grautönen erscheinen.



Das Gradientensystem erzeugt weitere Magnetfelder in den drei Raumrichtungen

Durch das Schalten der Gradienten lässt sich eine Schicht erzeugen, die dem Abschnitt des Körpers entspricht, der untersucht werden soll

Bestimmte Sequenzen sind beispielsweise ausgezeichnet zur Darstellung des Herzmuskels geeignet, andere zur Abbildung des Gehirns oder der Muskulatur. Die außergewöhnliche Flexibilität der Magnetresonanztomographie liegt vor allem in den zahlreichen unterschiedlichen Puls-Sequenzen begründet, die im Laufe der Zeit entwickelt wurden.

Was passiert während der Untersuchung?

Eine MRT-Untersuchung dauert mit Vorbereitung der Patient*innen in der Regel zwischen 20 und 60 Minuten. Da der Magnetresonanztomograph mit starken Magnetfeldern arbeitet, werden Patient*innen gebeten, magnetische Gegenstände wie Schmuck, Piercings, Uhr und Brille abzulegen. Bestimmte Implantate – wie zum Beispiel Herzschrittmacher, Stents oder künstliche Gelenke – werden durch das Magnetfeld beeinflusst und sollten dem Personal daher unbedingt vor der Untersuchung gemeldet werden. Da in manchen Kosmetikartikeln Metallpartikel enthalten sind, die sich auf die Bildqualität auswirken können, sollten Patient*innen vor allem bei Kopfuntersuchungen ungeschminkt zum Termin erscheinen. Große Tätowierungen fühlen sich während der Untersuchung möglicherweise etwas warm an, da die Metallpartikel bestimmter Farben von den Magnetfeldern leicht in Bewegung versetzt werden. Bei manchen Untersuchungen wird Patient*innen vorher ein Kontrastmittel verabreicht, das besondere Körperstrukturen noch deutlicher sichtbar macht, beispielsweise Blutgefäße oder Tumorgewebe.

Je nachdem welcher Körperteil untersucht werden soll, legen sich Patient*innen mit dem Kopf oder den Füßen voran auf die Liege. Das Personal platziert anschließend die Spulen auf den Teilen des Körpers, die untersucht werden sollen. Die meisten Untersuchungen werden in Rückenlage durchgeführt, manche

aber auch in Bauch- oder Seitenlage. Patient*innen bekommen einen weichen Gummiball in die Hand, den sogenannten Rufball, der beim Drücken über eine Gegensprechanlage Kontakt mit dem Personal aufbaut. Zum Schutz vor den Geräuschen des Gradientensystems, die je nach Puls-Sequenz unterschiedlich laut sind, tragen Patient*innen wahlweise Ohrstöpsel oder Kopfhörer mit Musik. Sobald die Patient*innen vorbereitet sind, werden sie auf der Liege in die Öffnung des Magnetresonanztomographen gefahren. Das Personal verlässt nach der

Vorbereitung den Raum, hat die Patient*innen aber während der Untersuchung im Blick, kann Kontakt über die Gegensprechanlage aufnehmen und gegebenenfalls Anweisungen geben. Während der Untersuchung müssen Patient*innen ruhig liegen, damit die Aufnahmen nicht – wie beim Fotografieren – verschwimmen oder verwackeln. Nach Abschluss der Untersuchung werden die Patient*innen wieder aus dem System gefahren und die Radiolog*innen können die MRT-Bilder auswerten.





Je nach zu untersuchender
Körperregion kommen zusätzliche
Sonderspulen zum Einsatz

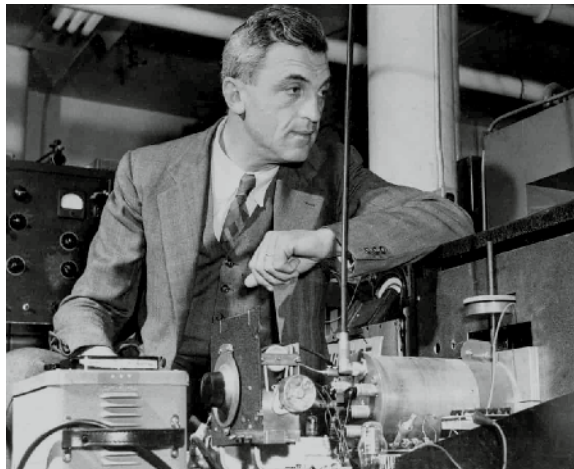
Die Harmonie einer Wissenschaft

Die Entdeckung der Kernspinresonanz und die Anfänge der Entwicklung bei Siemens

Als Felix Bloch im Jahre 1952 den Nobelpreis für Physik in den Händen hält, beginnt er seine Rede mit ehrerbietenden Worten: „Es ist ein Tribut an die Harmonie und das organische Wachstum unseres Wissenschaftszweigs, dass jeder Fortschritt in der Physik zu einem großen Teil auf den vorangegangenen Entwicklungen beruht.“ Seine Entdeckung der Kernspinresonanz sei ein typisches Beispiel für diese Situation. Tausende Menschen haben dazu beigetragen, den Aufbau der Atome und die Wirkung des Magnetismus zu verstehen. Die Geschichte der Magnetresonanztomographie beginnt daher – anders als die der Röntgentechnik – nicht mit einem bestimmten Ereignis; vielmehr besteht sie aus einem riesigen Netz faszinierender Gedanken und Experimente, die von Zeit zu Zeit große Durchbrüche und Fortschritte ermöglicht haben. Mithilfe von Felix Blochs Nobelpreisrede können wir die wichtigsten Meilensteine der Frühzeit überblicken – denn er gibt uns „eine Kurzfassung der langen und bewegten Vorgeschichte“, die ihn schließlich zu seiner Entdeckung der Kernspinresonanz geführt hat.

Brillante Nachforschungen

Bloch betont zunächst, dass seine Forschungen zur Kernspinresonanz letztlich auf der Spektroskopie aufbauen, „einem Gebiet, dem die moderne Physik in mehrerlei Hinsicht so viel zu verdanken hat.“ Ein Spektrum (von lateinisch *spectrum*: Gespenst, Erscheinung) bezeichnete ursprünglich etwas,



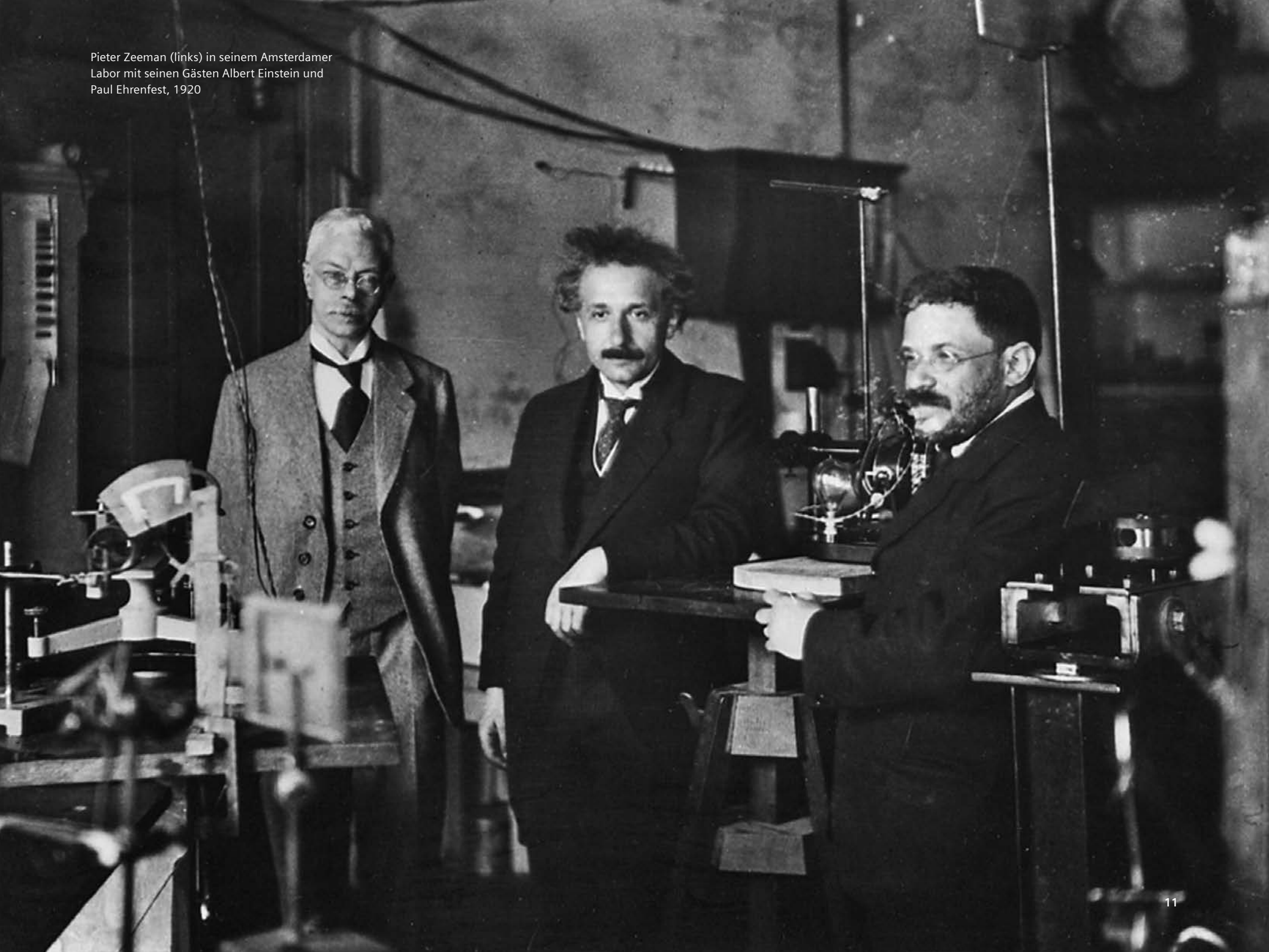
Felix Bloch in seinem Labor an der Stanford University, 1952

das sichtbar, aber unkörperlich ist, beispielsweise die Farben eines Regenbogens. Die Spektroskopie umfasst eine Gruppe physikalischer Methoden, mit der sich die Eigenschaften von Strahlung und ihre Wechselwirkung mit Materie untersuchen lassen. Jede Substanz hat ihre eigenen, charakteristischen Spektren. Eigenschaften wie die Wellenlänge oder die Anzahl der Wellen lassen exakte Rückschlüsse auf die untersuchte Materie zu. Dabei spielt es keine Rolle, welche Spektren analysiert werden sollen: Licht, Wärme, Röntgenstrahlen oder Radiowellen,

alle elektromagnetischen Strahlen können mithilfe der Spektroskopie ebenso in ihre Bestandteile zerlegt werden wie Teilchenstrahlen aus Atomen und Molekülen. In der Astronomie etwa ermöglicht das Verfahren, über das Spektrum eines Sterns die Helligkeit zu bestimmen und dadurch seine Entfernung abzuleiten.

Bei Felix Blochs kernmagnetischen Experimenten war aus seiner Sicht ein Effekt besonders bedeutend, den der niederländische Physiker Pieter Zeeman im Jahre 1896 mithilfe seines Spektroskops erstmals beobachtet hat: Das Spektrum des Lichts verändert sich auf charakteristische Weise, wenn es einem starken Magnetfeld ausgesetzt ist. Statt einer einzigen Wellenlänge lassen sich nun mehrere Wellenlängen beobachten. Zeemans Lehrer Hendrik Antoon Lorentz, einer der einflussreichsten Persönlichkeiten in der Geschichte der Physik, hatte diesen Effekt bereits theoretisch vorhergesagt. Als Lorentz am Samstag, den 31. Oktober 1896, von Zeemans Beobachtung erfährt, bittet er seinen Schüler am darauffolgenden Montag in sein Büro, um ihm die Theorie hinter der Beobachtung zu erklären. In der Atomphysik ist dieses Phänomen heute als Zeeman-Effekt bekannt. Zeeman und Lorentz erhalten für ihre gemeinsame Forschung über den Einfluss des Magnetismus auf die Strahlung im Jahre 1902 den Nobelpreis für Physik – sie sind damit, nach Wilhelm Conrad Röntgen, die zweiten Preisträger in der Geschichte dieser Auszeichnung.

Pieter Zeeman (links) in seinem Amsterdamer Labor mit seinen Gästen Albert Einstein und Paul Ehrenfest, 1920



Von nun an sollten zahlreiche weitere Nobelpreise für Forschungen verliehen werden, die direkt oder indirekt mit der Geschichte der Magnetresonanztomographie zusammenhängen. Felix Bloch hebt in seiner Rede drei seiner Vorgänger besonders hervor: Wolfgang Pauli, Otto Stern und Isidor Isaac Rabi. Der österreichische Physiker Wolfgang Pauli, der 1924 mit dem sogenannten Pauli-Prinzip den Aufbau der Elektronenhülle von Atomen erstmals verständlich erklärt, geht dabei von der Existenz eines Spins des Atomkerns aus. Ein weiterer entscheidender Schritt vorwärts sei dem deutschen Physiker Otto Stern und seinen Experimenten mit Protonen zu verdanken. Protonen gehören neben Neutronen und Elektronen zu den Bausteinen der Atome. Stern gelingt 1933 der Nachweis, dass das Proton des Elements Wasserstoff die Eigenschaften eines Magneten besitzt. Es hat also einen Nordpol und einen Südpol und reagiert demgemäß auf andere Magnetfelder. Der US-amerikanische Physiker Isidor Isaac Rabi baut auf Sterns Arbeit auf und erfindet dabei die sogenannte Molekularstrahl-Magnetresonanz-Detektionsmethode, den Vorläufer der Magnetresonanz-Spektroskopie. In „einer Reihe von brillanten Nachforschungen“, so Bloch, untersucht Rabis Team mithilfe der Resonanzmethode erstmals die magnetischen Eigenschaften von Atomkernen. Rabi erhält 1944 für die Erfindung dieser Methode den Nobelpreis für Physik, Otto Stern ist der Preisträger des Jahres 1943, Wolfgang Pauli erhält die Auszeichnung im Jahre 1945.

Otto Stern legt mit seiner Messung des magnetischen Moments des Wasserstoffatomkerns (des Protons) einen wichtigen Grundstein für die Magnetresonanz-Spektroskopie

Sprachverwirrungen

„Die Idee, dass ein neutrales Elementarteilchen ein magnetisches Moment besitzen sollte, hat mich besonders fasziniert“, fährt Bloch in seiner Rede fort und bezieht sich dabei auf Otto Sterns Entdeckung. Doch lässt sich der Kernspin auch in fester oder flüssiger Materie messen? Ist die Erkenntnis, dass Protonen ein magnetisches Moment besitzen, nur akademisch interessant, oder lässt sie sich auch

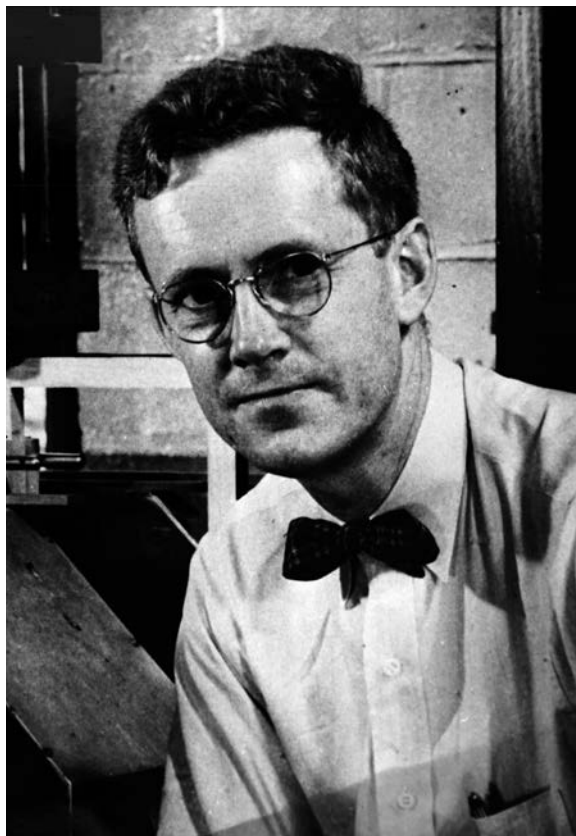
praktisch nutzen? Kurz nach dem Ende des Zweiten Weltkriegs beginnen zwei Forschergruppen damit, diesen Fragen experimentell nachzugehen: Ein von Felix Bloch geleitetes Team an der Stanford University, ein anderes um den US-amerikanischen Physiker Edward M. Purcell am Massachusetts Institute of Technology und der Harvard University. Beide Gruppen, Blochs und Purcells, wissen nichts von der Arbeit der jeweils anderen; beide entwickeln neue Methoden zur kernmagnetischen Präzisionsmessung



und erhalten dafür gemeinsam den Nobelpreis des Jahres 1952. Das Team um Felix Bloch bezeichnet seine Methode und die damit gemachten Entdeckungen als *Kerninduktion* (Nuclear Induction); Edward M. Purcells Gruppe fasst ihre Erkenntnisse unter dem Begriff *Kernspinresonanz* (Nuclear Magnetic Resonance, kurz NMR) zusammen – bei der Veröffentlichung der Arbeiten im Jahre 1946 hat jedoch zunächst kaum jemand erkannt, dass beide Methoden dasselbe Phänomen erforschen.

Als die Fachwelt schließlich zu begreifen beginnt, dass beide Gruppen die gleichen physikalischen Eigenschaften von Atomkernen beschreiben, liegt die Ursache für das anfängliche Missverständnis auf der Hand: Die Teams nutzen unterschiedliche Fachwörter, um ihre neuartigen Erkenntnisse zu beschreiben. Die sprachlichen Unterschiede sind anfangs so ausgeprägt, dass Bloch und Purcell bei ihrem ersten Treffen Schwierigkeiten haben, sich über die Details ihrer Entdeckung auszutauschen. In einfacher Sprache lässt sich die Bedeutung ihrer Arbeiten folgendermaßen zusammenfassen: Bloch und Purcell haben das Prinzip der Kernspinresonanz entdeckt. Sie konnten unter anderem nachweisen, dass Atomkerne in einem Magnetfeld kippen, wenn sie von einem elektromagnetischen Hochfrequenzfeld energetisch angeregt werden. Wird dieses Hochfrequenzfeld abgeschaltet, geben die Atome die aufgenommene Energie ab und kehren in ihren Ausgangszustand zurück. Bei diesem Vorgang, der in der Fachsprache *Relaxation* genannt wird, zeigen alle Atomkerne charakteristische Eigenschaften. In anderen Worten: Bloch und Purcell haben erkannt, wie sich das Phänomen der Kernspinresonanz präzise messen lässt. Zu diesem Zeitpunkt kann jedoch noch niemand ahnen, dass sie damit auch die technische Grundlage der Magnetresonanztomographie erfunden haben. Selbst das enorme Potenzial für die

Materialforschung ist kurz nach Blochs und Purcells Entdeckung noch nicht offensichtlich. Das einzige bekannte NMR-Signal ist die Kernspinresonanz von Wasser. Umso erstaunlicher, dass der US-amerikanische Erfinder Russell Harrison Varian sofort von der zukünftigen Bedeutung der NMR-Spektroskopie überzeugt ist.



Magnetresonanz im Silicon Valley

Russell Varian hatte sich bereits in den 1930er Jahren einen Namen gemacht. Das erste Klystron – eine Hochleistungselektronenröhre zur Erzeugung von Mikrowellen – basiert auf einer Idee Russells, die er zusammen mit seinem Bruder Sigurd und dem US-amerikanischen Physiker William Webster Hansen an der Stanford University in Kalifornien verwirklicht hat. 1947, weniger als ein Jahr nach Blochs Entdeckung der Kernspinresonanz in Stanford, arbeitet Russell Varian mit Wissenschaftlern der Universität an Verbesserungen des Klystrons. Als er von Blochs Arbeit erfährt und das Potenzial der NMR erkennt, schlägt er ihm und Hansen vor, die Technik zum Patent anzumelden. Bloch zeigt jedoch nur wenig Interesse. Er geht davon aus, dass die NMR-Spektroskopie nur für einige wenige Physiker interessant sein würde. Russell und Sigurd Varian erhalten stattdessen die exklusive Lizenz für die Entwicklung von *Verfahren und Hilfsmitteln zur chemischen Analyse durch Kerninduktion*.

Im Jahre 1948 gründeten die Gebrüder Varian gemeinsam mit William Webster Hansen und dem Stanford-Physiker Edward Ginzton die Firma Varian Associates, eines der ersten Hochtechnologie-Unternehmen im heutigen Silicon Valley. Das in der Gründungsurkunde erklärte Ziel von Varian Associates: „Forschungen auf dem Gebiete der

Edward M. Purcells Team fasst die Methoden zur kernmagnetischen Präzisionsmessung erstmals unter dem Begriff Kernspinresonanz zusammen

Naturwissenschaften jeglicher Art durchzuführen“. Zunächst gehen die Gründer davon aus, dass die NMR-Technik ein Grundpfeiler des Unternehmens werden könnte. Das Geschäft mit Klystron-Röhren entwickelt sich jedoch von Anfang an so ertragreich, dass mit den Gewinnen die Entwicklung der NMR-Spektroskopie unterstützt werden kann. Im Jahre 1949 bringt Varian das weltweit erste kommerzielle NMR-Instrument auf den Markt, drei Jahre später macht das deutlich weiterentwickelte Varian NMR-Spektrometer erstmals hochauflösende Materialuntersuchungen möglich. Auch in den folgenden Jahrzehnten prägt Varian die NMR-Technik und die Erforschung des Magnetismus mit zahlreichen Erfindungen. Zu den bekanntesten zählt Russell Varians *Magnetometer*, mit dem Mitte der 1950er Jahre erstmals das Magnetfeld der Erde präzise gemessen wird.

Russell und Sigurd Varian
neben ihrer ersten großen
Erfindung, der Klystronröhre



Die Anfänge bei Siemens

Ohne Varian wäre die Geschichte der NMR-Technik also sehr wahrscheinlich ganz anders verlaufen. Doch der Fokus der Forschung – sowohl bei Varian als auch in der Wissenschaft – liegt Mitte des 20. Jahrhunderts beinahe ausschließlich auf der chemischen Analyse von Materie. An eine medizinische Anwendung denken nur sehr wenige. Die Neugierde mag jedoch bereits zu dieser Zeit den einen oder anderen Forscher dazu gebracht haben, etwas Lebendiges mit einem NMR-Spektroskop zu untersuchen. Felix Bloch, zum Beispiel, hat seinen Finger in die Spule seines Spektrometers gesteckt und dabei ein starkes Signal erhalten. Edward M. Purcell ist 1948 sogar so weit gegangen, seinen Kopf, umgeben von einer Spule, in das 2-Tesla-Magnetfeld eines Zyklotrons der Harvard University zu halten. Doch das einzige messbare Signal, das dabei entstanden ist, war das elektromagnetische Feld seiner Zahnfüllungen. Diese zunächst eher verspielten Versuche sollten sich jedoch schon bald zu gezielten Experimenten entwickeln. Mitte der 1950er Jahre beginnen in mehreren Laboren rund um den Globus erste biologische Forschungen an lebenden Zellen. Einige Erkenntnisse dieser Jahre führen zu einer verheißungsvollen, aber zunächst nur zurückhaltend geäußerten Vermutung: das Phänomen der Kernspinresonanz lässt sich auch für die medizinische Diagnostik nutzen. Einer der wenigen Forscher, die bereits zu dieser Zeit gänzlich davon überzeugt sind, ist der deutsche Physiker Alexander Ganssen.

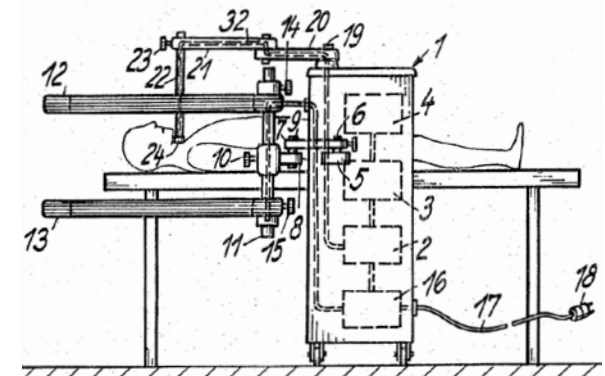
Bereits während seines Studiums beschäftigt sich Alexander Ganssen mit der magnetischen Kernresonanz und bleibt ihr sein Leben lang treu. Ganssen greift 1949 in seiner Doktorarbeit Blochs und Purcells Erkenntnisse auf und entwickelt daraus, wie der Titel der Dissertation verrät, ein „neues Verfahren zur Bestimmung der magnetischen

Atomrelaxationszeiten in Flüssigkeiten“. Nach seiner Promotion tritt Alexander Ganssen im Jahre 1953 eine Stelle als Wissenschaftlicher Assistent an der Technischen Hochschule München an, geht anschließend zehn Jahre in die USA, wo er unter anderem mit den Kernspinresonanz-Laboren des Massachusetts Institute of Technology und der Harvard University zusammenarbeitet, bis er sich schließlich 1965 bei Siemens bewirbt. Ganssen übernimmt die Leitung des neu gegründeten *Elektronenspin- und Kernresonanzlabors* in Erlangen, wo er erforschen soll, ob und wie sich die magnetische Kernresonanz für die medizinische Diagnostik nutzen lässt – wobei die Bezeichnung „Laborleiter“ in diesem Fall etwas umfangreicher klingt, als sie tatsächlich ist: denn der einzige Mitarbeiter des Labors ist Ganssen selbst. Er erhält jedoch vielfältige Unterstützung von seinen Kollegen der Erlanger Grundlagenforschung und aus anderen Laboren von Siemens.

Alexander Ganssen arbeitet bei Siemens zunächst an dem Spezialgebiet der Magnetresonanz, das er bereits zum Thema seiner Doktorarbeit gemacht hatte: die Analyse von Flüssigkeiten. Noch 1965 schlägt Ganssen vor, die Zähflüssigkeit des Blutes in vivo – lateinisch für „im Lebendigen“ – zu messen. Pionierarbeit zur Blutflussmessung hatte einige Jahre zuvor Jay Singer, ein Elektroingenieur der University of California, im Labor an lebenden Mäusen geleistet. Ganssens Herangehensweise führt 1967 zum weltweit ersten Patent eines Ganzkörper-NMR-Geräts, das den Blutfluss der Patient*innen in der Hauptschlagader oder im Arm misst. Das Konzept nimmt in Ansätzen bereits die Angiographie in der Magnetresonanztomographie der 1980er Jahre vorweg. Mit diesem Vorschlag ist Ganssen seiner Zeit jedoch ebenso weit voraus wie mit seinem 1972 eingereichten Patent, das das Konzept der rund 15 Jahre später eingeführten Kontrastmittel beschreibt.

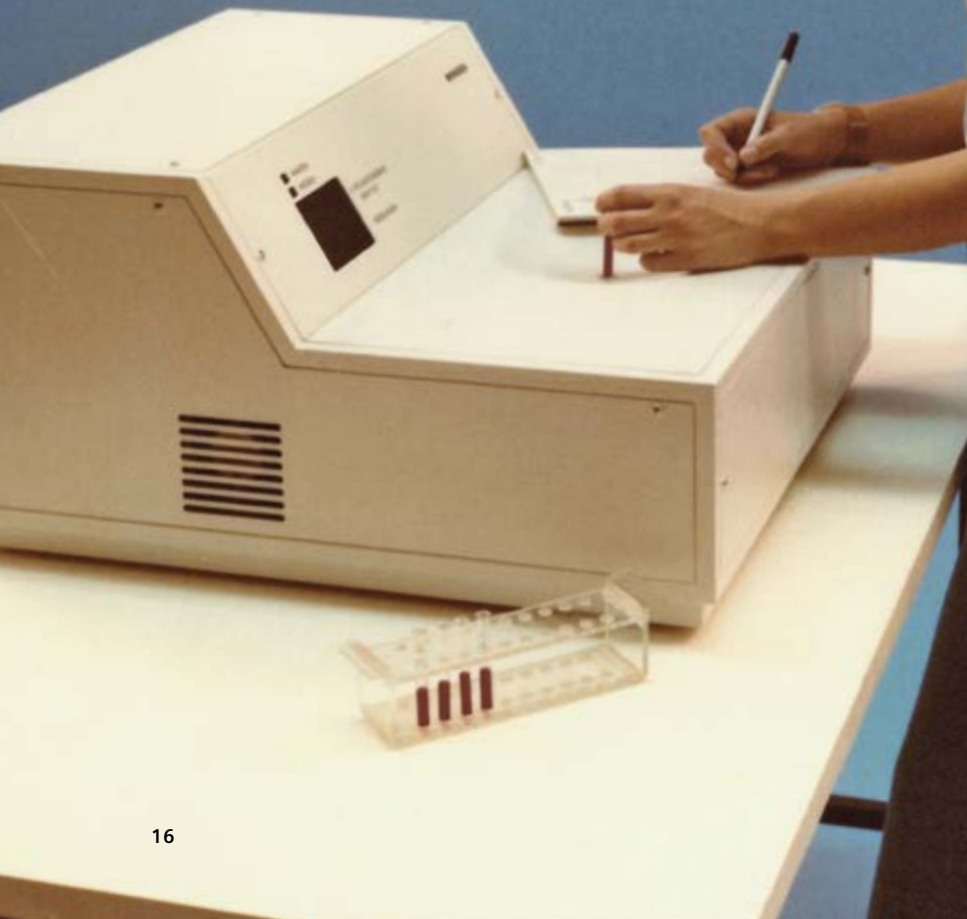


Alexander Ganssen leitet bei Siemens ab 1965 das neu gegründete Elektronenspin- und Kernresonanzlabor in Erlangen



Skizze aus Alexander Ganssens Patentschrift zu einem Ganzkörper-NMR-Gerät, das den Blutfluss in der Hauptschlagader oder im Arm misst

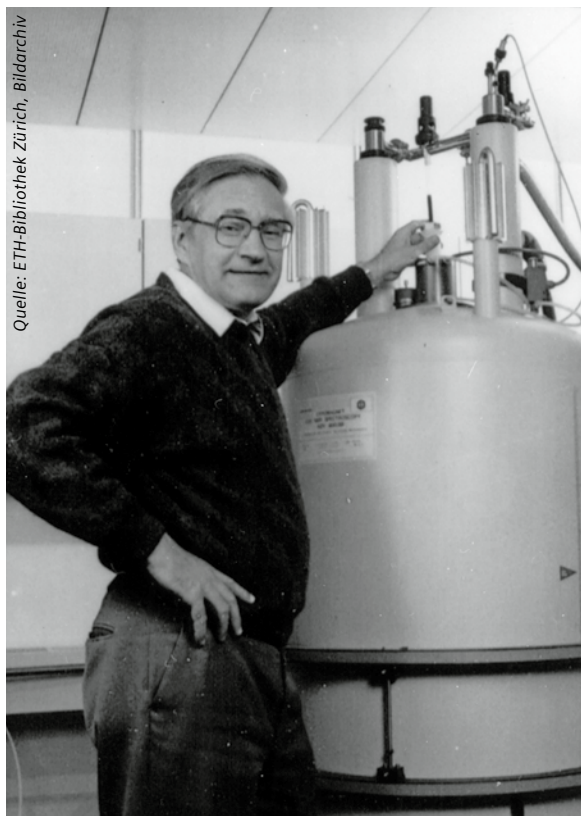
Siemens testet ab 1969 in Zusammenarbeit mit mehreren Kliniken und Hochschulen einen NMR-Apparat zur Analyse von Blut, anderen Körperflüssigkeiten und Gewebe



Ein ebenfalls von Alexander Ganssen erdachtes NMR-Gerät für Analysen von Blut, anderen Körperflüssigkeiten und Gewebe *in vitro* – also im Reagenzglas – testet Siemens ab 1969 in Zusammenarbeit mit mehreren Kliniken und Hochschulen. Der Apparat wird jedoch nie in Serie gebaut. Der Markt für ein solches Spezialgerät ist viel zu klein; das Interesse an biologischen Kernresonanzuntersuchungen bleibt zunächst vorwiegend akademisch. „Mit großer Wahrscheinlichkeit ist jedoch anzunehmen“, hält Ganssen in einer Prognose zur langfristigen Entwicklung des Siemens-Kernresonanzlabors fest, „dass sich früher oder später medizinische Anwendungen finden werden.“ Dabei müsse man die magnetischen Resonanzmethoden weniger als einen Ersatz für Technologien wie Ultraschall oder Röntgen betrachten, „sondern vielmehr als eine Verfeinerung, die, mit den erwähnten Methoden kombiniert, zusätzliche Informationen liefern kann.“ Damit sollte Ganssen ebenso richtig liegen wie mit vielen anderen seiner Annahmen der späten 1960er Jahre. Zu den bemerkenswertesten zählt wohl seine Vermutung aus dem Jahre 1968: „Auf dem Gebiet der Kernspinresonanz erscheint gegenwärtig die Früherkennung von Krebs besonders hoffnungsvoll.“

Es ist zu einem großen Teil Alexander Ganssens Hartnäckigkeit zu verdanken, dass Siemens bereits so früh an den medizinischen Möglichkeiten der Magnetresonanz geforscht hat. Anfang der 1970er Jahre deutet nur sehr wenig darauf hin, dass die Magnetresonanz tatsächlich eine bedeutende Rolle in der Diagnostik einnehmen würde. Regelmäßig muss Ganssen seine Beharrlichkeit begründen. Im Juni 1973 beantwortet er in einem Bericht die selbstgestellte Frage, warum der Siemens Unternehmensbereich Medizinische Technik weiterhin magnetische Kernresonanz betreiben solle, mit den Worten: „Wir beschäftigen uns hier mit dem Bau von Geräten, deren Aufgabe es ist, Informationen zu liefern über

das System Mensch. Die Systemelemente, an die unsere Technik angreifen kann, sind letztlich die Atome, aus denen wir aufgebaut sind.“ Die Ausdauer sollte sich, wie wir gleich sehen werden, bereits vier Jahre später auszahlen. Die medizinische NMR wird in dieser Zeit an verschiedenen Universitäten vom spektroskopischen zum bildgebenden Verfahren entwickelt. Die Details dieser Geschichte erinnern an Felix Blochs Nobelpreisrede – denn auch dieser Fortschritt beruht auf dem harmonischen Wachstum dieser Wissenschaft.



Quelle: ETH-Bibliothek Zürich, Bildarchiv

Richard Ernst beschleunigt die Datenerfassung von Magnetresonanz-Messungen um das Tausendfache

Ein Glücksrad mit Puls

In den späten 1960er und frühen 1970er Jahren scheint die NMR-Technologie den Zenit ihrer Möglichkeiten erreicht zu haben. Viele ältere Physiker vertreten die Meinung, die aufregende Zeit der Magnetresonanz sei vorbei; die nachfolgende Generation täte besser daran, sich „grünere Weiden“ zu suchen. Die Bedeutung mancher Entdeckung für die spätere Magnetresonanztomographie ist zu dieser Zeit kaum abzusehen. Erwin Hahns Spin-Echo-Technik, zum Beispiel, gilt zwar als „wunderschön“ und „elegant“, kommt jedoch bis zur Einführung der MRT praktisch kaum zum Einsatz. Einfach ausgedrückt besagt Hahns Theorie, dass die Spins in Atomkernen ein Echo erzeugen, wenn sie mit zwei Hochfrequenzimpulsen angeregt werden – eine der grundlegenden Methoden der Magnetresonanz-Bildgebung.

Eine ebenso bedeutende Voraussetzung für die moderne Magnetresonanztomographie ist die Arbeit Richard Ernsts, für die er knapp 30 Jahre später den Nobelpreis für Chemie erhalten sollte. Als Richard Ernst im Jahre 1963 seine Stelle bei Varian Associates antritt, sind die Methoden zur Anregung der Kernresonanz noch sehr ineffektiv und daher langsam. Wes Anderson, ein Kollege Ernsts und NMR-Spezialist bei Varian, baut 1964 auf einer Idee Russell Varians auf und erfindet eine neue Methode zur Kernanregung: Die auf den Namen „Wheel of Fortune“ (Glücksrad) getaufte Technologie nutzt – in der zweiten, verbesserten Version – Hochfrequenzimpulse zur Anregung der Kernresonanz und wandelt das gemessene Signal mit der sogenannten Fourier-Transformation um. Die Fourier-Transformation ist eine mathematische Analyseverfahren, ohne die keines der modernen tomographischen Bildgebungsverfahren möglich wäre. Richard Ernst setzt



Titelblatt eines Produktkatalogs zu NMR-Spektroskopen von Varian Associates aus den 1960er Jahren

Wes Andersons Konzept um, indem er zusammen mit einigen Varian-Technikern in nur zwei Monaten ein Puls-Spektrometer baut. Die Idee, mit der Puls-technik ein gesamtes Spektrum anzuregen, beschleunigt die Datenerfassung um das Tausendfache. Richard Ernst verfeinert diese Methode gemeinsam mit Kurt Wüthrich an der Eidgenössischen Technischen Hochschule Zürich, wo er 1968 eine Stelle als Privatdozent annimmt und später zum Professor ernannt wird. Die Pulstechnik in Kombination mit der Fourier-Transformation ist heute eine der wichtigsten Grundlagen der modernen Magnetresonanztomographie.

Vom Spektrum zum Bild

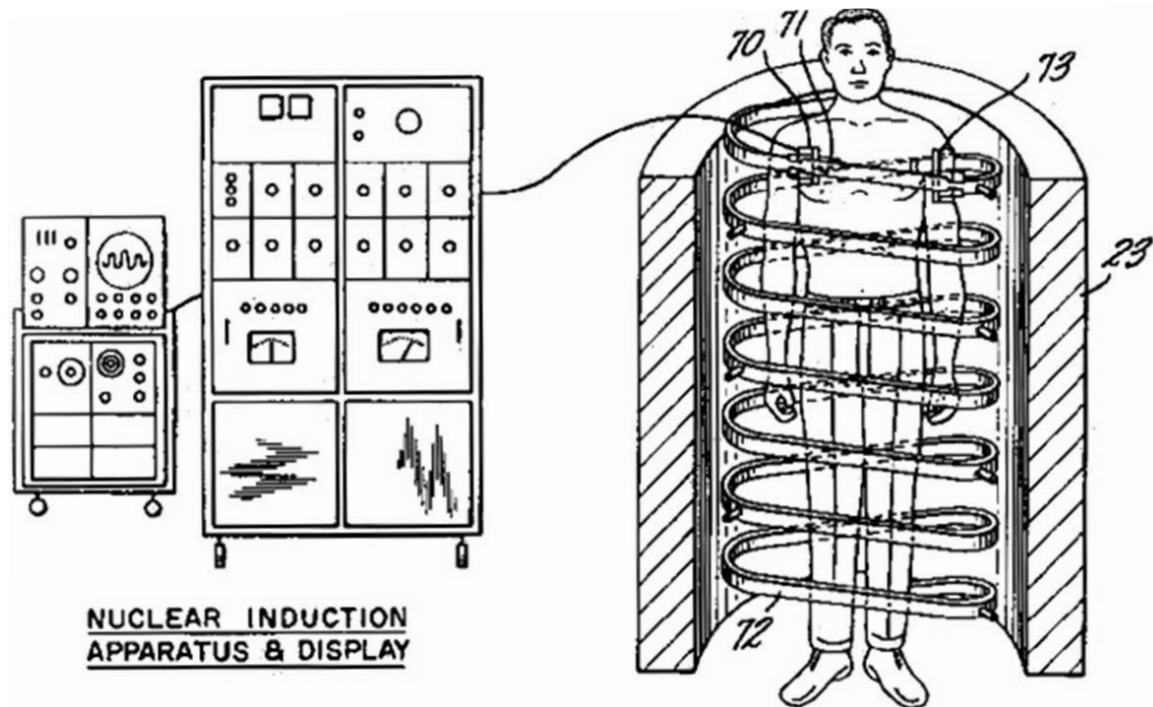
Trotz aller Euphorie über die riesigen technologischen Fortschritte: das enorme Potenzial der NMR-Technik für die Medizin liegt Ende der 1960er Jahre noch beinahe völlig im Dunklen. Die Messung der Blutflussgeschwindigkeit scheint die einzige praktikable Möglichkeit zu sein, die magnetischen Eigenschaften des menschlichen Körpers diagnostisch zu nutzen – bis eine Reihe von Ideen und Beobachtungen eine Entwicklung einläuten, die rund sieben Jahre später zum ersten NMR-Bild aus dem Inneren eines Menschen führt. Im Jahre 1970 vermutet der US-amerikanische Mediziner Raymond Damadian, dass sich Krebszellen und gesundes Gewebe durch die Messung der NMR-Relaxationszeiten

unterscheiden lassen. Bei seinen Untersuchungen an Ratten stellt er fest, dass das entnommene Tumorgewebe tatsächlich längere Relaxationszeiten aufweist als normales Gewebe. Damadian veröffentlicht seine Forschungsergebnisse 1971 im Magazin *Science* und weckt damit das Interesse anderer Wissenschaftler. Die weiteren Veröffentlichungen führen zu dem vermeintlichen Schluss, die Methode sei nicht zuverlässig, weil die absolut gemessenen Relaxationszeiten zu schwankend seien, um sichere Aussagen zu treffen. Doch obwohl keine absoluten Relaxationszeiten gemessen werden können, sind relative Unterschiede sehr stabil nachweisbar. Damadian hat mit seiner Arbeit wesentlich dazu beigetragen, die Aufmerksamkeit auf die medizinischen Möglichkeiten des Magnetresonanz-Verfahrens zu lenken.

Der US-amerikanische Chemiker Paul Christian Lauterbur hat im Sommer des Jahre 1971 die Gelegenheit, solche Krebsuntersuchungen an Gewebeproben von Ratten zu beobachten. Fasziniert von der reichen Vielfalt an Informationen, die eine NMR-Analyse des Gewebes aufdeckt, stellt sich Lauterbur die Frage: „Gibt es einen Weg, mit dem man exakt den Ort bestimmen kann, von dem ein NMR-Signal aus einem komplexen Objekt kommt?“ Am selben Abend, beim Hamburger-Essen in einem Big-Boy-Restaurant, hat Lauterbur einen Geistesblitz, der ihm schließlich den Nobelpreis einbringen sollte: Wenn ein gleichförmiges Magnetfeld mit drei Gradienten-Magnetfeldern überlagert wird, lassen sich die Ortskoordinaten messen und daraus Bilder berechnen. „Ich war mir meiner Sache so sicher, dass ich sofort losging und mir einen Notizblock kaufte, um die Idee festzuhalten.“

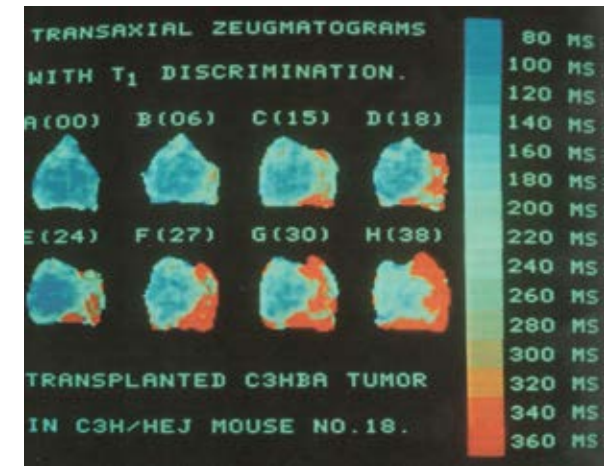
Doch Lauterbur kann zunächst niemanden von seiner Idee überzeugen. Mehrere Monate lang experimentiert er mit einem Varian A-60-Spektrometer und ordnet die Gradienten an verschiedenen Orten im Magnetfeld an – bis ihm schließlich die Aufnahme des ersten Bildes in der Geschichte der Magnetresonanztomographie gelingt: die Abbildung von Wasser in einem Reagenzglas. Er tauft seine Methode auf den Namen *Zeugmatographie*, abgeleitet vom griechischen Wort *Zeugma*, „das, was verbindet“.

Konzept zu einem Ganzkörper-NMR-Scanner aus Raymond Damadians 1972 eingereichtem Patent

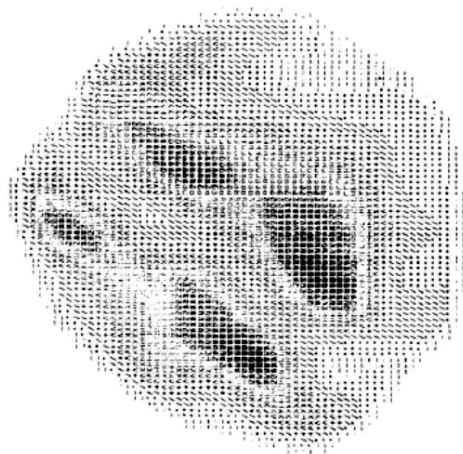


Lauterbur reicht seine Ausarbeitung im Oktober 1972 zur Veröffentlichung im Magazin *Nature* ein, kann den Herausgeber jedoch nur schwer davon überzeugen, dass seine Arbeit tatsächlich relevant sein könnte. Nach einem langen Briefwechsel erscheint Lauterburs Gradienten-Methode schließlich in der März-Ausgabe 1973. Kurze Zeit später, bei der Aufnahme der ersten Bilder von lebendigen Tieren, sind die winzigen Magneten dieser Zeit der limitierende Faktor. Lauterbur bildet zunächst das weiche

Gewebe im Inneren einer vier Millimeter großen Muschel ab, die in einem Reagenzglas mit fünf Millimetern Durchmesser steckt. Die berühmten Aufnahmen, mit denen Lauterbur das Wachstum eines Tumors in einer lebenden Maus über mehrere Wochen beobachtet, gelingen ihm 1974 mit einem optimierten Varian DA-60 Spektroskop mit fünf Zentimeter Magnetdurchmesser. „Dadurch schien es immer plausibler, dass zumindest einige Krebsarten mithilfe der NMR-Bildgebung aufspürbar sein sollten.“

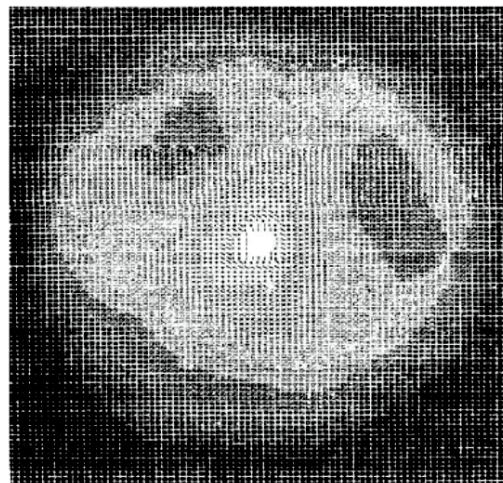


Im Jahre 1974 beobachtet Lauterbur mit einem optimierten Varian DA-60 Spektroskop über mehrere Wochen das Wachstum eines Tumors in einer lebenden Maus



Cross-section of a mouse →
(shades are lungs)

← Oil in peanuts



Paul C. Lauterbur veröffentlicht die ersten Bilder in der Geschichte der Magnetresonanztomographie am 16. März 1973 im Magazin *Nature*

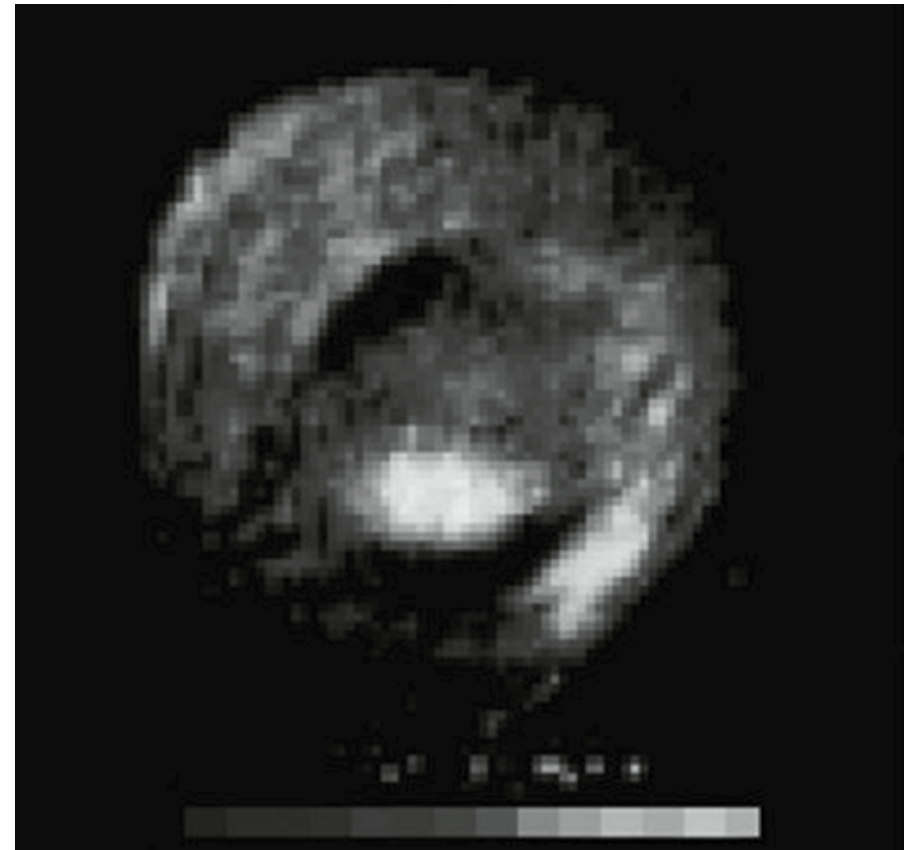


Einen ähnlichen Ansatz wie Paul C. Lauterbur verfolgt zur gleichen Zeit der britische Physiker Peter Mansfield. Wie Lauterbur hat auch Mansfield die Idee, das Hauptmagnetfeld mit Gradienten-Magnetfeldern zu überlagern. Als Mansfield im Jahre 1974 von Lauterburs Arbeit erfährt, kombiniert er beide Ansätze mit einer von ihm entwickelten Technik, die noch heute eine der schnellsten Messmethoden der Magnetresonanztomographie ist: Die Echo-Planar-Bildgebung regt die Kernresonanz durch schnelles Hin- und Herschalten der Gradienten an. Leistungsfähige Computer vorausgesetzt, kann auf diese Weise mit einer einzigen Anregung in wenigen Millisekunden ein Bild aufgenommen werden. Mansfields Computer ist mit vier Kilobyte Arbeitsspeicher zwar noch weit von dieser Messgeschwindigkeit entfernt, dennoch gelingt im Jahre 1976 eine aufsehenerregende Aufnahme: die Abbildung eines Fingers von Mansfields Student Andrew Maudsley ist die erste Magnetresonanztomographie eines lebenden Menschen.

Peter Mansfield baut auf Paul C. Lauterburs Gradienten-Technik auf und beschleunigt die Messung durch die Erfindung der Echo-Planar-Bildgebung deutlich. 2003 erhalten beide gemeinsam den Nobelpreis für Medizin

Im Jahre 1977 nutzt Andrew Maudsley einen etwas größeren Magneten und macht damit die Nerven, die Arterie und anderes Gewebe einer menschlichen Hand sichtbar. Das Potenzial der Magnetresonanztomographie für die Medizin zeigt sich immer deutlicher. Bei Siemens in Erlangen beginnen derweil die Vorbereitungen zum Bau eines Magnetresonanztomographen. Andrew Maudsley wird uns auch in dieser Geschichte wieder begegnen, ebenso wie Paul C. Lauterbur, Sir Peter Mansfield und natürlich Alexander Ganssen.

Die erste Magnetresonanztomographie eines lebenden Menschen: der Finger von Peter Mansfields Student Andrew Maudsley



„Und flupps, schaltete sich der Magnet aus“

Die Patientin aus der „Obstkiste“ und der Prototyp des ersten MAGNETOM

Erlangen, 2. Februar 1978: Der Physiker Arnulf Oppelt sitzt an seinem zweiten Arbeitstag bei Siemens am Schreibtisch, als plötzlich der Leiter der Bildgebungs-entwicklung, Friedrich Gudden, durch sein Büro läuft. Gudden, der Oppelt aus der gemeinsamen Zeit an der Technischen Hochschule Darmstadt kennt, sieht seinen neuen Kollegen und fragt: „Was machen Sie denn hier?“ Oppelt antwortet etwas erstaunt: „Na, ich soll mich doch hier mit Zeugmatographie befassen.“ Gudden erwidert: „Das schlagen Sie sich mal aus dem Kopf! Für so einen Unsinn haben wir hier gar keine Zeit.“ Das sei, wie sich Oppelt rund 40 Jahre später erinnert, natürlich nur ein Spruch gewesen – denn die Entwicklung des ersten Magnetresonanztomographen in der Geschichte von Siemens Healthineers ist zu dieser Zeit längst beschlossene Sache.

Etwa eineinhalb Jahre zuvor, im Sommer 1976, nimmt der Plan zum Bau eines bildgebenden Kernspin-Systems erstmals konkrete Formen an. Alexander Ganssen nutzt seine guten Verbindungen und knüpft Kontakte zu den späteren Nobelpreisträgern Paul C. Lauterbur und Peter Mansfield. Zunächst besucht Ganssen Lauterbur in New York; ein halbes Jahr später kommt Lauterbur zu Siemens nach Erlangen und präsentiert unter anderem seine bekannten Aufnahmen lebender Mäuse. „Aus den gezeigten Bildern, die in den letzten beiden Jahren im Labor von Professor Lauterbur entstanden sind“, schließt Ganssen in seinem Bericht, „dass man sich

bei dieser Technik zwar noch in einem relativ frühen Entwicklungsstadium befindet, dass diese jedoch neue Möglichkeiten der Bildgebung an lebenden Organismen eröffnet, die bisher mit keiner anderen Methode erzielbar waren.“

Eine Reise nach Nottingham in das Labor Peter Mansfields untermauert Ganssens Optimismus. Mansfield zeigt Schnittbilder eines Hasenkopfes, die mit einer Scanzeit von 20 Minuten bereits sehr viele Details des Gewebes sichtbar machen. „Bei den dort gesprochenen Herren bestand nicht der geringste Zweifel darüber, dass auch größere Körperteile mit dieser Methode mit guter räumlicher Auflösung dargestellt werden können“, berichtet Ganssen nach seiner Rückkehr im Juni 1977.



Das erste MRT-Mess-System bei Siemens im Jahre 1978

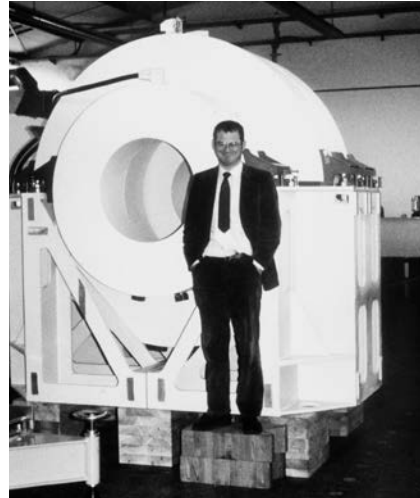
Bei einer Besprechung in Erlangen, am 17. November 1977, empfiehlt Mansfield die Verwendung eines Magneten der Firma Oxford Instruments, den auch er in seinem eigenen Labor nutzt. Unter den Teilnehmern dieser Besprechung befindet sich – neben Oppelt, Ganssen, dessen Chef Rudolf Schittenhelm, sowie Schmitt und Kuckuck aus dem Siemens-Forschungslabor – auch Mansfields ehemaliger Doktorand: Andrew Maudsley, der nach seiner Promotion bei Mansfield ein Jahr lang beim späteren Nobelpreisträger Richard Ernst in Zürich an zweidimensionaler Spektroskopie gearbeitet hat, zählt zweifellos zu den erfahrensten Pionieren der Kernspinresonanz-Bildgebung. Ganssen kann Maudsley überzeugen, von der ETH Zürich zur Siemens-Medizintechnik nach Erlangen zu wechseln. Paul C. Lauterbur und Peter Mansfield arbeiten mit Siemens auch in den folgenden Jahren als Berater zusammen.

Der Umzug in die Holzhütte

„Wir hatten in Herrn Dr. Ganssen einen Kernspinresonanz-Experten, der immer wieder auf die weltweit durchgeführten Experimente hingewiesen hat“, schreibt Friedrich Gudden später in den Erinnerungen an seine Zeit als Entwicklungschef beim Siemens Unternehmensbereich Medizinische Technik. „Er fand einen Bundesgenossen in Dr. Schittenhelm, der 1978 Herrn Dr. Oppelt aus Darmstadt für die Grundlagen-Entwicklung der Kernspintomographie einstellte – ein echter Glücksfall.“ Friedrich Gudden



Das erste MR-Forschungslabor aus Holz, fotografiert im Jahr 1979



Arnulf Oppelt vor einem 0,2-Tesla-Ganzkörpermagneten, den das Siemens Forschungslabor für die erste klinische Installation in Hannover konstruiert hat



Die Versuchsanlage mit Faraday'schem Käfig zur Abschirmung von Hochfrequenzwellen

und Rudolf Schittenhelm müssen sich zunächst gegen so manchen energischen Einwand behaupten. Einige Kollegen hätten die zwei Millionen Deutsche Mark Entwicklungskosten vorzugsweise in die Computertomographie investiert. Doch mit der Einstellung Oppelts und Maudsleys zum 1. Februar 1978 kann die praktische Entwicklung des ersten Prototyps schließlich beginnen. Ganssen verantwortet das Projekt, Oppelt leitet die Entwicklung der Hardware, Maudsley schreibt die Software für Bildrekonstruktion und Komponentensteuerung. Unterstützt wird das Kernteam – Oppelt und Maudsley – von Physikern, Ingenieuren und Elektronikern aus dem Siemens-Forschungszentrum.

Als Arnulf Oppelt mit seiner Arbeit beginnt, ist der große 0,1-Tesla-Magnet aus Oxford bereits bestellt; bis zur Lieferung sollten jedoch noch einige Monate vergehen. Zunächst muss er deshalb auf

Komponenten zurückgreifen, die aus früheren Experimenten Alexander Ganssens stammen. Oppelt findet in Ganssens Labor unter anderem einen Pulsgenerator und einen kleinen, etwa eine Tonne schweren Elektromagneten, der gerade einmal groß genug ist, um ein Reagenzglas oder einen Finger hineinzustecken. „Ich habe das dann zusammengestöpselt, habe einen Elektroniker so lange belagert, bis er einen Vorverstärker gebaut hat, und nach zwei Monaten konnte ich dann das erste NMR-gepulste Signal vorführen.“

Ganssens Labormagnet bleibt bis zur Ankunft des Magneten aus Oxford das provisorische Hilfsmittel, an dem Oppelt und Maudsley die anderen Komponenten testen. Die Ingenieure im Zentralen Forschungslabor konstruieren die Gradientenspulen samt Stromversorgung, die Kollegen der Medizintechnik entwickeln die Hochfrequenztechnik, die

Steuerung und die Software. Dabei sei oft eine Menge Überzeugungsarbeit nötig gewesen, erinnert sich Oppelt. Denn in der Anfangszeit habe jeder seine eigenen Vorstellungen gehabt, wie man Ziele am besten erreichen könne. Einigkeit herrscht über den Ort, an dem der erste Prototyp gebaut werden soll: Um Störungen des Magnetfelds zu vermeiden, errichtet Siemens auf dem Gelände des Zentralen Forschungslabors in Erlangen eine Holzhütte ohne magnetische Teile. Nicht einmal ein Eisennagel ist darin verbaut!

Nach dem Umzug in die Holzhütte bekommt das Erlanger Team abermals Besuch von Peter Mansfield, der unter anderem die ersten Oberkörperaufnahmen von Raymond Damadian aus dem Jahre 1977 im Gepäck hat. Um große Teile eines menschlichen Körpers akkurat abzubilden, muss das Magnetfeld extrem gleichmäßig, also homogen sein. Und diese Homogenität muss messbar sein. Auf der Suche nach

einem Messverfahren werden mehrere, aus heutiger Sicht abenteuerliche Ideen diskutiert. Der wohl außergewöhnlichste Vorschlag: Ein Roboter, der in seiner Grundform bereits im Siemens Forschungslabor existiert, soll mit einem langen Stab und einer Sonde ausgestattet das Magnetfeld Punkt für Punkt abtasten. Oppelt und Maudsley sind sich stattdessen einig, auf einer Methode aufzubauen, die Maudsley während seiner Zeit bei Richard Ernst in Zürich gelernt hat. Sie entwickeln ein zweidimensionales bildgebendes Verfahren, bei dem das Magnetfeld mithilfe von NMR-Spektroskopie analysiert wird – eine Pioniertat, die nach der Veröffentlichung in einem deutschen Fachmagazin zunächst weitgehend unbeachtet bleibt, heute jedoch als *Spectroscopic Imaging* bekannt ist.

Eine praktikable Lösung

Andrew Maudsley entwickelt auch ein Bildgebungsverfahren, das Objekte zeilenweise statt Punkt für Punkt abtastet. In einer späteren, verbesserten Version kann Maudsleys Programm sogar mehrere Linien gleichzeitig messen. „Das hat er auch zum Laufen gebracht auf dem Labormagneten“, erinnert sich Oppelt. Doch Anfang 1979 habe Maudsley Siemens verlassen, um an der Columbia University in New York die Entwicklung von supraleitenden Magneten zu leiten. „Ich hatte dann das Vergnügen, die Elektronik, die wir hatten, und auch den Rechner und das alles in die Holzhütte zum Zentralen Forschungslabor zu bringen und zu installieren.“ Dort läuft Maudsleys Programm aus unbekannten Gründen jedoch nicht. Oppelt hat mit dem Programmieren von Rechnern keine große Erfahrung, und auch ein eigens zur Fehlersuche bestellter Mathematiker kann nicht helfen. Zusammen mit Maudsleys Nachfolger, dem Physiker Wilfried Loeffler, findet Oppelt eine Lösung für das Problem: „Wir lassen

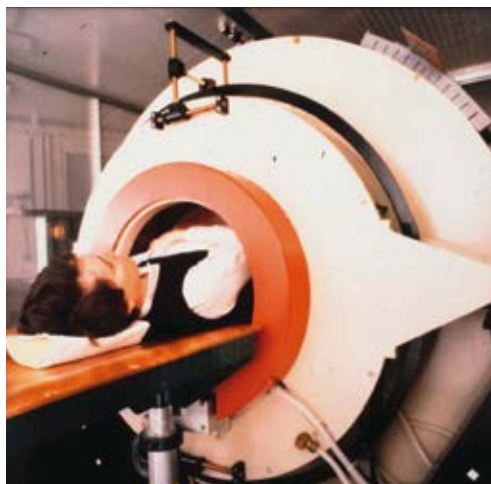
das erstmal sein und gehen auf das Verfahren zur Messung des Magnetfelds zurück.“ Eine äußerst praktikable Lösung, denn diese Technik bietet eine Option, auf der sich aufbauen lässt: sie misst nicht nur die Homogenität, sondern auch die räumliche Verteilung der Spins im Magnetfeld.

Loeffler, der vorher bei Siemens zwei Jahre lang Erfahrung in der Computertomographie gesammelt hat, muss Maudsleys Software zunächst kennenlernen, modifizieren und verbessern. Mitte 1979 ist die erste Versuchsanlage in der Holzhütte aufgebaut und betriebsbereit, „aber wir kriegten keine Bilder zustande.“ Da die Frequenz der Kernresonanz auf der von Radiowellen liegt, sehen Oppelt und Loeffler beispielsweise Signale von Kurzwellensendern aus Australien. Sie bauen einen Faraday'schen Käfig, also eine geschlossene Hülle aus einem elektrischen Leiter, die den Innenraum elektrisch abschirmt. Doch das, „was wir da zusammengeschustert haben“, hat laut Loeffler zwei Schwachstellen: Der Käfig

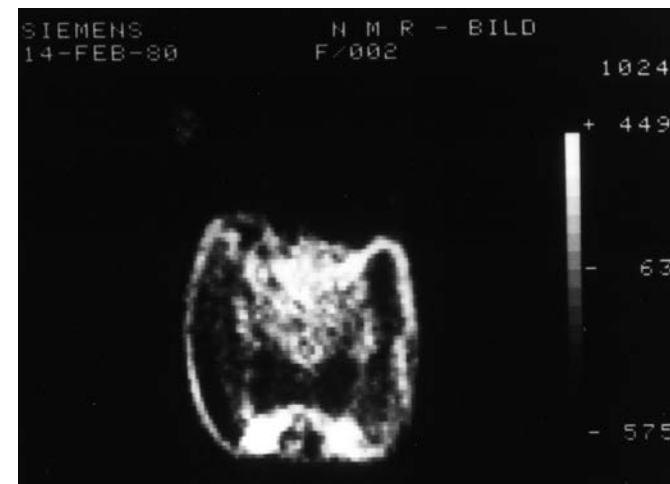
besteht aus Aluminium, also aus einem Material, das – wie man heute weiß – sehr schlecht dafür geeignet ist. Vor allem jedoch „hatten wir darin ein Loch, durch das wir die Kabel zum Magneten gelegt haben. Und das ist praktisch wie eine Antenne für Störungen.“ Das Problem ließe sich eigentlich schnell durch einen Filter lösen, den die Siemens-Energiesparte im Portfolio hat; doch bis zur Lieferung sollten noch Wochen oder gar Monate vergehen.

Die Patientin aus der Obstkiste

„Wir wollten uns aber nicht auf die faule Haut legen und warten“, erzählt Oppelt, „und haben also weiter programmiert und uns beispielsweise neue Pulssequenzen ausgedacht.“ Die Bildstörungen bleiben zunächst bestehen – während der November 1979 immer näher rückt. Oppelt und Loeffler sollen vor den Budgetdurchsprachen für das kommende Jahr reproduzierbare Ergebnisse vorlegen. Das heißt in diesem Fall: ein Bild. Das Argument des fehlenden



Wilfried Loeffler in der Versuchsanlage, 1980



Die Rekonstruktion der Paprika mit dem Datum 14. Februar 1980

Filters gelte nicht, Oppelt solle sich etwas überlegen. „Ich habe dann zum Wilfried Loeffler gesagt: Das ist kein Problem. Wir messen einfach sehr lange, immer wieder und wieder, und dann mitteln wir diese Störungen raus.“ Für die mehrstündige Aufnahmezeit brauchen die beiden ein Messobjekt, das sich nicht bewegt, das eine Struktur hat und das man aufschneiden kann, um nachzusehen, ob das Bild tatsächlich den inneren Aufbau zeigt. „Wir brauchten irgendetwas, was Wasser enthält“, erinnert sich Loeffler.

Mit dem VW Käfer von Loefflers Frau fahren die beiden zur „Obstkiste“ in Erlangen und kaufen eine große, saftige grüne Paprika. „Die haben wir dann in den Prototyp gelegt und gesagt: Ok, jetzt stellen wir das Ding so ein, dass es zwei Stunden lang misst.“ Die Messung sollte vom späten Nachmittag bis in den Abend dauern. Es sei, so Oppelt, natürlich langweilig gewesen, so lange dazusitzen und zuzugucken wie das Gerät klappert; denn immer, wenn die Gradienten schalten, entsteht das für die

Magnetresonanztomographie charakteristische Geräusch. „Dann holen wir uns doch ein bisschen Bier im nahegelegenen Supermarkt“, schlägt Oppelt vor. Das Sixpack vertreibt die Langeweile während des Messvorgangs und „hebt die Stimmung deutlich.“ Als Ganssen, der direkte Vorgesetzte Oppelts und Loefflers, anruft und sich nach dem Stand der Dinge erkundigt, sagen die beiden, er müsse sich schon etwas gedulden. Kurz darauf ruft auch Ganssens Vorgesetzter Schittenhelm und schließlich auch dessen Chef Professor Gudden an, „aber auch er musste sich gedulden.“ Am Abend sind die Daten im Kasten, Oppelt und Loeffler planen die Bildberechnung für den Morgen und gehen nachhause.

„Am nächsten Tag haben wir das Bild dann erstmal rekonstruiert und waren eigentlich begeistert. Dann haben wir es auch unseren Vorgesetzten gezeigt und die waren noch viel mehr begeistert. Alle Welt war begeistert von der Paprika!“ Sofort ist klar, dass Oppelt und Loeffler weitermachen sollen.

Die Magnetresonanztomographie der Paprika ist seitdem in zahlreichen Publikationen veröffentlicht worden, meist mit dem Aufnahmedatum 14. Februar 1980. Tatsächlich wurde das Bild aber im November 1979 aufgenommen. Auf der ersten Rekonstruktion ist jedoch ein kleiner Bildfehler zu sehen. „Da lief ein Balken durch das Bild“, erklärt Oppelt. „Den Fehler haben wir dann ausgemerzt und die Daten neu rekonstruiert. Deswegen steht da 1980.“

Akrobatische Kopfaufnahmen

Nach der erfolgreichen Aufnahme der Paprika soll am 14. März 1980 erstmals ein menschliches Körperteil mit der Versuchsanlage gescannt werden. Bei der allgemeinen Begeisterung fällt es dem Team leicht, einen bereitwilligen Probanden zu finden. „Der Dr. Ganssen war sehr begierig, ist akrobatisch in den Prototyp gekrabbelt und hat seinen Kopf reingehängt“, erzählt Oppelt. Eine Aufnahmezeit von zwei Stunden – wie bei der Paprika – kann Ganssen jedoch nicht zugemutet werden, vor allem nicht in dieser unbequemen Körperhaltung. Nach zwanzig Minuten sind die Daten für die erste Kopfaufnahme gesammelt und rekonstruiert; doch aufgrund des fehlenden Filters lässt das Ergebnis noch zu wünschen übrig. „Wir haben dann eine Liege dazu konstruiert“, erzählt Oppelt, „auf der der Proband sich drauflegen und auch ruhig liegen konnte.“ Im Frühjahr 1980 trifft schließlich der langersehnte Filter in Erlangen ein. In den folgenden Wochen entstehen zahlreiche, klinisch auswertbare Kopfaufnahmen, die Oppelt im Sommer 1980 auf der Jahrestagung der Deutschen Gesellschaft für Neuroradiologie vorstellen kann.

„Die Bildqualität war natürlich noch nicht so überlegend“, erinnert sich Oppelt an seine Präsentation. „Die Neuroradiologen waren da sehr abwartend.“



Die Aufnahme von Alexander Ganssens Kopf dauert Anfang 1980 rund 20 Minuten



Arnulf Oppelts Kopf in der Versuchsanlage, 1980

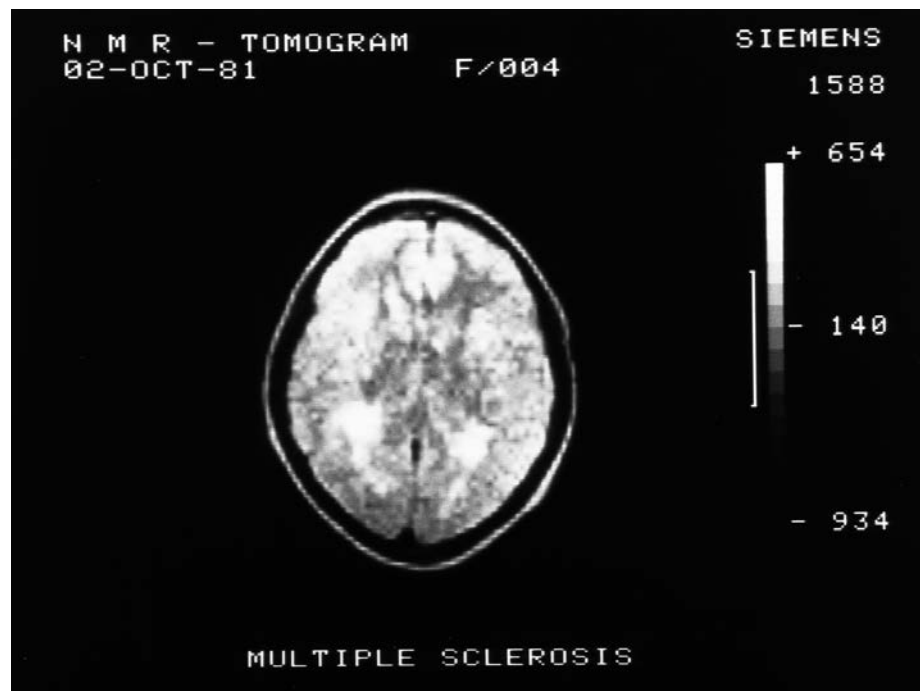


Carola Wölfl bei der Vorbereitung der klinischen Tests im Frühjahr 1981

Die kannten Computertomographie-Aufnahmen – und das hier war was Neues.“ Zu dieser Zeit ist die große Stärke der Magnetresonanztomographie noch nicht klar erkennbar. Doch bereits ein halbes Jahr später zeigt sich der außergewöhnlich hohe Kontrast auf den Kopfaufnahmen immer deutlicher. Als Wilfried Loeffler die Magnetresonanztomographie im Oktober 1980 als neues Verfahren auf dem Deutschen Röntgenkongress vorstellt, erregen die aktuellen Bilder große Aufmerksamkeit. „1979 bestanden sicher noch große Zweifel an der Kernspintomographie“, erinnert sich Loeffler. „Im Laufe des Jahre 1980 wurde es aber eigentlich klar, dass daraus eine neue Diagnostikmethode werden wird.“

Bitte nur ganz vorsichtig spülen!

Anfang 1981 beschließt Siemens, den Prototyp mit einem neuen Magneten von Oxford Instruments weiterzuentwickeln, diesmal mit doppelter Feldstärke, 0,2 Tesla. Dazu soll die Entwicklung von der Holzhütte in eine Laborhalle verlegt werden. „Und wenn die Anlage steht, dann können wir auch Patienten mithilfe von Ärzten aus der Umgebung untersuchen.“ Das Team wird um den Physiker Eckart Stetter und die Medizinisch-technische Assistentin Carola Wölfl erweitert. Stetter schreibt die Routinen der Untersuchungssoftware, Wölfl führt die Untersuchungen durch und hilft Stetter bei der Programmierung. Als die klinischen Tests schließlich beginnen, tritt am zweiten Prototyp ein Problem auf, mit dem wirklich niemand gerechnet hat: „Als die Ärzte mit ihren Patienten kamen“, erzählt Oppelt, „dann mussten sie auch hin und wieder auf die Toilette und drückten auf die Spülung – und flupp, dann schaltete sich der Magnet aus.“ Der Druck auf den Leitungen reicht nicht mehr aus, um die Wasserkühlung des Magneten zu versorgen. „Wir haben dann immer darauf geachtet, dass die Leute, die auf die Toilette gingen, ganz vorsichtig die Spülung drückten.“



Bereits 1981 lassen sich mithilfe der Magnetresonanztomographie Entzündungsherde im Gehirn sichtbar machen

Oppelt fährt jeden Tag früh zur Arbeit, um den Magneten einzuschalten, denn „der brauchte mindestens eine halbe Stunde, um stabil zu laufen.“ Mit einer Leistung von 70 Kilowatt – das entspricht etwa der 40-fachen Leistung eines durchschnittlichen Heizkörpers – erhöht die Anlage im Winter 1981 die Temperatur in der Laborhalle von „sehr kalt“ auf „schön warm“. Der Prototyp läuft zu dieser Zeit bereits weitgehend problemlos. Die Untersuchung von Patientinnen und Patienten, die Siemens im Laufe des Jahres mithilfe der Universitätsklinik Erlangen und dem Klinikum Nürnberg Nord durchführt, bestätigen die mittlerweile sehr hohen

Erwartungen an das neue Verfahren. „Das Potenzial der Magnetresonanztomographie zu diagnostischen Zwecken war klar, als wir 1981 den ersten Tumor auf einer Kopfaufnahme gesehen haben“, erinnert sich Arnulf Oppelt. Laut Wilfried Loeffler habe auch „eine mehr oder weniger zufällige Entdeckung“ die enorme Leistungsfähigkeit der MRT deutlich gezeigt: Bei der Untersuchung einer jungen Patientin mit Multipler Sklerose sei es möglich geworden, die Entzündungsherde im Gehirn zu erkennen. Dass die Darstellung von Multipler Sklerose zu dieser Zeit mit keinem anderen Verfahren möglich gewesen wäre, „war uns allen damals aber zunächst gar nicht klar.“

Das Lichtvisier hilft bei der richtigen
Positionierung der Patient*innen



Der Weg in die Klinik

Während sich im Laufe des Jahres 1980 langsam abgezeichnet hat, dass die Magnetresonanztomographie eine praktikable Diagnosemethode werden könnte, entwickelt sich diese Erwartung 1981 zur Gewissheit. Siemens beschließt unter dem Dach des Geschäftsbereichs Computertomographie eine Produktentwicklung für Kernspintomographen aufzubauen. Am 7. April 1982 verkündet Peter Graßmann, der Entwicklungsleiter der Computertomographie und fortan auch der Magnetresonanztomographie, die Gründung des Geschäftsgebiets Magnetresonanz (zunächst noch unter dem Namen NMR). „Nach wie vor ist CT die Methode, die – medizinisch verstanden – in zunehmendem Maße eingesetzt wird“, schreibt Graßmann in einem Memo an die Belegschaft. „Trotzdem glauben wir an eine langfristige Bedeutung der NMR parallel zur CT.“

Gleichzeitig mit dem Aufbau des Geschäftsbereichs MR plant Oppelts Team in der Grundlagenentwicklung die Installation eines Magnetresonanztomographen in einer Klinik. Eine fortgeschrittene Version des Prototyps soll an der Medizinischen Hochschule Hannover im klinischen Umfeld auf Alltagstauglichkeit getestet werden. Doch Anfang 1982 ist das System noch weit von der Klinikreife entfernt, denn Patient*innen müssen noch immer selbst auf einem Brett in den Magneten kriechen. Ein erfahrener Konstrukteur aus der Siemens Grundlagenabteilung entwickelt für die Anlage in Hannover erstmals eine in zwei Richtungen motorisch verstellbare Liege. Patient*innen können darauf Platz nehmen, werden automatisch auf die Höhe der Magnetöffnung angehoben und mithilfe eines Lichtvisiers am richtigen Ort innerhalb des Magneten positioniert. In diesem Zeitraum entwickelt das Team auch erste Körperspulen, um die Signale aus dem Inneren der Patient*innen zu verbessern. „Am Anfang hatten wir nur eine große

Spule“, erinnert sich Wilfried Loeffler. „Aus der Reagenzglas-MR war bekannt, dass je besser eine Spule dem Objekt angepasst ist, desto besser ist das Signal-Rausch-Verhältnis.“ Zunächst baut das Team eine Empfangsspule für den Kopf, etwas später folgen weitere Oberflächenspulen für andere Körperteile. „Das war damals noch relativ neu, heute ist es Standard.“

Auch der Magnet des Prototyps ist Anfang 1982 noch nicht klinikreif. „Es war halt doch mehr ein Labormagnet“, erzählt Arnulf Oppelt. „Deshalb hat die Zentrale Forschung gesagt, wir können euch einen richtig professionellen Magneten bauen, mit Ölkühlung.“ Mit Unterstützung des Bundesministeriums für Forschung und Technologie entwickelt das Siemens Forschungszentrum einen ölgekühlten normalleitenden 0,2-Tesla-Magneten, der im Februar 1983 in der Abteilung Nuklearmedizin der Medizinischen Hochschule Hannover unter der technischen Leitung Eckart Stettens installiert wird. Die dortige Untersuchung von mehr als 800 Patient*innen trägt erheblich dazu bei, dass wichtige Hinweise zur praktischen Handhabung in die Produktentwicklung einfließen. In der Zwischenzeit hat Wilfried Loeffler in der Produktentwicklung die Leitung einer Physikergruppe übernommen, die das Bildgebungsverfahren optimiert. „Meine Arbeit hat sich ein bisschen von der eigenen Softwareentwicklung und dem gemeinsamen Basteln mit Arnulf Oppelt wegentwickelt zum Schreiben von Algorithmen und Pulssequenzen für das erste MAGNETOM.“ Während Oppelt und Loeffler in der Grundlagenentwicklung auf viele zugekaufte Komponenten zurückgreifen mussten, beginnt mit der Produktentwicklung des MAGNETOM die Zeit der Eigenentwicklungen. „Wenn ich in meinem Laden die Leute alle zusammensitzen habe, die die Komponenten im Detail verstehen, dann kann ich die Komponenten auch besser aufeinander abstimmen“, begründet Loeffler die Entscheidung aus dem Jahre 1982. Eines der wenigen Bauteile, die zu dieser

Zeit nicht unter dem Dach von Siemens entwickelt werden, soll weiterhin von der Firma Oxford Instruments aus England geliefert werden: der Magnet.

Von Normal zu Supra

Bei der bis dahin verwendeten Magnettechnik, den sogenannten normalleitenden Widerstandsmagneten, wird das Magnetfeld mithilfe von großen, stromdurchflossenen Spulen aus Aluminium oder Kupfer erzeugt. Zusammen mit einem Eisenjoch zur Abschirmung beziehungsweise Rückführung des magnetischen Flusses kann ein Magnet mehr als 30 Tonnen wiegen. Jede Erhöhung der Feldstärke um weitere 0,1 Tesla würde den Magneten um etwa zwei Tonnen schwerer machen. Der Stromverbrauch stieg dabei drastisch an, die Spulen gäben nochmals deutlich mehr Wärme ab. Das heißt, die maximal erreichbare Feldstärke ist durch den Leistungsbedarf des Magneten begrenzt. Wirtschaftlich sinnvoll und technisch zweckmäßig lässt sich mit normalleitenden Magneten nur eine Feldstärke von 0,2 Tesla erreichen. Da das Kernspinresonanzsignal mit steigendem Magnetfeld zunimmt, soll die Feldstärke der nächsten Magnet-Generation möglichst auf 0,5 oder 1,5 Tesla erhöht werden. Eine technisch sinnvolle Möglichkeit, solch hohe Feldstärken zu erreichen, liegt in der Verwendung supraleitender Magnetspulen.

Supraleitend bedeutet, dass die Drähte der Magnetspulen bei einer Temperatur von unter minus 269 Grad keinen elektrischen

Widerstand aufweisen. Um die Drähte auf diese niedrige Temperatur zu bringen, werden sie mit flüssigem Helium gekühlt. Zusätzlich schirmt flüssiger Stickstoff das Helium ab, damit es nicht von äußerer Wärmeinstrahlung erhitzt wird und zu schnell verdampft. Peter Graßmann stellt 1982 fest: „Obwohl Siemens über breite Erfahrungen im Supraleitungsbau verfügt und Siemens-Magnete in zahlreichen Großforschungseinrichtungen seit Jahren erfolgreich in

Siemens beschließt im Jahre 1982, in der Magnetentwicklung auf die Erfahrungen der Firma Oxford Instruments zu vertrauen



Betrieb sind (zum Beispiel im CERN in Genf), haben wir uns entschlossen, auf eine Eigenentwicklung eines solchen Magneten zu verzichten und den Magneten von Oxford Instruments zum Einsatz zu bringen.“ In unseren MAGNETOM-Systemen solle unsere Erfahrung in der bildgebenden Magnetresonanz mit der Erfahrung dieser Firma kombiniert werden. „Dies spiegelt unser Zutrauen in den Entwicklungsstand von Oxford Instruments.“

Der Magnetspezialist aus Oxford hat bereits 1977 mit der Entwicklung supraleitender Magnete begonnen. Fünf Jahre später, als Graßmann die Entscheidung für Oxford Instruments verkündet, liefert das Unternehmen rund 300 supraleitende

Magnete pro Jahr für die analytische Kernspinresonanz aus. Das Supraleitungsmaterial, das Oxford Instruments verwendet, stammt fast ausschließlich aus der zu Siemens gehörenden Vakuumschmelze in der hessischen Stadt Hanau. Bereits Anfang der 1980er Jahre können supraleitende Magnete mehrere Jahre lang ohne Unterbrechung betrieben werden. Sie haben, wie auch Graßmann in seiner Prognose erwähnt, nur einen nennenswerten Nachteil: sie sind im Vergleich zu normalleitenden Magneten deutlich teurer in der Anschaffung. „Wir haben uns trotzdem dazu entschlossen, für unsere Kernspinresonanz-Systeme der höheren Bildqualität den Vorzug zu geben vor den Anschaffungskosten.“

Das MAGNETOM und der Röntgen-Preis

Das erste kommerzielle MRT-System von Siemens, das MAGNETOM GBS 1, basiert bereits auf einem supraleitenden Magneten aus Oxford. (Das GBS im Namen steht für Grundbausatz). Als die Anlage im August 1983 nach knapp dreimonatiger Installationszeit am Mallinckrodt Institute of Radiology in St. Louis in Betrieb genommen wird, arbeitet der Magnet mit einer Feldstärke von 0,35 Tesla. „Es war eigentlich ein 0,5-Tesla-Magnet“, erzählt Loeffler, „aber wir haben ihn auf 0,35 Tesla heruntergeregelt, weil wir wegen möglicher Interferenzen bei höheren Frequenzen zunächst etwas vorsichtiger sein wollten.“ In der ersten Serie des MAGNETOM, die zwischen Anfang 1983 und Mitte 1984 gefertigt wird, ist der Magnet noch nicht aktiv abgeschirmt. Das starke Streufeld macht enorme Baumaßnahmen nötig, um störende Einflüsse aus der und auf die Umgebung auszuschließen. Der Münchner Radiologe Hansjörg Heller, der Ende 1983 das erste 0,5-Tesla-MAGNETOM erhält, nimmt den Aufwand der Umbauten dennoch in Kauf: „Ich konnte ja nicht auf die grüne Wiese vor der Stadt gehen. Da wäre keiner gekommen.“

Nach Installation des Prototyps mit normalleitendem Magnet an der Medizinischen Hochschule Hannover durch Eckhart Stetter konzentrieren sich die MR-Arbeiten der Grundlagenentwicklung auf die Verbesserung der Bildqualität, Weiterentwicklung von Pulssequenzen zur Darstellung anderer Bildkontraste und Beschleunigung der Bildgebung, und dem Aufbau von Prototypen mit verschiedenen Feldstärken zwischen 0,23 Tesla und 1,5 Tesla. Arnulf Oppelt hat diese Arbeiten 1986 in einem Bericht zusammengefasst, für den er im gleichen Jahr mit dem Wilhelm-Conrad-Röntgen-Preis ausgezeichnet wurde.



Im August 1983 wird das erste kommerzielle MAGNETOM am Mallinckrodt Institute of Radiology in St. Louis in Betrieb genommen



Das 0,35-Tesla-Modell des ersten MAGNETOM wiegt rund 5,3 Tonnen und benötigt mindestens 95 Quadratmeter Raumfläche. Das etwas später folgende Modell mit 1,5 Tesla ist etwa 7,3 Tonnen schwer und nimmt 140 Quadratmeter in Anspruch

Die Reise nach Neuland

Von fahrenden Magnetresonanztomographen, fliegenden Werkzeugen und abgehobenen Hubwagen

Mit der Gründung des Geschäftsbereichs Magnetresonanz stehen viele Mitarbeiter*innen von Siemens vor völlig neuen Herausforderungen. Der Unternehmensbereich Medizintechnik ist vor allem auf die Entwicklung und Produktion von Computertomographen, Röntgengeräten, Ultraschall-Systemen und nuklearmedizinischen Scannern spezialisiert. Zwar hilft die Erfahrung aus der Computertomographie bei der Entwicklung der Hard- und Software für die Bildberechnung, abgesehen davon unterscheidet sich die Physik der Magnetresonanztomographie jedoch grundlegend von den anderen bildgebenden Verfahren. Die Mitarbeiter*innen, die den neuen Geschäftsbereich aufbauen, müssen umdenken und vieles von Grund auf neu lernen. Die Lösungen, die sie dabei finden, sind manchmal kurios, manchmal kompliziert oder ihrer Zeit weit voraus – und hin und wieder sind obendrein Geduld und Überzeugungskunst vonnöten.

„Plötzlich sollten wir Magnetfelder messen, Hochfrequenzanlagen und -spulen bauen und diese auch testen können“, erinnert sich Peter Scheuering, der zu dieser Zeit als junger Ingenieur in der Prüfplanung der Qualitätssicherung arbeitet. „Wir waren vom Röntgen her auf Niederfrequenzen und hohe Spannungen spezialisiert. Nun kam die Magnetresonanz und wir brauchten plötzlich hohe Ströme und hohe

Frequenzen.“ Die Prüfgeräte, die bis dahin verwendet werden, kosten meist nur rund 100 Deutsche Mark für die Komponenten, plus ein paar Arbeitsstunden

für den Zusammenbau. Mit der Magnetresonanztomographie sind in der Qualitätssicherung auf einmal Prüfgeräte nötig, die das Tausendfache kosten.



Untersuchung am Klinikum
Charlottenburg im Jahre 1983



Die Eisenabschirmung verringert das Streufeld des
Magneten deutlich, wiegt aber mehr als 30 Tonnen

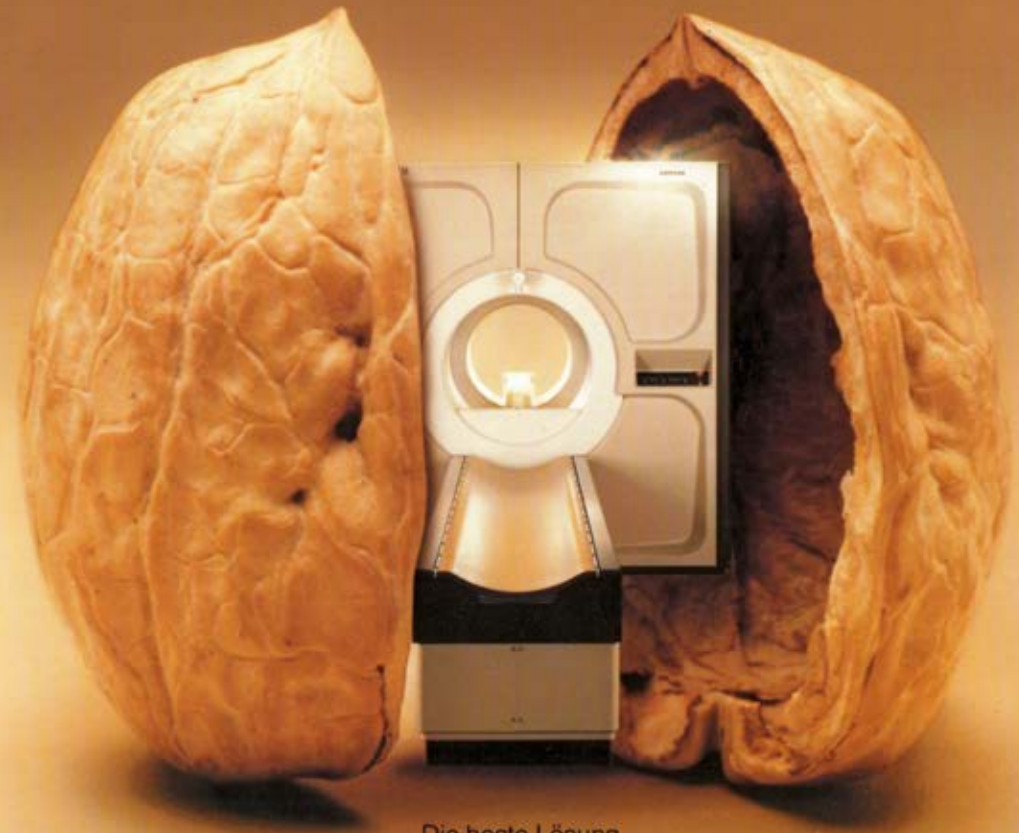
Straßenbahnen und fliegende Schraubenschlüssel

Die Magnetresonanztomographie verändert auch die Arbeit in den radiologischen Abteilungen der Kliniken. Das Personal muss Gegebenheiten beachten, die bei keinem anderen bildgebenden Verfahren relevant sind. Wer etwa einem der frühen Magnetresonanztomographen mit Ton- und Videobändern oder Magnetspeicherkassetten zu nahekommt, steht danach mit gelöschten Datenträgern da. Ein Patientenbett, das am Untersuchungsraum vorbeigeschoben wird, kann das Magnetfeld des MRT-Systems verändern und dadurch die Bildqualität beeinflussen. Schraubenschlüssel oder Zangen in der Hosentasche eines Haustechnikers fliegen zum MRT und der Magnet gibt sie ohne großen Aufwand nicht mehr her. Standard-Werkzeug aus magnetisierbarem Eisen wird mit einem Vielfachen seines Gewichts angezogen. Tückischerweise geschieht dies sehr abrupt. Zwei Meter vom Magneten entfernt ist nur ein leichtes Ziehen zu spüren, zehn Zentimeter näher dran ist das Werkzeug kaum noch zu halten.

Bereits bei der Planung des MRT-Raums müssen sämtliche mögliche Störfaktoren beachtet werden. Fahrende Aufzüge stören das Magnetfeld ebenso wie Stahlschränke und Stromkabel. Ganz besonders heikel sind Straßenbahnen und Züge, die in einem Abstand von weniger als 50 Metern am Magneten vorbeifahren. Schon die ersten Systeme, die „nur“ mit einer Feldstärke von 0,35 Tesla arbeiten, stellen die Raumplaner vor große Herausforderungen. Bei einer Erhöhung der Feldstärke auf 1,5 Tesla müssten Komponenten wie das Bedienpult oder Zubehör wie Monitore und Festplatten nochmals mehr als doppelt so weit entfernt stehen. Eine im Jahre 1984 vorgestellte Möglichkeit, das Magnetfeld abzuschirmen, ist sehr effizient, gleichzeitig aber auch äußerst

SIEMENS

MAGNETOM mit Direktabschirmung



Die beste Lösung
zur Integration einer MR-Anlage
in bestehende Gebäude

unhandlich – denn die sogenannte Direktabschirmung aus Eisen wiegt mehr als 30 Tonnen.

Die Idee hinter dieser Abschirmungsvorrichtung beruht darauf, die äußeren Magnetfelder durch eine dicke Eisenverschalung zu verkürzen. Durch die Eisenabschirmung ist das Streufeld des Magneten etwa fünfmal kleiner, beziehungsweise schwächer. Allerdings stellt die Konstruktion Anforderungen an den Boden einer Klinik, die nicht einmal in der Industrie üblich sind. Der Magnet eines 1,5-Tesla-Systems wiegt im Jahr 1984 rund 7,3 Tonnen; zusammen mit der Eisenabschirmung hat die Anlage ein Gewicht von rund 38 Tonnen. Normale Böden sind darauf ausgelegt, 500 Kilogramm pro Quadratmeter zu tragen, Industrieböden sind mit 2 Tonnen pro Quadratmeter belastbar – die Direktabschirmung setzt eine Bodenbelastbarkeit von sieben Tonnen pro Quadratmeter voraus. Bei Krankenhaus-Neubauten lassen sich Räume für solche MRT-Anlagen einplanen. Sie in einem bestehenden Krankenhaus zu installieren, ist jedoch in vielen Fällen unmöglich. Und es

sollten noch rund fünf Jahre vergehen, bis eine weitere Idee die Magnetabschirmung wesentlich leichter macht. Wie also lässt sich die Magnetresonanztomographie Mitte der 1980er Jahre auch von Kliniken nutzen, die nicht genug Platz und keine ausreichende Bodenbelastbarkeit haben?

Magnetresonanz auf Rädern

Aus der Idee, mobile MRT-Systeme zu den Kunden zu fahren, entsteht das Konzept einer recht ungewöhnlichen radiologischen Praxis. Siemens stattet Sattelschlepper wie komplette Kernspintomographie-Abteilungen aus, mit den gleichen Untersuchungs-, Auswerte- und Betriebseinrichtungen wie in der „echten“ Klinik. Um die extrem empfindliche Magnettechnik sicher über holprige Straßen zu fahren, sind alle Sattelschlepper mit Luftfederungen ausgestattet. Im Frühjahr 1986 rollen die ersten MAGNETOM-Systeme durch die USA, wo sie vor allem von kleineren Krankenhäusern mit hohem Patientenandrang genutzt werden.

Unter neuem Namen

Mitte der 1980er Jahre trägt der Siemens Geschäftsbereich MR – wie im vorigen Kapitel erwähnt – offiziell die Bezeichnung *Geschäftsbereich NMR* (Nuclear Magnetic Resonance). Paul C. Lauterbur's Begriff *Zeugmatographie* hat sich nie wirklich auf breiter Ebene durchgesetzt. Die weltweit gebräuchlichste Bezeichnung für alle Technologien und Verfahren, die das Phänomen der Kernspinresonanz als Analyseverfahren nutzen, war mehr als drei Jahrzehnte lang die Abkürzung NMR. Doch mit der sich immer weiterverbreitenden medizinischen Anwendung verzichteten mehr und mehr Fachleute auf den Namensbestandteil *Nuclear*, denn die MRT hat nichts mit der Kernenergie gemein. Die Entwicklung, als Oberbegriffe für die medizinische Anwendung die Bezeichnungen *Magnetresonanz* oder *Magnetresonanztomographie* zu nutzen, setzt sich Mitte der 1980er Jahre schließlich in der Fachwelt durch und Siemens benennt das Geschäftsgebiet im Jahre 1985 offiziell um.



Die mobilen MAGNETOM-Sattelschlepper sind wie komplette Kernspintomographie-Abteilungen ausgestattet

Aufregung im Anlagenzentrum

Mit einem Problem hat Siemens MR in diesen Tagen noch sehr zu kämpfen: Die Montage eines MAGNETOM beim Kunden dauert meist mehrere Monate, in Ausnahmefällen sogar bis zu zwei Jahre. Die Lösung des Problems liegt in einer Idee, die in den 1970er Jahren erstmals von den Kolleg*innen aus der Röntgenfertigung bei der Installation von Angiographie-Anlagen getestet worden ist. Der Technische Dienst soll die Systeme in den Werken der Siemens-Medizintechnik komplett vormontieren, prüfen, wieder demontieren, versenden und beim Kunden vollständig geprüft wieder aufbauen. 1986 übernimmt das MR-Team dieses Prinzip der modernen Fertigung. Die Vormontage in Erlangen und in Iselin, New Jersey, in den USA führt dazu, dass eventuelle Fehler vorher entdeckt und durch die Nähe zum Ersatzteillager und entsprechenden Spezialist*innen schnell behoben werden können. Die Inbetriebnahmezeit sinkt durch dieses sogenannte Prestaging ebenso dramatisch wie die Kosten.

Im Vergleich zu heute sind die Sicherheitsstandards in der Fertigung Mitte der 1980er Jahre noch deutlich niedriger. Zuweilen sorgt der ein oder andere Zwischenfall für Aufregung in den Siemens Anlagenzentren. „Die Magnete schnappten sich immer wieder mal magnetisierte Teile und verursachten damit mehr oder weniger große Schäden an Liege, Innenverkleidung oder Körperspule der MRT-Anlage“, erinnert sich Peter Scheuering 35 Jahre später. Bis zu zehn Gramm schwere Gegenstände wie Schrauben, Muttern oder Geldstücke lassen sich wieder vom Magneten lösen. „Als dann aber ein ganzer Hubwagen für Euro-Paletten vom Magneten angezogen und sogar zum Abheben vom Boden gebracht wurde, rief das die Sicherheitsleute auf den Plan.“ Bei einem Zwischenfall muss das Magnetfeld so schnell wie möglich ausgeschaltet werden.



Blick in die MR-Fertigung von Siemens in Erlangen im Jahre 1984

Dieses sogenannte Abregen dauert bei der ersten Generation des MAGNETOM allerdings noch mehrere Minuten.

Um den Magneten mit einem einfachen Knopfdruck sicher und schnell herunterzufahren, konstruiert das Entwicklungs-Team die *Emergency Run Down Unit*, kurz ERDU. Die Notabschaltung muss auch funktionieren, wenn der Strom für die Anlage ausfällt.

ERDU braucht also eine Batterie. „Auch eine kleine Herausforderung“, erklärt Scheuering, „denn Batterie und Ladetechnik waren damals noch nicht sehr ausgereift.“ Die Nickel-Cadmium- und Blei-Akkus dieser Zeit sind für einen langen und zuverlässigen Standby nicht geeignet. „Man musste einen Akku bauen, der ‚ahnte‘, wann er kaputt geht, und der den Kliniktechniker rechtzeitig zum Tauschen auffordert. Da war dann clevere und ausgeklügelte Technik gefragt.“

Wie ein Teekessel mit siedendem Wasser

Für die Magnetresonanztomographie müssen in den 1980er Jahren zahlreiche scheinbare Kleinigkeiten neu gedacht und entwickelt werden: Glühlampen, deren Wendel in der Nähe eines MRT nicht nach wenigen Tagen reißen; Monitore, deren Bilder sich durch die Magnetfelder nicht dauerhaft verfälschen; Feuerlöscher, die in der Nähe starker Magnete verwendet werden können. Die supraleitenden Magnete dieser Zeit bergen ein erhöhtes Risiko des Quenchens. Der Begriff *Quench* bedeutet in der Magnetresonanztomographie, dass die Magnetspule plötzlich ihre Supraleitfähigkeit verliert und die in ihr gespeicherte Energie schlagartig als Wärme abgibt. 500 Liter flüssiges Helium verdampfen dabei zu 300.000 Litern Heliumgas. Normalerweise verdampft Helium nicht plötzlich, sondern kontinuierlich, und wird dabei über ein sogenanntes Quenchrohr aus dem Gebäude geleitet. Dennoch könnte theoretisch ein Teil des Heliumgases in den Untersuchungsraum gelangen. Handelsübliche Feuerlöscher sind aus Stahl, also magnetisch, und können daher nicht in der Nähe eines MRT verwendet werden. Siemens entwickelt deshalb gemeinsam mit den Herstellern speziell für die Magnetresonanztomographie Feuerlöscher aus Edelstahl, deren Zylinder, Ventile und Gaskartuschen aus antimagnetischem Material bestehen.

Das Helium ist bei der ersten Anlagen-Generation auch in anderer Hinsicht eine Herausforderung. Die supraleitenden Magnete dieser Zeit sind mit einem offenen, mit siedendem Wasser gefüllten Teekessel vergleichbar! Jede Woche verdampfen rund 100 Liter, während der Preis pro Liter bereits damals umgerechnet bei mehr als 20 Euro liegt. Helium, das verdampft, entweicht ins Weltall und ist für unsere Erde auf immer verloren. Der Bestand schwindet also zunehmend, außer wenn durch Kernfusion aus

Wasserstoff neues Helium auf der Erde erzeugt wird. Zusätzlich muss das Helium von flüssigem Stickstoff abgeschirmt werden, von dem die Anlage ebenfalls jede Woche ein paar 100 Liter benötigt. Mitte der 1980er Jahre gibt es bei Siemens MR einen Mitarbeiter, dessen einzige Aufgabe es ist, die Kühlung der sieben Magnete im Entwicklungslabor am Laufen zu halten. Ein wichtiger Aspekt bei der Weiterentwicklung der MAGNETOM-Systeme ist daher von Anfang an, den Heliumverbrauch so weit wie möglich zu reduzieren – mit dem Ziel, den Bedarf eines Tages sogar auf null zu senken.

Der erste große Schritt in diese Richtung ist die Entwicklung eines Heliumrückverflüssigers, des sogenannten Liquifier. Wenn verdampftes Helium aus der Kammer im Magneten entweicht, fängt die Vorrichtung das Edelgas auf, verflüssigt es mithilfe einer extrem leistungsfähigen Kältemaschine und führt es dem Magneten wieder zu. Die Betriebskosten sinken, das Wartungsintervall verlängert sich enorm und die Heliumreserven der Erde werden geschont. Obendrein wird durch die Heliumrückverflüssigung der bisher nötige Stickstoff-Kühlmantel nicht mehr benötigt, was wiederum die Konstruktion des Magneten vereinfacht und damit weitere Kosten spart.

Nicht für möglich gehaltene Fortschritte

Neben solchen Detailverbesserungen macht das Entwicklungs-Team auch bei den Hauptkomponenten und der Software innerhalb weniger Jahre riesige Fortschritte. Während das erste kommerzielle MAGNETOM 1983 mit einer Feldstärke von 0,35 Tesla arbeitet, leistet der Magnet des MAGNETOM GBS 2 im Jahre 1987 bis zu 2 Tesla. Der vom Zentralen Forschungslabor in Erlangen entwickelte sogenannte Helicon-Magnet mit Liquifier erzeugt das homogenste Feld aller zu dieser Zeit weltweit eingesetzten Magnetresonanztomographen. Die Feldstärke kann

zwischen 0 und 2 Tesla variiert werden, wobei 1,5 Tesla für den klinischen Betrieb und 2 Tesla für die Forschung vorgesehen sind. Diese Veränderung der Feldstärke – das sogenannte Ramping – hat bisher mehrere Stunden in Anspruch genommen, beim Helicon dauert sie weniger als 20 Minuten.



Zwischen 1983 und 1987 sind Leistungsfähigkeit und Bildqualität enorm gestiegen

Die Erhöhung der Feldstärke des Hauptmagnetfeldes ist nur einer der Gründe, warum Leistungsfähigkeit und Bildqualität zwischen 1983 und 1987 enorm gestiegen sind. Auch die Feldstärke der Gradienten wurde in diesem Zeitraum mehr als verdreifacht. Aus der mittlerweile beinahe unüberschaubaren Menge an Puls-Sequenzen ragen zwei besonders heraus: Mit der *Half-Fourier-Matrix*, die bereits seit der ersten System-Generation zum Einsatz kommt, genügt es, nur noch die Hälfte der Daten zu messen. Das MAGNETOM rekonstruiert die andere Hälfte der Daten automatisch. Patient*innen müssen dadurch

Werbeaufnahme zum
MAGNETOM aus dem
Jahre 1987



nur noch halb so lange in der „Röhre“ liegen. Die zweite herausragende Puls-Sequenz baut auf einer Idee auf, die Axel Haase, Jens Frahm, Wolfgang Hänicke, Klaus-Dietmar Merboldt und Dieter Matthaei 1985 am Max-Planck-Institut in Göttingen umgesetzt haben. Ihr *FLASH*-Verfahren (Fast Low-Angle Shot) sollte die weitere Entwicklung der MRT erheblich beeinflussen. FLASH regt die Protonen nicht wie bis dahin üblich im 90-Grad-Winkel an, sondern kippt sie in kleineren, je nach Untersuchung sogar in sehr kleinen Winkeln. Das MAGNETOM muss nicht mehr so lange „warten“, bis die Relaxation der Protonen abgeschlossen ist. Mit der Pulssequenz *Turbo Flash* verkürzt sich die Echozeit beim MAGNETOM GBS 2 von 35 auf 2 Millisekunden. Die Messzeit verringert sich durch Turbo Flash dementsprechend deutlich.

Mitte der 1980er Jahre zeigt sich erstmals die enorme Flexibilität der Magnetresonanztomographie. Statt „nur“ den höchsten Gewebekontrast aller bildgebenden Verfahren zu bieten, lassen sich nun auch der Stoffwechsel, das schlagende Herz und Ablagerungen in Blutgefäßen darstellen. Bei der Bildgebung am Herzen wird die Messsequenz mit dem EKG Signal synchronisiert. Deshalb sind die Schnittbilder des Herzens trotz der schnellen Bewegung erstaunlich deutlich. Das Herz wird dabei nur in bestimmten Phasen des Schlages gemessen. Durch die Verschiebung des Triggerpunktes entstehen Schritt für Schritt Bilder aus mehreren Herzphasen, die schließlich als Film des schlagenden Herzens dargestellt werden können. Durch die schrittweise Messung dauert eine Herzuntersuchung noch deutlich länger als eine halbe Stunde, die hohe medizinische Aussagekraft solcher Aufnahmen rechtfertigt aber den Zeitaufwand. Mit spezieller Software kann das MAGNETOM GBS 2 die Herz-Anatomie und -Funktion darstellen und wichtige Werte wie Volumen und Muskeldicke messen. Bei Mediziner*innen stoßen diese Aufnahmen sofort auf großes Interesse, da zu dieser Zeit kein

anderes Verfahren das Innere des Herzens in so hoher Auflösung darstellen kann.

Auch bei der Darstellung des Blutflusses sind nicht für möglich gehaltene Fortschritte erzielt worden. Siemens hat bereits seit 1981 zusammen mit der Firma Schering, die später Teil der Bayer AG wird, an möglichen Kontrastmitteln für die Magnetresonanztomographie geforscht. Etwa zur selben Zeit ist entdeckt worden, dass bei der Verwendung bestimmter Pulssequenzen der Blutfluss in den Gefäßen ohne Kontrastmittel dargestellt werden kann. 1987 kann das MAGNETOM bereits Gefäßbäume bis zu einem Durchmesser von einem bis zwei Millimeter dreidimensional abbilden. Kurze Zeit später lassen sich mit der Software-Option *3D-Volumen-MR-Angiographie* beispielsweise Ablagerungen in Blutgefäßen erkennen oder Gefäßerkrankungen wie Thrombosen diagnostizieren.



Eine der frühen Angiographie-Aufnahmen mit dem MAGNETOM, 1987

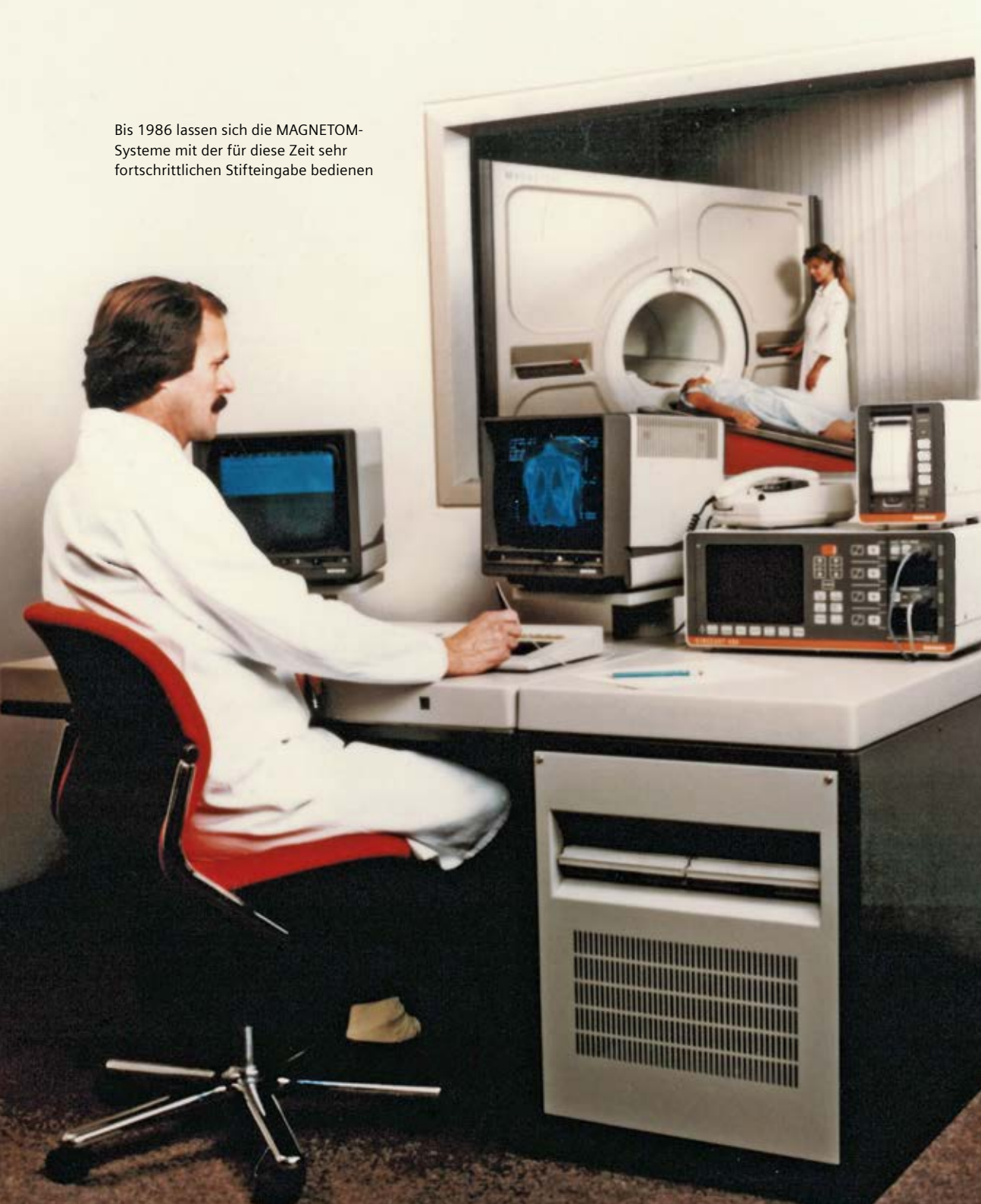
Der Zeit weit voraus

Die Kolleginnen und Kollegen des Geschäftsgebiets MR leisten auch innerhalb der Siemens Medizintechnik in vielerlei Hinsicht Pionierarbeit. Die ersten MAGNETOM lassen sich noch mit der für diese Zeit sehr fortschrittlichen und relativ weit verbreiteten Stifteingabe bedienen. Der Stift wird dabei auf eine acht mal acht Zentimeter große leitfähige Oberfläche aufgesetzt, wodurch an der entsprechenden Stelle auf dem Monitor ein Punkt entsteht. Die Stiftbedienung ist jedoch teuer und muss aufwendig kalibriert werden. Siemens MR führt deshalb 1986 als erstes Geschäftsgebiet die Bedienung per Logitech-Maus ein. Computermäuse sind Mitte der 1980er Jahre verglichen mit heute eine Rarität und ziemlich schmutzempfindlich. Die Mäuse sind noch nicht mit optischen Sensoren ausgestattet, sondern mit einer großen Kugel, die regelmäßig gereinigt werden muss.



Der Geschäftsbereich MR führt 1986 als erstes Geschäftsgebiet die Bedienung per Logitech-Maus ein

Bis 1986 lassen sich die MAGNETOM-Systeme mit der für diese Zeit sehr fortschrittlichen Stifteingabe bedienen



Doch mit der einfachen und präzisen Bedienung ist der Weg frei für die Entwicklung der grafischen Benutzeroberflächen der folgenden Jahre.

Ein weiteres der vielen möglichen Beispiele, in denen Siemens MR der damaligen Zeit weit voraus geht, ist die heute selbstverständliche Remote-Wartung. Ende der 1980er Jahre gibt es noch kein World Wide Web. Die Firma DEC (Digital Equipment Corporation), mit der Siemens bei den Systemrechnern für CT und MRT zusammenarbeitet, hat für ihre Rechner eine Fernwartung über Telefonleitung im Programm, die 300 Byte pro Sekunde in beide Richtungen übertragen kann. (Ein vier Minuten langes Lied im MP3-Format mit dieser Geschwindigkeit zu laden, würde etwa eine Stunde dauern.) Siemens MR nutzt diese Funktion, um damit Protokoll-Dateien der Analyse-Software des MAGNETOM nach Erlangen oder Iselin (USA) zu schicken. Etwas später stellt die neu gegründete Gruppe OPSIS (Online Programm Support in Installation and Software) die Optionen zur Verfügung, das MAGNETOM im Krankenhaus per Standleitung mit Siemens zu verbinden.

Technik aus dem Spielzeugtelefon

Durch die Physik der Magnetresonanztomographie ist Siemens praktisch dazu gezwungen, auch bei der Kommunikation zwischen Anwender*innen und Patient*innen neue Wege zu gehen. Denn die herkömmlichen Lautsprecher und Mikrofone können in der Nähe des Magneten nicht als Gegensprechanlage genutzt werden. Zunächst muss sich das Personal damit behelfen, mit den Patient*innen wie bei einem Spielzeugtelefon über Luftschläuche und Membranen zu sprechen; dann lässt Siemens eine Gegensprechanlage mit zu dieser Zeit exotischen Elektret-Mikrofonen und -Lautsprechern entwickeln. Um auch sehen zu können, ob es den Patient*innen gut geht, ist eine Überwachungskamera nötig.



Arbeiten am 4-Tesla-Magnet im Forschungszentrum in Erlangen

Doch handelsübliche Röhrenkameras funktionieren im MRT-Raum ebenfalls nicht. Siemens MR führt deshalb als erster Geschäftsbereich Halbleiter-Kameras zur Patientenüberwachung ein. „Diese Kameras waren damals mit mehreren 1.000 Deutsche Mark sündhaft teuer“, erinnert sich Peter Scheuering. „Aber der Zweck und die Sicherheit heiligen bekanntlich die Mittel.“

Nägel mit Köpfen

Den Entschluss aus dem Jahre 1982, für das MAGNETOM auf Magnettechnik von Oxford Instruments zu setzen, untermauert Siemens im Jahr 1987: Mit jeweils 50-prozentigem Anteil gründen Siemens und die Medizinsparte von Oxford Instruments das Joint Venture Oxford Magnet Technology. Zusätzlich arbeitet Siemens in der Grundlagenforschung in Erlangen Mitte der 1980er Jahre weiter an Magneten mit hoher Feldstärke. Siemens beschließt, mit Unterstützung des Bundesministeriums für Forschung und Technologie einen Forschungsmagneten zu entwickeln. In der Auftaktbesprechung schlägt Peter Graßmann zunächst vor, einen 4-Tesla-Magneten für die Untersuchung von Tieren zu konstruieren. Rudolf Schittenhelm regt an, die Magnetöffnung etwas größer zu machen, damit sich auch menschliche Köpfe untersuchen lassen. „Dann machen wir doch gleich Nägel mit Köpfen“, empfiehlt Arnulf Oppelt, der zu dieser Zeit die Grundlagen-Forschung leitet. „Wir können auch einen Ganzkörpermagneten bauen, der eine Öffnung von 1 Meter, oder lieber noch von 1,25 Metern hat.“ 1987 wird der 4-Tesla-Magnet mit

der außergewöhnlich großen Öffnung in Betrieb genommen. Die einzigartige Anlage erzeugt das mit Abstand homogenste Magnetfeld aller medizinischer Scanner dieser Zeit. Der Magnet ist jedoch nicht als Produktmagnet für den klinischen Einsatz konzipiert, sondern als Versuchsmagnet zur Erforschung von Möglichkeiten und Grenzen höherer Feldstärken. Zur Serienreife entwickelt wird hingegen eine Technik, die das Magnetfeld ähnlich effizient abschirmt wie die Direktabschirmung durch Eisen, gleichzeitig aber bis zu 30 Tonnen weniger wiegt. Bei der sogenannten aktiven Abschirmung sind zusätzliche Spulen am Magneten angebracht, die das Magnetfeld dort abschwächen, wo es nicht gebraucht wird.

Im Jahre 1987 arbeiten bei Siemens – einschließlich des Joint Ventures Oxford Magnet Technology – bereits mehr als 300 Menschen in der Entwicklung und im Marketing des Geschäftsgebiets Magnetresonanztomographie. Ein Jahr später gründen Siemens und Varian Associates das gemeinsame Unternehmen SISCO (Spectroscopy Imaging Systems Corporation), um in Entwicklung, Fertigung und Vertrieb von kleinen bildgebenden MR-Spektrometern zusammenzuarbeiten, die in der Industrie und in verschiedenen Naturwissenschaften zum Einsatz kommen. In der klinischen Praxis nimmt die Magnetresonanztomographie unter den bildgebenden Verfahren noch immer eine Exotenrolle ein – doch mit den Fortschritten steht das noch junge Verfahren kurz vor dem Durchbruch.

Aktiv abgeschirmter Magnet
des Joint Ventures Oxford
Magnet Technology



Der Durchbruch

Von der Investition in die Zukunft zur tragenden Säule

Im Laufe der 1980er Jahre ist das Interesse an der Magnetresonanztomographie stetig gewachsen. Das Verfahren etabliert sich zu dieser Zeit, langsam aber beständig, in immer mehr Kliniken und Praxen rund um den Globus. Die Anzahl an Forschungsarbeiten explodiert regelrecht – und bei Siemens entwickelt sich die MRT vom Nebenprojekt zu einer tragenden Säule für die Zukunft des Unternehmensbereichs Medizinische Technik. In den Anfangsjahren ist die Magnetresonanztomographie eine Investition in die Zukunft, deren enorme Kosten von den anderen Geschäftsgebieten der Siemens-Medizintechnik mitgetragen werden. Anfang der 1990er Jahre, nach dem abgeschlossenen Aufbau des neuen Geschäftsgebiets, präsentiert Siemens erstmals schwarze Zahlen. Etwa zur gleichen Zeit nimmt die Verbreitung der MRT richtig Fahrt auf. Die beiden Hauptgründe für den Durchbruch hängen direkt mit der Weiterentwicklung der Technologie zusammen: Die außergewöhnliche physikalische Komplexität der Magnetresonanztomographie, die ihre Entwicklung und Verbreitung bisher erschwert hat, wird mit den Fortschritten zur Stärke; denn eben diese physikalische Komplexität macht die MRT so außerordentlich flexibel. Der zweite, wesentliche Grund liegt in denjenigen technischen Fortschritten, die den großen Aufwand beim Umbau der Räumlichkeiten auf ein vertretbares Maß reduzieren und die Betriebskosten deutlich senken. Das erste System dieser neuen Generation, in der die Innovationen der 1980er Jahre vereint sind, ist das MAGNETOM Impact aus dem Jahr 1991.

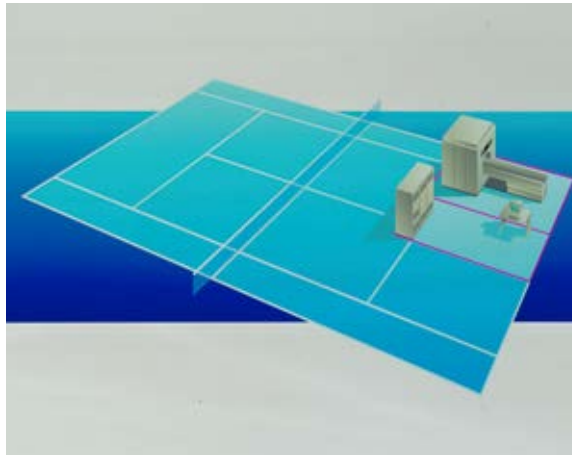


Das MAGNETOM Impact entwickelt sich innerhalb kürzester Zeit zum meistverkauften MRT der Welt

Matchball!

Beim Marketing des MAGNETOM Impact dreht sich alles um die zu dieser Zeit besonders beliebte Sportart Tennis. „Um auf dem heutigen MR-Markt im Spiel zu bleiben“, heißt es in der Produktbroschüre aus dem Jahr 1991, „muss ein System alles haben: bequeme Standortwahl, niedrige Installations- und Betriebskosten, hohen Patientendurchsatz und fortschrittliche Anwendungen.“ Während das erste MAGNETOM mit 0,35-Tesla-Magnet noch mindestens 95 Quadratmeter Platz benötigt, kann das MAGNETOM Impact mit 1 Tesla durch die aktive Abschirmung auf einer Fläche von 40 Quadratmetern installiert werden. Das MRT-System benötigt damit erstmals ähnlich wenig Platz wie ein CT-Scanner. Das MAGNETOM Impact lässt sich innerhalb von drei Wochen installieren und kommt mit drei Heliumfüllungen pro Jahr aus.

Für Siemens steht bei der Entwicklung des MAGNETOM Impact besonders im Fokus, MR-Untersuchungen für das Klinikpersonal deutlich einfacher und komfortabler zu machen als bei der ersten System-Generation. Die Anwender*innen navigieren per Computermouse durch die neue PC-ähnliche Benutzeroberfläche, die Funktionen und Ergebnisse sind auf einem hochauflösenden Monitor dargestellt. Erstmals sind alle wichtigen Anschlüsse für die HF-Spulen und anderes Zubehör im Patiententisch integriert. Mit Puls-Sequenzen wie TurboFLASH lassen sich beispielsweise Bewegungen im Inneren des Körpers sichtbar machen oder Angiographien durchführen. Eine komplette Kopfuntersuchung dauert nur noch 15 bis 20 Minuten, das ist zwei- bis dreimal schneller als mit älteren Systemen. Für Siemens wird das MAGNETOM Impact zum großen Erfolg. Das System entwickelt sich innerhalb kürzester Zeit zum meistverkauften MRT der Welt und bleibt dies mehr als sechs Jahre lang.



Das Marketing zum MAGNETOM Impact dreht sich um die Anfang der 1990er Jahre äußerst populäre Sportart Tennis

Eine ungewöhnliche Alternative

Mit einem ungewöhnlichen Ansatz kann Siemens den Raumbedarf sogar nochmals deutlich senken. Das MAGNETOM P8, das etwa zur gleichen Zeit wie das MAGNETOM Impact auf den Markt kommt, benötigt in der Praxis nur 25 Quadratmeter Platz und kann innerhalb von 10 Tagen installiert werden. Wie ist das möglich? Durch eine andere Magnettechnik. Das MAGNETOM P8 ist um einen sogenannten Permanentmagnet herum konzipiert. Im Unterschied zu supraleitenden Magneten besitzen Permanentmagnete ein Magnetfeld, das ohne Strom und Spulen funktioniert. Da es sich also dabei nicht um einen Elektromagneten handelt, sind die Betriebskosten sehr gering. Das MAGNETOM P8 benötigt weder Helium, Stickstoff noch Wasserkühlung. Der Stromverbrauch beträgt nur etwa ein Zehntel im Vergleich



Vom Monitor abfotografiertes Ergebnis einer Kopfuntersuchung, 1991

zu einem supraleitenden System. Die beiden größten Nachteile von Permanentmagneten, und der Grund, warum diese Magnettechnik in den folgenden Jahren eher eine Randerscheinung in der Magnetresonanztomographie bleiben sollte: die Feldstärke ist auf unter 0,3 Tesla begrenzt und die Homogenität ist deutlich niedriger als bei supraleitenden Magneten.

Anfang der 1990er Jahre sind Permanentmagnete jedoch eine Möglichkeit, die MRT für mehr Anwender*innen und Patient*innen zugänglich zu machen. Zwar müssen bei der Bildqualität aufgrund des 0,2-Tesla-Magneten Abstriche in Kauf genommen werden; doch die leistungsstarke Elektronik des MAGNETOM P8 ermöglicht die gleichen Anwendungen wie die Siemens-Systeme mit supraleitenden Magneten. Mit den auf die alternative Magnettechnik optimierten Sequenzen lassen sich dünne, lückenlos

Das MAGNETOM P8 ist ein ungewöhnlicher Ansatz, um den Raumbedarf und die Betriebskosten zu senken



aneinander gereichte Schichten messen und anschließend als dreidimensionale Volumenaufnahme in Echtzeit betrachten. Technologisch ist das Einstiegs-system MAGNETOM P8 den meisten MRTs mit konventioneller Magnettechnik in einigen Bereichen sogar weit voraus. Das System erkennt beispielsweise die Anordnung der Spulen bei der Positionierung der Patient*innen im Magnetfeld automatisch. Auf der Plasma-Anzeige über der Magnetöffnung können unter anderem die Tischfunktionen oder das EKG-Signal angezeigt und die Übersichtsaufnahme gestartet werden. Noch bevor das Personal den Aufnahmeraum verlässt, ist das erste Bild auf dem hochauflösenden Monitor sichtbar.

Vision für höhere Geschwindigkeiten

Die von Sir Peter Mansfield 1977 vorgestellte Echo-Planar-Bildgebung (EPI) war ihrer Zeit weit voraus. Das Verfahren beruht auf der Idee, die Kernresonanz durch einen einzigen Hochfrequenz-Impuls anzuregen. Dadurch können in sehr kurzem Abstand mehrere Bilder aufgenommen werden, denn die Messung pro Schichtbild dauert nur noch wenige Millisekunden statt Sekunden. Die echoplanare Bildgebung – genauer gesagt, ihre Geschwindigkeit – bringt zahlreiche Vorteile mit sich. Zu den wirkungsreichsten gehört, dass sie einerseits so schnell ist, dass molekulare Bewegungen im Inneren des Körpers gemessen werden können. Zum anderen können Bewegungen im Körper, die bei konventionellen Sequenzen Unschärfe-Artefakte erzeugen würden, durch EPI eingefroren werden. In den 1980er Jahren war die Hardware jedoch noch viel zu langsam, um die ultraschnellen Messungen und Berechnungen zu bewältigen. Als Siemens das Flaggschiff der neuen Generation, den weltweit ersten Echtzeit-Scanner MAGNETOM Vision, im Jahre 1994 auf den Markt bringt, lässt sich die Echo-Planar-Bildgebung erstmals in der klinischen Praxis nutzen.

Der große Leistungssprung des MAGNETOM Vision ist – neben den Komponenten zur Bildberechnung – vor allem auf das neue Gradientensystem mit Hochleistungsverstärkern zurückzuführen. Das 1,5-Tesla-System eignet sich durch die für diese Zeit außergewöhnliche Geschwindigkeit besonders zur Darstellung bewegter Organe wie Herz und Lunge, ebenso wie zur Abbildung von Blut oder von Organen, die wenig Kontrastunterschiede aufweisen wie Leber und Nieren. Die starke Durchblutung bestimmter Organe, beispielsweise im Herzmuskel, stört durch das Einfrieren der Bewegung nicht mehr bei der Beurteilung des Bildes. Erstmals lassen sich mit dem MAGNETOM Vision Schlaganfälle im Frühstadium ohne Kontrastmittel lokalisieren. Das System ermöglicht auch Studien zur immer wichtiger werdenden funktionellen Bildgebung, der sogenannten fMRT. Dabei messen optimierte Puls-Sequenzen die Gehirnaktivität und verknüpfen diese Stoffwechselaufnahmen mit der anatomischen Abbildung des Gehirns. Auf diese Weise lassen sich die aktiven Regionen des Gehirns von den inaktiven unterscheiden. Dadurch können beispielsweise Studien zu den unterschiedlichen Gehirnaktivitäten bei Menschen mit Angststörungen oder Depressionen und gesunden Kontrollgruppen durchgeführt werden. Mitte der 1990er Jahre beginnt sich die fMRT zu einem der wichtigsten Hilfsmittel der Hirnforschung zu entwickeln. Dazu später mehr.

Die Gradienten und die Hochfrequenz-Technik des MAGNETOM Vision sind so leistungsfähig, dass erstmals alle zu dieser Zeit bekannten ultraschnellen Bildgebungstechniken eingesetzt werden können. Die von Siemens entwickelte *Half-Fourier Acquisition Single-shot Turbo spin Echo Sequenz* (HASTE) versetzt Mediziner*innen in die Lage, auch das Gehirn von unruhigen Patient*innen ohne Bewegungsartefakte abzubilden. Im Vergleich zur schnelleren echoplanaren Bildgebung ist die räumliche Auflösung der mit



Werbeaufnahme zum weltweit ersten Echtzeit-Scanner MAGNETOM Vision aus dem Jahre 1994

HASTE erzeugten Bilder wesentlich höher. Zudem ist der Kontrast zwischen Gehirn-Rückenmarksflüssigkeit und Gehirngewebe auf HASTE-Bildern deutlicher als bei herkömmlichen Sequenzen. Schwieriger hingegen ist die Unterscheidung von grauem und weißem Hirngewebe. HASTE und die echoplanare Bildgebung sind keine konkurrierenden Messmethoden. Vielmehr haben beide ihre besonderen Stärken und tragen dazu bei, die diagnostischen Möglichkeiten der Magnetresonanztomographie weiter auszubauen.

Ultraschnelle Sequenzen wie HASTE und EPI erreichen ihre Geschwindigkeit durch die Entwicklung entsprechend leistungsfähiger Gradientensysteme. Die maximal mögliche Schaltrate der Gradienten ist dabei der limitierende Faktor. Eine andere Methode, die Bildqualität zu verbessern und vor allem die Untersuchung erheblich zu beschleunigen, ist die

sogenannte parallele Bildgebung. Das Verfahren der parallelen Bildgebung nutzt dazu die Anordnung der Körperspulen. Diese HF-Spulen auf dem Körper der Patient*innen sind die Empfänger für die MR-Signale. Die Anordnung mehrerer Spulen nennt man Array. Die herkömmliche Arraytechnik nimmt für jedes Spulenelement ein Bild auf. Die einzelnen Array-Aufnahmen werden anschließend zu einem Bild kombiniert. Bei der parallelen Bildgebung liefert die räumliche Anordnung der Arrays zusätzliche Informationen über die Herkunft der MR-Signale. Die Ortskodierung über die Gradienten wird also von den Informationen der Spulen ergänzt. Die parallele Bildgebung von Siemens heißt *iPAT* (integrated Parallel Acquisition Techniques). *iPAT* erlaubt entweder höher aufgelöste Bilder bei langer Messzeit, oder schnellere Aufnahmen bei geringerer Bildauflösung. Bei zeitkritischen Untersuchungen wie in der Kardiologie ist die parallele Bildgebung besonders wertvoll, denn Patient*innen müssen nun während der Herzuntersuchung nicht mehr 20 Sekunden lang den Atem anhalten.

Offen für neue Ideen

Ende 1993 überrascht Siemens die MR-Welt auf dem internationalen Kongress der Radiological Society of North America (RSNA) in Chicago mit einer einzigartigen Magnetkonstruktion. Der in Erlangen entwickelte Elektromagnet mit 0,2 Tesla hat die Form eines stehenden C und ist nach drei Seiten hin offen. Zu dieser Zeit hat die größte verfügbare Öffnung der Tunnel-Magnete einen Durchmesser von 60 Zentimetern. Durch die Bauweise des MAGNETOM Open können nun auch füllige Personen, Kinder oder klastrophobische Patient*innen untersucht werden. Das offene Design ermöglicht erstmals dynamische Gelenkstudien, da sich Patient*innen während der Untersuchung mehr bewegen können. Bei Schulterbewegungen etwa lassen sich die verschiedenen

Phasen untersuchen und anschließend im dreidimensionalen *Cine-Mode* in Bewegung auf dem Bildschirm analysieren. Alle von Siemens entwickelten MRT-Anwendungen sind im MAGNETOM Open integriert, etwa die Funktionen zur MR-Angiographie, die beispielsweise den Blutfluss und die Bewegungen der Herzwand darstellen.

Mitte der 1990er Jahre wird in zahlreichen Forschungsprojekten daran gearbeitet, den Erfolg von Therapien mithilfe der Magnetresonanztomographie zu überprüfen. Die Bauform des MAGNETOM Open eröffnet



Der Elektromagnet des MAGNETOM Open hat die Form eines stehenden C und ist nach drei Seiten hin offen

dabei neue Anwendungsmöglichkeiten in der sogenannten intraoperativen Bildgebung. Siemens arbeitet ab 1996 gemeinsam mit den Universitätskliniken Erlangen und Heidelberg daran, die Qualität neurochirurgischer Operationen weiter zu verbessern. In beiden Kliniken steht das MAGNETOM Open direkt neben dem Operationsraum, so dass der Operationstisch mit auf einem Luftkissen befindlicher Patient*in vom Operationssaal dorthin bewegt werden kann, um den Erfolg eines Eingriffs während der laufenden Operation beurteilen zu können. Bei den Forschungen in Erlangen und Heidelberg



Das MAGNETOM Concerto ist mit den leistungstärksten Gradienten aller zu dieser Zeit erhältlichen MRT-Systeme niedriger Feldstärke ausgestattet

zeigt sich in etwa der Hälfte aller Fälle, dass unter MR-Kontrolle Reste von Tumorgewebe sichtbar sind, die anschließend entfernt werden können. Die Erfahrungen aus diesen Studien fließen bereits kurze Zeit später in die Nachfolgesysteme mit C-Magnet ein: Beim MAGNETOM Open Viva aus dem Jahre 1996 kann Siemens durch neue Technologien beispielsweise den Abstand zwischen Patiententisch und oberem Magnetpol vergrößern. Das Modell aus dem Jahre 2000, das MAGNETOM Concerto, besitzt die leistungsstärksten Gradienten aller zu dieser Zeit erhältlichen MRT-Systeme mit niedriger Feldstärke.

Musik, Zauber und Technik

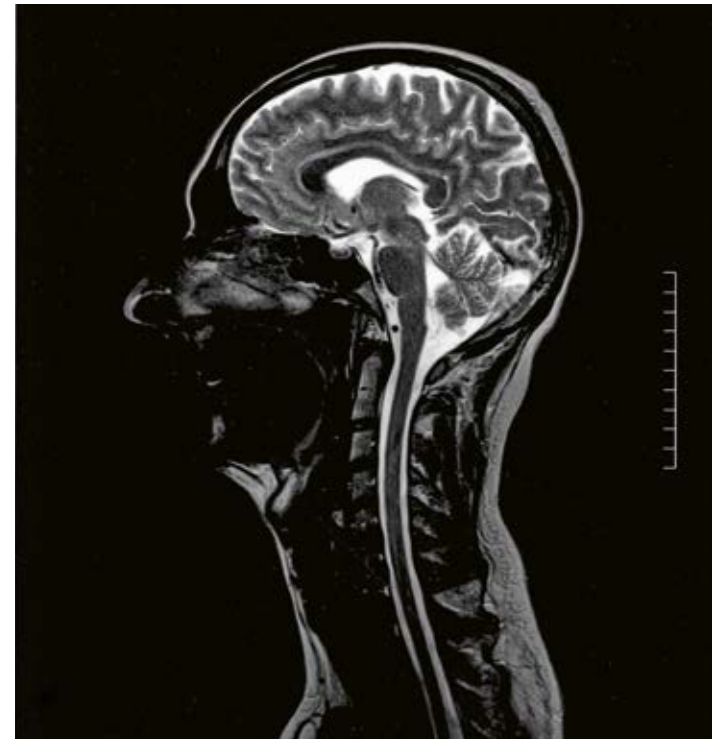
Bei der Entwicklung von Magnetresonanztomographen mit hohen Feldstärken verfolgt Siemens das Ziel, Offenheit und niedrige Betriebskosten mit der Bildqualität von Systemen mit 1 Tesla und 1,5 Tesla zu verbinden. MAGNETOM Harmony und MAGNETOM Symphony sind Ende 1997 ein großer Schritt in diese Richtung. Die beiden Systeme haben viele grundlegende Gemeinsamkeiten: Beide Magnete wiegen rund vier Tonnen, sind erstmals aktiv mit E.I.S. (External Interference Shielding) abgeschirmt und

sowohl das MAGNETOM Harmony mit 1 Tesla als auch das MAGNETOM Symphony mit 1,5 Tesla benötigen weniger als 30 Quadratmeter Fläche. Durch die integrierte Schrankkühlung ist kein separater Technikraum mehr nötig. Der Heliumverbrauch der Systeme ist so gering, dass erst nach rund zwei Jahren nachgefüllt werden muss.

Der „freischwebende“ Patiententisch lässt sich mittels Joystick bis auf 45 Zentimeter über den Boden absenken und trägt bis zu 200 Kilogramm schwere Patient*innen. Das Design der Systeme wird zu dieser



Das helle und offene Design der Systeme soll möglichen Ängsten entgegenwirken



Gehirnaufnahme mit dem MAGNETOM Harmony aus dem Jahre 1997

Zeit immer wichtiger. Die helle, offene Gestaltung der MAGNETOM-Systeme soll möglichen Ängsten mancher Patient*innen entgegenwirken. Verkleidung und Magnetöffnungsring sind in verschiedenen Farbkombinationen erhältlich, die sich den jeweiligen Untersuchungsräumen anpassen lassen. Gleichzeitig sollen die warmen Farben eine angenehme Atmosphäre für Patient*innen und Anwender*innen schaffen. Die Einführung des Integrated Panoramic Array (IPA) trägt zum Komfort bei. Bei diesem neuen Spulenkonzept sind die Wirbelsäulenspule und das Unterteil der Kopfspule im Patiententisch integriert. Per Softwaresteuerung arbeiten bis zu vier Spulen des IPA gleichzeitig. Dadurch ist bei Untersuchungen der Wirbelsäule, des Kopfes oder bei Ganzkörperaufnahmen meist kein Spulenwechsel mehr erforderlich. Der Anspruch für die neue MAGNETOM-Familie lautet: „The Perfection of Care“. Die Namen Harmony und Symphony sollen ein weiches, klingendes Moment in die technologische Welt bringen. Die Produkteinführung startet im Juni 1997 mit einem „Festival der Technologie“. Das Event, zu dem neben zahlreichen MR-Mitarbeiter*innen rund 120 Vertriebsmitarbeiter*innen aus der ganzen Welt nach Nürnberg reisen, steht unter dem Motto „Musik, Zauber und Technik“.

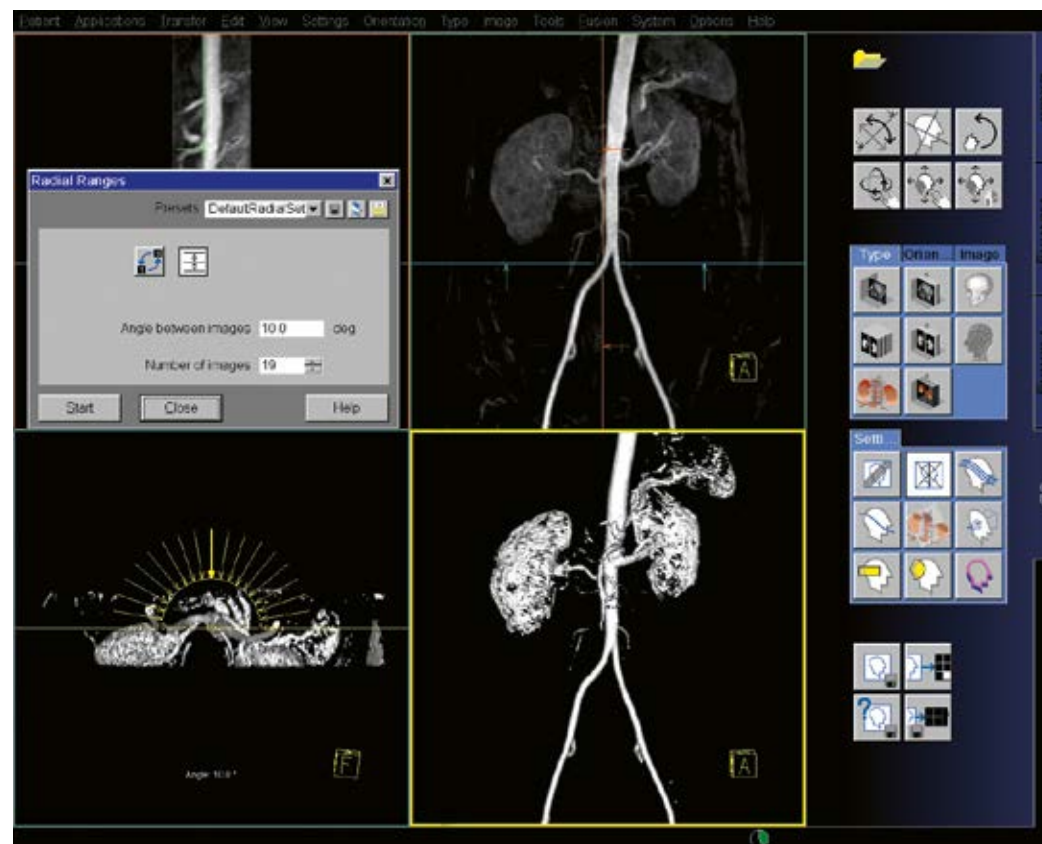
Eine für alle

PC-Anwendungen spielen Ende der 1990er Jahre bereits in vielen Branchen eine große Rolle, und Anwender*innen von Medizintechnik gehen ganz selbstverständlich mit Mausklicks, Fenstern und Menüs um. Doch im Gegensatz zu Office-Anwendungen ist die Software zur Bedienung der Systeme noch sehr komplex und kompliziert. Diese Situation veranlasst die Siemens-Medizintechnik, nach einer besseren Lösung zu suchen. Siemens hat bereits mit der Einführung grafischer Benutzeroberflächen im MAGNETOM Impact neue Maßstäbe in der Benutzerfreundlichkeit gesetzt; doch noch immer haben

Magnetresonanztomographen, Computertomographen und andere bildgebende Systeme desselben Herstellers verschiedene Benutzeroberflächen – und jede einzelne muss von den Anwender*innen erlernt werden. 1999 führt Siemens als erster Medizintechnik-Hersteller eine einheitliche Benutzeroberfläche für alle seine Systeme ein: die Software *syngo*™.

Besonderes Augenmerk hat Siemens bei der Entwicklung von *syngo* auf intuitives Verstehen und Handhaben gelegt. Die grafische Benutzeroberfläche besteht

durchgehend aus selbsterklärenden Symbolen. Unter der Oberfläche von *syngo* stecken zahlreiche Funktionen, die auf die Arbeitsabläufe in Kliniken und Praxen optimiert sind. Beispielsweise genügt ein einziger Klick, um Patientendaten wie Bildbefunde, Laborwerte oder Operationsberichte in einer übersichtlichen Struktur darzustellen. Alle *syngo* Workstations lassen sich über Kliniknetze im gesamten Krankenhaus oder über das Internet auf der ganzen Welt miteinander verbinden. Neue Systeme und Software-Anwendungen werden einfach in die



1999 schafft Siemens als erster Medizintechnik-Hersteller mit *syngo* eine einheitliche Benutzeroberfläche für alle seine Systeme

bestehende *syngo*-Architektur integriert. Schafft eine Klinik oder eine Praxis ein neues Bildgebungssystem von Siemens an, ist die Einarbeitungszeit durch das einheitliche Erscheinungsbild und den gemeinsamen Stil wesentlich kürzer.

Kopfsache

In den 1980er Jahren hat sich die Leistungsfähigkeit der MR-Bildgebung daran gezeigt, dass sie die Anatomie von weichem Gewebe deutlich detaillierter sichtbar macht als alle anderen bildgebenden Verfahren; in den 1990er Jahren entwickelt sie sich drüber hinaus zu einer wirkungsvollen Methode, mit der sich aktive Regionen des Gehirns von inaktiven unterscheiden lassen. Am Ende des Jahrzehnts ist die fMRT (funktionelle Magnetresonanztomographie) bereits zu einem Standardverfahren der wissenschaftlichen Untersuchung des Gehirns geworden. Der vom japanischen Biophysiker Seiji Ogawa entdeckte BOLD-Effekt (Blood Oxygen Level Dependent) ist die Grundlage der fMRT. Je nach Sauerstoffgehalt des durchbluteten Gewebes verändert der BOLD-Effekt die Helligkeit der entsprechenden Regionen auf dem MR-Bild. Da aktive Neuronen im Gehirn stärker durchblutet sind, können mit der fMRT beispielsweise Gehirnregionen identifiziert werden, die an Handbewegungen oder an visuellen Wahrnehmungen beteiligt sind.

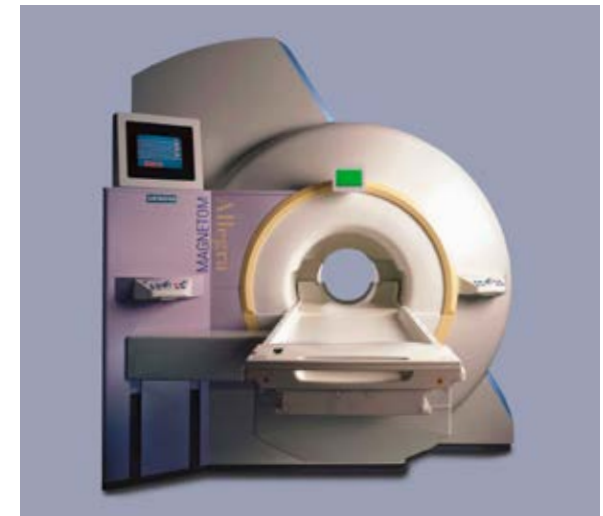
Die fMRT stellt enorme Anforderungen an die Hard- und Software von Magnetresonanztomographen. Ebenso wie jede andere MR-Technik wird auch die fMRT vom Signal-zu-Rausch-Verhältnis begrenzt, das die höchstmögliche Qualität der Bilder bestimmt. Qualität bedeutet in dieser Hinsicht: Wie klein kann die Struktur im Körper sein, damit sie auf dem MR-Bild dargestellt werden kann? Wie groß müssen die Unterschiede der Resonanzsignale sein, damit der Kontrast zwischen zwei Strukturen auf dem Bild sichtbar wird?

Im Laufe der 1990er Jahre ist an verschiedensten Ansätzen gearbeitet worden, die durch das Signal-zu-Rausch-Verhältnis gesetzten Grenzen aufzuheben. Die Erhöhung der Feldstärke ist eine der wirksamsten Möglichkeiten. Zudem ist es bei der Optimierung auf das verbesserte Signal-zu-Rauschverhältnis nötig, das gesamte MRT-System neu zu konstruieren: Komponenten wie HF-Spulen, Verstärker und Filter müssen die höhere Leistung und die höheren Frequenzen bewältigen; da wesentlich mehr Daten anfallen, müssen die Signale wiederum von schnelleren Rechnern verarbeitet werden. Bis zur Jahrtausendwende wird die fMRT deshalb in der Hirnforschung nur unter Einsatz spezieller Hochleistungscomputer an wissenschaftlichen Instituten angewandt. Dennoch kann die Berechnung der Messwerte noch immer mehrere Stunden dauern.

Für die Anwendung der fMRT in der klinischen Praxis müssen die Systeme so leistungsfähig werden, dass die aktiven Gehirnregionen dargestellt werden können, während der Patient noch im Magnetresonanztomographen liegt. Siemens entwickelt Ende der 1990er Jahre in Kooperation mit dem Deutschen Krebsforschungszentrum in Heidelberg MR-Applikationen, die fMRT-Daten in Echtzeit verarbeiten und um die Jahrtausendwende für aktuelle MAGNETOM-Systeme verfügbar werden. Anfang des neuen Jahrtausends ist Siemens der weltweit einzige Hersteller, der zwei spezialisierte 3-Tesla-Systeme anbietet: Das MAGNETOM Allegra aus dem Jahre 2000 ist ein eigens auf die Anforderungen der Neurologie abgestimmtes System für Kopfuntersuchungen; das ein Jahr danach folgende MAGNETOM Trio ist der erste klinische Ganzkörper-Scanner mit 3 Tesla Feldstärke. Durch das neue Magnetdesign sind die baulichen Anforderungen für Untersuchungsräume mit MAGNETOM Allegra oder MAGNETOM Trio mit denen der zeitgenössischen 1,5-Tesla-Systeme zu vergleichen.



Der erste klinische Ganzkörper-Scanner mit 3 Tesla Feldstärke, das MAGNETOM Trio, kommt 2001 auf dem Markt



Das MAGNETOM Allegra aus dem Jahre 2000 ist ein eigens auf die Anforderungen der Neurologie abgestimmtes System für Kopfuntersuchungen



Das MAGNETOM Sonata wurde insbesondere für die Anforderungen der Kardiologie entwickelt

Alles unter einem Dach

Ende der 1990er Jahre ist die Magnetresonanztomographie aus dem klinischen Alltag nicht mehr wegzu-denken. Siemens hat zu diesem Zeitpunkt bereits die weltweite Marktführerschaft in der MRT übernommen und fertigt in Erlangen mehrere Hundert Systeme pro Jahr. Am 14. Februar 2000 feiert das Unternehmen die Einweihung des neuen MR-Werks, das innerhalb von 18 Monaten errichtet worden ist. Wenige Gehminuten vom Hauptsitz der Siemens-Medizintechnik in Erlangen arbeiten fortan rund 2.000 Mitarbeiter*innen von Siemens MR unter einem Dach – eine wesentliche Erleichterung, denn bis dahin waren Entwicklung, Produktion, Logistik, Vertrieb und Service an fünf Standorten in Erlangen verteilt, die teilweise mehrere Kilometer auseinander lagen. In dieser weltweit modernsten Produktionsstätte für MRT-Systeme können die Installationszeiten beim Kunden durch Optimierungen in der Vorfertigung von vier bis zehn Wochen auf eine Woche verkürzt werden. Im neuen Werk betreibt Siemens mehr als 20 Testanlagen, Prototypen und aktuelle MAGNETOM-Modelle, die für die Forschung, Weiterentwicklungen sowie für Schulungen und Kundeninformationen zur Verfügung stehen.

Zur gleichen Zeit arbeitet ein chinesisches Startup-Unternehmen in Shenzhen an der Konstruktion hochwertiger aber preisgünstiger MRT-Systeme: Die 1998 gegründete Shenzhen Mindit Instruments Co., Ltd. hat sich mit ihren Produkten innerhalb weniger Jahre zu einem bedeutenden Unternehmen im chinesischen MR-Markt entwickelt. Im Jahre 2002 gründen Siemens und die Shenzhen Mindit Instruments Co., Ltd. das Joint Venture Siemens Mindit Magnetic Resonanz Ltd. mit Sitz in Shenzhen. Im Laufe der folgenden Jahre sollte daraus der High-Tech-Standort Siemens Shenzhen Magnetic Resonance entstehen, der als Teil des globalen Entwicklungsnetzwerks nahtlos mit Erlangen und Oxford vernetzt ist.



Am 14. Februar 2000 feiert Siemens die Einweihung des neuen MR-Werks in Erlangen

Enter the Matrix

Vom Flickenteppich zur nahtlosen Abbildung des ganzen Körpers

Anfang des neuen Jahrtausends ist die Magnetresonanztomographie fest in der klinischen Praxis etabliert. Zu dieser Zeit werden weltweit bereits mehr als 60 Millionen Untersuchungen pro Jahr mit dem Verfahren durchgeführt. Am 6. Oktober 2003 erhalten zwei der bedeutendsten Persönlichkeiten in der Geschichte der MRT eine – laut der Meinung vieler Fachleute – längst überfällige Nachricht aus Schweden: „Die Nobelversammlung am Karolinska Institut hat heute beschlossen, den Nobelpreis des Jahres 2003 in Physiologie oder Medizin Paul C. Lauterbur und Peter Mansfield gemeinsam für ihre Entdeckungen in Bezug auf die ‚Abbildung mit Magnetresonanz‘ zu verleihen.“ Im schwedischen Rundfunk erzählt Mansfield, er habe vor einigen Jahren daran gedacht, den Nobelpreis bekommen zu können, „dann habe ich mich aber von dem Gedanken verabschiedet.“ Auch Lauterbur sei über die Nachricht sehr erfreut und überrascht zugleich gewesen: „Ich muss das erst einmal verdauen!“

Tim verändert die MRT

Das Jahr 2003 spielt auch in der Geschichte der Magnetresonanztomographie von Siemens Healthineers eine herausragende Rolle. Etwa zur gleichen Zeit, zu der Lauterbur und Mansfield sich auf die Zeremonie in Stockholm vorbereiten, stellt Siemens auf dem internationalen Kongress der Radiological Society of North America (RSNA) in Chicago eine neue High-End-Technologie vor: die *Total imaging matrix*, kurz *Tim*.

Das Herzstück der Tim-Technologie sind die in großer Zahl matrixförmig angeordneten HF-Spulen, die über getrennte Empfangskanäle ausgelesen werden und eine geringere minimal mögliche Aufnahmezeit bei guter Bildqualität erlauben.

Die Total imaging matrix ist ausschlaggebend dafür, dass die MAGNETOM-Systeme der folgenden Jahre wesentlich schneller werden und zahlreiche neue Anwendungen ermöglichen. Zum ersten Mal seit der Einführung der MRT lässt sich der ganze Körper – in hoher Auflösung, also ohne einschneidende Kompromisse bei der Bildqualität – in einem einzigen Scanvorgang von Kopf bis Fuß abbilden. Das erste System mit Tim-Technologie, das *MAGNETOM Avanto* mit 1,5 Tesla Feldstärke, kann einen bis zu 205 Zentimeter großen Menschen in nur zwölf Minuten scannen, das ist doppelt so schnell, wie es bisher selbst unter optimalen Bedingungen möglich war. Durch Tim können Qualität und Quantität der Untersuchungen in der zur Verfügung stehenden Zeit deutlich gesteigert werden.

Der riesige Fortschritt durch Tim lässt sich anhand eines Vergleichs zu bisher gängigen Spulen-Technologien und den Vorteilen für die Patient*innen zusammenfassen: Bis Ende der 1990er Jahre waren Ganzkörperaufnahmen in der Magnetresonanztomographie nicht oder nur mit großen Qualitätseinbußen möglich. Die jeweiligen Körperteile der Patient*innen mussten mit zahlreichen



Durch Tim lässt sich der ganze Körper erstmals ohne einschneidende Kompromisse bei der Bildqualität in einem einzigen Scanvorgang von Kopf bis Fuß abbilden

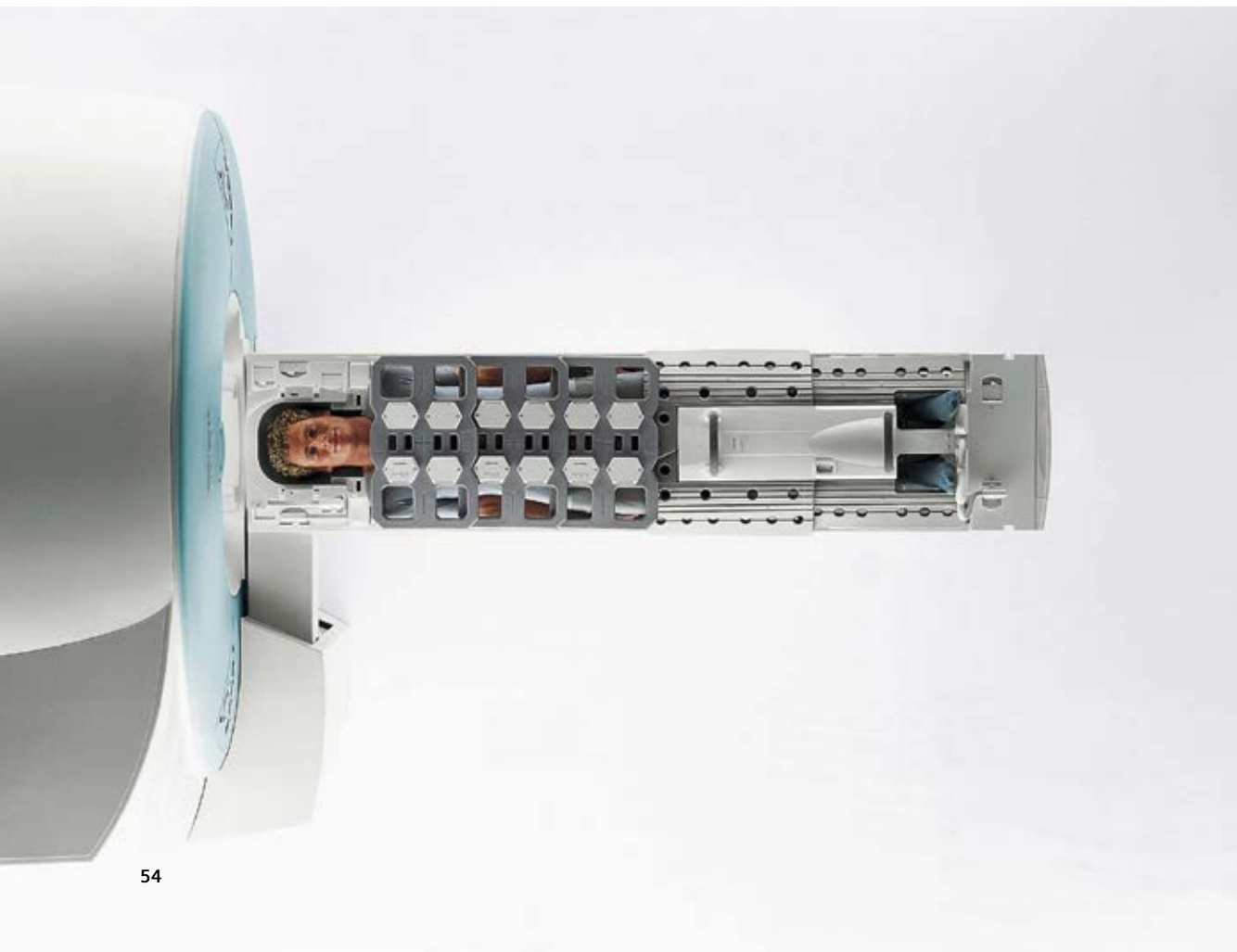
Siemens stellt im November 2003
das MAGNETOM Avanto vor, das erste
System mit Total imaging matrix



unterschiedlichen Spulen bedeckt und einzeln aufgenommen werden. Anschließend wurden die Abbildungen der Körperregionen miteinander verbunden; die Ganzkörperaufnahme war also wie eine Art Flickenteppich aus vielen Teilen zusammengesetzt. Abgesehen von der eingeschränkten Bildqualität an den Übergängen der einzelnen „Flicker“ war dieses Verfahren für viele Patient*innen sehr mühsam oder gar ungeeignet. Denn Unfallopfer, ältere oder sehr kranke Menschen mussten beim Wechsel der Spulen umgelagert und neu positioniert werden.

Als Siemens im Jahre 1998 die IPA (Integrated Panoramic Array) einführte, bei der große Teile der Spulen im Untersuchungstisch integriert sind, waren Ganzkörperaufnahmen erstmals ohne Umlagerung der Patient*innen möglich. Die Anwender*innen mussten sich jedoch noch immer entscheiden, ob sie nur einen kleinen Körperbereich mit hoher Auflösung und Bildqualität abbilden möchten, oder den ganzen Körper mit weniger guter Auflösung. Mit der Total imaging matrix ist diese Abwägung nicht mehr nötig.

Tim ermöglicht den Anwender*innen bereits in der ersten Technologie-Generation, bis zu 76 Spulenelemente mit bis zu 32 Hochfrequenz-Kanälen (statt der bisher möglichen 8 Kanäle) nahtlos zu einer Total imaging matrix zu kombinieren. Erstmals lässt sich der Körper mit der parallelen Bildgebung (PAT) ohne die bisher notwendigen, speziellen PAT-Spulen dreidimensional abbilden. Die *Tim Application Suite* stellt dabei spezielle Routinen für eine Vielzahl klinischer Anwendungen zur Verfügung, etwa für neurologische, kardiologische oder onkologische Untersuchungen sowie für die Orthopädie, die Angiographie und die Kinderheilkunde¹. Auch für Patient*innen wird die Untersuchung nun deutlich komfortabler: Die sogenannte Body-Matrix-Spule wiegt nur 950 Gramm. Bei vielen Untersuchungen können Patient*innen mit den Füßen voran in die Magnetöffnung gefahren werden, der Kopf bleibt außerhalb der Öffnung. Obwohl das MAGNETOM Avanto mit dem stärksten und schnellsten Gradientensystem seiner Zeit ausgestattet ist, kann Siemens den von den Gradientenspulen erzeugten Schalldruck im Vergleich zu herkömmlichen Systemen um bis zu 97 Prozent senken.



Tim ermöglicht den Anwender*innen, bis zu 76 Spulenelemente mit bis zu 32 Hochfrequenz-Kanälen nahtlos zu kombinieren

Zum Zeitpunkt der Weltpremiere des MAGNETOM Avanto, am 30. November 2003, sind bereits zwei dieser High-End-Systeme in Tübingen und New York installiert; innerhalb weniger Monate folgen hunderte weitere Installationen rund um den Globus. Im Rahmen einer Sonderpublikation über Innovationen in Wissenschaft und Gesundheitswesen zeigt Siemens ein mit Tim aufgenommenes MR-Bild, das das Ergebnis der ersten Zusammenarbeit des Geschäftsgebiets MR mit berühmten Sportler*innen ist. Die deutsche Schwimmerin Hannah Stockbauer,

die kurz vorher drei Goldmedaillen bei der Weltmeisterschaft in Barcelona gewonnen hat, ist zu dieser Zeit Praktikantin bei Siemens. Im Jahre 2005 erhält Siemens für die Entwicklung der Tim-Technologie den Innovationspreis der deutschen Wirtschaft. Im gleichen Jahr rüstet das Unternehmen die bestehenden Systeme MAGNETOM Symphony und MAGNETOM Trio mit der neuen Spulentechnik auf und bringt einen MRT auf den Markt, der ebenfalls mit Tim arbeitet und gleichzeitig in seiner Form einzigartig ist: das *MAGNETOM Espree*.



Chinesische Werbung zur Möglichkeit, das MAGNETOM Trio mit der Tim-Technologie aufzurüsten



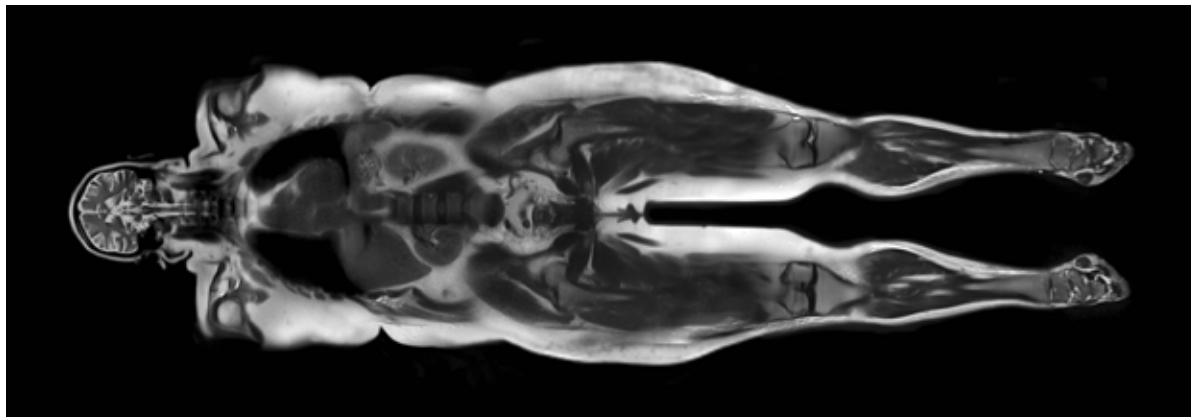
Unter dem Motto „Stars im Magnetresonanztomographen“ lässt sich unter anderem auch die britische Olympionikin Jo Fenn im MAGNETOM Avanto durchchecken



Die mehrfache Schwimmweltmeisterin Hannah Stockbauer lässt sich während ihrer Zeit als Siemens-Praktikantin mit der Tim-Technologie aufnehmen

Das MAGNETOM Espree aus dem Jahre 2004 ist der weltweit erste 1,5-Tesla-Magnetresonanztomograph mit 70 Zentimeter großer Magnetöffnung





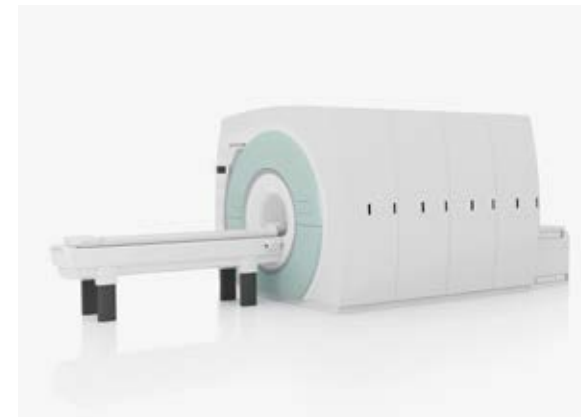
Mit HASTE im MAGNETOM Espree aufgenommener Ganzkörperscan einer rund 130 Kilogramm schweren Patientin

Die neue Offenheit

Der Magnet des MAGNETOM Espree wird bei seiner Vorstellung Ende 2004 als „offener Tunnel“ bezeichnet. Andere sogenannte offene Magnetresonanztomographen wie das MAGNETOM Open oder das 2004 vorgestellte MAGNETOM C! mit 0,35 Tesla sind sehr gut geeignet, um viele klinische Routineuntersuchungen in Disziplinen wie Orthopädie, Pädiatrie oder Neurologie zu bewerkstelligen. Systeme mit dieser Bauform stoßen jedoch vor allem bei stark übergewichtigen Menschen an ihre Grenzen. Durch die vergleichsweise niedrigen Feldstärken ist die Bildqualität bei der Untersuchung adipöser Patient*innen im Vergleich zu Tunnel-Systemen zu niedrig, etwa bei der Diagnose von Erkrankungen des Bewegungsapparates oder des Herz-Kreislauf-Systems. Das MAGNETOM Espree ist das weltweit erste 1,5-Tesla-System mit 70 Zentimeter großer Magnetöffnung. Der durchschnittliche Augenabstand zum Magneten beträgt nun statt 22 Zentimetern rund 30 Zentimeter. Darüber hinaus ist der Tunnel nur 125 Zentimeter kurz, so dass bei rund 60 Prozent

der Untersuchungen der Kopf der Patient*innen außerhalb des Systems bleiben kann. Das zu dieser Zeit einzigartige Magnetdesign kommt auch Menschen zugute, die unter Raumangst leiden.

Durch die Kombination der Tim-Technologie mit besonders starker Gradientenleistung ist das Signal-zu-Rausch-Verhältnis des MAGNETOM Espree bis zu viermal höher als bei anderen offenen Systemen. Dadurch werden bei übergewichtigen Menschen Anwendungen möglich, die offene Systeme bisher nicht leisten konnten, etwa die Diagnose und Therapieplanung bei Gefäßerkrankungen oder Diabetes. „Alle Patienten sollen uneingeschränkten Zugang zu qualitativ hochwertiger MR-Technologie haben“, stellt Dr. Heinrich Kolem fest, der zu dieser Zeit bei Siemens das Geschäftsgebiet MR leitet. „Die bisher angebotenen offenen MR-Systeme konnten mit den Qualitätsstandards für MR-Bilder im Hochfeldbereich nicht mithalten. Unser neues MR-System MAGNETOM Espree ist eine Kategorie für sich und bietet neben mehr Patientenkomfort auch diagnostische Bilder in Hochfeldqualität.“



Der Magnet des Forschungs-Systems MAGNETOM 7T ist rund drei Meter lang und wiegt 32 Tonnen

140.000-mal stärker als das Magnetfeld der Erde

Unter dem Begriff *Hochfeld-MR* werden zu dieser Zeit Systeme mit 1 Tesla und 1,5 Tesla zusammengefasst; Magnetresonanztomographen mit 3 Tesla oder noch höheren Feldstärken fallen unter die Bezeichnung *Ultrahochfeld-MR*. Während 3-Tesla Systeme wie MAGNETOM Trio im Laufe der 2000er Jahre zunehmend auch in der klinischen Routine eingesetzt werden, kommen in der Forschung ab 2002 erste Anlagen mit 7 Tesla zum Einsatz. Eine Feldstärke von 7 Tesla entspricht etwa dem 140.000-fachen des Erdmagnetfeldes. Das starke MR-Magnetfeld ermöglicht noch kontrastreichere und höher aufgelöste MR-Bilder, auf denen sich Strukturen mit einer Größe von 0,2 Millimeter deutlich voneinander abheben. Bei der Erforschung der Ursachen von Krankheiten lassen sich beispielsweise winzige Veränderungen im Gehirn erkennen, die im Frühstadium von Erkrankungen wie Alzheimer oder multipler Sklerose auftreten. Bei der Beobachtung des Stoffwechsels im Gewebe können unterschiedliche chemische

Elemente voneinander abgegrenzt werden, um zum Beispiel die Wirkung von Medikamenten im Körper zu untersuchen. Bereits ab Anfang 2002 liefert Siemens die Hauptkomponenten für Forschungsanlagen mit 7 Tesla Feldstärke. Im Laufe der folgenden Jahre entwickelt das Unternehmen gemeinsam mit Kooperationspartnern spezialisierte Spulen und anwendungsorientierte Technologien, die später im Forschungs-MRT MAGNETOM 7T zum Einsatz kommen. Die beiden ersten Partner sind die University of Minnesota und das Martinos Center, an dem das Massachusetts General Hospital, das Massachusetts Institute of Technology und die Harvard Medical School beteiligt sind. Der drei Meter lange Magnet des MAGNETOM 7T wiegt in der ersten Ausführung 32 Tonnen, wird mit 1.750 Litern flüssigem Helium gekühlt und benötigt trotzdem nur 40 Quadratmeter Installationsfläche. Viele Erkenntnisse aus der Entwicklung für die Forschung fließen in die Systeme mit niedrigerer Feldstärke ein. Als Siemens im Jahre 2007 auf der Tagung der International Society for Magnetic Resonance in Medicine (ISMRM) die neuen Trends in der 7T-Ultrahochfeld-Bildgebung vorstellt, ist weltweit bereits mehr als jede zweite eingesetzte 7-Tesla-Anlage ein Siemens-System.

Die „unmögliche“ Erfindung

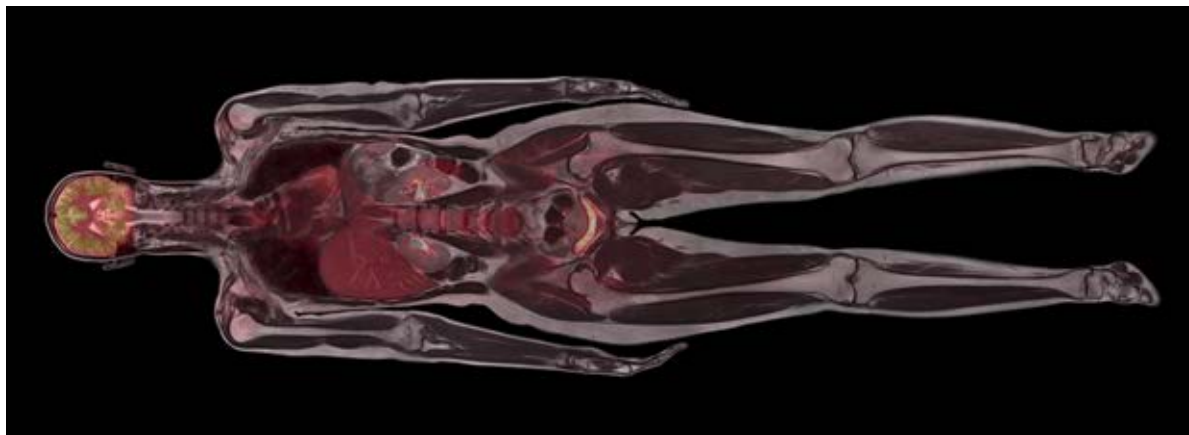
Auf der Tagung der ISMRM präsentiert Siemens auch den voll funktionsfähigen Prototyp einer Entwicklung, die bis dahin in einem klinischen Bildgebungs-System als physikalisch nicht umsetzbar galt: das weltweit erste System, das die Magnetresonanztomographie mit der Positronen-Emissionstomographie (PET) vereint. Die PET ist ein Verfahren der molekularen Bildgebung, das mithilfe von schwach radioaktiven Präparaten Körperfunktionen wie den Stoffwechsel detaillierter als andere Technologien darstellen kann. Eingesetzt wird die PET vor allem in der Tumordiagnostik, bei Untersuchungen

der Herzkranzgefäße und bei Erkrankungen des Nervensystems. Die Konstruktion eines Hybrid-Systems aus MRT und PET gilt lange Zeit als unmöglich. Die Detektoren der PET sind so empfindlich, dass sogar das sehr schwache Magnetfeld der Erde bei der Konstruktion entsprechend berücksichtigt werden muss. In der Nähe eines Magnetresonanztomographen funktionieren PET-Detektoren also nicht störungsfrei – und keinesfalls im selben Gehäuse. Die Lösung dieses physikalischen Problems liegt in der Halbleitertechnik.

Das Siemens Geschäftsgebiet Molecular Imaging hat bereits in den 1990er Jahren unter erheblichem technischem Aufwand mit der Entwicklung von Halbleiter-Detektoren begonnen, die unempfindlich gegen magnetische Kräfte sind. Zunächst kommen diese Detektoren in einer Art Mini-PET/MR zum Einsatz, den sogenannten präklinischen Systemen, mit denen in der Forschung der Stoffwechsel von kleinen Tieren untersucht wird. 2006 baut Siemens den ersten Detektorring, der groß genug ist für die Untersuchung des menschlichen Gehirns. Von diesem sogenannten



Zu den besonderen Stärken des Biograph mMR – eines Hybrid-Systems aus MRT und PET – zählt die detaillierte Darstellung des Nervensystems



Ganzkörperaufnahme mit dem Biograph mMR aus dem Jahre 2010. Das System wird vor allem in der Forschung eingesetzt, beispielsweise bei der Entwicklung neuer Therapien

„BrainPET“, das in das MAGNETOM Tim Trio mit 3 Tesla integriert ist, werden vier Forschungssysteme gebaut. Mit Unterstützung von Wissenschaftler*innen der Universität von Tennessee in den USA und der Universität Tübingen entstehen die ersten PET/MR-Aufnahmen des menschlichen Gehirns, die Siemens 2007 auf dem ISMRM präsentiert. Nach weiteren drei Jahren Entwicklung, finanziell gefördert von der Deutschen Forschungsgemeinschaft, beginnt der erste klinische Anwendungstest des Biograph mMR – die Abkürzung mMR steht für molekulare Magnetresonanz – im November 2010 am Klinikum der Technischen Universität München. Der Biograph mMR soll in München unter anderem zur Planung von Therapien und in der langjährigen Krebsnachsorge eingesetzt werden. Zu den besonderen Stärken des Biograph mMR zählt die detaillierte Darstellung des Nervensystems, die bei der Untersuchung von Krankheiten wie Demenz oder Epilepsie helfen kann, das betroffene Gewebe möglichst exakt zu identifizieren. In der klinischen Praxis kommt die PET/MR heute beispielsweise zum Einsatz, wenn überprüft werden soll, wie der Körper eines Patienten auf verabreichte Medikamente reagiert.

In der Forschung unterstützt der Biograph mMR unter anderem bei der Entwicklung neuer Therapien.

Neues Potenzial

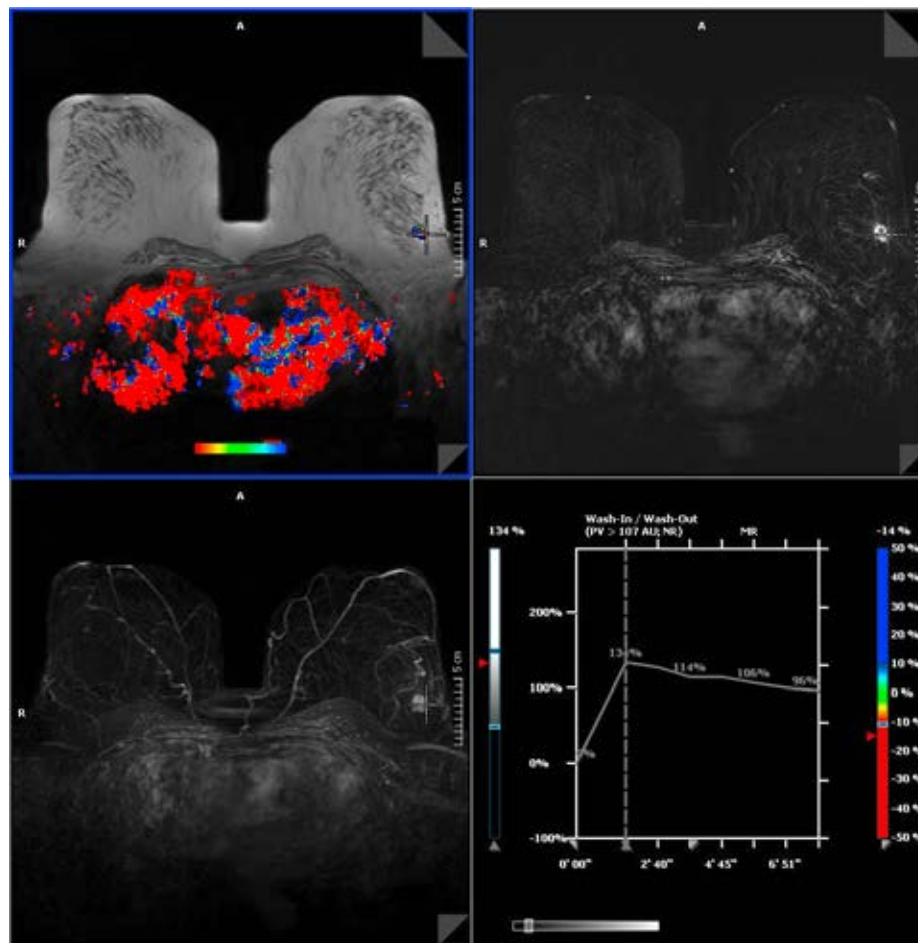
Siemens arbeitet Mitte der 2000er Jahre mit dem Massachusetts General Hospital (MGH) an der Entwicklung eines weiteren Prototyps. Die Anlage, die auf dem MAGNETOM Trio mit 3 Tesla Feldstärke und Tim-Technologie aufbaut, wird mit 128 voneinander unabhängigen Hochfrequenzkanälen versehen, statt wie bis dahin üblich mit 32 Kanälen. Das MGH untersucht die Grundlagen der 128-Kanal-MRT-Technologie und erforscht potenzielle Anwendungen. Die 2006 veröffentlichten Ergebnisse zeigen, dass durch die große Anzahl an Kanälen wesentlich höher aufgelöste Bilder oder deutlich schnellere Untersuchungen möglich werden. Im Vergleich zu bisherigen Standards verarbeitet die Tim-Technologie mit 128 Kanälen die Signale aus dem Körper bis zu 25-mal schneller. Arbeitsintensive Untersuchungen – etwa die Herzbildgebung in der Kardiologie oder die fMRT in der Neurologie – lassen sich mit 128 Kanälen

einfacher und schneller durchführen. Herzuntersuchungen mithilfe der Magnetresonanztomographie nehmen zu dieser Zeit stetig zu; denn ein Herz kann nunmehr innerhalb einer Atemphase aufgenommen und in Echtzeit am Monitor betrachtet werden.

Software spielt eine ebenso gewichtige Rolle wie Hardware, wenn es darum geht, das Potenzial der Magnetresonanztomographie zu nutzen. Durch die Tim-Technologie und neue Software werden im Laufe der Jahre neue Anwendungen möglich, die beispielsweise auf die Anforderungen der Kardiologie optimiert sind. syngo BEAT etwa wurde von Siemens entwickelt, um die bis dahin komplizierte und zeitaufwendige Kardio-MRT schneller und genauer zu machen. Mit nur wenigen Mausklicks ermöglicht syngo BEAT unter anderem dreidimensionale Darstellungen des Herzmuskels, der Herzkranzgefäße oder der Herzfunktion – auch bei Patient*innen mit Rhythmusstörungen. Die Software basiert auf Algorithmen, die zum Beispiel die Einstellungen des MRT-Systems selbständig der Herzfrequenz anpassen und bei Herzrhythmusstörungen die Datenerfassung automatisch aussetzen.

In der zweiten Hälfte der 2000er Jahre führt Siemens mehr Software-Lösungen ein als je zuvor. Mit *syngo* SPACE, zum Beispiel, kann das gesamte zentrale Nervensystem in nur fünf Minuten aufgenommen werden. Die Applikation macht dabei selbst kleinste Läsionen und Nervenwurzelabgänge sichtbar. Mit *syngo* GRAPPA stellt Siemens im Jahre 2006 eine Technik zur parallelen Bildgebung vor, die auf schnelle Aufnahmen in hoher Auflösung optimiert ist. Für Kinder oder andere Patient*innen, die nur kurze Zeit ruhig liegen können, kann *syngo* GRAPPA beispielsweise bei Darstellungen der Wirbelsäule oder bei MR-Angiographien eine große Erleichterung sein. Zu den bedeutendsten *syngo*-MR-Applikationen dieser Zeit zählt *syngo* TimCT. Die Abkürzung CT steht dabei für *Continuous Table move* – und die Assoziation zur Computertomographie ist beabsichtigt. Denn mit *syngo* TimCT bleiben die Patient*innen auf dem Untersuchungstisch nicht mehr in einer festen Position, sondern bewegen sich wie bei einem CT-Scan kontinuierlich vorwärts durch den Tunnel. Durch TimCT werden neue Anwendungen möglich, viele Untersuchungen schneller und die Arbeitsabläufe effizienter. Waren früher noch bis zu zwölf Arbeitsschritte nötig – von der Vorbereitung der Patient*innen bis zur Aufnahme des Bildes – sind es in den späten 2000er Jahren durch Anwendungen wie TimCT nur noch sechs.

Im Jahre 2007 komplettiert das MAGNETOM Verio die erste Generation der Tim-Systeme: Als erster Magnetresonanztomograph vereint das MAGNETOM Verio eine Feldstärke von 3 Tesla mit einer 70 Zentimeter großen Tunnelöffnung. Zudem ist der Magnet des Systems mit einer Länge von 173 Zentimetern der weltweit kürzeste mit einer Feldstärke von 3 Tesla. Das MAGNETOM Verio benötigt nicht viel mehr Platz als ein durchschnittliches 1,5-Tesla-System, ist mit rund sechs Tonnen Gewicht für ein 3-Tesla-System außergewöhnlich leicht, verbraucht kein Helium und



Die Befundungssoftware *syngo* BreVis ist eine von zahlreichen Anwendungen, die Siemens ab der zweiten Hälfte der 2000er Jahre entwickelt

ist deshalb jederzeit einsatzbereit. 3-Tesla-Systeme wurden Anfang des neuen Jahrtausends aufgrund ihrer höheren Bildauflösung vor allem in der Forschung eingesetzt; ab Mitte des ersten Jahrzehnts kommen sie zunehmend auch in der klinischen Routine zum Einsatz. Der Anteil an 3-Tesla-Systemen beträgt im Jahre 2007 bereits rund 13 Prozent.

Der Kostendruck im Gesundheitswesen nimmt auch im ersten Jahrzehnt des neuen Jahrtausends weiter zu. Siemens investiert deshalb vermehrt in die Entwicklung leistungsstarker und gleichzeitig kosteneffizienter Systeme, die besonders auf die Anforderungen von Krankenhäusern und Praxen mit kleinen Budgets abgestimmt sind. Das in Shenzhen



Das MAGNETOM Verio ist das erste System, das eine Feldstärke von 3 Tesla mit einer 70 Zentimeter großen Magnetöffnung vereint



Das in Shenzhen mit Unterstützung aus Erlangen und Oxford entwickelte Einstiegssystem MAGNETOM ESSENZA ist auf die Anforderungen von Krankenhäusern und Praxen mit kleinen Budgets abgestimmt



Das Team in Shenzhen konzentriert sich vor allem darauf, die MRT einem noch breiteren Kundenkreis zugänglich zu machen

gemeinsam mit Oxford und Erlangen entwickelte 1,5-Tesla-System MAGNETOM Essenza liegt deutlich unter dem Preis anderer MRT in diesem Marktsegment; dennoch sind in diesem System neueste Technologien wie Tim mit Innovationen wie dem *Focus-Shoulder-Array* kombiniert. Durch diese Spulentechnik lässt sich der Untersuchungsbereich des

Magneten von der Mitte des Systems hin zur Schulter verschieben. Ohne das Focus-Shoulder-Array würde die Schulter während der Untersuchung am Rand des Messbereichs liegen. Neben den geringeren Anschaffungs- und Betriebskosten lassen sich auch bei den Raum- und Baukosten Einsparungen von bis zu 25 Prozent erzielen. Möglich wird dies unter

anderem durch das mit 3,5 Tonnen vergleichsweise leichte Gewicht des Magneten, sodass das MAGNETOM Essenza nicht wie sonst üblich wegen der hohen Gewichtsbelastung des Bodens nur im Keller installiert werden kann, sondern auch in Stockwerken mit normal üblicher Bodenbelastbarkeit von 500 Kilogramm pro Quadratmeter.

Neue Abläufe

Technische Innovationen spielen bei der Steigerung der Produktivität im Gesundheitswesen eine große Rolle; deshalb stehen das Optimieren der Kosten und die stetige Verbesserung von Arbeitsabläufen auch bei der Entwicklung der nächsten Generation der Tim-Systeme im Mittelpunkt. MAGNETOM Aera mit 1,5 Tesla und MAGNETOM Skyra mit 3 Tesla, die neuen Systeme, die Siemens im November 2009 auf dem 95. Kongress der Radiologischen Gesellschaft Nordamerikas (RSNA) vorstellt, sind erstmals mit der neuentwickelten *Dot-Engine* ausgestattet. *Dot* steht für *Day optimizing throughput*. Die Kombination aus Tim und Dot verbessert die Bedienfreundlichkeit, verkürzt die Untersuchungszeit und kann dadurch die Produktivität des Krankenhauses bei MR-Untersuchungen um bis zu 30 Prozent steigern. Die Parameter der Untersuchung lassen sich mit wenigen

Mausklicks individuell an die Patient*innen anpassen. Dabei kann beispielsweise berücksichtigt werden, wie lange die Patientin oder der Patient den Atem anhalten kann. Dot ist auf zahlreiche Arbeitsabläufe optimiert, etwa für Untersuchungen des Herzens, des Gehirns, der Knie oder für die Tumordiagnostik. Die Anwender*innen werden dabei von der Dot-Engine mit Bildern und Texten Schritt für Schritt auch durch komplexe Untersuchungen geführt.

Zusätzlich zur Dot-Engine kann die neue Bildgebungssoftware *syngo.via*¹ zu schnelleren Untersuchungen mit verbessertem Komfort für Anwender*innen beitragen. *syngo.via* schlägt beispielsweise – zugeschnitten auf das jeweilige Krankheitsbild – je nach Patient*in passende und zeitsparende Arbeitsabläufe vor. Die einzelnen Workstations in der Klinik sind durch *syngo.via* miteinander vernetzt, so dass die Ergebnisse der Untersuchung von jedem verbundenen

Rechner aus abgerufen werden können. Auch für Patient*innen soll die Untersuchung so angenehm wie möglich sein: Neben der 70 Zentimeter großen Magnetöffnung, die zu dieser Zeit bereits bei fast allen neuen Siemens-MRT Standard ist, sind die Gehäuse von MAGNETOM Aera und MAGNETOM Skyra mit der sogenannten MoodLight-Beleuchtung ausgestattet, die die Umgebung im Untersuchungsraum in freundliche Farben tauchen kann.

Die Dot-Engine führt Anwender*innen schrittweise durch komplexe Untersuchungen

Die Tim-Technologie, die erstmals in MAGNETOM Aera und MAGNETOM Skyra zum Einsatz kommt, ist eine Weiterentwicklung der ersten Version aus dem Jahr 2003. Die neue *Tim-4G*-Technologie, die vierte Spulengeneration, ist statt mit 76 Spulenelementen und 32 Empfangskanälen nun mit bis zu 204 Elementen und 128 Kanälen ausgestattet. Der neue mobile Tisch mit integrierter und herausnehmbarer 32-Kanal-Spule trägt Patient*innen mit einem Gewicht von bis zu 250 Kilogramm. Adipöse, schwerkranke oder bettlägerige Patient*innen können nun außerhalb des MR-Raums vorbereitet und auf dem Tisch zum MAGNETOM befördert werden, der anschließend am System andockt. Die Tim-Spulen der vierten Generation lassen sich durch die Direct-Connect-Schnittstelle per Slide-Connect flexibel an die unterschiedlichen Körperregionen anpassen. Alle HF-Sende- und Empfangskomponenten sind per DirektRF, der neuen Digital-in/Digital-out-Technik, mit dem System verbunden.

Neuheiten wie die Total imaging matrix, die PET/MR, die Forschungssysteme mit 7 Tesla und TimCT haben die Anwendungsmöglichkeiten der Magnetresonanztomographie in den 2000er Jahren nochmals bedeutend erweitert. Hochauflösende Ganzkörperuntersuchungen etwa sind nun ebenso möglich wie dreidimensionale Abbildungen des Herzens oder die Beobachtung des Stoffwechsels im Gewebe. Die Einführung der 70 Zentimeter großen Magnetöffnung und Detailverbesserungen wie leichte und bequemere Spulen haben die MRT für Patient*innen wesentlich komfortabler werden lassen. Die enormen Fortschritte in der Softwareentwicklung haben ebenso zum großen Leistungssprung beigetragen wie die Verbesserungen der Hardware. Die darauffolgenden Jahre sollten nicht minder bewegt verlaufen – im Gegenteil: Neue Ideen und Herangehensweisen führen im folgenden Jahrzehnt in der Magnetresonanztomographie zu bahnbrechenden Möglichkeiten, die 2010 noch in weiter Ferne scheinen.



Im Jahre 2009 stellt Siemens die nächste Generation der Tim-Systeme vor



Neue Freiheiten

Magnetresonanztomographie für mehr und mehr Menschen

Die Magnetresonanztomographie war in ihren frühen Jahren ein Verfahren, das nur von wenigen Spezialist*innen angewandt wurde und für relativ wenige Patient*innen zugänglich gewesen ist. Dies hatte zahlreiche Gründe: Die Bedienung der ersten Systeme war so kompliziert, dass Anwender*innen über fundiertes physikalisches Wissen verfügen mussten, um einen Magnetresonanztomographen zu betreiben. Auch für die komplexe Interpretation der Ergebnisbilder waren in den Anfangsjahren nur wenige Radiolog*innen ausgebildet. Zudem wogen die Systeme bis zu 40 Tonnen, der Wartungsaufwand war erheblich und der hohe Heliumverbrauch verursachte signifikante Betriebskosten. Die räumlichen Anforderungen, die in den 1980er Jahren mit der Installation eines MRTs einhergingen, setzten aufwendige Umbauten in Krankenhäusern und Praxen voraus. Die engen und langen Magnettunnel machten es schwierig oder gar unmöglich, zum Beispiel übergewichtige oder claustrophobische Patient*innen zu untersuchen. Die zahlreichen neuen Technologien und Anwendungen, die seit Anfang der 1990er Jahre entwickelt wurden, haben die MRT für immer mehr Patient*innen zugänglich gemacht und die Einsatzmöglichkeiten enorm erweitert. Am Beispiel der Kinderheilkunde² lassen sich die Fortschritte anschaulich zeigen.

Kinder sind für die medizinische Bildgebung eine große Herausforderung. Ihr schnellerer Herzschlag und ihre höhere Atemfrequenz stellen besondere Anforderungen an die Technik. Damit die kleinen



In der Pädiatrie kommen seit Ende der 2000er Jahre spezielle Spulen zur Untersuchung von Kindern zum Einsatz

Organe genauso detailliert dargestellt werden können wie die Organe Erwachsener, muss die Auflösung der Bilder entsprechend höher sein. Technologien wie die parallele Bildgebung, spezielle Kinder-Spulen, höhere Feldstärken und schnellere Sequenzen haben dazu geführt, dass die Magnetresonanztomographie in der Kinderheilkunde zunächst für Gehirnuntersuchungen, später auch für alle anderen Organe genutzt werden konnte. Anfang der 2010er Jahre können beispielsweise der Brustkorb, der Bauchraum, der Bewegungs-

apparat und das Herz von Kindern im MRT untersucht werden. Um Kinder bestmöglich auf die bevorstehende Untersuchung vorzubereiten und dazu beizutragen, dass sie während des Scans möglichst lange still liegen, wurden im Laufe der Zeit altersgerechte Bilderbücher, MRT-Spielzeuge, Musik und Videos entwickelt.

„Gerda, die mutige Giraffe“ bereitet Kinder auf ihre MRT-Untersuchung vor und soll ihnen die Angst nehmen – als Bilderbuch, Hörspiel und mit dem „Mut-mach-Song“



MRT-Spielzeuge können dazu beitragen, Kinder so gut wie möglich auf die Untersuchung vorzubereiten



Das High-End-System MAGNETOM Prisma aus dem Jahre 2013 ist auf die Anforderungen der neurologischen Grundlagenforschung optimiert und wird gleichzeitig von vielen Kund*innen als High-End-System für die klinische Diagnostik geschätzt



Nervenbahnen aus bis zu 514 Richtungen

Auch die Systeme mit der zu dieser Zeit höchsten zugelassenen klinischen Feldstärke, 3 Tesla, sind in den vergangenen zehn Jahren in allen Belangen signifikant verbessert worden. Waren um die Jahrtausendwende bei den ersten Installationen von 3-Tesla-Scannern noch Untersuchungszeiten von mehr als einer Stunde die Regel, dauern die Scans mit der Technik der frühen 2010er Jahre oft nur noch wenige Minuten. Dabei ist die Bildqualität kaum noch mit der der ersten 3-Tesla-Systeme vergleichbar. In den Jahren 2012 und 2013 erweitert Siemens sein Portfolio an 3-Tesla-Magnetresonanztomographen um das Einstiegssystem MAGNETOM Spectra und das High-End-System MAGNETOM Prisma. Das MAGNETOM Spectra konnte durch seinen vergleichsweise niedrigen Einstiegspreis und die geringen Betriebskosten auch kleineren Krankenhäusern und radiologischen Praxen den Einstieg in die 3-Tesla-Technologie ermöglichen. Die Tim-Technologie der vierten Generation basiert auf neu entwickelten Spulen mit bis zu 204 Elementen, die bis zu 128 Kanäle nutzen. Tim-4G-Funktionen wie *DirectRF* verbessern durch die vollständige Digitalisierung aller Signale unter anderem das Signal-Rausch-Verhältnis, was zu stabileren Bildern mit weniger Artefakten führt. Die Untersuchungsgeschwindigkeit erhöht Tim-4G unter anderem durch die neuen *DirectConnect*- und *SlideConnect*-Spulen, die sich flexibler anordnen lassen und über deutlich weniger Kabel mit dem MRT verbunden werden.

Das MAGNETOM Prisma setzt in vielen Bereichen neue Maßstäbe. Durch die einzigartigen Gradientenspulen, die schnellsten und stärksten dieser Zeit, sind nun auch geringe Bewegungen von Flüssigkeiten im Körper messbar, etwa zur Diagnostik von Sauerstoffunterversorgungen im Gehirn. Neue Anwendungen wie DTI (Diffusion Tensor Imaging)

können beispielsweise im Gehirn Nervenbahnen aus bis zu 514 Richtungen sichtbar machen. Abgesehen von der außergewöhnlichen Gradientenstärke ist die Bildqualität vor allem auf die hohe Homogenität des Magnetfeldes zurückzuführen. Die sogenannten Shim-Spulen des Systems – das sind Vorrichtungen zur Homogenisierung von Magnetfeldern – gleichen die Inhomogenitäten besser aus, die durch den Körper der Patient*innen im Magnetfeld entstehen. Das MAGNETOM Prisma basiert technisch auf dem 3-Tesla-System MAGNETOM Skyra, ist aber auf Forschungsanwendungen wie die neurologische Grundlagenforschung optimiert. Gesundheitsversorger, die das MAGNETOM Trio im Einsatz haben, können es mit der Technologie des MAGNETOM Prisma aufrüsten lassen.



Der Fortschritt eines neuro- oder kardiovaskulären Eingriffs lässt sich heute bereits während der Operation mithilfe der MRT kontrollieren

Kombinierte Lösungen

Zu den zahlreichen neuen Technologien, die Siemens in der ersten Hälfte der 2010er Jahre auf den Markt bringt, gehört beispielsweise das Produktpaket *MAGNETOM Combi Suite*, das auf den Einsatz der Magnetresonanztomographie bei Interventionen optimiert ist. Um die MRT schnell und unkompliziert in den Arbeitsablauf von Operationen zu integrieren, entwickelt Siemens einen mobilen Scannertisch, den *Combi Dockable Table*. Die Patient*innen können etwa während eines neuro- oder kardiovaskulären Eingriffs zur Kontrolle des Behandlungsfortschritts schnell und sicher zum MRT transportiert werden.

Zahlreiche Neuheiten führt Siemens 2014 im MAGNETOM Amira ein. Das 1,5-Tesla-System verbraucht durch den *Eco Power Mode* bis zu 30 Prozent weniger Energie. Der *Eco Power Mode* überwacht den Heliumkreislauf und steuert die Kühlung und Rückverflüssigung des Heliums effizienter. *DotGO*, die damals neueste Generation der MRT-Untersuchungssoftware, bietet abhängig von der medizinischen Fragestellung den passenden Arbeitsablauf für den jeweiligen Scan an. Die Anwendung *Quiet Suite* senkt den Schalldruck bis zu 97 Prozent. Manche Untersuchungen mit dem MAGNETOM Amira können sogar nahezu geräuschlos durchgeführt werden.

7 Tesla für den klinischen Einsatz

Knapp 15 Jahre nachdem 3-Tesla-Systeme erstmals in der klinischen Praxis eingesetzt wurden, bereitet Siemens die Einführung des MAGNETOM Terra vor, des weltweit ersten 7-Tesla-Systems für den klinischen Einsatz. Die Vorteile von Systemen mit 7 Tesla Feldstärke zeigen sich unter anderem bei der Diagnose von Epilepsie oder Multipler Sklerose. Die bei Epilepsie bedeutsame Unterscheidung zwischen weißer und grauer Gehirnmasse lässt sich bei dieser Feldstärke wesentlich deutlicher darstellen. Bei Patient*innen mit Multipler Sklerose werden Läsionen (krankhafte oder verletzungsbedingte Veränderungen) in der grauen Gehirnmasse, die zu Beeinträchtigungen der kognitiven Leistungsfähigkeit führen können, früher sichtbar und somit behandelbar. Der höhere Kontrast, das bessere Signal-zu-Rausch-Verhältnis und die höhere Auflösung von 7-Tesla-Systemen offenbaren bei diesen Untersuchungen wichtige Details, die mit 3-Tesla-Systemen nicht sichtbar sind.

Als Siemens den Prototyp des MAGNETOM Terra im Mai 2015 erstmals öffentlich vorstellt, ist die Marktzulassung für den klinischen Einsatz in bestimmten neurologischen und orthopädischen Anwendungen bereits beantragt. Der von Siemens Magnet Technology in Oxford entwickelte aktiv abgeschirmte Magnet ist der leichteste 7-Tesla-Magnet der Welt, 50 Prozent leichter als bisherige aktiv abgeschirmte Magnete. Das MAGNETOM 7T aus dem Jahre 2005 wiegt 32 Tonnen, das MAGNETOM Terra nur noch rund 17 Tonnen. Dadurch werden der Transport und das Einbringen in das Klinikgebäude deutlich erleichtert. Durch die Dual-Mode-Funktion³ ist das MAGNETOM Terra darauf ausgelegt, innerhalb von weniger als zehn Minuten zwischen Forschungsanwendungen und klinischen Protokollen zu

wechseln. Im Juli 2018 erhält das MAGNETOM Terra schließlich die CE-Kennzeichnung der Europäischen Union und kann fortan in Europa in der klinischen Diagnostik eingesetzt werden. Zwei Monate später folgt die Freigabe der Food and Drug Administration (FDA) und somit die Zulassung für den US-amerikanischen Markt.

Auf Knopfdruck

Die Erfahrungen aus der Entwicklung des 7-Tesla-Systems überträgt Siemens Healthineers auf die Konstruktion des MAGNETOM Vida mit 3 Tesla Feldstärke. Das neue High-End-System ist unter anderem mit den stärksten kommerziell erhältlichen Gradienten aller Scanner mit einer Magnetöffnung von 70 Zentimetern ausgestattet. Nach mehr als fünf Jahren Entwicklung präsentiert das Unternehmen das MAGNETOM Vida Anfang 2017 am Universitätsklinikum Tübingen und auf dem European Congress of Radiology (ECR) in Wien mit einer neuen Technologie, die einen bedeutenden Meilenstein hin zur Präzisionsmedizin und zu einer individuellen Patientenversorgung darstellt: Die *BioMatrix*-Technologie liefert zuverlässig reproduzierbare Untersuchungsbilder, unabhängig davon, wer untersucht wird und wer das System bedient. Das heißt, die *BioMatrix*-Technologie berücksichtigt die physiologischen und anatomischen Unterschiede der Patient*innen ebenso wie die unterschiedlichen Erfahrungs- und Ausbildungsniveaus der Anwender*innen. Beispielsweise messen die *BioMatrix Sensors* im Untersuchungstisch den Atemverlauf und erlauben damit eine automatische Triggerung der Sequenzmessung auf Basis des Atemsignals. In der Vergangenheit war hierzu das Anbringen eines dedizierten Atemgurtes notwendig. Die Anwender*innen können somit Untersuchungszeit einsparen und gleichzeitig den Komfort für die Patient*innen erhöhen.

Die *BioMatrix*-Technologie umfasst zudem *BioMatrix Tuners*, die es ermöglichen, das lokale Magnetfeld optimal auf die individuellen Patient*innen anzupassen. Hierdurch können Bildartefakte besser vermieden werden, die die diagnostische Qualität gerade bei den hochpräzisen 3-Tesla-Systemen beeinträchtigen könnten. Die Touchscreen-Bedienoberfläche des MAGNETOM Vida mit dem Namen *BioMatrix Select&GO* ermöglicht die optimale Positionierung der Patient*innen mit nur einem Klick: Auf Basis intelligenter Körpermodelle fährt der Untersuchungstisch selbstständig in die richtige Scan-Position. Somit beschleunigt die *BioMatrix*-Technologie die Patientenpositionierung um bis zu 30 Prozent. Mit der Compressed-Sensing-Anwendung, die bis zu zehnmal schnellere MRT-Aufnahmen ermöglicht als ohne diese Technologie, lassen sich zum Beispiel dynamische Untersuchungen deutlich effizienter und für den Patienten komfortabler durchführen. Zum Beispiel können mit Compressed Sensing dynamische Untersuchungen der Leber



Mit dem MAGNETOM Vida führt Siemens Healthineers 2017 die *BioMatrix*-Technologie ein

Das MAGNETOM Terra ist das weltweit
erste 7-Tesla-System, das für den klinischen
Einsatz zugelassen wurde





Das MAGNETOM Sola aus dem Jahr 2018 ist das erste 1,5-Tesla-System mit BioMatrix-Technologie

ohne Atemanhalten auf Knopfdruck in einem Scan-Vorgang durchgeführt werden. Vorher waren für solche Aufnahmen bis zu vier einzelne Schritte mit circa 20-sekündigem Atemanhalten notwendig. Auch zur Planung und Durchführung der bisher aufwendigen Ganzkörperaufnahmen sind nur noch wenige Klicks nötig: Die Whole-Body Dot Engine des MAGNETOM Vida vereinfacht und automatisiert merklich die Untersuchungsplanung, so dass eine Ganzkörperuntersuchung innerhalb von 25 Minuten durchgeführt werden kann.

Rund ein Jahr nach der Vorstellung des MAGNETOM Vida führt Siemens Healthineers die BioMatrix-Technologie in die 1,5-Tesla-Bildgebung ein: Das MAGNETOM Sola vereint viele Innovationen erstmals in einem 1,5-Tesla-System und wird später zusätzlich mit zwei neuen BioMatrix-Sensoren ausgestattet: Der in die Körperspule integrierte *BioMatrix Beat Sensor* erkennt automatisch die Bewegungen des Herzens, so dass keine Elektroden auf der Haut der Patient*innen angebracht werden müssen. Die Technologien *Simultaneous Multi-Slice* und *Compressed Sensing*, die in den folgenden Absätzen genauer erklärt werden, senken in Verbindung mit paralleler Bildgebung die Untersuchungszeiten mit dem MAGNETOM Sola um bis zu 50 Prozent.

Freies Atmen

Mitte der 2010er Jahre hat die Magnetresonanztomographie ein Niveau erreicht, auf dem selbst mit der Hardware von High-End-Systemen keine bedeutende Steigerung der Untersuchungsgeschwindigkeit möglich ist. Durch die relativ lange Aufnahmezeit müssen Patient*innen beispielsweise bei bestimmten Herzuntersuchungen vierzehnmal für längere Zeit den Atem anhalten. Zusammen mit den Regenerationsphasen dauert eine Abbildung des Herzens bis zu sechs Minuten. Ende 2016 stellt

Siemens Healthineers eine Lösung vor, bei der Patient*innen während der gleichen Untersuchung frei atmen können und der Scan nur 25 Sekunden dauert: Die Software-Technologie *Compressed Sensing Cardiac Cine* basiert auf Algorithmen, die die Bildberechnung um den Faktor zehn beschleunigen können. Compressed Sensing erfasst nur die für Diagnose nötigen Datenpunkte und rekonstruiert daraus schrittweise hochaufgelöste Bilder, ohne dass dabei Bildinformationen verloren gehen.

„Mit Compressed Sensing werden Scan-Geschwindigkeiten möglich, die bisher undenkbar waren“, sagt Dr. Christoph Zindel, der zu dieser Zeit das Geschäftsgebiet Magnetresonanztomographie bei Siemens Healthineers leitet. Der Algorithmus, auf dem Compressed Sensing basiert, wurde im Jahre 2014 von einer Arbeitsgruppe in Zusammenarbeit mit Siemens auf dem Kongress der Internationalen Gesellschaft für Magnetresonanz in der Medizin (International Society for Magnetic Resonance in Medicine, ISMRM) erstmals der Öffentlichkeit präsentiert. Nachdem die Technologie beim Wettbewerb für dynamische Bildgebung als Sieger hervorgegangen ist, hat Siemens Healthineers den Algorithmus gemeinsam mit wissenschaftlichen Partnern rund um den Globus weiterentwickelt und zur Produktreife gebracht. „In enger Zusammenarbeit mit unseren Kollaborationspartnern konnten wir bei dieser Technologie wahre Pionierarbeit leisten“, so Zindel. „Compressed Sensing Cardiac Cine ist dabei nur der erste Schritt; zusammen mit unseren Partnern arbeiten wir bereits daran, die Technologie auszuweiten und zusätzliche Applikationen auf den Markt zu bringen.“

Kurze Zeit nach der Anwendung für die Kardiologie führt Siemens Healthineers Compressed Sensing für Untersuchungen des Bauchraums ein. Mehrfaches Anhalten des Atems und komplexe Zeitvorgaben bei

der Kontrastmittelgabe sind mit *Compressed Sensing GRASP-VIBE* nicht mehr nötig. Die Anwendung erfasst die Untersuchungsregion des Abdomens bei freier Atmung der Patient*innen in einem kontinuierlichen Durchlauf. Mit *3D Compressed Sensing SPACE* ist es möglich, hochaufgelöste Bilder der Bauchspeicheldrüse und des Gallengangsystems entweder mit einer einzigen kurzen Atempause oder innerhalb von zwei Minuten bei freier Atmung aufzunehmen.



Abbildung der Leber. Compressed Sensing GRASP-VIBE macht solche Untersuchungen des Bauchraums möglich, ohne dass Patient*innen mehrmals den Atem anhalten müssen

Gleichzeitig statt nacheinander

Zu den bedeutendsten Innovationen, die Siemens Healthineers mit MAGNETOM Vida und MAGNETOM Sola in die Magnetresonanztomographie einführt, gehört die Technologie *Simultaneous Multi-Slice (SMS)*. Wie Compressed Sensing verkürzt auch die Simultaneous Multi-Slice-Technologie die Dauer bestimmter Untersuchungen deutlich. Das Verfahren baut auf der parallelen Bildgebung auf, der am häufigsten genutzten Methode der klinischen MRT. SMS geht einen Schritt weiter als die parallele Bildgebung und nimmt Schichten nicht nacheinander, sondern gleichzeitig auf. Die Kombination der Simultaneous Multi-Slice-Technologie mit Puls-Sequenzen wie der Echo-Planar-Bildgebung kann beispielsweise die Dauer von Gehirnaufnahmen halbieren. Statt Zeit zu sparen, lassen sich in der ursprünglichen Scanzeit auch Bilder in höherer Auflösung oder dünnere Schichten aufnehmen. Auch die Simultaneous Multi-Slice-Technologie hat Siemens Healthineers mit zahlreichen Kooperationspartnern zur Marktreife entwickelt, darunter das Centre for Magnetic Resonance Research (CMRR) der University of Minnesota und das Massachusetts General Hospital der Harvard Medical School. Siemens Healthineers hat Simultaneous Multi-Slice und Compressed Sensing mit Technologien wie der parallelen Bildgebung in der Lösung *Turbo Suite* vereint.

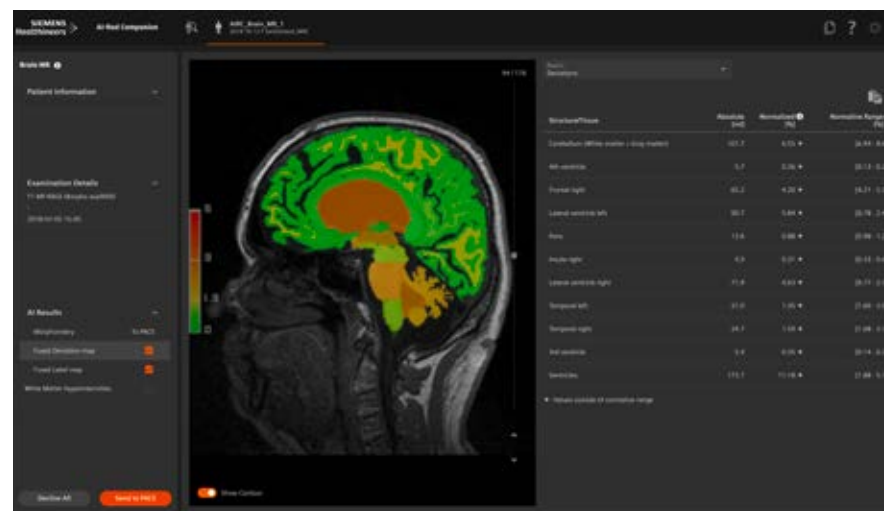
Lernen für die Zukunft

Neben Technologien zur schnelleren Bildaufnahme trägt seit einigen Jahren auch Künstliche Intelligenz (KI, englisch artificial intelligence, AI) dazu bei, die Untersuchungszeiten deutlich zu verkürzen. Die *Dot-Engine* basiert auf maschinellem Lernen und unterstützt Anwender*innen dabei, die Untersuchungen mit den bestmöglichen Parametern

schnell und effizient durchzuführen. Das klinische Personal soll bei standardisierten und sich wiederholenden Aufgaben so weit wie möglich entlastet werden. Mit den Fortschritten der vergangenen Jahre in der Rechenleistung und bei der Entwicklung von Algorithmen werden zunehmend neue, komplexere Anwendungen möglich. Besonders im Training neuronaler Netzwerke, dem sogenannten Deep Learning, liegt riesiges Potenzial für die Zukunft. Eine KI kann schnell und präzise in riesigen und komplexen Datenmengen Muster erkennen, die der Algorithmus anhand hochwertiger Trainingsdaten „gelernt“ hat. Je mehr Trainingsdaten einer KI zur Verfügung gestellt werden, desto präziser werden ihre Auswertungen. Mögliche Anwendungen in der Magnetresonanztomographie umfassen beispielsweise die Vorbereitung der Untersuchung, die Bildberechnung, die Entlastung der Radiolog*innen bei der Beurteilung von Ergebnisbildern sowie die Unterstützung bei der klinischen Entscheidungsfindung.

Der Erfolg der Künstlichen Intelligenz in der klinischen Praxis hängt unter anderem von der Leistungs-

fähigkeit der Algorithmen ab und von der nahtlosen Integration dieser digitalen Assistenten in die Arbeitsabläufe der Radiologie. Siemens Healthineers setzt die Technologie unter anderem in der Plattform *AI-Rad Companion* ein, die 2019 zunächst für Untersuchungen des Brustkorbs in der Computertomographie vorgestellt wird. Zur gleichen Zeit existiert in der Magnetresonanztomographie ein Prototyp des smarten Assistenten, der mit zahlreichen Analyseschritten die Befundung der Prostata unterstützt. Der Prototyp des *AI-Rad Companion Prostate MR* segmentiert die Prostata und ihre peripheren Zonen und kann beispielsweise verdächtige Läsionen identifizieren. Anschließend wird ein strukturierter Bericht erstellt, dessen Ergebnisse Radiolog*innen in ihrer Befundung unterstützen. Kurze Zeit später stellt Siemens Healthineers den *AI-Rad Companion Brain MR* vor, der bei der Beurteilung von Gehirnaufnahmen unterstützen kann. Doch auch in Zukunft wird Software wie der *AI-Rad Companion* Radiolog*innen nicht ersetzen, sondern ihnen Routinetätigkeiten abnehmen, damit sie mehr Zeit haben, um sich schwierigen Diagnosen widmen zu können.



Der *AI-Rad Companion Brain MR* kann bei der Beurteilung von Aufnahmen unterstützen und erstellt dazu unter anderem automatisch einen Bericht mit volumetrischen Analysen des Gehirns

Schneller und leiser

Anfang 2019 stellt Siemens Healthineers zwei kosten-effiziente Scanner vor, die den Zugang zu High-End-Technologien ermöglichen: Das MAGNETOM Altea mit 1,5 Tesla und das MAGNETOM Lumina mit 3 Tesla wurden von Anfang an dafür entworfen, MRT-Untersuchungen so schnell und so komfortabel wie möglich zu machen. Mit den beiden Systemen führt Siemens Healthineers das neue Patienten-Infotainment-System *Innovision* von *Innovere*⁴ ein, das kurze Zeit später auch für die High-End-Systeme MAGNETOM Vida und MAGNETOM Sola verfügbar wird. *Innovision* kann für mehr Entspannung und Komfort während der Untersuchung sorgen. Sobald Patient*innen auf dem Tisch platznehmen, liefert *Innovision* Videos oder Musik in außergewöhnlicher HiFi-Qualität. Gleichzeitig dämpft *Innovision* durch ein einzigartiges Schaumkissen die Geräusche des MRTs.

Die meisten aktuellen MAGNETOM-Systeme sind mit Technologien ausgestattet, die die teilweise sehr lauten Geräusche dämpfen, die beim Schalten der Gradienten entstehen. Die Lösung *Quiet Suite* hebt die Geräuschunterdrückung in MAGNETOM Altea oder MAGNETOM Lumina auf eine neue Stufe, ohne dabei die Bildqualität zu beeinträchtigen. *Quiet Suite* umfasst Sequenzen wie *QuietX* und *PETRA* (pointwise-encoding time reduction with radial acquisition) sowie optimierte Protokolle für neurologische und orthopädische Untersuchungen. *QuietX* senkt die Lautstärke des MRT-Systems um rund 20 Dezibel, *PETRA* ist die allgemein leiseste Sequenz von Siemens Healthineers. *PETRA* kann in manchen Fällen sogar diagnostische Vorteile bieten, etwa bei der Abbildung der Nasennebenhöhlen. Vor allem bei Kindern oder demenzkranken Patient*innen können solche Sequenzen zu einer als angenehmer empfundenen Untersuchung beitragen.



Die Patienten-Infotainment-Lösung *Innovision* kann für mehr Entspannung und Komfort während der Untersuchung sorgen

Fingerabdrücke des Gewebes

Auch heute steckt in der Magnetresonanztomographie noch riesiges Potenzial, das durch technologische Weiterentwicklungen nutzbar gemacht werden kann. Ein vielversprechender neuer Ansatz, das sogenannte *MR Fingerprinting* (MRF), könnte die Möglichkeiten der MRT deutlich erweitern und einen bedeutenden Beitrag zur immer wichtiger werdenden Präzisionsmedizin und individuelleren Therapien sein. MR Fingerprinting unterscheidet sich bei der Datenerfassung, der Nachbearbeitung und der Visualisierung deutlich von der herkömmlichen Magnetresonanztomographie. Statt wie bisher die Eigenschaften von Körpergewebe sichtbar zu machen, erzeugt MR Fingerprinting einzigartige „Fingerabdrücke“, die die Eigenschaften des gescannten Gewebes und der Anatomie numerisch statt visuell widerspiegeln. Das Ziel bei der Entwicklung dieser sogenannten MR-Quantifizierung ist es, Gewebe genauer zu charakterisieren, also gesundes von krankem Gewebe standardisiert zu unterscheiden.

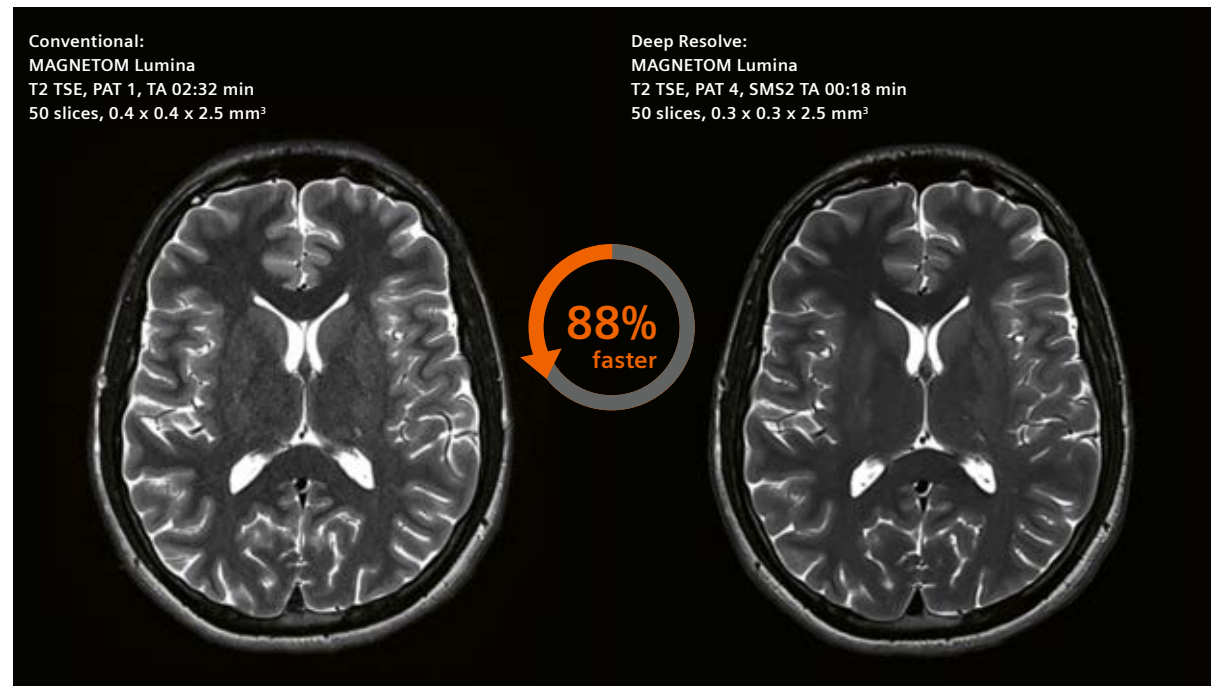
Siemens Healthineers arbeitet in einer mehrjährigen Forschungspartnerschaft mit der Case Western Reserve University und den University Hospitals in Cleveland daran, durch MR Fingerprinting die Quantifizierbarkeit und die Reproduzierbarkeit von MR-Messungen deutlich weiter zu verbessern. Das Ergebnis stellen die Kooperationspartner im Jahre 2019 dem Publikum des ISMRM (International Society for Magnetic Resonance in Medicine) in Montréal vor: Die MRF-Anwendung für die klinische Forschung sowie die dazugehörige Datenbank ist zunächst für das MAGNETOM Vida verfügbar, später folgen weitere Softwarepakete für andere 3-Tesla-Systeme von Siemens Healthineers. Die Daten, die in der Forschung zu MR Fingerprinting gewonnen werden, lassen sich nutzen, um die Methode weiter zu verfeinern. Der Fokus liegt heute darauf, die Ergebnisse aus der neurologischen

MRF-Forschung auf weitere Körperregionen auszuweiten und zusätzliche quantifizierbare biologische Merkmale zu finden, die zur Unterstützung von Diagnosen nützlich sein können.

Mit Intelligenz zum Bild

In den 1980er Jahren hat sich die Magnetresonanztomographie aufgrund ihres außergewöhnlich hohen Weichteilkontrastes schnell etabliert, obwohl sie im Vergleich zu anderen bildgebenden Verfahren einen charakteristischen Nachteil hat: Eine Untersuchung dauert in der MRT wesentlich länger als etwa in der Computertomographie. Zur Abbildung kleinerer Körperregionen in höchstmöglicher Qualität benötigte

ein CT-Scanner damals nur wenige Sekunden, ein MRT-System oft 30 Minuten oder mehr, je nach verwendeter Puls-Sequenz. Im Laufe der Jahre wurde die Scanzeit in der Magnetresonanztomographie erheblich verkürzt, vor allem durch Technologien wie der parallelen Bildgebung, Simultaneous Multi-Slice und Compressed Sensing. Seit einigen Jahren beschleunigt zudem Künstliche Intelligenz die Planung und Vorbereitung von Untersuchungen und unterstützt bei der Interpretation der Bilder. In Künstlicher Intelligenz steckt auch an anderer Stelle enormes Potenzial: Die Scanzeit lässt sich signifikant verkürzen und die Bildqualität gleichzeitig erhöhen, wenn spezielle Algorithmen zur Rekonstruktion des Bildes eingesetzt werden.



Die KI-gestützte Bildrekonstruktionstechnologie Deep Resolve kann Untersuchungen bei gleichbleibender oder sogar besserer Bildqualität signifikant beschleunigen.

Ohne den Einsatz Künstlicher Intelligenz zur Bildrekonstruktion wird die Qualität der Ergebnisbilder in der Magnetresonanztomographie von drei Faktoren beeinflusst, die sich gegenseitig bedingen: von der Geschwindigkeit der Aufnahme, der Auflösung der Bilder und dem Signal-Rausch-Verhältnis. Soll einer dieser drei Faktoren verbessert werden, geht dies nicht ohne negative Effekte auf mindestens einen der beiden anderen Faktoren. Bei großen Beschleunigungen der Aufnahmezeit können verschiedene Beeinträchtigungen des Bildes auftreten, insbesondere eine starke Rauschbehaftung des Bildes. KI-basierte Bildrekonstruktion hingegen hat das Potenzial, alle drei Faktoren gleichzeitig zu verbessern. Mit der Deep-Learning-Technologie *Deep Resolve* bringt Siemens Healthineers im Jahr 2020 KI-gestützte Algorithmen zur Bildrekonstruktion in die Magnetresonanztomographie. Eine Knieuntersuchung mit einem 3-Tesla-System, zum Beispiel, dauert mit herkömmlicher Bildrekonstruktion rund 10 Minuten; mit Deep-Resolve-Algorithmen lässt sich diese Zeit bei gleicher Bildqualität auf unter zwei Minuten verkürzen.

Anstatt das fertige klinische Bild zu verbessern, arbeitet Deep Resolve mit den Rohdaten des Scans. Der Rekonstruktionsalgorithmus reduziert schrittweise im Rahmen einer iterativen Rekonstruktion das Bildrauschen. Dabei wurde das zugrundeliegende neuronale Netzwerk anhand von zigtausend Datenpaaren dahingehend trainiert, dass das durch Beschleunigung entstehende Rauschen besonders effizient reduziert wird. Deep Resolve besteht aus mehreren Algorithmen, die miteinander kombiniert werden können, etwa zur Berechnung schärferer Bilder oder auf die Anforderungen bestimmter Untersuchungen wie Gehirn-Scans. Um den Diagnosewert und die Qualität der Bilder zu gewährleisten, prüft Deep Resolve automatisch während der gesamten schrittweisen Bildrekonstruktion die Konsistenz der Daten.

Weniger ist manchmal mehr

Die technischen Fortschritte der vergangenen Jahrzehnte haben dazu geführt, dass immer mehr Menschen mithilfe der Magnetresonanztomographie untersucht werden können. Doch aus verschiedenen Gründen hat die Mehrheit der Weltbevölkerung noch immer keinen Zugang zur MRT: Die im Vergleich zu anderen bildgebenden Verfahren höheren Kosten können für kleinere Gesundheitsdienstleister, besonders in ländlichen Regionen, eine große Hürde sein. MRT-Systeme sind große und schwere Anlagen, die vergleichsweise aufwendige Umbauten der Räumlichkeiten und komplexe Infrastruktur nötig machen. Patient*innen mit Implantaten können bisher nur eingeschränkt in supraleitenden MRT-Systemen untersucht werden. Für viele klaustrophobische oder adipöse Menschen sind die 70 Zentimeter großen Magnetöffnungen zu eng. Um mehr Menschen Zugang zu verschaffen und die Magnetresonanztomographie an Orte zu bringen, an denen sie bisher noch nicht eingesetzt werden konnte, überwindet Siemens Healthineers diese Hürden mit einem neuen Ansatz in der Systemkonstruktion. Im November 2020 stellt das Unternehmen das erste System einer neuen Klasse Magnetresonanztomographen vor: das MAGNETOM Free.Max – der weltweit erste Magnetresonanztomograph mit einer Patienten-Öffnung von 80 Zentimetern.

Bisher war die Installation eines Magneten kompliziert und erforderte sehr viele Planungen und Vorbereitungen, bevor das System ins Gebäude gebracht werden konnte. Mit dem MAGNETOM Free.Max wird die Installation deutlich einfacher. Statt den Magneten mit einem Kran in einen aufwendig umgebauten Untersuchungsraum zu heben, kann das MAGNETOM Free.Max aufgrund seiner Transporthöhe von weniger als zwei Metern durch Türen, Gänge und in Krankenhaus-Aufzüge gefahren

werden. Zur Installation ist es nicht mehr nötig, Wände oder sogar Dächer zu öffnen. Das gesamte System beansprucht nur 24 Quadratmeter Raumfläche, wiegt weniger als 3,2 Tonnen und ist daher an vielen Orten im Krankenhaus installierbar. Herkömmliche MRT-Systeme benötigen bis zu 1.500 Liter Helium und die teure Installation eines Quenchrohrs,

Das MAGNETOM Free.Max ist der weltweit erste Magnetresonanztomograph mit einer Patienten-Öffnung von 80 Zentimetern



Mit dem MAGNETOM Free.Max aufgenommenes klinisches Bild einer Wirbelsäule

das im Falle einer Magnetabschaltung das verdampfende Helium aus dem Gebäude leitet. Die *DryCool-Technologie* des MAGNETOM Free.Max hingegen ist ein in sich geschlossenes Magnetdesign, das mit 0,7 Liter flüssigem Helium arbeitet. Die gesamte für den Betrieb notwendige Infrastruktur ist in den Magneten integriert.

Siemens Healthineers kombiniert im MAGNETOM Free.Max digitale Technologien mit der außergewöhnlichen Feldstärke von 0,55 Tesla und nennt diese Technologie *High-V MRI*. Der Algorithmus Deep Resolve ist dabei mit anderen digitalen Technologien wie Simultaneous Multi-Slice und Compressed Sensing kombiniert, um eine Systemleistung zu erreichen, die in der Vergangenheit bei einer solch niedrigen Feldstärke undenkbar war. In Kombination mit der Feldstärke von 0,55 Tesla ermöglicht High-V MRI Untersuchungen, die bisher in der MRT kaum möglich waren. Bei Untersuchungen der Lunge, zum Beispiel, fällt bei höheren Feldstärken das Signal am Luft-Gewebe-Übergang schnell ab. Je höher die Feldstärke, desto schwieriger die Lungenbildgebung. Deutliche Vorteile im Vergleich zur herkömmlichen MRT hat die High-V MRI auch bei Patient*innen mit Metallimplantaten. Metall verursacht Bildartefakte, die bei 0,55 Tesla deutlich seltener auftreten. Auf Künstliche Intelligenz baut auch die Benutzerführung des MAGNETOM Free.Max auf, die von Grund auf für neue Anwender*innen der MRT entwickelt worden ist: Die Applikation *myExam Autopilot*, die unter dem Dach *myExam Companion* verfügbar ist, automatisiert Routineuntersuchungen vollständig. Die zeitaufwendige Positionierung der Patient*innen wird durch die weltweit erste, vollständig in den Scanner integrierte 3D Kamera wesentlich erleichtert und beschleunigt. Die *myExam 3D Camera* – die bei Siemens Healthineers auch in anderen Bildgebungstechnologien wie der Computertomographie eingesetzt wird – erfasst dafür die Umrisse des Körpers

sowie die exakte Lage auf dem Tisch, beispielsweise die Position der Ellbogen und der Hände. Der KI-gestützte Algorithmus der Kamera errechnet daraus dreidimensionale Daten und positioniert die Patient*innen automatisch optimal im Zentrum des Magnetfeldes. Gleichzeitig bleibt die Untersuchung für erfahrene Anwender*innen durch die Applikationen *myExam Assist* und *myExam Cockpit* voll konfigurierbar. Hierdurch wird eine weitere Hürde der MRT Bildgebung – die komplexe Bedienung – genommen, sodass die MRT-Bildgebung für noch mehr Menschen zugänglich wird.

Die MRT kommt zu den Patient*innen, nicht umgekehrt

Auch rund 35 Jahre nachdem MAGNETOM-Scanner erstmals in Sattelschleppern installiert wurden, um die Magnetresonanztomographie für möglichst viele Menschen zugänglich zu machen, sind mobile MRTs eine flexible Alternative oder Ergänzung zu fest installierten Systemen. Medizinische Dienstleister wie RAYUS Radiology bieten Gesundheitseinrichtungen in den USA die Möglichkeit, mobile Scanner kurz- oder langfristig zu mieten. Die Anlagen können etwa bei Screening-Programmen in unterversorgten Regionen helfen oder die Zeit während des Umbaus eines Gebäudes überbrücken. Mit dem MAGNETOM Viato.Mobile⁵ stellt Siemens Healthineers im November 2022 die neueste Generation mobiler Scanner vor. Das System ist auf der aktuellen 1,5-Tesla-Plattform von Siemens Healthineers aufgebaut und wird durch Technologien wie Deep Resolve und myExam Companion die gleichen Optionen bieten wie fest installierte Scanner. Bei Bedarf kann das MAGNETOM Viato.Mobile über eine Mobilfunkverbindung bedient und gewartet werden. Dadurch wird weniger Personal vor Ort benötigt werden; Fachkräfte können beispielsweise aus dem Homeoffice arbeiten und die Kolleg*innen am System aus der Ferne unterstützen.



Siemens Healthineers stellt im November 2022 das MAGNETOM Viato.Mobile vor, die neueste Generation mobiler Scanner

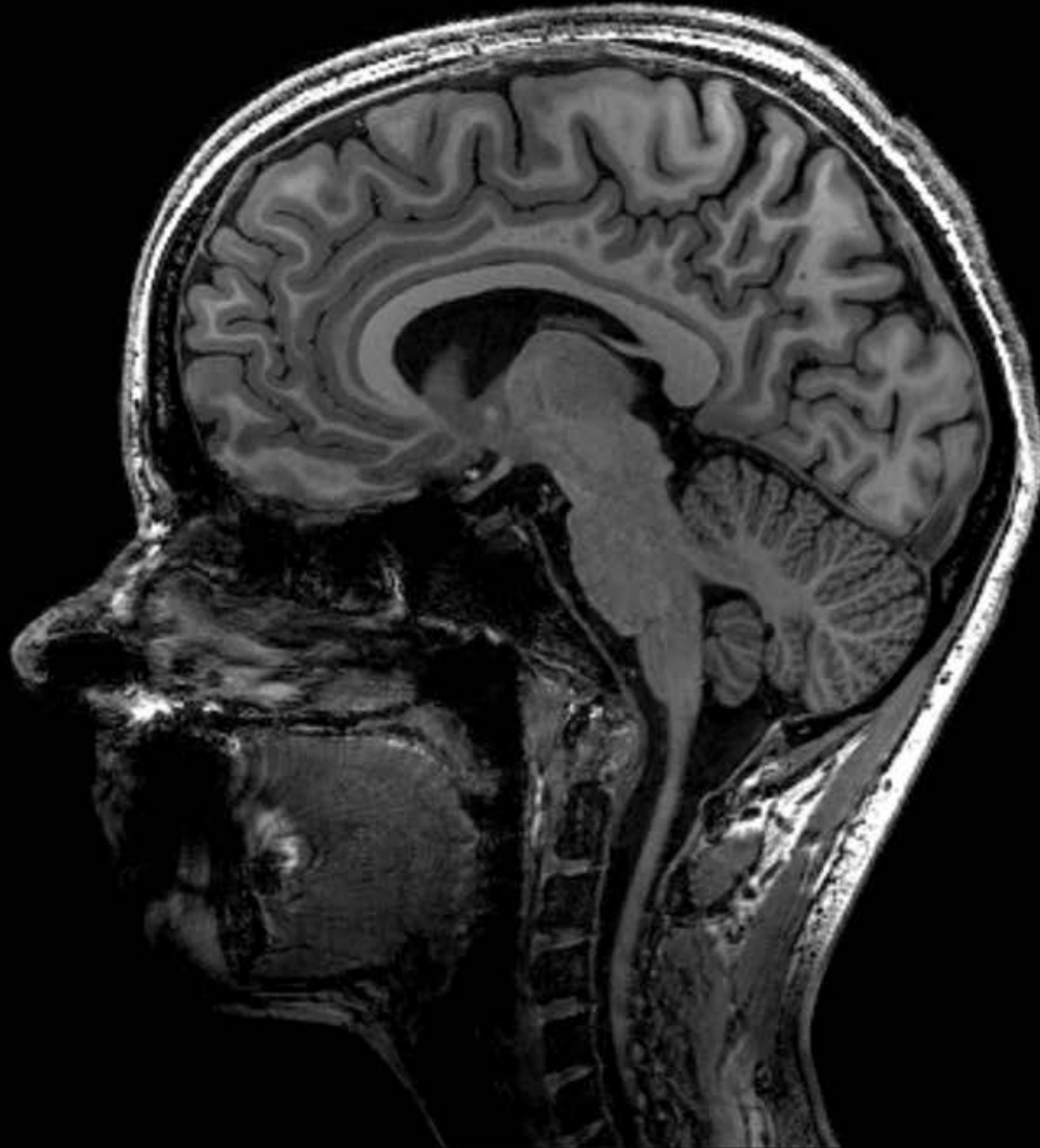
Forschung und klinische Routine vereinigt

Seit Ende 2020 bringt Siemens Healthineers jedes Jahr auf dem hauseigenen Event *Shape* einige der bedeutendsten Meinungsführer des weltweiten Gesundheitssektors zusammen und präsentiert die neuesten Innovationen. Auf der *Shape 23* Pressekonferenz im November 2022 präsentiert Arthur Kaindl, zu dieser Zeit Leiter der Magnetresonanztomographie bei Siemens Healthineers, die beiden neuesten High-End-Magnetresonanztomographen für Forschung und klinische Routine: das 3-Tesla-System MAGNETOM Cima.X⁶ und das



Die Gradienten des 2022 vorgestellten
MAGNETOM Cima.X sind 2,5-mal stärker als
die bis dahin leistungsfähigsten Gradienten
von Siemens Healthineers

Die in Entwicklung befindliche Ultra IQ-Technologie ist dafür vorgesehen, das volle Potenzial der 7T-MRT nutzbar zu machen



MAGNETOM Terra.X⁷ mit 7 Tesla Feldstärke. Bei der Vorstellung des MAGNETOM Cima.X steht vor allem die neue Gradienten-Technik im Mittelpunkt. Die Stärke der Gradienten ist in der Magnetresonanztomographie von großer Bedeutung, wenn sogenannte Mikrostrukturen deutlich sichtbar gemacht werden sollen. Eine hohe Gradientenstärke könnte beispielsweise eine wichtige Rolle zum Verständnis neurologischer Erkrankungen wie Multipler Sklerose spielen. Die Gradienten des MAGNETOM Cima.X werden 2,5-mal stärker als die bis dahin leistungsfähigsten Gradienten von Siemens Healthineers sein. Mikrostrukturen werden sich dadurch wesentlich detailreicher abbilden lassen als bisher.

Auch beim MAGNETOM Terra.X steht der Detailgrad der Untersuchungsbilder im Mittelpunkt der Präsentation. Die hohe Feldstärke des Systems wird besonders hochauflösende Bilder ermöglichen, auf denen sich selbst kleinste Veränderungen oder Verletzungen des Gewebes erkennen lassen. Bei bestimmten Erkrankungen wird die Abbildung solcher sogenannten Läsionen für die weitere Behandlung entscheidend sein können. Das MAGNETOM Terra.X wird mit neuer Hard- und Software – die Siemens Healthineers unter der Bezeichnung *Ultra IQ Technology* zusammenfasst

– eine Begleiterscheinung herkömmlicher Aufnahmen mit extrem hoher Feldstärke beseitigen: Bisher konnten Kopfaufnahmen bei 7 Tesla Feldstärke eine Art Schatten aufweisen, der beispielsweise den unteren Teil des Bildes leicht verdunkelt. Die Ultra IQ Technology ist entwickelt worden, um solche Schatteneffekte zu beseitigen. Gleichzeitig wird die Geschwindigkeit der Aufnahmen durch Deep Resolve deutlich erhöht werden können. „Durch die erstmalige Einführung KI-basierter Algorithmen für diese High-End-Scanner reduzieren wir die Scanzeit im MRT um bis zu 50 Prozent und verbessern gleichzeitig die Bildqualität“, sagt Arthur Kaindl bei der Vorstellung von MAGNETOM Cima.X und MAGNETOM Terra.X während der Shape 23 Keynote.

Solche Innovationen, sowohl auf der technischen als auch auf der klinischen Seite, wären nicht möglich ohne die Forschungspartner von Siemens Healthineers. Im Jahre 2022 arbeitet das Unternehmen bei der Weiterentwicklung der Magnetresonanztomographie mit rund 1.000 Partnern rund um den Globus zusammen, um neue Technologien in die klinische Routine einzuführen. Um diese Zusammenarbeit noch effizienter zu gestalten, führt Siemens Healthineers 2022 die softwarebasierte Plattform *Open Recon*⁸ ein.

Die Menschen hinter der Technik

Während der Prototyp des ersten MAGNETOM aus dem Jahr 1983 von einem kleinen Team in einer Holzhütte in Erlangen entwickelt wurde, entstehen Systeme wie das MAGNETOM Free.Max heute durch die Zusammenarbeit hunderter Menschen rund um den Globus. Die technologischen Fortschritte sind nicht zu trennen von den Menschen, die daran beteiligt sind: Ärzt*innen, Wissenschaftler*innen, Physiker*innen und Ingenieur*innen, Patient*innen, unzählige Kooperationspartner*innen und unzähliger Mitarbeiter*innen von Siemens Healthineers haben diese Entwicklungen möglich gemacht. Auch nach den riesigen Fortschritten der vergangenen Jahrzehnte steckt noch enormes Potenzial in der MRT – und dieses Buch über die Geschichte der Magnetresonanztomographie bei Siemens Healthineers wird sicherlich noch um viele faszinierende Kapitel ergänzt werden ...

Impressum

Herausgeber

Siemens Healthcare GmbH
Henkestr. 127
91052 Erlangen
Deutschland

Autor

Ingo Zenger

Redaktionelle Mitarbeit

Siemens Healthineers Magnetic Resonance

Wir bedanken uns für die freundliche Unterstützung besonders bei:

Arnulf Oppelt
Wilfried Loeffler
Peter Scheuering

© Siemens Healthcare GmbH, 2023

Alle Rechte vorbehalten.

Daten liegen vor. Ergebnisse können variieren.

¹ *syngo.via kann einzeln oder zusammen mit anderen syngo.via-basierten Software-Optionen betrieben werden, die eigenständige Medizinprodukte sind.*

² *Die Sicherheit von MR-Scans bei der Bildgebung von Föten und Säuglingen unter zwei Jahren ist nicht erwiesen. Der verantwortliche Arzt muss den Nutzen der MR-Untersuchung im Vergleich zu anderen bildgebenden Verfahren bewerten.*

³ *Der Forschungsmodus als Teil des Dual-Mode-Modus ist optional erhältlich und nicht für den klinischen Einsatz vorgesehen. Der Forschungsbetrieb kann die Beachtung nationaler Vorschriften erfordern.*

⁴ *Die hier gezeigten Informationen beziehen sich auf Produkte von Drittherstellern und unterliegen daher deren regulatorischer Verantwortung. Für weitere Informationen wenden Sie sich bitte an den Drittanbieter.*

⁵ *MAGNETOM Viato.Mobile befindet sich in der Entwicklungsphase und ist nicht im Handel erhältlich. Die zukünftige Verfügbarkeit kann nicht garantiert werden.*

⁶ *MAGNETOM Cima.X befindet sich noch in der Entwicklungsphase und ist deshalb noch nicht käuflich zu erwerben. Die zukünftige Verfügbarkeit kann nicht gewährleistet werden.*

⁷ *MAGNETOM Terra.X befindet sich noch in der Entwicklungsphase und ist deshalb noch nicht käuflich zu erwerben. Die zukünftige Verfügbarkeit kann nicht gewährleistet werden.*

⁸ *Open Recon ist dazu vorgesehen, dem System klinische Rekonstruktionen hinzuzufügen, sofern diese von Siemens Healthineers abgezeichnet und für den klinischen Gebrauch freigegeben wurden.*

Siemens Healthineers Headquarters

Siemens Healthcare GmbH
Henkestr. 127
91052 Erlangen, Germany
Phone: +49 9131 84-0
siemens-healthineers.com

**Siemens Healthineers
Historical Institute**

Gebbertstr. 1
91052 Erlangen, Germany
Phone: +49 9131 84-5442
medmuseum.siemens-healthineers.com