

Gesundheitsrisiken für medizinisches Personal durch Magnetfelder in der Magnetresonanztomographie

Health risks for medical personnel due to magnetic fields in magnetic resonance imaging

Autorinnen/Autoren

Alexander Marc König , Antje Pöschke, Andreas H. Mahnken

Institute

Diagnostic and Interventional Radiology, Philipps University of Marburg, Marburg, Germany

Schlüsselwörter

MR-imaging, physics, safety

Keywords

MR-imaging, physics, safety

eingereicht 18.1.2024

akzeptiert nach Revision 19.3.2024

Artikel online veröffentlicht 19.7.2024

Bibliografie

Rofo 2025; 197: 135–144

DOI 10.1055/a-2296-3860

ISSN 1438-9029

© 2024, Thieme. All rights reserved.


Georg Thieme Verlag KG, Oswald-Hesse-Straße 50, 70469 Stuttgart, Germany

Korrespondenzadresse

Alexander Marc König

Diagnostic and Interventional Radiology, Philipps University of Marburg, Baldingerstrasse, 35043 Marburg, Germany

AKoenig@med.uni-marburg.de

 Zusätzliches Material finden Sie unter <https://doi.org/10.1055/a-2296-3860>.

 English version at: <https://doi.org/10.1055/a-2296-3860>.

ZUSAMMENFASSUNG

Hintergrund Es wird der aktuelle medizinisch-wissenschaftliche Stand zu Wirkungen der Exposition gegenüber elektromagnetischen Feldern auf die Beschäftigten im Bereich der klinischen Magnetresonanztomografie (MRT) zusammengefasst.

Methode In einer systematischen Literaturrecherche wurden die Gesundheitsrisiken für das medizinische Personal durch Magnetfelder in der MRT analysiert. Es wurden insgesamt 7273 Zitate identifiziert, von denen nach Titel- und Abstract-

Screening 7139 Zitierungen ausgeschlossen werden konnten. Nach Volltext-Screening verblieben 34 Quellen, die Eingang in diese Arbeit gefunden haben.

Schlussfolgerung Es gibt eine Reihe von wissenschaftlichen Veröffentlichungen zum Auftreten von kurzzeitigen sensorischen Effekten wie Vertigo, metallischem Geschmack, Phosphenen sowie zum Auftreten von neurokognitiven sowie neurologischen Verhaltenseffekten. Durch kurzzeitige Exposition gegenüber klinischen Magnetfeldern wurden beispielsweise eine 4%-ige Reduktion der Geschwindigkeit und der Präzision sowie eine 16%-ige Reduktion der visuellen Kontrastempfindlichkeit im Nahbereich berichtet. Es werden sowohl Aug-Hand-Präzision als auch Koordinationsgeschwindigkeit beeinflusst. Die Langzeitstudien betreffen u. a. den Einfluss von Magnetfeldern auf die Schlafqualität, welche in Zusammenhang mit einem erhöhten Unfallrisiko stehen könnten. Die Daten zur Exposition von Mitarbeiterinnen im Gesundheitswesen gegenüber magnetischen Feldern während der Schwangerschaft sind durchgehend veraltet. Es wird jedoch geschlussfolgert, dass es zu keinen besonderen Abweichungen bezüglich der Schwangerschaftsdauer, der Frühgeburten, der Fehlgeburten und des Geburtsgewichtes kommt. Epidemiologische Arbeiten fehlen. Mit Fokus auf das Personal im Gesundheitswesen besteht ein erheblicher Bedarf an qualitativ hochwertigen Daten v. a. zu Folgen einer Langzeitexposition gegenüber elektromagnetischen Feldern durch die klinische MRT sowie zu deren Effekten auf eine Schwangerschaft.

Kernaussagen

- Es können bei Exposition von Magnetfeldern kurzzeitige sensorische Effekte wie Vertigo, metallischer Geschmack, Phosphenen sowie neurokognitive und neurologische Verhaltenseffekte auftreten.
- Langzeiteffekte betreffen vor allem die Schlafqualität, welche in Zusammenhang mit einem erhöhten Unfallrisiko gebracht werden kann.
- Bei Magnetfeldexposition auf schwangere Mitarbeiterinnen konnten keine besonderen Abweichungen bezüglich der Schwangerschaftsdauer, der Frühgeburten, der Fehlgeburten und des Geburtsgewichtes gefunden werden.

Zitierweise

- König AM, Pöschke A, Mahnken AH. Health risks for medical personnel due to magnetic fields in magnetic resonance imaging. *Rofo* 2025; 197: 135–144

ABSTRACT

Background The current state of medical and scientific knowledge on the effects of exposure to electromagnetic fields on workers in the field of clinical magnetic resonance imaging (MRI) is summarized here.

Method A systematic literature search was conducted to analyze the health risks to medical personnel from magnetic fields in MRI. A total of 7273 sources were identified, with 7139 being excluded after screening of the title and abstract. After full-text screening, 34 sources remained and were included in this paper.

Conclusion There are a number of scientific publications on the occurrence of short-term sensory effects such as vertigo, metallic taste, phosphenes as well as on the occurrence of neurocognitive and neurobehavioral effects. For example, short-term exposure to clinical magnetic fields has been reported to result in a 4% reduction in speed and precision and a 16% reduction in visual contrast sensitivity at close range. Both eye-hand precision and coordination speed are affected.

The long-term studies concern, among other things, the influence of magnetic fields on sleep quality, which could be linked to an increased risk of accidents. The data on the exposure of healthcare workers to magnetic fields during pregnancy is consistently outdated. However, it has been concluded that there are no particular deviations with regard to the duration of pregnancy, premature births, miscarriages, and birth weight. Epidemiological studies are lacking. With a focus on healthcare personnel, there is a considerable need for high-quality data, particularly on the consequences of long-term exposure to electromagnetic fields from clinical MRI and the effects on pregnancy.

Key Points

- Short-term sensory effects such as vertigo, metallic taste, phosphenes as well as neurocognitive and neurological behavioral effects may occur upon exposure to magnetic fields.
- Long-term effects mainly concern quality of sleep, which can be associated with an increased risk of accidents.
- When pregnant women were exposed to magnetic fields, no particular deviations were found with regard to the duration of pregnancy, premature births, miscarriages, and birth weight.

Einleitung

Die Magnetresonanztomografie (MRT) hat als eines der wichtigsten medizinischen bildgebenden Verfahren in den letzten Jahrzehnten immer mehr an Bedeutung gewonnen [1, 2, 3]. In Deutschland wurden im Jahr 2019 je 1000 Einwohner 145 MRT-Untersuchungen registriert [4]. International sind derzeit schätzungsweise 50 000 Magnetresonanztomografen im Einsatz [5]. Modense et al. schätzen eine Gesamtzahl von ca. 2 000 000 Mitarbeitern weltweit, die hohen statischen Magnetfeldern im Bereich der medizinischen MRT ausgesetzt sind [6]. Hierzu zählen nicht nur Radiolog*innen und Radiologieassistent*innen, sondern auch Anästhesist*innen, Pflegepersonal, technisches Personal und Reinigungskräfte [2]. Hinzu kommen Mitarbeiter*innen, die in Forschungseinrichtungen an MRT-Systemen arbeiten und Beschäftigte, die an der Montage und Wartung von MRT-Geräten beteiligt sind. Die am stärksten exponierte Gruppe sind Radiologieassistent*innen [7]. Auswirkungen auf das Personal, vor allem im Hinblick auf Langzeitwirkungen, sind jedoch teilweise nur gering erforscht. Um einen Überblick über diese Wirkungen zu geben und Forschungslücken aufzudecken, wurde eine systematische Literaturrecherche durchgeführt.

Um störende, aber auch gesundheitsschädliche Wirkungen auf den menschlichen Organismus zu vermeiden, wurde die Richtlinie 2013/35/EU (RL 2013/35/EU) erlassen, in der die Mindestvorschriften zum Schutz von Sicherheit und Gesundheit der Arbeitnehmer vor der Gefährdung durch physikalische Einwirkungen (elektromagnetische Felder) festgelegt sind. Langzeitwirkungen der Exposition gegenüber diesen Feldern wurden in dieser Richtli-

nie nicht berücksichtigt, da zum Zeitpunkt des Inkrafttretens diesbezüglich keine gesicherten wissenschaftlichen Erkenntnisse vorlagen. Durch das „Gesetz zum Schutz vor nichtionisierender Strahlung bei der Anwendung am Menschen (NISG)“ soll der Schutz und die Vorsorge vor schädlichen Wirkungen beim Betrieb von Systemen, die nichtionisierende Strahlung in der Heil- und Zahnheilkunde sowie zu gewerblichen Zwecken verwenden, gewährleistet und geregelt werden [8]. Dieses Gesetz findet unter anderem Anwendung für Anlagen welche elektrische, magnetische und elektromagnetische Strahlung in den Frequenzbereichen von 0 Hertz bis 300 Gigahertz zu medizinischen und gewerblichen Zwecken verwenden und regelt beispielsweise die Anforderungen der Anwender wie Notwendigkeit einer Approbation oder ein Fachkundenachweis. Nahezu alle nationalen und internationalen Bestimmungen zum Schutz vor elektrischen, magnetischen und elektromagnetischen Feldern gehen auf Empfehlungen der ICNIRP (*International Commission on Non-Ionizing Radiation Protection*) zurück [9].

Eine der Grundlagen der RL 2013/35/EU stellt unter anderem der Forschungsbericht 400-D (FB 400-D) aus dem Jahr 2011 des Bundesministeriums für Arbeit- und Soziales (BMAS) dar [10]. Dieser gibt Grenzwerte und Auslöseschwellen für die Exposition gegenüber elektrischen, magnetischen und elektromagnetischen Feldern an. Die im FB 400-D gesetzten Grenzwerte und Auslöseschwellen basieren in der Hauptsache auf dem Ziel, den menschlichen Körper vor unerwünschten Wirkungen durch elektromagnetische Felder zu schützen (Nervenstimulation, Gewebeerwärmung usw.). Diese Werte beziehen sich im Wesentlichen auf kurzfristige

Interaktionen mit unterschiedlichen Arten elektromagnetischer Felder.

Die vorliegende Arbeit gibt einen Überblick über den gegenwärtigen Stand der Forschung zu Auswirkungen der Exposition des menschlichen Körpers gegenüber hohen statischen und niederfrequenten Magnetfeldern sowie hochfrequenten elektromagnetischen Feldern. Im Fokus der Betrachtung steht die Exposition für Personal im Bereich der klinischen MRT-Bildgebung. Hier liegt die magnetische Feldstärke (magnetische Flussdichte) heutzutage üblicherweise bei 1,5 T bis 3 T. Im Forschungsbereich werden in Deutschland mittlerweile zehn Ultrahochfeld-Human-MRT im Bereich von 7 T bis 9,4 T betrieben, wobei 2017 ein erstes 7 T-MRT-Gerät die klinische Zulassung erhalten hat und in der Krankenversorgung eingesetzt wird [11, 12, 13]. Im Bereich der Forschung liegen die magnetischen Flussdichten der MRT-Geräte (Experimental- und Kleintier-MRT) bei derzeit bis zu 17,6 T [12]. Für die Magnetresonanztomographie (MRS) werden magnetische Flussdichten bis zu 28 T angegeben [10, 14].

In dieser Zusammenfassung wird der aktuelle medizinisch-wissenschaftliche Stand zu Wirkungen der Exposition gegenüber elektromagnetischen Feldern unter Berücksichtigung einer Langzeitexposition zusammengefasst. Hierbei liegt der Fokus auf den Beschäftigten im Bereich der klinischen Magnetresonanztomografie.

Methode der Recherche

In ▶ **Tab. 1** sind die Ein- und Ausschlusskriterien für die Literaturrecherche zusammengefasst.

Da sich die Fragestellungen explizit auf Auswirkungen elektromagnetischer Felder auf den Menschen bzw. das medizinische Personal beziehen, wurde eine Einschränkung der Suche auf humane Studien bzw. kombinierte Studien (human/tierexperimentell) innerhalb der Zielgruppe durchgeführt. Die Artikel, die aufgrund dieser Einschränkung nicht in die Recherche aufgenommen wurden, wurden gesondert auf Relevanz geprüft. Wenn sich dort Erkenntnisse ergaben, die für diese Untersuchung von Bedeutung waren, werden diese im Abschnitt Diskussion kommentiert.

In ▶ **Tab. 2** sind die durchsuchten Datenbanken aufgeführt. In den Datenbanken wurde mittels Expertensuche (erweiterter Suche, Advanced Search) gesucht. Weiterhin wurden Boolesche Operatoren, eine Trunkierung, sowie Phrasen für die Suche verwendet.

Das allgemeine Pico-Schema wurde modifiziert, um eine passende Suchmatrix für die zugrunde liegenden Fragestellungen zu erhalten (▶ **Tab. 3**).

Für die Recherche wurde eine Sammlung aus thematisch passenden Stichwörtern und Schlagwörtern angefertigt. Synonyme und Abkürzungen wurden berücksichtigt.

▶ **Tab. 1** Ein- und Ausschlusskriterien der systematischen Literaturrecherche.

	Einschlusskriterien	Ausschlusskriterien
Sprache	Englisch, Deutsch	andere Sprachen
Zielgruppe	Humane Studien (Beschäftigte) oder (kombinierte Studien human/tierexperimentell)	rein tierexperimentelle Studien
Verfügbarkeit	Volltext ist verfügbar	Zugriff nur auf Titel oder Abstract

▶ **Tab. 2** Ausgewählte Datenbanken.

Datenbank	URL	Datenbanktyp
Pubmed	https://pubmed.ncbi.nlm.nih.gov/	Medizinische Datenbank mit Artikeln aus dem gesamten Bereich der Biomedizin (Zugang zu MEDLINE)
Cochrane Library	https://www.cochranelibrary.com/	Online-Bibliothek, umfasst drei wissenschaftliche Datenbanken (Systematic Reviews, Central Register of Controlled Trials und Cochrane Clinical Answers)
ClinicalTrials	https://www.ClinicalTrials.gov/	Datenbank klinischer Studien der U.S. National Library of Medicine

▶ **Tab. 3** Modifiziertes PICO-Schema für diese Studie.

P	Population	Welche Population wird betrachtet?	Angestellte (insbes. Mitarbeiter im Gesundheitsbereich)
I	Intervention: hier Exposition	Welche Exposition wird beschrieben?	Elektromagnetische Felder, MRT
O	Outcome, hier: Effekte	Zu beobachtende Effekte nach Exposition mit elektromagnetischen Feldern	Wirkungen (auch Langzeitfolgen), Beeinträchtigungen

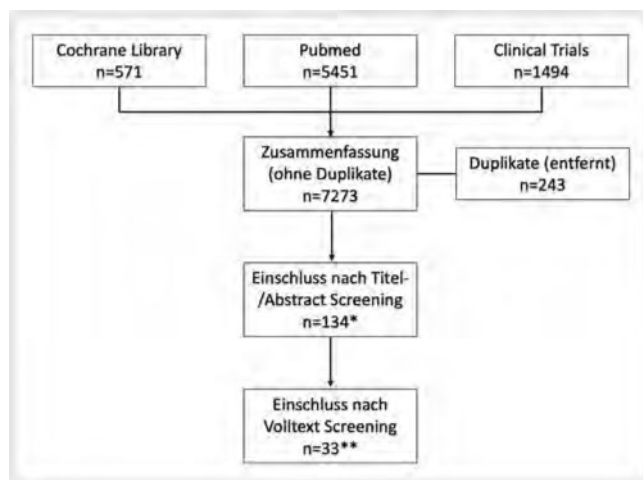
► **Tab. 4** Zusammenstellung der Suchbegriffe (Pubmed).

	Nr.	Query	Treffer
P	#1	"Occupational Medicine"[MeSH] OR "Occupation*" [Title/Abstract] OR "Occupational Diseases"[Mesh:NoExp] OR "Occupational Exposure"[MeSH] OR "Staff*" [Title/Abstract] OR "personnel*" [Title/Abstract] OR "Radiologists"[MeSH] OR "Medical Laboratory Personnel"[MeSH] OR "physicians"[Mesh:NoExp] OR "nurses"[MeSH] OR "medical staff"[MeSH] OR "nursing staff"[MeSH] OR "personnel, Hospital"[Mesh:NoExp] OR "Health personnel"[Mesh:NoExp] OR "Occupational Health"[MeSH] OR "Health occupations"[Mesh:NoExp] OR "employment*" [Title/Abstract] OR "workplace*" [Title/Abstract] OR "workstation*" [Title/Abstract]	872 419
I	#2	"Magnetic Resonance Imaging"[Mesh:NoExp] OR "fMRI"[Title/Abstract] OR "Magnetic Resonance*" [Title/Abstract] OR "MR Tomograph*" [Title/Abstract] OR "NMR Imaging*" [Title/Abstract] OR "NMR Tomograph*" [Title/Abstract] OR "MRI"[Title/Abstract] OR "Magnetic Fields"[MeSH] OR "Magnetic Field*" [Title/Abstract] OR "Electromagnetic Field*" [Title/Abstract] OR "Electromagnetic Radiation"[MeSH] OR "Electromagnetic Radiation*" [Title/Abstract] OR "magnetic resonance" [Title/Abstract]	1 079 485
O	#3	"Cognition Disorders"[MeSH] OR "Cognition*" [Title/Abstract] OR "Cognition"[MeSH] OR "Cognitive*" [Title/Abstract] OR "Sensation Disorders"[MeSH] OR "sensitiv*" [Title/Abstract] OR "senses*" [Title/Abstract] OR "Sensation*" [Title/Abstract] OR "Sensor*" [Title/Abstract] OR "hearing*" [Title/Abstract] OR "Tinnitus"[Title/Abstract] OR "smell*" [Title/Abstract] OR "taste*" [Title/Abstract] OR "metallic*" [Title/Abstract] OR "Phosphenes"[MeSH] OR "phosphene*" [Title/Abstract] OR "light phenom*" [Title/Abstract] OR "eye-hand*" [Title/Abstract] OR "Dysgeusia"[Title/Abstract] OR "vision*" [Title/Abstract] OR "visual*" [Title/Abstract] OR "Dizzi*" [Title/Abstract] OR "Dizzy*" [Title/Abstract] OR "Vertigo"[MeSH] OR "Vertigo*" [Title/Abstract] OR "spinning*" [Title/Abstract] OR "Nausea"[MeSH] OR "Nausea*" [Title/Abstract] OR "Neurocognitive Disorders"[MeSH] OR "Neurocognitiv*" [Title/Abstract] OR "Sleep Disorders, Circadian Rhythm"[MeSH] OR "Sleep*" [Title/Abstract] OR "nerve stimulation*" [Title/Abstract] OR "tactil*" [Title/Abstract] OR "tissue heating*" [Title/Abstract] OR "neuropsychological Tests"[MeSH] OR "neuropsychological Tests" [Title/Abstract] OR "Embryonic Development"[MeSH] OR "embryonic development*" [Title/Abstract] OR "Congenital Abnormalities"[MeSH] OR "malformation*" [Title/Abstract] OR "Pregnancy"[MeSH] OR "pregnan*" [Title/Abstract] OR "Fertility"[MeSH] OR "Fertil*" [Title/Abstract] OR "fetal development*" [Title/Abstract] OR "fetal development" [MeSH] OR "teratogen*" [Title/Abstract] OR "Neoplasms"[MeSH] OR "Neoplasm*" [Title/Abstract] OR "cancer*" [Title/Abstract] OR "carcinog*" [Title/Abstract] OR "Blood Circulation"[MeSH] OR "Blood Circulation*" [Title/Abstract] OR "blood flow*" [Title/Abstract] OR "adverse effects"[sh] OR "adverse effect*" [Title/Abstract] OR "Time Factors"[MeSH] OR "limit value*" [Title/Abstract] OR "specific absorption rate*" [Title/Abstract]	11 083 102

Alle Suchbegriffe wurden entweder als MeSH-Term (z. B. „Cognition Disorders“ [MeSH]) oder als Begriff bzw. Phrase in Title/Abstract gesucht (z. B. „Cognition*" [Title/Abstract]). Manche MeSH-Terms wurden mit der Einschränkung „No Exp“ für „no exploded“ gesucht (z. B. „Health personnel“ [Mesh:NoExp]), in diesem Fall wird nur der MeSH-Term selbst und nicht seine Unterbegriffe gesucht.

Die einzelnen Suchblöcke aus ► **Tab. 4** wurden anschließend mit dem Booleschen Operator **AND** verknüpft. Für die Pubmed-Suche ergab sich nach der Verknüpfung der drei Suchblöcke eine Trefferanzahl von 6428. Nach Eingrenzung von Sprache (1) und Zielgruppe (2) verblieben für die weitere Betrachtung 5372 Treffer.

Es ergab sich eine Trefferanzahl von 571 für die Cochrane Library und 1494 für ClinicalTrials.gov. Eine Kombination aller drei Datenbanken unter Ausschluss der Duplikate ergab eine Trefferanzahl von insgesamt 7273 Treffern. Diese wurden im Anschluss einem Screening nach Titel und Abstract unterzogen und auf Relevanz hinsichtlich der aufgeworfenen Fragestellungen geprüft. Nach Titel/Abstract-Screening wurden 134 Studien für ein Volltext-Screening ausgewählt (► **Abb. 1**). Im weiteren Verlauf der Suche wurden zitierte Studien und Internetquellen mit aufgenommen.



► **Abb. 1** Flussdiagramm zur Literaturrecherche (* = Anhang 1; ** = Anhang 2).

► **Tab. 5** Frequenz der maximalen Empfindlichkeit für bestimmte physiologische Wirkungen im Niederfrequenzbereich (modifiziert nach FB 400-D).

Frequenz der max. Empfindlichkeit	Physiologische Wirkung	Wechselwirkungsort
<< 1 Hz	Auftreten metallischer Geschmacksempfindungen	Geschmacksrezeptoren der Zunge (Veränderungen von Ionengradienten)
< 0,1–2 Hz	<ul style="list-style-type: none"> ▪ Schwindel, Übelkeit ▪ durch den Blutfluss induzierte elektrische Felder im Gewebe 	Innenohr (Vestibularapparat) Reizung von Nerven und Muskeln (Störung der autonomen Herzaktion)
~ 20 Hz	Magnetophosphene	Retina
~ 50 Hz	<ul style="list-style-type: none"> ▪ Taktile und schmerzhaft empfindungen ▪ Verlust der Muskelkontrolle ▪ Störung der autonomen Herzaktion 	Periphere Nerven Periphere Nerven, Muskeln Herz

Ergebnisse und Diskussion

Wirkungen statischer, niederfrequenter und bewegungsinduzierter Magnetfelder

Starke statische Magnetfelder sind fähig, den menschlichen Körper nahezu ungehindert zu durchdringen. Dementsprechend können elektrodynamische Interaktionen Einfluss auf geladene, sich bewegende Teilchen im Körper nehmen [15, 16]. Auch im Blutstrom befinden sich geladene Teilchen, welche durch diese Interaktionen magnetohydrodynamisch beeinflusst werden können [15]. Kinouchi et al. lieferten hierzu im Jahr 1996 mithilfe der Finite-Element-Analyse einen theoretischen Ansatz [15]. In dieser Studie wurde errechnet, dass bei Flussdichten von 10 und 15 T eine ungefähre Verringerung des Blutvolumenstroms von 5 % bzw. 10 % zu erwarten sind [15]. Ebenso weisen die Ergebnisse darauf hin, dass durch den Blutfluss induzierte Spannungen in der Aorta bis ins Herz vordringen und die autonome Herzfunktion stören könnten [15, 17]. Im Jahr 2003 untersuchten Chakeres et al. 25 Personen an verschiedenen Lokalisationen im Umfeld eines 8-T-MRT in jeweils 14 Messungen innerhalb und außerhalb des Magnetfeldes (hochfrequente elektromagnetische Felder kamen nicht zum Einsatz) [18]. Fünf Messungen fanden innerhalb des Magnetfeldes an Lokalisationen statt, die unterschiedlichen Feldstärken entsprachen (8; 6; 4,5; 3 und 1,5 T). Es wurden verschiedene Vitalfunktionen mithilfe eines Monitoringsystems (Herzfrequenz, Elektrokardiogramm (EKG), systolischer und diastolischer Blutdruck) gemessen und zusätzlich die Sauerstoffsättigung und Körpertemperatur ermittelt. Die einzige statistisch signifikante Veränderung, die festgestellt wurde, war ein leichter Anstieg des systolischen Blutdruckes bei 8 T, der aber klinisch vernachlässigbar war [18]. Die anderen gemessenen Vitalfunktionen zeigten keine signifikanten klinisch relevanten Veränderungen in Bezug auf die Exposition gegenüber den unterschiedlichen Feldstärken [18]. Diese Ergebnisse sind in Einklang mit den Erkenntnissen von Kangarlu et al., die sowohl bei Schweinen als auch bei freiwilligen Probanden bei einer Feldstärke von 8 T keine signifikanten kardialen und kognitiven Wirkungen feststellen konnten [19]. Eine neuere Studie von Bongers et al. aus dem Jahr 2018 deutet darauf hin, dass eine Langzeitexposition gegenüber statischen Magnetfeldern bei Beschäftigten, die in der Produktion von MRT-Geräten

tätig sind, die Entwicklung von Bluthochdruck begünstigen [20]. In dieser Studie wurden die ersten und letzten verfügbaren betriebsärztlichen Blutdruckmessungen von Beschäftigten (n = 538) mit den jeweiligen modellierten kumulativen Expositionen gegenüber statischen Magnetfeldern verbunden (einrichtungsbezogene Expositionsmatrix und individuelle Arbeitsabläufe). Die Studie kam zu dem Ergebnis, dass hohe kumulative Expositionen gegenüber statischen Magnetfeldern eine Entwicklung von Bluthochdruck begünstigen können [20]. Hierbei zeigte sich, dass die Stärke und Intensität der Expositionen einen deutlicheren Einfluss auf das Risiko, Bluthochdruck zu entwickeln, hatten als die Gesamtdauer der Expositionen [20]. In diesem Zusammenhang und den immer stärker werdenden statischen Magnetfeldern im Bereich der MRT sind weitere Studien nötig, um die Ergebnisse dieser Studie und damit mögliche Langzeiteffekte zu bestätigen.

Die zeitlich veränderlichen, niederfrequenten Magnetfelder (100–1000 Hz) und Bewegungen in einem statischen Magnetfeld sowie Bewegungen entlang eines Feldgradienten können elektrische Wirbelströme induzieren [21, 22, 23]. Für konstante Bewegungsabläufe (gleichbleibende Geschwindigkeit der Bewegung) kann die Stärke der induzierten elektrischen Felder im Körper geschätzt werden [24]. Im menschlichen Körper liegen natürliche Feldstärken von 5–50 mV vor [25]. Die Induktion elektrischer Felder über bestimmte Schwellenwerte hinaus kann somit zu sensorischen Effekten bis hin zu gesundheitlichen Gefahren führen [25]. Weiterhin kann es durch die Interaktion starker statischer Magnetfelder mit bewegten, geladenen Teilchen in Flüssigkeiten und Zellen des Körpers zu vorübergehenden Störungen der Sinnesempfindungen kommen. Diese entstehen durch magnetische Induktion über die Einwirkung von Lorentzkräften. Im statischen Magnetfeld geht man davon aus, dass Lorentzkräfte z. B. auf Ionenströme in der vestibulären Endolymphflüssigkeit und in den Haarzellen wirken [3, 26]. In ► **Tab. 5** ist die Frequenz der maximalen Empfindlichkeit (Wirkungsmaximum) für bestimmte physiologische Wirkungen dargestellt. Schaap et al. untersuchte das Auftreten vorübergehender Symptome bei 361 Mitarbeitern in 14 Klinik- und Forschungseinrichtungen [27]. Die Scanner-Stärke reichte von 0,5 bis 11,7 T. In dieser Studie zeigte sich, dass in 16–39 % der Arbeitsschichten definierte Symptome (Vertigo (Schwindel), Übelkeit, Tinnitus/ Kopfklingeln, Magnetophosphene und metallischer Geschmack), deren Auftreten in Zusammenhang

► **Tab. 6** Akute Wirkungen elektromagnetischer Felder auf Kognition und Verhalten.

Feldstärke	Literaturquelle	Beeinflusste Kognition
0,7 T Statisches Magnetfeld mit und ohne Bewegung Proband	De Vocht et al. [37]	<ul style="list-style-type: none"> ▪ 4 %-ige Reduktion der Geschwindigkeit und der Präzision ▪ 16 %-ige Reduktion der visuellen Kontrastempfindlichkeit im Nahbereich
Strefelfeld von 0,6 – 1 T bei 1,5- und 3 T MRT	De Vocht et al. [38]	<i>Negative Expositions-Wirkungs-Beziehungen für visuelles und auditives Arbeitsgedächtnis (Auge-Hand-Koordinationsgeschwindigkeit und visuelle Trackingaufgaben)</i>
statisches Magnetfeld von 0,05 T und 8 T (ohne Bewegungen)	Chakeres et al. [42]	<i>Keinen Zusammenhang zwischen der Exposition des statischen Magnetfeldes und der kognitiven Leistungsfähigkeit</i>
variabel	De Vocht et al. [35]	<ul style="list-style-type: none"> ▪ Schwindel, Konzentrationsprobleme, metallischer Geschmack und Kopfklingeln signifikant häufiger in der exponierten Gruppe ▪ Anzahl der definierten Symptome signifikant höher mit der Dauer der Exposition, der magnetischen Flussdichte und der Geschwindigkeit der Bewegungsabläufe ▪ Keine signifikanten Beeinträchtigungen der kognitiven Leistungsfähigkeit, wie motorische Reaktion
1600 mT, 800 mT und 0 mT (statischer und induzierter, zeitvariabler Magnetfelder)	De Vocht et al. [36]	<i>Leichte, nicht signifikante Effekte auf die visuell-sensorische Domäne sowie die Auge-Hand-Koordination</i>
Kopfbewegung im Strefelfeld eines 7 T-Gerätes bei 0,5 T und 1 T bzw. ohne Exposition bei 0 T	Van Nierop et al. [43]	<ul style="list-style-type: none"> ▪ Negative Beeinflussung bei Konzentration und Aufmerksamkeit, sowie Beeinträchtigung der visuell-räumlichen Orientierung ▪ Auswirkung auf Aufmerksamkeit und Konzentration besonders bei hoher Arbeitsgedächtnisleistung
Kopfbewegung im Strefelfeld eines 7 T-Gerätes (1 T vor der Bohrung eines 7 T-Gerätes mit bzw. ohne 2,4 T/s bewegungsinduzierter Exposition)	van Nierop et al. [44]	<ul style="list-style-type: none"> ▪ Statische Magnetfelder in Kombination mit bewegungsinduzierten, zeitvariablen Magnetfeldern, beeinflussen die verbale Gedächtnisleistung sowie die Sehschärfe signifikant ▪ Aufmerksamkeit und Konzentration negativ beeinflusst. ▪ Alleinige Exposition gegenüber dem statischen Magnetfeld zeigte keine signifikanten Effekte

mit der Exposition gegenüber statischen Magnetfeldern gebracht werden, auftraten. Die Symptome korrelierten positiv mit zunehmender magnetischer Flussdichte. Bei 6 % der Mitarbeiter wurde das Auftreten von Vertigo beobachtet, welches ein Sicherheitsrisiko darstellen kann [27]. 2015 veröffentlichten Schaap et al. eine Studie zur Exposition von MRT-Mitarbeitern*innen gegenüber magnetischen Feldern und dem Auftreten von Vertigo [28]. In dieser Studie wurden die Expositionen nicht geschätzt, sondern mit tragbaren Magnetfeld-Dosimetern ermittelt. Der deutlichste Zusammenhang zwischen Schwindel und Exposition ergab sich bei bewegungsinduzierten zeitvariablen Magnetfeldern [28]. Es gibt aber auch Studien, die gezeigt haben, dass Probanden auch ohne Bewegung im MRT-Gerät Schwindel empfinden [29, 30], welcher durch die Ionenströme in der Endolymphe in den Bogen gängen verursacht wird [3, 26, 30, 31]. Vor allem wenn die Anwesenheit eines Mitarbeiters während eines medizinischen Eingriffes nötig ist, können Episoden von Vertigo für den Mitarbeiter, aber auch für den zu behandelnden Patienten, ein Risiko darstellen [3, 32]. Im Hinblick auf die immer weiter zunehmenden magnetischen Flussdichten der MRT-Systeme ist auch eine Zunahme der in diesem Zusammenhang untersuchten Symptome zu erwarten [27].

Die oben genannten Wirkungen werden als sensorische Wirkungen zusammengefasst. Sie können beim Arbeitnehmer Stö-

rungen der Sinnesorgane und minimale Änderungen der Hirnfunktion hervorrufen. Im Allgemeinen werden sie jedoch als harmlos angesehen, da sie meist nur von kurzer Dauer sind. Zu den gesundheitlichen Wirkungen werden die Stimulation von Nerven- und Muskelgewebe bei höheren Feldstärken gezählt. Die Frequenz der maximalen Empfindlichkeit für periphere Nerven- und Muskelstimulation liegt bei ungefähr 50 Hz. Der internationale Basisgrenzwert legt bei einer Frequenz von 50 Hz eine elektrische Feldstärke von 20 mV/m fest [25]. Ab einer Wirkschwelle von 50 mV/m kommt es zur Auslösung von Phosphenen und ab elektrischen Feldstärken von 4000–6000 mV/m zur Reizung peripherer Nerven- und Muskelzellen [25]. Ab etwa 12 000 mV/m kann es dann zu einer Störung der Herzfunktion (zusätzliche Kontraktionen bis hin zu Kammerflimmern) kommen [33].

Akute Wirkungen elektromagnetischer Felder auf Kognition und Verhalten

In ► **Tab. 6** sind die akuten Wirkungen elektromagnetischer Felder auf die Kognition und das Verhalten zusammengestellt. Während in der ersten Studie von De Vocht et al. die Auge-Hand-Präzision beeinflusst war [34], wurde in der zweiten Studie die Koordinationsgeschwindigkeit reduziert [35]. Diese Unterschiede könnten durch Expositionsunterschiede oder auch durch eine relativ kleine Versuchsgruppengröße mit beeinflusst sein. Auch diese Studie

legte nahe, dass es Expositions-Wirkungsbeziehungen für das visuelle und das auditive Arbeitsgedächtnis, die Auge-Hand-Koordinationsgeschwindigkeit und visuelle Tracking-Aufgaben gibt. Ungeklärt blieb hier, ob die neurologischen Verhaltenseffekte mehrheitlich durch das statische Magnetfeld oder die Bewegungsgeschwindigkeit innerhalb des Streufeldes ausgelöst wurden [36]. Eine Studie von Chakeres et al., konnte hingegen keinen Zusammenhang zwischen einer Exposition gegenüber statischen Magnetfeldern von 0,05 T und 8 T und der kognitiven Leistungsfähigkeit finden [37]. Nicht nur Mitarbeiter im Bereich der MRT, sondern auch Beschäftigte, die an der Herstellung solcher Geräte beteiligt sind, sind hohen Expositionen gegenüber den beschriebenen elektromagnetischen Feldern ausgesetzt. De Vocht et al. konnte bei einer Studie an Probanden aus dem Bereich der Herstellung und Montage von MRT-Systemen zeigen, dass Schwindel, Konzentrationsprobleme, metallischer Geschmack und Kopfklingeln signifikant erhöht, jedoch kognitive Leistungsfähigkeiten nicht beeinträchtigt waren [38]. Da die kognitiven Tests unmittelbar vor und nach einer Schicht durchgeführt wurden, schlussfolgern De Vocht et al., dass kognitive Beeinträchtigungen nur von akuter und vorübergehender Natur sind und relativ schnell im Anschluss an die Exposition verschwinden [38]. Eine weitere Studie von Vocht et al. zeigte bei Testpersonen in unmittelbarer Nähe zum MRT-System leichte Effekte auf die visuellsensorische Domäne sowie die Auge-Hand-Koordination, jedoch ohne Signifikanz zur Kontrollgruppe [39]. Die Studien von Van Nierop et al. zeigten im Wesentlichen, dass sich Bewegung im statischen Magnetfeld negativ auf die Konzentration, Gedächtnisleistung, Aufmerksamkeit, sowie die Sehschärfe auswirkt [40, 41].

Wirkungen durch Langzeit-Exposition gegenüber statischen und niederfrequenten Feldern

Es gibt nur sehr wenige Studien oder Daten zu Langzeitwirkungen der beruflichen Exposition gegenüber starken statischen Magnetfeldern [45]. Bei Betrachtung der zu beobachtenden akuten Auswirkungen in Bezug auf Neurokognition, Neuroverhalten und sensorische Effekte stellt sich die Frage, ob regelmäßig auftretende Reaktionen zu langfristigen Beeinträchtigungen führen könnten [46]. Bongers et al. untersuchten in einer retrospektiven Kohortenstudie den Einfluss einer beruflichen Exposition gegenüber starken statischen Magnetfeldern in einer Produktionsanlage für MRT-Geräte [46]. In dieser Arbeit sollte der Zusammenhang zwischen Expositionen gegenüber starken statischen Magnetfeldern und dem Unfallrisiko der Arbeitnehmer untersucht werden. Es zeigte sich ein Zusammenhang zwischen der Exposition gegenüber statischen Magnetfeldern und einem erhöhten Risiko von Unfällen. Zusätzlich war das Auftreten von Unfällen bzw. Beinaheunfällen auf dem Weg zur Arbeit (weniger aber auf dem Nachhause-Weg) ebenfalls von der Exposition im Berufsleben und der kürzlichen Exposition gegenüber statischen Magnetfeldern abhängig. Huss et al. bestätigte diese Beobachtung bei Radiologieassistent*innen [47]. In dieser Studie zeigte sich ein erhöhtes Risiko für Wegeunfälle, wenn die Studienteilnehmer im Jahr vor dem Unfall häufiger an oder in der Nähe eines MRT-Gerätes gearbeitet hatten. Das Risiko erhöhte sich auch mit Zunahme der Expositionstage pro Jahr. Zudem ließ eine höhere magnetische Flussdichte

das Risiko ansteigen. Als limitierender Faktor dieser Studie war unter anderem die niedrige Rücklaufquote der Fragebögen (~ 30 %) genannt und die Möglichkeit, dass Personen Unfälle in der Zeitspanne vor dem Untersuchungszeitraum hatten, aber in dieser Studie als unfallfrei gewertet werden.

Huss et al. zeigt nach Auswertung der Schlafqualität, dass diese unter anderen Faktoren eine Begründung für das zuvor beobachtete höhere Unfallrisiko sein könnte [48]. Mitarbeiter, die sich während der Bildaufnahmen im Scannerraum befanden, berichteten ebenfalls häufiger über Schlafstörungen.

Schwangere Mitarbeiterinnen in der klinischen MRT

Es gibt eine Vielzahl von Studien, die sich mit der Risiko-Nutzenabwägung einer MRT-Untersuchung bei schwangeren Patientinnen beschäftigen [3, 49, 50, 51].

In Bezug auf Langzeitwirkungen und die Sicherheit von schwangeren Mitarbeiterinnen im Bereich der MRT wird jedoch sehr häufig nur die Arbeit von Kanal et al. aus dem Jahre 1993 zitiert [42, 43]. In dieser Studie wurden in einer Umfrage unter Mitarbeiterinnen von MRT-Einrichtungen verschiedenste Parameter wie Schwangerschaftsdauer, Frühgeburten, Fehlgeburten, Geburtsgewichte, Zyklusdauer usw. aufgenommen [42]. In diese Studie wurden 1915 Fragebögen einbezogen, in denen 1421 Schwangerschaften (bei 770 Frauen) registriert wurden. Von den 1421 registrierten Schwangerschaften betrafen 280 Schwangerschaften Mitarbeiterinnen, die zur Zeit der Schwangerschaften im MRT tätig waren. Insgesamt kommen Kanal et al. zu dem Schluss, dass es zu keinen besonderen Abweichungen bezüglich der Schwangerschaftsparameter kommt, also kein erhöhtes Risiko für schwangere Mitarbeiterinnen und das ungeborene Kind besteht [42]. Diese Studie wird häufig im Zusammenhang mit Risiken im Bereich der MRT und schwangeren Mitarbeiterinnen [44, 51, 52], sowie in nationalen und internationalen Regelwerken zitiert [21, 53]. In diesen Regelwerken wird eine Anwesenheit der Schwangeren im Scannerraum nicht empfohlen, eine Tätigkeit im Schaltraum sei jedoch nicht ausgeschlossen, so wird auch die Strahlenschutzkommission in ihrem Bericht 2003 zitiert [54, 55]. Mühlenweg et al. weisen darauf hin, dass die fehlenden Grenzwerte dazu führen, dass es schwangeren Mitarbeiterinnen aufgrund der Empfehlung der Norm IEC 60601-2-33:2010/A2 in vielen Kliniken und Praxen freigestellt wird, den Magnetraum außerhalb der Messungen zu betreten [54]. In den USA ist laut dem Standardregelwerk „ACR Guidance Document on MR Safe Practices: 2013“ von Kanal et al. den schwangeren Mitarbeiterinnen der Einsatz in der gesamten Schwangerschaft im Scannerraum und auch während der Messungen erlaubt [53].

Epidemiologische Studien

Für den Bereich der klinischen MRT liegen keine expliziten epidemiologischen Daten vor. Dies wurde auch von Bongers et al. in einer retrospektiven Studie aus dem Jahr 2014, die sich mit den gesundheitlichen Folgen durch eine langfristige Exposition gegenüber statischen Magnetfeldern befassen, explizit angemerkt [56]. Feychting et al. erklärten 2005 die Notwendigkeit von Studien zu langfristigen Effekten einer Exposition gegenüber

statischen Magnetfeldern [45]. Ebenso wurden von anderen Organisationen epidemiologische Studien bezüglich der chronischen Exposition gegenüber statischen Magnetfeldern gefordert [16, 57, 58]. Niederfrequente Felder werden auch immer wieder in Zusammenhang mit neurodegenerativen Erkrankungen (amyotrophe Lateralsklerose (ALS), Alzheimer, Parkinson) gebracht, die Ergebnisse sind jedoch nicht eindeutig [59, 60, 61, 62, 63]. Niederfrequente Magnetfelder wurden weiterhin vom internationalen Krebsforschungszentrum (IARC) der Weltgesundheitsorganisation (WHO) aufgrund der Ergebnisse aus epidemiologischen Studien, die ein erhöhtes Risiko für Kinderleukämie bei magnetischen Flussdichten von über 0,3–0,4 μT in die Klasse 2B „möglicherweise krebserregend“ eingestuft [64, 65]. Allerdings ist bis jetzt kein Wirkungsmechanismus bekannt und in Tierversuchen konnten die Ergebnisse nicht bestätigt werden [64, 65].

Zusammenfassung

Allgemein können magnetische Felder zu sensorischen und kognitiven Störungen führen, die jedoch in der Regel schnell reversibel sind. Als Langzeitwirkungen konnte eine mögliche Prädisposition für Bluthochdruck, sowie Schlafstörungen gezeigt werden. Bei schwangeren Mitarbeiterinnen konnte gezeigt werden, dass die Schwangerschaftsparameter nicht von der Norm abweichen. Jedoch liegen sowohl bei den Langzeitwirkungen als auch bei der Untersuchung schwangerer Mitarbeiterinnen nur sehr wenige Publikationen vor. Somit besteht hier noch ein großer Forschungsbedarf.

Fördermittel

BGW (ext FF_1455)

Interessenkonflikt

Die Autorinnen/Autoren geben an, dass kein Interessenkonflikt besteht.

Literatur

- [1] Nekolla EA, Schegerer AA, Griebel J et al. Häufigkeit und Dosis diagnostischer und interventioneller Röntgenanwendungen: Trends zwischen 2007 und 2014. *Radiologie* 2017; 57: 555–562. doi:10.1007/s00117-017-0242-y
- [2] Hartwig V, Virgili G, Mattei FE et al. Occupational exposure to electromagnetic fields in magnetic resonance environment: an update on regulation, exposure assessment techniques, health risk evaluation, and surveillance. *Med Biol Eng Comput* 2022; 297–320. doi:10.1007/s11517-021-02435-6
- [3] Pophof B, Brix G. Magnetic resonance imaging: Recent studies on biological effects of static magnetic and high-frequency electromagnetic fields. *Radiologie* 2017; 57: 563–568. doi:10.1007/s00117-017-0260-9
- [4] Health at a Glance 2021. OECD; 2021. doi:10.1787/ae3016b9-en
- [5] 21–01 | Facts and figures: Organ distribution of MRI studies – Number of MRI machines worldwide – Field strength of MRI machines. Last update October 2018 | MRI NMR Magnetic Resonance • Essentials, introduction, basic principles, facts, history | The primer of EMRF/TRTF (30.05.2019). Zugriff am 13.02.2022 unter <https://www.magnetic-resonance.org/ch/21-01.html>
- [6] Modenese A, Gobba F. Occupational Exposure to Electromagnetic Fields and Health Surveillance According to the European Directive 2013/35/EU. *Int J Environ Res Public Health* 2021; 18. doi:10.3390/ijerph18041730
- [7] Schaap K, Christopher-De Vries Y, Slottje P et al. Inventory of MRI applications and workers exposed to MRI-related electromagnetic fields in the Netherlands. *Eur J Radiol* 2013; 82: 2279–2285. doi:10.1016/j.ejrad.2013.07.023
- [8] NiSG – Gesetz zum Schutz vor nichtionisierender Strahlung bei der Anwendung am Menschen* (07.06.2022). Zugriff am 07.06.2022 unter <https://www.gesetze-im-internet.de/nisg/BjNR243310009.html>
- [9] ICNIRP. ICNIRP (25.02.2022). Zugriff am 25.02.2022 unter <https://www.icnirp.org/>
- [10] BMAS. BMAS – Forschungsbericht „Elektromagnetische Felder am Arbeitsplatz“ (25.02.2022). Zugriff am 25.02.2022 unter <https://www.bmas.de/DE/Service/Publikationen/Forschungsberichte/fb400-elektromagnetische-felder.html>
- [11] Klinische Zulassung für 7-Tesla Hochfeld-MR-Bildgebung | Friedrich-Alexander-Universität Erlangen-Nürnberg (28.02.2022). Zugriff am 28.02.2022 unter <https://www.fau.de/2017/10/news/wissenschaft/klinische-zulassung-fuer-7-tesla-hochfeld-mr-bildgebung/>
- [12] Über GUF1 (12.06.2022). Zugriff am 12.06.2022 unter <https://mr-gufi.de/index.php/was-ist-gufi>
- [13] Bundesamt für Strahlenschutz. BfS-Forschungsvorhaben zur Wirkung starker statischer Magnetfelder (12.06.2022). Zugriff am 12.06.2022 unter https://www.bfs.de/DE/bfs/wissenschaft-forschung/ergebnisse/starke-statische-magnetfelder/starke-statische-magnetfelder_node.html?sessionid=B7AC71CD2B5A430BB9E28ED389A736A3.2_cid374
- [14] NMR-Spektrometer der Superlative (13.04.2022). Zugriff am 13.04.2022 unter <https://www.mpg.de/15185601/0721-bich-056839-eines-der-drei-staerksten-hochaufloesenden-1-2-ghz-nmr-spektrometer-weltweit-steht-nun-in-goettingen>
- [15] Kinouchi Y, Yamaguchi H, Tenforde TS. Theoretical analysis of magnetic field interactions with aortic blood flow. *Bioelectromagnetics* 1996; 17: 21–32. doi:10.1002/(SICI)1521-186X(1996)17:13.0.CO;2-8
- [16] Karine. ICNIRP | Static Magnetic Fields (0 Hz) (11.04.2022). Zugriff am 11.04.2022 unter <https://www.icnirp.org/en/frequencies/static-magnetic-fields-0-hz/index.html>
- [17] Holden AV. The sensitivity of the heart to static magnetic fields. *Prog Biophys Mol Biol* 2005; 87: 289–320. doi:10.1016/j.pbiomolbio.2004.08.015
- [18] Chakeres DW, Kangarlu A, Boudoulas H et al. Effect of static magnetic field exposure of up to 8 Tesla on sequential human vital sign measurements. *J Magn Reson Imaging* 2003; 18: 346–352. doi:10.1002/jmri.10367
- [19] Kangarlu A, Burgess RE, Zhu H et al. Cognitive, cardiac, and physiological safety studies in ultra high field magnetic resonance imaging. *Magn Reson Imaging* 1999; 17: 1407–1416. doi:10.1016/S0730-725X(99)00086-7
- [20] Bongers S, Slottje P, Kromhout H. Development of hypertension after long-term exposure to static magnetic fields among workers from a magnetic resonance imaging device manufacturing facility. *Environ Res* 2018; 164: 565–573. doi:10.1016/j.envres.2018.03.008
- [21] ICNIRP. Guidelines on limits of exposure to static magnetic fields. *Health Phys* 2009; 96: 504–514. doi:10.1097/01.HP.0000343164.27920.4a
- [22] ICNIRP. ICNIRP Statement on Diagnostic Devices Using Non-ionizing Radiation: Existing Regulations and Potential Health Risks. *Health Phys* 2017; 112: 305–321. doi:10.1097/HP.0000000000000654
- [23] ICNIRP. Guidelines for limiting exposure to electric fields induced by movement of the human body in a static magnetic field and by time-varying magnetic fields below 1 Hz. *Health Phys* 2014; 106: 418–425. doi:10.1097/HP.0b013e31829e5580

- [24] Crozier S, Liu F. Numerical evaluation of the fields induced by body motion in or near high-field MRI scanners. *Prog Biophys Mol Biol* 2005; 87: 267–278. doi:10.1016/j.pbiomolbio.2004.08.002
- [25] Bundesamt für Strahlenschutz. Nachgewiesene Wirkungen niederfrequenter Felder (11.04.2022). Zugriff am 11.04.2022 unter <https://www.bfs.de/DE/themen/emf/nff/wirkung/nff-nachgewiesen/nff-nachgewiesen.html>
- [26] Antunes A, Glover PM, Li Y et al. Magnetic field effects on the vestibular system: calculation of the pressure on the cupula due to ionic current-induced Lorentz force. *Phys Med Biol* 2012; 57: 4477–4487. doi:10.1088/0031-9155/57/14/4477
- [27] Schaap K, Christopher-De Vries Y, Mason CK et al. Occupational exposure of healthcare and research staff to static magnetic stray fields from 1.5–7 Tesla MRI scanners is associated with reporting of transient symptoms. *Occup Environ Med* 2014; 71: 423–429. doi:10.1136/oemed-2013-101890
- [28] Schaap K, Portengen L, Kromhout H. Exposure to MRI-related magnetic fields and vertigo in MRI workers. *Occup Environ Med* 2016; 73: 161–166. doi:10.1136/oemed-2015-103019
- [29] Mian OS, Li Y, Antunes A et al. On the vertigo due to static magnetic fields. *PLoS One* 2013; 8: e78748. doi:10.1371/journal.pone.0078748
- [30] Boegle R, Stephan T, Ertl M et al. Magnetic vestibular stimulation modulates default mode network fluctuations. *Neuroimage* 2016; 127: 409–421. doi:10.1016/j.neuroimage.2015.11.065
- [31] Glover PM, Li Y, Antunes A et al. A dynamic model of the eye nystagmus response to high magnetic fields. *Phys Med Biol* 2014; 59: 631–645. doi:10.1088/0031-9155/59/3/631
- [32] Gorlin A, Hoxworth JM, Pavlicek W et al. Acute vertigo in an anesthesia provider during exposure to a 3 T MRI scanner. *Med Devices (Auckl)* 2015; 8: 161–166. doi:10.2147/MDER.S76474
- [33] Bundesamt für Strahlenschutz. Elektromagnetische Felder (22.02.2022). Zugriff am 22.02.2022 unter https://www.bfs.de/DE/themen/emf/emf_node.html;jssio_nid=BDC28775FD3FF418F7BAE4F07034AD42.1_cid391
- [34] Vocht F de, van-Wendel-de-Joode B, Engels H et al. Neurobehavioral effects among subjects exposed to high static and gradient magnetic fields from a 1.5 Tesla magnetic resonance imaging system—a case-crossover pilot study. *Magn Reson Med* 2003; 50: 670–674. doi:10.1002/mrm.10604
- [35] Vocht F de, Stevens T, van Wendel-de-Joode B et al. Acute neurobehavioral effects of exposure to static magnetic fields: analyses of exposure-response relations. *J Magn Reson Imaging* 2006; 23: 291–297. doi:10.1002/jmri.20510
- [36] Vocht F de, Muller F, Engels H et al. Personal exposure to static and time-varying magnetic fields during MRI system test procedures. *J Magn Reson Imaging* 2009; 30: 1223–1228. doi:10.1002/jmri.21952
- [37] Chakeres DW, Bornstein R, Kangarlu A. Randomized comparison of cognitive function in humans at 0 and 8 Tesla. *J Magn Reson Imaging* 2003; 18: 342–345. doi:10.1002/jmri.10366
- [38] Vocht F de, van Drooge H, Engels H et al. Exposure, health complaints and cognitive performance among employees of an MRI scanners manufacturing department. *J Magn Reson Imaging* 2006; 23: 197–204. doi:10.1002/jmri.20485
- [39] Vocht F de, Stevens T, Glover P et al. Cognitive effects of head-movements in stray fields generated by a 7 Tesla whole-body MRI magnet. *Bioelectromagnetics* 2007; 28: 247–255. doi:10.1002/bem.20311
- [40] van Nierop LE, Slottje P, van Zandvoort MJE et al. Effects of magnetic stray fields from a 7 tesla MRI scanner on neurocognition: a double-blind randomised crossover study. *Occup Environ Med* 2012; 69: 759–766. doi:10.1136/oemed-2011-100468
- [41] van Nierop LE, Slottje P, van Zandvoort M et al. Simultaneous exposure to MRI-related static and low-frequency movement-induced time-varying magnetic fields affects neurocognitive performance: A double-blind randomized crossover study. *Magn Reson Med* 2015; 74: 840–849. doi:10.1002/mrm.25443
- [42] Kanal E, Gillen J, Evans JA et al. Survey of reproductive health among female MR workers. *Radiology* 1993; 187: 395–399. doi:10.1148/radiology.187.2.8475280
- [43] Evans JA, Savitz DA, Kanal E et al. Infertility and pregnancy outcome among magnetic resonance imaging workers. *J Occup Med* 1993; 35: 1191–1195
- [44] Bulas D, Egloff A. Benefits and risks of MRI in pregnancy. *Semin Perinatol* 2013; 37: 301–304. doi:10.1053/j.semperi.2013.06.005
- [45] Feychting M. Health effects of static magnetic fields—a review of the epidemiological evidence. *Prog Biophys Mol Biol* 2005; 87: 241–246. doi:10.1016/j.pbiomolbio.2004.08.007
- [46] Bongers S, Slottje P, Portengen L et al. Exposure to static magnetic fields and risk of accidents among a cohort of workers from a medical imaging device manufacturing facility. *Magn Reson Med* 2016; 75: 2165–2174. doi:10.1002/mrm.25768
- [47] Huss A, Schaap K, Kromhout H. MRI-related magnetic field exposures and risk of commuting accidents – A cross-sectional survey among Dutch imaging technicians. *Environ Res* 2017; 156: 613–618. doi:10.1016/j.envres.2017.04.022
- [48] Huss A, Özdemir E, Schaap K et al. Occupational exposure to MRI-related magnetic stray fields and sleep quality among MRI – Technicians – A cross-sectional study in the Netherlands. *Int J Hyg Environ Health* 2021; 231: 113636. doi:10.1016/j.ijheh.2020.113636
- [49] Jabehear Maralani P, Kapadia A, Liu G et al. Canadian Association of Radiologists Recommendations for the Safe Use of MRI During Pregnancy. *Can Assoc Radiol J* 2021. doi:10.1177/084653712111015657
- [50] Sammet S. Magnetic resonance safety. *Abdom Radiol (NY)* 2016; 41: 444–451. doi:10.1007/s00261-016-0680-4
- [51] Buls N, Covens P, Nieboer K et al. Dealing with pregnancy in radiology: a thin line between science, social and regulatory aspects. *JBR-BTR* 2009; 92: 271–279
- [52] Wilde JP de, Rivers AW, Price DL. A review of the current use of magnetic resonance imaging in pregnancy and safety implications for the fetus. *Prog Biophys Mol Biol* 2005; 87: 335–353. doi:10.1016/j.pbiomolbio.2004.08.010
- [53] Kanal E, Barkovich AJ, Bell C et al. ACR guidance document on MR safe practices: 2013. *Journal of Magnetic Resonance Imaging* 2013; 37: 501–530. doi:10.1002/jmri.24011
- [54] Mühlenweg M, Schaefer G, Trattning S. New aspects from legislation, guidelines and safety standards for MRI. *Radiologe* 2015; 55: 691–696. doi:10.1007/s00117-015-2859-z
- [55] Die Strahlenschutzkommission – Publikationen – Heft 36: Empfehlungen zur sicheren Anwendung magnetischer Resonanzverfahren in der medizinischen Diagnostik (29.03.2022). Zugriff am 29.03.2022 unter https://www.ssk.de/SharedDocs/Publikationen/BerichtederSSK/Heft_36.html
- [56] Bongers S, Christopher Y, Engels H et al. Retrospective assessment of exposure to static magnetic fields during production and development of magnetic resonance imaging systems. *Ann Occup Hyg* 2014; 58: 85–102. doi:10.1093/annhyg/met049
- [57] Mattsson MO, Auvinen A, Bridges J et al. SCENIHR (Scientific Committee on Emerging and Newly Identified Health Risks), Research needs and methodology to address the remaining knowledge gaps on the potential health effects of EMF, 6 July, 2009. 2009
- [58] Research agenda on electromagnetic fields (06.04.2022). Zugriff am 12.04.2022 unter <https://www.who.int/teams/environment-climate-change-and-health/radiation-and-health/non-ionizing/research>
- [59] EMF-Portal | Neurodegenerative Erkrankungen (Parkinson, Alzheimer, ALS) (12.04.2022). Zugriff am 12.04.2022 unter <https://www.emf-portal.org/de/cms/page/home/effects/low-frequency/neurodegenerative-diseases>

- [60] Huss A, Koeman T, Kromhout H et al. Extremely Low Frequency Magnetic Field Exposure and Parkinson's Disease—A Systematic Review and Meta-Analysis of the Data. *Int J Environ Res Public Health* 2015; 12: 7348–7356. doi:10.3390/ijerph120707348
- [61] Jalilian H, Teshnizi SH, Rööslü M et al. Occupational exposure to extremely low frequency magnetic fields and risk of Alzheimer disease: A systematic review and meta-analysis. *Neurotoxicology* 2018; 69: 242–252. doi:10.1016/j.neuro.2017.12.005
- [62] Vergara X, Kheifets L, Greenland S et al. Occupational exposure to extremely low-frequency magnetic fields and neurodegenerative disease: a meta-analysis. *J Occup Environ Med* 2013; 55: 135–146. doi:10.1097/JOM.0b013e31827f37f8
- [63] van der Mark M, Vermeulen R, Nijssen PCG et al. Extremely low-frequency magnetic field exposure, electrical shocks and risk of Parkinson's disease. *Int Arch Occup Environ Health* 2015; 88: 227–234. doi:10.1007/s00420-014-0949-2
- [64] EMF-Portal | Krebs und Kinderleukämie (12.04.2022). Zugriff am 12.04.2022 unter <https://www.emf-portal.org/de/cms/page/home/effects/low-frequency/cancer-and-childhood-leukemia>
- [65] Exposure to extremely low frequency fields – background (06.04.2022). Zugriff am 12.04.2022 unter <https://www.who.int/teams/environment-climate-change-and-health/radiation-and-health/non-ionizing/elff>