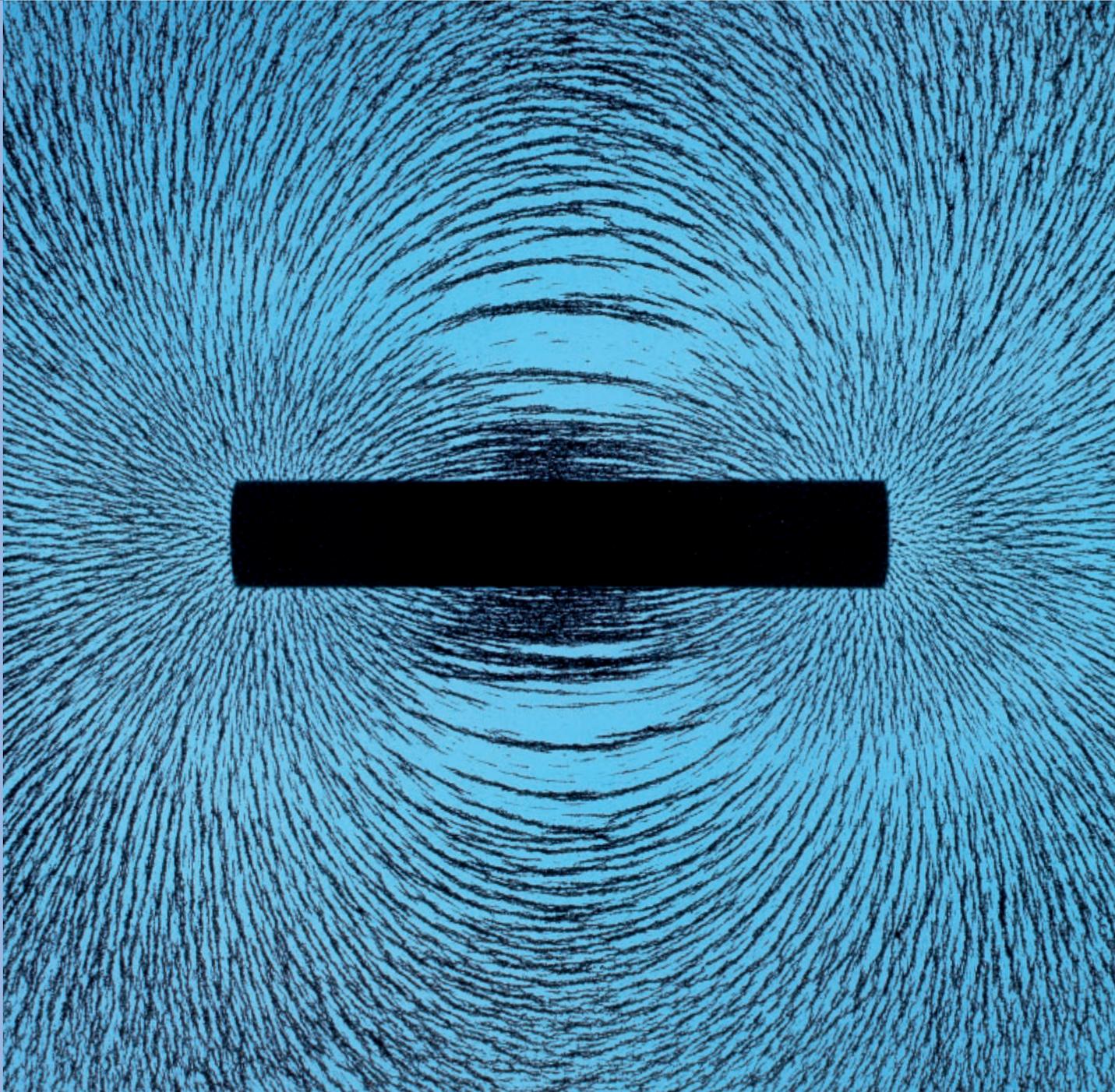


CHRONIK

Zur Geschichte des Magnetismus



Mit freundlicher Genehmigung nachgedruckt aus: „Der Radiologe“ 4 / 2005, Springer Verlag · Best.-Nr. A91MR-1000-3CZ

SIEMENS
medical

Vom Magneteisenstein zum Magnetresonanztomographen

Heinz-Peter Schlemmer

Abteilung Radiologische Diagnostik, Universitätsklinikum Tübingen

Seit Jahrtausenden waren die Erklärungsversuche magnetischer Erscheinungen nie frei von Spekulationen und Phantastereien. Dem Menschen war und ist die Eigenschaft bestimmter Steine, eine Kraftwirkung zu besitzen, mysteriöse und fremdartig (Abb.1). Bis in das 19. Jahrhundert war der Magnetismus verschwommen im Umfeld von Magie, Religion und Medizin beheimatet. Erwähnt sei z.B. der deutsche Arzt Franz Anton Mesmer (1734–1815), der die Existenz eines animalischen Magnetismus annahm, ein den Organismus belebendes Fluidum, das mit dem kosmischen Weltäther in Verbindung steht. Viele Verwirrungen rührten daher, dass die magnetische Kraftwirkung keine den Sinnen zugängliche Erscheinung darstellt und damit Spielfeld für allerlei Phantastereien bietet. Denn um das Phänomen des Magnetismus zu ergründen wurden Instrumente benötigt, mit der die Kraftwirkung indirekt wahrgenommen und untersucht werden konnte. Jedoch anders als zum Beispiel beim Teleskop, das unsere bereits existierende Fähigkeit Licht zu erkennen verstärkt, also einen quantitativen Zuwachs an Wahrnehmung ermöglicht, fördern die Instrumente zur Erfassung magnetischer Phänomene eine für uns primär nicht existente Naturerscheinung zu Tage und erweitern damit grundlegend unseren Erfahrungsbereich. Die Geschichte des Magnetismus ist daher auch die Geschichte des Siegeszuges der empirischen Naturwissenschaften, die Naturphänomene durch objektiv nachprüfbar Beobachtungen und nicht individuelle Spekulationen erfasst.

Was ist eigentlich Magnetismus?

Die Anwendungen der magnetischen Kraftwirkung ist aus unserer Welt nicht mehr wegzudenken: z.B. die elektromotorische Induktion für die Stromerzeugung bzw. den Antrieb von Elektromotoren oder die Verwendung elektromagnetischer Wellen für die Kommunikation. Ganz banal gäbe es also ohne Ausnutzung der magnetischen Induktion keine Elektrizitätswerke, und ohne Strom ginge sprichwörtlich das Licht in jeder radiologischen Abteilung

aus. Bei der Magnetresonanztomographie gehen Radiologen tagtäglich und ganz selbstverständlich mit sehr hohen Magnetfeldern von 1,5 Tesla um, d.h. etwa dem 30.000-fachen der Erdmagnetfeldstärke. Doch trotz des alltäglichen Umgangs mit dem Phänomen bleibt die Frage offen: was ist eigentlich Magnetismus? Nüchtern nach der Brockhaus-Enzyklopädie handelt es sich dabei um die Lehre vom magnetischen Feld und dem Verhalten von Materie in ihm. Für den Praktiker mag eine solche Angabe im medizinisch-pragmatischen Denken ausreichen, auch wenn hierbei nicht zwischen der Lehre und dem eigentlichen Gegenstand, dem Phänomen des Magnetismus, unterschieden wird. Die Geschichte vom Magnetismus ist aber auch die Geschichte von der wechselseitigen Bereicherung von Naturwissenschaft und Medizin und viele medizinische Fortschritte fußen auf einem tiefgründigen Verständnis der magnetischen Phänomene. Wo und was ist also die Quelle der magnetischen Kraft, und wie wird diese über den Raum hinweg vermittelt?

Wenn ein Nicht-Physiker versucht, das Phänomen des Magnetismus durch eingehendes Studium physikalischer Fachliteratur zu verstehen, so ist dies meistens ein eher frustrierendes Unterfangen. Das Wissen um die Naturphänomene ist in der wenig populären Sprache der Mathematik formuliert, und diese ist für die meisten trocken, unverständlich und auch ein wenig weltfremd. Für viele wäre es sicherlich wesentlich angenehmer, wenn sich die Zusammenhänge in Lied- oder Gedichtform erklären ließen, doch leider wissen wir spätestens seit Galileo Galilei, dass sich das Buch der Natur am besten in der mathematischen Sprache schreiben lässt. Verständlich ist daher auch der Versuch, sich im medizinischen Alltag auch in dieser physikalisch-mathematischen Begriffswelt zu bewegen. Doch viele Missverständnisse werden auch dadurch erzeugt und unterhalten, dass die physikalischen Begriffe und mathematischen Symbole unpräzise angewandt werden (und manchmal eher der Selbstdarstellung als der Naturbeschreibung zu dienen scheinen). So wird bei-



[1] *Magneteisenstein (Magnetit) aus Balmat, N.Y., USA Mineralogische Schau- und Lehrsammlung, Institut für Geowissenschaften, Universität Tübingen*

spielsweise der Kernmagnetismus hartnäckig – obwohl physikalisch in der Konsequenz frustrierend – durch auf Pfeilen aufgespießte und im Raum herum torkelnde Kügelchen erklärt. Schnell mutiert da der schleierhafte Kernspinn zum lebensnahen Kernspinn, oder die rätselhafte Kernspintomographie zur einfach nur teuren Kernspintomographie, oder der geheimnisumwitterte k-Raum wird zu einer Art Kofferraum, in dem Datenreihen klug zu verstauen sind. Die Verballhornung der Begriffe ist symptomatisch.

Es wäre es allerdings auch verkehrt, das eigene Missverständnis alleine nur durch die persönliche Ungebildetheit zu erklären. Der Blick auf die geschichtliche Entwicklung bei der Deutung magnetischer Phänomene zeigt ganz deutlich die Probleme und Irrungen im Umgang mit Magnetismus. Wie die physikalischen Phänomene verstanden werden, oder mehr noch, wie Physik überhaupt möglich ist, liegt ganz wesentlich an der Existenz von uns Menschen selbst, denn Wissenszuwachs beginnt mit bewusster Wahrnehmung. Wesentlich verständlicher und dabei zugleich spannender ist es daher, einen wissenschaftshistorischen Weg einzuschlagen und einen Blick auf den über 2000 Jahre langen Weg des Beobachtens und Nachdenkens zu werfen. Hierbei kann der Wissenszugewinn von Generationen von Menschen schrittweise verfolgt werden, und die Vergegenwärtigung der ganz menschlichen Probleme in der Vergangenheit hilft beim eigenen Verstehen des Naturphänomens.

Die Geschichte des Magnetismus wurzelt in zwei Kulturen, der chinesischen und der europäischen. Dafür finden sich Belege in der chinesischen Literatur bereits seit der zweiten

Hälfte des 1. Jahrtausends vor Christus. Im Jahr 83 wurde von Lung Heng eine Art magnetischer Löffel beschrieben, der frei beweglich auf einem Brett rotieren konnte und in magischen Ritualen benutzt wurde. Der immer nach Süden ausgerichtete Löffel war der Startpunkt für Instrumente, die den Menschen den Weg zeigen konnten. Schon im 11. Jahrhundert wurde in China eine schwimmende magnetische Nadel zur Navigation verwendet.

Nord- und Südpol

In der westlichen Kultur gibt es konkurrierende Auffassungen, was die Entdeckung und Namensgebung des Magnetismus angeht: nach einer Legende des griechischen Nikander von Kolophon (antike Stadt in Kleinasien) ca. 150 vor Christus lehnt sich das Wort Magnetismus an den griechischen Schafhirten Magnes an, der auf dem Berg Ida seltsame Steine gefunden hat, die seine Schuhnägel und seinen Hirtenstab anzogen. Nach Lucretius von Rom (96–53 v. C.) hingegen entspringt die Bezeichnung der griechischen Stadt Magnesia nahe der Westküste von Kleinasien, wo Magneteisenstein gefunden wurde (heute heißt die Stadt Manisa und liegt in Westanatolien). Der Magnetismus spielte bei den Griechen eine große Rolle in Magie und Medizin und große Philosophen – von Thales bis Aristoteles – versuchten Erklärungen für die Kraftwirkung zu finden. Doch weder die Griechen noch die Römer fanden Näheres über die Natur und Eigenschaften von Magneten heraus. Nüchterne Untersuchungen magnetischer Eigenschaften und die Entwicklung praktischer Anwendungen waren erst möglich, nachdem sich die Lehre vom Magne-



[2] *William Gilbert (1544–1603) markiert den Beginn der eigentlichen Wissenschaft vom Magnetismus.*



[3] *Hans Christian Oersted (1777–1851) deckte den Zusammenhang von Elektrizität und Magnetismus auf.*

tismus von Aberglauben und Magie lösten. Hierfür mussten aber mehr als tausend Jahre vergehen. Erst in der Renaissance mit Auflehnung gegen die Autorität des Aristoteles wurde der Weg in der westlichen Welt freigemacht für ein von traditionellem Denken losgelöstes Erkennen magnetischer Eigenschaften. Den Beginn markiert Pierre de Maricourt mit seinem 1269 erschienenen Werk „Epistola de Magnete“. Bemerkenswert am Werk des Pierre de Maricourt ist, dass er von der damals üblichen Arbeitsweise, der Auslegung bereits vorhandener Schriften, abwich und eigenständig Untersuchungen mit kugelig abgedrehten Magneteisensteinen und Eisennadeln durchführte. Er beobachtete die Ausrichtung dieser Nadeln in Richtung zweier Punkte dieser Kugeln, die er in Analogie zum Himmelsgewölbe Nord- und Südpol nannte. Entsprechend vermutete er auch die Anziehung der Magnetenadel von den Himmelspolen. Pierre de Maricourt beschrieb aber nicht nur zuerst die Eigenschaften von Magneten, er lieferte der westlichen Welt den Kompass für die Navigation. Aufgrund seiner Vorstellung reden wir allerdings auch heute noch davon, dass die Kompassnadel die „Himmels“-richtung anzeigt, obwohl wir heute doch eigentlich wissen sollten, dass nicht der Himmel sondern die Erde mit dem Erdmagnetfeld die Ausrichtung der Nadel hervorruft. Den Beginn der eigentlichen Wissenschaft vom Magnetismus markiert der englische Naturforscher und Arzt William Gilbert (1544–1603), der Präsident des Royal College of Physicians und Leibarzt der Queen Elisabeth I von England war (Abb. 2). Sein 1600 erschienenes Buch „De Magnete“ wurde lange als Vorbild der experimentellen Methode

betrachtet und von Kepler, Galilei und Descartes wertgeschätzt. Er ging ausführlich auf den Magnetismus der Erde ein und erklärte diesen durch ungleichmäßig verteilte Eisenlager. Die magnetische Kraft wurde universell akzeptiert und sogar Kepler vermutete, dass die Kraft der Sonne auf die Planeten magnetischen Ursprungs ist.

Magnetismus und Elektrizität

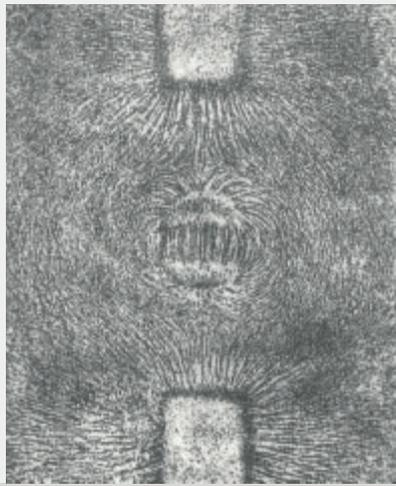
Der französische Naturwissenschaftler und Philosoph René Descartes (1596–1659) ist bekannt als Begründer der analytischen Geometrie. Als Philosoph des Materialismus suchte er auch nach mechanischen Begründungen für Naturphänomene. So erklärte er die Übertragung der magnetischen Kraft durch sinnlich zwar nicht wahrnehmbare, dafür aber doch stoffliche Teilchen zu erklären: Schraubenähnliche Teilchen sollten in einem Wirbel um die Erde erzeugt werden und durch Verdrängung der Luft zwischen Magneten und Eisen zu deren Anziehung führen. Die Existenz zweier Pole wurde durch die Annahme erklärt, dass es rechts- und linksdrehende Schrauben gab. Diese Vorstellungen mögen uns aus heutiger Sicht töricht vorkommen. Doch welchem schwierigen Problem hat sich Descartes gestellt, wenn er eine Erklärung dafür finden wollte, wie eine Kraft von einem Körper über den Raum hinweg auf einen anderen vermittelt werden kann.

Magnetismus und Elektrizität wurden lange Zeit als zwei getrennte Phänomene betrachtet, die zwar Analogien aufwiesen, aber ansonsten keinen gemeinsamen Zusammenhang aufwiesen. Bedeutsame Entwicklungen auf dem Weg zum Verständnis von Magnetismus wurden im 19'ten

1700



[4A] Michael Faraday (1791–1867) untersuchte mittels grundlegender experimenteller Beobachtungen die Gemeinsamkeit sowie die gegenseitige Umwandelbarkeit von Elektrizität und Magnetismus.



[4B] Von Faraday durch Eisenfeilspäne sichtbar gemachter Verlauf der magnetischen Kraftlinien zwischen Magnetpolen.



[4C] Faradays Instrumente zum Nachweis der Umwandlung von Magnetismus in Elektrizität

Jahrhundert gemacht, in der Zeit der romantischen Naturphilosophie, die nach einem einheitlichen Hintergrund aller Naturphänomene suchte. 1820 deckte der dänische Physiker Hans Christian Oersted (1777–1851) den Zusammenhang von Elektrizität und Magnetismus auf, indem er die Auslenkung einer Magnetnadel in der Nähe eines Drahtes beobachtete, durch den die Entladung einer galvanischen Kette ging (Abb. 3). Die Entdeckung stieß auf fruchtbaren Boden und verbreitete sich schnell. Schon wenige Monate später fand André Marie Ampère (1775–1836) die gegenseitige Kraftwirkung zweier Drähte, durch die eine Entladung ging. Ampère war auch derjenige Forscher, der entdeckte, dass in Drähten elektrische Ströme fließen, und er schuf auch die Begriffe „Strom“ und „Spannung“ in der Elektrizitätslehre. Die Zusammenführung seiner Beobachtungen und Ansichten machen ihn auch zum Begründer der Theorie, dass die magnetische Kraft Folge elektrischer Ströme in Leitern ist. Ampère stellte in der Folge auch die Theorie auf, dass Magnetismus von „Molekularströmen“ hervorgerufen wird. Nach seiner Vorstellung werden Moleküle von kreisförmigen elektrischen Strömen umgeben, eine frühe Vorstellung also des Bohr'schen Atommodells des 20. Jahrhunderts.

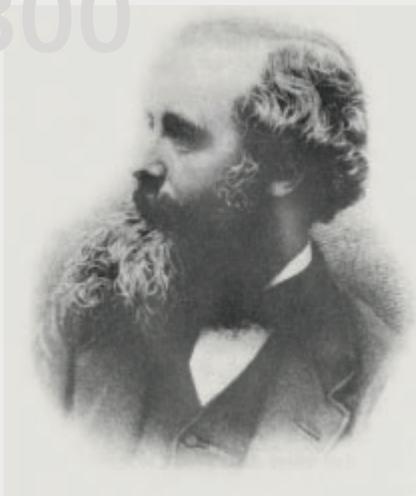
Einen entscheidenden Meilenstein markiert der Autodidakt und exzellente Experimentator Michael Faraday (1791–1867, Abb. 4). Von den Oersted'schen Experimenten über einen Zusammenhang von Magnetismus und Elektrizität angeregt stieg Michael Faraday aus eigener Kraft und von seiner Neugier angetrieben aus ärmlichen Verhältnissen vom Buchbinderlehrling bis zum Mitglied aller bedeuten-

den Wissenschaftlichen Akademien und Direktor der Royal Institution auf. Er untersuchte mittels experimenteller Beobachtungen die Gemeinsamkeit von Elektrizität und Magnetismus und galt in seiner Zeit als einer der größten Gelehrten; den Adelstitel lehnte er jedoch aus persönlichen religiösen Gründen ab. Von der Fülle von grundlegenden Experimenten kann hier nur ein kleiner Bruchteil erwähnt werden. So fand er, dass nicht nur Elektrizität Magnetismus, sondern umgekehrt auch Magnetismus Elektrizität hervorrufen kann. Die 1831 gemachte Entdeckung der elektromagnetischen Induktion brachte Faraday auch auf das Konzept der magnetischen Kraftlinien. Schon bald wurden auf Induktion beruhende Maschinen zur Stromerzeugung konstruiert. Auf der Basis seines Instinkts und seiner vielfältigen Experimente hatte Faraday entdeckt, was noch heute zur Elektrizitätserzeugung in unseren Kraftwerken angewandt wird.

Elektromagnetismus

Der Schotte James Clerk Maxwell (1831–1897) wurde in dem Jahr geboren als Faraday das Induktionsgesetz entdeckte (Abb. 5). Basierend auf den experimentellen Beobachtungen Faradays begründete er die einheitliche Theorie des Elektromagnetismus und postulierte, dass Licht eine elektromagnetische Erscheinung ist. Sein monumentales Werk „A Treatise of Electricity and Magnetism“ erklärte der wissenschaftlichen Gemeinschaft die Bedeutung und Tragweite des elektromagnetischen Feldes. In der Arbeit „Electromagnetic Theory of Light“ beschreibt er die Ausbreitung elektromagnetischer Wellen mit Lichtgeschwin-

1800



[5] James Clerk Maxwell (1831–1897) begründete die einheitliche Theorie des Elektromagnetismus.

1900



[6] Felix Bloch (l.) (1905–1983) und Edward Will Purcell (r.) (1912–1997) gelang 1945 unabhängig voneinander der erste experimentelle Nachweis der kernmagnetischen Resonanz in kondensierter Materie. Für diese Entdeckung erhielten sie gemeinsam im Jahr 1952 den Nobelpreis für Physik.

digkeit. Maxwell gilt als der bedeutendste theoretische Physiker des 19'ten Jahrhunderts. Seine Theorie brachte Albert Einstein auf umwälzende Einblicke in die Struktur der Raumzeit, was er mit den Sätzen würdigte: „Der faszinierendste Gegenstand zur Zeit meines Studiums war die Maxwell'sche Theorie. Was sie als revolutionär erscheinen ließ, war der Übergang von den Fernwirkungskräften zu Feldern als Fundamentalgrößen. Die Einordnung der Optik in die Theorie des Elektromagnetismus mit ihrer Beziehung der Lichtgeschwindigkeit zum elektrischen und magnetischen absoluten Maßsystem ... – es war wie eine Offenbarung. ...In diesem Zusammenhang kann ich die Bemerkung nicht unterdrücken, dass das Paar Faraday – Maxwell so merkwürdige innere Ähnlichkeit hat mit dem Paar Galileo – Newton, der erste jedes Paares die Zusammenhänge intuitiv erfassend, der zweite sie exakt formulierend und quantitativ anwendend.“ Heinrich Hertz (1857–1894) entdeckte 1886 in Karlsruhe die Existenz elektromagnetischer Wellen und bestätigte damit die Gültigkeit der Maxwell'schen Theorie. Ohne es zu wissen, schuf er damit auch die Grundlage für unsere weltumspannende und in den Weltraum hinausgreifende Telekommunikation.

Die Beschäftigung mit dem Phänomen des Magnetismus erfordert also die Beschäftigung mit dem Konzept von Kraftfeldern und diese ist im wesentlichen eine Geschichte des 19'ten Jahrhunderts, verwurzelt in der romantischen Naturphilosophie. Die Existenz von Kraftfeldern um einen Magneten konnte Faraday mit Eisenfeilspänen darstellen, die in die Nähe eines Magneten gebracht die Stärke und Richtung der Kraft anzeigen. Die eigenständige Existenz dieser Felder wurde durch die Entdeckung

elektromagnetischer Wellen bestätigt, die sich mit Lichtgeschwindigkeit über den Raum hinweg ausbreiten. Richard Feynman (1918–1988, Nobelpreis für Physik 1965) hat mit der Quantenelektrodynamik die moderne Theorie des Elektromagnetismus aufgestellt. Diese Theorie erklärt, wie die Kraftwirkung zwischen magnetischen Körpern über den Raum hinweg durch quantenhafte Absorption elektromagnetischer Wellen vermittelt wird. Diese faszinierende Theorie ist allerdings ein mathematisch schwieriges und unanschauliches Gedankengebäude. Die Unverständlichkeit ist einerseits verwunderlich, andererseits aber auch bemerkenswert. Ursache hierfür mag sein, dass wir immer wieder versuchen, Naturphänomene in unser vertrautes atomistisch-mechanisches Gedankengebäude einzusortieren und damit durch eine Art Planetenmodell von im Raum herumfliegenden Materiekügelchen erklären zu wollen. Einen Einblick in die Notwendigkeit des Umdenkens gibt sein bekannter Ausspruch, dass wer versucht die Quantenmechanik zu verstehen, hoffnungslos den Bach hinuntergeht. Doch diese Thematik ist auch heute noch uferlos und führt hier zu weit.

NMR – Nuclear Magnetic Resonance

Der holländische Physiker Pieter Zeemann (1865–1943) untersuchte 1897 den Einfluss von Magnetfeldern auf die Spektrallinien und fand dabei eine Aufspaltung dieser. Im gleichen Jahr erklärte der Holländer Hendric Antoon Lorentz (1853–1929) den Effekt und beide erhielten 1902 für diese Entdeckung den Nobelpreis für Physik (der ersten Nobelpreis wurde im Jahre 1900 an Wilhelm Conrad Röntgen



[7] Raymond Damadian als Proband für die ersten Versuche der MR-Tomographie im Jahr 1977.



[8] Paul Lauterbur (geb. 1929) und Sir Peter Mansfield (geb. 1933) erhielten gemeinsam im Jahr 2003 den Nobelpreis für Medizin für ihre grundlegenden Arbeiten zur Magnetresonanztomographie.

[9] MR-Tomographie der gesamten Wirbelsäule, die in einer Messzeit von etwa 5 Minuten aufgenommen wurde.



2000

(1845–1923) für die Entdeckung der X-Strahlen vergeben). Der österreichische Physiker Wolfgang Pauli (1900–1958, Nobelpreis für Physik 1945) erklärte in seiner Theorie die Aufspaltung von Spektrallinien in sehr starken Magnetfeldern. Er führte 1925 formal eine mathematische Größe ein, die später von George E. Uhlenbeck und Samuel A. Goudsmit physikalisch als Eigendrehimpuls, bzw. „Spin“ der Elektronen gedeutet wurde. Dass auch Protonen magnetische Eigenschaften besitzen fand der Amerikaner Otto Stern (1888–1969, Nobelpreis für Physik 1943). Durch Experimente mit Atomstrahlen und Magnetfeldern wies 1939 Isidor I. Rabi (Nobelpreis für Physik 1944) den Spin von Atomkernen nach. Die Entdeckung der so genannten „kernmagnetischen Resonanz“ in kondensierter Materie (z.B. einem Wassertropfen) geht auf Felix Bloch (1905–1983) und Edward Will Purcell (1912–1997) zurück, denen unabhängig voneinander der erste experimentelle Nachweis 1945 gelang (Abb. 6). Für die Entdeckung erhielten beide 1952 den Nobelpreis für Physik. Das Phänomen der kernmagnetischen Resonanz bzw. magnetischen Kernspinresonanz (nuclear magnetic resonance, NMR) beinhaltet die Absorption und Emission von Radiofrequenzwellen durch einen (para)magnetischen Atomkern in einem äußeren Magnetfeld. Der Nachweis dieser Resonanz konnte prinzipiell auf zwei Weisen erfolgen: (1) der Induktionsspule, die Energie einstrahlt, wird auch Energie entzogen (Purcell), oder (2) in einer zweiten, senkrecht zur Induktionsspule stehenden Spule wird Energie, bzw. ein Resonanzsignal, induziert (Bloch). Mit der Einführung der gepulsten Fourier-Spektroskopie durch den Schweizer Richard Robert Ernst (geb. 1933, Nobelpreis für Chemie

1991) und die technische Entwicklung von supra-leitenden Magneten wurde die hochaufgelöste NMR zu einem unentbehrlichen Analyseverfahren in der Physik, Chemie und Biochemie.

Magnetresonanztomographie

Die Grundlage für eine tomographische Bildgebung mittels Kernspinresonanz, die Kernspinresonanz- oder Magnetresonanz-Tomographie, wurde in den 1970'er Jahren gelegt. Raymond V. Damadian (geb. 1936) fand 1971, dass gesundes Gewebe und Tumorgewebe sich durch verschiedenartige Relaxationszeiten unterscheiden lassen könnten und schlug 1977 eine Untersuchung des gesamten Körpers mittels NMR vor (Abb. 7) Paul Lauterbur (geb. 1929) und Sir Peter Mansfield (geb. 1933) veröffentlichten 1973, bzw. 1977 zwei grundlegende Arbeiten zur Magnetresonanztomographie, die Zeugmatographie, bzw. das Echo-Planar Imaging, wofür beide gemeinsam im Jahr 2003 den Nobelpreis für Medizin erhielten (Abb. 8). Die Magnetresonanztomographie (MRT) ist angewandte Magnetresonanz-Spektroskopie, oder genauer Kernspinresonanz (im englischen Nuclear Magnetic Resonance, NMR) – Spektroskopie. Der Begriff Spektroskopie umfasst im weitesten Sinne alle Untersuchungen der Energiezustände von Materie sowie der induzierten Übergänge durch Absorption und Emission elektromagnetischer Wellen. Bei der MRT werden die Energiezustände von Protonen im Magnetfeld untersucht. Die Protonen sind dabei in Wasser- und Fettmolekülen eingeschlossen. Aufgrund der relativ geringen Energiedifferenzen der Energiezustände handelt es sich bei der MRT um eine Form der Radiofrequenz-Spek-

troskopie, die mit elektromagnetischen Wellen geringer Frequenz (in der Größenordnung MHz), bzw. langer Wellenlänge (in der Größenordnung 0,5 m) gearbeitet wird. Von Spulen werden zusätzlich zum Grundmagnetfeld magnetische Gradientenfelder geschaltet und elektromagnetische Wellen eingestrahlt, deren Energie von den Protonen absorbiert und anschließend wieder remittiert wird. Die vom Patienten ausgestrahlten elektromagnetischen Wellen induzieren wiederum in Spulen einen Strom, der digitalisiert, mit dem Computer analysiert (Fouriertransformation) und schließlich in ein für das Auge erkennbares Muster von Helligkeiten, eine Bild, übersetzt wird. In der Welt der vertrauten Bilder fühlen wir uns dann wieder wohl, fernab von physikalischen Problemen, identifizieren anatomische Strukturen und versuchen normale Gestalt, Normvariante und krankhafte Veränderung zu trennen (Abb. 9). Im Gegensatz zu einem Röntgenbild, das prinzipiell wie ein Schattenwurf bei Beleuchtung eines Gegenstandes mit sichtbarem Licht entsteht, ist die Bildinformation bei der MR-Tomographie jedoch in der Strahlungsfrequenz und -intensität verschlüsselt. Der darzustellende Körper ist demnach eine Art Radiowellen-sender, der auf einem bestimmten Frequenzband sendet und die Bildinformation kann durch einen entsprechenden Radiowellenempfänger visualisiert werden. Die Physik lässt sich demnach nicht ganz vertreiben und ein wenig Unbehagen im Umgang mit der MRT muss bleiben.

Schlußwort

Nach über 2000 Jahren des Beobachtens, Experimentierens und Nachdenkens hat die westliche Zivilisation ein detailliertes Wissen über die magnetischen Phänomene hervorgebracht, deren Nutzung wesentlich zu unserem Wohlstand beiträgt. Als Quelle der Kraft haben sich bewegte elektrische Ladungen und der Eigendrehimpuls von Elementarteilchen herausgestellt. Die Vermittlung der Kraft über den Raum konnte mit Hilfe des Kraftfeld-Konzeptes verstanden werden. In der Folge wurde gefunden, dass diese Kraftfelder sogar eine eigenständige Existenz besitzen, und dass oszillierende magnetische und elektrische Kraftfelder sich als elektromagnetische Wellen mit Lichtgeschwindigkeit über den Raum ausbreiten. Nur deren Oszillationsfrequenz unterscheidet dabei z.B. sichtbares Licht von Röntgenstrahlung oder Radiowellen. Eine tiefgründige physikalische Beschreibung von Magnetismus und Elektrizität ist im 20. ten Jahrhundert durch die Quantenelektrodynamik gelungen. Diese faszinieren-

den Einsichten führen aber in eine andere und wundersame Welt, in der wir unser vertrautes atomistisch-mechanisches Gedankengebäude verlassen müssen und sich herkömmliche Vorstellungen von Materie, Raum, Zeit und Kausalität auflösen. Vielleicht werden ja von der Beschäftigung mit dem Magnetismus noch ganz andere Impulse für den medizinischen Fortschritt ausgehen.



*Priv.-Doz. Dr. med. Dipl.-Phys.
Heinz-Peter Schlemmer
Universitätsklinikum Tübingen,
Radiologische Klinik, Abteilung
Radiologische Diagnostik,
Hoppe-Seyler-Str. 3, 72076 Tübingen,
e-mail: heinz-peter.schlemmer
@med.uni-tuebingen.de*

Weiterführende Literatur

- [>] Hund F (1978) Geschichte der physikalischen Begriffe. Teil 1: Die Entstehung des mechanischen Naturbildes. Teil 2: Die Wege zum heutigen Naturbild. B.I. Bibliographisches Institut – Wissenschaftsverlag Mannheim/Wien/Zürich
- [>] Lemmerich J (1991) Michael Faraday 1791–1867: Erforscher der Elektrizität. Verlag C.H. Beck München
- [>] Long GJ and Grandjean F (1991) Supermagnets, Hard Magnetic Materials. Kluwer Academic Publishers
- [>] Mourino MR (1991) From Thales to Lauterbur, or from the lodestone to MR imaging: magnetism and medicine. Radiology 180: 593–612
- [>] Peruzzi G. (2000) Maxwell: Der Begründer der Elektrodynamik. Spektrum der Wissenschaft. Biographie 2/2000. Spektrum der Wissenschaft Verlagsgesellschaft mbH Heidelberg
- [>] Radvanyi P (2003) Die Curies: Eine Dynastie von Nobelpreisträgern. Spektrum der Wissenschaft Biographie 2/2003 Spektrum der Wissenschaft Verlagsgesellschaft mbH Heidelberg
- [>] Saini S, Frankel RB, Stark DD, Ferrucci JT Jr (1988) Magnetism: a primer and review. American Journal of Roentgenology AJR 150: 735–743
- [>] Schreiner W (Hrsg.) (1991). Geschichte der Physik: Ein Abriss. Deutscher Verlag der Wissenschaften Berlin
- [>] Shapin S (1998) Die wissenschaftliche Revolution. Fischer Taschenbuch Verlag Frankfurt
- [>] Simonyi K (1995) Kulturgeschichte der Physik: Von den Anfängen bis 1990. Verlag Harri Deutsch Thun, Frankfurt
- [>] Wiederkehr KH (1988) Zur Deutung magnetischer Phänomene im 19. Jahrhundert. Physikalische Blätter 44(5): 129–134

Bildnachweis

- [1] Mineralogische Schau- und Lehrsammlung, Institut für Geowissenschaften, Universität Tübingen. [2] Spektrum der Wissenschaft Verlagsgesellschaft, Heidelberg, 1999, S. 16. [3] Phys. Bl. 44, 1988, S. 130. H. Wußing. [4A] Verlag C.H. Beck, München, 1991, Archivaufnahme. [4B] Deutsches Museum. [4C] Science Museum London. [5] Bildarchiv Preußischer Kulturbesitz Berlin. [6] Nobel Foundation. [7] C.L. Partain, A.E. James, F.D. Rollo, R.R. Price. Nuclear Magnetic Resonance (NMR) Imaging. W.B. Saunders Company 1983, Seite 37, Figure 3–10. [8] Nobel Foundation. [9] Universitätsklinikum Tübingen, Abt. Diagnostische Radiologie