

# Ressortforschungsberichte zum Strahlenschutz

**Exposition und Wirkungen der elektromagnetischen Felder  
neuartiger Technologien im Zwischenfrequenzbereich –  
systematischer Review  
- Vorhaben 3616S82437**

**Auftragnehmer:  
Seibersdorf Labor GmbH**

**R. Hirtl  
L. Bodewein  
K. Schmiedchen  
D. Dechent  
D. Stunder  
D. Gräfrath  
L. Winter  
T. Kraus  
S. Drießen  
G. Schmid**

**Das Vorhaben wurde mit Mitteln des Bundesministeriums für Umwelt, Naturschutz und nukleare Sicherheit (BMU) und im Auftrag des Bundesamtes für Strahlenschutz (BfS) durchgeführt.**



Bundesamt für Strahlenschutz

Dieser Band enthält einen Ergebnisbericht eines vom Bundesamt für Strahlenschutz im Rahmen der Ressortforschung des BMU (UFOPLAN) in Auftrag gegebenen Untersuchungsvorhabens. Verantwortlich für den Inhalt sind allein die Autoren. Das BfS übernimmt keine Gewähr für die Richtigkeit, die Genauigkeit und Vollständigkeit der Angaben sowie die Beachtung privater Rechte Dritter. Der Auftraggeber behält sich alle Rechte vor. Insbesondere darf dieser Bericht nur mit seiner Zustimmung ganz oder teilweise vervielfältigt werden.

Der Bericht gibt die Auffassung und Meinung des Auftragnehmers wieder und muss nicht mit der des BfS übereinstimmen.

**BfS-RESFOR-139/18**

Bitte beziehen Sie sich beim Zitieren dieses Dokumentes immer auf folgende URN:  
**urn:nbn:de:0221-2018080715819**

Salzgitter, August 2018

**R E P O R T**

Exposition und Wirkungen der  
elektromagnetischen Felder neuartiger  
Technologien im Zwischenfrequenzbereich –  
systematischer Review

**Abschlussbericht**

Rene Hirtl, Lambert Bodewein, Kristina Schmiedchen, Dagmar Dechent, Dominik Stunder,  
David Gräfrath, Lukas Winter, Thomas Kraus, Sarah Drießen, Gernot Schmid

09.10.2018

**V1.3**

# Exposition und Wirkungen der elektromagnetischen Felder neuartiger Technologien im Zwischenfrequenzbereich – systematischer Review

## Abschlussbericht

Auftraggeber

**Bundesamt für Strahlenschutz  
38201 Salzgitter**

Auftragsnummer: 3616S82437

Rene Hirtl<sup>1</sup>, Lambert Bodewein<sup>2</sup>, Kristina Schmiedchen<sup>2</sup>, Dagmar Dechent<sup>2</sup>, Dominik Stunder<sup>2</sup>, David Gräfrath<sup>2</sup>, Lukas Winter<sup>2</sup>, Thomas Kraus<sup>2</sup>, Sarah Drießen<sup>2</sup>, Gernot Schmid<sup>1</sup>

<sup>1</sup>Seibersdorf Labor GmbH  
Geschäftsfeld EMC & Optics  
Fachbereich Elektromagnetische Verträglichkeit

<sup>2</sup>*femu* – Forschungszentrum für elektromagnetische Umweltverträglichkeit  
Institut für Arbeits-, Sozial- und Umweltmedizin  
Leitung: Univ.-Prof. Dr. med. Thomas Kraus  
Uniklinik RWTH Aachen  
Pauwelsstrasse 30  
52074 Aachen

# Zusammenfassung

## Immissions- und Expositionsdaten

Bei der Anwendung vieler neuartiger technologischer Entwicklungen, wie z.B. Induktionsherden oder Elektrofahrzeugen, entstehen elektromagnetische Felder im Zwischenfrequenzbereich. In bisherigen Reviews von Immissions- und Expositionsdaten wurde das Augenmerk meist auf den niedrigen oder hohen Frequenzbereich begrenzt.

Im Rahmen dieser Arbeit wurden daher systematisch Quellen mit Immissionen im Frequenzbereich von 300 Hz – 1 MHz identifiziert und in Gruppen kategorisiert. Für diese Quellen wurden die vorhandenen Literatordaten bezüglich Immissionen und Exposition anhand von Qualitätskriterien analysiert. Dabei wurde insbesondere auf hinreichende Dokumentation der Mess- bzw. Berechnungsmethode sowie Angaben bezüglich räumlicher und zeitlicher statistischer Größen geachtet. Außerdem wurden ausschließlich jene Immissions- und Expositionsdaten verwendet, die eindeutig dem Zwischenfrequenzbereich zugeordnet werden konnten.

Die Datenlage ist vielfach sehr eingeschränkt, da bei vielen Geräten, die Zwischenfrequenzimmissionen verursachen, der Hauptteil des Immissionsspektrums zumeist im niedrigen Frequenzbereich und somit außerhalb des Zwischenfrequenzbereichs liegt und die vorhandenen zugehörigen Messdaten oftmals nicht frequenzselektiv erhoben wurden. Eine Beurteilung der Immissionen und Expositionen im interessierenden Frequenzbereich von 300 Hz – 1 MHz ist in solchen Fällen nicht möglich. Typischerweise handelt es sich dabei um 50 Hz-Quellen wie Motoren, Maschinen und Büro- sowie Haushaltsgeräte. Ähnlich verhält es sich mit elektronischen Geräten mit im kHz-Bereich arbeitenden Schaltreglern, deren Immissionsspektrum sich oftmals nicht ausschließlich unterhalb von 1 MHz befindet. Dieses Problem betrifft insbesondere Magnetresonanztomographen, Geräte für die drahtlose Energieübertragung, Fahrzeuge mit Elektroantrieb sowie invertergesteuerte Schweißgeräte.

Für die Allgemeinbevölkerung haben die Auswertungen jener Gerätegruppen mit vergleichsweise guter Datenlage mitunter Immissionen und Expositionen oberhalb der gegenwärtig auf europäischer Ebene empfohlenen Referenz- und Basisgrenzwerte ergeben. Beispiele hierfür sind diverse Sicherungssysteme wie Metalldetektoren, elektronische Artikelsicherungssysteme und Radiofrequenz Identifikationssysteme (RFID), sowie Induktionsherde und Geräte zur drahtlosen Energieübertragung. Bezüglich beruflich exponierter Personen zeigten sich insbesondere diverse industrielle Erwärmungsanlagen, Schweißanlagen sowie Deaktivatoren als relevant.

## Biologische Wirkungen

Im Vergleich zur Erforschung der Wirkungen von Feldern im Nieder- bzw. Hochfrequenz-Bereich gelten die Wirkungen von Feldern im Zwischenfrequenzbereich auf biologische Systeme bislang als nur wenig untersucht und es liegen nur wenige Übersichtsarbeiten vor. Daher wurde im Rahmen dieser Arbeit ein systematischer Review durchgeführt, in dem mögliche biologische Wirkungen magnetischer, elektrischer und elektromagnetischer Felder im Frequenzbereich 300 Hz – 1 MHz analysiert und bewertet wurden.

Der Review wurde nach PRISMA (Preferred Reporting Items for Systematic Reviews and Meta-Analyses)-Richtlinien erstellt. Die systematische Literatursuche wurde in der thematisch spezialisierten Literaturlieferantenbank EMF-Portal ([www.emf-portal.org](http://www.emf-portal.org)) durchgeführt. Relevante Studien wurden extrahiert und tabellarisch zusammengefasst. Das Risiko für Bias im Studiendesign sowie die Studienqualität wurden anhand des vom National Toxicology

Program's Office of Health Assessment and Translation (OHAT) entwickelten Protokolls bewertet.

Insgesamt 56 Studien wurden in den Review eingeschlossen. Davon waren drei Humanstudien, 27 Tierstudien und 26 *in vitro*-Studien. Die untersuchten Endpunkte und die Qualität der Studien waren heterogen. Studien, welche die möglichen Feldwirkungen von Induktionsherden, induktiven Ladegeräten und Magnetresonanztomographen (Gradientenfelder) untersuchten, lieferten keine Hinweise auf schädliche Wirkungen für die untersuchten Endpunkte, wie beispielsweise Fortpflanzung & Entwicklung. Es wurden jedoch im Rahmen von *in vitro*-Studien Hinweise auf eine Wirkung von magnetischen Zwischenfrequenzfeldern auf die Zellproliferation und Zellebensfähigkeit gefunden, wohingegen genotoxische Wirkungen bei Magnetfeldern <100 kHz als unwahrscheinlich eingeschätzt werden können. Zu den meisten Endpunkten, die in Tierstudien untersucht wurden, ist die Studienlage nicht ausreichend, um mögliche Wirkungen beurteilen zu können. Studien zu Reiz- und Wärmewirkung konnten im Rahmen des Reviews nicht gefunden werden. Auch aus der sehr geringen Anzahl an Humanstudien, die sich ausschließlich mit Wirkungen auf das Gehirn und die Kognition beschäftigt haben, lassen sich keine Schlussfolgerungen ziehen. Ebenso wenig können Aussagen zu den Wirkungen von elektrischen Feldern und elektromagnetischen Feldern getroffen werden.

Der größte Teil der evaluierten Studien untersuchte Magnetfelder mit Feldstärken oberhalb der ICNIRP-Referenzwerte für die Allgemeinbevölkerung. Elektrische und elektromagnetische Felder wurden kaum untersucht. Ebenso ist das Frequenzspektrum im Zwischenfrequenzbereich ungleichmäßig erforscht. Es wurde hauptsächlich der Bereich bis 100 kHz untersucht und nur sehr wenige Studien applizierten Felder zwischen 100 kHz und 1 MHz. Es besteht somit Forschungsbedarf an Studien, die ein breiteres Spektrum des Zwischenfrequenzbereiches abdecken, vor allen Dingen Humanstudien. Zudem sollten zukünftige Studien gezielter Bias-Risiken bezüglich des Designs, der Durchführung sowie der Dokumentation der Studie minimieren.

### **Mögliche Störbeeinflussung elektronischer Implantate**

Es ist bekannt, dass aktive Implantate, wie z.B. Herzschrittmacher, gegenüber starken elektromagnetischen Feldern anfällig für Fehlfunktionen sind. Bisher gibt es keine Grenzwerte für den Schutz von Patienten mit aktiven Implantaten. Auf Basis eines systematischen Literatur-Reviews wurde daher analysiert und bewertet, ob elektromagnetische Felder im Zwischenfrequenzbereich ein Risiko für Patienten mit aktiven Implantaten darstellen. Außerdem sollen die Schwierigkeiten erläutert werden, Grenzwerte für den Schutz von Patienten mit aktiven Implantaten vor elektromagnetischen Feldern festzulegen.

Mit Hilfe der PRISMA (Preferred Reporting Items for Systematic Reviews and Meta-Analyses)-Empfehlungen wurden Studien recherchiert und ausgewertet, die im Rahmen von *in vivo*-Studien, *in vitro*-Studien (Phantom-Studien, Benchmarktests) und Simulationsstudien elektromagnetische Interferenzen (EMI) bei aktiven Implantaten untersucht haben. Insgesamt erfüllten 45 Artikel die Auswahlkriterien und wurden in das Review eingeschlossen. Darüber hinaus wurden die Vor- und Nachteile der verschiedenen Studientypen diskutiert.

Die evaluierten Studien deuten darauf hin, dass bei aktiven Implantaten Fehlfunktionen durch einige EMF-Quellen des täglichen Lebens im Zwischenfrequenzbereich hervorgerufen werden können. EMI kann insbesondere in unmittelbarer Nähe von Sicherheitssystemen (z.B. RFID) und Induktionsherden auftreten. Die Ergebnisse dieser Studien deuten weiter

darauf hin, dass die Wahrscheinlichkeit für EMI von Expositions-bezogenen Parametern (Feldstärke, Frequenz, Modulation) und von Implantat-bezogenen Parametern (Implantat-Typ, Einstellung der Implantat-Empfindlichkeit, Sonden-Konfiguration, Implantationslage) abhängig ist. Nur wenige Studien korrelierten die identifizierten EMI mit detaillierten dosimetrischen Expositionsdaten.

Für Patienten mit aktiven Implantaten kann die Exposition gegenüber verschiedenen EMF-Quellen ein Risiko darstellen, weshalb zum Schutz dieser Patientengruppe eine besondere Berücksichtigung bei der Festlegung von Grenzwerten für die Exposition gegenüber EMF erforderlich ist. Um die Einflussfaktoren von EMI besser charakterisieren und Grenzwerte festlegen zu können, sollten zukünftige Studien standardisierte Expositionsaufbauten verwenden, Feldeigenschaften mit der identifizierten EMI korrelieren und sowohl Expositions-bezogene als auch Implantat-bezogene Parameter genauer untersuchen. Zusätzlich sollten, wenn möglich, Worst-Case-Szenarien für alle Studientypen berücksichtigt werden (z.B. unipolare Sonde, maximale Empfindlichkeit, homogene Feld-Exposition, Thorax senkrecht zur Magnetfeldexposition).

### **Zusammenfassende Bewertung**

Es hat sich gezeigt, dass eine aussagekräftige Bewertung möglicher gesundheitlicher Auswirkungen von elektrischen, magnetischen und elektromagnetischen Feldern im Zwischenfrequenzbereich nur mit einer soliden Datenbasis bezüglich des Ausmaßes der Exposition der Bevölkerung möglich ist und diese Datenbasis bislang noch nicht in zufriedenstellendem Umfang verfügbar ist. Es sind daher systematische frequenzselektive Messungen an repräsentativen Geräten jener Gerätekategorien zu empfehlen, bei denen bereits Einzelbefunde Hinweise auf hohe Immissionen oder Expositionen geliefert haben, bzw. bei denen eine weite Verbreitung angenommen werden kann.

Bei den biologischen Wirkungen hat sich gezeigt, dass zukünftige Studien gezielter Bias-Risiken bezüglich des Designs, der Durchführung sowie der Dokumentation minimieren sollten. Schlüsselfaktoren wie Verblindung, Charakterisierung der Exposition und der Felder sowie eine vollständige Beschreibung der Ergebnisse bedürfen einer besonderen Berücksichtigung. Insbesondere bei Tier- und Humanstudien besteht weiterer Forschungsbedarf, was sich auch mit den Einschätzungen bisheriger Reviews deckt. Weiters zeigte sich, dass einige in der Praxis gängige Zwischenfrequenzquellen für Patienten mit aktiven Implantaten ein Risiko im Hinblick auf die Störbeeinflussung der Implantate darstellen können. Es wird daher die Festlegung fundierter Grenzwerte für Immissionen im Zwischenfrequenzbereich im Hinblick auf Patienten mit aktiven Implantaten als sinnvoll erachtet.

## Summary

### Immission and exposure data

The application of many novel technologies, such as induction cookers or electric vehicles, results in electromagnetic fields in the intermediate frequency range. In previous reviews of immission and exposure data, the focus has mostly been limited to the low or high frequency range.

Within the scope of this work, sources with immissions in the frequency range of 300 Hz – 1 MHz were systematically identified and categorized into groups. For these sources, the existing literature data on immission and exposure were analysed on the basis of quality criteria. Attention was particularly paid to adequate documentation of the measurement or calculation method as well as information regarding spatial and temporal statistical variables. In addition, only immission and exposure data that could be clearly assigned to the intermediate frequency range was used.

For many devices which produce intermediate frequency fields, limited data is available, because the majority of the immission spectrum is typically at the low frequency range and the corresponding measurement data is not collected with frequency selective sensors. In such cases an assessment of the immission and exposure in the frequency range of interest from 300 Hz – 1 MHz is not possible. Typically, these are 50 Hz sources such as electrical engines, machinery and office and home appliances. Similarly, electronic devices with switching regulators in the kHz range often have immission spectrums not exclusively below 1 MHz. This problem relates in particular to magnetic resonance imaging systems, devices for wireless power transfer, vehicles with electric drive and inverter controlled welding devices.

The evaluation of devices, relevant for the general public, sometimes indicated immission and exposure values above the reference levels and basic restrictions, currently recommended by the European Commission. Examples include various security systems such as metal detectors, electronic article surveillance systems and radio frequency identification systems (RFID), as well as induction cookers and devices for wireless power transfer. With regard to occupationally exposed persons, various industrial heating systems, welding systems and electronic article surveillance deactivation devices in particular proved to be relevant.

### Biological effects

In comparison to research on the effects of extremely low and radio frequency fields, the effects on biological systems of intermediate frequency fields have been poorly investigated and few reviews are available. Therefore, a systematic review was carried out within the scope of this work, in which possible biological effects of magnetic, electric and electromagnetic fields in the frequency range 300 Hz – 1 MHz were analyzed and evaluated.

The review was prepared in accordance with PRISMA (Preferred Reporting Items for Systematic Reviews and Meta-Analyses) guidelines. The systematic literature search was carried out in the thematically specialized literature database EMF-Portal ([www.emf-portal.org](http://www.emf-portal.org)). Relevant studies were extracted and summarized in tabular form. The risk of bias in study design and the study quality were assessed using the protocol developed by the National Toxicology Program's Office of Health Assessment and Translation (OHAT).

A total of 56 studies were included in the review. Of these, three were human studies, 27 animal studies and 26 *in vitro* studies. The investigated endpoints and the quality of the

studies were heterogeneous. Studies examining the potential field effects of induction cooker, inductive charging and magnetic resonance imaging devices (gradient fields) did not indicate any adverse effects on the endpoints studied, such as reproduction & development. However, there are indications from *in vitro* studies of effects of intermediate frequency fields on cell proliferation and cell viability, whereas genotoxic effects are deemed unlikely for magnetic fields <100 kHz. For most endpoints that have been studied in animal studies, there is insufficient data to assess possible effects. No studies on thermal and stimulation effects were found in the framework of this review. No conclusions could be drawn from the small number of human studies, which have dealt exclusively with effects on the brain and cognition. Likewise, no statements about the effects of electric fields and electromagnetic fields can be made.

Most of the evaluated studies examined magnetic fields with field strengths above the ICNIRP reference levels for the general public. Electric and electromagnetic fields have hardly been studied. Likewise, the frequency spectrum in the intermediate frequency range is unevenly researched. The range up to 100 kHz was mainly studied and very few studies applied fields between 100 kHz and 1 MHz. Thus, there is a need for research with studies investigating a broader spectrum of the intermediate frequency range, especially human studies. In addition, future studies should focus on limiting the risk of bias in design, execution and documentation of the study.

### **Possible interference with electronic implants**

Implantable electronic devices, such as cardiac pacemakers, are known to be susceptible to malfunction in the presence of strong electromagnetic fields (EMF). So far, standard organizations have not proposed limit values to EMF exposure for patients with electronic implants. The aim of this systematic review is to evaluate whether electronic implants are susceptible to electromagnetic interference (EMI) in the intermediate frequency range (300 Hz – 1 MHz). Additionally, we discuss the advantages and disadvantages of the different types of studies used to investigate EMI. Using the PRISMA (Preferred Reporting Items for Systematic Reviews and Meta-Analyses) statement, we collected and evaluated studies examining EMI in *in vivo* studies, *in vitro* studies (phantom studies, benchmark tests), and simulation studies. Our analysis revealed that electronic implants are susceptible to malfunction induced by EMF in the intermediate frequency range. Electromagnetic interference may in particular be provoked by security systems and induction cookers. The results of the studies evaluated in this systematic review further indicate that the likelihood for EMI is dependent on exposure-related parameters (field strength, frequency, and modulation) and on implant- as well as on lead-related parameters (model, type of implant, implant sensitivity setting, lead configuration, and implantation site). The review shows that the factors influencing EMI are not sufficiently characterized and EMF limit values for CIED (Cardiovascular Implantable Electronic Device) patients cannot be derived yet. Future studies should therefore consider exposure-related parameters as well as implant- and lead-related parameters systematically. Additionally, worst-case scenarios (i.e. unipolar sensing, maximum sensitivity, atrium sensing, sustained pacing of the CIED, left-sided implantation, lateral lead's tip position, vertical lead's tip orientation, homogeneous field exposure, and thorax perpendicular to the magnetic field exposure) should be considered in all study types, where possible.

## **Conclusion**

A comprehensive evaluation of possible health effects of electric, magnetic and electromagnetic fields in the intermediate frequency range is only possible with a solid set of data covering the full extent of exposure of the population. However, such a solid set of data is currently not available to a satisfying extent. Therefore, it is recommended that systematic frequency-selective measurements are made on representative devices from the device categories in which individual findings have already provided indications of high immission or exposure values, or for which wide distribution can be assumed.

Investigations into studies on biological effects showed that future studies should minimize risks of bias related to design, execution and documentation. Key factors such as blinding, characterization of exposure and fields as well as a full description of the results deserve special consideration. There is a need for further research, particularly in the case of animal and human studies, which is in agreement with the conclusions of previous reviews. Furthermore, there is evidence that EMF sources of everyday life such as security systems or induction hobs may induce EMI. Thus, the establishment of limit values for patients with electronic implants will contribute to estimate which electronic appliances can be considered safe for implant carriers and which distances to various electronic appliances should be respected in order to prevent EMI.

# Inhalt

<b>1</b>	<b>Einleitung</b>	<b>12</b>
<b>2</b>	<b>Grenzwertregelung im Bereich 300 Hz – 1 MHz</b>	<b>13</b>
<b>3</b>	<b>Quellen von elektromagnetischen Feldern im Zwischenfrequenzbereich und dokumentierte Expositionen und Immissionen der Bevölkerung und beruflich exponierter Personen</b>	<b>16</b>
3.1	Methoden	16
3.1.1	Ermittlung von Quellen	16
3.1.2	Ermittlung der Immissions- und Expositionsdaten	17
3.2	Liste der Quellen für die Exposition der Bevölkerung und beruflich exponierter Personen	19
3.2.1	Beleuchtungseinrichtungen	19
3.2.2	Elektronische Artikelsicherungssysteme (EAS)	19
3.2.3	Geräte für die Energieversorgung	20
3.2.4	Fahrzeuge mit Elektroantrieb	20
3.2.5	Elektro- bzw. Induktionserwärmungsgeräte	21
3.2.6	Geräte in Haushalt und Büro	23
3.2.7	Industrielle Prozesse zur Materialbearbeitung	24
3.2.8	Medizinische Anwendungen	25
3.2.9	Radio Frequenz Identifikation (RFID)	26
3.2.10	Schweiß- und Lötgeräte	26
3.2.11	Sonstiges	27
3.3	Zusammenstellung der erhobenen Immissions- und Expositionsdaten im Zwischenfrequenzbereich	28
3.3.1	Beleuchtungseinrichtungen	29
3.3.2	Elektronische Artikelsicherungssysteme (EAS)	34
3.3.3	Geräte für die Energieversorgung	42
3.3.4	Fahrzeuge mit Elektroantrieb	48
3.3.5	Elektro- bzw. Induktionserwärmungsgeräte	53
3.3.6	Geräte in Haushalt und Büro	61
3.3.7	Industrielle Prozesse zur Materialbearbeitung	71
3.3.8	Medizinische Anwendungen	73
3.3.9	Radio Frequenz Identifikation (RFID)	79
3.3.10	Schweiß- und Lötgeräte	83
3.3.11	Sonstiges	87
3.4	Zusammenfassende Bewertung der Exposition von Personen im Zwischenfrequenzbereich	92
3.4.1	Exposition der Allgemeinbevölkerung	92
3.4.2	Exposition am Arbeitsplatz	95

<b>4</b>	<b>Bewertung der möglichen biologischen und gesundheitlichen Wirkungen elektromagnetischer Felder im Zwischenfrequenzbereich anhand der erfassten originalen Literaturstellen</b>	<b>99</b>
4.1	Methoden	99
4.1.1	Literaturrecherche	99
4.1.2	Studienauswahl, Ein- und Ausschlusskriterien	100
4.1.3	Studienextraktion	101
4.1.4	Studienbewertung	101
4.2	Ergebnisse	103
4.2.1	Eingeschlossene Studien	103
4.2.2	Studienbewertung	105
4.2.3	Humanstudien	109
4.2.4	Tierstudien	110
4.2.5	<i>In vitro</i> -Studien	120
4.3	Diskussion	128
4.3.1	Zusammenfassung der Evidenz für Wirkungen nach Endpunkten	128
4.3.2	Relevanz der Studien in Bezug auf Grenzwerte und Anwendungen	129
4.3.3	Einschränkungen des Reviews	132
4.3.4	Schlussfolgerung	133
<b>5</b>	<b>Erfassung aller relevanten wissenschaftlichen Reviews und Bewertungen zu Exposition und Wirkung elektromagnetischer Felder im Zwischenfrequenzbereich</b>	<b>135</b>
5.1	Reviews zu Feldern im Zwischenfrequenzbereich	135
5.2	Reviews und Bewertungen von Gremien zu Feldern im Zwischenfrequenzbereich	138
<b>6</b>	<b>Bewertung der möglichen Störbeeinflussung elektronischer Implantate durch elektromagnetische Felder im Zwischenfrequenzbereich anhand der erfassten originalen Literaturstellen</b>	<b>140</b>
6.1	Einleitung	140
6.1.1	Hintergrund	140
6.1.2	Studientypen zur Untersuchung von elektromagnetischen Interferenzen	141
6.1.3	Fachbegriffe	143
6.2	Methoden	143
6.2.1	Literaturrecherche	143
6.2.2	Studienauswahl, Ein- und Ausschlusskriterien	144
6.2.3	Studien-Extraktion	144
6.3	Ergebnisse	145
6.3.1	Studienlage	145
6.3.2	Auswertung der Studien ohne Feldquellen-Bezug	146
6.3.3	Warensicherungssysteme, RFID und Metalldetektoren	152
6.3.4	Induktionsherde	160

6.3.5	Sonstige dokumentierte Störbeeinflussungen im Bereich 300 Hz – 1 MHz	164
6.4	Zusammenfassung und Schlussfolgerung	169
6.4.1	Expositions-bezogene Faktoren	170
6.4.2	Kardiale Implantate und Sonden-bezogene Faktoren	171
6.4.3	Grenzwerte	171
6.4.4	Fazit	172
6.5	Hinweis zu Kapitel 6	172
<b>7</b>	<b>Identifizierung der wissenschaftlichen Kenntnislücken</b>	<b>173</b>
7.1	Immissions- und Expositionsdaten	173
7.2	Biologische Wirkungen	173
7.3	Mögliche Störbeeinflussung elektronischer Implantate	174
7.4	Zusammenfassende Bewertung der wissenschaftlichen Kenntnislücken	174
<b>8</b>	<b>Literatur</b>	<b>175</b>

## 1 Einleitung

Die Immissionen und Expositionen von elektrischen, magnetischen und elektromagnetischen Feldern nehmen stetig zu. Dabei gewinnt der Zwischenfrequenzbereich durch neue technische Entwicklungen, wie z.B. induktives Laden oder stromrichter-gesteuerte Anlagen und Ähnliches, zunehmend an Bedeutung. Der Zwischenfrequenzbereich ist ein nicht klar definierter Frequenzbereich zwischen dem Niederfrequenz- (0,1 Hz – 1 kHz) und dem Hochfrequenz-Bereich (10 MHz – 300 GHz), der laut Weltgesundheitsorganisation (WHO) zwischen 300 Hz und 10 MHz liegt (WHO, 2005). Im EMF-Portal wird die untere Grenze jedoch höher angesetzt und es wird erst ab 1 kHz von Zwischenfrequenzen gesprochen (EMF-Portal, 2017). Das Bundesamt für Strahlenschutz dagegen unterscheidet nur nieder- und hochfrequente Felder und setzt die Grenze bei 100 kHz (BfS, 2018).

Im Zwischenfrequenzbereich gehen das elektrische und das magnetische Feld mit zunehmender Frequenz in ein zusammenhängendes elektromagnetisches Feld mit einer elektrischen und einer magnetischen Feldkomponente über. Dabei ändert sich auch die dominierende Wirkung auf biologische Systeme. So handelt es sich im Zwischenfrequenzbereich nach gegenwärtigem Kenntnisstand immer um eine Kombination aus Reizwirkung und Wärmewirkung, wobei ab ca. 100 kHz die im Niederfrequenz-Bereich dominierende Reizwirkung von der im Hochfrequenz-Bereich dominierenden Wärmewirkung abgelöst wird (ICNIRP, 1998). Im Vergleich zur Erforschung der Wirkungen der Felder im Niederfrequenz- bzw. Hochfrequenz-Bereich gelten die Wirkungen im Zwischenfrequenzbereich bislang als nur wenig untersucht. Die WHO führte im Jahr 2007 eine Risikoabschätzung für den Frequenzbereich 300 Hz – 100 kHz durch und schlussfolgerte unter anderem, dass nur wenige Studien zu den möglichen Wirkungen vorliegen. Sie hat daher der Forschung zu den Wirkungen der Felder im Zwischenfrequenzbereich eine hohe Priorität eingeräumt (WHO, 2007a). Diese Einschätzung wird auch vom wissenschaftlichen Ausschuss "Neu auftretende und neu identifizierte Gesundheitsrisiken" (SCENIHR) der EU geteilt (SCENIHR, 2009, 2015). SCENIHR urteilt, dass insgesamt zu wenige und speziell keine epidemiologischen Studien für den Zwischenfrequenzbereich verfügbar sind. Angesichts der erwarteten Zunahme der Exposition gegenüber Feldern im Zwischenfrequenzbereich wird daher die Durchführung weiterer Studien empfohlen (SCENIHR, 2015).

Typische Quellen von elektromagnetischen Feldern im Zwischenfrequenzbereich sind z.B. Induktionsherde, elektronische Warensicherungs-Systeme (EAS, RFID), Energiesparlampen, induktive Ladestationen, Monitore, Magnetresonanztomographen (MRT) und medizinische Geräte zur Stimulation von Nerven und Knochen. Die Ergebnisse verschiedener Studien deuten darauf hin, dass elektronische Warensicherungssysteme die ICNIRP-Referenzwerte zum Teil deutlich überschreiten können. Auch ist zum Beispiel bei Induktionsherden und induktiven Ladestationen ein Überschreiten der Referenzwerte nicht auszuschließen (siehe auch Kapitel 3.2 bzw. 3.3).

Das Ziel des vorliegenden Projektes war die Erstellung eines systematischen Reviews, in dem einerseits die Quellen von magnetischen, elektrischen und elektromagnetischen Feldern im Frequenzbereich 300 Hz – 1 MHz und andererseits die Wirkungen auf biologische Funktionen analysiert und bewertet werden. Dazu wurden relevante experimentelle und epidemiologische Studien erfasst und bewertet und der weitere Forschungsbedarf identifiziert.

## 2 Grenzwertregelung im Bereich 300 Hz – 1 MHz

Um gesundheitlich nachteilige Effekte zu vermeiden, ist die Exposition von Personen gegenüber elektrischen, magnetischen und elektromagnetischen Feldern zu begrenzen. Nach derzeitigem wissenschaftlichem Kenntnisstand sind im Bereich niedriger Frequenzen (bis zu ca. 100 kHz) Zellreizungen durch von den externen Feldern im Körper induzierte Körperstromdichten bzw. Feldstärken der biologisch relevante Wirkungsmechanismus. Im Hochfrequenzbereich (oberhalb von 10 MHz) stellt nach gegenwärtigem wissenschaftlichem Kenntnisstand die Gewebserwärmung zufolge Absorption von elektromagnetischer Strahlung den biologisch relevanten Wirkungsmechanismus dar. Gegenwärtige Sicherheitsdokumente definieren daher frequenzabhängige Expositionsgrenzwerte um gesundheitlich nachteilige Effekte durch die genannten Wirkmechanismen zu verhindern. Im Übergangsbereich zwischen Nieder- und Hochfrequenz (100 kHz – 10 MHz) wurden Expositionsgrenzwerte festgelegt, die beide genannten Wirkmechanismen berücksichtigen. Ausgehend von den wissenschaftlich gesicherten Wirkungsmechanismen (Zellreizung bzw. Gewebserwärmung zufolge Absorption) wurden Basisgrenzwerte bzw. Expositionsgrenzwerte<sup>1</sup> für die Stromdichte im Gewebe (J) bzw. die im Gewebe induzierte elektrische Feldstärke ( $E_i$ ), sowie für die spezifische Absorptionsrate (SAR) festgelegt. Da diese Größen nur *in vivo* bzw. näherungsweise *in vitro* erfassbar sind, erfolgte zusätzlich die Definition so genannter Referenzwerte bzw. Auslöseschwellen oder Auslösewerte<sup>2</sup> für die äußeren Feldgrößen (elektrische und magnetische Feldstärke bzw. Flussdichte). Diese Referenzwerte- bzw. Auslöseschwellen wurden aus den Basisgrenzwerten bzw. Expositionsgrenzwerten unter konservativen Annahmen (maximale Feldeinkopplung in den Körper) anhand von einfachen Modellrechnungen abgeleitet und stellen somit konservative Vergleichswerte für die Expositionsbeurteilung dar. Aus einer Unterschreitung der Referenzwerte bzw. Auslöseschwellen folgt daher gleichzeitig auch die Einhaltung der Basisgrenzwerte bzw. Expositionsgrenzwerte. Umgekehrt bedeutet eine Überschreitung der Referenzwerte bzw. Auslöseschwellen nicht zwangsläufig auch eine Überschreitung der Basisgrenzwerte bzw. Expositionsgrenzwerte. Zeigen Feldstärke- bzw. Flussdichtemessungen Überschreitungen der Referenzwerte bzw. Auslöseschwellen, so bedeutet dies zunächst nur, dass eine endgültige Entscheidung über die Konformität im Hinblick auf die Basisgrenzwerte bzw. Expositionsgrenzwerte nur auf Basis weiterer detaillierter (und aufwändiger) Mess- bzw. Simulationsmethoden getroffen werden kann.

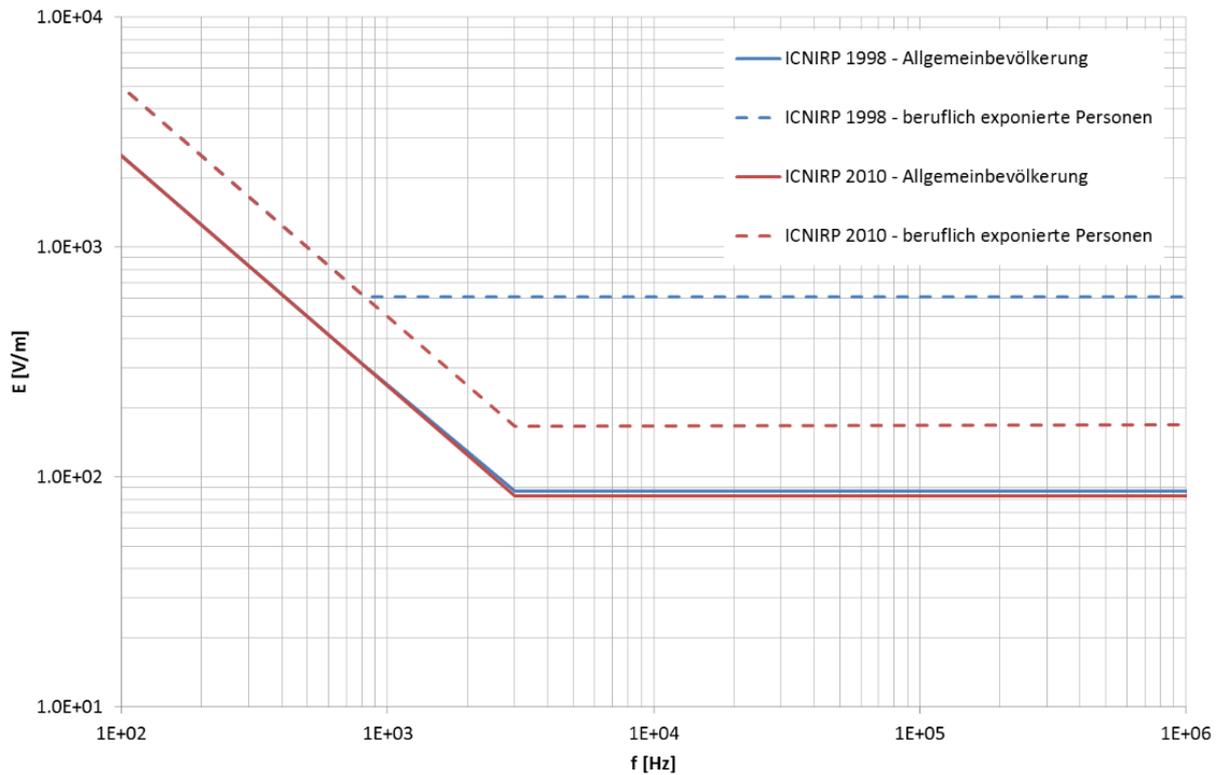
Diese oben beschriebenen Referenzwerte und Basisgrenzwerte wurden auf europäischer Ebene von der Internationalen Kommission für den Schutz vor nichtionisierender Strahlung (ICNIRP, 1998, 2010) festgelegt. Daraus wiederum wurden die EU-Ratsempfehlung 1999/519/EU (EU, 1999) sowie die EU-Richtlinie 2013/35/EU (EU, 2013) abgeleitet.

Abbildung 2.1 und Abbildung 2.2 zeigen die Referenzwerte für die Allgemeinbevölkerung sowie für beruflich exponierte Personen für den Bereich 300 Hz – 1 MHz. Zusätzlich sind in Tabelle 2.1 die Referenzwerte für die Allgemeinbevölkerung nochmals tabellarisch dargestellt.

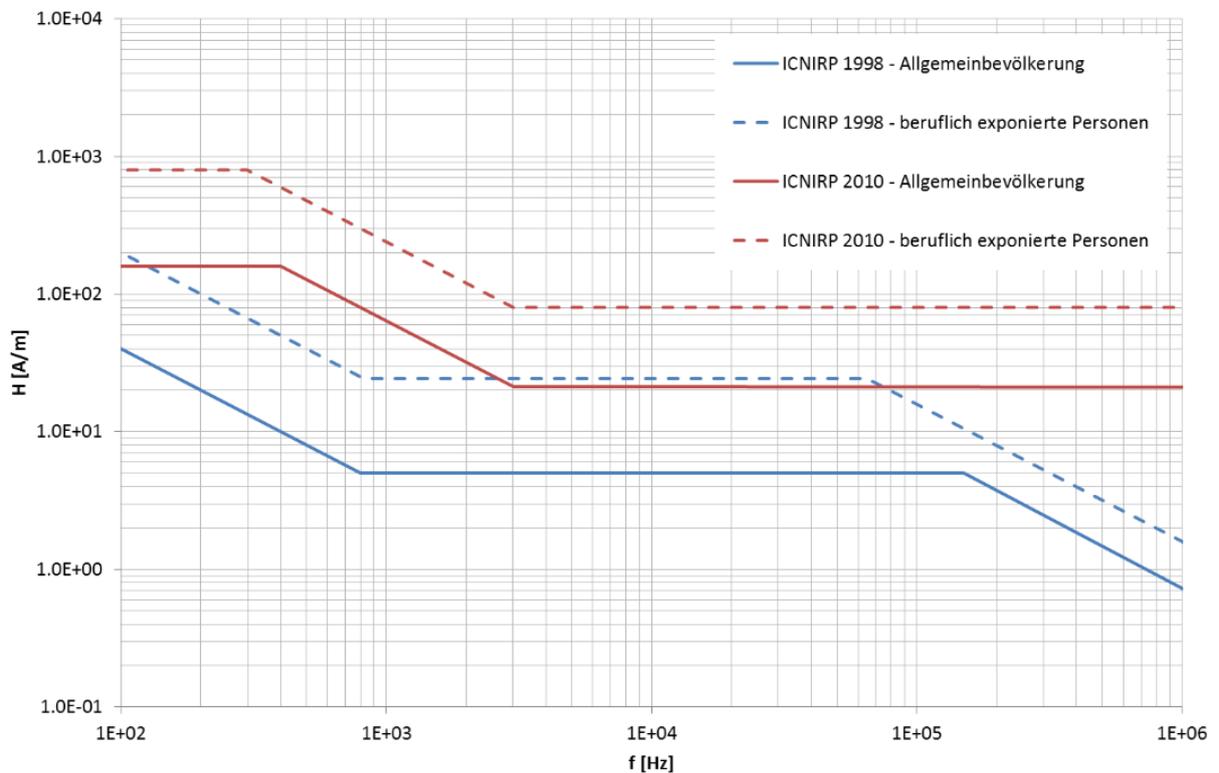
---

<sup>1</sup> Die Begriffe „Basisgrenzwert“, und „Expositionsgrenzwert“ können aus physikalischer Sicht als Synonyme aufgefasst werden. Die unterschiedliche Begriffsbildung ist ausschließlich eine Folge einer formalen neuen Diktion in der EU-Richtlinie 2013/35/EU.

<sup>2</sup> Die Begriffe „Referenzwert“, „Auslöseschwelle“ und „Auslösewert“ können dabei aus physikalischer Sicht als Synonyme aufgefasst werden. Die unterschiedliche Begriffsbildung ist ausschließlich eine Folge einer formalen neuen Diktion in der EU-Richtlinie 2013/35/EU.



**Abbildung 2.1:** Referenzwerte für die elektrische Feldstärke für die Allgemeinbevölkerung und beruflich exponierte Personen nach ICNIRP 1998 und ICNIRP 2010.



**Abbildung 2.2:** Referenzwerte für die magnetische Feldstärke für die Allgemeinbevölkerung und beruflich exponierte Personen nach ICNIRP 1998 und ICNIRP 2010.

**Tabelle 2.1:** Referenzwerte (Effektivwerte) für elektrische und magnetische Felder im Frequenzbereich 300 Hz – 1 MHz, basierend auf den Empfehlungen von ICNIRP (ICNIRP, 1998, 2010) für die Allgemeinbevölkerung.

Empfehlung	Frequenz f	Elektrische Feldstärke [V/m]	Magnetische Feldstärke [A/m]	Magnetische Flussdichte [ $\mu$ T]
ICNIRP 2010	300 Hz – 400 Hz	$250.000/f$ [Hz]	160	200
	400 Hz – 3 kHz	$250.000/f$ [Hz]	$64.000/f$ [Hz]	$80.000/f$ [Hz]
	3 kHz – 1 MHz	83	21	27
ICNIRP 1998	100 kHz – 150 kHz	87	5	6,25
	150 kHz – 1 MHz	87	$0,73/f$ [MHz]	$0,92/f$ [MHz]

Die ICNIRP-Empfehlungen berücksichtigen allerdings nicht die Wirkung von elektrischen, magnetischen und elektromagnetischen Feldern auf Implantat-Träger. Vielmehr geben sie an, dass auch bei Einhaltung der Referenzwerte Störbeeinflussungen von Implantaten nicht ausgeschlossen sind. International anerkannte Referenzwerte zum Schutz von Personen mit aktiven Implantaten vor Wirkungen durch elektromagnetische Felder gibt es derzeit nicht. Es existieren jedoch Produktnormen für HSM (EN 45502-2-1:2004, 2004), ICD (EN 45502-2-2:2008, 2008) und Cochlea/Hirnstamm-Implantat-Systeme (EN 45502-2-3:2010, 2010). Die darin angegebenen frequenzabhängigen Prüfsignale für kardiale Implantate, die keine Fehlfunktion beim Implantat auslösen dürfen, sind in Tabelle 2.2 aufgeführt. Die Störfestigkeit von Implantaten auf bestimmte Störsignale müssen demzufolge von den Herstellern im Rahmen von Benchmarktests zur CE-Kennzeichnung getestet werden. Der Nachteil dieser Methodik besteht darin, dass von den applizierten Störsignalen nicht ohne Weiteres auf die Feldstärken externer elektrischer, magnetischer oder elektromagnetischer Felder, die entsprechende Spannungen am Implantat-Eingang erzeugen, geschlossen werden kann (vgl. auch Kapitel 6.1.2). Eine Übertragung auf reale Situationen ist nur mittels Kopplungsmodellen möglich.

**Tabelle 2.2:** Amplituden der Prüfsignale, bis zu denen HSM und ICD nicht beeinflusst werden dürfen (nach Abs. 27.5 der EN 45502-2-1:2004 und EN 45502-2-2:2008 für den Bereich 300 Hz – 1 MHz).

Frequenz	Amplitude des Prüfsignals (Spitze-Spitze-Wert)	
	Unipolare Wahrnehmung	Bipolare Wahrnehmung
300 Hz – 1 kHz	2 mV	0,2 mV
1 kHz – 3 kHz	$2 \text{ mV} \times (f/1 \text{ kHz})^2$	$0,2 \text{ mV} \times (f/1 \text{ kHz})^2$
3 kHz – 167 kHz	$6 \text{ mV} \times f/1 \text{ kHz}$	$0,6 \text{ mV} \times f/1 \text{ kHz}$
167 kHz – 1 MHz	1 V	100 mV

### **3 Quellen von elektromagnetischen Feldern im Zwischenfrequenzbereich und dokumentierte Expositionen und Immissionen der Bevölkerung und beruflich exponierter Personen**

In einem ersten Schritt wurden potenziell relevante Feldquellen im interessierenden Frequenzbereich von 300 Hz bis 1 MHz systematisch erhoben, kategorisiert und tabellarisch zusammengefasst. Im zweiten Schritt wurden die in der gegenwärtig verfügbaren wissenschaftlichen Literatur vorhandenen Daten hinsichtlich der Exposition von Personen durch die identifizierten Zwischenfrequenzquellen einer detaillierten Analyse unterzogen, um daraus eine Abschätzung der zu erwartenden Immission und Exposition der Allgemeinbevölkerung und beruflich exponierter Personen im Frequenzbereich zwischen 300 Hz und 1 MHz ableiten zu können.

#### **3.1 Methoden**

##### **3.1.1 Ermittlung von Quellen**

Für die Ermittlung von Quellen der Exposition der Allgemeinbevölkerung und beruflicher Exposition im Zwischenfrequenzbereich wurden zunächst Recherchen im EMF-Portal durchgeführt. Diese wurden ergänzt durch weiterführende systematische Suche in Online Datenbanken, sowie gezielt nach einschlägigen, öffentlich zugänglichen Forschungsberichten nationaler und internationaler Institutionen, sowie auf Basis einer Durchsicht des deutschen Frequenznutzungsplanes. Grundsätzlich wurden ausschließlich Feldquellen mit bekannten Immissionen im Frequenzbereich von 300 Hz – 1 MHz aufgenommen. Die daraus entstehende Liste wurde im Hinblick auf Synonyme bereinigt und gruppiert.

Typische 50 Hz-Quellen wurden nur dann in die Liste mitaufgenommen, wenn in der Literatur Daten zu Messungen verfügbar sind, die eindeutig zeigen, dass die Größenordnung der von der jeweiligen Quelle verursachten Oberwellen im relevanten Frequenzbereich liegt. Als relevant wurden dabei Werte größer oder gleich 1 % vom Referenzwert für Allgemeinbevölkerung gemäß ICNIRP 1998 bzw. resultierende Expositionsquotienten (EQ) im Frequenzbereich bis 400 kHz größer 0.05 angenommen. Der Expositionsquotient berechnet sich als Quotient des Messwerts bei einer bestimmten Frequenz und dem zugehörigen Referenzwert bei dieser Frequenz. Die Einschränkung des Frequenzbereichs von max. 400 kHz bei der Berechnung des EQ ergibt sich aus dem Messbereich der im Normalfall für 50 Hz-Quellen verwendeten Messgeräte. Die Referenzwerte für das elektrische und magnetische Feld sind in Abbildung 2.1 und Abbildung 2.2 dargestellt.

Die Geräte auf der resultierenden Liste wurden anschließend nach Art und Anwendung gruppiert, bzw. falls nicht vernünftig zuordenbar in die Gruppe Sonstiges zugeordnet. Daraus ergaben sich folgende Gruppen:

- Beleuchtungseinrichtungen
- Elektronische Artikelsicherungssysteme (EAS)
- Geräte für die Energieversorgung
- Fahrzeuge mit Elektroantrieb
- Elektro- bzw. Induktionserwärmungsgeräte
- Geräte für Haushalt und Büro
- Industrielle Materialbearbeitungsprozesse
- Medizinische Anwendungen
- Radio Frequenz Identifikation (RFID)
- Schweiß- und Lötgeräte
- Sonstiges

Für die tabellarische Zusammenfassung der einzelnen Gruppen wurden für die zugehörigen Geräte noch folgende Parameter festgelegt und bestimmt bzw. abgeschätzt:

- Exposition der Allgemeinbevölkerung durch das Gerät (ja/nein)
- Exposition von beruflich exponierten Personen durch das Gerät (ja/nein)
- Einsatzhäufigkeit des Geräts
- Tendenz der Einsatzhäufigkeit
- Literatur in der das betreffende Gerät dosimetrisch untersucht wurde
- Synonyme für die Bezeichnung des Geräts

Für die Einsatzhäufigkeit wurden die Kategorien niedrig, mittel und hoch festgelegt, bei der Tendenz gibt es die Kategorien fallend, konstant und steigend. Die Zuordnung zur Exposition der Allgemeinbevölkerung bzw. beruflich exponierter Personen erfolgte alternativ. Quellen, die für die Exposition der Allgemeinbevölkerung relevant sind, wurden der Kategorie Allgemeinbevölkerung zugeordnet. In die Kategorie der beruflich exponierten Personen wurden nur jene Quellen aufgenommen, die ausschließlich an Arbeitsplätzen zu erwarten sind, da grundsätzlich davon auszugehen ist, dass alle für die Allgemeinbevölkerung relevanten Quellen auch an Arbeitsplätzen vorkommen können.

### **3.1.2 Ermittlung der Immissions- und Expositionsdaten**

Zur Ermittlung der Höhe der Immission und Exposition der Allgemeinbevölkerung und beruflich exponierter Personen im Zwischenfrequenzbereich wurden die identifizierten Publikationen einer detaillierten Analyse bezüglich der Relevanz, Qualität und Verwertbarkeit der darin berichteten Immissions- und Expositionsdaten unterzogen.

Als wesentlichstes und grundlegendes Einschlusskriterium für eine Aufnahme der publizierten Daten in die weitere Analyse wurde eine eindeutige Identifizierbarkeit des Zwischenfrequenzanteils in den publizierten Immissions- bzw. Expositionsdaten zugrunde gelegt. D.h., Messdaten aus Breitbandmessungen mit einem Messfrequenzbereich der über eine oder beiden Grenzen des hier definierten Zwischenfrequenzbereichs (300 Hz – 1 MHz) hinausging und bei denen die spektralen Immissionsanteile unterhalb und oberhalb dieser Grenzen nicht vernachlässigbar waren, wurden als nicht relevant im Sinne der Aufgabenstellung klassifiziert und daher von der weiteren Analyse ausgeschlossen.

Die verbleibenden Daten wurden hinsichtlich Qualität und Verwertbarkeit analysiert und entsprechend aufbereitet.

Als Qualitätskriterien wurden dabei herangezogen:

*für Messdaten:*

- Hinreichende Dokumentation der verwendeten Messmethode
  - Breitband- (Messfrequenzbereich) oder frequenzselektive Messung
  - Verwendete Messgeräte
  - Angabe der betrachtete Messpositionen (Ort des Mess-Sensors)

*für Daten aus numerischen Berechnungen:*

- Angabe von Berechnungsmethode, Randbedingungen und Rechengitterauflösung
- Validierung des numerischen Modells
- Spezifikation von Körper- bzw. Gewebemodellen (sofern verwendet)

*für Mess- und Berechnungsergebnisse:*

- Hinreichende Angabe des Charakters der Mess- und/oder Berechnungsergebnisse
  - Angabe bezüglich des räumlichen statistischen Charakters (Mittelwert über Raumbereich, Maximalwert, Einzelpunktmessung, etc.)
  - Angabe bezüglich des zeitlichen statistischen Charakters (Effektivwert, Spitzenwert, etc.)
  - Nachvollziehbarkeit von Angaben als Anteil vom Referenzwert (sofern vorhanden)

Weiters wurde im Hinblick auf die praktische Verwertbarkeit auch die eindeutige und nachvollziehbare Dokumentation der zum Zeitpunkt der Messungen herrschenden Betriebsbedingungen der Feldquelle als wichtiges Bewertungskriterium herangezogen.

Die auf diese Weise erhobenen und bewerteten Expositions- bzw. Immissionsdatendaten der unterschiedlichen Feldquellen wurden schließlich, zunächst eingeteilt nach den folgenden Feldquellenkategorien zusammengefasst:

- Beleuchtungseinrichtungen
- Elektronische Artikelsicherungssysteme (EAS)
- Geräte für die Energieversorgung
- Fahrzeuge mit Elektroantrieb
- Elektro- bzw. Induktionserwärmungsgeräte
- Geräte für Haushalt und Büro
- Industrielle Materialbearbeitungsprozesse
- Medizinische Anwendungen
- Radio Frequenz Identifikation (RFID)
- Schweiß- und Lötgeräte
- Sonstiges

Auf Basis dieser Daten wurde, unter Berücksichtigung der gegenwärtigen und absehbaren Verbreitung der jeweiligen Quellen, das Ausmaß der Exposition der Bevölkerung im Alltag und von Arbeitnehmern an ihrem Arbeitsplatz durch elektromagnetische Felder im Zwischenfrequenzbereich abgeschätzt.

Schließlich wurde auf der Grundlage der publizierten Immissions- und Expositionsdaten sowie deren Qualität und Verwertbarkeit eine „Landkarte“ abgeleitet, die ggf. vorhandene Kenntnislücken bezüglich Expositionsdaten von Zwischenfrequenzquellen aufzeigt.

## 3.2 Liste der Quellen für die Exposition der Bevölkerung und beruflich exponierter Personen

### 3.2.1 Beleuchtungseinrichtungen

**Tabelle 3.1:** Liste der Geräte in der Kategorie Beleuchtung. Einsatzhäufigkeit: niedrig, mittel und hoch; Tendenz: fallend, konstant und steigend.

Bezeichnung	Allgemeinbevölkerung	beruflich exponierte Personen	Einsatzhäufigkeit	Tendenz	Literatur	Synonyme
Energiesparlampe	ja	nein	hoch	konstant	Aerts et al. (2017), Bakos et al. (2010), Bundesamt für Strahlenschutz (2008), Dürrenberger et al. (2004), Farag et al. (1998), Kurokawa et al. (2004), Mader und Peralta (1992), Nadakuduti et al. (2010), National Research Council (1997), Neitzke et al. (2006), Preece et al. (1997), Van Den Bossche et al. (2015)	Leuchtstofflampe, Leuchtstoffröhre, Kompaktleuchtstofflampe, Leuchtröhre
Halogenspot mit Transformator	ja	nein	hoch	fallend	Aerts et al. (2017)	keine
LED Lampe	ja	nein	mittel	steigend	Nadakuduti et al. (2010)	keine

### 3.2.2 Elektronische Artikelsicherungssysteme (EAS)

**Tabelle 3.2:** Liste der Geräte in der Kategorie elektronische Artikelsicherung. Einsatzhäufigkeit: niedrig, mittel und hoch; Tendenz: fallend, konstant und steigend.

Bezeichnung	Allgemeinbevölkerung	beruflich exponierte Personen	Einsatzhäufigkeit	Tendenz	Literatur	Synonyme
Akusto-magnetisches System	ja	nein	mittel	konstant	Casamento (1999), Deutsche Gesetzliche Unfallversicherung und Börner (2011), Harris et al. (2000), Li und Wu (2014, 2015), Leitgeb et al. (2013), Roivainen et al. (2014), Schmid et al. (2012), Trulsson et al. (2007), van der Togt et al. (2008), WHO (2007a)	keine
Elektromagnetisches Warensicherungssystem	ja	nein	mittel	konstant	Casamento (1999), Deutsche Gesetzliche Unfallversicherung und Börner (2011), Harris et al. (2000), Li und Gandhi (2005), Leitgeb et al. (2013), Roivainen et al. (2014), Schmid et al. (2014b), Trulsson et al. (2007), WHO (2007a)	keine

### 3.2.3 Geräte für die Energieversorgung

**Tabelle 3.3:** Liste der Geräte in der Kategorie Energieversorgung. Einsatzhäufigkeit: niedrig, mittel und hoch; Tendenz: fallend, konstant und steigend.

Bezeichnung	Allgemeinbevölkerung	beruflich exponierte Personen	Einsatzhäufigkeit	Tendenz	Literatur	Synonyme
Batterieladegerät	ja	nein	hoch	steigend	Aerts et al. (2017)	keine
Drahtlose Energieübertragung	ja	nein	niedrig	steigend	Chen et al. (2014), Christ et al. (2013), Huang et al. (2009), Ibrahim et al. (2015), Kang et al. (2013), Kim et al. (2015), Laakso et al. (2014, 2012), Laakso und Hirata (2013), Nadakuduti et al. (2015), Shimamoto et al. (2015), Sunohara et al. (2014), Tell et al. (2014), Zhang et al. (2015)	Induktives Laden, Kabellose Leistungsübertragung
Frequenzumrichter	ja	ja	hoch	steigend	Aerts et al. (2017)	Inverter, Wechselrichter

### 3.2.4 Fahrzeuge mit Elektroantrieb

**Tabelle 3.4:** Liste der Geräte in der Kategorie der Fahrzeuge mit Elektroantrieb. Einsatzhäufigkeit: niedrig, mittel und hoch; Tendenz: fallend, konstant und steigend.

Bezeichnung	Allgemeinbevölkerung	beruflich exponierte Personen	Einsatzhäufigkeit	Tendenz	Literatur	Synonyme
Elektroauto	ja	nein	niedrig	steigend	Low und Ruddle (2013), Moreno-Torres et al. (2013), Schmid et al. (2009), Tell et al. (2013), Tell und Kavet (2016)	Elektro-PKW
Elektroschlepper	nein	ja	mittel	steigend	Schmid et al. (2009)	keine
Hybrid-Bus	ja	nein	niedrig	steigend	Schmid et al. (2009)	keine
Hybrid-Lastkraftwagen	nein	ja	niedrig	steigend	Schmid et al. (2009), Tell et al. (2013)	Hybrid-LKW
Magnetschwebebahn	ja	ja	niedrig	steigend	Brecher et al. (2002), Fugate et al. (2006), Fukuta et al. (2005), Halgamuge et al. (2010), ICNIRP (2008), Nakagawa und Koana (1993), National Research Council (1997), Ruppe et al. (1995), Schmid et al. (2009)	keine

Bezeichnung	Allgemeinbevölkerung	beruflich exponierte Personen	Einsatzhäufigkeit	Tendenz	Literatur	Synonyme
Metro	ja	ja	hoch	konstant	Allen et al. (1994), Chadwick und Lowes (1998), Gryz und Leszko (2009), Landesanstalt für Umweltschutz Baden-Württemberg (2002)	U-Bahn, Untergrundbahn
Mildhybrid-Auto	ja	nein	niedrig	steigend	Halgamuge et al. (2010), Schmid et al. (2009), Tell et al. (2013)	Mildhybridauto, Mildhybrid-Fahrzeug, Mildhybridfahrzeug
Straßenbahn	ja	ja	hoch	konstant	Bundesamt für Gesundheit et al. (2006), Chadwick und Lowes (1998), Gryz und Leszko (2009), Halgamuge et al. (2010), Landesanstalt für Umwelt und Bayerisches Landesamt für Umwelt (2010), Landesanstalt für Umweltschutz Baden-Württemberg (2002)	Tram
Vollhybrid-Auto	ja	nein	niedrig	steigend	Hareuveny et al. (2015), Schmid et al. (2009), Vassilev et al. (2015)	keine

### 3.2.5 Elektro- bzw. Induktionserwärmungsgeräte

**Tabelle 3.5:** Liste der Geräte in der Kategorie der Elektro- bzw. Induktionserwärmungsgeräte. Einsatzhäufigkeit: niedrig, mittel und hoch; Tendenz: fallend, konstant und steigend.

Bezeichnung	Allgemeinbevölkerung	beruflich exponierte Personen	Einsatzhäufigkeit	Tendenz	Literatur	Synonyme
Drahtglühanlage	nein	ja	hoch	konstant	Vereinigung der Metall-Berufsgenossenschaften (2003)	Glühanlage
Durchlauferwärmungsanlage	nein	ja	hoch	konstant	Vereinigung der Metall-Berufsgenossenschaften (2003)	keine
Elektrostahlöfen	nein	ja	hoch	konstant	Vereinigung der Metall-Berufsgenossenschaften (2003)	Schmelzöfen, Tiegelöfen
Härteanlage	nein	ja	hoch	konstant	Vereinigung der Metall-Berufsgenossenschaften (2003)	keine
HF-Aufschmelzanlage	nein	ja	hoch	konstant	Vereinigung der Metall-Berufsgenossenschaften (2003)	keine

Bezeichnung	Allgemeinbevölkerung	beruflich exponierte Personen	Einsatzhäufigkeit	Tendenz	Literatur	Synonyme
Induktionsheizung	nein	ja	hoch	konstant	Seibersdorf Labor GmbH (2016a)	keine
Induktionsherd	ja	nein	niedrig	steigend	Aerts et al. (2017), Binggeli et al. (2005), Bullo et al. (2013), Christ et al. (2012), Guldemann et al. (2011), Health Protection Agency und Advisory Group on Non-ionising Radiation AGNIR (2012), Kos et al. (2011), Leitgeb et al. (2008a, 2008b, 2008c), Mantiply et al. (1997), Rickli et al. (2003), Tenforde (1992)	Induktionskochfeld
Induktionsofen	nein	ja	hoch	konstant	Floderus et al. (2002)	keine
Nacherwärmungsanlage	nein	ja	hoch	konstant	Vereinigung der Metall-Berufsgenossenschaften (2003)	keine
Rohrbiegeanlage	nein	ja	hoch	konstant	Vereinigung der Metall-Berufsgenossenschaften (2003)	keine

### 3.2.6 Geräte in Haushalt und Büro

**Tabelle 3.6:** Liste der Geräte in der Kategorie Haushalt und Büro. Einsatzhäufigkeit: niedrig, mittel und hoch; Tendenz: fallend, konstant und steigend.

Bezeichnung	Allgemeinbevölkerung	beruflich exponierte Personen	Einsatzhäufigkeit	Tendenz	Literatur	Synonyme
Bildschirme und Anzeigegeräte	ja	nein	hoch	konstant	Aerts et al. (2017), Ainsbury et al. (2005), Behrens et al. (2004), Bundesamt für Gesundheit et al. (2006), Bundesamt für Strahlenschutz (2008), Farag et al. (1998), Kim und Cho (2001), Kurokawa et al. (2004), Lacy-Hulbert et al. (1998), Leitgeb et al. (2008a, 2008b), Mader and Peralta (1992), National Research Council (1997), Preece et al. (1999, 1997), Van Den Bossche et al. (2015)	Computer-Bildschirm, Fernsehbildschirm, Flachbildschirm, Kathodenstrahl-Röhrenbildschirm, Monitor, PC-Bildschirm, PC-Monitor, Plasmabildschirm, Röhrenbildschirm, TV-Bildschirm, Kathodenstrahlröhre
Headset	ja	nein	hoch	konstant	Bundesamt für Gesundheit et al. (2006), Kaune et al. (2002), Lee et al. (2009), Schmid et al. (2007)	Kopfhörer
Hifi-Anlage	ja	nein	hoch	konstant	Ainsbury et al. (2005), Leitgeb et al. (2008b), Neitzke et al. (2006), Preece et al. (1997)	Lautsprechanlage, Musikanlage, Stereoanlage
iPod	ja	nein	hoch	konstant	Bassen (2008), Shah et al. (2010)	keine
Klimaanlage	ja	nein	hoch	steigend	Aerts et al. (2017)	keine
Kühlschrank mit Invertertechnologie	ja	nein	hoch	konstant	Aerts et al. (2017)	keine
Mikrowellenherd mit Invertertechnologie	ja	nein	hoch	konstant	Aerts et al. (2017)	keine
Photovoltaik-Anlage	ja	ja	mittel	steigend	Tell et al. (2015)	keine

Bezeichnung	Allgemeinbevölkerung	beruflich exponierte Personen	Einsatzhäufigkeit	Tendenz	Literatur	Synonyme
Plasmalampe	ja	nein	mittel	konstant	Alanko et al. (2011)	keine
Smartmeter PLC	ja	nein	niedrig	steigend	Seibersdorf Labor GmbH (2016b)	keine
Staubsauger	ja	nein	hoch	konstant	Ainsbury et al. (2005), Bundesamt für Strahlenschutz (2008), EPA (1992), Farag et al. (1998), IEH et al. (2012), Kim und Cho (2001), Kurokawa et al. (2004), Leitgeb et al. (2008c, 2008b, 2008a), Mader und Peralta (1992), National Research Council (1997), Preece et al. (1997)	keine
Waschmaschine mit Invertertechnologie	ja	nein	hoch	konstant	Aerts et al. (2017)	keine

### 3.2.7 Industrielle Prozesse zur Materialbearbeitung

**Tabelle 3.7:** Liste der Geräte in der Kategorie industrielle Prozesse zur Materialbearbeitung. Einsatzhäufigkeit: niedrig, mittel und hoch; Tendenz: fallend, konstant und steigend.

Bezeichnung	Allgemeinbevölkerung	beruflich exponierte Personen	Einsatzhäufigkeit	Tendenz	Literatur	Synonyme
Oberflächenbearbeitung (Plattieren)	nein	ja	hoch	konstant	Floderus et al. (2002)	keine
Plasmabearbeitung (Ätzung, Hochfrequenz Sputtern, Epitaxie)	nein	ja	hoch	konstant	Litvak et al. (2002)	keine

### 3.2.8 Medizinische Anwendungen

**Tabelle 3.8:** Liste der Geräte in der Kategorie medizinische Anwendungen. Einsatzhäufigkeit: niedrig, mittel und hoch; Tendenz: fallend, konstant und steigend.

Bezeichnung	Allgemeinbevölkerung	beruflich exponierte Personen	Einsatzhäufigkeit	Tendenz	Literatur	Synonyme
Magnetfeldtherapie	ja	ja	mittel	konstant	De Santis et al. (2015), Gwechenberger et al. (2006)	keine
Langwellentherapie	ja	ja	mittel	konstant	De Santis et al. (2015), Skanlab Norge	Diathermiegerät
Elektrische Zahnbürste	ja	nein	hoch	konstant	Kameda et al. (2012)	Zahnbürste
Elektrochirurgie	ja	ja	mittel	konstant	Molla-Djafari et al. (1998), Van Den Bossche et al. (2015)	keine
Elektromagnetische Nervenstimulatoren	ja	ja	niedrig	steigend	Litvak et al. (2002)	keine
Magnetische Knochenstimulatoren	ja	ja	niedrig	konstant	Litvak et al. (2002)	keine
Magnetresonanztomograph	ja	ja	niedrig	steigend	Acri et al. (2014), Andreuccetti et al. (2013), Boss et al. (2007), de Greef et al. (2013), Israel et al. (2013), Karpowicz und Gryz (2013), Kondur et al. (2008), Laakso et al. (2013), Liu et al. (2003), Murbach et al. (2014), Schaap et al. (2014), Wilkening und Sutton (1990), Yamaguchi-Sekino et al. (2014)	MRT

### 3.2.9 Radio Frequenz Identifikation (RFID)

**Tabelle 3.9:** Liste der Geräte in der Kategorie Radio Frequenz Identifikation (RFID). Einsatzhäufigkeit: niedrig, mittel und hoch; Tendenz: fallend, konstant und steigend.

Bezeichnung	Allgemeinbevölkerung	beruflich exponierte Personen	Einsatzhäufigkeit	Tendenz	Literatur	Synonyme
LF-Zutrittskontrollsystem (Proximity Coupling)	ja	ja	mittel	konstant	Schmid et al. (2012)	keine
LF-Zutrittskontrollsystem (Vicinity Coupling)	ja	ja	mittel	konstant	Schmid et al. (2012)	keine
LF-Vicinity System zur Tieridentifikation	nein	ja	mittel	konstant	Schmid et al. (2012)	keine

### 3.2.10 Schweiß- und Lötgeräte

**Tabelle 3.10:** Liste der Geräte in der Kategorie Schweiß- und Lötgeräte. Einsatzhäufigkeit: niedrig, mittel und hoch; Tendenz: fallend, konstant und steigend.

Bezeichnung	Allgemeinbevölkerung	beruflich exponierte Personen	Einsatzhäufigkeit	Tendenz	Literatur	Synonyme
Hartlötanlage	nein	ja	hoch	konstant	Vereinigung der Metall-Berufsgenossenschaften (2003)	keine
I-Lötanlage	nein	ja	hoch	konstant	Vereinigung der Metall-Berufsgenossenschaften (2003)	keine
Punktschweißzangen	nein	ja	hoch	konstant	Schmid et al. (2017a)	keine
Rohrschweißmaschine	nein	ja	hoch	konstant	Vereinigung der Metall-Berufsgenossenschaften (2003)	keine
Lichtbogenschweißgerät	nein	ja	hoch	konstant	Aerts et al. (2017), Schmid et al. (2017a)	keine
Widerstandsschweißmaschine	nein	ja	hoch	konstant	Schmid et al. (2017a)	keine
Bolzenschweißgeräte	nein	ja	hoch	konstant	Schmid et al. (2017a)	keine

### 3.2.11 Sonstiges

**Tabelle 3.11:** Liste der Geräte in der Kategorie Sonstiges. Einsatzhäufigkeit: niedrig, mittel und hoch; Tendenz: fallend, konstant und steigend.

Bezeichnung	Allgemeinbevölkerung	beruflich exponierte Personen	Einsatzhäufigkeit	Tendenz	Literatur	Synonyme
AM-Radiosender	ja	ja	mittel	fallend	Health Protection Agency und Advisory Group on Non-ionising Radiation AGNIR (2012), Jokela et al. (1994), Mantiply et al. (1997), Valič et al. (2015)	Mittelwellen-Radiosender
GSM-Mobiltelefone (nur NF)	ja	nein	hoch	konstant	Tuor et al. (2005)	keine
Metalldetektor	ja	ja	mittel	konstant	Boivin et al. (2003), Cooper (2002), Floderus et al. (2002), Kainz et al. (2003), Wu et al. (2007)	keine
Luftraumüberwachung	ja	ja	mittel	konstant	Joseph et al. (2012a), Mantiply et al. (1997)	keine

### **3.3 Zusammenstellung der erhobenen Immissions- und Expositionsdaten im Zwischenfrequenzbereich**

In den folgenden Abschnitten werden die aus den zugrunde gelegten wissenschaftlichen Arbeiten ableitbaren Immissions- und Expositionsdaten tabellarisch und grafisch zusammengefasst.

Vorausgeschickt werden muss dazu, dass die schlussendlich verbleibende Anzahl verwertbarer Publikationen deutlich unter jener Anzahl liegt, die zunächst als potenziell verwertbar identifiziert wurden. Es existiert grundsätzlich eine Vielzahl von Publikationen, die valide Messdaten hinsichtlich der Exposition von Personen in der Umgebung von Feldquellen, die relevante Immissionen im Zwischenfrequenzbereich erzeugen, enthalten. Viele dieser Quellen verursachen jedoch auch bedeutende Immissionen im ELF-Bereich (< 300 Hz), wodurch in vielen der erhobenen Publikationen bei der messtechnischen Bestimmung der Immissionen der ELF- und Zwischenfrequenzbereich nicht getrennt erfasst wurden, sondern mit Breitband-Messgeräten gemessen wurde, die eine Messbandbreite beginnend bei einigen bzw. einigen zehn Hertz bis zu einer oberen Grenzfrequenz typischerweise zwischen 800 Hz und 400 kHz besitzen.

Dadurch ist in vielen dieser Arbeiten die Exposition durch elektromagnetische Felder im Zwischenfrequenzbereich 300 Hz – 1 MHz nicht quantitativ ableitbar, wodurch sie das grundlegende Einschlusskriterium nicht mehr erfüllten.

In den folgenden Kapiteln werden die erhobenen Daten, gruppiert nach Feldquellenkategorie und Feldquelle (Gerätetype) zunächst tabellarisch zusammengefasst, wobei pro Feldquelle die jeweils verfügbaren unterschiedlichen Immissionsgrößen (elektrische Feldstärke  $E$  und magnetische Feldstärke  $H$ ) bzw. Expositionsgrößen (Kontaktstrom  $I_c$ , induzierte Stromdichte  $J$ , induzierte elektrische Feldstärke  $E_i$ , spezifische Absorptionsrate SAR) in separate Tabellen gruppiert wurden. Die zunächst als potenziell verwertbar angesehenen Publikationen, die jedoch aufgrund des oben angesprochenen grundlegenden Einschlusskriteriums schlussendlich nicht verwertbar waren und daher von der weiteren Analyse ausgeschlossen werden mussten, werden jeweils am Anfang jedes Feldquellenkapitels angegeben. Für jede Feldquellenkategorie wurden schließlich die verfügbaren Daten, soweit sinnvoll vergleichbar, grafisch zusammengefasst und am Ende des jeweiligen Feldquellenkategorie-Kapitels dargestellt, wobei einerseits Darstellungen der Immissions- bzw. Expositionsgrößen selbst, als auch Darstellungen der zugehörigen Expositionsindizes (Verhältnis von Immission bzw. Exposition zum jeweils anzuwendenden Referenzwert (Auslöseschwelle) bzw. Basiswert (Expositionsgrenzwert)) angeführt wurden. Bei Feldquellen bei denen angenommen werden kann, dass die von ihnen verursachten Immissionen für die Allgemeinbevölkerung relevant sind, erfolgte die Berechnung der Expositionsindizes unter Zugrundelegung der Referenzwerte bzw. Basiswerte der EU-Ratsempfehlung 1999/519/EG (Europäische Gemeinschaft, 1999), und es wurde auch die „Relevanz“ der jeweiligen Quelle insofern abgeschätzt in dem die Feldquellen hinsichtlich der Anzahl der durch sie regelmäßig exponierten Personen grob in die Kategorien „gering“, „mittel“ und „hoch“ eingeteilt wurden. Bei Feldquellen, von denen angenommen werden kann, dass sie praktisch ausschließlich an Arbeitsplätzen eingesetzt werden erfolgte die Berechnung der Expositionsindizes auf Grundlage der Auslöseschwellen bzw. Expositionsgrenzwerte gemäß 2013/35/EU (EU, 2013). Die Berechnung der Expositionsindizes erfolgte dabei immer in konservativer Weise, d.h., bei Breitbandmessergebnissen unter Zugrundelegung des strengsten Limits im Messfrequenzbereich.

### **3.3.1 Beleuchtungseinrichtungen**

Die erhobenen Daten zeigen, zwar offensichtlich stark abhängig vom jeweiligen Lampentyp, jedoch konsistent in unterschiedlichen Publikationen, die Möglichkeit relativ hoher elektrischer Feldstärken in unmittelbarer Nähe zu Energiesparlampen. Bei Zugrundelegung der Referenzwerte gemäß EU-Ratsempfehlung 1999/519/EU ergeben sich in diesen Fällen Expositionsindizes bis zu ca. 10-20. Die wenigen verfügbaren Arbeiten hinsichtlich der dadurch erzeugten induzierten Stromdichten bzw. elektrischen Feldstärken im Gewebe ergeben jedoch keine Hinweise auf Überschreitungen der zugrundeliegenden Basiswerte (Nadakuduti et al., 2012, 2010; Schmid et al., 2014a).

### 3.3.1.1 Energiesparlampen

In der Untergruppe der Energiesparlampen wurden aufgrund der in Kapitel 3.1.2 erläuterten Kriterien die Publikationen Bundesamt für Strahlenschutz (2008), Farag et al. (1998), Mader und Peralta (1992), National Research Council (1997), Neitzke et al. (2006) und Preece et al. (1997) ausgeschlossen.

**Tabelle 3.12:** Liste der Immissionswerte der elektrischen Feldstärke E in V/m für die Untergruppe Energiesparlampen der Kategorie Beleuchtungseinrichtungen.

Publikation	Immissionswert E [V/m]	Frequenz [Hz]	Messposition	Messmethode	Kommentar
Aerts et al. (2017)	35	35-51k	20 cm (nicht näher definiert)	frequenzselektiv	peak; 30s max hold
	40.15	35-51k	20 cm (nicht näher definiert)	breitbandig	peak; 30s max hold
Bakos et al. (2010)	216	1.2-100k	15 cm (nicht näher definiert)	breitbandig	peak
	168	1.2-100k	15 cm (nicht näher definiert)	breitbandig	30s Mittelwert
Dürrenberger et al. (2004)	< 1	10-500k	30 cm (nicht näher definiert)	frequenzselektiv	
Nadakuduti et al. (2010)	433	50k	15 cm (Mittelpunkt-Mittelpunkt)	frequenzselektiv	peak; 30s max hold
	497%	50k	15 cm (Mittelpunkt-Mittelpunkt)	frequenzselektiv	ICNIRP 1998 Allgemeinbevölkerung; peak; 30s max hold
Van Den Bossche et al. (2015)	1244.9	45k	0 cm (nicht näher definiert)	frequenzselektiv	30s Mittelwert

**Tabelle 3.13:** Liste der Immissionswerte der magnetischen Feldstärke für die Untergruppe Energiesparlampen der Kategorie Beleuchtungseinrichtungen.

Publikation	Immissionswert H [A/m]	Frequenz [Hz]	Messposition	Messmethode	Kommentar
Aerts et al. (2017)	0.03	35-51k	20 cm (nicht näher definiert)	frequenzselektiv	peak; 30s max hold
	0.11	35-51k	20 cm (nicht näher definiert)	breitbandig	peak; 30s max hold
Dürrenberger et al. (2004)	0.023	10-500k	30 cm (nicht näher definiert)	frequenzselektiv	
Kurokawa et al. (2004)	0.01328	10-150k	50 cm (nicht näher definiert)	breitbandig	peak; 1s Maximalwert
Nadakuduti et al. (2010)	0.105	50k	15 cm (Mittelpunkt-Mittelpunkt)	frequenzselektiv	peak; 30s max hold
	2.10%	50k	15 cm (Mittelpunkt-Mittelpunkt)	frequenzselektiv	ICNIRP 1998 Allgemeinbevölkerung; peak; 30s max hold

**Tabelle 3.14:** Liste der Expositionswerte der induzierten Stromdichte für die Untergruppe Energiesparlampen der Kategorie Beleuchtungseinrichtungen.

Publikation	Expositionswert $J$ [ $\text{mA}/\text{m}^2$ ]	Frequenz [Hz]	Messposition	Messmethode	Kommentar
Nadakuduti et al. (2010)	8.6	47.1k	2 cm (Geräteoberfläche- Geräteoberfläche)	frequenzselektiv	gemessen; Mittelwert über $1\text{cm}^2$
Nadakuduti et al. (2012)	8.61	47.1k	2 cm (Geräteoberfläche- Geräteoberfläche)	frequenzselektiv	gemessen; Mittelwert über $1\text{cm}^2$

**Tabelle 3.15:** Liste der Expositionswerte der induzierten elektrischen Feldstärke für die Untergruppe Energiesparlampen der Kategorie Beleuchtungseinrichtungen.

Publikation	Expositionswert $E_i$ [ $\text{V}/\text{m}$ ]	Frequenz [Hz]	Messposition	Messmethode	Kommentar
Schmid et al. (2014a)	3.5	50k	10 cm von Lampenunterkante bis Kopf	-	RMS; Mittelwert über $2 \times 2 \times 2 \text{ mm}^3$
	1	150k	10 cm von Lampenunterkante bis Kopf	-	RMS; Mittelwert über $2 \times 2 \times 2 \text{ mm}^3$

### 3.3.1.2 Niedervolt Halogenspots mit Transformator

**Tabelle 3.16:** Liste der Immissionswerte der elektrischen Feldstärke für die Untergruppe Niedervolt Halogenspots mit Transformator der Kategorie Beleuchtungseinrichtungen.

Publikation	Immissionswert $E$ [ $\text{V}/\text{m}$ ]	Frequenz [Hz]	Messposition	Messmethode	Kommentar
Aerts et al. (2017)	4.9	32-46k	20 cm (nicht näher definiert)	frequenzselektiv	peak; 30s max hold
	0.06 Expositionswert	32-46k	20 cm (nicht näher definiert)	frequenzselektiv	ICNIRP 2010 Allgemeinbevölkerung; peak; 30s max hold
	6.91	15k, 32-60k	20 cm (nicht näher definiert)	breitbandig	peak; 30s max hold

**Tabelle 3.17:** Liste der Immissionswerte der magnetischen Feldstärke für die Untergruppe Niedervolt Halogenspots mit Transformator der Kategorie Beleuchtungseinrichtungen.

Publikation	Immissionswert $H$ [ $\text{A}/\text{m}$ ]	Frequenz [Hz]	Messposition	Messmethode	Kommentar
Aerts et al. (2017)	1.51	15k	20 cm (nicht näher definiert)	breitbandig	peak; 30s max hold

### 3.3.1.3 LED Lampen / Leuchten

In der Untergruppe der LED Lampen / Leuchten wurden aufgrund der in Kapitel 3.1.2 erläuterten Kriterien die Publikationen Nadakuduti et al. (2012) sowie Ticleanu und Littlefair (2015) ausgeschlossen.

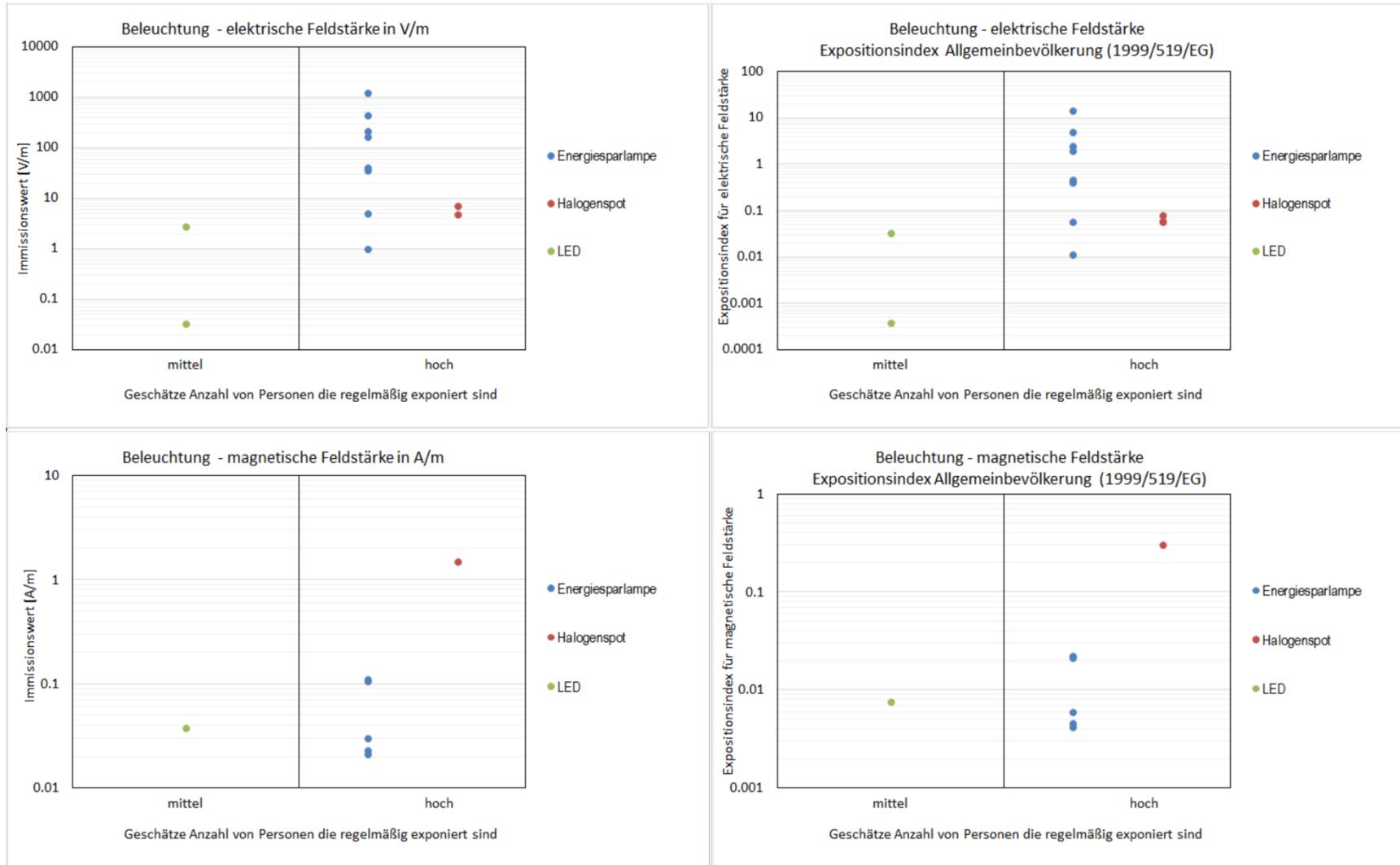
**Tabelle 3.18:** Liste der Immissionswerte der elektrischen Feldstärke für die Untergruppe LED Lampen / Leuchten der Kategorie Beleuchtungseinrichtungen.

Publikation	Immissionswert E [V/m]	Frequenz [Hz]	Messposition	Messmethode	Kommentar
Nadakuduti et al. (2010)	2.8	65k	15 cm (Mittelpunkt-Mittelpunkt)	frequenzselektiv	peak; 30s max hold
	3.30%	65k	15 cm (Mittelpunkt-Mittelpunkt)	frequenzselektiv	ICNIRP 1998 Allgemeinbevölkerung; peak; 20s max hold

**Tabelle 3.19:** Liste der Immissionswerte der magnetischen Feldstärke für die Untergruppe LED Lampen / Leuchten der Kategorie Beleuchtungseinrichtungen.

Publikation	Immissionswert H [A/m]	Frequenz [Hz]	Messposition	Messmethode	Kommentar
Nadakuduti et al. (2010)	0.038	65k	15 cm (Mittelpunkt-Mittelpunkt)	frequenzselektiv	peak; 30s max hold
	0.80%	65k	15 cm (Mittelpunkt-Mittelpunkt)	frequenzselektiv	ICNIRP 1998 Allgemeinbevölkerung; peak; 20s max hold

### 3.3.1.4 Diagramme



**Abbildung 3.1:** Graphische Darstellung der Immissionswerte (links) sowie der zugehörigen Expositionsindizes für die Allgemeinbevölkerung (rechts) für die elektrische (oben) und magnetische (unten) Feldstärke bei Quellen aus der Kategorie der Beleuchtungseinrichtungen.

### 3.3.2 Elektronische Artikelsicherungssysteme (EAS)

Zwei der gegenwärtig eingesetzten EAS-Technologien mit relevanten Zwischenfrequenzimmissionen, nämlich die akustomagnetischen (AM) Systeme und elektromagnetischen (EM) Systeme, decken gemeinsam ca. 50% aller gegenwärtig installierten EAS in Deutschland ab (Schmid et al., 2012), wobei die AM-Technologie allein ca. 48% Marktanteil besitzt und die EM-Technologie nur mehr relativ selten anzutreffen ist (< 2% Marktanteil). Da diese Technologien bereits relativ alt sind und bald nach ihrer Einführung als potenzielle Feldquelle identifiziert wurden, liegen dafür vergleichsweise umfangreiche und detaillierte Daten vor.

Vor allem in der Nähe der Antennen von AM-Systemen (in Europa typischer Weise bei 58 kHz betrieben) treten dabei beachtliche magnetische Feldstärken auf, die auch in Entfernungen von mehr als 50 cm zu den Antennen noch deutlich oberhalb der gegenwärtig anzuwendenden Referenzwerte für die Allgemeinbevölkerung liegen (z.B. 5 A/m gemäß EU-Ratsempfehlung 1999/519/EG). Verfügbare Daten im Hinblick auf die im Körper induzierten Stromdichten und elektrische Feldstärken zeigen, dass bei Aufenthalt in unmittelbarer Nähe (< 20 cm) zu den Antennen eine Überschreitung der Basiswerte in der Praxis nicht ausgeschlossen werden kann. Dies gilt insbesondere für Kinder, da sich deren Kopf bei vielen der verwendeten Antennen in Höhe des Feldstärkemaximums (ca. 80-100 cm über dem Boden) befindet (Schmid et al., 2014b, 2012). Der Grund für diese Problematik ist wohl darin zu sehen, dass die europäische Norm (EN 62369-1), die für EAS im Zuge des Zulassungsverfahrens im Hinblick auf die Exposition von Personen anzuwenden ist, eine Prüfvorschrift definiert, die ausschließlich von einer erwachsenen Person, seitlich zur Antenne stehend in 20 cm Distanz ausgeht. Diese Prüfvorschrift trägt bestenfalls dem (vom Hersteller definierten) bestimmungsgemäßen Gebrauch Rechnung, jedoch nicht dem (in der Praxis sich ergebenden) vorhersehbaren Gebrauch, bei dem man den Antennen wesentlich näher als 20 cm kommen kann (nicht ausschließlich seitlich zur Antenne stehend), und vor allem dem Umstand, dass der Kopf von Kindern im Feldmaximum zu liegen kommt (der Kopf von Erwachsenen überragt die typischer Weise in ca. 150 cm Höhe befindliche Oberkante der Antenne in den meisten Fällen deutlich und befindet sich daher bereits in einem Bereich relativ geringer Feldstärken).

Weiters interessant im Zusammenhang mit der Umsetzung der Richtlinie 2013/35/EU bezüglich elektromagnetischer Felder am Arbeitsplatz erscheint die Exposition der Hände durch Deaktivatoren für Einwegetiketten der AM-EAS Technologie. Bei der Deaktivierung der Einwegetiketten wird ein starker Magnetfeldimpuls (abklingend oszillierend) zur Entmagnetisierung der Etiketten erzeugt. Ältere Geräte verwenden dazu Frequenzen im ELF-Bereich, neuere Geräte im Zwischenfrequenzbereich (ca. 1,6 kHz). Auf der Oberfläche des Deaktivators (wo sich die Hände des Kassenspersonals während des Deaktivierungsprozesses befinden) herrschen Spitzenfeldstärken in der Größenordnung von ca. 8 kA/m, was einem Expositionsexponenten von deutlich mehr als 10 entspricht (bei Zugrundelegung der hohen Auslöseschwellen für Gliedmaßen gemäß 2013/35/EU). Verlässliche Daten im Hinblick auf die im Körper induzierten elektrischen Feldstärken zum Vergleich mit den Expositionsgrenzwerten existieren bisher nicht.

### 3.3.2.1 Akustomagnetische Artikelsicherungssysteme

In der Untergruppe der akustomagnetischen Artikelsicherungssysteme wurden aufgrund der in Kapitel 3.1.2 erläuterten Kriterien die Publikationen (Leitgeb et al., 2013) und van der Togt et al. (2008) ausgeschlossen.

**Tabelle 3.20:** Liste der Immissionswerte der magnetischen Feldstärke H in A/m für die Untergruppe Akustomagnetische Artikelsicherungssysteme der Kategorie elektronische Artikelsicherungssysteme (EAS).

Publikation	Immissionswert H [A/m]	Frequenz [Hz]	Messposition	Messmethode	Kommentar
Casamento (1999)	51.9	58k	36 cm (nicht näher definiert)	breitbandig	
Deutsche Gesetzliche Unfallversicherung und Börner (2011)	16.4	58k	- (nicht näher definiert)	-	
Harris et al. (2000)	26.3	58k	100 cm (nicht näher definiert)	breitbandig	
	3.3	131k	100 cm (nicht näher definiert)	breitbandig	
Joseph et al. (2012c)	42.4	58k	20 cm (nicht näher definiert)	frequenzselektiv	RMS
	8.48 Exposure Index	58k	20 cm (nicht näher definiert)	frequenzselektiv	RMS
	25.8	58k	20 cm (nicht näher definiert)	frequenzselektiv	RMS
Neitzke et al. (2006)	64.32	39.5k	- (nicht näher definiert)	-	
	16.48	58k	- (nicht näher definiert)	-	
	29.2	132k	- (nicht näher definiert)	-	
Roivainen et al. (2014)	151.2	58k	20 cm (von Geräteoberfläche)	breitbandig	peak
Schmid et al. (2012)	238.4	58k	10 cm (von Geräteoberfläche)	breitbandig	peak
	124.8	58k	20 cm (von Geräteoberfläche)	breitbandig	peak
	72.8	58k	35 cm (von Geräteoberfläche)	breitbandig	peak
	85.36	58k	10 cm (von Geräteoberfläche)	breitbandig	peak
	60.56	58k	20 cm (von Geräteoberfläche)	breitbandig	peak
	29.6	58k	35 cm (von Geräteoberfläche)	breitbandig	peak
	189.6	58k	10 cm (von Geräteoberfläche)	breitbandig	peak
	116	58k	20 cm (von Geräteoberfläche)	breitbandig	peak
	55.68	58k	35 cm (von Geräteoberfläche)	breitbandig	peak

Publikation	Immissionswert H [A/m]	Frequenz [Hz]	Messposition	Messmethode	Kommentar
	177.6	58k	10 cm (von Geräteoberfläche)	breitbandig	peak
	96	58k	20 cm (von Geräteoberfläche)	breitbandig	peak
	44.8	58k	35 cm (von Geräteoberfläche)	breitbandig	peak
	8000	1.6k	1 cm (von Geräteoberfläche)	breitbandig	peak
	2960	1.6k	15 cm (von Geräteoberfläche)	breitbandig	peak
Schmid et al. (2014b)	240.8	58k	10 cm (von Geräteoberfläche)	breitbandig	peak
	104.8	58k	20 cm (von Geräteoberfläche)	breitbandig	peak
	40.96	58k	35 cm (von Geräteoberfläche)	breitbandig	peak
	257.6	58k	10 cm (von Geräteoberfläche)	breitbandig	peak
	118.4	58k	20 cm (von Geräteoberfläche)	breitbandig	peak
	56.8	58k	35 cm (von Geräteoberfläche)	breitbandig	peak
Trulsson et al. (2007)	35	58k	20 cm (von Geräteoberfläche)	-	RMS
	17	58k	20 cm (von Geräteoberfläche)	-	RMS
WHO (2007a)	52	58k	36 cm (nicht näher definiert)	-	

**Tabelle 3.21:** Liste der Expositionswerte der induzierten Stromdichte für die Untergruppe Akustomagnetische Artikelsicherungssysteme der Kategorie elektronische Artikelsicherungssysteme (EAS).

Publikation	Expositionswert J [mA/m <sup>2</sup> ]	Frequenz [Hz]	Messposition	Messmethode	Kommentar
Schmid et al. (2012)	436	1.6k	Hand direkt auf Oberfläche (Deaktivator)	-	Hand; peak; Mittelwert über 1cm <sup>2</sup>
	503	1.6k	Hand direkt auf Oberfläche (Deaktivator)	-	Hand; peak; Mittelwert über 1cm <sup>2</sup>
	68	58k	20 cm (seitlich stehend)	-	ZNS; peak; Mittelwert über 1cm <sup>2</sup>
	799	58k	20 cm (seitlich stehend)	-	alle Gewebe; peak; Mittelwert über 1cm <sup>2</sup>
	149	58k	10 cm (mit Rücken zum Gerät)	-	ZNS; peak; Mittelwert über 1cm <sup>2</sup>
	1193	58k	10 cm (mit Rücken zum Gerät)	-	alle Gewebe; peak; Mittelwert über 1cm <sup>2</sup>
	429	58k	3,5 cm (mit Rücken zum Gerät)	-	ZNS; peak; Mittelwert über 1cm <sup>2</sup>
	2723	58k	3,5 cm (mit Rücken zum Gerät)	-	alle Gewebe; peak; Mittelwert über 1cm <sup>2</sup>

Publikation	Expositionswert J [mA/m <sup>2</sup> ]	Frequenz [Hz]	Messposition	Messmethode	Kommentar
	30	58k	20 cm (seitlich stehend)	-	ZNS; peak; Mittelwert über 1cm <sup>2</sup>
	450	58k	20 cm (seitlich stehend)	-	alle Gewebe; peak; Mittelwert über 1cm <sup>2</sup>
	60	58k	10 cm (mit Rücken zum Gerät)	-	ZNS; peak; Mittelwert über 1cm <sup>2</sup>
	827	58k	10 cm (mit Rücken zum Gerät)	-	alle Gewebe; peak; Mittelwert über 1cm <sup>2</sup>
	266	58k	3,5 cm (mit Rücken zum Gerät)	-	ZNS; peak; Mittelwert über 1cm <sup>2</sup>
	2403	58k	3,5 cm (mit Rücken zum Gerät)	-	alle Gewebe; peak; Mittelwert über 1cm <sup>2</sup>

**Tabelle 3.22:** Liste der Expositionswerte der induzierten elektrischen Feldstärke für die Untergruppe Akustomagnetische Artikelsicherungssysteme der Kategorie elektronische Artikelsicherungssysteme (EAS).

Publikation	Expositionswert E <sub>i</sub> [V/m]	Frequenz [Hz]	Messposition	Messmethode	Kommentar
Li und Wu, (2014)	2	125k	20 cm (Geräteoberfläche - Achsel des Körpermodells)	-	ZNS; 99% Perzentile; Mittelwert über 2x2x2 mm <sup>3</sup>
	1.38	125k	20 cm (Geräteoberfläche - Achsel des Körpermodells)	-	ZNS; 99% Perzentile; Mittelwert über 2x2x2 mm <sup>3</sup>
	0.56	125k	20 cm (Geräteoberfläche - Achsel des Körpermodells)	-	alle Gewebe; 99% Perzentile; Mittelwert über 2x2x2 mm <sup>3</sup>
	0.75	125k	20 cm (Geräteoberfläche - Achsel des Körpermodells)	-	alle Gewebe; 99% Perzentile; Mittelwert über 2x2x2 mm <sup>3</sup>
Li und Wu (2015)	4.61e-2 V/m/A	125k	20 cm (Geräteoberfläche - Achsel des Körpermodells)	-	alle Gewebe; 99% Perzentile; Mittelwert über 2x2x2 mm <sup>3</sup>
	3.60e-2 V/m/A	125k	20 cm (Geräteoberfläche - Achsel des Körpermodells)	-	ZNS; 99% Perzentile; Mittelwert über 2x2x2 mm <sup>3</sup>
Schmid et al. (2014b)	70.2	1.6k	Hand direkt auf Oberfläche (Deaktivator)	-	Hand; peak; Mittelwert über 2x2x2 mm <sup>3</sup>
	72.7	1.6k	Hand direkt auf Oberfläche (Deaktivator)	-	Hand; peak; Mittelwert über 2x2x2 mm <sup>3</sup>
	0.65	58k	20 cm (seitlich stehend)	-	ZNS; peak; Mittelwert über 2x2x2 mm <sup>3</sup>
	9.03	58k	20 cm (seitlich stehend)	-	alle Gewebe; peak; Mittelwert über 2x2x2 mm <sup>3</sup>
	1.2	58k	10 cm (mit Rücken zum Gerät)	-	ZNS; peak; Mittelwert über 2x2x2 mm <sup>3</sup>
	17.6	58k	10 cm (mit Rücken zum Gerät)	-	alle Gewebe; peak; Mittelwert über 2x2x2 mm <sup>3</sup>

Publikation	Expositionswert $E_i$ [V/m]	Frequenz [Hz]	Messposition	Messmethode	Kommentar
	3.68	58k	3,5 cm (mit Rücken zum Gerät)	-	ZNS; peak; Mittelwert über 2x2x2 mm <sup>3</sup>
	29.4	58k	3,5 cm (mit Rücken zum Gerät)	-	alle Gewebe; peak; Mittelwert über 2x2x2 mm <sup>3</sup>
	0.16	58k	20 cm (seitlich stehend)	-	ZNS; peak; Mittelwert über 2x2x2 mm <sup>3</sup>
	2.57	58k	20 cm (seitlich stehend)	-	alle Gewebe; peak; Mittelwert über 2x2x2 mm <sup>3</sup>
	0.26	58k	10 cm (mit Rücken zum Gerät)	-	ZNS; peak; Mittelwert über 2x2x2 mm <sup>3</sup>
	9.28	58k	10 cm (mit Rücken zum Gerät)	-	alle Gewebe; peak; Mittelwert über 2x2x2 mm <sup>3</sup>
	3.9	58k	3,5 cm (mit Rücken zum Gerät)	-	ZNS; peak; Mittelwert über 2x2x2 mm <sup>3</sup>
	13.5	58k	3,5 cm (mit Rücken zum Gerät)	-	alle Gewebe; peak; Mittelwert über 2x2x2 mm <sup>3</sup>
	0.9	58k	20 cm (seitlich stehend)	-	ZNS; peak; Mittelwert über 2x2x2 mm <sup>3</sup>
	6.09	58k	20 cm (seitlich stehend)	-	alle Gewebe; peak; Mittelwert über 2x2x2 mm <sup>3</sup>
	1.74	58k	10 cm (mit Rücken zum Gerät)	-	ZNS; peak; Mittelwert über 2x2x2 mm <sup>3</sup>
	19.7	58k	10 cm (mit Rücken zum Gerät)	-	alle Gewebe; peak; Mittelwert über 2x2x2 mm <sup>3</sup>
	2.38	58k	20 cm (seitlich stehend)	-	ZNS; peak; Mittelwert über 2x2x2 mm <sup>3</sup>
	3.41	58k	20 cm (seitlich stehend)	-	alle Gewebe; peak; Mittelwert über 2x2x2 mm <sup>3</sup>
	7.27	58k	3,5 cm (mit Rücken zum Gerät)	-	ZNS; peak; Mittelwert über 2x2x2 mm <sup>3</sup>
	17.1	58k	3,5 cm (mit Rücken zum Gerät)	-	alle Gewebe; peak; Mittelwert über 2x2x2 mm <sup>3</sup>

**Tabelle 3.23:** Liste der Expositionswerte der spezifischen Absorptionsrate für die Untergruppe Akustomagnetische Artikelsicherungssysteme der Kategorie elektronische Artikelsicherungssysteme (EAS).

Publikation	Expositionswert SAR [W/kg]	Frequenz [Hz]	Messposition	Messmethode	Kommentar
Li und Wu (2014)	8.82E-04	125k	20 cm (Geräteoberfläche - Achsel des Körpermodells)	-	peak; 10g Mittelwert
	8.28E-04	125k	20 cm (Geräteoberfläche - Achsel des Körpermodells)	-	peak; 10g Mittelwert
Li und Wu (2015)	1.31e-2 W/kg/A <sup>2</sup>	125k	20 cm (Geräteoberfläche - Achsel des Körpermodells)	-	peak; 10g Mittelwert
	4.92e-3 W/kg/A <sup>2</sup>	125k	20 cm (Geräteoberfläche - Achsel des Körpermodells)	-	peak; 10g Mittelwert
	1.00e-3 W/kg/A <sup>2</sup>	125k	20 cm (Geräteoberfläche - Achsel des Körpermodells)	-	peak; Ganzkörpermittelwert

### 3.3.2.2 Elektromagnetische Artikelsicherungssysteme

In der Untergruppe der Elektromagnetischen Artikelsicherungssysteme wurden Aufgrund der in Kapitel 3.1.2 erläuterten Kriterien die Publikationen Harris et al. (2000), Li und Gandhi (2005) sowie Leitgeb et al. (2013) ausgeschlossen.

**Tabelle 3.24:** Liste der Immissionswerte der elektrischen Feldstärke für die Untergruppe Elektromagnetische Artikelsicherungssysteme der Kategorie elektronische Artikelsicherungssysteme (EAS).

Publikation	Immissionswert E [V/m]	Frequenz [Hz]	Messposition	Messmethode	Kommentar
Floderus et al. (2002)	40	650	10 cm (nicht näher definiert)	frequenzselektiv	
	1069	650	Sonde am Körper des Arbeiters befestigt	frequenzselektiv	
	100	5k, 7.5k	10 cm (nicht näher definiert)	frequenzselektiv	
	663	5k, 7.5k	Sonde am Körper des Arbeiters befestigt	frequenzselektiv	

**Tabelle 3.25:** Liste der Immissionswerte der magnetischen Feldstärke für die Untergruppe Elektromagnetische Artikelsicherungssysteme der Kategorie elektronische Artikelsicherungssysteme (EAS).

Publikation	Immissionswert H [A/m]	Frequenz [Hz]	Messposition	Messmethode	Kommentar
Casamento (1999)	57.6	535.7	36 cm (nicht näher definiert)	breitbandig	
Deutsche Gesetzliche Unfallversicherung und Börner (2011)	20	6.3k	- (nicht näher definiert)	-	
Floderus et al. (2002)	40	650	10 cm (nicht näher definiert)	frequenzselektiv	
	1.59	650	- (nicht näher definiert)	frequenzselektiv	
	71.6	5k, 7.5k	10 cm (nicht näher definiert)	frequenzselektiv	
	27.2	5k, 7.5k	- (nicht näher definiert)	frequenzselektiv	
Joseph et al. (2012c)	108.23	485	20 cm (nicht näher definiert)	frequenzselektiv	RMS
	8.56 Expositionsindex	485	20 cm (nicht näher definiert)	frequenzselektiv	RMS
	91.29	485	20 cm (nicht näher definiert)	frequenzselektiv	RMS
Neitzke et al. (2006)	1025.68	5k, 7.5k	- (nicht näher definiert)	-	
Roivainen et al. (2014)	63.2	5-7.5k	20 cm (von Geräteoberfläche)	frequenzselektiv	peak

Publikation	Immissionswert H [A/m]	Frequenz [Hz]	Messposition	Messmethode	Kommentar
Schmid et al. (2014b)	90.88	5k	10 cm (von Geräteoberfläche)	breitbandig	RMS
	38.24	5k	20 cm (von Geräteoberfläche)	breitbandig	RMS
	19.28	5k	35 cm (von Geräteoberfläche)	breitbandig	RMS
Trulsson et al. (2007)	95	5k, 7.5k	20 cm (von Geräteoberfläche)	-	RMS
	47	5k, 7.5k	20 cm (von Geräteoberfläche)	-	RMS
WHO (2007a)	80	1k	41 cm (nicht näher definiert)	-	

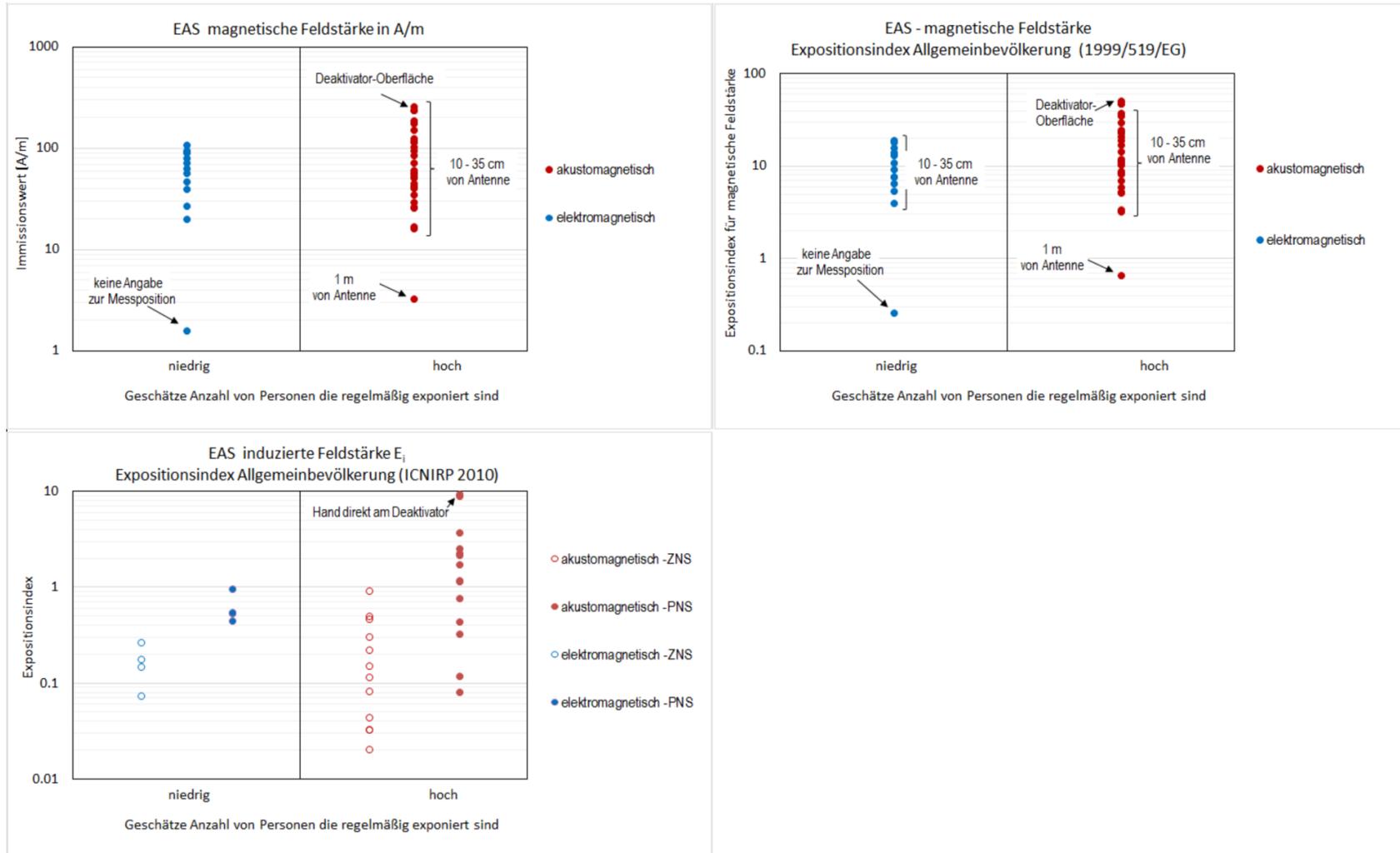
**Tabelle 3.26:** Liste der Expositionswerte des Kontaktstromes für die Untergruppe Elektromagnetische Artikelsicherungssysteme der Kategorie elektronische Artikelsicherungssysteme (EAS).

Publikation	Expositionswert $I_c$ [mA]	Frequenz [Hz]	Messposition	Messmethode	Kommentar
Floderus et al. (2002)	1.1	5k, 7.5k	- (nicht näher definiert)	frequenzselektiv	Mittelwert über Armquerschnitt

**Tabelle 3.27:** Liste der Expositionswerte der induzierten elektrischen Feldstärke für die Untergruppe Elektromagnetische Artikelsicherungssysteme der Kategorie elektronische Artikelsicherungssysteme (EAS).

Publikation	Expositionswert $E_i$ [V/m]	Frequenz [Hz]	Messposition	Messmethode	Kommentar
Schmid et al. (2014b)	0.05	5k	20 cm (seitlich stehend)	-	ZNS; RMS; Mittelwert über 2x2x2 mm <sup>3</sup>
	0.36	5k	20 cm (seitlich stehend)	-	alle Gewebe; RMS; Mittelwert über 2x2x2 mm <sup>3</sup>
	0.1	5k	10 cm (mit Rücken zum Gerät)	-	ZNS; RMS; Mittelwert über 2x2x2 mm <sup>3</sup>
	0.37	5k	10 cm (mit Rücken zum Gerät)	-	alle Gewebe; RMS; Mittelwert über 2x2x2 mm <sup>3</sup>
	0.12	5k	20 cm (seitlich stehend)	-	ZNS; RMS; Mittelwert über 2x2x2 mm <sup>3</sup>
	0.3	5k	20 cm (seitlich stehend)	-	alle Gewebe; RMS; Mittelwert über 2x2x2 mm <sup>3</sup>
	0.18	5k	3,5 cm (mit Rücken zum Gerät)	-	ZNS; RMS; Mittelwert über 2x2x2 mm <sup>3</sup>
	0.65	5k	3,5 cm (mit Rücken zum Gerät)	-	alle Gewebe; RMS; Mittelwert über 2x2x2 mm <sup>3</sup>

### 3.3.2.3 Diagramme



**Abbildung 3.2:** Graphische Darstellung der Immissionswerte (oben links) sowie der zugehörigen Expositionsindizes für die Allgemeinbevölkerung (oben rechts) für die magnetische Feldstärke, sowie die Expositionsindizes für die induzierte elektrische Feldstärke (unten) bei Quellen aus der Kategorie der elektronischen Artikelsicherungsanlagen.

### 3.3.3 Geräte für die Energieversorgung

In der Kategorie der Geräte für die Energieversorgung wurden die verfügbaren Daten von Batterieladegeräten, Frequenzumrichtern (Schaltnetzteile, Inverter) und Geräte zur drahtlosen Energieübertragung zusammengefasst, wobei der weitaus größere Teil der vorhandenen Daten auf Systeme für die drahtlose Energieübertragung entfällt.

Anzumerken ist, dass für die Feldquellen Batterieladegeräte und Frequenzumrichter ausschließlich Daten aus einer Publikation vorhanden sind und dabei nur büro- und haushaltsübliche Vertreter dieser Gerätetypen untersucht wurden, also keine professionellen Batterieladegeräte (für z.B. Fahrzeugbatterien) und keine Frequenzumformer, wie sie in Großanlagen zur Energieverteilung und –erzeugung zum Einsatz kommen.

Obwohl (auch relativ leistungsarme) Batterieladegeräte, Schaltnetzteile, Inverter, etc., vor allem aus dem Bereich der Geräte-EMV (EMVG) bekannt dafür sind, elektromagnetische Immissionen im Zwischenfrequenzbereich zu verursachen, so sind die in der Praxis auftretenden Immissionen im Hinblick auf die Exposition von Personen offensichtlich gering. Selbst sehr nahe zu den untersuchten Geräten liegen die Expositionsindizes (auf Basis der gegenwärtigen Referenzwerte für die Allgemeinbevölkerung) deutlich unterhalb von eins.

Eine gänzlich andere Situation stellen Geräte für die drahtlose Energieübertragung dar, deren Verbreitung erst am Anfang steht, sowohl in Haushalt und Büro (z.B. zum drahtlosen Wiederaufladen von Akku-betriebenen Kleingeräten) als auch im professionellen Umfeld (z.B. Aufladestationen für Elektrofahrzeuge). Vor allem bei letztgenannten Systemen werden mit Frequenzen im Bereich mehrerer 10 kHz bis mehrere 100 kHz mehrere Kilowatt an Leistung übertragen, was zu entsprechend hohen magnetischen Streufeldern in der unmittelbaren Umgebung der Geräte führen kann. Die erhobenen Daten zeigen magnetische Feldstärken von bis zu mehreren 100 A/m für in der Praxis durchaus zugängliche Bereiche und zugehörige Expositionsindizes (bezüglich der magnetischen Feldstärke) im Bereich deutlich oberhalb von 10. Die bisher nur in sehr eingeschränktem Ausmaß zur Verfügung stehenden Daten hinsichtlich der im Körper induzierten elektrischen Feldstärken zeigen zwar, dass für in der Praxis übliche Abstände zu den Geräten wahrscheinlich mit keinen Überschreitungen der Basiswerte zu rechnen ist. Bei unmittelbarer Annäherung an die Geräte, wie dies z.B. im Zuge der Ausübung einschlägiger beruflicher Tätigkeiten der Fall sein kann, erscheinen Überschreitungen der Basisgrenzwerte jedoch als durchaus möglich.

### 3.3.3.1 Batterieladegerät

**Tabelle 3.28:** Liste der Immissionswerte der elektrischen Feldstärke für die Untergruppe Batterieladegerät der Kategorie der Geräte für die Energieversorgung.

Publikation	Immissionswert E [V/m]	Frequenz [Hz]	Messposition	Messmethode	Kommentar
	6.4	42-65k	20 cm (nicht näher definiert)	frequenzselektiv	peak; 30s max hold
Aerts et al. (2017)	0.35 Expositionindex	42-65k	20 cm (nicht näher definiert)	frequenzselektiv	ICNIRP 2010 Allgemeinbevölkerung; peak; 30s max hold
	11.56	20k, 42-65k	20 cm (nicht näher definiert)	breitbandig	peak; 30s max hold

**Tabelle 3.29:** Liste der Immissionswerte der magnetischen Feldstärke für die Untergruppe Batterieladegerät der Kategorie der Geräte für die Energieversorgung.

Publikation	Immissionswert H [A/m]	Frequenz [Hz]	Messposition	Messmethode	Kommentar
Aerts et al. (2017)	0.03	42-65k	20 cm (nicht näher definiert)	frequenzselektiv	peak; 30s max hold
	0.1	42-65k	20 cm (nicht näher definiert)	breitbandig	peak; 30s max hold

### 3.3.3.2 Drahtlose Energieübertragung

In der Untergruppe der drahtlosen Energieübertragung wurden Aufgrund der in Kapitel 3.1.2 erläuterten Kriterien die Publikationen Christ et al. (2013), Ibrahim et al. (2015), Ishihara et al. (2015), Kang et al. (2013), Kim et al. (2015), Laakso et al. (2012), Nadakuduti et al. (2015), Seckler et al. (2015), Wake et al. (2017) ausgeschlossen.

**Tabelle 3.30:** Liste der Immissionswerte der elektrischen Feldstärke für die Untergruppe drahtlose Energieübertragung der Kategorie der Geräte für die Energieversorgung.

Publikation	Immissionswert E [V/m]	Frequenz [Hz]	Messposition	Messmethode	Kommentar
Tell et al. (2014)	1.17	1.2-100k	Maximalwert im Bus	breitbandig	RMS
	0.545	10k	Maximalwert im Bus	frequenzselektiv	RMS

**Tabelle 3.31:** Liste der Immissionswerte der magnetischen Feldstärke für die Untergruppe drahtlose Energieübertragung der Kategorie der Geräte für die Energieversorgung.

Publikation	Immissionswert H [A/m]	Frequenz [Hz]	Messposition	Messmethode	Kommentar
Huang et al. (2009)	254	5-50k	0 cm vom Rand der Spule	-	
Laakso und Hirata (2013)	15	85k	Körpermodell ist so nah wie möglich an hinterer Stoßstange des KFZ positioniert	-	RMS
	20.3	85k	Körpermodell ist so nah wie möglich an hinterer Stoßstange des KFZ positioniert	-	RMS
Laakso et al. (2014)	10	85k	Körpermodell ist so nah wie möglich an hinterer Stoßstange des KFZ positioniert	-	RMS
	14	85k	Körpermodell ist so nah wie möglich an hinterer Stoßstange des KFZ positioniert	-	RMS
	15	85k	Körpermodell ist so nah wie möglich an hinterer Stoßstange des KFZ positioniert	-	RMS
	22	85k	Körpermodell ist so nah wie möglich an hinterer Stoßstange des KFZ positioniert	-	RMS
	90	85k	Körpermodell ist so nah wie möglich an hinterer Stoßstange des KFZ positioniert	-	RMS
	180	85k	Körpermodell ist so nah wie möglich an hinterer Stoßstange des KFZ positioniert	-	RMS
Shimamoto et al. (2015)	56.7	85k	gesuchtes Maximum rund um das Fahrzeug, wo sich eine Person aufhalten könnte	-	RMS
Tell et al. (2014)	6.384	1.2-100k	Maximalwert im Bus	breitbandig	RMS
	6.384	20k	Maximalwert im Bus	frequenzselektiv	RMS
Zhang et al. (2015)	21.84	9k-30M	14 cm (nicht näher definiert)	-	

**Tabelle 3.32:** Liste der Expositionswerte der induzierten elektrischen Feldstärke für die Untergruppe drahtlose Energieübertragung der Kategorie der Geräte für die Energieversorgung.

Publikation	Expositionswert E; [V/m]	Frequenz [Hz]	Messposition	Messmethode	Kommentar
Chen et al. (2014)	510 mV/m /Apeak	100k	Maximalwert aus verschiedenen Positionen und Abständen (90 Simulationen)	-	peak; Mittelwert über 2x2x2 mm <sup>3</sup>
	760 mV/m /Apeak	100k	Maximalwert aus verschiedenen Positionen und Abständen (90 Simulationen für D=0.25m, 54 für D=2.5m)	-	peak; Mittelwert über eine 5 mm lange Gerade
Laakso und Hirata (2013)	2.96	85k	Körpermodell ist so nah wie möglich an hinterer Stoßstange des KFZ positioniert	-	RMS; 99.9% Perzentile des Mittelwerts über 2x2x2 mm <sup>3</sup>
Laakso et al. (2014)	2.3	85k	Körpermodell ist so nah wie möglich an hinterer Stoßstange des KFZ positioniert	-	RMS; 99.9% Perzentile des Mittelwerts über 2x2x2 mm <sup>3</sup>
Shimamoto et al. (2015)	0.4	85k	0 cm; Körpermodell stehend	-	RMS; 99.9% Perzentile des Mittelwerts über 2x2x2 mm <sup>3</sup>
	0.92	85k	Körpermodell beim Fahrzeug hockend	-	RMS; 99.9% Perzentile des Mittelwerts über 2x2x2 mm <sup>3</sup>
	2.3	85k	Körpermodell liegend am Boden	-	RMS; 99.9% Perzentile des Mittelwerts über 2x2x2 mm <sup>3</sup>
	5.95	85k	Körpermodell liegend am Boden mit ausgestreckten Armen	-	RMS; 99.9% Perzentile des Mittelwerts über 2x2x2 mm <sup>3</sup>
	0.024	85k	Körpermodell sitzend am Fahrersitz	-	RMS; 99.9% Perzentile des Mittelwerts über 2x2x2 mm <sup>3</sup>
	0.55	85k	Körpermodell stehend auf der Spule im Boden	-	RMS; 99.9% Perzentile des Mittelwerts über 2x2x2 mm <sup>3</sup>
Sunohara et al. (2014)	80.7 mV/m / W	140k	1 cm (nicht näher definiert)	-	Mittelwert über 2x2x2 mm <sup>3</sup>
	91.2 mV/m / W	140k	1 cm (nicht näher definiert)	-	Mittelwert über 2x2x2 mm <sup>3</sup>
	80.0 mV/m / W	140k	1 cm (nicht näher definiert)	-	Mittelwert über 2x2x2 mm <sup>3</sup>

**Tabelle 3.33:** Liste der Expositionswerte der spezifischen Absorptionsrate für die Untergruppe drahtlose Energieübertragung der Kategorie der Geräte für die Energieversorgung.

Publikation	Expositionswert SAR [W/kg]	Frequenz [Hz]	Messposition	Messmethode	Kommentar
Chen et al. (2014)	1.2e-7 W/kg /Apeak <sup>2</sup>	100k	Maximalwert aus verschiedenen Positionen und Abständen (90 Simulationen)	-	peak; Maximalwert des wbSAR
	6.9e-6 W/kg /Apeak <sup>2</sup>	100k	Maximalwert aus verschiedenen Positionen und Abständen (90 Simulationen)	-	peak; Maximalwert des 1g psSAR Mittelwerts
	3.2e-6 W/kg /Apeak <sup>2</sup>	100k	Maximalwert aus verschiedenen Positionen und Abständen (90 Simulationen)	-	peak; Maximalwert des 10g psSAR Mittelwerts
Sunohara et al. (2014)	49.9 nW/kg / W	140k	1 cm (nicht näher definiert)	-	Maximalwert des 10g psSAR Mittelwerts
	67.0 nW/kg / W	140k	1 cm (nicht näher definiert)	-	Maximalwert des 10g psSAR Mittelwerts
	46.3 nW/kg / W	140k	1 cm (nicht näher definiert)	-	Maximalwert des 10g psSAR Mittelwerts

### 3.3.3.3 Frequenzumrichter

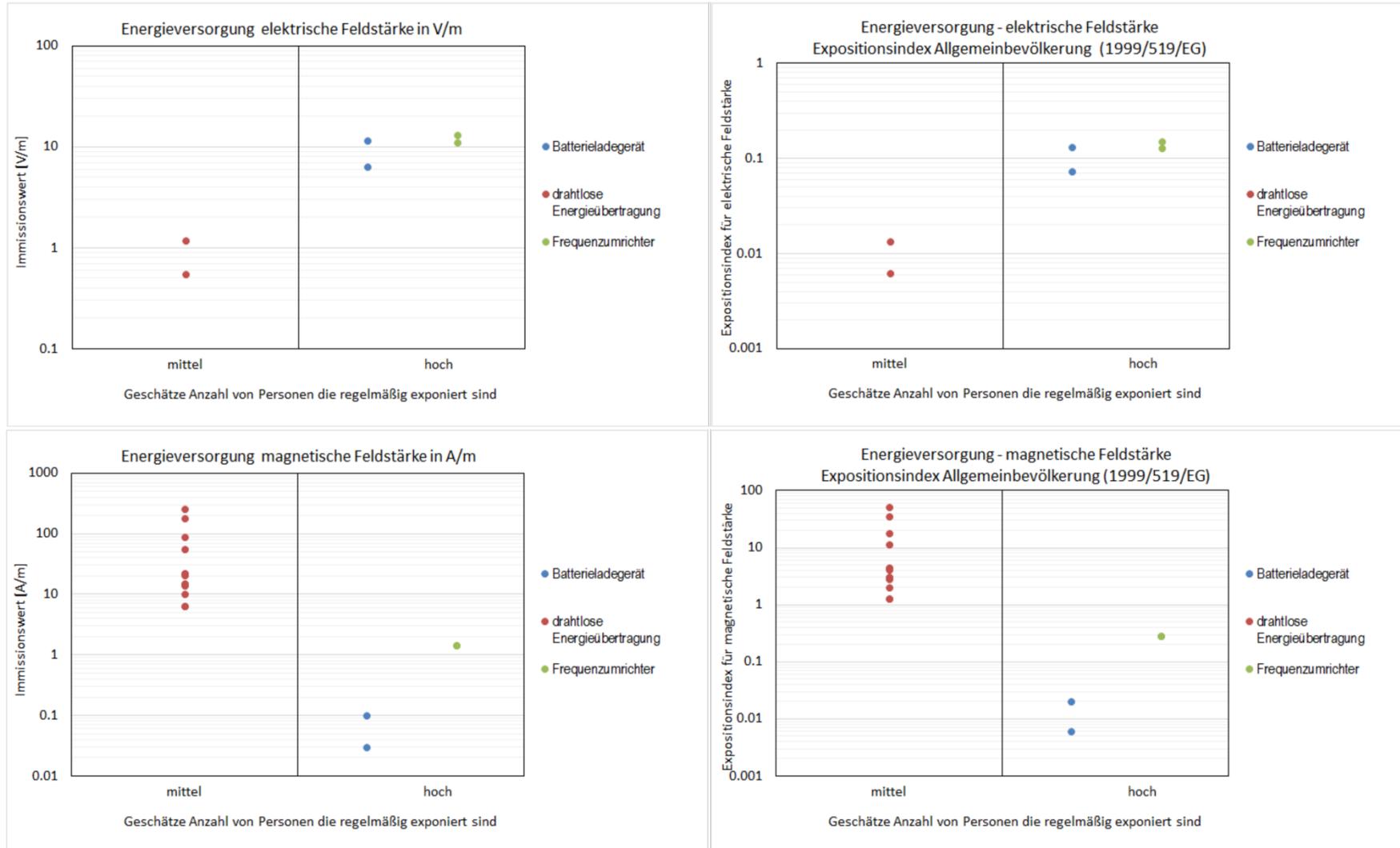
**Tabelle 3.34:** Liste der Immissionswerte der elektrischen Feldstärke für die Untergruppe Frequenzumrichter der Kategorie der Geräte für die Energieversorgung.

Publikation	Immissionswert E [V/m]	Frequenz [Hz]	Messposition	Messmethode	Kommentar
Aerts et al. (2017)	11.13	12k	20 cm (nicht näher definiert)	frequenzselektiv	peak; 30s max hold
	0.19 Expositionswert	12k	20 cm (nicht näher definiert)	frequenzselektiv	ICNIRP 2010 Allgemeinbevölkerung; peak; 30s max hold
	13.03	6k und Harmonische	20 cm (nicht näher definiert)	breitbandig	peak; 30s max hold

**Tabelle 3.35:** Liste der Immissionswerte der magnetischen Feldstärke für die Untergruppe Frequenzumrichter der Kategorie der Geräte für die Energieversorgung.

Publikation	Immissionswert H [A/m]	Frequenz [Hz]	Messposition	Messmethode	Kommentar
Aerts et al. (2017)	1.44	70k	20 cm (nicht näher definiert)	frequenzselektiv	peak; 30s max hold
	0.07 Expositionswert	70k	20 cm (nicht näher definiert)	frequenzselektiv	ICNIRP 2010 Allgemeinbevölkerung; peak; 30s max hold
	1.43	20-80k	20 cm (nicht näher definiert)	breitbandig	peak; 30s max hold

### 3.3.3.4 Diagramme



**Abbildung 3.3:** Graphische Darstellung der Immissionswerte (links) sowie der zugehörigen Expositionsindizes für die Allgemeinbevölkerung (rechts) für die elektrische (oben) und magnetische (unten) Feldstärke bei Quellen aus der Kategorie der Geräte für die Energieversorgung.

### 3.3.4 Fahrzeuge mit Elektroantrieb

Mit der Verbreitung der Elektromobilität wurde auch das Thema der damit zusammenhängenden Exposition von Personen in Elektro- und Hybridfahrzeugen in den letzten Jahren aufgegriffen, so dass einige Arbeiten diesbezüglich publiziert wurden. Speziell in diesem Fall, sowie auch im Fall von etablierten elektrisch angetriebenen Transportsystemen (U-Bahn, Straßenbahn, Eisenbahn, etc.) wurde in den vorliegenden Publikationen jedoch zumeist die Gesamtexposition im ELF und Zwischenfrequenzbereich (typ. bis max. einige 10 kHz) publiziert, sodass der Zwischenfrequenzanteil an der Gesamtexposition aus vielen dieser Arbeiten nicht extrahierbar war und diese Daten daher für die weitere Analyse ausgeschlossen werden mussten.

Der verbleibende Anteil an Immissions- bzw. Expositionsdaten im Zwischenfrequenzbereich zeigt in für Personen typischerweise zugänglichen Bereichen moderate magnetische Feldstärken, vor allem in der Nähe zum Inverter bzw. zu den stromführenden Kabeln. Da diese felderzeugenden Quellen im Allgemeinen relativ klein und lokalisiert sind, nehmen die verursachten Feldstärkewerte mit der Entfernung rasch ab, so dass die über größere Körperabschnitte gemittelten Immissionswerte typischerweise deutlich unterhalb der lokal nahe zu den Komponenten messbaren Feldstärken liegen werden. Die vorliegenden, allerdings relativ wenigen, verwertbaren Daten zeigen selbst bei Heranziehung der lokal in der Nähe der Komponenten gemessenen Immissionswerte (im einstelligen A/m Bereich) durchwegs Expositionsindizes  $< 1$  (bezüglich der Referenzwerte für die Allgemeinbevölkerung gemäß 1999/519/EG).

Aus den publizierten Immissions-Spektren von Fahrzeugen mit Stromrichter (Inverter-) gesteuerten Elektroantrieben (z.B. Schmid et al., 2009) ist jedoch deutlich ablesbar, dass der Immissionsanteil zwischen 300 Hz und einigen 10 kHz die Gesamtexposition dominieren kann (bei Zugrundelegung der Referenzwerte und deren Frequenzabhängigkeit, wie in 1999/519/EG festgelegt).

### 3.3.4.1 Elektroauto

In der Untergruppe der Elektroautos wurden aufgrund der in Kapitel 3.1.2 erläuterten Kriterien die Publikationen Tell et al. (2013) sowie Tell und Kavet (2016) ausgeschlossen.

**Tabelle 3.36:** Liste der Immissionswerte der magnetischen Feldstärke für die Untergruppe Elektroauto der Kategorie der Fahrzeuge mit Elektroantrieb.

Publikation	Immissionswert H [A/m]	Frequenz [Hz]	Messposition	Messmethode	Kommentar
Moreno-Torres et al. (2013)	0.296	5 kHz	20 cm (zum Inverter-Simulationsmodell)	-	
Low und Ruddle (2013)	ca. 40 nT/A	ca. 300 Hz	Fußbereich	-	
Schmid et al. (2009)	0.16	ca. 300 Hz	Fußbereich Beifahrer	frequenzselektiv	ICNIRP 1998 Allgemeinbevölkerung
	1.50%	ca. 300 Hz	Fußbereich Beifahrer	frequenzselektiv	
	0.32	300 Hz - 30 kHz	Rückbank, über Kabel	frequenzselektiv	
	8.00%	300 Hz - 30 kHz	Rückbank, über Kabel	frequenzselektiv	ICNIRP 1998 Allgemeinbevölkerung
	0.72	300 Hz - 30 kHz	Rückbank, über Kabel	frequenzselektiv	ICNIRP 1998 Allgemeinbevölkerung
	12.00%	300 Hz - 30 kHz	Rückbank, über Kabel	frequenzselektiv	
	0.032	300 Hz - 30 kHz	Fußbereich Beifahrer	frequenzselektiv	
Vassilev et al. (2015)	0.60%	300 Hz - 30 kHz	Fußbereich Beifahrer	frequenzselektiv	ICNIRP 1998 Allgemeinbevölkerung
	0.016	7 kHz - 9 kHz	max. aus unterschiedlichen Positionen	frequenzselektiv	
	0.048	200 kHz - 10 MHz	max. aus unterschiedlichen Positionen	frequenzselektiv	
	0.8	500 Hz - 1 kHz	max. aus unterschiedlichen Positionen	frequenzselektiv	

### 3.3.4.2 Elektroschlepper

**Tabelle 3.37:** Liste der Immissionswerte der magnetischen Feldstärke für die Untergruppe Elektroschlepper der Kategorie der Fahrzeuge mit Elektroantrieb.

Publikation	Immissionswert H [A/m]	Frequenz [Hz]	Messposition	Messmethode	Kommentar
Schmid et al. (2009)	0.8	300 Hz - 10 kHz	Fahrersitz	frequenzselektiv	ICNIRP 1998 Allgemeinbevölkerung
	0.70%	300 Hz - 10 kHz	Fahrersitz	frequenzselektiv	

### 3.3.4.3 Hybrid Bus

**Tabelle 3.38:** Liste der Immissionswerte der magnetischen Feldstärke für die Untergruppe Hybrid Bus der Kategorie der Fahrzeuge mit Elektroantrieb.

Publikation	Immissionswert H [A/m]	Frequenz [Hz]	Messposition	Messmethode	Kommentar
Schmid et al. (2009)	0.96	300 Hz - 30 kHz	Sitzplatz unter Inverter	frequenzselektiv	ICNIRP 1998 Allgemeinbevölkerung
	9%	300 Hz - 30 kHz	Sitzplatz unter Inverter	frequenzselektiv	

### 3.3.4.4 Hybrid Lastkraftwagen

In der Untergruppe der Hybrid Lastkraftwagen wurde aufgrund der in Kapitel 3.1.2 erläuterten Kriterien die Publikation Tell et al. (2013) ausgeschlossen.

**Tabelle 3.39:** Liste der Immissionswerte der magnetischen Feldstärke für die Untergruppe Hybrid Lastkraftwagen der Kategorie der Fahrzeuge mit Elektroantrieb.

Publikation	Immissionswert H [A/m]	Frequenz [Hz]	Messposition	Messmethode	Kommentar
Schmid et al. (2009)	0.024	300 Hz - 30 kHz	Fußbereich Fahrer	frequenzselektiv	ICNIRP 1998 Allgemeinbevölkerung
	0.10%	300 Hz - 30 kHz	Fußbereich Fahrer	frequenzselektiv	

### 3.3.4.5 Magnetschwebbahn

In der Untergruppe der Magnetschwebbahn wurden aufgrund der in Kapitel 3.1.2 erläuterten Kriterien die Publikationen Halgamuge et al. (2010), ICNIRP (2008), Nakagawa und Koana (1993), National Research Council (1997) und Ruppe et al. (1995) ausgeschlossen.

**Tabelle 3.40:** Liste der Immissionswerte der magnetischen Feldstärke für die Untergruppe Magnetschwebbahn der Kategorie der Fahrzeuge mit Elektroantrieb.

Publikation	Immissionswert H [A/m]	Frequenz [Hz]	Messposition	Messmethode	Kommentar
Brecher et al. (2002)	1.52	300 Hz - 3 kHz	max im Fußbereich an Bord	frequenzselektiv	
	0.8	300 Hz - 3 kHz	max im Rumpfbereich an Bord	frequenzselektiv	
	0.72	300 Hz - 3 kHz	max im Kopfbereich an Bord	frequenzselektiv	
Fugate et al. (2006)	0.08 - 0.96	300 Hz - 3 kHz	max an Bord	frequenzselektiv	
Fukuta et al. (2005)	0.096	2 kHz - 400 kHz	Sitzplatz nahe Inverter	breitband	

### 3.3.4.6 Metro

In der Untergruppe der Metro wurden aufgrund der in Kapitel 3.1.2 erläuterten Kriterien die Publikationen Allen et al. (1994), Chadwick und Lowes (1998), Gryz und Leszko (2009) und Landesanstalt für Umweltschutz Baden-Württemberg (2002) ausgeschlossen.

### 3.3.4.7 Mildhybrid Auto

In der Untergruppe der Mildhybrid Autos wurden aufgrund der in Kapitel 3.1.2 erläuterten Kriterien die Publikationen Halgamuge et al. (2010), Tell et al. (2013) ausgeschlossen.

**Tabelle 3.41:** Liste der Immissionswerte der magnetischen Feldstärke für die Untergruppe Mildhybrid Auto der Kategorie der Fahrzeuge mit Elektroantrieb.

Publikation	Immissionswert H [A/m]	Frequenz [Hz]	Messposition	Messmethode	Kommentar
Schmid et al. (2009)	4	300 Hz - 10 kHz	Fußbereich Beifahrer	frequenzselektiv	ICNIRP 1998 Allgemeinbevölkerung
	25%	300 Hz - 10 kHz	Fußbereich Beifahrer	frequenzselektiv	
Vassilev et al. (2015)	0.016	7 kHz - 9 kHz	max. aus unterschiedlichen Positionen	frequenzselektiv	
	0.048	200 kHz - 10 MHz	max. aus unterschiedlichen Positionen	frequenzselektiv	

### 3.3.4.8 Straßenbahn

In der Untergruppe der Straßenbahn wurden aufgrund der in Kapitel 3.1.2 erläuterten Kriterien die Publikationen Bundesamt für Gesundheit et al. (2006), Chadwick und Lowes (1998), Gryz und Leszko (2009), Halgamuge et al. (2010), Landesanstalt für Umwelt und Bayerisches Landesamt für Umwelt (2010) und Landesanstalt für Umweltschutz Baden-Württemberg (2002) ausgeschlossen.

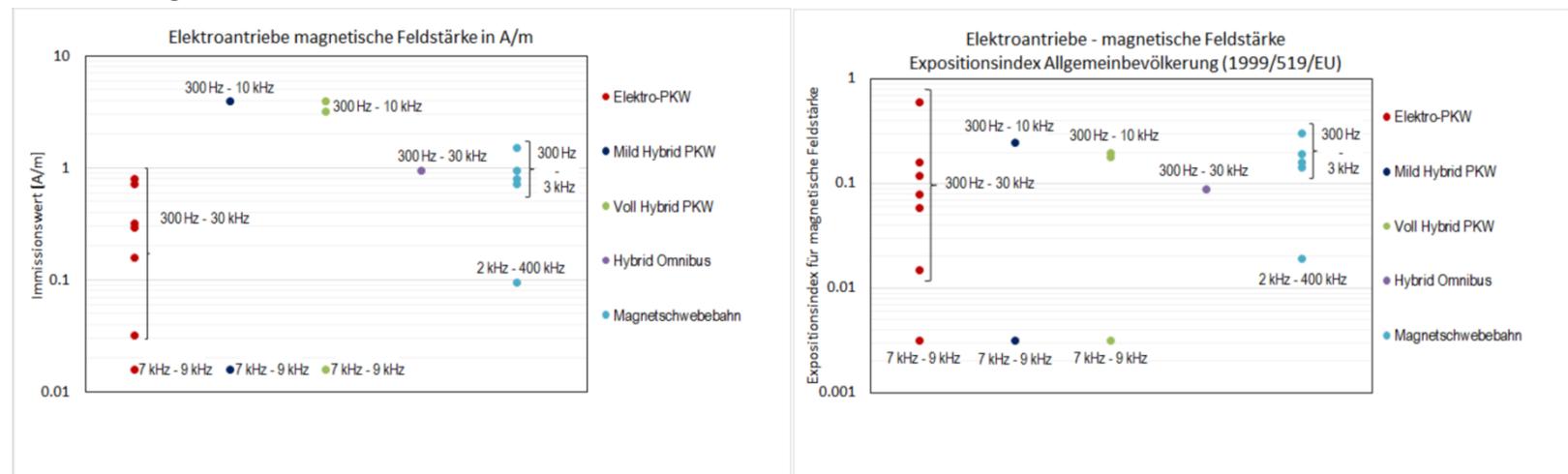
### 3.3.4.9 Vollhybrid Auto

In der Untergruppe der Vollhybrid Autos wurde aufgrund der in Kapitel 3.1.2 erläuterten Kriterien die Publikation Hareuveny et al. (2015) ausgeschlossen.

**Tabelle 3.42:** Liste der Immissionswerte der magnetischen Feldstärke für die Untergruppe Vollhybrid Auto der Kategorie der Fahrzeuge mit Elektroantrieb.

Publikation	Immissionswert H [A/m]	Frequenz [Hz]	Messposition	Messmethode	Kommentar
Schmid et al. (2009)	4	300 Hz - 10 kHz	Hintere Sitzreihe, Mitte, Fußbereich, über Kabel	frequenzselektiv	
	20%	300 Hz - 10 kHz	Hintere Sitzreihe, Mitte, Fußbereich, über Kabel	frequenzselektiv	ICNIRP 1998 Allgemeinbevölkerung
	3.2	300 Hz - 10 kHz	Hintere Sitzreihe, rechts, am Sitz, nahe Batterieanschlussklemme	frequenzselektiv	
	18%	300 Hz - 10 kHz	Hintere Sitzreihe, rechts, am Sitz, nahe Batterieanschlussklemme	frequenzselektiv	ICNIRP 1998 Allgemeinbevölkerung
Vassilev et al. (2015)	0.016	7 kHz - 9 kHz	max. aus unterschiedlichen Positionen	frequenzselektiv	
	0.048	200 kHz - 10 MHz	max. aus unterschiedlichen Positionen	frequenzselektiv	

### 3.3.4.10 Diagramme



**Abbildung 3.4:** Graphische Darstellung der Immissionswerte (links) sowie der zugehörigen Expositionsindizes für die Allgemeinbevölkerung (rechts) für die magnetische Feldstärke bei Quellen aus der Kategorie der Fahrzeuge mit Elektroantrieb.

### **3.3.5 Elektro- bzw. Induktionserwärmungsgeräte**

In dieser Feldquellenkategorie sind Geräte und Anlagen zusammengefasst, die im professionellen Umfeld zur Erwärmung eingesetzt werden (Induktionsherd, siehe nachfolgendes Kapitel 3.3.6 Geräte in Haushalt und Büro) und für die Daten mit Immissionsanteilen im Zwischenfrequenzbereich verfügbar sind.

Gemessen an der anzunehmenden Verbreitung dieser Prozesse in der industriellen Fertigung erscheinen Anzahl verfügbarer Publikationen und Umfang verwertbarer Daten als sehr gering. Die wenigen verfügbaren Daten deuten auf (zumindest lokal messbare) beachtliche elektrische und magnetische Feldstärken in unmittelbarer (in der Praxis für die Beschäftigten durchaus zugänglichen) Nähe zu den Geräten bzw. Anlagen hin. Expositionsindizes bezüglich der Auslöseschwellen im Bereich oberhalb von 10 dürften dabei nicht auszuschließen sein. Verwertbare Daten hinsichtlich der im Körper induzierten elektrischen Feldstärken liegen keine vor.

### 3.3.5.1 Drahtglühanlage

**Tabelle 3.43:** Liste der Immissionswerte der magnetischen Feldstärke für die Untergruppe Drahtglühanlage der Kategorie der Elektro- bzw. Induktionserwärmungsgeräte.

Publikation	Immissionswert H [A/m]	Frequenz [Hz]	Messposition	Messmethode	Kommentar
Vereinigung der Metall-Berufsgenossenschaften (2003)	288	800	- (nicht näher definiert)	-	

### 3.3.5.2 Durchlauferwärmungsanlage

**Tabelle 3.44:** Liste der Immissionswerte der magnetischen Feldstärke für die Untergruppe Durchlauferwärmungsanlage der Kategorie der Elektro- bzw. Induktionserwärmungsgeräte.

Publikation	Immissionswert H [A/m]	Frequenz [Hz]	Messposition	Messmethode	Kommentar
Vereinigung der Metall-Berufsgenossenschaften (2003)	> 8000	770	- (nicht näher definiert)	-	

### 3.3.5.3 Elektrostahlöfen

**Tabelle 3.45:** Liste der Immissionswerte der magnetischen Feldstärke für die Untergruppe Elektrostahlöfen der Kategorie der Elektro- bzw. Induktionserwärmungsgeräte.

Publikation	Immissionswert H [A/m]	Frequenz [Hz]	Messposition	Messmethode	Kommentar
Vereinigung der Metall-Berufsgenossenschaften (2003)	2320	1k	- (nicht näher definiert)	-	

### 3.3.5.4 Härteanlage

**Tabelle 3.46:** Liste der Immissionswerte der elektrischen Feldstärke für die Untergruppe Härteanlage der Kategorie der Elektro- bzw. Induktionserwärmungsgeräte.

Publikation	Immissionswert E [V/m]	Frequenz [Hz]	Messposition	Messmethode	Kommentar
Floderus et al. (2002)	176	25k	10 cm (nicht näher definiert)	frequenzselektiv	
	636	25k	Sonde am Körper des Arbeiters befestigt	frequenzselektiv	
	130	900k	10 cm (nicht näher definiert)	frequenzselektiv	
	19	900k	Sonde am Körper des Arbeiters befestigt	frequenzselektiv	

**Tabelle 3.47:** Liste der Immissionswerte der magnetischen Feldstärke für die Untergruppe Härteanlage der Kategorie der Elektro- bzw. Induktionserwärmungsgeräte.

Publikation	Immissionswert H [A/m]	Frequenz [Hz]	Messposition	Messmethode	Kommentar
Vereinigung der Metall-Berufsgenossenschaften (2003)	61.6	10k	- (nicht näher definiert)	-	
Floderus et al. (2002)	64.5	25k	10 cm (nicht näher definiert)	frequenzselektiv	
	4.75	25k	Sonde am Körper des Arbeiters befestigt	frequenzselektiv	
	> 2.5	900k	10 cm (nicht näher definiert)	frequenzselektiv	
	1.1	900k	Sonde am Körper des Arbeiters befestigt	frequenzselektiv	

**Tabelle 3.48:** Liste der Expositionswerte des Kontaktstromes für die Untergruppe Härteanlage der Kategorie der Elektro- bzw. Induktionserwärmungsgeräte.

Publikation	Expositionswert I <sub>c</sub> [mA]	Frequenz [Hz]	Messposition	Messmethode	Kommentar
Floderus et al. (2002)	2.1	25k	- (nicht näher definiert)	frequenzselektiv	Mittelwert über Fußquerschnitt
	3.5	900k	- (nicht näher definiert)	frequenzselektiv	Mittelwert über Armquerschnitt

### 3.3.5.5 HF-Aufschmelzanlage

**Tabelle 3.49:** Liste der Immissionswerte der magnetischen Feldstärke für die Untergruppe HF-Aufschmelzanlage der Kategorie der Elektro- bzw. Induktionserwärmungsgeräte.

Publikation	Immissionswert H [A/m]	Frequenz [Hz]	Messposition	Messmethode	Kommentar
Vereinigung der Metall-Berufsgenossenschaften (2003)	0.3	160k	- (nicht näher definiert)	-	

### 3.3.5.6 Induktionserwärmungsanlage

**Tabelle 3.50:** Liste der Immissionswerte der elektrischen Feldstärke für die Untergruppe Induktionserwärmungsanlage der Kategorie der Elektro- bzw. Induktionserwärmungsgeräte.

Publikation	Immissionswert E [V/m]	Frequenz [Hz]	Messposition	Messmethode	Kommentar
Mantiply et al. (1997)	1000	250-790k	20 cm (nicht näher definiert)	-	
	8200	250-790k	im Aufenthaltsbereich des Benutzers	-	

**Tabelle 3.51:** Liste der Immissionswerte der magnetischen Feldstärke für die Untergruppe Induktionserwärmungsanlage der Kategorie der Elektro- bzw. Induktionserwärmungsgeräte.

Publikation	Immissionswert H [A/m]	Frequenz [Hz]	Messposition	Messmethode	Kommentar
Seibersdorf Laboratories 2016. Interner Prüfbericht über Magnetfeldmessungen an einer 300 kHz (8 kW) Induktionserwärmungsanlage	4.64	300 kHz	10 cm zur Anlage	frequenzselektiv	RMS
	112	300 kHz	6 cm oberhalb Induktor	frequenzselektiv	RMS
	8	300 kHz	20 cm oberhalb Induktor	frequenzselektiv	RMS
Mantiply et al. (1997)	20	250-790k	20 cm (nicht näher definiert)	-	
	21	250-790k	im Aufenthaltsbereich des Benutzers	-	

### 3.3.5.7 Induktionsofen

**Tabelle 3.52:** Liste der Immissionswerte der elektrischen Feldstärke für die Untergruppe Induktionsofen der Kategorie der Elektro- bzw. Induktionserwärmungsgeräte.

Publikation	Immissionswert E [V/m]	Frequenz [Hz]	Messposition	Messmethode	Kommentar
Floderus et al. (2002)	855	480	Sonde am Körper des Arbeiters befestigt	frequenzselektiv	
	4000	800	10 cm (nicht näher definiert)	frequenzselektiv	
	550	800	Sonde am Körper des Arbeiters befestigt	frequenzselektiv	
	304	900	50 cm (nicht näher definiert)	frequenzselektiv	
	579	900	Sonde am Körper des Arbeiters befestigt	frequenzselektiv	
	2093	7k	Sonde am Körper des Arbeiters befestigt	frequenzselektiv	

**Tabelle 3.53:** Liste der Immissionswerte der magnetischen Feldstärke für die Untergruppe Induktionsofen der Kategorie der Elektro- bzw. Induktionserwärmungsgeräte.

Publikation	Immissionswert H [A/m]	Frequenz [Hz]	Messposition	Messmethode	Kommentar
Floderus et al. (2002)	13.3	480	Sonde am Körper des Arbeiters befestigt	frequenzselektiv	
	955	800	10 cm (nicht näher definiert)	frequenzselektiv	
	87.3	800	Sonde am Körper des Arbeiters befestigt	frequenzselektiv	
	349	900	10 cm (nicht näher definiert)	frequenzselektiv	
	67.5	900	Sonde am Körper des Arbeiters befestigt	frequenzselektiv	
	10.5	7k	Sonde am Körper des Arbeiters befestigt	frequenzselektiv	

### 3.3.5.8 Nacherwärmungsanlage

**Tabelle 3.54:** Liste der Immissionswerte der magnetischen Feldstärke für die Untergruppe Nacherwärmungsanlage der Kategorie der Elektro- bzw. Induktionserwärmungsgeräte.

Publikation	Immissionswert H [A/m]	Frequenz [Hz]	Messposition	Messmethode	Kommentar
Vereinigung der Metall-Berufsgenossenschaften (2003)	500 $\mu$ T	512	- (nicht näher definiert)	-	

### 3.3.5.9 Rohrbiegeanlage

**Tabelle 3.55:** Liste der Immissionswerte der magnetischen Feldstärke für die Untergruppe Rohrbiegeanlage der Kategorie der Elektro- bzw. Induktionserwärmungsgeräte.

Publikation	Immissionswert H [A/m]	Frequenz [Hz]	Messposition	Messmethode	Kommentar
Vereinigung der Metall-Berufsgenossenschaften (2003)	130 $\mu$ T	650	- (nicht näher definiert)	-	

### 3.3.5.10 Schmiedemaschine

**Tabelle 3.56:** Liste der Immissionswerte der elektrischen Feldstärke für die Untergruppe Schmiedemaschine der Kategorie der Elektro- bzw. Induktionserwärmungsgeräte.

Publikation	Immissionswert E [V/m]	Frequenz [Hz]	Messposition	Messmethode	Kommentar
Floderus et al. (2002)	150	3.8k	50 cm (nicht näher definiert)	frequenzselektiv	
	656	3.8k	Sonde am Körper des Arbeiters befestigt	frequenzselektiv	
	197	4k	50 cm (nicht näher definiert)	frequenzselektiv	
	300	4k	Sonde am Körper des Arbeiters befestigt	frequenzselektiv	
	43	419k	50 cm (nicht näher definiert)	frequenzselektiv	
	61.5	419k	Sonde am Körper des Arbeiters befestigt	frequenzselektiv	

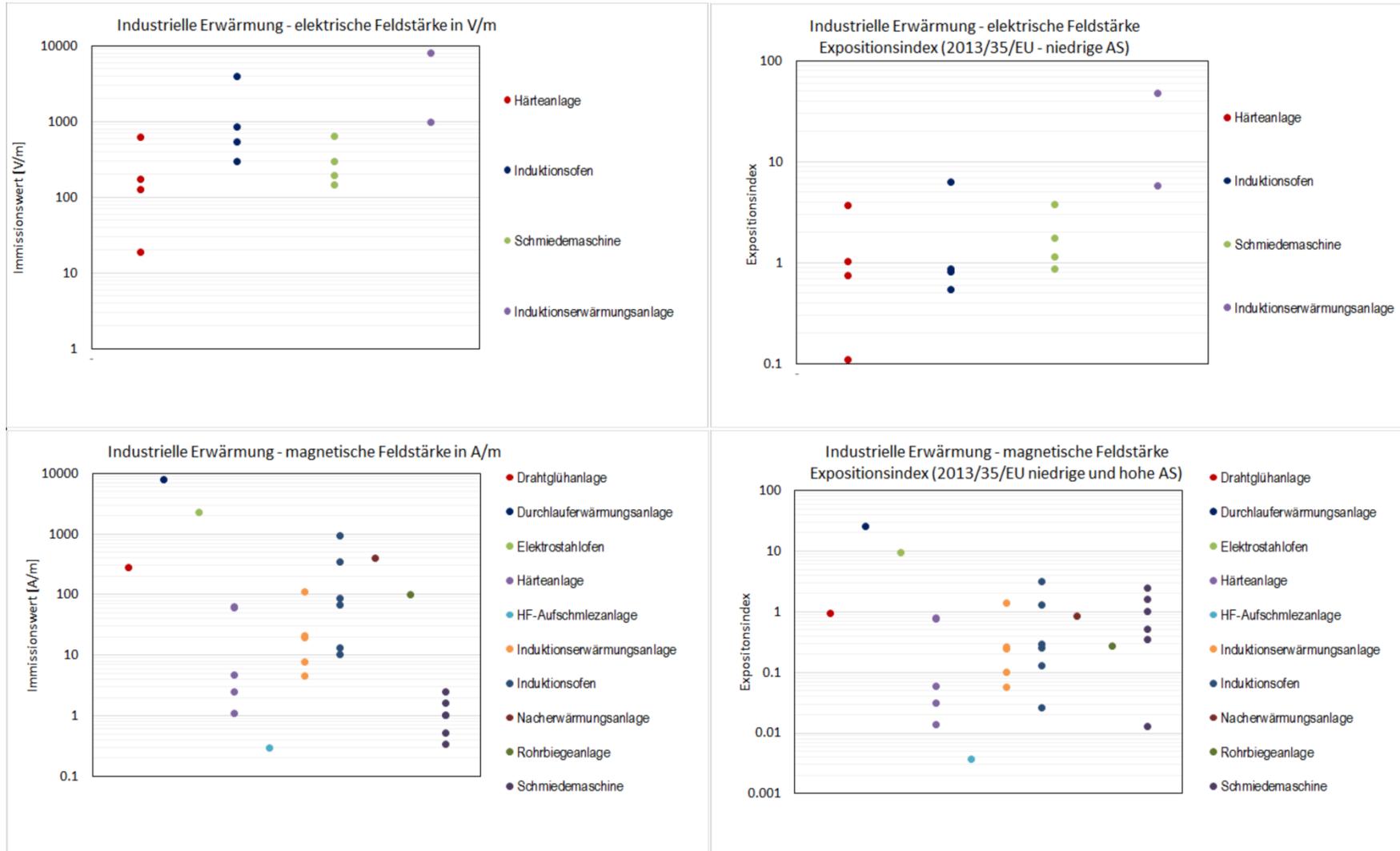
**Tabelle 3.57:** Liste der Immissionswerte der magnetischen Feldstärke für die Untergruppe Schmiedemaschine der Kategorie der Elektro- bzw. Induktionserwärmungsgeräte.

Publikation	Immissionswert H [A/m]	Frequenz [Hz]	Messposition	Messmethode	Kommentar
Floderus et al. (2002)	1.05	3.8k	50 cm (nicht näher definiert)	frequenzselektiv	
	1.02	3.8k	Sonde am Körper des Arbeiters befestigt	frequenzselektiv	
	2.5	4k	50 cm (nicht näher definiert)	frequenzselektiv	
	1.62	4k	Sonde am Körper des Arbeiters befestigt	frequenzselektiv	
	0.52	419k	100 cm (nicht näher definiert)	frequenzselektiv	
	0.35	419k	Sonde am Körper des Arbeiters befestigt	frequenzselektiv	

**Tabelle 3.58:** Liste der Expositionswerte des Kontaktstromes für die Untergruppe Schmiedemaschine der Kategorie der Elektro- bzw. Induktionserwärmungsgeräte.

Publikation	Expositionswert $I_c$ [mA]	Frequenz [Hz]	Messposition	Messmethode	Kommentar
Floderus et al. (2002)	1.04	419k	- (nicht näher definiert)	frequenzselektiv	Mittelwert über Fußquerschnitt

### 3.3.5.11 Diagramme



**Abbildung 3.5:** Graphische Darstellung der Immissionswerte (links) sowie der zugehörigen Expositionsindizes für beruflich exponierte Personen (rechts) für die elektrische (oben) und magnetische (unten) Feldstärke bei Quellen aus der Kategorie der Elektro- bzw. Induktionserwärmungsanlagen.

### 3.3.6 Geräte in Haushalt und Büro

Diese Feldquellenkategorie umfasst theoretisch nahezu alle elektrischen Verbraucher die im Büro oder Haushalt betrieben werden. Immissionsdaten von Haushaltsgeräten sind grundsätzlich in großer Vielfalt publiziert worden. Allerdings zeigt sich auch hier das bereits früher angesprochene Problem, dass aus den meisten dieser Publikationen die Immissionsanteile im Zwischenfrequenzbereich nicht extrahiert werden können und somit nicht in die weitere Analyse aufgenommen werden konnten.

Als Quellen für messbare Immissionen im Zwischenfrequenzbereich in Zusammenhang mit derartigen Geräten können im Wesentlichen die folgenden genannt werden:

- Schalfrequenzen (inkl. Harmonische) von Schaltnetzteilen, Invertern, etc.
- Oberwellen von Strömen in Verbrauchern, z.B. Elektromotoren
- Gerätespezifische Nutzfrequenzen (z.B. im Audio-Frequenzbereich durch Lautsprecher von Audio-Wiedergabegeräten, Zeilenfrequenzen von Anzeigegeräten, Nutzfrequenz des Induktionsherdes, etc.)

Eine Vielzahl von haushaltsüblichen Geräten wurde speziell im Hinblick auf die im Zwischenfrequenzbereich (300 Hz – 1 MHz) verursachten Immissionen analysiert und die Daten in einer aktuellen Publikation von (Aerts et al., 2017) veröffentlicht.

Ergänzt mit anderen verfügbaren publizierten Daten zeigen sich in unmittelbarer Nähe zu den Geräten typischerweise elektrische Feldstärken bis zu einigen 10 V/m, in Ausnahmefällen bis einige 100 V/m, und magnetische Feldstärken im Bereich bis zu einigen 10 A/m, meistens jedoch deutlich darunter. Legt man die Referenzwerte für die Allgemeinbevölkerung gemäß EU-Ratsempfehlung 1999/519/EG zugrunde, ergeben sich für nahezu alle betrachteten Geräte Expositionsindizes  $< 1$ .

Sieht man von den in unmittelbar an der Oberfläche (ohne weitere Angabe) einer elektrischen Zahnbürste gemessenen magnetischen Feldstärke von ca. 8 A/m bei ca. 500 – 1200 Hz (Kameda et al., 2012) und der in 5 cm Abstand zur Rückseite eines Touchscreens gemessenen elektrischen Feldstärke von ca. 155 V/m bei ca. 44 kHz (van der Togt et al., 2008) ab, verbleiben eine Plasmalampe und die untersuchten Induktionskochfelder als aus strahlenschutztechnischer Sicht interessanteste Feldquellen. Während die berichteten 677 V/m (20 kHz) in 35 cm zu einer Plasmalampe derzeit noch als Einzelbefund gesehen werden muss, zeigen mehrere Publikationen konsistent die teilweise erheblichen magnetischen Streufelder von Induktionskochfeldern auf. An der Vorderkante von Induktionsherden wurden teilweise mehr als 60 A/m (ca. 20 kHz) und in 20 cm Abstand noch bis zu 56 A/m (20 kHz) gemessen, was Expositionsindizes von  $>10$  bezogen auf den Referenzwert für die Allgemeinbevölkerung gemäß 1999/519/EG entspricht. Auf Grundlage der bisher vorliegenden Daten im Hinblick auf die im Körper induzierten Stromdichten und elektrischen Feldstärken lässt sich eine Überschreitung der Basiswerte in der Praxis nicht ausschließen (Christ et al., 2012).

### 3.3.6.1 Bildschirme und Anzeigegeräte

In der Untergruppe der Bildschirme und Anzeigegeräte wurden aufgrund der in Kapitel 3.1.2 erläuterten Kriterien die Publikationen Ainsbury et al. (2005), Behrens et al. (2004), Bundesamt für Strahlenschutz (2008), Farag et al. (1998), Kim und Cho (2001), Lacy-Hulbert et al. (1998), Leitgeb et al. (2008a, 2008c, 2008b), Mader und Peralta (1992) und Preece et al. (1999, 1997) ausgeschlossen.

**Tabelle 3.59:** Liste der Immissionswerte der elektrischen Feldstärke für die Untergruppe Bildschirme und Anzeigegeräte der Kategorie der Geräte in Haushalt und Büro.

Publikation	Immissionswert E [V/m]	Frequenz [Hz]	Messposition	Messmethode	Kommentar
	23	45-90k	20 cm (nicht näher definiert)	frequenzselektiv	peak; 30s max hold
Aerts et al. (2017)	0.29 Expositionsindex	45-90k	20 cm (nicht näher definiert)	frequenzselektiv	ICNIRP 2010 Allgemeinbevölkerung; peak; 30s max hold
	42.7	45-90k	20 cm (nicht näher definiert)	breitbandig	peak; 30s max hold
Bundesamt für Gesundheit et al. (2006)	20	30-40k	30 cm (nicht näher definiert)	-	
van der Togt et al. (2008)	155.66	44k	5 cm von der Rückseite eines Touchscreens	frequenzselektiv	30s Mittelwert
	1.9 Expositionsrate	44k	5 cm von der Rückseite eines Touchscreens	frequenzselektiv	30s Mittelwert

**Tabelle 3.60:** Liste der Immissionswerte der magnetischen Feldstärke für die Untergruppe Bildschirme und Anzeigegeräte der Kategorie der Geräte in Haushalt und Büro.

Publikation	Immissionswert H [A/m]	Frequenz [Hz]	Messposition	Messmethode	Kommentar
Aerts et al. (2017)	0.7	45-90k	20 cm (nicht näher definiert)	frequenzselektiv	peak; 30s max hold
	0.72	45-90k	20 cm (nicht näher definiert)	breitbandig	peak; 30s max hold
Kurokawa et al. (2004)	0.03184	10-150k	10 cm (nicht näher definiert)	breitbandig	peak; 1s Maximalwert
National Research Council (1997)	0.264	-	56 cm	-	RMS; mindestens 1s
van der Togt et al. (2008)	0.33	44k	5 cm von der Rückseite eines Touchscreens	frequenzselektiv	30s Mittelwert
	0.02 Expositionsrate	44k	5 cm von der Rückseite eines Touchscreens	frequenzselektiv	30s Mittelwert

### 3.3.6.2 Headset

In der Untergruppe Headset wurden aufgrund der in Kapitel 3.1.2 erläuterten Kriterien die Publikationen Bundesamt für Gesundheit et al. (2006), Lee et al. (2009) und Schmid et al. (2007) ausgeschlossen.

**Tabelle 3.61:** Liste der Immissionswerte der magnetischen Feldstärke für die Untergruppe Headset der Kategorie der Geräte in Haushalt und Büro.

Publikation	Immissionswert H [A/m]	Frequenz [Hz]	Messposition	Messmethode	Kommentar
Kaune et al. (2002)	0.0356	606-3066	nicht genau definiert	frequenzselektiv	Mittelwert aus 4 Messungen im 10s Intervall
	0.002	8-200k	nicht genau definiert	frequenzselektiv	Mittelwert aus 4 Messungen im 10s Intervall

### 3.3.6.3 Hifi Anlage

In der Untergruppe der Hifi Anlagen wurden aufgrund der in Kapitel 3.1.2 erläuterten Kriterien die Publikationen Ainsbury et al. (2005), Leitgeb et al. (2008b), Neitzke et al. (2006) und Preece et al. (1997) ausgeschlossen.

### 3.3.6.4 Induktionsherd

In der Untergruppe der Induktionsherde wurden aufgrund der in Kapitel 3.1.2 erläuterten Kriterien die Publikationen Leitgeb et al. (2008a, 2008c, 2008b), Stuchly und Lecuyer (1987) und Tenforde (1992) ausgeschlossen.

**Tabelle 3.62:** Liste der Immissionswerte der elektrischen Feldstärke für die Untergruppe Induktionsherd der Kategorie der Geräte in Haushalt und Büro.

Publikation	Immissionswert E [V/m]	Frequenz [Hz]	Messposition	Messmethode	Kommentar
Aerts et al. (2017)	41.5	19.5-70k	20 cm (nicht näher definiert)	frequenzselektiv	peak; 30s max hold
	0.63 Expositionsindex	19.5-70k	20 cm (nicht näher definiert)	frequenzselektiv	ICNIRP 2010 Allgemeinbevölkerung; peak; 30s max hold
	41.84	19-70k	20 cm (nicht näher definiert)	breitbandig	peak; 30s max hold

**Tabelle 3.63:** Liste der Immissionswerte der magnetischen Feldstärke für die Untergruppe Induktionsherd der Kategorie der Geräte in Haushalt und Büro.

Publikation	Immissionswert H [A/m]	Frequenz [Hz]	Messposition	Messmethode	Kommentar
	2.7	19.5-70k	20 cm (nicht näher definiert)	frequenzselektiv	peak; 30s max hold
Aerts et al. (2017)	0.13 Expositionsindex	19.5-70k	20 cm (nicht näher definiert)	frequenzselektiv	ICNIRP 2010 Allgemeinbevölkerung; peak; 30s max hold
	3.71	19-70k	20 cm (nicht näher definiert)	breitbandig	peak; 30s max hold
Binggeli et al. (2005)	56	20k	20 cm (nicht näher definiert)	frequenzselektiv	
	61.6	1-100k	0 cm (nicht näher definiert)	breitbandig	kein zugehöriger Wert für nicht zentrierten Topf
Bullo et al. (2013)	47.12	1-100k	0 cm (nicht näher definiert)	breitbandig	RMS; 30s Mittelwert
Christ et al. (2012)	~64	20k	0 cm von Kante des Geräts	frequenzselektiv	peak
Guldimann et al. (2011)	45.2	19.5k	0 cm von Kante des Geräts	frequenzselektiv	RMS
Health Protection Agency und Advisory Group on Non-ionising Radiation AGNIR (2012)	12	300k-1M	- cm (nicht näher definiert)	-	
Kos et al. (2011)	~4.4	1Hz-400k	1 cm (nicht näher definiert)	frequenzselektiv	RMS
Rickli et al. (2003)	20	15-25k	beim Kochtopf	-	
Viellard et al. (2006)	30.4	30Hz-400k	1 cm von Gerätevorderseite	breitbandig	RMS

**Tabelle 3.64:** Liste der Expositionswerte der induzierten Stromdichte für die Untergruppe Induktionsherd der Kategorie der Geräte in Haushalt und Büro.

Publikation	Expositionswert J [mA/m <sup>2</sup> ]	Frequenz [Hz]	Messposition	Messmethode	Kommentar
Christ et al. (2012)	~700	20k	0 cm von Kante des Geräts	-	peak; Mittelwert über 1cm <sup>2</sup>
	46	35k	18 cm vom Zentrum des Kochfeldes	-	RMS; Mittelwert über 1cm <sup>2</sup>
Kos et al. (2011)	46	35k	18 cm vom Zentrum des Kochfeldes	-	RMS; Mittelwert über 1cm <sup>2</sup>
	15	105k	18 cm vom Zentrum des Kochfeldes	-	RMS; Mittelwert über 1cm <sup>2</sup>
	15	105k	18 cm vom Zentrum des Kochfeldes	-	RMS; Mittelwert über 1cm <sup>2</sup>

**Tabelle 3.65:** Liste der Expositionswerte der induzierten elektrischen Feldstärke für die Untergruppe Induktionsherd der Kategorie der Geräte in Haushalt und Büro.

Publikation	Expositionswert $E_i$ [V/m]	Frequenz [Hz]	Messposition	Messmethode	Kommentar
Kos et al. (2011)	2.28	35k	18 cm vom Zentrum des Kochfeldes	-	RMS; Mittelwert über 2x2x2 mm <sup>3</sup>
	0.078	35k	18 cm vom Zentrum des Kochfeldes	-	RMS; Mittelwert über 2x2x2 mm <sup>3</sup>
	0.752	105k	18 cm vom Zentrum des Kochfeldes	-	RMS; Mittelwert über 2x2x2 mm <sup>3</sup>
	0.026	105k	18 cm vom Zentrum des Kochfeldes	-	RMS; Mittelwert über 2x2x2 mm <sup>3</sup>

### 3.3.6.5 iPod

**Tabelle 3.66:** Liste der Immissionswerte der magnetischen Feldstärke für die Untergruppe iPod der Kategorie der Geräte in Haushalt und Büro.

Publikation	Immissionswert H [A/m]	Frequenz [Hz]	Messposition	Messmethode	Kommentar
Bassen (2008)	0.16	3k-3M	0.5 cm (nicht näher definiert)	-	
Shah et al. (2010)	0.0424	10-500k	1 cm (nicht näher definiert)	frequenzselektiv	

### 3.3.6.6 Klimaanlage mit Invertertechnologie

**Tabelle 3.67:** Liste der Immissionswerte der elektrischen Feldstärke für die Untergruppe Klimaanlage mit Invertertechnologie der Kategorie der Geräte in Haushalt und Büro.

Publikation	Immissionswert E [V/m]	Frequenz [Hz]	Messposition	Messmethode	Kommentar
Aerts et al. (2017)	0.69	21k, 160-215k	20 cm (nicht näher definiert)	breitbandig	peak; 30s max hold

### 3.3.6.7 Kühlschränke mit Invertertechnologie

**Tabelle 3.68:** Liste der Immissionswerte der elektrischen Feldstärke für die Untergruppe Kühlschränke mit Invertertechnologie der Kategorie der Geräte in Haushalt und Büro.

Publikation	Immissionswert E [V/m]	Frequenz [Hz]	Messposition	Messmethode	Kommentar
	11.13	12k	20 cm (nicht näher definiert)	frequenzselektiv	peak; 30s max hold
Aerts et al. (2017)	0.19 Expositionsindex	12k	20 cm (nicht näher definiert)	frequenzselektiv	ICNIRP 2010 Allgemeinbevölkerung; peak; 30s max hold
	13.03	6k, Harmonische	20 cm (nicht näher definiert)	breitbandig	peak; 30s max hold

### 3.3.6.8 Mikrowellenherde mit Invertertechnologie

In der Untergruppe der Mikrowellenherde mit Invertertechnologie wurde aufgrund der in Kapitel 3.1.2 erläuterten Kriterien die Publikation Ainsbury et al. (2005) ausgeschlossen.

**Tabelle 3.69:** Liste der Immissionswerte der elektrischen Feldstärke für die Untergruppe Mikrowellenherde mit Invertertechnologie der Kategorie der Geräte in Haushalt und Büro.

Publikation	Immissionswert E [V/m]	Frequenz [Hz]	Messposition	Messmethode	Kommentar
Aerts et al. (2017)	2.45	50-80k	20 cm (nicht näher definiert)	frequenzselektiv	peak; 30s max hold
	2.47	20-80k	20 cm (nicht näher definiert)	breitbandig	peak; 30s max hold

**Tabelle 3.70:** Liste der Immissionswerte der magnetischen Feldstärke für die Untergruppe Mikrowellenherde mit Invertertechnologie der Kategorie der Geräte in Haushalt und Büro.

Publikation	Immissionswert H [A/m]	Frequenz [Hz]	Messposition	Messmethode	Kommentar
	1.44	70k	20 cm (nicht näher definiert)	frequenzselektiv	peak; 30s max hold
Aerts et al. (2017)	0.07 Expositionsindex	70k	20 cm (nicht näher definiert)	frequenzselektiv	ICNIRP 2010 Allgemeinbevölkerung; peak; 30s max hold
	1.43	20-80k	20 cm (nicht näher definiert)	breitbandig	peak; 30s max hold

### 3.3.6.9 Photovoltaik Anlage

In der Untergruppe der Photovoltaik Anlage wurde aufgrund der in Kapitel 3.1.2 erläuterten Kriterien die Publikation Tell et al. (2015) ausgeschlossen.

### 3.3.6.10 Plasmalampe

**Tabelle 3.71:** Liste der Immissionswerte der elektrischen Feldstärke für die Untergruppe Plasmalampe der Kategorie der Geräte in Haushalt und Büro.

Publikation	Immissionswert E [V/m]	Frequenz [Hz]	Messposition	Messmethode	Kommentar
Alanko et al. (2011)	677	20k	35 cm (nicht näher definiert)	frequenzselektiv	peak
	12.1 Expositionsindex	20k	35 cm (nicht näher definiert)	frequenzselektiv	ICNIRP 2010 Allgemeinbevölkerung; peak

**Tabelle 3.72:** Liste der Expositionswerte des Kontaktstromes für die Untergruppe Plasmalampe der Kategorie der Geräte in Haushalt und Büro.

Publikation	Expositionswert I <sub>c</sub> [mA]	Frequenz [Hz]	Messposition	Messmethode	Kommentar
Alanko et al. (2011)	30.3	10-400k	0 cm (nicht näher definiert)	frequenzselektiv	peak ;Mittelwert über Handgelenksquerschnitt
	2.0 Expositionsindex	10-400k	0 cm (nicht näher definiert)	frequenzselektiv	ICNIRP 2010 Allgemeinbevölkerung; peak; Mittelwert über Handgelenksquerschnitt

### 3.3.6.11 Smartmeter PLC

**Tabelle 3.73:** Liste der Immissionswerte der magnetischen Feldstärke für die Untergruppe Smartmeter PLC der Kategorie der Geräte in Haushalt und Büro.

Publikation	Immissionswert H [A/m]	Frequenz [Hz]	Messposition	Messmethode	Kommentar
Abart et al. (2017)	0.0012	10 k-100k	Bett, 50 cm Distanz zu nächster Installation	frequenzselektiv	RMS

### 3.3.6.12 Staubsauger

In der Untergruppe der Staubsauger wurden Aufgrund der in Kapitel 3.1.2 erläuterten Kriterien die Publikationen Ainsbury et al. (2005), Bundesamt für Strahlenschutz (2008), EPA (1992), Farag et al. (1998), IEH et al. (2012), Kim und Cho (2001), Leitgeb et al. (2008a, 2008c, 2008b), Mader und Peralta (1992), National Research Council (1997 und Preece et al. (1997) ausgeschlossen.

**Tabelle 3.74:** Liste der Immissionswerte der magnetischen Feldstärke für die Untergruppe Staubsauger der Kategorie der Geräte in Haushalt und Büro.

Publikation	Immissionswert H [A/m]	Frequenz [Hz]	Messposition	Messmethode	Kommentar
Kurokawa et al. (2004)	0.01744	10-150k	10 cm (nicht näher definiert)	breitbandig	peak; 1s Maximalwert

### 3.3.6.13 Waschmaschine mit Invertertechnologie

In der Untergruppe der Waschmaschinen mit Invertertechnologie wurde Aufgrund der in Kapitel 3.1.2 erläuterten Kriterien die Publikation Preece et al. (1997) ausgeschlossen.

**Tabelle 3.75:** Liste der Immissionswerte der elektrischen Feldstärke für die Untergruppe Waschmaschine mit Invertertechnologie der Kategorie der Geräte in Haushalt und Büro.

Publikation	Immissionswert E [V/m]	Frequenz [Hz]	Messposition	Messmethode	Kommentar
	4.7	8k	20 cm (nicht näher definiert)	frequenzselektiv	peak; 30s max hold
Aerts et al. (2017)	0.06 Expositionsindex	8k	20 cm (nicht näher definiert)	frequenzselektiv	ICNIRP 2010 Allgemeinbevölkerung; peak; 30s max hold
	6.21	15k, 18k, 21k, Harmonische	20 cm (nicht näher definiert)	breitbandig	peak; 30s max hold

**Tabelle 3.76:** Liste der Immissionswerte der magnetischen Feldstärke für die Untergruppe Waschmaschine mit Invertertechnologie der Kategorie der Geräte in Haushalt und Büro.

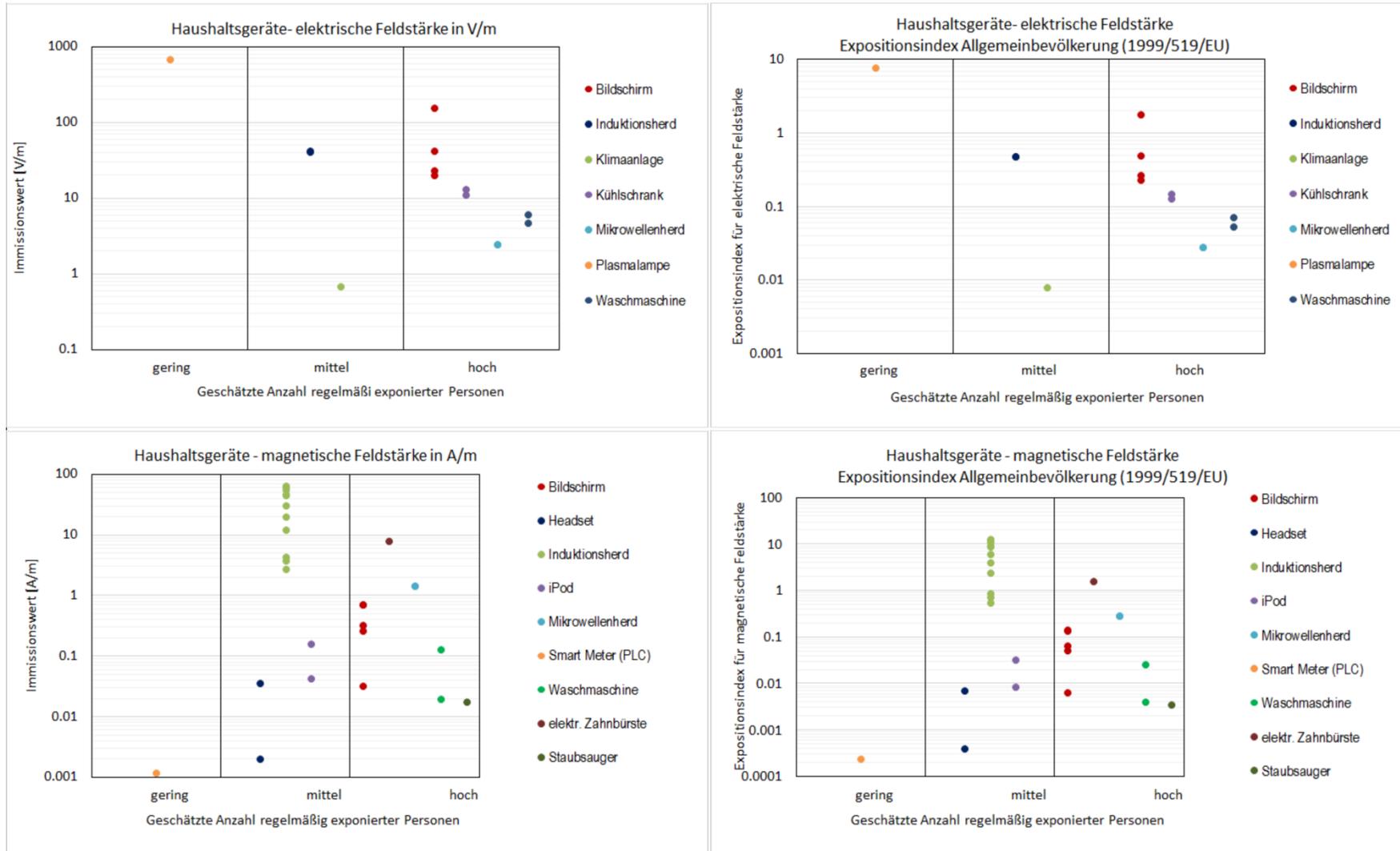
Publikation	Immissionswert H [A/m]	Frequenz [Hz]	Messposition	Messmethode	Kommentar
Aerts et al. (2017)	0.02	30k	20 cm (nicht näher definiert)	frequenzselektiv	peak; 30s max hold
	0.13	15k, Harmonische	20 cm (nicht näher definiert)	breitbandig	peak; 30s max hold

### 3.3.6.14 Elektrische Zahnbürste

**Tabelle 3.77:** Liste der Immissionswerte der magnetischen Feldstärke für die Untergruppe elektrische Zahnbürste der Kategorie der Geräte in Haushalt und Büro.

Publikation	Immissionswert H [A/m]	Frequenz [Hz]	Messposition	Messmethode	Kommentar
Kameda et al. (2012)	< 8	1-2k	0 cm (nicht näher definiert)	frequenzselektiv	

### 3.3.6.15 Diagramme



**Abbildung 3.6:** Graphische Darstellung der Immissionswerte (links) sowie der zugehörigen Expositionsindizes für die Allgemeinbevölkerung (rechts) für die elektrische (oben) und magnetische (unten) Feldstärke bei Quellen aus der Kategorie der Geräte in Haushalt und Büro.

### **3.3.7 Industrielle Prozesse zur Materialbearbeitung**

Die ohnehin nur vereinzelt auffindbaren Publikationen in dieser Feldquellenkategorie zur Oberflächenbearbeitung (Plattieren) und Plasmabearbeitung (Ätzen, Hochfrequenz-Sputtern, Epitaxie) mussten nach Anwendung der Einschlusskriterien weiter eingeschränkt werden, so dass schließlich nur Daten einer einzigen Publikation bezüglich der von einer Plattiermaschine verursachten elektrischen (bis zu 160 V/m) und magnetischen (bis zu 7 A/m, direkt am Körper gemessen) Immissionen am Arbeitsplatz bei 400 kHz als verwertbare Daten vorliegen. Im Vergleich mit den anzuwendenden niedrigen Auslösewerten gemäß 2013/35/EU (170 V/m bzw. 80 A/m) sind diese Werte allerdings als gering einzustufen.

### 3.3.7.1 Oberflächenbearbeitung (Plattieren)

**Tabelle 3.78:** Liste der Immissionswerte der elektrischen Feldstärke für die Untergruppe Oberflächenbearbeitung (Plattieren) der Kategorie industrielle Prozesse zur Materialbearbeitung.

Publikation	Immissionswert E [V/m]	Frequenz [Hz]	Messposition	Messmethode	Kommentar
Floderus et al. (2002)	160	400k	50 cm (nicht näher definiert)	frequenzselektiv	
	119	400k	Sonde am Körper des Arbeiters befestigt	frequenzselektiv	

**Tabelle 3.79:** Liste der Immissionswerte der magnetischen Feldstärke für die Untergruppe Oberflächenbearbeitung (Plattieren) der Kategorie industrielle Prozesse zur Materialbearbeitung.

Publikation	Immissionswert H [A/m]	Frequenz [Hz]	Messposition	Messmethode	Kommentar
Floderus et al. (2002)	4.77	400k	50 cm (nicht näher definiert)	frequenzselektiv	
	7.06	400k	Sonde am Körper des Arbeiters befestigt	frequenzselektiv	

### 3.3.7.2 Plasmabearbeitung (Ätzung, Hochfrequenz Sputtern, Epitaxie)

In der Untergruppe der Plasmabearbeitung wurden aufgrund der in Kapitel 3.1.2 erläuterten Kriterien die Publikationen Chadwick (1999) und Litvak et al. (2002) ausgeschlossen.

### 3.3.8 Medizinische Anwendungen

Elektromagnetische Felder mit Spektralanteilen im Zwischenfrequenzbereich sind in Zusammenhang mit medizinischen Anwendungen vielfältig bekannt, und werden zumeist gezielt am Patienten zu therapeutischen oder diagnostischen Zwecken angewendet. Daten, die sich bezüglich des Immissionsanteils im Zwischenfrequenzbereich analysieren und verwerten lassen, wurden jedoch nur von elektrochirurgischen Geräten, Langwellentherapiegeräten und Magnetresonanztomographie aufgefunden. Die Tatsache, dass in der Nähe zu Magnetresonanztomographen aufgrund des Schaltens der Gradientenspulen während des Scans beachtliche magnetische Feldstärken auftreten können, ist bekannt. Die von den Gradientenspulen verursachten dB/dt Werte im Untersuchungsraum waren Gegenstand mehrere umfangreicher Messkampagnen (z.B. Capstick, 2008), wenngleich die Ergebnispräsentation in den meisten zugehörigen Publikationen auch keine unmittelbare Identifikation des Zwischenfrequenzanteils an den Immissionen erlaubt. Die eingeschränkte Zahl der in diesen Bereichen beschäftigten Personen ist bezüglich der auftretenden Immissionen (Expositionsindizes  $> 2$  bezüglich niedriger Auslöseschwelle gemäß 2013/35/EU) unterwiesen und kann daher entsprechende Vorkehrungen treffen, um Expositionen oberhalb der Expositionsgrenzwerte zu vermeiden.

Aus strahlenschutztechnischer Sicht wesentlich interessanter erscheinen die publizierten Daten bezüglich der Immissionen (elektrische Feldstärke), die von elektrochirurgischen Geräten ausgeht. Hier zeigen Daten aus mehreren unabhängigen Publikationen elektrische Feldstärken im Bereich mehrerer 100 V/m, in Extremfällen bis über 1 kV/m (entsprechende Expositionsindizes bis nahezu 10) unmittelbar an den Komponenten (z.B. Kabel) die in der Praxis in unmittelbarer Nähe des Chirurgen bzw. des Patienten sind. Daten hinsichtlich der dadurch im Körper induzierten Stromdichten bzw. elektrische Feldstärken liegen gegenwärtig keine vor.

### 3.3.8.1 Elektromagnetische Nervenstimulatoren

In der Untergruppe der elektromagnetischen Nervenstimulation wurden aufgrund der in Kapitel 3.1.2 erläuterten Kriterien die Publikationen Benecke et al. (1988) und Litvak et al. (2002) ausgeschlossen.

### 3.3.8.2 Elektrochirurgie

In der Untergruppe der Elektrochirurgie wurden aufgrund der in Kapitel 3.1.2 erläuterten Kriterien die Publikationen Litvak et al. (2002) und Paz et al. (1987) ausgeschlossen.

**Tabelle 3.80:** Liste der Immissionswerte der elektrischen Feldstärke für die Untergruppe Elektrochirurgie der Kategorie medizinische Anwendungen.

Publikation	Immissionswert E [V/m]	Frequenz [Hz]	Messposition	Messmethode	Kommentar
Floderus et al. (2002)	15.6	390k	Sonde am Körper des Arbeiters befestigt	frequenzselektiv	
	553	390k	10 cm (nicht näher definiert)	frequenzselektiv	
	491	390k	10 cm (nicht näher definiert)	frequenzselektiv	
	321	390k	Sonde am Körper des Arbeiters befestigt	frequenzselektiv	
Liljestrand et al. (2003)	1800	300k-1M	5 cm Abstand zum Kabel	breitbandig	
Mantiplay et al. (1997)	1000	500-2400k	10 cm (nicht näher definiert)	-	
Molla-Djafari et al. (1998)	994.8	350-400k	- (nicht näher definiert)	breitbandig	
	1025.3	500-600k	- (nicht näher definiert)	breitbandig	
	979.6	390-470k	- (nicht näher definiert)	breitbandig	
	1422	500k	- (nicht näher definiert)	breitbandig	
	984	500k	- (nicht näher definiert)	breitbandig	
Van Den Bossche et al. (2015)	1203.5	bis 940k	0.5 cm (gemessen vom Versorgungskabel)	breitbandig	max hold
	7.1 Expositionsindex	bis 940k	0.5 cm (gemessen vom Versorgungskabel)	breitbandig	ICNIRP 2010 Allgemeinbevölkerung; max hold

**Tabelle 3.81:** Liste der Immissionswerte der magnetischen Feldstärke für die Untergruppe Elektrochirurgie der Kategorie medizinische Anwendungen.

Publikation	Immissionswert H [A/m]	Frequenz [Hz]	Messposition	Messmethode	Kommentar
Floderus et al. (2002)	0.18	390k	Sonde am Körper des Arbeiters befestigt	frequenzselektiv	
	0.59	390k	10 cm (nicht näher definiert)	frequenzselektiv	
	0.6	390k	10 cm (nicht näher definiert)	frequenzselektiv	
	1.55	390k	Sonde am Körper des Arbeiters befestigt	frequenzselektiv	
Mantipty et al. (1997)	0.71	500-2400k	16 cm (nicht näher definiert)	-	
Molla-Djafari et al. (1998)	1.56	350-400k	- (nicht näher definiert)	breitbandig	
	1.53	500-600k	- (nicht näher definiert)	breitbandig	
	2.64	390-470k	- (nicht näher definiert)	breitbandig	
	1.57	500k	- (nicht näher definiert)	breitbandig	
	0.75	500k	- (nicht näher definiert)	breitbandig	
Van Den Bossche et al. (2015)	2.68	bis 940k	0.5 cm (gemessen vom Versorgungskabel)	breitbandig	max hold
	1.7 Expositionsindex	bis 940k	0.5 cm (gemessen vom Versorgungskabel)	breitbandig	ICNIRP 1998 beruflich exponierte Personen; max hold
Wilén (2010)	10.4	300k-30M	10 cm (nicht näher definiert)	frequenzselektiv	

**Tabelle 3.82:** Liste der Expositionswerte des Kontaktstromes für die Untergruppe Elektrochirurgie der Kategorie medizinische Anwendungen.

Publikation	Expositionswert I <sub>c</sub> [mA]	Frequenz [Hz]	Messposition	Messmethode	Kommentar
Floderus et al. (2002)	5	390k	- (nicht näher definiert)	frequenzselektiv	Mittelwert über Fußquerschnitt
	13	390k	- (nicht näher definiert)	frequenzselektiv	Mittelwert über Fußquerschnitt

### 3.3.8.3 Langwellentherapie

In der Untergruppe der Langwellentherapie wurden aufgrund der in Kapitel 3.1.2 erläuterten Kriterien die Publikationen De Santis et al. (2015) und Skanlab Norge ausgeschlossen:

**Tabelle 3.83:** Liste der Immissionswerte der elektrischen Feldstärke für die Untergruppe Langwellentherapie der Kategorie medizinische Anwendungen.

Publikation	Immissionswert E [V/m]	Frequenz [Hz]	Messposition	Messmethode	Kommentar
Floderus et al. (2002)	0	1M	10 cm (nicht näher definiert)	frequenzselektiv	am Patienten befestigt
	300	1M	10 cm (nicht näher definiert)	frequenzselektiv	frei (nur Gel aufgetragen)
	78.5	1M	Sonde am Körper des Arbeiters befestigt	frequenzselektiv	normale Behandlung

**Tabelle 3.84:** Liste der Immissionswerte der magnetischen Feldstärke für die Untergruppe Langwellentherapie der Kategorie medizinische Anwendungen.

Publikation	Immissionswert H [A/m]	Frequenz [Hz]	Messposition	Messmethode	Kommentar
Floderus et al. (2002)	0	1M	10 cm (nicht näher definiert)	frequenzselektiv	am Patienten befestigt
	0.05	1M	50 cm (nicht näher definiert)	frequenzselektiv	frei (nur Gel aufgetragen)
	0.46	1M	Sonde am Körper des Arbeiters befestigt	frequenzselektiv	normale Behandlung

**Tabelle 3.85:** Liste der Expositionswerte des Kontaktstromes für die Untergruppe Langwellentherapie der Kategorie medizinische Anwendungen.

Publikation	Expositionswert I <sub>c</sub> [mA]	Frequenz [Hz]	Messposition	Messmethode	Kommentar
Floderus et al. (2002)	6.2	1M	- (nicht näher definiert)	frequenzselektiv	Mittelwert über Armquerschnitt; am Patienten befestigt
	12.8	1M	- (nicht näher definiert)	frequenzselektiv	Mittelwert über Armquerschnitt; frei (nur Gel aufgetragen)

### 3.3.8.4 Magnetfeldtherapie

In der Untergruppe der Magnetfeldtherapie wurden aufgrund der in Kapitel 3.1.2 erläuterten Kriterien die Publikationen De Santis et al. (2015) und Gwechenberger et al. (2006) ausgeschlossen.

### 3.3.8.5 Magnetische Knochenstimulatoren

In der Untergruppe der magnetischen Knochenstimulation wurden aufgrund der in Kapitel 3.1.2 erläuterten Kriterien die Publikationen Litvak et al. (2002) sowie Polk und Postow (1995) ausgeschlossen.

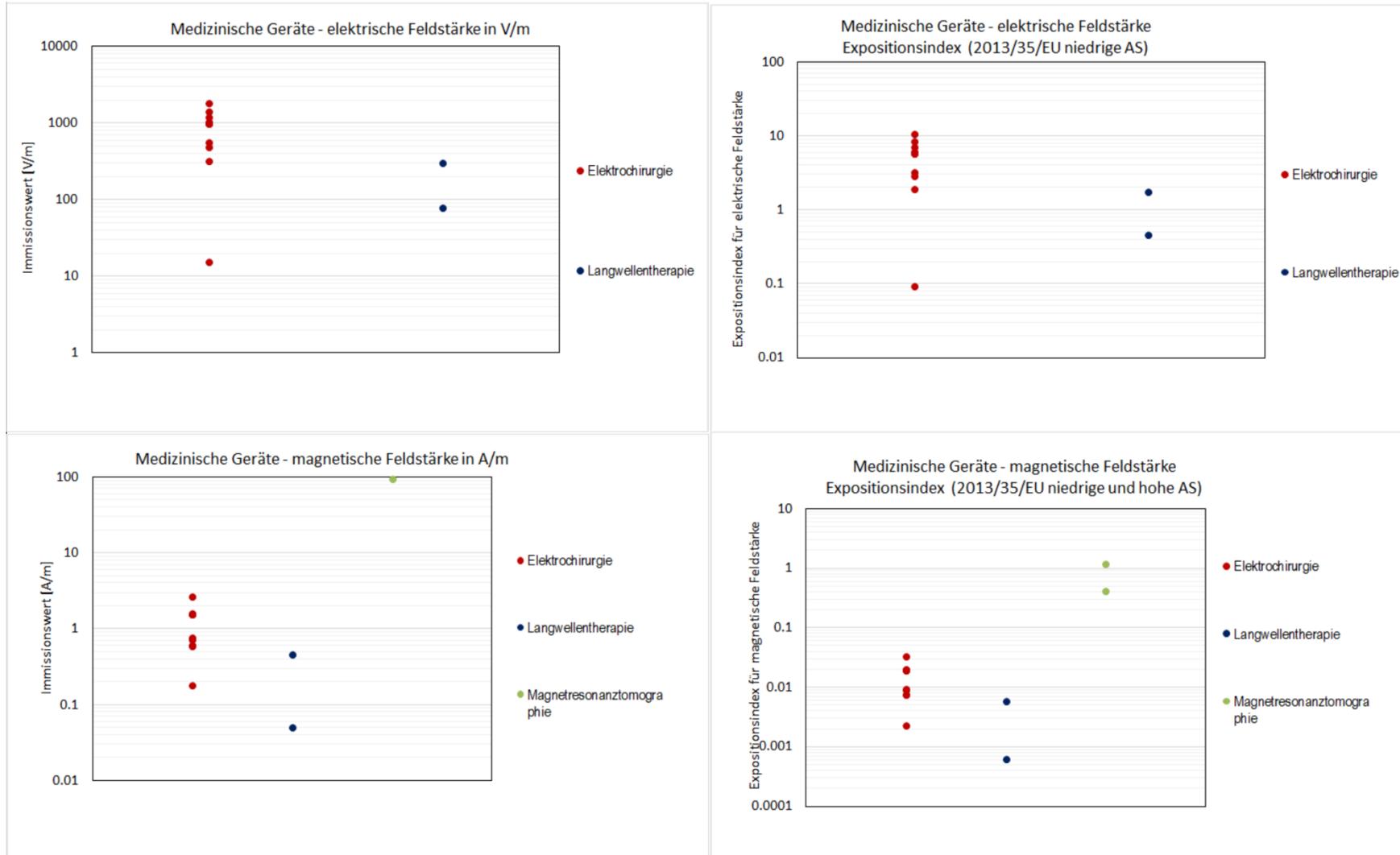
### 3.3.8.6 Magnetresonanztomograph

In der Untergruppe der Magnetresonanztomographie wurden aufgrund der in Kapitel 3.1.2 erläuterten Kriterien die Publikationen Acri et al. (2014), Boss et al. (2007), Capstick (2008), de Greef et al. (2013), Farrag (2014), Israel et al. (2013), Karpowicz und Gryz (2013), Laakso et al. (2013), Litvak et al. (2002), Liu et al. (2003), Murbach et al. (2014), Schaap et al. (2014), Wilkening und Sutton (1990) und Yamaguchi-Sekino et al. (2014) ausgeschlossen.

**Tabelle 3.86:** Liste der Immissionswerte der magnetischen Feldstärke für die Untergruppe Magnetresonanztomograph der Kategorie medizinische Anwendungen.

Publikation	Immissionswert H [A/m]	Frequenz [Hz]	Messposition	Messmethode	Kommentar
	94.4	1Hz-400k	45 cm (nicht näher definiert)	frequenzselektiv	
	2.44 WP-FD	1Hz-400k	20 cm (nicht näher definiert)	frequenzselektiv	ICNIRP 1998 beruflich exponierte Personen
Andreuccetti et al. (2013)	0.415 WP-FD	1Hz-400k	20 cm (nicht näher definiert)	frequenzselektiv	ICNIRP 2010 beruflich exponierte Personen
	12.0 WP-FD	1Hz-400k	20 cm (nicht näher definiert)	frequenzselektiv	ICNIRP 1998 Allgemeinbevölkerung
	1.57 WP-FD	1Hz-400k	20 cm (nicht näher definiert)	frequenzselektiv	ICNIRP 2010 Allgemeinbevölkerung
Budinger et al. (1991)	8000	600, 960, 1.27k, 1.52k, 1.95k	- (nicht näher definiert)	-	

### 3.3.8.7 Diagramme



**Abbildung 3.7:** Graphische Darstellung der Immissionswerte (links) sowie der zugehörigen Expositionsindizes für beruflich exponierte Personen (rechts) für die elektrische (oben) und magnetische (unten) Feldstärke bei Quellen aus der Kategorie der medizinischen Anwendungen.

### 3.3.9 Radio Frequenz Identifikation (RFID)

RFID Systeme, die im Zwischenfrequenzbereich arbeiten, nutzen zumeist einen schmalen Frequenzbereich im Bereich zwischen ca. 70 kHz und 150 kHz. Relativ veraltet sind Zutrittskontrollsysteme, die zumeist mit Frequenzen zwischen 120 und 135 kHz arbeiten und für die einzelne Daten vorhanden sind (Schmid et al., 2012). Während die magnetischen Feldstärken in der Nähe von Proximity Lesegeräten (kleine Antennen, typ. < 100 mm x 100 mm) gering sind, können die magnetischen Feldstärken in der Nähe zu Vicinity Antennen (groß, typ. 40 cm x 150 cm) mehrere 10 A/m betragen und damit zu Expositionsindizes > 1 führen. In unmittelbarer Nähe zu solchen Antennen stehend können auch Überschreitungen der Basiswerte nicht ausgeschlossen werden (Schmid et al., 2012). Systeme für die Tieridentifikation, die in Europa den gleichen Frequenzbereich nutzen, sind demgegenüber weniger relevant. Für Handleser gilt Ähnliches wie für die oben bereits angeführten Proximity Leser von Zutrittskontrollsystemen, und in der Nähe von Vicinity-Lesern mit großen Durchgangsantennen (z.B. bei Melkständen) sind die magnetischen Feldstärken typischer Weise wesentlich geringer als bei Vicinity Antennen für Personen-Zutrittskontrollsystemen. Grund dafür ist, dass der von den Tieren getragene Transponder (im Gegensatz zu Zutrittskarten) typischerweise einen Ferritkern enthält und damit die Sendefeldstärke der Leser-Antenne deutlich geringer ausfallen kann.

Eine neuere im Wachsen begriffene RFID-Anwendung im Zwischenfrequenzbereich für die jedoch bisher keinerlei Immissionsdaten vorhanden sind, stellen so genannte „Keyless-Go“ Systeme (elektronischer Autoschlüssel) dar. Diese Systeme kombinieren typischer Weise mehrere Funkübertragungsverfahren, eine Systemkomponente wird jedoch zumeist von Antennen zur induktiven Übertragung von Information gebildet, die im Fahrzeug an mehreren Stellen verbaut sind. Von diesen Antennen wird in regelmäßigen Abständen ein magnetisches Feld ausgesendet um den „Autoschlüssel“ (enthält zugehörigen Transponder) zu lokalisieren.

### 3.3.9.1 LF-Zutrittskontrollsystem (Proximity Coupling)

**Tabelle 3.87:** Liste der Immissionswerte der magnetischen Feldstärke für die Untergruppe LF-Zutrittskontrollsystem (Proximity Coupling) der Kategorie Radio Frequenz Identifikation (RFID).

Publikation	Immissionswert H [A/m]	Frequenz [Hz]	Messposition	Messmethode	Kommentar
Schmid et al. (2012)	1.64	120k	4 cm (von Geräteoberfläche)	breitbandig	RMS

### 3.3.9.2 LF-Zutrittskontrollsystem (Vicinity Coupling)

**Tabelle 3.88:** Liste der Immissionswerte der magnetischen Feldstärke für die Untergruppe LF-Zutrittskontrollsystem (Vicinity Coupling) der Kategorie Radio Frequenz Identifikation (RFID).

Publikation	Immissionswert H [A/m]	Frequenz [Hz]	Messposition	Messmethode	Kommentar
	24.8	120k	10 cm (von Geräteoberfläche)	breitbandig	RMS
Schmid et al. (2012)	15.12	120k	20 cm (von Geräteoberfläche)	breitbandig	RMS
	8.32	120k	35 cm (von Geräteoberfläche)	breitbandig	RMS

**Tabelle 3.89:** Liste der Expositionswerte der induzierten Stromdichte für die Untergruppe LF-Zutrittskontrollsystem (Vicinity Coupling) der Kategorie Radio Frequenz Identifikation (RFID).

Publikation	Expositionswert J [mA/m <sup>2</sup> ]	Frequenz [Hz]	Messposition	Messmethode	Kommentar
	150	120k	20 cm (seitlich stehend)	-	ZNS; RMS; Mittelwert über 1cm <sup>2</sup>
	890	120k	20 cm (seitlich stehend)	-	alle Gewebe; RMS; Mittelwert über 1cm <sup>2</sup>
Schmid et al. (2012)	230	120k	10 cm (mit Rücken zum Gerät)	-	ZNS; RMS; Mittelwert über 1cm <sup>2</sup>
	3190	120k	10 cm (mit Rücken zum Gerät)	-	alle Gewebe; RMS; Mittelwert über 1cm <sup>2</sup>
	310	120k	10 cm (mit Brust zum Gerät)	-	ZNS; RMS; Mittelwert über 1cm <sup>2</sup>
	2270	120k	10 cm (mit Brust zum Gerät)	-	alle Gewebe; RMS; Mittelwert über 1cm <sup>2</sup>

**Tabelle 3.90:** Liste der Expositionswerte der spezifischen Absorptionsrate für die Untergruppe LF-Zutrittskontrollsystem (Vicinity Coupling) der Kategorie Radio Frequenz Identifikation (RFID).

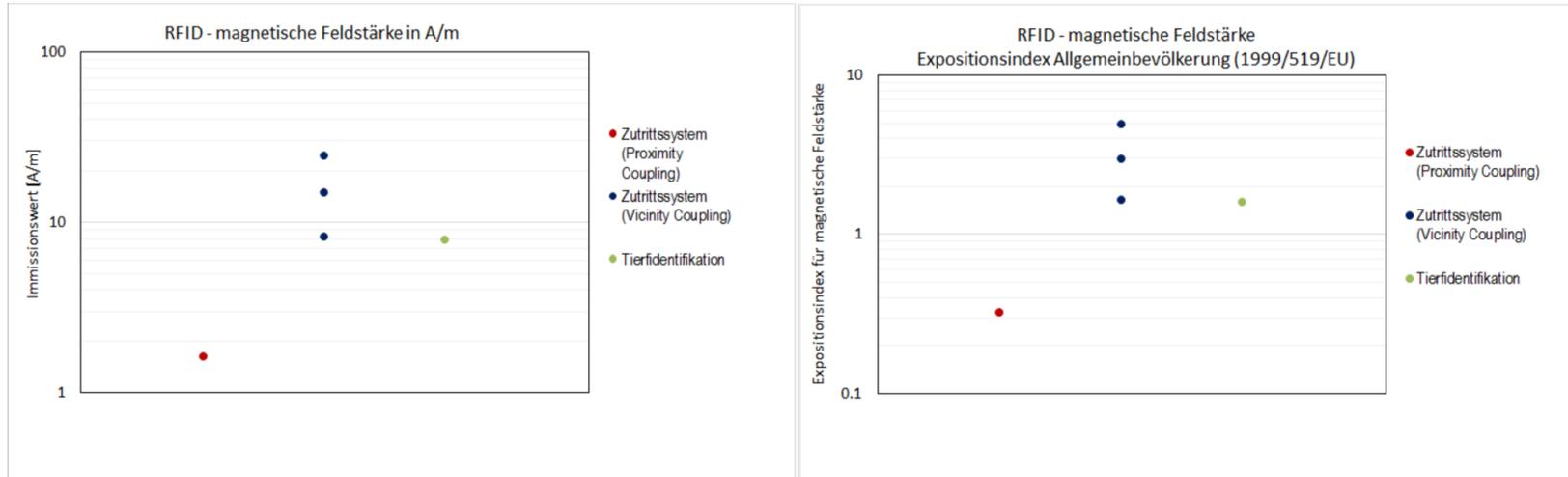
Publikation	Expositionswert SAR [W/kg]	Frequenz [Hz]	Messposition	Messmethode	Kommentar
Schmid et al. (2012)	0.00025	120k	20 cm (seitlich stehend)	-	RMS; 10g Mittelwert
	0.00001	120k	20 cm (seitlich stehend)	-	RMS; Ganzkörpermittelwert
	0.00199	120k	10 cm (mit Rücken zum Gerät)	-	RMS; 10g Mittelwert
	0.00011	120k	10 cm (mit Rücken zum Gerät)	-	RMS; Ganzkörpermittelwert
	0.00039	120k	10 cm (mit Brust zum Gerät)	-	RMS; 10g Mittelwert
	0.00003	120k	10 cm (mit Brust zum Gerät)	-	RMS; Ganzkörpermittelwert

### 3.3.9.3 LF-Vicinity System zur Tieridentifikation

**Tabelle 3.91:** Liste der Immissionswerte der magnetischen Feldstärke für die Untergruppe LF-Vicinity System zur Tieridentifikation der Kategorie Radio Frequenz Identifikation (RFID).

Publikation	Immissionswert H [A/m]	Frequenz [Hz]	Messposition	Messmethode	Kommentar
Schmid et al. (2012)	8	120k	7 cm (von Antennenleiter)	breitbandig	RMS

### 3.3.9.4 Diagramme



**Abbildung 3.8:** Graphische Darstellung der Immissionswerte (links) sowie der zugehörigen Expositionsindizes für die Allgemeinbevölkerung (rechts) für die magnetische Feldstärke bei Quellen aus der Kategorie der Radio Frequenz Identifikation (RFID).

### 3.3.10 Schweiß- und Lötgeräte

Die von Löt- und insbesondere von Schweißgeräten und –anlagen verursachte Magnetfeldexposition von Personen war in den vergangenen Jahren und ist gegenwärtig Gegenstand zahlreicher Untersuchungen, wobei in diesen Arbeiten die Bewertung der Gesamtexposition (von 0 Hz bis in den Zwischenfrequenzbereich) im Vordergrund stand bzw. steht. Eine separate Angabe der Immissionsanteile im Zwischenfrequenzbereich findet sich gegenwärtig nur in ganz wenigen Arbeiten, die im Rahmen dieses Projekts als Grundlage verwendet werden konnten.

Grundsätzlich sind die Immissionsanteile im Zwischenfrequenzbereich wieder von Schaltreglern (Invertern) verursacht, die in modernen Schweißgeräten zur Steuerung des Schweißstromes verwendet werden. Dem Schweißstrom (dessen spektraler Hauptanteil im ELF-Bereich liegt) ist dadurch eine Restwelligkeit (Ripple) überlagert, die jedoch, abhängig vom Schweißverfahren und der Invertercharakteristik, mehrere hundert Ampere betragen kann, was in der Nähe der Gerätekomponenten (Schweißkabel, Zangenfenster) zu relevanten magnetischen Feldstärken im Bereich oberhalb von 1 kA/m im Zwischenfrequenzbereich und damit zu Expositionsindizes deutlich größer als 10 führen kann. Je nach Schweißstromquelle (Schweißstrom-Zeitverlauf, Amplitude und Zeitverlauf des Ripples) kann der Anteil der Zwischenfrequenzimmission vernachlässigbar, relevant oder sogar dominierend im Hinblick auf die Gesamtexposition sein (Schmid et al., 2017b). Von besonderer Relevanz erscheinen hier handgeführte Schweißzangen, da sie relativ nah am Körper betrieben werden. Öffentlich zugängliche Daten bezüglich des Zwischenfrequenzanteils der im Körper induzierten elektrischen Feldstärken von konkreten Geräten liegen gegenwärtig noch keine vor. In (Börner, 2013) wurden für zwei unterschiedliche Geometrien von Schweißzangen und einem anatomischen Körpermodell systematische Berechnungen der im Gewebe induzierten elektrischen Feldstärke  $E_i$  für unterschiedliche Frequenzen durchgeführt. Der Abstand des Körpermodells zur Zangenfenstermitte betrug dabei immer mindestens 20 cm. Für eine typische Frequenz der Restwelligkeit von 2 kHz wird in (Börner, 2013) eine maximale, auf 1 A Strom normierte induzierte elektrische Feldstärke von ca. 6,5 mV/A angegeben. Geht man von diesem Wert und einer Stromwelligkeit mit Amplitude von 300 A aus, wird ersichtlich, dass eine Überschreitung der Expositionsgrenzwerte für gesundheitliche Effekte (1,1 V/m gemäß 2013/35/EU) nicht ausgeschlossen werden kann. Unter Berücksichtigung der Tatsachen, dass

1. die Berechnungen in (Börner, 2013) nur mit einem anatomischen Körpermodell und nur mit 2 konkreten Zangen-Geometrien durchgeführt wurden,
2. der dort angenommene Mindestabstand von 200 mm zur Zangenfenstermitte und die Ausrichtung des Körpermodells nicht zwingend den worst case in der Praxis darstellen, und schließlich
3. dass in der Praxis Schweißstromrestwelligkeiten auch größer als 300 A (Amplitude) beobachtet wurden (Schmid et al., 2017b),

deutet die gegenwärtig verfügbare Datenlage bezüglich Widerstandsschweißen auf strahlenschutztechnisch und arbeitnehmerschutztechnisch besonders interessante Fragestellungen in Zusammenhang mit der Exposition im Zwischenfrequenzbereich hin.

### 3.3.10.1 Hartlötanlage

**Tabelle 3.92:** Liste der Immissionswerte der magnetischen Feldstärke für die Untergruppe Hartlötanlage der Kategorie Schweiß- und Lötgeräte.

Publikation	Immissionswert H [A/m]	Frequenz [Hz]	Messposition	Messmethode	Kommentar
Vereinigung der Metall-Berufsgenossenschaften (2003)	400	10k	- (nicht näher definiert)	-	

### 3.3.10.2 I-Lötanlage

**Tabelle 3.93:** Liste der Immissionswerte der magnetischen Feldstärke für die Untergruppe I-Lötanlage der Kategorie Schweiß- und Lötgeräte.

Publikation	Immissionswert H [A/m]	Frequenz [Hz]	Messposition	Messmethode	Kommentar
Vereinigung der Metall-Berufsgenossenschaften (2003)	49.6	100k	- (nicht näher definiert)	-	

### 3.3.10.3 Lichtbogenschweißgeräte

**Tabelle 3.94:** Liste der Immissionswerte der elektrischen Feldstärke für die Untergruppe Lichtbogenschweißgeräte der Kategorie Schweiß- und Lötgeräte.

Publikation	Immissionswert E [V/m]	Frequenz [Hz]	Messposition	Messmethode	Kommentar
Aerts et al. (2017)	0.05 Expositionsindex	98k	20 cm (nicht näher definiert)	frequenzselektiv	ICNIRP 2010 Allgemeinbevölkerung; peak; 30s max hold
	7.29	98k, Harmonische	20 cm (nicht näher definiert)	breitbandig	peak; 30s max hold

**Tabelle 3.95:** Liste der Immissionswerte der magnetischen Feldstärke für die Untergruppe Lichtbogenschweißgeräte der Kategorie Schweiß- und Lötgeräte.

Publikation	Immissionswert H [A/m]	Frequenz [Hz]	Messposition	Messmethode	Kommentar
Aerts et al. (2017)	0.12	99k	20 cm (nicht näher definiert)	frequenzselektiv	peak; 30s max hold
	0.18	98k, Harmonische	20 cm (nicht näher definiert)	breitbandig	peak; 30s max hold
Molla-Djafari et al. (2008)	85%	100k-400k	nahe Schweißkabel	frequenzselektiv	ICNIRP 1998 beruflich exponierte Personen; RMS

### 3.3.10.4 Punktschweißzangen

In der Untergruppe der Punktschweißzangen wurde aufgrund der in Kapitel 3.1.2 erläuterten Kriterien die Publikation Börner (2009) ausgeschlossen.

**Tabelle 3.96:** Liste der Immissionswerte der magnetischen Feldstärke für die Untergruppe Punktschweißzangen der Kategorie Schweiß- und Lötgeräte.

Publikation	Immissionswert H [A/m]	Frequenz [Hz]	Messposition	Messmethode	Kommentar
Seibersdorf Labor GmbH (2016c)	1600	1 - 400k	10 cm zur Fensterebene der Roboterschweißzange	frequenzselektiv	Spitze-Spitze
	200	1 - 400k	50 cm zur Fensterebene der Roboterschweißzange	frequenzselektiv	Spitze-Spitze
	2240	1 - 400k	10 cm zur Schweißelektrode der Roboterschweißzange	frequenzselektiv	Spitze-Spitze
	160	1 - 400k	50 cm zur Schweißelektrode der Roboterschweißzange	frequenzselektiv	Spitze-Spitze

**Tabelle 3.97:** Liste der Expositionswerte der induzierten elektrischen Feldstärke für die Untergruppe Punktschweißzangen der Kategorie Schweiß- und Lötgeräte.

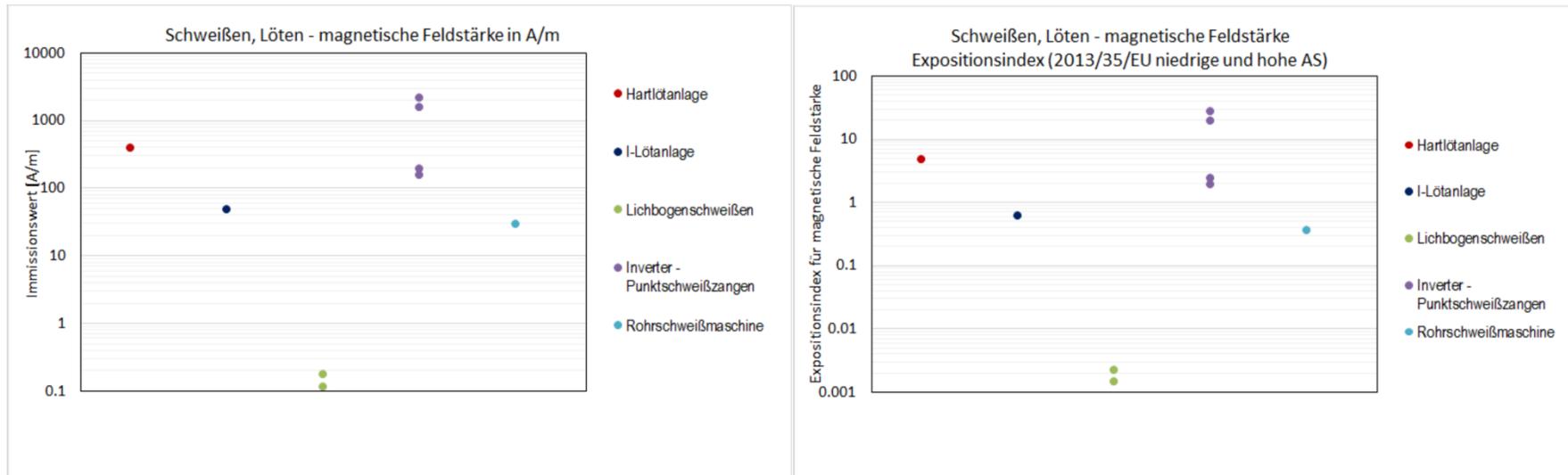
Publikation	Expositionswert E <sub>i</sub> (normiert)	Frequenz [Hz]	Messposition	Messmethode	Kommentar
Börner (2013)	3,3 mV / A pro kHz	-	20 cm Normalabstand zur Zangenfenstermitte	-	Maximaler Spitzenwert, normiert auf 1 A

### 3.3.10.5 Rohrschweißmaschine

**Tabelle 3.98:** Liste der Immissionswerte der magnetischen Feldstärke für die Untergruppe Rohrschweißmaschine der Kategorie Schweiß- und Lötgeräte.

Publikation	Immissionswert H [A/m]	Frequenz [Hz]	Messposition	Messmethode	Kommentar
Vereinigung der Metall-Berufsgenossenschaften (2003)	29.8	400k	- (nicht näher definiert)	-	

### 3.3.10.6 Diagramme



**Abbildung 3.9:** Graphische Darstellung der Immissionswerte (links) sowie der zugehörigen Expositionsindizes für beruflich exponierte Personen (rechts) für die magnetische Feldstärke bei Quellen aus der Kategorie der Schweiß- und Lötgeräte.

### **3.3.11 Sonstiges**

In dieser Kategorie wurden verfügbare Daten der Zwischenfrequenzimmissionen von weiteren Feldquellen zusammengefasst, die keiner anderen der festgelegten Kategorien zugeordnet werden konnten. Die Immissionen, verursacht von den gegenwärtig ohnehin nur mehr wenig präsenten AM-Radiosendern sind im für die Allgemeinbevölkerung zugänglichen Bereichen offensichtlich von untergeordneter Bedeutung und daher nur im Hinblick auf die Exposition von Arbeitnehmern nahe den Antennen relevant. Soweit aus den publizierten Daten ableitbar (Messorte der Immissionsdaten in (Joseph et al., 2012b) nicht angegeben), dürfte dies auch für Non-Directional Beacon (NDB-)Sender für die Luftraumüberwachung angenommen werden können.

Interessanter erscheinen hingegen die Immissionsdaten für Metalldetektoren, vor allem Durchgangs-Metalldetektoren, wie sie beispielsweise auf Flughäfen jeder Passagier im Zuge des Security-Checks durchschreiten muss. Die im Durchgangsbereich auftretenden magnetischen Feldstärken liegen lokal deutlich oberhalb der Referenzwerte für die Allgemeinbevölkerung gemäß 1999/519/EU. Auch die bisher veröffentlichten Daten im Hinblick auf die im Körper induzierten Wirkungsgrößen lassen nicht den Schluss zu, dass in der Praxis Überschreitungen der Basiswerte ausgeschlossen werden können.

### 3.3.11.1 AM-Radiosender

In der Untergruppe der AM-Radiosender wurden aufgrund der in Kapitel 3.1.2 erläuterten Kriterien die Publikationen Allen et al. (1994), Health Protection Agency und Advisory Group on Non-ionising Radiation AGNIR (2012), Mantiply et al. (1997) und Valič et al. (2015) ausgeschlossen.

**Tabelle 3.99:** Liste der Immissionswerte der elektrischen Feldstärke für die Untergruppe AM-Radiosender der Kategorie Sonstiges.

Publikation	Immissionswert E [V/m]	Frequenz [Hz]	Messposition	Messmethode	Kommentar
Jokela et al. (1994)	490	963k	10 m	-	
	70	963k	50 m		
	25	963k	100 m		

**Tabelle 3.100:** Liste der Expositionswerte des Kontaktstromes für die Untergruppe AM-Radiosender der Kategorie Sonstiges.

Publikation	Expositionswert I <sub>c</sub> [mA]	Frequenz [Hz]	Messposition	Messmethode	Kommentar
Jokela et al. (1994)	130	963k	10 m	-	GC-2 Fußstrommessgerät (Eigenentwicklung der Universität von Utah)

### 3.3.11.2 GSM-Mobiltelefone (nur NF)

In der Untergruppe der GSM-Mobiltelefone wurden aufgrund der in Kapitel 3.1.2 erläuterten Kriterien die Publikationen Straume et al. (2007) und Tuor et al. (2005) ausgeschlossen.

### 3.3.11.3 Metalldetektor

In der Untergruppe der Metalldetektoren wurde aufgrund der in Kapitel 3.1.2 erläuterten Kriterien die Publikation Cooper (2002) ausgeschlossen.

**Tabelle 3.101:** Liste der Immissionswerte der elektrischen Feldstärke für die Untergruppe Metalldetektor der Kategorie Sonstiges.

Publikation	Immissionswert E [V/m]	Frequenz [Hz]	Messposition	Messmethode	Kommentar
Floderus et al. (2002)	70	5k	10 cm (nicht näher definiert)	frequenzselektiv	
	658	5k	Sonde am Körper des Arbeiters befestigt	frequenzselektiv	

**Tabelle 3.102:** Liste der Immissionswerte der magnetischen Feldstärke für die Untergruppe Metalldetektor der Kategorie Sonstiges.

Publikation	Immissionswert H [A/m]	Frequenz [Hz]	Messposition	Messmethode	Kommentar
Boivin et al. (2003)	6.81	94.8k	5 cm Mittelpunkt zu Mittelpunkt	breitbandig	Spitze - Spitze; Handgerät
	193	500	direkt im Durchgang	breitbandig	Spitze - Spitze; Walk Through
	85	3.5k	direkt im Durchgang	breitbandig	Spitze - Spitze; Walk Through
Floderus et al. (2002)	2	5k	50 cm (nicht näher definiert)	frequenzselektiv	
	0.35	5k	Sonde am Körper des Arbeiters befestigt	frequenzselektiv	

**Tabelle 3.103:** Liste der Expositionswerte der induzierten Stromdichte für die Untergruppe Metalldetektor der Kategorie Sonstiges.

Publikation	Expositionswert J [mA/m <sup>2</sup> ]	Frequenz [Hz]	Messposition	Messmethode	Kommentar
Kainz et al. (2003)	35.7	95k	1 cm (nicht näher definiert).	-	Mittelwert über 1cm <sup>2</sup> ; Handgerät
Wu et al. (2007)	3.69	940	direkt im Durchgang	-	alle Gewebe; Mittelwert über 1cm <sup>2</sup> ; Walk Through
	3.06	940	direkt im Durchgang	-	Gewebe des Fötus; Mittelwert über 1cm <sup>2</sup> ; Walk Through

### 3.3.11.4 Luftraumüberwachung

In der Untergruppe der Luftraumüberwachung wurde aufgrund der in Kapitel 3.1.2 erläuterten Kriterien die Publikation Joseph et al. (2012a) ausgeschlossen.

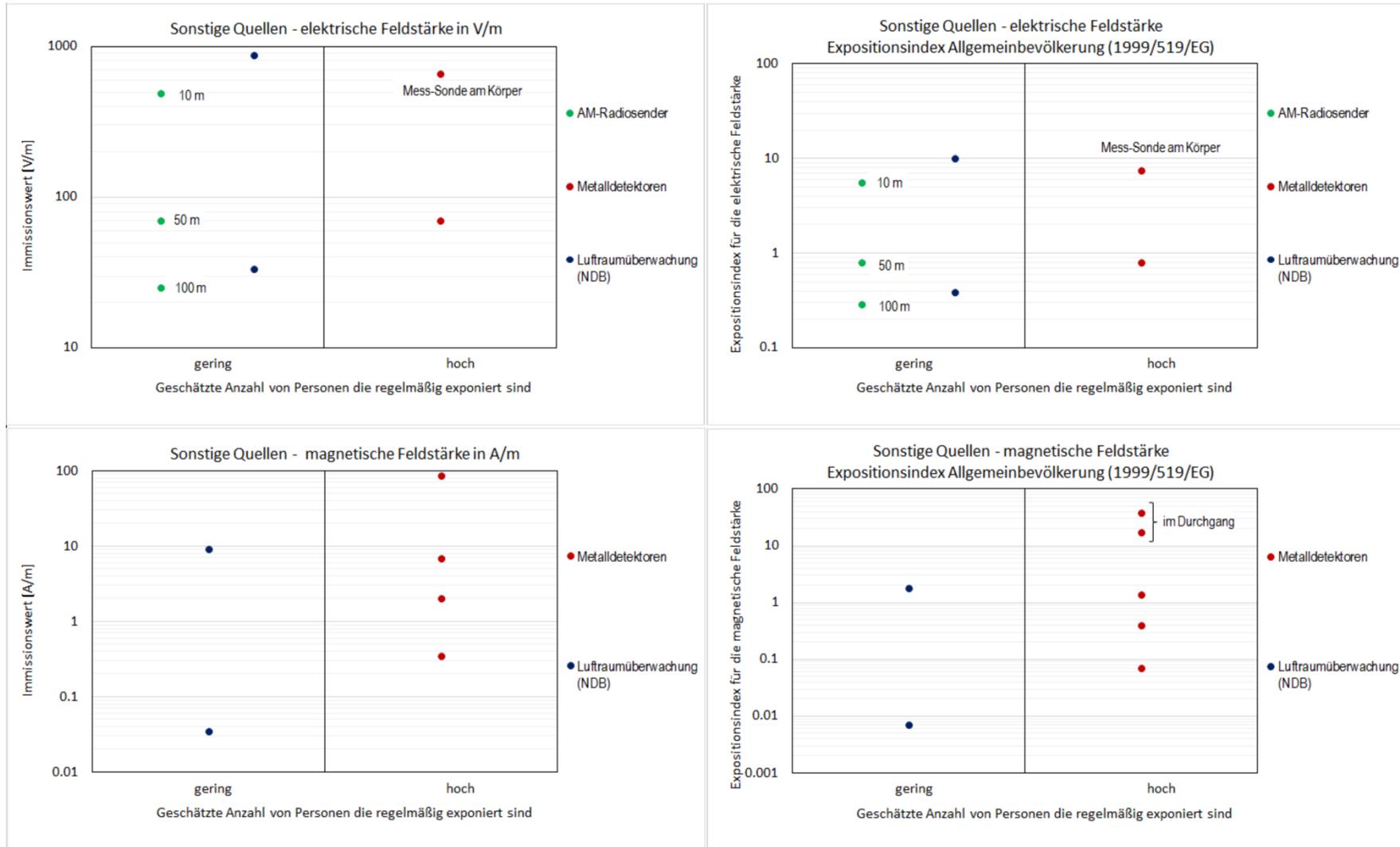
**Tabelle 3.104:** Liste der Immissionswerte der elektrischen Feldstärke für die Untergruppe Luftraumüberwachung der Kategorie Sonstiges.

Publikation	Immissionswert E [V/m]	Frequenz [Hz]	Messposition	Messmethode	Kommentar
Joseph et al. (2012b)	881.6	293k	nicht definiert	frequenzselektiv	120s max hold
	1.45 Expositionswert	293k	nicht definiert	frequenzselektiv	ICNIRP 1998 beruflich exponierte Personen; 120s max hold
	33.6	293k	nicht definiert	frequenzselektiv	120s max hold
	0.39 Expositionswert	293k	nicht definiert	frequenzselektiv	ICNIRP 1998 Allgemeinbevölkerung; 120s max hold

**Tabelle 3.105:** Liste der Immissionswerte der magnetischen Feldstärke für die Untergruppe Luftraumüberwachung der Kategorie Sonstiges.

Publikation	Immissionswert H [A/m]	Frequenz [Hz]	Messposition	Messmethode	Kommentar
Joseph et al. (2012b)	9.1	314k	nicht definiert	frequenzselektiv	120s max hold
	1.78 Expositionsindex	314k	nicht definiert	frequenzselektiv	ICNIRP 1998 beruflich exponierte Personen; 120s max hold
	0.035 A/m	314k, 386.5k	nicht definiert	frequenzselektiv	120s max hold
	0.02 Expositionsindex	314k, 386.5k	nicht definiert	frequenzselektiv	ICNIRP 1998 Allgemeinbevölkerung; 120s max hold

### 3.3.11.5 Diagramme



**Abbildung 3.10:** Graphische Darstellung der Immissionswerte (links) sowie der zugehörigen Expositionsindizes für die Allgemeinbevölkerung (rechts) für die elektrische (oben) und magnetische (unten) Feldstärke bei Quellen aus der Kategorie Sonstiges.

### **3.4 Zusammenfassende Bewertung der Exposition von Personen im Zwischenfrequenzbereich**

Aus dem ermittelten Stand der Technik lässt sich ableiten, dass die Quellen elektromagnetischer Felder, die einen messbaren Immissionsanteil im Zwischenfrequenzbereich von 300 Hz – 1 MHz verursachen, mannigfaltig sind. Allein aufgrund der Tatsache, dass die meisten modernen elektrischen und elektronischen Geräte über Schaltnetzteile mit Schaltfrequenzen im kHz-Bereich an das 50 Hz-Netz angeschlossen werden, kann erwartet werden, dass Personen im Alltag regelmäßig elektromagnetischen Immissionen im Zwischenfrequenzbereich ausgesetzt sind. Weiters reichen Oberwellen der Betriebsströme vieler elektrischer und elektronischer Geräte (z.B. Elektromotoren in Haushalts-, Büro- und Werkzeuggeräten) deutlich in den Zwischenfrequenzbereich hinein. Schließlich nutzen viele Geräte des privaten und beruflichen Alltags gezielt für ihre Funktion Frequenzen im Zwischenfrequenzbereich.

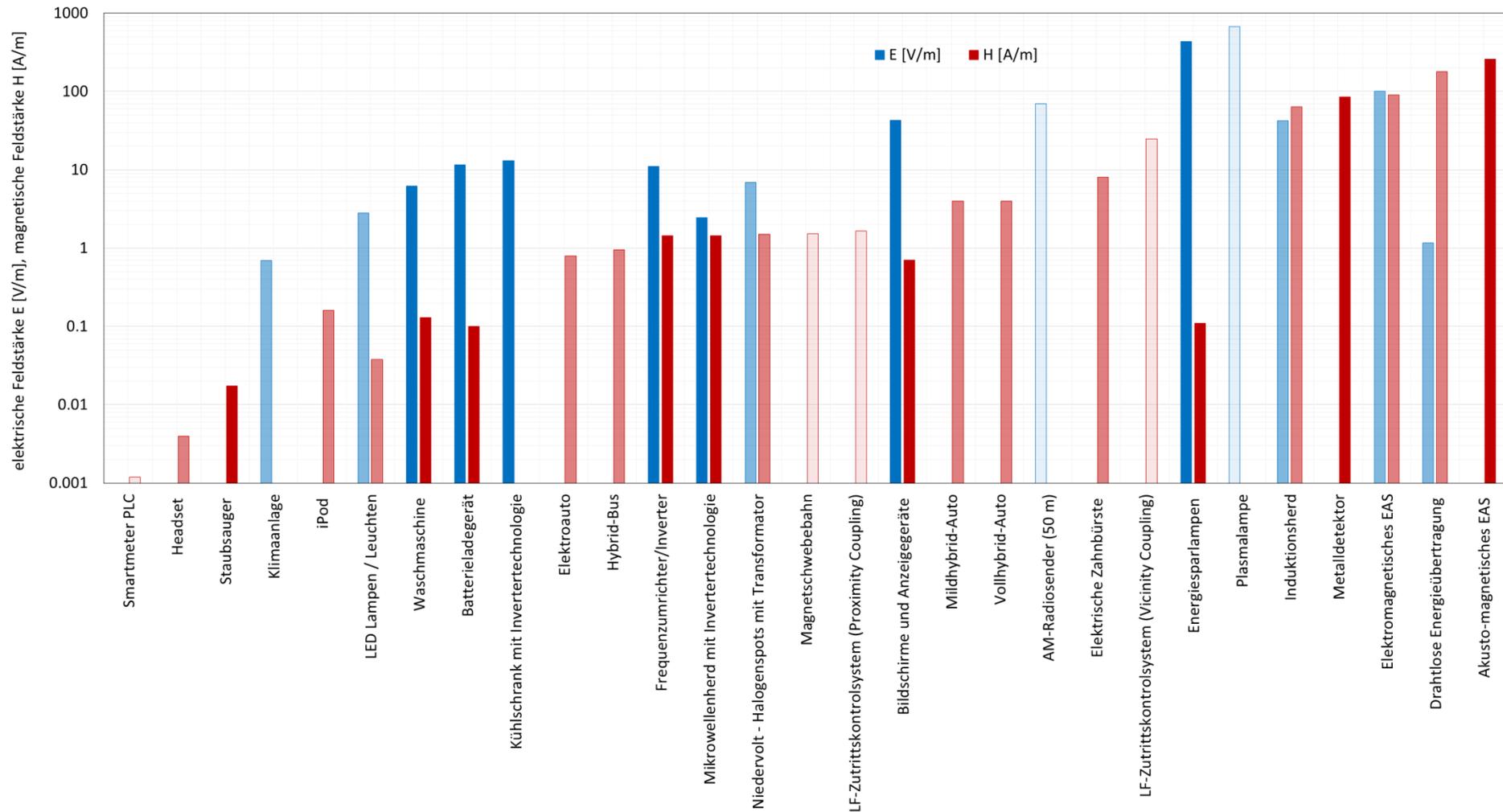
Die durchgeführte Recherche nach wissenschaftlichen und validen Daten, die zur Charakterisierung der Exposition der Bevölkerung durch elektromagnetische Felder im Zwischenfrequenzbereich herangezogen werden können, zeigte jedoch, dass verwertbare Daten nur sehr spärlich vorhanden sind. Dies betrifft vor allem Geräte, deren Hauptanteil des Immissionsspektrums außerhalb des Zwischenfrequenzbereiches (zumeist im ELF-Bereich) liegt, wie z.B. die oben angeführten und weit verbreiteten haushalts- und bürotypischen Geräte. Wenngleich eine Vielzahl von ausführlichen Arbeiten zur Charakterisierung der Exposition von Personen durch eine Vielzahl solcher Feldquellen vorliegt, so ist jener Anteil dieser Arbeiten, aus dem sich der Beitrag aus dem Zwischenfrequenzbereich an der Gesamtexposition ableiten lässt, relativ gering.

Ähnliches gilt auch für die Immissionen verursacht von Fahrzeugen mit Elektroantrieb, Geräten und Anlagen zur elektromagnetischen Erwärmung (z.B. Induktionsöfen) und der Verbindungstechnik (z.B. Schweißen) der Metallindustrie.

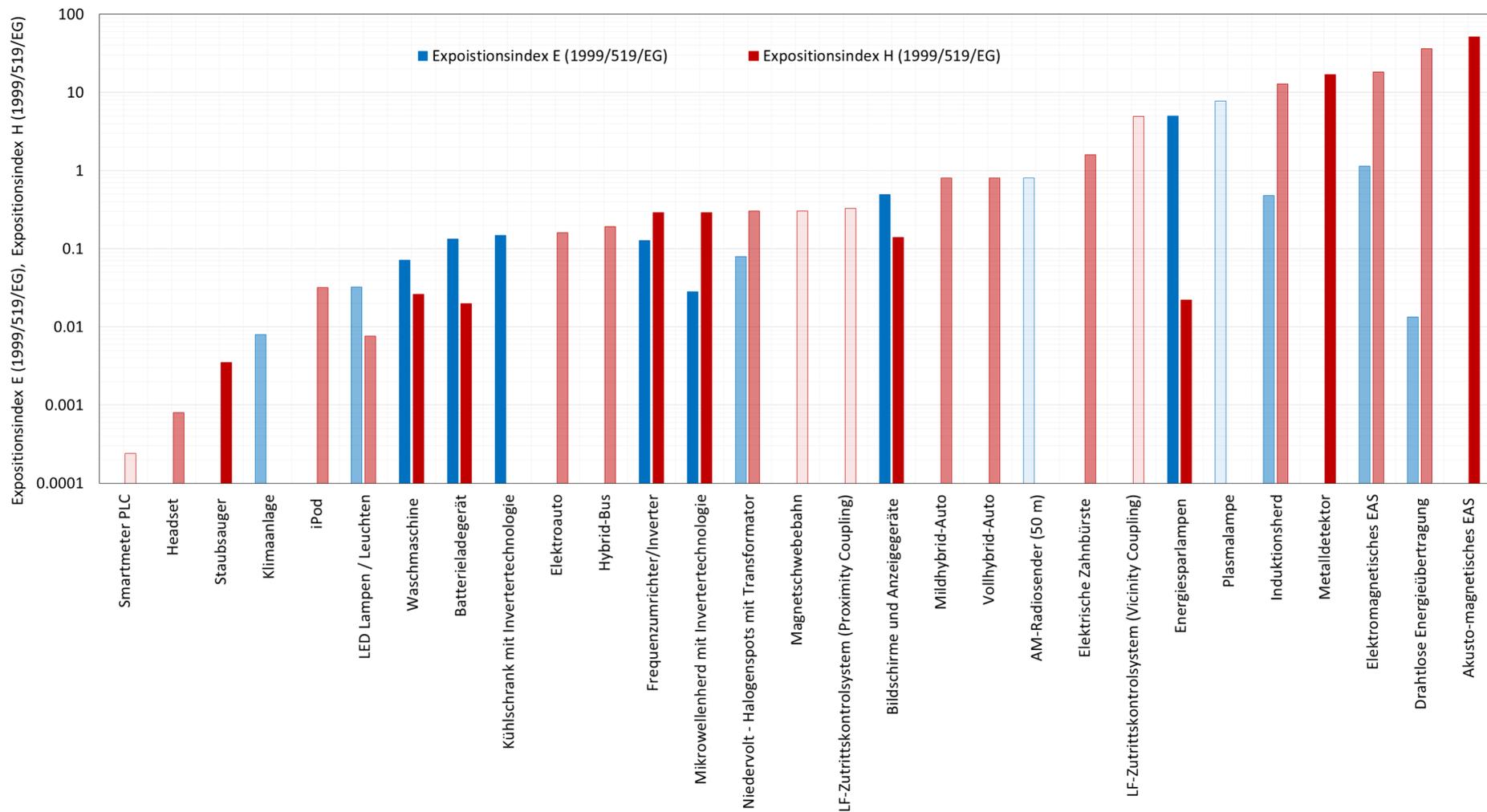
Zur Abschätzung des Ausmaßes der Exposition der Allgemeinbevölkerung in ihrem täglichen Umfeld und von Arbeitnehmern und Arbeitnehmerinnen an ihrem Arbeitsplatz durch elektromagnetische Felder im Zwischenfrequenzbereich wurden die in Kapitel 3.2 und 3.3 zusammengefassten Daten unter Berücksichtigung der gegenwärtigen und absehbaren zukünftigen Verbreitung weiter analysiert.

#### **3.4.1 Exposition der Allgemeinbevölkerung**

Abbildung 3.11 zeigt eine grafische Zusammenfassung der in den verwertbaren Publikationen berichteten Maximalwerte der gemessenen elektrischen und magnetischen Feldstärken im Zwischenfrequenzbereich in der Nähe der unterschiedlichen Geräte bzw. Anlagen, die als relevant für die Allgemeinbevölkerung angesehen werden müssen. Die dargestellten Immissionswerte wurden in Distanzen zu den Geräten gemessen, wie sie als realistischer worst case im Alltag angesehen werden können (typ. zwischen 10-50 cm Distanz zur Geräteoberfläche). Die Helligkeit der Balken im Diagramm stellt die geschätzte Anzahl von Personen dar, die durch diese Immissionen gegenwärtig und innerhalb der nächsten 5-10 Jahre regelmäßig bzw. über längere Zeiträume exponiert sind (dunkler Balken = hoch, mittlere Farbsättigung des Balkens = mittel, heller Balken = gering). Abbildung 3.12 zeigt die gleichen Daten in Form der Expositionsindizes bei Zugrundelegung der Referenzwerte gemäß EU-Ratsempfehlung 1999/519/EG.



**Abbildung 3.11:** Graphische Zusammenfassung der maximalen gemessenen elektrischen (blau) und magnetischen (rot) Feldstärken der unterschiedlichen Geräte, die für die Exposition der Allgemeinbevölkerung relevant sind. Die Farbsättigung zeigt die geschätzte Anzahl an betroffenen Personen an, die von Immissionen der entsprechenden Geräte betroffen sein können (dunkel = hoch, hell = niedrig).



**Abbildung 3.12:** Graphische Zusammenfassung der maximalen Expositionsindizes bei Zugrundelegung der Referenzwerte gemäß EU-Ratsempfehlung 1999/519/EG für elektrische (blau) und magnetische (rot) Immissionen der unterschiedlichen Geräte, die für die Exposition der Allgemeinbevölkerung relevant sind. Die Farbsättigung zeigt die geschätzte Anzahl an betroffenen Personen an, die von Immissionen der entsprechenden Geräte betroffen sein können (dunkel = hoch, hell = niedrig).

Die Daten zeigen, dass für viele weit verbreitete Geräte die Immissionen vergleichsweise gering sind (im Vergleich zu den gegenwärtigen Referenzwerten). Andererseits deuten die Daten aber auch für einige bereits gegenwärtig weit verbreitete Geräte und einige in naher Zukunft deutlich zunehmende Geräte bzw. Technologien auf relativ hohe Expositionen hin. Während der hohe Expositionsindex ( $>1$ ) bezüglich der elektrischen Feldstärke in der Nähe zu Energiesparlampen relativiert werden muss, da Berechnungen der im Körper induzierten Wirkungsgrößen keine Hinweise auf potenzielle Konflikte mit den Basiswerten zeigen (aus physikalischer Sicht kann vermutlich Ähnliches auch für Plasmalampen angenommen werden), bleiben Geräte zur drahtlosen Energieübertragung, Induktionsherde, akustomagnetische Artikelsicherungsanlagen und Metalldetektoren als strahlenschutztechnisch besonders interessante und für die Allgemeinbevölkerung besonders relevante Zwischenfrequenzfeldquellen bestehen. Da für die von elektronischen Artikelsicherungsanlagen verursachten Expositionen bereits eine solide Datenbasis verfügbar ist, wird Forschungsbedarf vor allem im Hinblick auf Geräte zur drahtlosen Energieübertragung, Metalldetektoren und Induktionsherden gesehen (Abbildung 3.13).

Quelle	Verbreitung	Datenlage	Exposition in der Praxis
LF-RFID	gering	mittel	BGW Überschreitung möglich
Energiesparlampen	hoch	gut	BGW Überschreitung unwahrsch.
Plasmalampen	gering	schlecht	BGW Überschreitung unwahrsch.
Induktionsherd	mittel	mittel	BGW Überschreitung möglich
Metalldetektoren	hoch	schlecht	BGW Überschreitung möglich
EM-EAS	mittel	gut	BGW Überschreitung möglich
Drahtlose E-Übertrag.	mittel	mittel	BGW Überschreitung möglich
AM-EAS	hoch	gut	BGW Überschreitung möglich

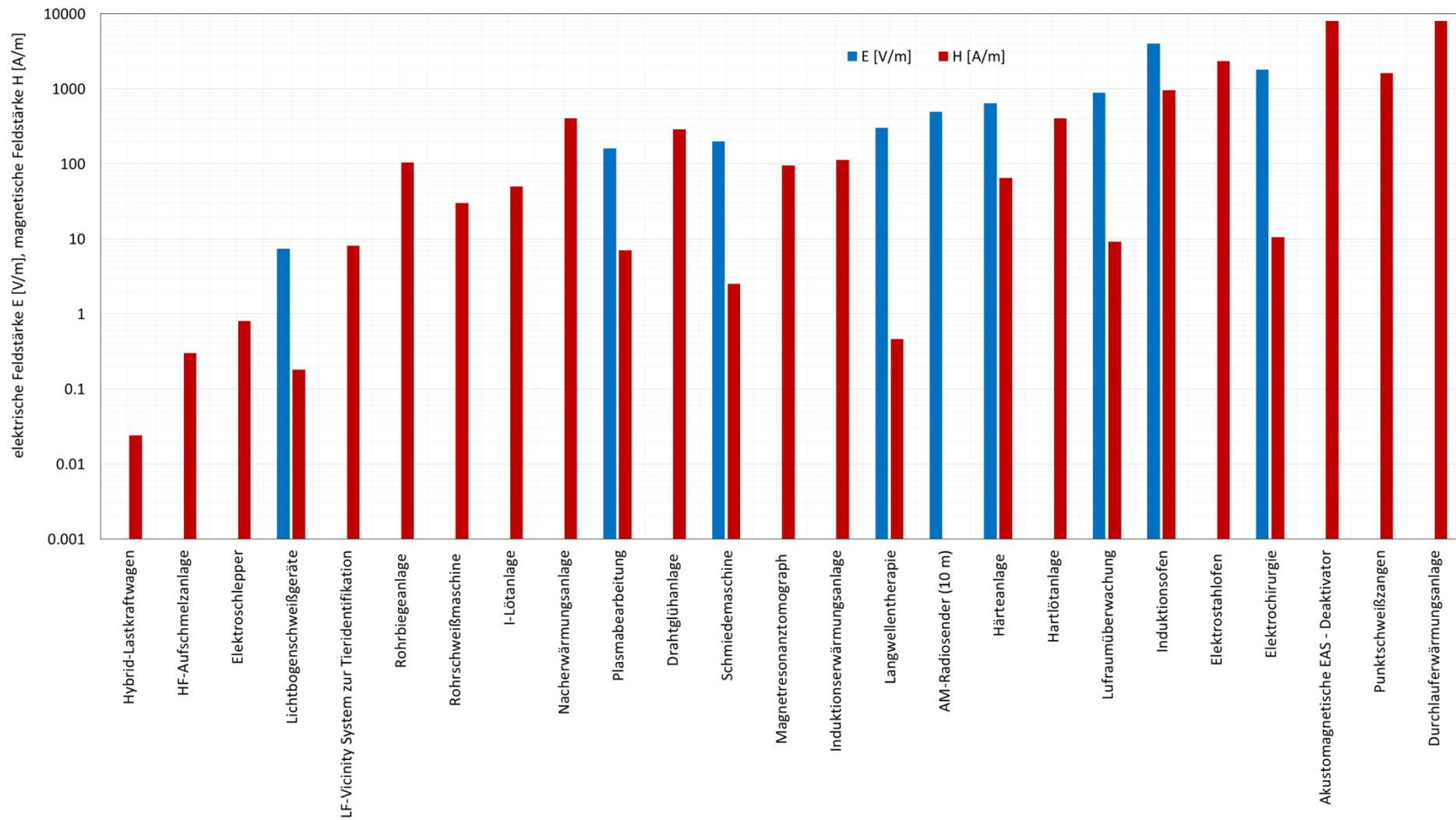
tendenziell zunehmende Exposition

**Abbildung 3.13:** Auswahl der für die Exposition der Allgemeinbevölkerung als am meisten relevant eingestufteten Zwischenfrequenzquellen, mit Angaben im Hinblick auf deren Verbreitung, verfügbaren Expositionsdaten und einer Einschätzung bezüglich der Möglichkeit von Überschreitungen des Basisgrenzwertes (BGW).

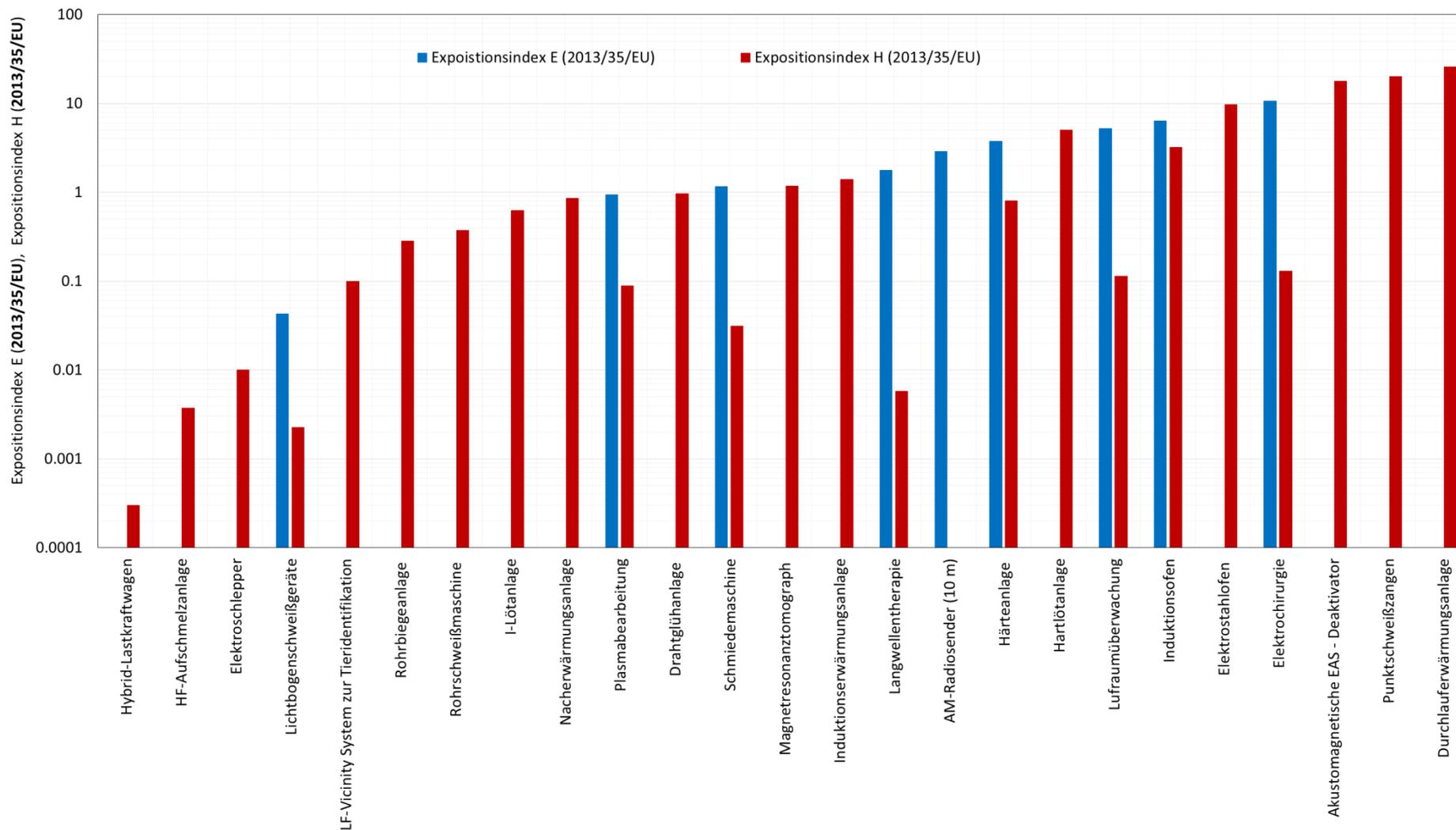
### 3.4.2 Exposition am Arbeitsplatz

Abbildung 3.14 fasst die erhobenen Daten der Zwischenfrequenzimmissionen in Form der Maximalwerte der elektrischen und magnetischen Feldstärke zusammen, wie sie in der Nähe von Geräten gemessen wurden, die als ausschließlich für berufliche Exposition relevant angesehen werden können. Die angegebenen Werte traten in Distanzen zu den Geräten bzw. Anlagen auf, wie sie in der Praxis als durchaus üblich anzusehen sind. Abbildung 3.15 zeigt die gleichen Daten in Form der Expositionsindizes bei Zugrundelegung der niedrigen Auslöseschwellen gemäß EU-Richtlinie 2013/35/EU.

Hinweise auf mögliche Expositionen oberhalb der Auslöseschwellen ergeben sich daraus vor allem für einige Anwendungen in der metallverarbeitenden Industrie, wie z.B. für Widerstandsschweißen (Punktschweißen) und induktive Erwärmungsprozesse. Aber auch Deaktivatoren für akustomagnetische EAS-Etiketten und elektrochirurgische Geräte zeigen sich als besonders relevant und gleichzeitig als Zwischenfrequenzquellen bei denen noch Bedarf an soliden Expositionsdaten besteht (Abbildung 3.16).



**Abbildung 3.14:** Graphische Zusammenfassung der maximalen gemessenen elektrischen (blau) und magnetischen (rot) Feldstärken von unterschiedlichen Geräten, die als ausschließlich für berufliche Exposition relevant angesehen werden können.



**Abbildung 3.15:** Graphische Zusammenfassung der maximalen Expositionsindizes bei Zugrundelegung der niedrigen Auslöseschwellen gemäß EU-Richtlinie 2013/35/EU für elektrische (blau) und magnetische (rot) Immissionen von unterschiedlichen Geräten, die als ausschließlich für berufliche Exposition relevant angesehen werden können.

tendenziell zunehmende Exposition

Quelle	Verbreitung	Datenlage	Exposition in der Praxis
Schmiedemaschine	gering	mittel	BGW Überschreitung unwahrsch.
MRT	gering	gut	BGW Überschreitung unwahrsch.
Induktionserwärmung	mittel	schlecht	BGW Überschreitung möglich
Langwellentherapie	gering	schlecht	BGW Überschreitung unwahrsch.
AM- und NDB-Sender	gering	schlecht	?
Härten und Löten	gering	schlecht	BGW Überschreitung möglich
Ind.- und E-Stahlofen	gering	schlecht	?
Elektrochirurgie	mittel	schlecht	?
AM-EAS Deaktivator	hoch	schlecht	BGW Überschreitung möglich
Widerstandsschweißen	hoch	mittel	BGW Überschreitung möglich

**Abbildung 3.16:** Auswahl der im Hinblick auf die Exposition am Arbeitsplatz als am meisten relevant eingestufteten Zwischenfrequenzquellen, mit Angaben zu deren Verbreitung, verfügbaren Expositionsdaten und einer Einschätzung bezüglich der Möglichkeit von Überschreitungen des Basisgrenzwertes (BGW) bzw. Expositionsgrenzwertes.

## 4 Bewertung der möglichen biologischen und gesundheitlichen Wirkungen elektromagnetischer Felder im Zwischenfrequenzbereich anhand der erfassten originalen Literaturstellen

Es liegen bisher nur wenige Übersichtsarbeiten zu den möglichen biologischen Wirkungen elektromagnetischer Felder im Zwischenfrequenzbereich vor, wobei die meisten dieser Arbeiten nicht explizit diesen Frequenzbereich untersucht haben, sondern ihn nur ausschnittsweise bzw. zusätzlich zu anderen Frequenzbereichen betrachtet haben. Juutilainen (1991) hat in einem Review zu den Wirkungen von Feldern im Bereich 10 Hz – 20 kHz einige Hinweise auf negative Auswirkungen auf die Schwangerschaft zusammengetragen, schlussfolgerte jedoch, dass die Datenlage nicht ausreichend sei, um ein Fazit ziehen zu können. Litvak et al. (2002) evaluierten in ihrem Übersichtsartikel Studien, die den Bereich 300 Hz – 10 MHz untersucht haben und schlussfolgerten, dass keine Hinweise auf gesundheitliche Wirkungen unterhalb der Grenzwerte vorliegen. Allerdings urteilten sie ebenfalls, dass die Datenlage nicht ausreichend sei, insbesondere um Wirkungen für Feldstärken unterhalb der Grenzwerte zu bewerten. Shigemitsu et al. (2007) evaluierten ebenfalls Studien im Zwischenfrequenzbereich, wobei der Fokus auf Frequenzen im Bereich von 20 kHz lag. Die Autoren kamen zu dem Schluss, dass die verfügbaren Daten für eine Bewertung des Gesundheitsrisikos nicht ausreichend seien. Schrafel et al. (2016) schlussfolgerten in einem Review zu den möglichen Gesundheitsrisiken durch drahtlose Energieübertragung (ca. 20 kHz), dass bei Einhaltung der aktuellen Normen und Grenzwerte keine Gefahren für die menschliche Gesundheit bestehen.

### 4.1 Methoden

Der Review wurde nach den PRISMA (Preferred Reporting Items for Systematic Reviews and Meta-Analyses)-Richtlinien erstellt (Moher et al., 2009). Es wurden die gleichen Methoden wie bei Petri et al. (2017) und Schmiedchen et al. (2018) verwendet.

#### 4.1.1 Literaturrecherche

Die systematische Literatursuche nach relevanten Artikeln wurde in der thematisch spezialisierten Literaturdatenbank EMF-Portal ([www.emf-portal.org](http://www.emf-portal.org)) durchgeführt. Das EMF-Portal ist die weltweit umfangreichste wissenschaftliche Literaturdatenbank zu biologischen und gesundheitsbezogenen Wirkungen von magnetischen, elektrischen und elektromagnetischen Feldern und wurde von der WHO als Referenzdatenbank anerkannt<sup>3</sup>. Sie besteht seit über 15 Jahren, ist kostenfrei öffentlich zugänglich und umfasst derzeit ca. 26.000 wissenschaftliche Veröffentlichungen (Stand: Januar 2018). Relevante Studien werden täglich anhand systematischer Suchstrategien in internationalen Literaturdatenbanken wie Medline/PubMed<sup>4</sup> und IEEE Xplore Digital Library<sup>5</sup> identifiziert und in das EMF-Portal aufgenommen. Wissenschaftliche Zeitschriften, die in diesen Datenbanken nicht enthalten sind, werden separat geprüft. Alle in das EMF-Portal eingehenden Studien werden nach grundlegenden Merkmalen wie Expositions-Parameter (z.B. Frequenz, Art des Feldes), Art der Veröffentlichung (z.B. Originalstudien, Review, Kommentar) und Studiendesign (z.B. experimentelle Studie, epidemiologische

---

<sup>3</sup> <http://www.who.int/peh-emf/research/database/en/index1.html>, abgerufen am 23.01.18

<sup>4</sup> <https://www.ncbi.nlm.nih.gov/pubmed/>, abgerufen am 23.01.18

<sup>5</sup> <http://ieeexplore.ieee.org/Xplore/home.jsp>, abgerufen am 23.01.18

Studie) kategorisiert. So wird jeder Artikel mit zusätzlichen Details auf der Grundlage eines standardisierten Schemas charakterisiert, um hochspezifische Suchen zu ermöglichen.

Bei der Primärsuche im EMF-Portal wurde nach allen Artikeln, die den Begriff „Zwischenfrequenz“ enthalten, gesucht<sup>6</sup>. Durch die automatische Übersetzung des Suchbegriffs wurde damit gleichzeitig auch nach „intermediate frequency“ gesucht. Zudem wurden die Referenzlisten der Artikel der Primärsuche durchgesehen, um weitere relevante Artikel zu identifizieren.

#### 4.1.2 Studienauswahl, Ein- und Ausschlusskriterien

Die Einschlusskriterien wurden nach der PECO (*population, exposure, control, outcome*, deutsch: Population, Exposition, Kontrolle, Ergebnis)-Strategie definiert (NTP, 2015a). Relevant für diesen Review waren alle experimentellen und epidemiologischen Studien, in denen biologische Systeme (P), das heißt Menschen, Tiere und *in vitro*-Systeme (z.B. Mikroorganismen, Zellen) bei magnetischen, elektrischen oder elektromagnetischen Feldern im Zwischenfrequenzbereich (300 Hz – 1 MHz) exponiert wurden (E). Als Signalformen wurden sinusförmige und symmetrische Dreiecks-Signalformen sowie Studien ohne Spezifikation der Signalform akzeptiert. Bezüglich der untersuchten Endpunkte wurden im Vorfeld keine Einschränkungen festgelegt, d.h. es wurden Wirkungen auf alle biologischen Funktionen berücksichtigt (O). Weitere Einschlusskriterien waren, dass die Studien eine Kontrollgruppe oder -bedingung ohne Exposition (Sham) beinhalteten (C) und die Expositionsquelle und -dauer sowie die Feldstärke angegeben waren. Bei Humanstudien mussten außerdem zumindest die Probanden verblindet gewesen sein. Eingeschlossen wurden nur englisch- und deutschsprachige Artikel, die in Fachzeitschriften mit Peer-Review-Verfahren veröffentlicht wurden. Der Zeitpunkt der Veröffentlichung war auf Studien nach 1970 beschränkt.

Ausgeschlossen wurden dosimetrische Studien, Reviews und Kommentare. Studien, die keine diskreten Frequenzen (Frequenzspektren) oder ein Feld nur in einer Ko-Exposition mit anderen Feldern oder nicht-elektromagnetischen-Expositionen (z.B. Medikamenten) untersucht haben, wurden ebenfalls ausgeschlossen. Auch Studien, die Puls-Signale (d.h. asymmetrische oder unregelmäßige Wellenformen, Rechteck-, Trapez- und Sägezahn-Wellenformen und alle nicht näher definierten Puls-Signale) nutzten, wurden ausgeschlossen, da sich hierbei schwer definierbare Frequenzspektren ergeben.

Studien zu Strom-Applikationen sowie Studien, die natürliche Sferics (impulshafte elektromagnetische Wellen natürlichen Ursprungs innerhalb der Erdatmosphäre, meist bei Gewittern) untersuchten, wurden ebenso ausgeschlossen wie Studien mit einer Exposition bei VDUs (Visual Display Units, d.h. Computerbildschirmen), da hier stets Puls-Signale und verschiedene Felder auftreten. Nicht berücksichtigt wurden weiterhin Studien zu subzellulären Strukturen und Molekülen.

---

<sup>6</sup> Link zur Suche, abgerufen am 10.01.18: <https://www.emf-portal.org/de/article/search/results?keywords=Zwischenfrequenz+&logicalOperator=0&authors=&journals=&years=&topics%5B%5D=0&topics%5B%5D=1&topics%5B%5D=2&topics%5B%5D=3&topics%5B%5D=4&topics%5B%5D=5&topics%5B%5D=6&topics%5B%5D=7&topics%5B%5D=8&topics%5B%5D=9&frequencyRanges%5B%5D=0&frequencyRanges%5B%5D=1&frequencyRanges%5B%5D=2&frequencyRanges%5B%5D=3&frequencyRanges%5B%5D=4&timeSpan=0>

Alle potenziell relevanten Artikel wurden anhand der Ein- und Ausschlusskriterien in zwei Schritten überprüft. Zunächst wurden Titel und Abstracts unabhängig von zwei Autoren durchgesehen (LB, LW) (Vorauswahl, vgl. Abbildung 4.2). Anschließend wurden die Volltexte aller Artikel, die die Einschlusskriterien erfüllten, unabhängig von mehreren Autoren überprüft (Eignung) und gemeinsam über deren Ein- bzw. Ausschluss entschieden (LB, SD, DS, DD).

#### 4.1.3 Studienextraktion

Das Extraktionsprotokoll wurde vor Beginn des Projekts festgelegt. Die extrahierten Daten umfassten bibliographische Angaben, das experimentelle Modell (Mensch, Tier oder Zelle), die Anzahl an experimentellen Gruppen und Kontroll- bzw. Schein-Expositionsgruppen<sup>7</sup>, die Anzahl der Studienteilnehmer, Tiere bzw. Zellkulturplatten, die Frequenz, die Feldstärke und die Expositionsdauer. Die untersuchten Endpunkte und die Ergebnisse wurden ebenfalls extrahiert. Besonderheiten bzw. Einschränkungen der Studien wurden notiert. Die Daten der eingeschlossenen Studien wurden unabhängig voneinander von zwei Autoren (LB, DD/SD) extrahiert und anschließend abgeglichen. Unstimmigkeiten und technische Unklarheiten wurden von den Autoren (LB, DD, SD, DS) diskutiert und ggf. durch weitere Recherche geklärt.

#### 4.1.4 Studienbewertung

Um die interne Validität (d.h. die Minimierung des Bias-Risikos im Studiendesign) und die Qualität der eingeschlossenen Studien zu bewerten, wurde das vom National Toxicology Program's (NTP) Office of Health Assessment and Translation (OHAT) veröffentlichte Protokoll (NTP, 2015a, 2015b) verwendet. Dieses Protokoll, das speziell für Studien mit einem Fokus auf Umweltgesundheit und Toxikologie entwickelt wurde, beinhaltet eine detaillierte Anleitung, mit der beurteilt werden kann, inwieweit das Design und die Durchführung einer Studie zu einer möglichen Verzerrung (Bias) der Ergebnisse geführt haben können, d.h. zu einer Unter- oder Überschätzung des Expositionseffektes.

Für diesen Review wurden zwei Modifikationen des OHAT-Protokolls vorgenommen. Die erste Modifikation ermöglichte die zusätzliche Bewertung von *in vitro*-Studien, die im OHAT-Protokoll bisher nicht gesondert behandelt werden. *In vitro*-Studien wurden, wie von Rooney (2015) empfohlen, weitestgehend wie experimentelle Tierstudien behandelt, jedoch mit dem Unterschied, dass bei Studien, die Zellen aus einer homogenen Zellsuspension untersucht haben, die Bewertungskriterien *Randomization* und *Allocation Concealment* nicht zur Anwendung kamen. Die zweite Modifikation des OHAT-Protokolls betraf das Kriterium *Identical Experimental Conditions Across Study Groups*. Dieses Kriterium wurde von den Autoren auch für Humanstudien (*Human Controlled Trials*) als relevant betrachtet, um die experimentellen Bedingungen bei der Schein-Exposition zu bewerten, die bei Studien mit elektro-magnetischen Feldern ein ausschlaggebender Faktor für ein gut kontrolliertes Design sind. Es wurden demzufolge für alle eingeschlossenen *Human Controlled Trials* und *Experimental Animals Studies* neun Kriterien angewendet, anhand derer der *Selection Bias*, *Performance Bias*, *Attrition/Exclusion Bias*, *Detection Bias*, *Selective Reporting Bias* und andere Ursachen für Bias (*Other biases*) bewertet wurden. Bei *in vitro*-Studien wurden abhängig vom exponierten System entweder sieben Kriterien (Zellen aus homogener Zellsuspension) oder neun Kriterien (anderes exponiertes System, z.B. Gewebe oder

---

<sup>7</sup> Zwischen den Bezeichnungen „Kontrolle“ und „Schein-Exposition“ wurde insofern unterschieden, als dass der Begriff „Kontrolle“ ohne weitere Erklärungen keinerlei Aussage darüber macht, ob versucht wurde, die Umgebungsbedingungen der exponierten Gruppen nachzubilden (Schein-Exposition) oder nicht (z.B. Käfig-Kontrolle).

Blutproben) angewendet. Zwei Autoren (LB, DD) bewerteten unabhängig voneinander die jeweiligen Kriterien für alle eingeschlossenen Studien wie folgt: "++" = definitiv geringes Bias-Risiko, "+" = wahrscheinlich geringes Bias-Risiko, "-" = wahrscheinlich hohes Bias-Risiko oder "--" = definitiv hohes Bias-Risiko. Die Ergebnisse wurden anschließend miteinander verglichen und die endgültige Bewertung durch Konsens beider Autoren festgelegt.

Die Bewertungen der einzelnen Kriterien bildeten die Grundlage für die Einteilung der Studien in eine der drei Qualitätsklassen (hohe, moderate oder geringe Studienqualität). Hierfür wurden drei Schlüsselkriterien definiert, denen ein stärkeres Gewicht bei der Beurteilung der Qualität zukam: (1) *confidence in the exposure*, (2) *confidence in the outcome assessment* und (3) *identical experimental conditions across study groups*. Den Bewertungen der restlichen Kriterien kam ein geringeres Gewicht zu. Abbildung 4.1 und die nachfolgende Erklärung bieten eine detailliertere Zusammenstellung der Kriterien für die Studienqualität.

Qualitätskategorie	Bedingungen		Bias-Risiko-Kriterien <small>(Schlüsselkriterien sind fettgedruckt bzw. schwarz umrandet)</small>								
			<i>Confidence in the exposure</i>	<i>Confidence in the outcome assessment</i>	<i>Identical experimental conditions across study groups</i>	Randomization exposure level	Allocation concealment	Blinding of research personnel/ subjects	Attrition/exclusion rate	All measured outcomes reported	Other potential threats
hoch	"definitiv geringes Bias-Risiko" (++) oder "wahrscheinlich geringes Bias-Risiko" (+) in allen Schlüsselkriterien UND "definitiv niedriges Bias-Risiko" (++) oder "wahrscheinlich geringes Bias-Risiko" (+) in $\geq 50\%$ der verbleibenden Kriterien	Beispiel 1	+	++	+	+	+	-	-	++	+
moderat	Studien, die weder der hohen noch der niedrigen Qualitätskategorie zugeordnet werden können	Beispiel 2	++	-	+	-	-	+	+	++	-
		Beispiel 3	+	-	-	-	-	++	+	--	+
		Beispiel 4	-	--	+	+	-	++	-	+	+
gering	"definitiv hohes Bias-Risiko" (-) oder "wahrscheinlich hohes Bias-Risiko" (-) in allen Schlüsselkriterien UND "definitiv hohes Bias-Risiko" (-) oder "wahrscheinlich hohes Bias-Risiko" (-) in $\geq 50\%$ der verbleibenden Kriterien	Beispiel 5	--	-	-	+	-	++	-	-	-

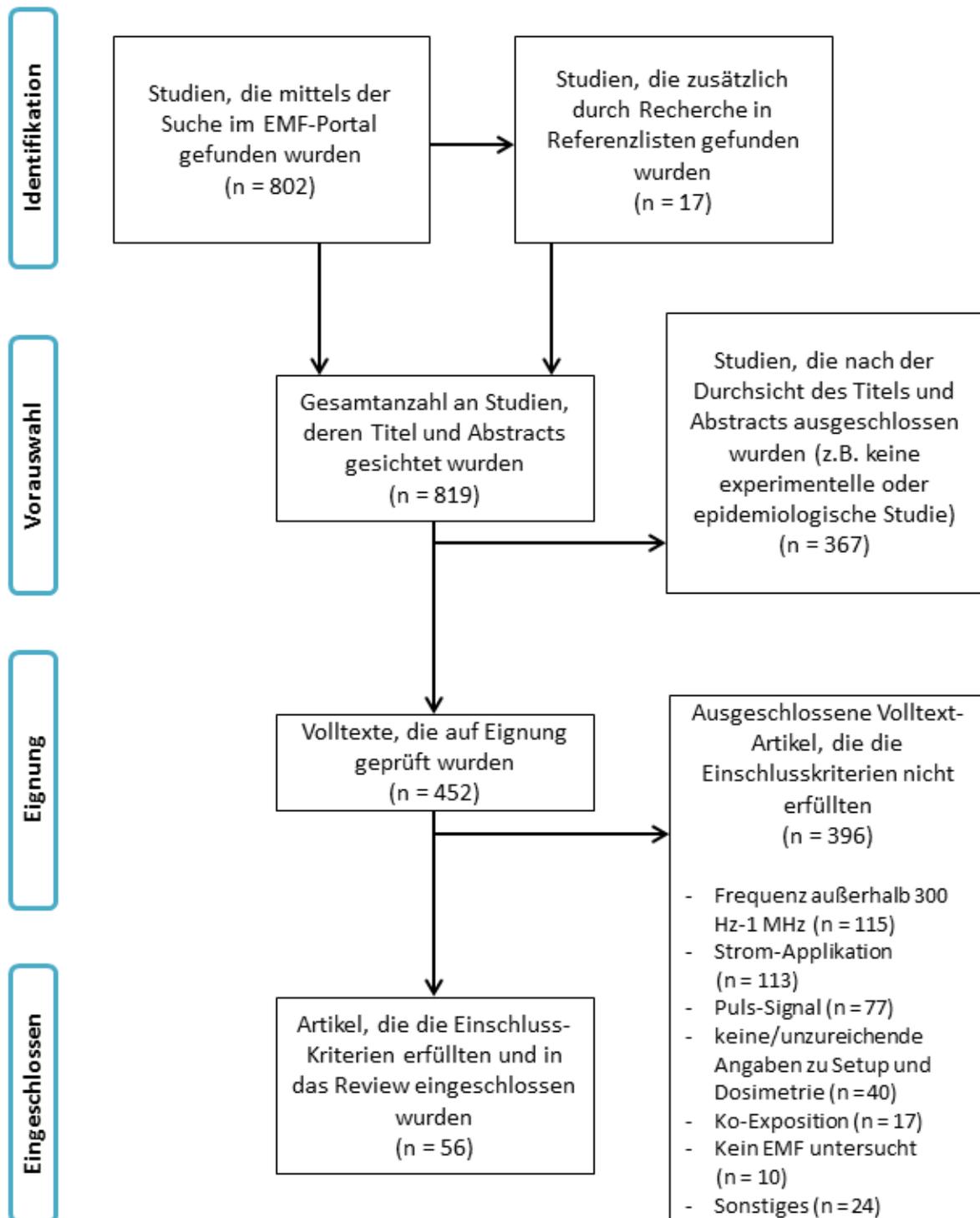
**Abbildung 4.1:** Einordnung der einzelnen Studien in eine der drei Qualitätskategorien (hoch, moderat, gering) basierend auf dem Bias-Risiko für einzelne Kriterien. "++" = definitiv geringes Bias-Risiko, "+" = wahrscheinlich geringes Bias-Risiko, "-" = wahrscheinlich hohes Bias-Risiko oder "--" = definitiv hohes Bias-Risiko. Modifiziert nach dem vom National Toxicology Program's Office of Health Assessment and Translation (OHAT) veröffentlichten Protokoll (NTP, 2015a, 2015b).

Für die Kategorie "hohe Studienqualität" musste eine Studie in allen drei Schlüsselkriterien mit einem "definitiv geringen Bias-Risiko" (++) oder einem "wahrscheinlich geringen Bias-Risiko" (+) bewertet worden sein. Zudem mussten  $\geq 50\%$  der verbleibenden Kriterien mit einem "definitiv geringen Bias-Risiko" (++) oder einem „wahrscheinlich geringen Bias-Risiko“ (+) bewertet worden sein. Für die Kategorie "niedrige Studienqualität" musste eine Studie in den drei Schlüsselrisiken als "wahrscheinlich hohes Bias-Risiko" (-) oder "definitiv hohes Bias-Risiko" (-- ) eingestuft worden sein und in  $\geq 50\%$  der verbleibenden Kriterien als "wahrscheinlich hohes Bias-Risiko" (-) oder "definitiv hohes Bias-Risiko" (-- ) bewertet worden sein. Alle anderen Studien wurden der moderaten Qualitätskategorie zugeordnet.

## 4.2 Ergebnisse

### 4.2.1 Eingeschlossene Studien

Das Flussdiagramm in Abbildung 4.2 zeigt das Ein- und Ausschlussverfahren potenziell relevanter Artikel. Mit Hilfe der systematischen Suche wurden in einem ersten Schritt 802 Studien identifiziert. Hinzu kamen weitere 17 Studien durch Recherche in den Referenzlisten der Studien aus der Primärsuche. Somit wurden insgesamt 819 potenziell relevante Artikel zu den Wirkungen von Zwischenfrequenzfeldern auf biologische Systeme identifiziert. Nach der Durchsicht der Titel und Abstracts konnten 367 Artikel aus verschiedenen Gründen ausgeschlossen werden (z.B. keine experimentelle oder epidemiologische Studie, Reviews). Anschließend wurden die Volltexte der verbliebenen 452 Artikel geprüft. Von diesen konnten 396 weitere Artikel aus folgenden Gründen ausgeschlossen werden: Frequenz außerhalb 300 Hz – 1 MHz oder Frequenzspektren (z.B. VDUs) (n = 115), Strom-Applikation (n = 113), Puls-Signal (n = 77), keine oder unzureichende Angaben zu Setup und Dosimetrie (n = 40), Ko-Exposition (n = 17), keine elektromagnetischen Felder untersucht (n = 10) oder Sonstiges (n = 24). Die Artikel unter „Sonstiges“ wurden ausgeschlossen, weil sie z.B. Sferics untersuchten, keine Kontrollen beinhalteten oder unverblindete Humanstudien waren. 56 Studien erfüllten die in Kapitel 4.1.2 aufgeführten Einschlusskriterien und wurden in den Review aufgenommen.



**Abbildung 4.2:** Flussdiagramm des Studienauswahlprozesses nach PRISMA-Richtlinien, basierend auf Moher et al. (2009).

Von den 56 eingeschlossenen Studien untersuchten drei Studien die Wirkungen von Feldern im Zwischenfrequenzbereich auf den Menschen (Endpunkt: Wirkungen auf Gehirn und Kognition), 27 Studien untersuchten die Wirkungen auf Tiere (Endpunkte: Wirkungen auf Fortpflanzung und Entwicklung, Gehirn und Kognition, Krebs, Herzkreislauf und Blut sowie Verhalten) und 26 Studien untersuchten die Wirkungen auf Zellen und Gewebe in *in vitro*-Versuchen (Endpunkte: Wirkungen auf Blut-Parameter, Genotoxizität, Genexpression, Zellebensfähigkeit und Zellproliferation sowie Zellfunktionen).

## 4.2.2 Studienbewertung

Das von OHAT veröffentlichte Protokoll (NTP, 2015a, 2015b) wurde verwendet, um das Bias-Risiko in den einzelnen Studien sowie die Qualität der Studien zu bewerten (siehe Kapitel 4.1.4).

### Humanstudien

Zwei der evaluierten Humanstudien hatten eine hohe Qualität, während die Qualität der dritten Studie als moderat eingestuft wurde (Abbildung 4.3). Ein Bias-Risiko im Auswahlprozess trat in den Studien von (Glover et al., 2007) und (Navarro et al., 2016) auf, da keine Angaben zur Randomisierungsmethode (*Randomization exposure level*) und Verblindung (*Allocation concealment*) bei der Zuordnung der Probanden zu den Gruppen gemacht wurden.

		Randomization exposure level	Allocation concealment	<b>Identical experimental conditions across study groups</b>	Blinding of research subjects	Attrition/exclusion rate	<b>Confidence in the exposure assessment</b>	Confidence in the outcome	All measured outcomes reported	Other potential threats	Studien-Qualität
<b>Humanstudien</b>	De Vocht et al. 2007	+	++	+	+	+	+	++	++	++	hoch
	Glover et al. 2007	-	-	-	-	+	+	-	-	-	moderat
	Navarro et al. 2016	-	-	+	+	+	+	++	++	++	hoch

++	definitiv geringes Bias-Risiko	+	wahrscheinlich geringes Bias-Risiko	-	wahrscheinlich hohes Bias-Risiko	---	definitiv hohes Bias-Risiko
----	--------------------------------	---	-------------------------------------	---	----------------------------------	-----	-----------------------------

**Abbildung 4.3:** Risk-of-Bias-Bewertung für Humanstudien (n = 3). Die Bewertungen der einzelnen Kriterien dienten als Grundlage für die Zuordnung der Studien zu einer der drei Studienqualitätskategorien (hoch, moderat, gering – vgl. Abbildung 4.1). Die Schlüsselkriterien sind fettgedruckt bzw. schwarz umrandet.

## Tierstudien

Die Qualität der Tierstudien variierte erheblich. Von den 27 eingeschlossenen Studien waren neun Studien (33,3%) von hoher, 14 Studien (51,9%) von moderater und vier Studien (14,8%) von geringer Qualität (siehe Abbildung 4.4).

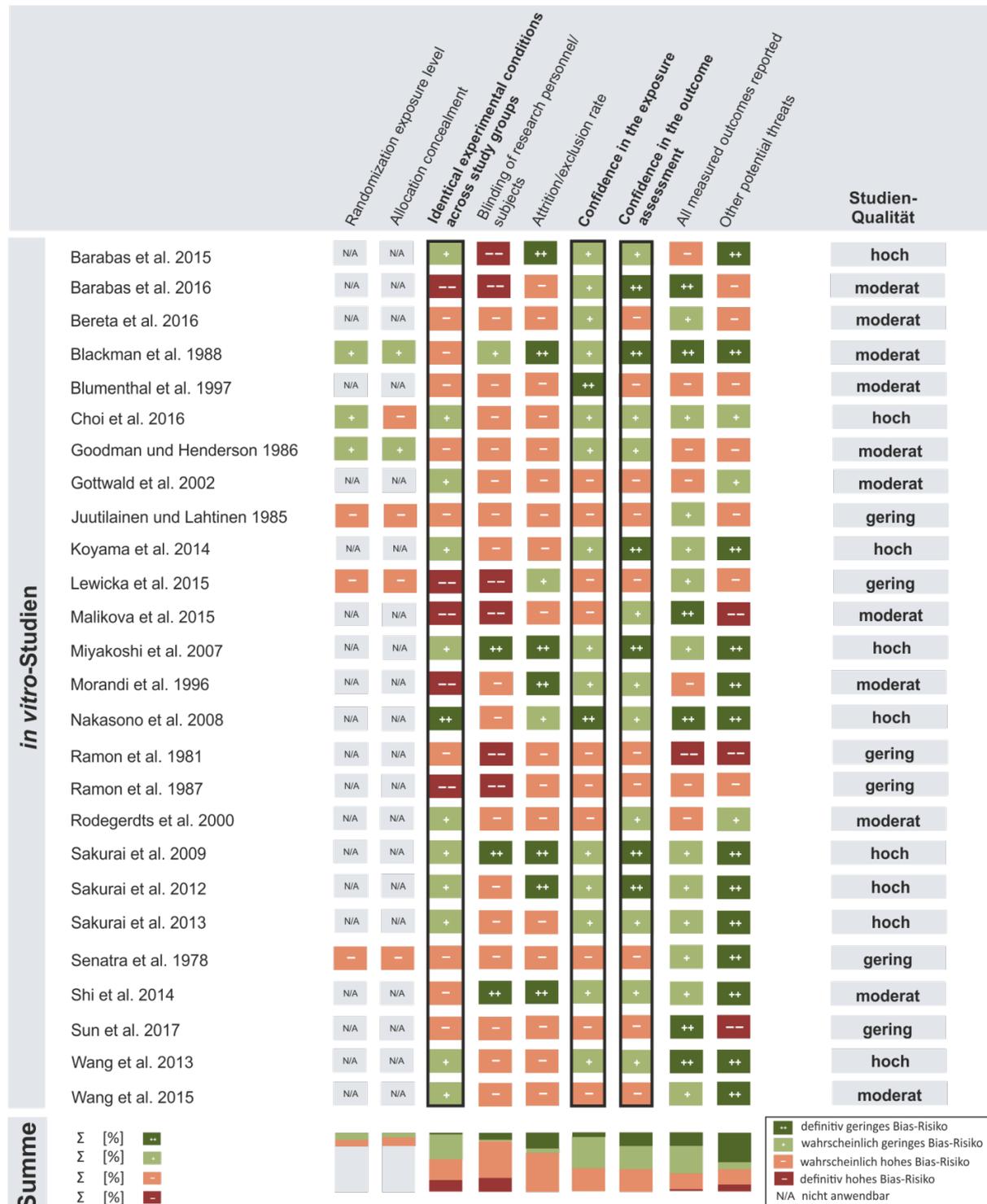


**Abbildung 4.4:** Risk-of-Bias-Bewertung für Tierstudien (n = 27). Die Bewertungen der einzelnen Kriterien dienten als Grundlage für die Zuordnung der Studien zu einer der drei Studienqualitätskategorien (hoch, moderat, gering – vgl. Abbildung 4.1). Die Schlüsselkriterien sind fettgedruckt bzw. schwarz umrandet. Summe (Σ [%]) stellt die Verteilung der vier Bias-Risiko-Kategorien separat für jedes einzelne Kriterium über alle Studien hinweg in prozentualen Balkenanteilen dar.

Methodische Schwächen bei den Tierstudien wurden insbesondere bezüglich des *Allocation concealment* (Verblindung bei der Einteilung der Gruppen) und *Blinding of research personnel/subjects* (Verblindung bei der Versuchsdurchführung) identifiziert. *Allocation concealment* wurde nur bei einer Studie erwähnt (Juutilainen et al., 1988), in allen anderen Studien fehlten diese Angaben. In lediglich zwei Studien (Nishimura et al., 2009; Tomanova und Vacha, 2016) wurde *Blinding of research personnel/subjects* durchgeführt, wohingegen diese Information in den anderen Studien fehlte bzw. die Verblindung nicht adäquat durchgeführt wurde. Auch bezüglich der beiden Schlüsselkriterien *Confidence in the outcome* (Qualität der Auswertung) und *Identical experimental conditions* (gleiche Bedingungen für alle Gruppen/Schein-Exposition) wurden deutliche methodische Schwächen bei der Hälfte der Studien identifiziert. Die Kriterien *Confidence in the exposure* (Charakterisierung der Exposition) sowie *Attrition/exclusion rate* (Anzahl und Charakterisierung ausgeschlossener Test-Tiere) und *All measured outcomes reported* (Vollständigkeit und Dokumentation der Daten) unterlagen hingegen weitgehend einem geringen Bias-Risiko.

## In vitro-Studien

Bei den *in vitro*-Studien variierte die Qualität wie bei den Tierstudien ebenfalls erheblich. Von den insgesamt 26 Studien waren neun Studien (34,6%) von hoher, elf Studien (42,3%) von moderater und sechs Studien (23,1%) von geringer Qualität (siehe Abbildung 4.5).



**Abbildung 4.5:** Risk-of-Bias-Bewertung für *in vitro*-Studien (n = 26). Die Bewertungskriterien *Randomization* und *Allocation Concealment* kamen bei Studien, die Zellen aus einer homogenen Zellsuspension untersuchten, nicht zur Anwendung (N/A; siehe Kapitel 4.1.4). Die Bewertungen der einzelnen Kriterien dienten als Grundlage für die Zuordnung der Studien zu einer der drei Studienqualitätskategorien (hoch, moderat, gering – vgl. Abbildung 4.1). Die Schlüsselkriterien sind fettgedruckt bzw. schwarz umrandet. Die Summe (Σ [%]) stellt die Verteilung der vier Bias-Risikokategorien separat für jedes einzelne Kriterium über alle Studien in prozentualen Balkenanteilen dar.

Ähnlich wie bei den Tierstudien stellte auch bei den *in vitro*-Studien das *Blinding of research personnel/subject* ein Bias-Risiko dar. Ein weiteres Bias-Risiko wurde in der Kategorie *Identical experimental conditions across study groups* identifiziert. Bei der Hälfte der Studien war die Schein-Exposition nicht oder nur mangelhaft beschrieben, so dass nicht sichergestellt werden konnte, dass die experimentellen Rahmenbedingungen bei Expositionen und Schein-Expositionen, abgesehen vom Feld an sich, identisch waren. Die Kriterien *Randomization exposure level* und *Allocation concealment* wurden größtenteils nicht bewertet, da Zellen aus Zellsuspensionen verwendet wurden (siehe Kapitel 4.1.4). Die *Attrition/Exclusion rate* ließ sich bei den evaluierten *in vitro*-Studien oftmals nicht nachvollziehen, was sich in der Bewertung des Kriteriums entsprechend als ein Bias-Risiko widerspiegelt.

#### 4.2.3 Humanstudien

##### 4.2.3.1 Wirkungen von Magnetfeldern auf Gehirn und Kognition des Menschen

Drei Studien untersuchten die Wirkungen von Magnetfeldern (Bereich: 0,1  $\mu\text{T}$  – 2,8 mT) auf sensorische und kognitive Funktionen des Menschen (Größe der Studiengruppen: zwischen sieben und 40 Probanden) (siehe Tabelle 4.1).

**Tabelle 4.1:** Wirkungen von Magnetfeldern auf das Gehirn und die Kognition beim Menschen. Die Färbung der Zellen der ersten Spalte entspricht der Studienqualität basierend auf OHAT (grün = hoch, gelb = moderat).

Publikation	Exponiertes System (Anzahl der Probanden)	Exposition	Endpunkte	Ergebnis	Anmerkungen
de Vocht et al. (2007)	Kopf (24 Männer, 16 Frauen), 2 Expositionsbedingungen und 1 Kontrollbedingung	Gradienten-Magnetfeld, sinusoidal, 490 Hz, Spitzen-Werte 2,8 mT und 1,4 mT im Bereich der Augen  Expositionsdauer: 50 Zyklen (0,1 Sekunde, jede Sekunde wiederholt) für 10 Minuten (600 Wiederholungen)	Wirkungen auf visuelles und visuomotorisches System, allgemeine Symptome	keine statistisch signifikanten Wirkungen	-
Glover et al. (2007)	Kopf (5 Männer, 2 Frauen), 1 Expositionsbedingung und dazwischen liegende Kontrollbedingungen	Gradienten-Magnetfeld, sinusoidal, 490 Hz, Spitzen-Wert 2,8 mT im Bereich der Augen (im geschätzten Abstand von 10 cm zur Spule)  Expositionsdauer: 250 Zyklen (0,5 Sekunden) alle fünf Sekunden wiederholt; insgesamt 10 Minuten (600 oder 120 Wiederholungen?)	visuell evozierte Potenziale	keine statistisch signifikanten Wirkungen	Widerspruch bei Dauer der Exposition (120 Wiederholungen anstatt 600), scheinbar sehr laute Umgebung, viele Störeinflüsse
Navarro et al. (2016)	Kopf, männlich, 1 Expositionsgruppe (n = 34) und 1 Kontrollgruppe (n = 31)	Magnetfeld, 2 kHz, keine Signalform angegeben, 0,110 $\mu\text{T}$ (räumliche Abweichung 0,025 $\mu\text{T}$ ), 0,1 $\mu\text{T}$ im Bereich des	Kurzzeitgedächtnis	statistisch signifikant verringerte Reaktionszeit bei Wahrnehmung, Daueraufmerksamkeit	Vorstudie

Publikation	Exponiertes System (Anzahl der Probanden)	Exposition	Endpunkte	Ergebnis	Anmerkungen
		Vorderlappens im Gehirn		und Motorik ( $p < 0,01$ ), aber signifikant verlängerte Reaktionszeit bei binären Entscheidungen ( $p < 0,001$ )	

Zwei Studien (de Vocht et al., 2007; Glover et al., 2007) untersuchten die Wirkungen von 490 Hz-Gradienten-Magnetfeldern, die durch MRTs erzeugt werden, auf sensorische Leistungen (visuelles System) und fanden keine statistisch signifikanten Unterschiede zwischen Exposition und Kontrollbedingung. In einer weiteren Humanstudie wurden Hinweise gefunden, dass sich eine Exposition bei einem 2 kHz-Magnetfeld beim Tragen von In-Ear-Kopfhörern möglicherweise auf das Kurzzeitgedächtnis auswirkt (Navarro et al., 2016). Dabei zeigten die Ergebnisse jedoch keine eindeutig negativen Auswirkungen und die Autoren mutmaßten, dass die Exposition Stress hervorrufen oder die Stimmung verändern könnte, wiesen aber auch auf die Vorläufigkeit ihrer Ergebnisse hin. Im Gegensatz zu den anderen beiden wurden hier eine höhere Frequenz und ein anderer Endpunkt untersucht, so dass die Studien nicht miteinander zu vergleichen sind.

#### 4.2.4 Tierstudien

Insgesamt 27 Studien beschäftigten sich mit der Wirkung von Zwischenfrequenzfeldern auf Tiere. Neben Wirbeltieren (hauptsächlich Mäuse und Ratten) wurden die Versuche auch mit Invertebraten wie Fliegen, Flohkrebse und Seeigeln durchgeführt. Der am häufigsten untersuchte Endpunkt war Fortpflanzung & Entwicklung (n = 13 Studien).

##### 4.2.4.1 Wirkungen von Magnetfeldern und elektrischen Feldern auf Fortpflanzung & Entwicklung

Insgesamt wurden in zwölf Studien an Ratten und Mäusen (5 – 25 Versuchstiere, z.T. Replikationen), Hühnereiern (14 – 62 Versuchstiere, z.T. Replikationen) sowie Embryonen verschiedener Tiere (10 – 718 Versuchstiere, z.T. Replikationen) die Wirkungen von Magnetfeldern (Bereich: 1,3  $\mu$ T – 4 mT) auf die Fortpflanzung und Entwicklung untersucht. Das Ziel der meisten Studien war es, die Wirkung von Induktionsherden und anderen induktiven Geräten zu untersuchen. Speziell beim Induktionsherd wurde die Nähe der Fortpflanzungsorgane und des menschlichen Embryos zur Herdplatte als Expositionsszenario angenommen und stellvertretend am Tiermodell untersucht. Eine weitere Studie (Panagopoulos, 2016) untersuchte die Wirkungen von elektrischen Feldern (100 – 400 kV/m) auf die Fortpflanzung und DNA-Schäden bei Fruchtfliegen (n = 20; 5 Replikationen) zur Aufdeckung genereller Wirkungsmechanismen von elektrischen Feldern (siehe Tabelle 4.2).

**Tabelle 4.2:** Wirkungen von elektrischen Feldern und Magnetfeldern auf die Fortpflanzung & Entwicklung bei Tieren. Die Färbung der Zellen der ersten Spalte entspricht der Studienqualität basierend auf OHAT (grün = hoch, gelb = moderat).

Publikation	Exponiertes System	Exposition	Endpunkte	Ergebnis	Anmerkungen
Dawson et al. (1998)	Wistar-Ratten, 3 experimentelle Sets à 3 Expositionsgruppen (entsprechend den magnetischen Flussdichten) und 1 Schein-Expositionsgruppe (2 Sets mit 14 – 17 Weibchen und 1 Set mit 5 Männchen je Gruppe); 718, 693 und 566 Föten aus den Sets	Magnetfeld, sinusoidal, 10,8 kHz, 0,095 mT, 0,24 mT, 0,95 mT, homogene Feldstärke im Bereich der Tiere  Expositionsdauer: 20 – 23,5 Stunden/Tag; Set 1: während 22 Tagen der Trächtigkeit (Weibchen), Set 2: 45 – 58 Tage vor der Paarung (Männchen), Set 3: 30 – 72 Tage vor der Paarung (Weibchen)	verschiedene Fruchtbarkeitsparameter: Trächtigkeit, Fehlbildungen und allgemeine Gesundheit der Elterntiere und Föten	keine konsistenten statistisch signifikanten Wirkungen	leichte Temperaturunterschiede zwischen Gruppen aufgrund von Erwärmung der Spulen gemessen
Juutilainen und Saali (1986)	befruchtete Hühnereier (White Leghorn), 12 Expositionsgruppen, jeweils eigene Schein-Expositionsgruppe (14 – 20 Eier)	Magnetfeld, sinusoidal, 1 kHz, 10 kHz und 100 kHz, 0,1 A/m, 1 A/m, 10 A/m und 100 A/m (Effektivwert; ca. 1,3 $\mu$ T – 0,13 mT)  Expositionsdauer: 48 Stunden (in den ersten Stunden nach der Befruchtung (nach 4 Stunden Aufwärmzeit))	Entwicklungsverzögerung und Anomalien	statistisch signifikante Zunahme der anomalen Embryonen bei Feldstärken zwischen 1 A/m – 100 A/m ( $p < 0,05$ )	-
Krylov (2010)	Wasserfloh ( <i>Daphnia magna</i> )-Eier, 4 Expositionsgruppen und jeweilige Kontrollgruppen (min. 3 x 10 Eier pro Gruppe)	Magnetfeld, sinusoidal, 305, 370, 435 und 500 Hz ( $\pm 0,1$ Hz), 75 $\mu$ T (kalibriert)  Expositionsdauer: unklar (bis die selbstständige Bewegung und die Futteraufnahme begann, > 43,1 Stunden)	Fehlbildungen, Entwicklung und Fruchtbarkeit	schnellere Lösung von der inneren Eihülle bei 435 und 500 Hz, verlängerte Reifedauer bei 500 Hz, Abnahme der lebensfähigen Nachkommen bei 435 und 500 Hz ( $p$ -Wert nicht angegeben)	keine Erklärung, warum die Frequenzen gewählt wurden, biologische Relevanz der Wirkung möglicherweise gering (laut Autoren)
Krylov et al. (2016)	Embryonen des Rotauges ( <i>Rutilus rutilus</i> ), 7 relevante Expositionsgruppen, 5 Kontrollgruppen (jeweils n = 400 nach Exposition)	Magnetfeld, sinusoidal, 500 Hz, 1,4 $\mu$ T – 1,6 $\mu$ T  Expositionsdauer: 27 – 230 Stunden nach der Befruchtung	Morphologie, Schlupfdynamik und Mortalität	statistisch signifikante Zunahme der morphologischen Varianz bei Embryonen ( $p < 0,05$ )	Versuchen über mehrere Jahre, Mortalität zeigte große Variabilität zwischen Jahrgängen, auch Ko-Exposition von Magnetfeld und Umwelttoxinen untersucht und

Publikation	Exponiertes System	Exposition	Endpunkte	Ergebnis	Anmerkungen
					Hinweise auf eine synergistische Wirkung gefunden
Kumari et al. (2017)	männliche C57BL/6 J-Mäuse, 2 Expositionsgruppen (jeweils n = 20), 1 Schein-Expositionsgruppe (n = 30)	Magnetfeld, keine Signalform angegeben, 7,5 kHz, 12,3 $\mu$ T (Durchschnittswert) und 120 $\mu$ T (beide gemessen), Homogenität der Feldstärke $\pm$ 9%  Expositionsdauer: kontinuierlich für 5 Wochen	Spermienqualität	statistisch signifikant erhöhte Spermienbeweglichkeit bei 120 $\mu$ T, keine schädliche Wirkung ( $p < 0,05$ )	numerische Dosimetrie der induzierten Ströme und Felder durchgeführt
Lee und Yang (2014)	Fischembryonen von Medaka ( <i>Oryzias latipes</i> ), 3 Expositionsgruppen, 1 Kontrollgruppe (jeweils 16 – 27 Embryonen)	Magnetfeld, keine Signalform angegeben, 3,2 kHz, 15, 25 und 60 $\mu$ T (0,12 $\mu$ T bei Kontrolle)  Expositionsdauer: kontinuierlich ab 5 Stunden nach der Befruchtung bis zum Schlupf (bis zu ca. 13 Tagen)	Schlupfverhalten, Morphologie und Verhalten	statistisch signifikant schnellere Entwicklung, statistisch signifikant erhöhtes Angstverhalten bei 60 $\mu$ T-Exposition ( $p < 0,05$ )	Temperatur in Testbehältern nicht gemessen, Temperaturwirkung wäre möglich und wird von den Autoren selbst diskutiert, keine Erläuterung, warum 3,2 kHz untersucht wurde
Levin und Ernst (1995)	Seeigel-Embryonen/ mehrere Expositionsgruppen und jeweilige Kontrollgruppen (jeweils n = 200 Embryonen alle 15 min ausgewertet)	Magnetfeld, sinusoidal, 360 Hz – 600 kHz, 2,5 – 4 mT (Effektivwert), max. 5% Inhomogenität  Expositionsdauer: kontinuierlich für bis zu 6 Stunden	Zellteilungsrate	Zunahme der Zellteilungsrate bei Exposition < 6 kHz, Abnahme bei > 6 kHz bei 2,5 mT ( $p$ -Wert nicht angegeben)	-
Nishimura et al. (2009)	Befruchtete Hühnereier (White Leghorn), 5 Expositionsgruppen, je 1 Schein-Expositionsgruppe (3 Wiederholungen mit je 60 Eiern)	Magnetfeld, sinusoidal, 20 kHz, 0,011 mT, 0,11 mT, 1,1 mT (Effektivwert), Feld variiert um weniger als $\pm$ 2,5% im Inkubator  Expositionsdauer: kontinuierlich für 2,7 oder 11 Tage	Fehlbildungen und Embryonalentwicklung	keine statistisch signifikanten Wirkungen	-
Nishimura et al. (2011)	trächtige CrI:CD(SD)-Ratten, 2 Expositionsgruppen (jeweils n = 2 x 25 Ratten) und 2 Schein-Expositionsgruppen (jeweils n = 2 x 25 Ratten)	Magnetfeld, sinusoidal, Exposition 1: 20 kHz, 0,2 mT (Effektivwert), Exposition 2: 60 kHz, 0,1 mT (Effektivwert)  Expositionsdauer: 22 Stunden/Tag für 10 Tage (von Tag 7 bis Tag 17 der Trächtigkeit)	Toxizität bei Elterntieren, Embryotoxizität, Fehlbildungen	keine statistisch signifikanten Wirkungen	-

Publikation	Exponiertes System	Exposition	Endpunkte	Ergebnis	Anmerkungen
Nishimura et al. (2012)	SPF/VAF, Cri:CD(SD)-Ratten, 2 Expositionsgruppen (jeweils n = 2 x 24 Ratten pro Geschlecht), eine Schein-Expositionsgruppe (n = 2 x 24 Ratten pro Geschlecht)	Magnetfeld, sinusoidal, Exposition 1: 20 kHz, 0,2 mT (Effektivwert), Exposition 2: 60 kHz, 0,1 mT (Effektivwert)  Expositionsdauer: 22 Stunden/Tag für 14 Tage vor und während der Paarung und bis zum 7. Trächtigkeitstag (Weibchen) oder für 3 Tage nach der Paarung (Männchen)	Fortpflanzungsfunktionen und Fehlbildungen (Spermatogenese, Fruchtbarkeit, frühe Embryogenese)	keine statistisch signifikanten Wirkungen	-
Nishimura et al. (2013)	befruchtete Hühnereier (White Leghorn), 2 Expositionsgruppen, 1 Schein-Expositionsgruppe (jeweils n = 3 x 60 Eier)	Magnetfeld, sinusoidal, Exposition 1: 20 kHz, 1,1 mT (Effektivwert), Exposition 2: 60 kHz, 0,11 mT (Effektivwert), weniger als 3% Feld-inhomogenität  Expositionsdauer: 19 Tage während der Embryogenese	Anomalien und Entwicklungsgeschwindigkeit, Mortalität	keine statistisch signifikanten Wirkungen	-
Panagopoulos (2016)	Taufliege ( <i>Drosophila melanogaster</i> ), 5 x 4 Expositionsgruppen und jeweilige Schein-Expositionsgruppen (je 10 Männchen und Weibchen)	elektrisches Feld, sinusoidal, 8 kHz gepulst mit 44,4 Hz, exponentiell abschwächend, 100 kV/m, 200 kV/m, 300 kV/m und 400 kV/m  Expositionsdauer: 5 Tage lang alle 2 Stunden für 20 Minuten	Fortpflanzung und DNA-Schäden in den Gonaden	statistisch signifikante Zunahme der Anzahl an Nachkommen mit steigender Feldstärke, DNA-Fragmentierung bei Nährzellen und Follikelzellen (bei 400 kV/m) ( $p < 0,05$ )	-
Zervins (1973)	befruchtete Hühnereier (White Leghorn), 1 Expositionsgruppe (n = 62), 1 Kontrollgruppe (n = 70)	Magnetfeld, 26 kHz, sinusoidal, 16 mT (Spitze-Wert), $\pm 7\%$ Homogenität  Expositionsdauer: kontinuierlich für 19 Tage (23 Stunden/Tag)	Mortalität, Entwicklung und Schlupfrate	keine statistisch signifikanten Wirkungen	-

Die Hälfte der evaluierten Studien ( $n = 7$ ) fand einen Einfluss der Magnetfeldexposition auf verschiedene Entwicklungsparameter von Wirbellosen und Wirbeltieren. Es wurde berichtet, dass in exponierten Gruppen die Zahl an abnormalen Hühner-Embryonen zunahm (Juutilainen und Saali, 1986), die morphologische Varianz der Fisch-Embryonen erhöht war (Krylov et al., 2016) und die Entwicklung bei Wasserflöhen verlangsamt und gleichzeitig deren Mortalität erhöht war (Krylov, 2010). Ein beschleunigender Einfluss auf die Entwicklung wurde hingegen in zwei weiteren Studien gefunden: Lee und Yang (2014) fanden eine beschleunigte Entwicklung von Fisch-Embryonen und Levin und Ernst (1995) eine beschleunigte Zellteilung bei Seeigel-Zygoten bei einer Frequenz des Feldes von  $< 6$  kHz. Bei höheren Frequenzen ( $> 6$  kHz) kehrte sich dieser Effekt allerdings um und die Autoren beobachteten eine verlangsamte Zellteilung. In den drei Studien, die über eine Veränderung der Entwicklungsgeschwindigkeit unter Magnetfeldeinfluss berichteten (Krylov, 2010; Lee und Yang, 2014; Levin und Ernst, 1995), wurden sowohl Beschleunigungen als auch Verlangsamungen gefunden und es kann kein genereller Zusammenhang zwischen der Frequenz des Feldes und der Wirkung abgeleitet werden. Zudem ist nicht geklärt, welche biologische Relevanz diese Wirkungen haben und ob es sich um prinzipiell schädliche Wirkungen handelt. Kumari et al. (2017) beobachteten eine erhöhte Spermien-Beweglichkeit bei Mäusen nach einer Magnetfeldexposition, was sich möglicherweise vorteilhaft auf die Reproduktion auswirken könnte. In sechs weiteren Studien, in denen Hühnereier und trächtige Ratten exponiert wurden, konnten keine Wirkungen der Exposition auf verschiedene Entwicklungsparameter, wie beispielsweise die Fruchtbarkeit der Elterntiere, die Schlupfraten oder Fehlbildungen der Embryonen, nachgewiesen werden (Dawson et al., 1998; Nishimura et al., 2009, 2012, 2011, 2013; Zervins, 1973). Studien, in denen potenziell schädliche Wirkungen gefunden wurden, waren allesamt von moderater Qualität. Keine der Studien von hoher Qualität konnte eine schädliche Wirkung des Magnetfeldes feststellen (Kumari et al., 2017; Nishimura et al., 2009, 2012, 2013).

Panagopoulos (2016) führte die einzige Tierstudie mit einem elektrischen Feld zum Endpunkt Fortpflanzung & Entwicklung durch und fand eine positive Dosis-Wirkungs-Beziehung zwischen der Anzahl der Nachkommen von Taufiegen und der Feldstärke sowie signifikante DNA-Schäden in den Gonaden. Die Ergebnisse dieser Studie bleiben jedoch trotz guter Qualität ein Einzelbefund.

#### **4.2.4.2 Wirkungen von Magnetfeldern und elektrischen Feldern auf Gehirn und Kognition**

Vier Studien haben sich mit dem Einfluss von Magnetfeldern ( $n = 3$ ,  $6,25 \mu\text{T} - 3,8 \text{ mT}$ ) und elektrischen Feldern ( $n = 1$ ,  $0,5 \text{ V/m}$ ) auf das Gehirn von Mäusen und Ratten (6 – 16 Versuchstiere) beschäftigt. Zwei Studien untersuchten die Wirkungen von Induktionsherden auf die Gedächtnis-assoziierte Genexpression und auf oxidativen Stress (Win-Shwe et al., 2013, 2015), während sich eine Studie mit den Wirkungen von Zwischenfrequenzimmissionen in Kombination mit Schwermetall-Belastung auf oxidativen Stress beschäftigte (Maaroufi et al., 2011). Eine weitere Studie untersuchte an Ratten, ob eine elektrische Feld-Exposition als therapeutisches Mittel bei epileptischen Anfällen beim Menschen geeignet ist (Juutilainen et al., 1988) (siehe Tabelle 4.3).

**Tabelle 4.3:** Wirkungen von Magnetfeldern und elektrischen Feldern auf Gehirn und Kognition bei Tieren. Die Färbung der Zellen der ersten Spalte entspricht der Studienqualität basierend auf OHAT (gelb = moderat, rot = gering).

Publikation	Exponiertes System	Exposition	Endpunkte	Ergebnis	Anmerkungen
Juutilainen et al. (1988)	Ratten mit einer Anfälligkeit für audiogene Krampfanfälle, 2 x 2 Expositionsgruppen (jeweils n = 16)	elektrisches Feld, sinusoidal, 10 und 28 kHz, gepulst mit 10 Hz, gedämpft 0,5 V/m  Expositionsdauer: 1 – 1,5 Stunden	Stärke und Dauer der Krampfanfälle sowie Dauer von der Stimulation bis zum Einsetzen der audiogenen Krampfanfälle	keine statistisch signifikanten Wirkungen	Expositionsdauer ungenau definiert, mit gleichem Setup wird bei 100 Hz scheinbar ein Magnetfeld erzeugt (?)
Maaroufi et al. (2011)	männliche Wistar-Ratten, 1 Expositionsgruppe und 1 Schein-Expositionsgruppe (jeweils n = 6)	Magnetfeld, keine Signalform angegeben, 150 kHz, 6,25 $\mu$ T (gemessen), max. 15% Inhomogenität (laut Autoren vernachlässigbar) Expositionsdauer: 1 Stunde/Tag für 21 Tage	oxidativer Stress und antioxidative Aktivität im Gehirn	statistisch signifikante Zunahme des oxidativen Stresses ( $p < 0,05$ )	Ko-Expositionsgruppe Magnetfeld+Eisen nicht relevant, Tiere erst 2 Monate nach Exposition untersucht; nicht klar, wie sie in der Zwischenzeit gehalten wurden und ob die Wirkung ursächlich auf die Exposition zurückgeführt werden kann
Win-Shwe et al. (2013)	C57BL/6J-Mäuse, 2 Expositionsgruppen (akut und Erholung), 1 Schein-Expositionsgruppe (jeweils n = 6)	Magnetfeld, sinusoidal, 21 kHz, 3,8 mT, $\pm$ 5% Homogenität  Expositionsdauer: 1 Stunde/Tag für 2 Wochen	Expression von Gedächtnis-assoziierten Genen im Hippocampus, Morphologie des Hippocampus	keine statistisch signifikanten Wirkungen	-
Win-Shwe et al. (2015)	trächtige C57BL/6J-Mäuse, aus dem Wurf 3 Expositionsgruppen mit männlichen Jungtieren, Käfigkontrolle und Schein-Expositionsgruppe, nur pränatale Exposition und pränatale + postnatale Exposition (alle jeweils n = 6)	Magnetfeld, sinusoidal, 20,8 kHz, 3,8 mT, $\pm$ 5% Homogenität  Expositionsdauer: 1 Stunde/Tag vom 7. bis 17. Tag der Trächtigkeit (insgesamt 11 Tage, pränatal) und vom 27. bis 48. Tag nach der Geburt, außer an den Wochenenden (insgesamt 16 Tage, postnatal)	Genexpression, oxidativer Stress, Entzündungsreaktionen und Histopathologie im Gehirn	Erhöhung der Expressionsraten von NMDA-Rezeptoren, statistisch signifikante Zunahme von Entzündungsmediatoren und Markern für oxidativen Stress ( $p < 0,05$ )	-

Während Win-Shwe et al. (2013) keine Wirkungen von Magnetfeldern auf Gedächtnis-Funktionen bei adulten Mäusen fanden, berichteten sie in ihrer späteren Studie aus dem Jahr 2015 über Wirkungen auf das sich entwickelnde Gehirn während der Trächtigkeit (Win-Shwe et al., 2015). Sie fanden sowohl eine Zunahme der Expression von Glutamat-Rezeptoren, die in Zusammenhang mit Gedächtnis-Funktionen stehen (NMDA-Rezeptoren) als auch eine Zunahme von Markern für Entzündungsreaktionen und oxidativen Stress im Gehirn der Jungtiere. Die Autoren wiesen allerdings darauf hin, dass weitere Untersuchungen, z.B. Verhaltensexperimente, notwendig sind, um die Wirkungen der Felder auf Jungtiere zu bestätigen. Maaroufi et al. (2011) fanden ebenfalls eine signifikante Zunahme des oxidativen Stresses, allerdings wurden die Tiere erst zwei Monate nach der Exposition untersucht und es ist fraglich, ob der Endpunkt geeignet war, um eine Wirkung nach diesem langen Zeitraum ursächlich auf die Exposition zurückzuführen.

Juutilainen et al. (1988) fanden in der einzigen Studie, die die Wirkung eines elektrischen Feldes untersucht hat, keine statistisch signifikanten Wirkungen des elektrischen Feldes auf verschiedene Krampfparameter und somit keine Hinweise für einen therapeutischen Effekt.

#### 4.2.4.3 Wirkungen von Magnetfeldern auf das Herz-Kreislaufsystem & Blut

Zwei Studien untersuchten die Wirkungen von Magnetfeldern (0,034 nT – 3,8 mT) auf das Herz-Kreislaufsystem & Blut von Hunden bzw. Ratten (11 – 21 Versuchstiere). Hintergrund der Studien war ein möglicher therapeutischer Nutzen (Scherlag et al., 2004) bzw. die gesundheitliche Wirkung von Induktionsherden (Ushiyama et al., 2014) (siehe Tabelle 4.4).

**Tabelle 4.4:** Wirkungen von Magnetfeldern auf das Herz-Kreislaufsystem & Blut bei Tieren. Die Färbung der Zellen der ersten Spalte entspricht der Studienqualität basierend auf OHAT (grün = hoch, gelb = moderat).

Publikation	Exponiertes System	Exposition	Endpunkte	Ergebnis	Anmerkungen
Scherlag et al. (2004)	vagosympathischer Nerv von anästhesierten Hunden (n = 21)	Magnetfeld, biphasische Wellenform, 2 kHz, 0,034 nT (kalibriert und simuliert), Spulen direkt auf Nerv platziert  Expositionsdauer: 5 Minuten	Herzfrequenz, atrioventrikuläre Weiterleitung und Herzrhythmus-Störungen	statistisch signifikante Zunahme von Extrasystolen, atrialer Tachykardie und Vorhofflimmern ( $p < 0,05$ )	Cross-Over Studie, Helmholtz-Spulen direkt auf vagosympathischem Nerv platziert, zusätzlich andere Expositionsszenarien untersucht, jedoch mit für diesen Review irrelevanten Feldern, vorläufige Studie
Ushiyama et al. (2014)	Ratten, 1 Käfigkontrolle, 1 Schein-Exposition, 1 Expositionsgruppe (jeweils n = 11 – 12 Ratten)	Magnetfeld, sinusoidal, 21 kHz, 3,8 mT (Effektivwert), homogenes Feld, Tiere immobilisiert  Expositionsdauer: 1 Stunde/Tag für 14 aufeinanderfolgende Tage	hämatologische und biochemische Blutparameter, Zellfunktionen bei Immunzellen	keine signifikanten Wirkungen	Expositionsaufbau wie Win-Shwe et al. (2013)

Scherlag et al. (2004) fanden Hinweise darauf, dass der Herzrhythmus mittels eines magnetischen Feldes beeinflusst werden kann und eine Magnetfeldexposition somit einen therapeutischen Nutzen bei der Behandlung von Herzrhythmus-Störungen haben könnte. Allerdings sprechen die Autoren selbst von vorläufigen Ergebnissen. Mit einem

gesundheitlichen Risiko für Blut- und Immunfunktionen durch Magnetfelder, die von Induktionsherden ausgehen, ist Ushiyama et al. (2014) zufolge nicht zu rechnen.

#### 4.2.4.4 Wirkungen von Magnetfeldern auf das Verhalten

Zwei Studien untersuchten die Wirkungen von Magnetfeldern (2 nT – 250 µT) auf das Verhalten von Tieren, wobei die Studienziele (magnetische Orientierung bzw. Bewegungsaktivität) und die untersuchten Spezies (Flohkrebse bzw. Ratten, Gruppengrößen zwischen 10 – 72 Tiere) unterschiedlich waren (siehe Tabelle 4.5).

**Tabelle 4.5:** Wirkungen von Magnetfeldern auf das Verhalten von Tieren. Die Färbung der Zellen der ersten Spalte entspricht der Studienqualität basierend auf OHAT (grün = hoch, gelb = moderat).

Publikation	Exponiertes System	Exposition	Endpunkte	Ergebnis	Anmerkungen
Tomanova und Vacha (2016)	Flohkrebse ( <i>Gondogeneia antarctica</i> ), 2 relevante Expositionsgruppen (n = 70 und 72) ausgewertet, 1 Kontrollgruppe (n = 221) ausgewertet	Magnetfeld, keine Signalform angegeben, 969 kHz, 2 nT und 20 nT  Expositionsdauer: 1–2 Minuten	magnetische Orientierung	statistisch signifikanter Verlust der Orientierung am Erdmagnetfeld ab Exposition bei 2 nT-Feld ( $p = 0,029$ )	zusätzlich 10 MHz-Exposition untersucht, aber nicht relevant für diesen Review
Zhadin et al. (1999)	männliche Wistar Ratten, 4 relevante Expositionsgruppen und jeweilige Kontrollgruppen (jeweils n = 10)	Magnetfeld, keine Signalform angegeben, 380 Hz (Ca <sup>++</sup> -Zyklotronfrequenz) und 630 Hz (Mg <sup>++</sup> -Zyklotronfrequenz), sinusoidal, 250 µT  Expositionsdauer: 20 Minuten	Bewegungsaktivität	keine statistisch signifikanten Wirkungen	Ratten wurden in Hungerzustand gehalten, um Bewegung einzuschränken, nicht eindeutig, ob für jede Testbedingung neue Ratten verwendet wurden

Tomanova und Vacha (2016) berichteten, dass die Orientierung von Flohkrebse am Erdmagnetfeld bereits bei 2 nT-Feldern signifikant gestört sei. Dieses Verhalten wurde auf eine negative Beeinflussung der Magnetorezeption durch die Felder zurückgeführt. Bei exponierten Ratten hatten verschiedene 250 µT-Felder keine Auswirkung auf die Bewegungsaktivität (Zhadin et al., 1999).

#### 4.2.4.5 Wirkungen von Magnetfeldern auf Krebs-Therapie

Eine Studie untersuchte das therapeutische Potenzial von 0,1 mT – 2 mT Magnetfeldern zur Krebsbehandlung an Ratten (Gruppengrößen unbekannt) (siehe Tabelle 4.6).

**Tabelle 4.6:** Wirkungen von Magnetfeldern auf Krebs bei Tieren. Die Färbung der Zelle der ersten Spalte entspricht der Studienqualität basierend auf OHAT (rot = gering).

Publikation	Exponiertes System	Exposition	Endpunkte	Ergebnis	Anmerkungen
Baumann et al. (1989)	weibliche Wistar-Furth-Ratten mit implantiertem Mamma-Adenokarzinom, 3 Expositionsgruppen, 1 Schein-Expositionsgruppe (jeweils n = 6 gleichzeitig exponiert, Gruppengrößen unbekannt), 4 Replikationsexperimente	Magnetfeld, sinusoidal, 2 kHz, 0,1, 1 und 2 mT, Tiere immobilisiert  Expositionsdauer: 1 Stunde/Tag für 9 Tage	Tumorstadium, Hormonspiegel (therapeutischer Ansatz)	keine statistisch signifikanten Wirkungen	Kurz-Artikel, Immobilisierungsstress könnte Wirkungen überdeckt haben (laut Autoren), kein eindeutiges Alter der Ratten angegeben (min. 9 Monate), verschiedene Parameter zwischen den Replikationsexperimenten geändert

In der Studie von Baumann et al. (1989) wurden keine Wirkungen auf das Tumorstadium oder den Hormonspiegel gefunden. Die Studie war allerdings von geringer Qualität und die Autoren merkten an, dass eventuelle schwache Wirkungen durch Unzulänglichkeiten in der Studiendurchführung nicht registriert worden sein könnten.

#### 4.2.4.6 Sonstige Wirkungen von Magnetfeldern und elektromagnetischen Feldern

Fünf Studien beschäftigten sich mit den Wirkungen einer elektromagnetischen Feld- bzw. Magnetfeldexposition (0,4 µT – 1,9 mT) auf diverse pathologische und neuroregenerative Parameter bei Ratten und Meerschweinchen (Gruppengröße zwischen 3 – 10 Tieren) (Tabelle 4.7). Die Hintergründe der Studien waren sehr verschieden (z.B. die Untersuchung therapeutischer Ansätze oder genereller Wirkungen von Magnetfeldern) oder wurden nicht näher erläutert.

**Tabelle 4.7:** Sonstige Wirkungen von Magnetfeldern und elektromagnetischen Feldern bei Tieren. Die Färbung der Zellen der ersten Spalte entspricht der Studienqualität basierend auf OHAT (grün = hoch, gelb = moderat, rot = gering).

Publikation	Exponiertes System	Exposition	Endpunkte	Ergebnis	Anmerkungen
Morales et al. (2009)	Meerschweinchen, 6 Expositionsgruppen (jeweils n = 3 – 7 Tiere), jeweils 1 Kontrolltier pro Gruppe	elektromagnetisches Feld, sinusoidal, 500 – 5000 Hz, 471,40 V/m, 1,249 A/m, 1,569 µT (berechnet), Transversalwellen (Fernfeld-Bedingungen)  Expositionsdauer: 16 – 20 Stunden/Tag für 165 – 390 Tage	funktionelle und morphologische Veränderungen im Corti-Organ	keine statistisch signifikanten Wirkungen	nur jeweils ein Tier als Kontrolle, kleine Expositionsgruppen, zusätzlich 50 Hz-Exposition untersucht, aber nicht relevant für diesen Review

Publikation	Exponiertes System	Exposition	Endpunkte	Ergebnis	Anmerkungen
Nishimura et al. (2016)	männliche und weibliche Crl:CD(SD)-Ratten, 4 Expositionsgruppen und jeweilige Schein-Expositionsgruppen (n = 12 pro Geschlecht pro Gruppe), 2 unabhängige Experimente	Magnetfeld, 20 kHz, sinusoidal, 0,20 mT (Effektivwert) und 60 kHz, 0,10 mT (Effektivwert, gemessen)  Expositionsdauer: 22 Stunden/Tag für 14 Tage (akut) oder 13 Wochen (subchronisch)	Organ- und Körpergewicht, Morbidität, klinische Anzeichen von Toxizität, Hämatologie, Blutchemie, pathologische und histopathologische Parameter	keine statistisch signifikanten Wirkungen	-
Robertson et al. (1996)	männliche und weibliche B6C3F1-Mäuse, 3 Expositionsgruppen (akut: jeweils n = 7, chronisch: jeweils n = 15), 1 Kontrollgruppe (akut: jeweils n = 14, chronisch: jeweils n = 20)	Magnetfeld, 10,2 kHz, sinusoidal, 37 $\mu$ T (Kontrolle), 0,08 mT, 0,28 mT, 1 mT  Expositionsdauer: 22,6 Stunden/Tag (im Durchschnitt) für 14 Tage (akut) und 90 Tage (subchronisch)	Körpergewicht, klinische Auffälligkeiten, Pathologie, Blutchemie, Mortalität	keine statistisch signifikanten Wirkungen	akute Pilotstudie + subchronische Studie, Temperatur von 21°C (Kontrolle) – 24°C (1 mT) aufgrund von Erwärmung der Spulen
Rusovan et al. (1992)	weibliche Sprague-Dawley-Ratten mit experimenteller Quetschverletzung des rechten Ischias-Nervs, 4 relevante Expositionsgruppen, 1 Kontrollgruppe (Gruppengrößen unbekannt)	Magnetfeld, sinusoidal, 500, 1000, 1500 und 2000 Hz, 0,1 mT (gemessen)  Expositionsdauer: 3, 4 oder 6 Tage, keine Angaben zu Expositionsdauer/Tag	Nervenregeneration	statistisch signifikant erhöhte Regenerationsrate bei 500 und 1000 Hz (1000 Hz Optimum) ( $p < 0,001$ )	2 – 3 Tiere pro Käfig, ergo mehrere Durchgänge zu unterschiedlichen Zeiten, da > 4 verletzte Ischias-Nerven untersucht wurden (?)
Shuvy et al. (2014)	Sprague-Dawley Ratten, jeweils 1 Expositionsgruppe mit gesunden Ratten und 1 Gruppe mit Ratten, die eine verkalkungsfördernde Prädisposition aufwiesen, jeweils 1 eigene Kontrollgruppe (jeweils n = 8 –10 Ratten)	Magnetfeld, sinusoidal und exponentiell abklingend, 150 – 155 kHz (zufällig ausgewählt), 0,4 – 0,7 $\mu$ T (gemessen)  Expositionsdauer: kontinuierlich für 9 Wochen	Gefäßverkalkung	statistisch signifikante Zunahme der Gefäßverkalkung ( $p < 0,05$ ) und verringerte Osteoblasten-Marker-Expression ( $p$ -Wert nicht angegeben) in Ratten mit verkalkungsfördernder Prädisposition	Hintergrund der Studie unklar, Bezug zu Alltagsexposition fragwürdig

Es wurde ein positiver Einfluss der Exposition auf die Nervenregeneration (Rusovan et al., 1992) gefunden. Die Autoren fanden eine Erhöhung der Regenerationsrate des Ischias-Nervs bei 250 Hz-, 500 Hz- und 1000 Hz-Feldern, wobei die höchste Regenerationsrate bei 1000 Hz beobachtet wurde. Shuvy et al. (2014) berichteten, dass eine Magnetfeldexposition die Zunahme der Gefäßverkalkung bei Ratten mit einer Prädisposition fördert und sich somit nachteilig auswirkt. Beide Studien sind jedoch von geringer Qualität.

In drei Studien, die sich einerseits mit funktionellen und morphologischen Veränderungen im Corti-Organ (Morales et al., 2009) sowie andererseits mit diversen hämatologischen, pathologischen und histologischen Parametern (Nishimura et al., 2016; Robertson et al., 1996) beschäftigt haben, wurden keine statistisch signifikanten Wirkungen bei Exposition gegenüber elektromagnetischen Feldern bzw. Magnetfeldern gefunden.

#### 4.2.5 *In vitro*-Studien

Insgesamt wurden 26 Studien identifiziert, die sich mit der Wirkung von elektrischen Feldern (n = 5), Magnetfeldern (n = 22) oder elektromagnetischen Feldern (n = 2) auf Zellen beschäftigten. Manche Studien untersuchten sowohl ein elektrisches Feld als auch ein Magnetfeld und/oder ein elektromagnetisches Feld und wurden deshalb mehrfach gezählt. Die Studien wurden hauptsächlich an menschlichen Zellen und Blut (n = 9), aber auch an tierischen Zellen und Gewebe (n = 7), Bakterien (n = 6) sowie Hefen (n = 4) durchgeführt. Die am häufigsten untersuchten Endpunkte gehörten zu den Kategorien Zellfunktionen (n = 7) und Zellproliferation (n = 7) gefolgt von Genotoxizität (n = 6), Genexpression (n = 3) und hämatologischen Parametern (n = 3).

##### 4.2.5.1 *Wirkungen von Magnetfeldern und elektrischen Feldern auf Zellfunktionen*

Von insgesamt sieben Studien untersuchten fünf die Wirkungen von Magnetfeldern (59 nT – 40 mT), eine die Wirkungen von elektrischen Feldern (Gottwald et al., 2002) (15 V/m – 100 V/m) und eine weitere Studie die Wirkungen von elektromagnetischen Feldern (Blackman et al., 1988) (59 – 61 nT, 15 V/m) auf unterschiedliche Zellfunktionen, wie z.B. Zelldifferenzierung und Metabolismus (siehe Tabelle 4.8). Exponiert wurden unterschiedliche Zelllinien, wie beispielsweise Hefen, Knochenmarkszellen und Karzinom-Zellen. Die Hintergründe der Studien waren unterschiedlich, wobei die Studien mit dem Endpunkt „Zelldifferenzierung“ (Choi et al., 2017; Gottwald et al., 2002; Wang et al., 2015) einen therapeutischen Ansatz verfolgten.

**Tabelle 4.8:** *In vitro*-Wirkungen von elektrischen Feldern und Magnetfeldern auf verschiedene Zellfunktionen. Die Färbung der Zellen der ersten Spalte entspricht der Studienqualität basierend auf OHAT (grün = hoch, gelb = moderat).

Publikation	Exponiertes System	Exposition	Endpunkte	Ergebnis	Anmerkung
Bereta et al. (2016)	Bierhefe ( <i>S. cerevisiae</i> ), 1 Expositionsgruppe, 1 Kontrollgruppe (jeweils n = 6)	Magnetfeld, sinusoidal, 800 Hz, 2,37 – 2,49 mT (gemessen), 95% Homogenität  Expositionsdauer: 16 Stunden während der Messung	Zellmetabolismus (oxidativer Stress) und Zellwachstum	Unterschiede beim Zellmetabolismus (p-Wert nicht angegeben)	keine statistische Auswertung, Deutung des Ergebnisses unpräzise, Konferenzbericht
Blackman et al. (1988)	Hirnhälften von Küken, 16 Expositions- gruppen und jeweilige Schein- Expositionsgruppen (28 – 32/Gruppe), 405 Hz-Versuche wurden 4 Monate später wiederholt	elektromagnetisches Feld, keine Signalform genannt, 300 – 510 Hz, 59 – 61 nT (Effektivwert, ± 1 nT, gemessen), 15 V/m (Effektivwert)  Expositionsdauer: 20 Minuten	Calcium-Ionen- Efflux aus Hirngewebe	statistisch signifikant erhöhter Calcium-Efflux bei 315 Hz (p = 0,0004) und 405 Hz (p < 0,05)	weitere Expositionen bei 1 – 285 Hz nicht relevant für Review, spekulative Theorien zu Wirkungsfenster

Publikation	Exponiertes System	Exposition	Endpunkte	Ergebnis	Anmerkung
Blumenthal et al. (1997)	Knochenmarkszellen der Ratte, 2 Expositionsgruppen (bereits angehaftete Zellen und noch nicht angehaftete Zellen), jeweilige Kontrollen (jeweils 2 Platten)	Magnetfeld, sinusoidal, 1 kHz, 0,25 mT (Spitze-Spitze-Wert, gemessen), $\pm 2\%$ Homogenität  Expositionsdauer: 4 Tage	Zelladhäsion, Zellmorphologie, teilweise Zelllebensfähigkeit	Zelladhäsion deutlich verringert und Zellmorphologie verändert; Zelllebensfähigkeit teilweise verringert ( $p$ -Wert nicht angegeben)	keine statistische Auswertung, Erdmagnetfeld neutralisiert, Ko-Expositionen mit DC und AC und bei 60 Hz-Feld sowie Apoptose-Experimente mit DC-Feld nicht relevant für Review
Choi et al. (2017)	menschliche mesenchymale Knochenmarks-Stammzellen und männliche Mäuse mit experimenteller zerebraler Ischämie, jeweils 1 Expositionsgruppe und 1 Kontrollgruppe für <i>in vivo</i> -(jeweils $n = 15$ ) und <i>in vitro</i> -Versuche	Magnetfeld, keine Signalform angegeben, 4 kHz, gepulst für 5 ms mit 60 Hz, 10 mT (max. Spitzenwert, gemessen) für <i>in vitro</i> , 40 mT (max. Spitzenwert, gemessen) für <i>in vivo</i> , homogenes Feld  Expositionsdauer: <i>in vitro</i> : 8 Tage <i>in vivo</i> : 12 Stunden/Tag für 8 Tage	neurale Zelldifferenzierung, Regeneration nach Schlaganfall	keine statistisch signifikanten Wirkungen	Ko-Expositionsgruppen mit Schall-Behandlung und Zellimplantationen nicht relevant für Review
Gottwald et al. (2002)	undifferenzierte pluripotente P19 embryonale Karzinom-Zellen der Maus, kultiviert als Embryoid Bodies (EB), 6 Expositionsgruppen, 1 Schein-Expositionsgruppe, Positivkontrolle (500/EB, Anzahl an EB je Gruppe und Test unterschiedlich)	elektrisches Feld, keine Signalform angegeben, 4 kHz moduliert mit 10 Hz, 50 Hz und 100 Hz (vermutlich Amplitudenmodulation), 100 V/m  Expositionsdauer: 5 Minuten alle 3 Stunden für 24 –72 Stunden oder kontinuierlich für 72 Stunden	kardiale Zelldifferenzierung	statistisch signifikante Zunahme kardialer Myozyten bei 4 kHz mit 100 Hz-Modulation ( $p < 0,05$ )	-
Koyama et al. (2014)	neutrophilartig differenzierte menschliche HL60-Zellen: 3 Expositionsgruppen und entsprechende Schein-Expositionsgruppen (min. 3 Wiederholungen)	Magnetfeld, sinusoidal, 23 kHz, 2 mT (Effektivwert, gemessen), Homogenität $\pm 5\%$ , sinusoidal  Expositionsdauer: 2 h, 3 h oder 4 Stunden	Chemotaxis und Phagozytose	keine statistisch signifikanten Wirkungen	-

Publikation	Exponiertes System	Exposition	Endpunkte	Ergebnis	Anmerkung
Wang et al. (2015)	Knochenmark-abgeleitete Stammzellen der Ratte: 4 Expositionsgruppen, 3 Kontrollgruppen (min. 3 Wiederholungen)	Magnetfeld, keine Signalform angegeben, 750 Hz gepulst mit 75 Hz, 1 mT, 2 mT und 5 mT (berechnet) Expositionsdauer: 3 Stunden/Tag für 4 Wochen	indirekte Ossifikation (osteogene Differenzierung und Hypertrophie)	Verstärkung der Ossifikation bei einer 1 mT-Exposition ( $p < 0,05$ )	chondrogene und z.T. hypertrophe Differenzierung wurde vor der Exposition mit Differenzierungsmedium induziert

Zwei der sieben evaluierten Studien fanden keine statistisch signifikanten Wirkungen der Exposition auf die Zelldifferenzierung sowie Chemotaxis und Phagozytose (Choi et al., 2017; Koyama et al., 2014). Nur diese beiden Studien wiesen eine hohe Studienqualität auf. Zwei weitere Studien berichteten über eine Wirkung des Magnetfeldes auf den Zellmetabolismus (Bereta et al., 2016) bzw. auf die Zelladhäsion und Zellmorphologie (Blumenthal et al., 1997). Beide Studien werteten jedoch die Ergebnisse nicht mit statistischen Methoden aus. Die übrigen drei Studien fanden statistisch signifikante Wirkungen auf den Calcium-Efflux und die Zelldifferenzierung (Blackman et al., 1988; Gottwald et al., 2002; Wang et al., 2015). Die Ergebnisse von Gottwald et al. (2002) und Wang et al. (2015) deuteten dabei darauf hin, dass eine gezielte Exposition mit bestimmten Frequenzen und Modulationen von magnetischen und elektrischen Feldern einen therapeutischen Nutzen bei der Zelldifferenzierung haben könnte.

#### 4.2.5.2 Wirkungen von Magnetfeldern auf die Zellproliferation und Zellebensfähigkeit

In sieben Studien wurden die Wirkungen von Magnetfeldern (0,8 mT – 11 mT) auf die Zellproliferation und die Zellebensfähigkeit untersucht (siehe Tabelle 4.9). Exponierte Systeme waren Bakterien, Hefen und menschliche Zellen. Bei den meisten Studien war der Hintergrund unklar oder es wurde generell nach Wirkungen von Magnetfeldern geforscht. Rodegerdts et al. (2000) untersuchten jedoch Zellen vor dem Hintergrund von Sicherheit beim MRT und Wang et al. (2013) interessierten sich für eine therapeutische Nutzung von Magnetfeldern bei der Behandlung von Krebs.

**Tabelle 4.9:** *In vitro*-Wirkungen von Magnetfeldern auf die Zellproliferation und die Zellebensfähigkeit. Die Färbung der Zellen der ersten Spalte entspricht der Studienqualität basierend auf OHAT (grün = hoch, gelb = moderat, rot = gering).

Publikation	Exponiertes System	Exposition	Endpunkte	Ergebnis	Anmerkung
Barabáš et al. (2015)	Hefe ( <i>S. cerevisiae</i> ), 2 verschiedene Wildtyp-Stämme, jeweils 5 Expositionsgruppen und entsprechende Kontrollgruppen (16 Petrischalen/Frequenz, insgesamt 160 Schalen)	Magnetfeld, keine Signalform angegeben, 1,2 – 2 kHz, 2,37 – 2,49 mT (gemessen), 5% Inhomogenität Expositionsdauer: 66 Stunden	Zellebensfähigkeit und Zellproliferation	Unterschiede bei der Zellproliferation in Abhängigkeit von der Frequenz, kein eindeutiger Trend erkennbar ( $p$ -Wert nicht angegeben)	-

Publikation	Exponiertes System	Exposition	Endpunkte	Ergebnis	Anmerkung
Barabas et al. (2016)	Bakterien ( <i>D. radiodurans</i> und <i>E. aerogenes</i> ), jeweils 1 Expositionsgruppe und 1 Kontrollgruppe (jeweils 4 Platten)	Magnetfeld, keine Signalform angegeben, 1,24 kHz, 1,6 mT (gemessen), 5% Inhomogenität Expositionsdauer: 4 Stunden	Zellebensfähigkeit und Zellproliferation	reduzierte Zellebensfähigkeit und Zellproliferation bei beiden Stämmen ( $p$ -Wert nicht angegeben)	kurzer Konferenzbeitrag, keine statistische Methode beschrieben
Malíková et al. (2015)	Hefe ( <i>C. albicans</i> ), 2 Expositionsgruppen und entsprechende Kontrollgruppen (3 – 4 Replikationen)	Magnetfeld, sinusoidal, 1,24 kHz mit 1,6 mT, 1,26 kHz mit 1,63 mT (Effektivwert), max. 5% Inhomogenität Expositionsdauer: 4 Stunden	Zellwachstum (Zellebensfähigkeit und Zellproliferation)	verringertes Wachstum ( $p$ -Wert nicht angegeben)	Ca <sup>2+</sup> -Resonanz-Frequenz untersucht, keine statistischen Angaben
Ramon et al. (1981)	<i>E. coli</i> (ATCC 25922), 1 Expositionsgruppe, 1 Kontrollgruppe	Magnetfeld, sinusoidal, 600 Hz, 2 mT oder 3 mT (unklar) Expositionsdauer: 17 – 64 Stunden	Zellwachstum (Zellproliferation)	verringertes Wachstum ( $p$ -Wert nicht angegeben)	Kurzartikel, weitere Exposition bei 60 Hz-Feld nicht relevant für Review, keine statistischen Angaben
Ramon et al. (1987)	<i>B. subtilis</i> , 2 Expositions- und jeweilige Kontrollgruppen (jeweils 5 Proben)	Magnetfeld, sinusoidal, 800 und 1000 Hz, 0,8 mT, 1,6 mT und 2,5 mT ( $\pm$ 0,1 mT, gemessen) Expositionsdauer: „an“, „aus“ im 2 Sekunden-Takt und kontinuierlich bis zu 30 Stunden	Zellwachstum (Zellproliferation und Zellverbands-Struktur)	signifikante Zunahme des Wachstums und kaum Ausbildung von Zellverbänden ( $p < 0,05$ )	Kurzartikel, Geräuschpegel des Expositionsapparates sehr laut und mit Zellproliferations-hemmender Wirkung
Rodegerdts et al. (2000)	menschliche fötale Fibroblasten: 1 Expositionsgruppe, 1 Kontrollgruppe (3 – 6 Wiederholungen)	Gradientenmagnetfeld, Dreieckssignal, 500 Hz, $2 \pm 0,25$ mT (Durchschnitt), max. 0,5 mT Abweichung Expositionsdauer: 2 und 24 Stunden	Zellzyklus-verteilung und Zellproliferation	keine statistisch signifikanten Unterschiede	zusätzlich 75 Hz-Rechteck-Puls untersucht, nicht relevant für Review
Wang et al. (2013)	menschliche Leberkrebszellen (HepG2), 3 Expositionsgruppen, 1 Kontrollgruppe (3 unabhängige Wiederholungen)	Magnetfeld, keine Signalform angegeben, 300 kHz, 5 mT, 8 mT und 11 mT (gemessen) Expositionsdauer: 30 Minuten	Zellebensfähigkeit, Apoptose, Zellmorphologie	statistisch signifikante Zunahme der Apoptose ( $p < 0,001$ ) in allen Gruppen und Abnahme der Zellebensfähigkeit ( $p = 0,01$ ) bei 11 mT	zusätzlich Ko-Exposition bei dem gleichen Magnetfeld und Hyperthermie untersucht (hier nicht relevant), Vorversuch zur Ermittlung der wirksamsten Magnetfeldstärke durchgeführt

Sechs der sieben Studien fanden eine Wirkung auf die Zellproliferation und auf die Zellebensfähigkeit, wobei vier Studien ein verringertes Zellwachstum bzw. eine reduzierte Lebensfähigkeit der Zellen unter Magnetfeldeinfluss fanden (Barabas et al., 2016; Malíková

et al., 2015; Ramon et al., 1981; Wang et al., 2013). Eine Studie beobachtete eine Zunahme des Zellwachstums (Ramon et al., 1987). Allerdings trat die Wirkung zusammen mit einem Verlust der Zellverbandsstruktur auf, so dass hier womöglich ein zusätzlicher Effekt eine Rolle gespielt haben könnte. Eine weitere Studie beobachtete unterschiedliche Wirkungen in Abhängigkeit der Frequenz (Barabáš et al., 2015), ohne jedoch eine eindeutige Tendenz der Feldwirkung identifizieren zu können. Rodegerdts et al. (2000) fanden keine statistisch signifikanten Wirkungen. Insgesamt lassen sich die Ergebnisse der vorliegenden Studien unter den gegebenen Bedingungen als Hinweis auf eine Wirkung von Magnetfeldern auf die Zellproliferation und Zellebensfähigkeit deuten. Es scheint jedoch möglich, dass das Magnetfeld je nach Zelllinie unterschiedlich wirkt oder dass bereits kleine Unterschiede in der Frequenz die Wirkung verändern.

#### 4.2.5.3 Genotoxische Wirkungen von Magnetfeldern und elektrischen Feldern

Insgesamt wurden sechs Studien evaluiert, die genotoxische und mutagene Wirkungen von Magnetfeldern (3,78  $\mu$ T – 6,05 mT) untersuchten (siehe Tabelle 4.10). Eine Studie befasste sich zusätzlich mit einer Exposition bei einem elektrischen Feld (300 V/m) und dessen mutagenen Wirkungen. In den Studien wurde vor allen Dingen der Frage nachgegangen, ob die Felder bestimmter Anwendungen im Zwischenfrequenzbereich, wie z.B. induktives Laden oder Kochen, potenziell genotoxisch oder karzinogen sein könnten.

**Tabelle 4.10:** *In vitro*-genotoxische Wirkungen von Magnetfeldern und elektrischen Feldern. Die Färbung der Zellen der ersten Spalte entspricht der Studienqualität basierend auf OHAT (grün = hoch, gelb = moderat, rot = gering).

Publikation	Exponiertes System	Exposition	Endpunkte	Ergebnis	Anmerkung
Sakurai et al. (2009)	CHO-K1 (Hamster-Ovarzellen) und menschliche Glioblastomzellen, 1 Expositionsgruppe, 1 Kontrollgruppe, 1 Positivkontrolle (min. 3 unabhängige Replikationen)	Magnetfeld, sinusoidal, 23 kHz, 6,05 mT (Effektivwert, gemessen), 4,8% Inhomogenität  Expositionsdauer: 2 Stunden	Genotoxizität, Zellwachstum und Stress	keine statistisch signifikanten Wirkungen	-
Miyakoshi et al. (2007)	CHO-K1 (Hamster-Ovarzellen), <i>S. typhimurium</i> und <i>E.coli</i> , jeweils 1 Expositionsgruppe, 1 Kontrollgruppe, 1 Positivkontrolle (3 unabhängige Replikationen)	Magnetfeld, sinusoidal, 23 kHz, 532 $\mu$ T (Effektivwert, gemessen), < 3,8% Inhomogenität  Expositionsdauer: 30 – 120 Minuten	Genotoxizität, Zellwachstum und Mutagenität	keine statistisch signifikanten Wirkungen	-
Morandi et al. (1996)	verschiedene Stämme von <i>S. typhimurium</i> , 4 Expositionsgruppen, 2 Kontrollgruppen, Positivkontrolle (2 Zellkultur-Platten pro Gruppe)	Magnetfeld oder elektrisches Feld, keine Signalform angegeben, 600 und 6000 Hz, 0,33 mT (Effektivwert, gemessen), Inhomogenität $\leq$ 5%, 300 V/m (Effektivwert)  Expositionsdauer: 48 Stunden	Mutagenität	keine statistisch signifikanten Wirkungen	60 Hz-Exposition und Ko-Expositionen verschiedener Felder und mit Mutagen (nicht relevant für Review)

Publikation	Exponiertes System	Exposition	Endpunkte	Ergebnis	Anmerkung
Nakasono et al. (2008)	4 Stämme von <i>S. typhimurium</i> und 2 Stämme von <i>E. coli</i> für Mutagenitätstests; Hefe-Stamm <i>S. cerevisiae</i> für Gen-Konversionstest, Positiv- und Negativkontrollen, (min. 5 unabhängige Replikationen)	Magnetfeld, sinusoidal, 2 kHz (0,91 mT Effektivwert), 20 kHz (1,1 mT Effektivwert), 60 kHz (0,11 mT Effektivwert) (alle gemessen), Inhomogenität < 2,5%  Expositionsdauer: 48 Stunden	Mutagenität und Genotoxizität	keine statistisch signifikanten Wirkungen	auch Ko-Exposition mit verschiedenen chemischen Mutagenen untersucht (nicht relevant für Review)
Shi et al. (2014)	kultivierte menschliche Linsenepithelzellen (SRA01/04), 2 Expositionsgruppen, 1 Schein-Expositionsgruppe, Positivkontrolle (5 Proben je Gruppe, 3 unabhängige Replikationen)	Magnetfeld, sinusoidal, 90 kHz, 93,36 µT, 5,3% Inhomogenität  Expositionsdauer: 2 oder 4 Stunden	Genotoxizität, Zellproliferation, Apoptose	keine statistisch signifikanten Wirkungen	-
Sun et al. (2017)	retinale Pigmentepithel-Zellen (des Menschen?), 1 Expositionsgruppe und 1 Kontrollgruppe	Magnetfeld, keine Signalform angegeben, 100 kHz, 3 A/m (gemessen, ca. 3,78 µT), homogenes Feld  Expositionsdauer: 24 Stunden	DNA-Schäden und -Menge	keine statistisch signifikanten Wirkungen	Konferenzbeitrag/ Vorstudie, Anzahl der Zellen/Zellkulturplatten unbekannt, vermutlich nur 1 Zellkulturplatte/ Gruppe

Keine der sechs evaluierten Studien (Miyakoshi et al., 2007; Morandi et al., 1996; Nakasono et al., 2008; Sakurai et al., 2009; Shi et al., 2014; Sun et al., 2017) konnte genotoxische oder mutagene Wirkungen durch eine Magnetfeldexposition nachweisen. Drei dieser Studien wiesen eine hohe Studienqualität auf (Miyakoshi et al., 2007; Nakasono et al., 2008; Sakurai et al., 2009). Auch bei der Exposition gegenüber einem elektrischen Feld (Morandi et al., 1996) wurde keine Wirkung gefunden.

#### 4.2.5.4 Wirkungen von Magnetfeldern auf die Genexpression

Drei Studien untersuchten die Wirkungen von Magnetfeldern (18 µT – 2 mT) auf die Genexpression in menschlichen Zellen und Speicheldrüsen-Zellen der Mücke (siehe Tabelle 4.11). Goodman und Henderson (1986) interessierten sich für generelle Wirkungen elektromagnetischer Felder, Sakurai et al. (2012, 2013) untersuchten die Wirkungen von Feldern die von Induktionsherden emittiert werden.

**Tabelle 4.11:** *In vitro*-Wirkungen von Magnetfeldern auf die Genexpression. Die Färbung der Zellen der ersten Spalte entspricht der Studienqualität basierend auf OHAT (grün = hoch, gelb = moderat).

Publikation	Exponiertes System	Exposition	Endpunkte	Ergebnis	Anmerkung
Goodman und Henderson (1986)	Speicheldrüsen der Trauermücke ( <i>Sciara</i> ), 1 Expositionsgruppe, 1 Kontrollgruppe (keine Gruppengrößen genannt)	Magnetfeld, sinusoidal, 4,4 kHz, 18 $\mu$ T (Spitzenwert, gemessen)  Expositionsdauer: 15 – 60 Minuten	Transkriptionsaktivität in Speicheldrüsen-Zellen	erhöhte Transkriptionsaktivität (keine Signifikanz-Angaben)	keine statistische Auswertung, Fokus auf 72 Hz-Exposition, nicht relevant für Review
Sakurai et al. (2012)	menschliche Gliazellen (SVGp12), 1 Expositionsgruppe, 1 Kontrollgruppe, 1 Positivkontrolle (3 unabhängige Replikationen)	Magnetfeld, sinusoidal, 23 kHz, 100 $\mu$ T (Effektivwert, gemessen), $\leq$ 4,8% Inhomogenität  Expositionsdauer: 2, 4 oder 6 Stunden	Genexpressions-Profil und Zellzyklus-Verteilung	keine statistisch signifikanten Wirkungen	-
Sakurai et al. (2013)	menschliche Gliazellen (SVGp12), 1 Expositionsgruppe, 1 Kontrollgruppe, 1 Positivkontrolle (3 unabhängige Replikationen)	Magnetfeld, sinusoidal, 23 kHz, 2 mT (Effektivwert, gemessen), $\leq$ 4,7% Inhomogenität  Expositionsdauer: 2, 4 oder 6 Stunden	Genexpressions-Profil	keine statistisch signifikanten Wirkungen	-

Einzig Goodman und Henderson (1986) fanden in ihrer Studie zur zellulären Reaktion auf das Magnetfeld eine erhöhte Transkriptionsaktivität bei einem 18  $\mu$ T-Feld (4,4 kHz) in Speicheldrüsen-Zellen der Trauermücke. Allerdings wurden die Ergebnisse nicht statistisch ausgewertet und nur knapp dargestellt. Die beiden Studien von Sakurai et al. (2012, 2013), welche eine hohe Studienqualität hatten, fanden keine statistisch signifikanten Wirkungen.

#### 4.2.5.5 Wirkungen von Magnetfeldern und elektrischen Feldern auf hämatologische Parameter

Drei Studien untersuchten Feldwirkungen im Zwischenfrequenzbereich auf hämatologische Parameter des Menschen (5 – 5000 V/m, 0,6 – 500  $\mu$ T) (siehe Tabelle 4.12). Zwei dieser Studien beschäftigten sich mit der Sedimentationsrate von roten Blutkörperchen während der Exposition in einem elektrischen Feld und elektromagnetischen Feld (Juutilainen und Lahtinen, 1985; Senatra et al., 1978) zur Aufdeckung von nicht-thermischen Wirkungen dieser Felder. Eine weitere Studie untersuchte den Einfluss von Magnetfeldern und elektrischen Feldern alltäglicher Feldquellen auf oxidativen Stress in Blutplättchen (Lewicka et al., 2015).

**Tabelle 4.12:** *In vitro*-Wirkungen von elektrischen Feldern und Magnetfeldern auf hämatologische Parameter. Die Färbung der Zellen der ersten Spalte entspricht der Studienqualität basierend auf OHAT (rot = gering).

Publikation	Exponiertes System	Exposition	Endpunkte	Ergebnis	Anmerkung
Juutilainen und Lahtinen (1985)	menschliche Blutproben, jeweils aufgeteilt in 4 Expositionsgruppen und eine Kontrollgruppe sowie gemischte Blutproben von mehreren Probanden, aufgeteilt in 2 Expositionsgruppen und 2 Kontrollgruppen (Anzahl der Proben nicht eindeutig)	elektrisches Feld und elektromagnetisches Feld, sinusoidal, 300 Hz – 100 kHz, 5 V/m, 25 V/m, 50 V/m, 250 V/m, 500 V/m und 5000 V/m (gemessen und berechnet), 0,48 – 1,1 A/m, ca. 0,6 – 1,38 $\mu$ T  Expositionsdauer: 1 Stunde (?), nicht eindeutig	Sedimentationsrate der Erythrozyten	Verlangsamung der Sedimentationsrate bei allen Frequenzen und unterschiedlichen Feldstärken ( $\geq 25$ V/m) beim elektrischen Feld, kein linearer Zusammenhang ( $p < 0,05$ )	elektromagnetisches Feld mit 1,6 kHz als Replikation von Senatra et al. (1978)
Lewicka et al. (2015)	menschliche Blutplättchen, 1 Expositionsgruppe und 1 Kontrollgruppe (36 Proben pro Gruppe oder insgesamt? nicht eindeutig)	elektrisches oder magnetisches Feld, keine Signalform angegeben, 1 kHz, 0,5 mT oder 220 V/m, Magnetfeld homogen  Expositionsdauer: 30 Minuten	oxidativer Stress	Zunahme des oxidativen Stresses bei Magnetfeldexposition ( $p$ -Wert nicht angegeben), geringere Zunahme ohne Signifikanzangabe beim elektrischen Feld	Magnetfeld repräsentiert Exposition bei Autoelektronik, elektrisches Feld einen LCD-Monitor, Gruppengröße nicht eindeutig, widersprüchliche Verwendung des Begriffs "control sample" sowohl für Kontrollgruppe als auch für Blindwerte der Messung, Signifikanz der Ergebnisse nicht eindeutig angegeben, zusätzlich Wirkung von 50 Hz-Magnetfeld untersucht (Physiotherapie-Gerät)
Senatra et al. (1978)	Blutproben von männlichen Arbeitern (43/100 zufällig ausgewählt), jede Probe aufgeteilt in 3 Kontrollgruppen (direkt nach Blutabnahme, im Labor und abgeschirmt) und 1 Expositionsgruppe	elektrisches Feld, sinusoidal, 1,59 kHz, 235 V/m (Effektivwert)  Expositionsdauer: 20 min – 2 Stunden	Erythrozyten-Sedimentationsrate und Bioimpedanz	statistisch signifikant verringerte und z.T. gestoppte Sedimentation ( $p < 0,001$ )	laut Juutilainen und Lahtinen (1985), die eine Replikation durchführten, bestand die Exposition zusätzlich aus einem Magnetfeld – keine Angaben dazu im Artikel selbst

Juutilainen und Lahtinen (1985) und Senatra et al. (1978) fanden eine verringerte und z.T. gestoppte Sedimentationsrate von Erythrozyten. Die Erythrozyten-Sedimentationsrate ist ein häufig verwendeter, sensitiver aber unspezifischer Marker für entzündliche Erkrankungen (Flexikon DocCheck, 2018). Die Wirkungen traten in der Studie von Senatra bei einem 235 V/m-Feld (1,6 kHz) auf, wohingegen Juutilainen und Lahtinen (1985) eine Verlangsamung der Sedimentationsrate bei allen untersuchten Frequenzen 300 Hz – 100 kHz und Feldstärken ab 50 V/m feststellen konnten (jedoch ohne linearen Zusammenhang) (siehe Tabelle 4.12). Ein Teil der Studie von Juutilainen und Lahtinen (1985) - bestehend aus einer elektromagnetischen Feld-Exposition - war darauf ausgelegt, die Studie von Senatra et al. (1978) zu replizieren, was allerdings nicht gelang. Die Ergebnisse beider Studien deckten sich nur in Ansätzen und die Studienqualität beider Studien ist gering. Dennoch könnten die Ergebnisse eine weitere, methodisch einwandfreie Replikation der Studien zur Klärung der Ergebnisse rechtfertigen. Der Befund, dass sich elektrische und magnetische Felder in der Studie von Lewicka et al. (2015) auf oxidativen Stress bei Blutplättchen auswirkten, wird durch zahlreiche methodische Mängel der Studie abgeschwächt. Allerdings gab es aus Tierversuchen (Maaroufi et al., 2011) ebenfalls Hinweise für eine Zunahme des oxidativen Stresses durch Magnetfeldeinfluss (siehe Kapitel 4.2.4.2).

## **4.3 Diskussion**

### **4.3.1 Zusammenfassung der Evidenz für Wirkungen nach Endpunkten**

Das Ziel des vorliegenden systematischen Reviews war es, die aktuelle Datenlage zu den Wirkungen von magnetischen, elektrischen und elektromagnetischen Feldern im Zwischenfrequenzbereich (300 Hz – 1 MHz) auf biologische Systeme zu analysieren und zu bewerten. Insgesamt 56 Studien erfüllten die Einschlusskriterien. Davon waren drei Humanstudien, 27 Tierstudien und 26 Zellstudien (*in vitro*).

Sieben der 56 Studien untersuchten die Wirkungen von elektrischen Feldern. Dabei wurden Wirkungen auf hämatologische Parameter (Juutilainen und Lahtinen, 1985; Senatra et al., 1978), auf die Fortpflanzung bei Tauflieden (Panagopoulos, 2016) und die Zelldifferenzierung (Gottwald et al., 2002) gefunden. Die Autoren diskutierten eine Interaktion der elektrischen Felder mit den Zellen bzw. anderen Gewebe-Komponenten, wobei aber gleichzeitig weitere Faktoren, wie die Modulation des Feldes oder das Erdmagnetfeld eine Rolle gespielt haben könnten oder sogar notwendig für die Wirkungen waren. Aufgrund der geringen Anzahl der Studien, der unterschiedlichen Endpunkte und verschiedenen applizierten Frequenzen sowie der ungeklärten Wirkungsmechanismen lässt sich keine Einschätzung zu den möglichen Wirkungen von elektrischen Feldern im Zwischenfrequenzbereich auf biologische Systeme treffen.

Drei Studien untersuchten die Wirkungen von elektromagnetischen Feldern (Blackman et al., 1988; Juutilainen und Lahtinen, 1985; Morales et al., 2009). Blackman et al. (1988) fanden eine Wirkung auf Ionenströme im Gehirn, allerdings nur bei zwei der untersuchten Frequenzen (315 Hz und 405 Hz) und spekulierten, dass enge Frequenz-Fenster für Wirkungen von elektromagnetischen Feldern bestehen könnten. Wie bei den elektrischen Feldern kann aufgrund der geringen Anzahl an Studien keinerlei Aussage über mögliche Wirkungen getroffen werden.

Der weitaus größere Teil der Studien (n = 49) untersuchte die Wirkungen von Magnetfeldern (Anmerkung: Einige Studien untersuchten mehrere Expositionen, z.B. Magnetfelder und elektrische Felder, und wurden daher in jeder Kategorie mitgezählt). Nur eine der drei Humanstudien (Navarro et al., 2016) fand statistisch signifikante Wirkungen auf kognitive

Funktionen. Die Autoren spekulierten, dass das Magnetfeld Veränderungen im Neurotransmitter-Haushalt hervorrufen könnte, die sich auf die Leistung des Kurzzeitgedächtnisses auswirken könnten. Einige der Tierstudien lieferten Hinweise, dass sich Magnetfelder auf Entwicklungsparameter verschiedener Spezies auswirken könnten (Juutilainen und Saali, 1986; Krylov, 2010; Krylov et al., 2016; Lee und Yang, 2014; Levin und Ernst, 1995) bzw. oxidativen Stress (Bereta et al., 2016; Lewicka et al., 2015; Win-Shwe et al., 2015) hervorrufen könnten. Als Wirkmechanismen wurden in diesem Zusammenhang die Anregung von Magnetitpartikeln bei Hühnern (Juutilainen und Saali, 1986) bzw. Ionen in Wasserflöhen und Fischen (Krylov, 2010; Krylov et al., 2016) oder eine mögliche Wärmewirkung, trotz der niedrigen Frequenz von 3,2 kHz (Lee und Yang, 2014) diskutiert. Win-Shwe et al. (2015) vermuteten ferner, dass primär oxidativer Stress durch die Exposition erzeugt werden könnte, welcher dann wiederum weitere Wirkungen (z.B. Entzündungen) hervorrufen könnte.

Auch ein Teil der evaluierten *in vitro*-Studien lieferte Hinweise, dass sich Magnetfelder im Zwischenfrequenzbereich auf biologische Systeme auswirken könnten. Es wurden Wirkungen auf die Zellproliferation und Zelllebensfähigkeit gefunden (Barabas et al., 2016; Barabáš et al., 2015; Malíková et al., 2015; Ramon et al., 1987, 1981; Wang et al., 2013), die möglicherweise über eine direkte Wechselwirkung des Magnetfeldes mit Zellkomponenten (Barabas et al., 2016) bzw. Ionen (Malíková et al., 2015; Ramon et al., 1987) hervorgerufen werden könnten. Allerdings war die Richtung der Beeinflussung der Zellproliferation (Stimulation oder Hemmung) nicht über alle Studien konsistent und womöglich spielten weitere Faktoren, wie beispielsweise unbeabsichtigte Ko-Expositionen, die verwendete Zelllinie und die Frequenz des Feldes eine Rolle.

Die Evidenz für die Wirkungen von Magnetfeldern ist auf Basis der hier eingeschlossenen Tier- und *in vitro*-Studien insgesamt als gering einzustufen. Zum einen waren die Frequenzbereiche und Feldstärken der applizierten Felder, die Endpunkte der Studien sowie die untersuchten Spezies heterogen, sodass viele Ergebnisse lediglich als Einzelbefunde zu werten sind. Zum anderen wiesen zahlreiche Studien, die eine Feldwirkung beschrieben haben, methodische Schwächen auf, die die Aussagekraft einschränken. Die Wirkungen wurden möglicherweise nicht durch die Felder *per se* hervorgerufen, sondern durch Faktoren, die durch das experimentelle Design nicht ausreichend kontrolliert wurden (z.B. unbewusste Beeinflussung durch fehlende Verblindung).

#### **4.3.2 Relevanz der Studien in Bezug auf Grenzwerte und Anwendungen**

Von den insgesamt 56 Studien untersuchten 15 die Wirkungen von Magnetfeldern von Induktionsherden, vier Studien die Wirkungen von Magnetfeldern, die beim induktivem Laden bzw. drahtloser Energieübertragung auftreten, und drei Studien MRT-Gradientenfelder. Darüber hinaus wurden verschiedene therapeutische Ansätze untersucht und in vielen Fällen waren generelle Wirkungen von elektro-magnetischen Feldern von Interesse oder der Hintergrund war unklar.

##### Induktionsherde

In 15 der 56 Studien wurden die Wirkungen von magnetischen Zwischenfrequenzfeldern untersucht, die bei häuslichen Induktionsherden und industriellen Induktionsöfen auftreten (hauptsächlich im Bereich 20 – 60 kHz). Alle 15 Studien untersuchten Feldstärken (100  $\mu$ T – 6,05 mT) oberhalb der ICNIRP-Referenzwerte für die Allgemeinbevölkerung (vgl. Kapitel 2, Tabelle 2.1), wobei nur Win-Shwe et al. (2015) eine signifikante Wirkung einer 3,8 mT-Exposition auf die Genexpression im Mäusehirn fanden. Diese Studie wies jedoch einige methodische Schwächen auf. Nur eine Studie (Nishimura et al., 2009) untersuchte zusätzlich

auch Feldstärken (11  $\mu\text{T}$ ) unterhalb der ICNIRP-Referenzwerte, jedoch konnten keine Wirkungen in diesem Bereich gefunden werden. Die gemessenen Feldstärken von Induktionsherden liegen bei richtiger Anwendung auch bei einem geringen Abstand zur Herdplatte deutlich unterhalb der Referenzwerte (Bullo et al., 2013; Guldimann et al., 2011; Rickli et al., 2003), in Worst-Case-Szenarien (Messung direkt an der Herdplatte ohne Kochtopf) wurde allerdings eine magnetische Flussdichte von maximal 84  $\mu\text{T}$  gemessen (Viellard C et al., 2007) bzw. von 300  $\mu\text{T}$  simuliert (Christ et al., 2012), was beides oberhalb der Referenzwerte liegt.

Auf Basis der hier eingeschlossenen 15 Studien existieren demnach kaum Belege für Wirkungen von Magnetfeldern mit Induktionsherd-relevanten Frequenzen auf biologische Systeme, selbst bei sehr hohen Feldstärken. Daher kann keine schädliche Wirkung für die Gesundheit durch die Nutzung von Induktionsherden abgeleitet werden. Allerdings haben die meisten dieser Studien Wirkungen auf Fortpflanzungs- und Entwicklungsparameter bei Hühnern und Nagetieren ( $n = 5$ ) oder auf die Genexpression und Genotoxizität ( $n = 4$ ) untersucht. Es kann daher nicht ausgeschlossen werden, dass von Induktionsherden emittierte Magnetfelder potenziell Wirkungen auf andere biologische Funktionen haben.

#### Induktives Laden

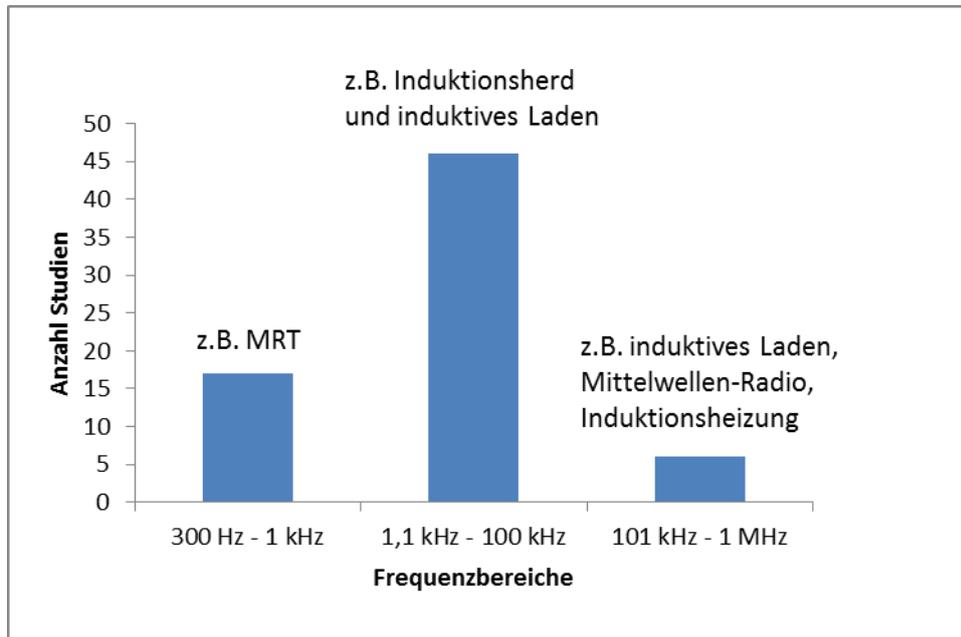
Vier weitere Studien untersuchten die Wirkungen von Magnetfeldern, die beim induktiven Laden, bspw. von Elektrofahrzeugen oder mobilen Geräten, auftreten können (10 kHz – 100 kHz). Eine Studie untersuchte ein Magnetfeld mit einer Feldstärke unterhalb der ICNIRP-Referenzwerte (Sun et al., 2017), drei weitere Studien (Dawson et al., 1998; Robertson et al., 1996; Shi et al., 2014) untersuchten Feldstärken oberhalb der Referenzwerte. In keiner dieser Studien wurden Hinweise gefunden, dass sich eine Exposition in diesem Frequenzbereich und mit den untersuchten Feldstärken auf biologische Funktionen auswirkt. Auch Schrafel et al. (2016) schlussfolgerten in ihrem Review zu den gesundheitlichen Risiken von induktivem Laden bei Elektrofahrzeugen, dass die aktuell festgelegten Grenzwerte ausreichend Sicherheit vor Magnetfeldern bieten.

#### MRT-Gradientenfelder

Drei Studien beschäftigten sich mit der Sicherheit von MRTs für das Bedienpersonal (de Vocht et al., 2007; Glover et al., 2007) bzw. bei Untersuchung schwangerer Personen (Rodegerdts et al., 2000). In diesem Review wurden nur Studien berücksichtigt, bei denen das Gradientenmagnetfeld - eine der drei Feld-Komponenten einer MRT-Exposition - im Zwischenfrequenzbereich lag und isoliert von den anderen Feld-Komponenten untersucht wurde. Durch das Abschalten des statischen Magnetfelds ist es auch möglich, die für das MRT typischen lauten Geräusche zu unterbinden, welche als Confounder die Feld-Wirkungen beeinflussen könnten (de Vocht et al., 2007). Keine der Studien konnte Hinweise auf eine Wirkung der Zwischenfrequenz-Gradientenmagnetfelder des MRTs auf die Gehirnaktivität oder auf Zellen finden.

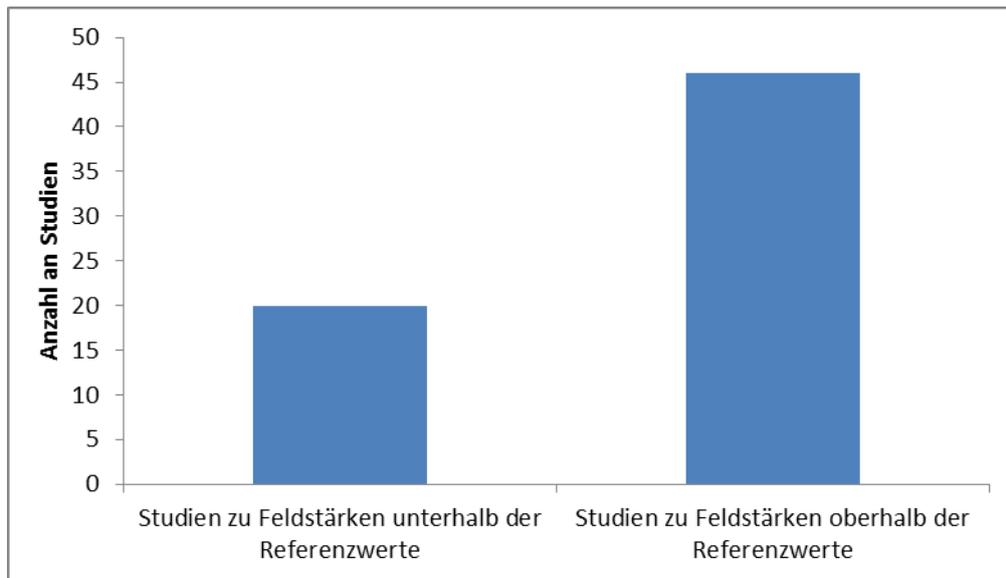
## Übersicht

Abbildung 4.6 zeigt die Verteilung der in diesem Review evaluierten Studien auf die verschiedenen Zwischenfrequenzbereiche.



**Abbildung 4.6:** Anzahl der Studien, die einen von verschiedenen Zwischenfrequenzbereichen untersucht haben. Anwendungsbeispiele sind zusätzlich für jeden Frequenzbereich aufgeführt. Manche Studien untersuchten mehrere Frequenzbereiche und wurden daher entsprechend mehrfach gezählt.

Die meisten Studien untersuchten den Frequenzbereich von 1,1 – 100 kHz ( $n = 46$ ). Diesen Frequenzbereich nutzen auch Induktionsherde und induktive Ladegeräte. Der Bereich unterhalb von 1 kHz wurde von deutlich weniger Studien untersucht ( $n = 17$ ) und der größte Frequenzbereich von 101 kHz – 1 MHz wurde lediglich von sechs Studien untersucht. Einerseits spiegelt dieses ungleiche Verhältnis das gesteigerte Forschungsinteresse an Feldwirkungen, die möglicherweise von den häuslich genutzten Induktionsherden ausgehen, wider. Es zeigt aber auch, dass ein großer Teil des Zwischenfrequenzbereiches ( $> 100$  kHz) kaum untersucht ist und dass Forschungsbedarf besteht, um die Wirkungen auf biologische Systeme über den gesamten Zwischenfrequenzbereich besser abschätzen zu können. Dies gilt insbesondere, da laut ICNIRP 2010 ab 100 kHz die Reizwirkung, die im Niederfrequenzbereich dominiert, durch die Wärmewirkung im Hochfrequenzbereich abgelöst wird, was gänzlich andere Folgen für biologische Systeme haben kann. Dies ist auch der Grund dafür, dass für Frequenzen  $> 100$  kHz neben den Referenzwerten von ICNIRP 2010 zusätzlich die Werte von ICNIRP 1998 berücksichtigt werden müssen, da letztere Empfehlung die Wärmewirkung mit einbezieht (siehe Kapitel 2, Tabelle 2.1). Abbildung 4.7 zeigt die Verteilung der Studien auf die Feldstärken unterhalb und oberhalb der ICNIRP-Referenzwerte für die Allgemeinbevölkerung.



**Abbildung 4.7:** Anzahl der Studien, die Feldstärken unterhalb und oberhalb der ICNIRP-Referenzwerte für die Allgemeinbevölkerung getestet haben (siehe Kapitel 2, Tabelle 2.1). Für den Bereich > 100 kHz wurden die Referenzwerte der (ICNIRP, 1998) herangezogen. Manche Studien untersuchten sowohl Feldstärken unterhalb als auch oberhalb der Referenzwerte und wurden daher in beiden Kategorien gezählt.

Die meisten Tier- und *in vitro*-Studien untersuchten Feldstärken oberhalb der Referenzwerte mit dem Ziel, prinzipielle Wirkungen aufzudecken und Worst-Case-Expositionen zu simulieren. Insgesamt wurden Wirkungen jedoch sowohl bei Expositionen mit Feldstärken oberhalb als auch unterhalb der Grenzwerte gefunden. Die den ICNIRP-Referenzwerten zugrundeliegenden Endpunkte „Nervenstimulation“ und „Wärmewirkung“ wurden in keiner der hier eingeschlossenen Studien untersucht.

### 4.3.3 Einschränkungen des Reviews

Eine mögliche Einschränkung dieses Reviews ist, dass einige wenige Studien durch die Suchstrategie nicht identifiziert werden konnten, da relevante Schlüsselwörter nicht im Titel oder der Zusammenfassung enthalten waren. Darüber hinaus erlaubten die Aufnahmekriterien nur Artikel in englischer und deutscher Sprache mit Peer-Review-Prozess. Potenziell relevante Daten, die in der sogenannten grauen Literatur (Publikationen, die nicht in wissenschaftlichen Journals veröffentlicht wurden) oder in anderen Sprachen veröffentlicht wurden, sind daher nicht enthalten.

Viele Studien (n = 396), welche nach der ersten Vorauswahl zunächst als potenziell relevant eingestuft wurden, konnten nicht in den Review aufgenommen werden. Die Hauptgründe dafür waren: (1) Die Untersuchung von Frequenzspektren oder Ko-Expositionen, (2) die direkte Applikation eines Stroms als Exposition und (3) die Nutzung von Puls-Signalen. Bei Frequenzspektren oder Ko-Expositionen ist die Rückführung einer Wirkung auf ein Feld mit einer bestimmten Frequenz nicht möglich, weswegen diese Studien ausgeschlossen wurden. Studien, in denen ein Strom direkt appliziert, d.h. galvanisch eingekoppelt wird, können zwar grundsätzlich zur Beurteilung von möglichen Wirkungen externer Magnetfelder auf den Menschen herangezogen werden, da die Wirkung von Magnetfeldern auf biologische Systeme auf der Induktion elektrischer Ströme im Gewebe beruht. Da es jedoch nur mit Hilfe von Simulationen und numerischen Berechnungen möglich ist, Aufschluss darüber zu erhalten, welche externen Magnetfelder entsprechende Ströme im Gewebe induzieren, wurden Studien mit Strom-Applikation im vorliegenden Review ausgeschlossen. Studien mit

Puls-Signalen wurden ausgeschlossen, da die meist asymmetrische Signalform und die steilen Flanken in der Modulation ein schwer definierbares Spektrum an verschiedenen Frequenzen ergeben.

Häufig wurden in Studien mit Ko-Expositionen, Stromapplikation oder Puls-Signalen spezielle Geräte (z.B. VDUs) oder Therapien (z.B. zur Krebsbehandlung) untersucht. Das heißt, dass es zusätzlich eine gewisse Anzahl an Publikationen gab, die Signale im Zwischenfrequenzbereich und deren Wirkungen auf biologische Systeme untersucht haben, der Großteil der Studien jedoch nicht dafür geeignet war, eine frequenzabhängige Wirkung elektromagnetischer Felder zu identifizieren.

Eine weitere Einschränkung dieses Reviews betrifft die methodische Qualität der eingeschlossenen Studien (siehe auch Kapitel 4.3.1). In zahlreichen Studien wurden Bias-Faktoren identifiziert, die aus nicht oder unzureichend durchgeführter Verblindung sowie aus einer mangelhaften Schein-Exposition bzw. Expositions-Charakterisierung resultierten.

Schließlich war es nicht möglich, die Konsistenz der Studienergebnisse in einer Meta-Analyse zu bewerten, da die meisten Studien in Bezug auf ihre Expositionsparameter, untersuchten Endpunkte und Darstellung der Ergebnisse nicht hinreichend ähnlich waren.

#### **4.3.4 Schlussfolgerung**

In diesem Review wurden experimentelle Studien zu den Wirkungen von magnetischen (n = 49), elektrischen (n = 7) und elektromagnetischen (n = 3) Feldern im Zwischenfrequenzbereich (300 Hz – 1 MHz) auf biologische Systeme systematisch zusammengetragen, analysiert und bewertet. Anzumerken ist, dass manche Studien mehr als einen Feldtyp untersuchten und daher doppelt gezählt wurden.

Studien zu Expositionen von Induktionsherden, induktiven Ladegeräten und MRTs (Gradientenfelder) lieferten keine Hinweise auf schädliche Wirkungen. Allerdings wurden in diesen Studien nur vereinzelte Endpunkte (z.B. Fortpflanzung & Entwicklung) untersucht.

Im Rahmen von *in vitro*-Studien wurden Hinweise auf eine Wirkung von Zwischenfrequenzfeldern auf die Zellproliferation und Zelllebensfähigkeit und möglicherweise auf das Auslösen von oxidativem Stress gefunden, wohingegen genotoxische Wirkungen bei Magnetfeldern < 100 kHz als unwahrscheinlich eingeschätzt werden können. Zu den meisten Endpunkten, die in Tierstudien untersucht wurden, ist die Studienlage nicht ausreichend und zu inkonsistent, um eine Einschätzung zu den möglichen Wirkungen vornehmen zu können. Auch aus den drei Humanstudien, die sich ausschließlich mit Wirkungen auf das Gehirn und die Kognition beschäftigt haben, lassen sich keine Schlussfolgerungen ziehen.

Es muss berücksichtigt werden, dass die beschriebenen Wirkungen bisher kaum repliziert wurden und die meisten Studien eine Reihe von methodischen Schwächen aufwiesen, die die interne Validität der Ergebnisse einschränken. Zukünftige Studien sollten gezielter Bias-Risiken bezüglich des Designs, der Durchführung sowie der Dokumentation der Studie minimieren. Hierbei sollten insbesondere die Schlüsselfaktoren Verblindung, Charakterisierung der Exposition bzw. Charakterisierung der Felder sowie die vollständige Beschreibung der Ergebnisse berücksichtigt werden.

Der größte Teil der eingeschlossenen Studien zu Magnetfeldern hat magnetische Flussdichten oberhalb der ICNIRP-Referenzwerte für die Allgemeinbevölkerung untersucht. Die den gegenwärtigen Basisgrenzwerten und Referenzwerten zugrundeliegenden Endpunkte Nervenreizung und Erwärmung wurden in keiner Studie untersucht. Zu elektrischen und elektromagnetischen Feldern wurden generell nur wenige Studien durchgeführt. Das Frequenzspektrum ist ebenso ungleichmäßig wie die Feldstärke erforscht.

Es wurde hauptsächlich der Bereich bis 100 kHz untersucht und nur sehr wenige Studien (n = 6) haben Felder zwischen 100 kHz und 1 MHz appliziert.

Aufgrund der geringen Anzahl an Studien zu einzelnen Endpunkten, der inkonsistenten Ergebnisse und ungleichmäßigen Abdeckung des Frequenzspektrums sowie der heterogenen Qualität der Studien ist es nicht möglich, eine fundierte Aussage über mögliche Wirkungen von elektrischen Feldern, Magnetfeldern und elektromagnetischen Feldern im Frequenzbereich 300 Hz – 1 MHz abzuleiten.

Es besteht somit weiterer Forschungsbedarf, speziell an Tier- und Humanstudien, die ein breiteres Spektrum des Zwischenfrequenzbereiches abdecken. Die Befunde dieses Reviews decken sich somit mit den Einschätzungen von SCENIHR (2015) und der WHO (2007a) sowie den bisherigen Reviews zum Zwischenfrequenzbereich (siehe Kapitel 1).

## 5 Erfassung aller relevanten wissenschaftlichen Reviews und Bewertungen zu Exposition und Wirkung elektromagnetischer Felder im Zwischenfrequenzbereich

Im folgenden Abschnitt sind die im Hinblick auf Wirkungen elektromagnetischer Felder ermittelten Literaturstellen, sortiert nach Reviews (Kapitel 5.1) und Bewertungen wissenschaftlicher Fachgremien (Kapitel 5.2), zusammengestellt. Wo möglich, wurden die Publikationen weiter untergliedert nach Exposition und Wirkungen. Die Datengrundlage für das Projekt sind primär die im EMF-Portal ([www.emf-portal.org](http://www.emf-portal.org)) gesammelten und kategorisierten wissenschaftlichen Studien. Zudem wurde manuell in den Referenzen der Artikel der Primärsuche nach weiteren relevanten Artikeln recherchiert.

### 5.1 Reviews zu Feldern im Zwischenfrequenzbereich

Es wurden 61 Reviews identifiziert, welche im Folgenden (Tabelle 5.1) alphabetisch mit Angabe des betrachteten Frequenzbereichs und der untersuchten Endpunkte aufgelistet sind. Es wird darauf hingewiesen, dass die meisten der identifizierten Reviews nicht ausschließlich die Wirkungen von EMF im Zwischenfrequenzbereich analysiert und bewertet haben. Meist wurde der Zwischenfrequenzbereich im Rahmen eines größeren Frequenzbereichs oder nur ein sehr begrenzter Frequenzbereich in Hinblick auf einen spezifischen Endpunkt hin berücksichtigt.

**Tabelle 5.1:** Reviews, die Studien zu Feldern im Zwischenfrequenzbereich beinhalten. Verwendete Abkürzungen: EF = elektrisches Feld, ELF = extrem niedrige Frequenz, EMF = elektromagnetisches Feld, MF = Magnetfeld, VDT = Visual Display Terminals.

Publikation	Feldtyp/Frequenzbereich	Endpunkte
Adair et al. (1997)	MF, EF (VDT)/0-300 kHz + EMF >300 GHz	generelle Wirkungen
Adey (1981)	MF, EF und EMF/0,5 Hz – 3000 GHz	Wirkungen auf Nervengewebe
Adey und Bawin (1977)	MF, EF/1 – 1000 Hz	Wirkungen auf das Gehirn
Ahlbom et al. (2004)	EMF (nur epidemiologische Studien)/23,4 kHz – 1900 MHz	Wirkungen auf die menschliche Gesundheit
Alizadeh et al. (2016)	EMF/3 kHz – 24 GHz (und nicht-EMF-Exposition)	Therapien für Cellulite u. ä.
Asghari et al. (2016)	MF, EMF/33 Hz – 2,45 GHz	Fortpflanzung
Azanza und Del Moral (1994)	MF, EF, EMF/0 Hz – 78 GHz	generelle Wirkungen
Beers (1989)	MF, EF, EMF/0 Hz – 9,4 GHz	generelle Wirkungen
Bernhardt (1992)	MF, EF, EMF/EMF allgemein, gesamtes Spektrum	Übersicht und Review zu den Wirkungen von EMF allgemein
Blank und Goodman (2000)	MF, EF/0 Hz – 2,5 kHz	Wirkungen auf die Genexpression
Brent (1999)	MF und EF/0 Hz – 18 kHz	Fortpflanzung & Entwicklung
Brent et al. (1993)	MF, EF, EMF (VDT)/45 Hz – 125 kHz	Fortpflanzung & Entwicklung
Bryan und Gildersleeve (1988)	MF, EF, EMF/0 Hz – 9,29 GHz	Wirkungen auf Vögel

<b>Publikation</b>	<b>Feldtyp/Frequenzbereich</b>	<b>Endpunkte</b>
Chernoff et al. (1992)	MF, EF/0,5 Hz – 100 kHz	Fortpflanzung & Entwicklung
Cleary (1987)	EF, EMF/10 Hz – 41,8 GHz	Wirkungen auf Zellen
Clements-Croome (2004)	MF, EF, EMF/1 Hz – 2,45 GHz	Übersichtsartikel über EMF
Cook et al. (2002)	MF, EMF/0,1 Hz – 915 MHz	Elektrophysiologie und Kognition beim Menschen
de Vocht und Olsen (2016)	MF, EF, EMF (nur epidemiologische Studien)/10 kHz – 1 MHz	generelle Wirkungen von "dirty electricity"
Elmas (2016)	MF, EF, EMF/5 Hz – 900 MHz	Wirkungen auf das Herz
Goodman et al. (1995)	MF, EF, EMF/10 Hz – 915 MHz	Wirkungen auf Moleküle und Zellen
Gye und Park (2012)	MF, EF, EMF/33 Hz – 2,45 GHz	Fortpflanzung & Entwicklung
Habash et al. (2003a)	MF, EF/1 Hz – 15,6 kHz	generelle Wirkungen
Habash et al. (2003b)	EMF/405 kHz – 60 GHz	generelle Wirkungen
Mild und Oberg (1982)	MF, EF, EMF/0 Hz – 30 MHz	Neurophysiologische Wirkung
Hatch (1992)	MF, EF (VDT) (nur epidemiologische Studien)/50 Hz – 20 kHz	menschliche Fortpflanzung und Entwicklung
Heynick et al. (2003)	MF, EF, EMF/400 kHz – 136 GHz	Krebs und Genotoxizität
Heynick und Merritt (2003)	EF, EMF/25 kHz – 6 GHz	Entwicklung
Hunt et al. (2009)	MF, EF, EMF/0,3 Hz – 42 GHz	Stimulation von Mikroorganismen
Huuskonen et al. (1998)	MF/15 Hz – 20 kHz	Fortpflanzung & Entwicklung
Juutilainen (1991)	MF (VDT)/10 – 20 kHz	Schwangerschaft & Entwicklung
Juutilainen (2003)	MF, EF/10 Hz – 100 kHz	Entwicklung
Juutilainen (2005)	MF, EMF/50 Hz – 6000 MHz	Entwicklung
Kavet und Tell (1991)	MF, EF (nur VDT)/0 Hz – 31 kHz	Fehlgeburt
Kirsner und Federman (1998)	MF, EF (VDT)/30 Hz – 30 kHz	Wirkungen auf die menschliche Gesundheit
Knave (1994)	MF, EF/50 Hz – 20 kHz	generelle Wirkungen
Koch et al. (1993)	MF/1 Hz – 100 kHz	Entwicklung von Hühnerembryonen
König et al. (1981)	MF, EF, EMF/EMF allgemein, gesamtes Spektrum	generelle Wirkungen
Levallois (2002)	MF, EF, EMF (VDT)/0,5 Hz – 5 MHz	Elektrosensibilität
Lindbohm und Hietanen (1995)	MF (nur VDT)/50 Hz – 60 kHz	Fehlgeburt
Litvak et al. (2002)	MF, EF und EMF/300 Hz – 10 MHz	generelle Wirkungen

<b>Publikation</b>	<b>Feldtyp/Frequenzbereich</b>	<b>Endpunkte</b>
Marcus (1990)	nur epidemiologische VDT-Studien, keine Angaben zu Feldern und Frequenzen	Fehlgeburt
Marcus et al. (2000)	EMF (nur VDT)/<30 kHz	Fehlgeburt
McCann et al. (1993)	MF, EF/16 Hz – 640 Hz	Genotoxizität
McCann et al. (1998)	MF, EF/1 Hz – 18 kHz	Genotoxizität (Update)
McKay et al. (2007)	MF, EMF/0 Hz – 1439 MHz	Blutfluss und -Gefäße
Moulder (1998)	MF, EF/12 – 6 kHz	Krebs
Nakagawa (1997)	MF, EF/14,5 Hz – 3,8 kHz	Krebs
Schrafel et al. (2016)	MF/ca. 20 kHz	Übersicht zu Wirkungen und Grenzwerten im Zusammenhang mit wireless power transmission
Ochatt (2013)	MF, EF, EMF/8 Hz – 8,7 kHz	Wirkungen auf Pflanzenzellen
Persinger et al. (1973)	MF, EF/0,1 Hz – 100 kHz	Psychophysiologische Wirkungen
Polk (1991)	MF, EF/1 Hz – 100 kHz	generelle Wirkungen
Pourlis (2009)	MF, EMF/0 Hz – 3 GHz	Fortpflanzung & Entwicklung
Reeves (2000)	EMF/60 kHz – 235 MHz	klinische Symptome aus Fall-Studien
Reilly (1989)	MF/2,1 kHz – 50 kHz	Periphere Nervenstimulation
Robert (1996)	MF, EF, EMF (VDT, MRT)/keine genauen Frequenzangaben	menschliche Entwicklung
Robert (1999)	MF, EF und EMF (nur epidemiologische Studien)/50 Hz – 2450 MHz	Fortpflanzung
Rösli et al. (2003)	EMF/23,4 kHz – 10 GHz	Wirkungen auf die menschliche Gesundheit
Rubin et al. (2011)	MF, EF, EMF (VDT)/0,1 – 2,14 GHz	Elektrosensibilität
Tenforde (1992)	MF (VDT)/5 Hz– 20 kHz	generelle Wirkungen
Vijayalaxmi und Obe (2005)	MF, EF, EMF/0 Hz – 20 kHz	Genotoxizität
Ziskin und Morrissey (2011)	MF, EMF/20 kHz – 2 GHz	thermische Wirkungen auf Fortpflanzung und Entwicklung

## 5.2 Reviews und Bewertungen von Gremien zu Feldern im Zwischenfrequenzbereich

Zusätzlich zu den in Kapitel 5.1 zusammengestellten Reviews wurden auch Bewertungen und Stellungnahmen von internationalen Gremien zu Feldern im Zwischenfrequenzbereich und deren gesundheitlichen Wirkungen recherchiert. Es wurden 38 Artikel identifiziert, welche im Folgenden (Tabelle 5.2) alphabetisch mit Angabe des betrachteten Frequenzbereichs und der untersuchten Endpunkte bzw. des Themas aufgelistet sind. Es wird darauf hingewiesen, dass sich die meisten Stellungnahmen nicht ausschließlich mit EMF im Zwischenfrequenzbereich befassen. Meist wird der Zwischenfrequenzbereich (oder Teile davon) im Rahmen eines erweiterten Frequenzbereichs berücksichtigt. Die Recherche wird fortlaufend fortgesetzt und die Liste entsprechend aktualisiert.

**Tabelle 5.2:** Reviews und Bewertung von Gremien zu Feldern im Zwischenfrequenzbereich. Verwendete Abkürzungen: EF = elektrisches Feld, ELF = extrem niedrige Frequenz, EMF = elektromagnetisches Feld, HF = Hochfrequenz, MF = Magnetfeld, NF = Niederfrequenz, VDT = Visual Display Terminals.

Publikation	Exposition/Frequenzbereich	Endpunkte/Thema
ACGIH (2012)	MF, EF, EMF/0 – 300 GHz	Grenzwertempfehlungen für Arbeiter (USA)
ARPANSA (2002)	MF, EF, EMF/3 kHz – 3 GHz	Review, Übersicht und Grenzwerte für Australien
Bundesamt für Umwelt (2009)	MF/10 Hz – 100 kHz	Bewertung karzinogener Wirkungen
Bundesbehörden der Schweizerischen Eidgenossenschaften (1999)	MF, EF, EMF/0 – 300 GHz	Grenzwerte für die Schweiz
European Commission und McKinlay AF (1996)	MF, EF, EMF/0 – 9 GHz	Übersicht und Bewertung von EMF
Europäische Gemeinschaft (1999)	MF, EF, EMF/0 – 300 GHz	Grenzwertempfehlungen des Rates der Europäischen Union
Health Canada (2015)	EMF/3 kHz – 300 GHz	Grenzwerte für Kanada
Health Council of the Netherlands (2000)	MF, EF, EMF/0 – 10 MHz	Grenzwertempfehlungen für die Niederlande
Health Council of the Netherlands (2005)	MF, EF, EMF/keine genauen Frequenzangaben, NF und HF	Jahresaktualisierung, Stellungnahme zu gesundheitlichen Wirkungen
Health Protection Agency und Advisory Group on Non-ionising Radiation AGNIR (2012)	EMF/1 MHz – 99 GHz	Übersicht, Review und Bewertung von HF
IARC (2002)	MF, EF, EMF/0 – 64 MHz	Review zu karzinogenen Wirkungen von MF und EF (3 Hz - 3000 Hz)
IARC (2013)	EF, EMF/1 kHz – 300 GHz	Review zu karzinogenen Wirkungen von EMF (30 kHz - 300 GHz)
ICNIRP (1998)	MF, EF, EMF/bis 0 – 300 GHz	Aktuelle Empfehlung für Grenzwerte von 100 kHz bis 300 GHz
ICNIRP (2003)	MF, EF, EMF/0 – 100 kHz	Review zu Quellen, Mechanismen und Studien zu biologischen Wirkungen
ICNIRP (2004)	MF, EMF/20 Hz – 2,5 GHz	Stellungnahme zu Wirkungen von Exposition bei elektronischen

<b>Publikation</b>	<b>Exposition/Frequenzbereich</b>	<b>Endpunkte/Thema</b>
		Sicherheitssystemen
ICNIRP (2009)	EMF/150 kHz – 94 GHz	Review zu generellen Wirkungen von EMF (100 kHz - 300 GHz)
ICNIRP (2010)	MF, EF, EMF/1 Hz – 100 kHz	Aktuelle Empfehlung für Grenzwerte bis 100 kHz
ICNIRP (2017)	MF, EMF/0 Hz – 15 GHz	Bewertung von diagnostischen Geräten
IEEE C95.6-2002 (2002)	MF, EF/3 kHz	Grenzwertempfehlungen
IEEE C95.1-2345-2014 (2014)	MF, EF, EMF/0 – 300 GHz	Grenzwertempfehlungen für militärische Arbeitsplätze
National Research Council (1997)	MF, EF/2 Hz – 2,45 GHz	Review zu Wirkungen von MF und EF in häuslicher Umgebung
Dennis et al. (1992)	MF, EF, EMF/5 Hz – 3 GHz	Review zu generellen Wirkungen von EMF
NRPB (1993)	MF, EF, EMF/0 – 300 GHz	Stellungnahme und Review
NRPB (1994)	MF, EF, EMF/10 Hz – 100 kHz	Übersicht, Review und Bewertung von VDT
NRPB (2001)	MF, EF/1,5 Hz – 20 kHz	Bewertung karzinogener Wirkung
NRPB (2004)	MF, EF, EMF/20 Hz – 61 GHz	Review zu biologischen Wirkungen von EMF (0 - 300 GHz)
President of the Council Ministers (2003)	EMF/100 kHz – 300 GHz	Grenzwerte für Italien
SCENIHR (2009)	MF, EF, EMF/0 Hz – 300 GHz	Bewertung der Studienlage, Abschätzung von biologischen Wirkungen
SCENIHR (2015)	MF, EF, EMF/0 Hz – 300 GHz	aktualisierte Version von 2009
SSK (2001)	MF, EF, EMF/0 – 300 GHz	Zusammenfassung des Kenntnisstands und Stellungnahme
SSM und Scientific Council on Electromagnetic Fields (2016)	MF, EF, EMF/0 Hz – 60,4 GHz	Review und Bewertung von biologischen Wirkungen
WHO (1981)	EMF/100 kHz – 300 GHz	Zusammenfassung zu Empfehlungen, Wirkungen, Quellen, etc. von HF
WHO (1987)	MF, EF/0,1 – 4 kHz	Review und Bewertung zu MF <300 Hz
WHO (1993)	MF, EF, EMF/10 Hz – 107 GHz	Übersicht, Review und Bewertung von biologischen Wirkungen
WHO (2005)	MF, EF, EMF/300 Hz – 10 MHz	Informationsblatt Zwischenfrequenzen
WHO (2007a)	MF, EF/0 – 100 kHz	Fact Sheet zu ELF
WHO (2007b)	MF, EF/1,5 Hz – 5 MHz	Review und Bewertung der WHO (aktuell)
WHO (2007c)	MF, EF/0 – 100 kHz	Forschungsagenda ELF

## 6 Bewertung der möglichen Störbeeinflussung elektronischer Implantate durch elektromagnetische Felder im Zwischenfrequenzbereich anhand der erfassten originalen Literaturstellen

### 6.1 Einleitung

#### 6.1.1 Hintergrund

In den letzten Jahren ist die Anzahl der Patienten mit kardialen aktiven Implantaten, z.B. Herzschrittmachern (HSM) oder implantierbaren Kardioverter-Defibrillatoren (ICD), stark angestiegen. Während in den USA 1990 noch 9.000 kardiale aktive Implantate eingesetzt wurden (Lahor-Soler et al., 2015), stieg die Zahl im Jahr 2009 auf 368.829 (Mond und Proclemer, 2011) und zwischen 1993 und 2008 wurden über 4,2 Millionen primäre kardiale aktive Implantationen durchgeführt (Greenspon et al., 2011). In Europa wurden im Jahr 2016 insgesamt 547.586 HSM und 105.730 ICD eingesetzt (Raatikainen et al., 2017). Darüber hinaus werden neuartige kardiale aktive Implantate, wie sondenlose HSM oder subkutan implantierbare Kardioverter-Defibrillatoren (S-ICD), aber auch andere aktive (= elektronische) Implantate, wie Neurostimulatoren und Cochlea-Implantate immer wichtiger.

Parallel zu den Erfolgen der aktiven Implantat-Technologie in den letzten Jahrzehnten hat die Exposition durch elektrische, magnetische und elektromagnetische Felder zugenommen, zumindest im Zwischen- und Hochfrequenz-Bereich (Calin et al., 2013; Gajšek et al., 2015; SCENIHR, 2015; Urbinello et al., 2014).

Es ist bekannt, dass aktive Implantate unter Beeinflussung von starken elektromagnetischen Feldern anfällig für Störungen sind (Beinart und Nazarian, 2013; Misiri et al., 2012a, 2012b; Napp et al., 2015). In einer Vielzahl von Studien wurde die elektromagnetische Interferenz (EMI), das heißt die mögliche unerwünschte Auswirkung von elektromagnetischen Feldern auf die Funktion von aktiven Implantaten (Störbeeinflussung), untersucht. Das vom Institut für Arbeits-, Umwelt- und Sozialmedizin der RWTH-Aachen betriebene EMF-Portal ([www.emf-portal.org](http://www.emf-portal.org)) umfasst als weltweit umfangreichste wissenschaftliche Literaturdatenbank zu biologischen und gesundheitsbezogenen Auswirkungen von elektromagnetischen Feldern 665 Einträge in Bezug auf EMI (Stand: Januar 2018). Die Manufacturer and User Facility Device Experience (MAUDE)-Datenbank der amerikanischen Behörde für Lebens- und Arzneimittel (American Food and Drug Administration, FDA) dokumentierte zwischen Januar 2010 und März 2017 in insgesamt 2843 Fällen Fehlfunktionen an medizinischen Geräten, hervorgerufen durch EMI. Eine Umfrage in Frankreich ergab, dass 16 % der befragten Medizinerinnen und Mediziner sich mindestens einmal im Jahr mit Patientinnen und Patienten auseinandersetzen, die von EMI berichteten (Hours et al., 2014). So ist beispielsweise die Fehlwarnnehmung (Oversensing) aufgrund der Exposition bei elektromagnetischen Feldern ein in der täglichen Praxis regelmäßig auftauchendes Phänomen. Eine Studie mit 2940 ICD-Patienten zeigte, dass die Inzidenz von EMI bei 1,87 % pro Patient und Jahr lag. Nur auf klinisch signifikante oder potentiell signifikante Vorfälle bezogen, lag die Ereignisrate bei 0,27 % pro Patient und Jahr (von Olshausen et al., 2016). Napp et al. (2015) legten in ihrer Studie die generellen Wirkungsmechanismen von elektromagnetischen Feldern auf kardiale aktive Implantate dar, beispielsweise die Erwärmung eines Implantats oder der Sonde durch hochfrequente Felder oder die Einkopplung elektrischer Ströme im menschlichen Körper durch niederfrequente Felder, die zum Beispiel zu Störungen der Wahrnehmung des Implantats führen können. Darüber hinaus zeigten Beinart und Nazarian (2013) die alltäglichen Quellen von EMI auf

und dokumentierten typische Auswirkungen, wie etwa Beschädigung der Implantat-Elektronik, Inhibition, asynchrone Stimulation oder inadäquate Schocks.

Organisationen und Gremien, die für die Empfehlung von Grenzwerten zuständig sind, haben bisher keine Grenzwerte für die EMF-Exposition von Patienten mit aktiven Implantaten festgelegt. Das amerikanische Normungsinstitut ANSI (American National Standards Institute) (IEEE C95.1-2005, 2006; IEEE C95.6-2002, 2002), die Internationale Kommission für den Schutz vor nichtionisierender Strahlung ICNIRP (International Commission for Non-Ionizing Radiation Protection) (ICNIRP, 1998, 2010) und die Europäische Union (EU, 1999, 2013) berücksichtigen in ihren Sicherheitsrichtlinien für den Schutz von Menschen, die elektromagnetischen Feldern ausgesetzt sind, keine Patienten mit aktiven Implantaten. Daraus resultierend ist es für Ärzte und Patienten oftmals schwierig, EMF-Quellen, die ein Risiko darstellen, zu identifizieren bzw. geeignete Sicherheitsabstände festzulegen, die eingehalten werden sollten. In kritischen Fällen kann das Fehlen geeigneter Sicherheitsmaßnahmen im Arbeitsumfeld zu einem Ausschluss von Patienten mit aktiven Implantaten vom Arbeitsplatz führen.

Ziel des vorliegenden systematischen Reviews ist es, zu bewerten, ob aktive Implantate im Zwischenfrequenzbereich (300 Hz – 1 MHz) anfällig für EMI sind. In aktuellen Reviews (Beinart und Nazarian, 2013; Napp et al., 2015) wurde EMI im Zwischenfrequenzbereich nicht systematisch untersucht. Zusätzlich sollen die Vor- und Nachteile der verschiedenen Studientypen erläutert werden, die genutzt werden, um EMI zu untersuchen.

### **6.1.2 Studientypen zur Untersuchung von elektromagnetischen Interferenzen**

Zur sicheren Beurteilung der Störbeeinflussung von aktiven Implantaten durch elektrische, magnetische oder elektromagnetische Felder und entsprechender Festlegung von Grenzwerten sollten verschiedene Studientypen berücksichtigt werden, da die Störbeeinflussung von interindividuellen Unterschieden (wie Körperumfang, Körpergröße, Gewicht und Krankheitsbild) (Joosten et al., 2009), der Variabilität der Implantate (Art des Implantats, Modell und Einstellungen) und der Sonden (unipolar, bipolar, Sondenlage) (Beinart und Nazarian, 2013) abhängig ist, deren Einflüsse durch die einzelnen Studientypen unterschiedlich gut abgedeckt werden.

**Provokationsstudien** sind experimentelle *in vivo*-Studien, bei denen Träger aktiver Implantate mit Feldquellen exponiert werden, um die Störbeeinflussung des Implantats bei realer Feldexposition zu überprüfen. Idealerweise findet die Exposition unter definierten Laborbedingungen statt, d.h. es werden elektromagnetische Felder einer bestimmten Frequenz mit definierter Feldstärke appliziert, um die jeweilige Störschwelle des Implantats zu bestimmen. Nur in Provokationsstudien besteht der direkte Bezug zum Menschen, wodurch eine individuelle Risikobewertung möglich wird. Es können so Expositionsbereiche angegeben werden, in denen eine Störung unter gewissen Voraussetzungen ausgeschlossen werden kann. Darüber hinaus können bei entsprechend großer Stichprobe mittels statistischer Auswertungen Patienten-, Implantat- und Sonden-bezogene Prädiktoren für eine Störbeeinflussung identifiziert werden. Die Provokationsstudie unter definierten Laborbedingungen stellt nach Meinung der Autoren den „Goldstandard“ unter den Studientypen dar, kann aber erst bei einer genügend großen Probanden-Anzahl ein aussagekräftiges Ergebnis liefern.

Bei **Studien mit einem Phantom-Modell** handelt es sich um experimentelle *in vitro*-Studien, in denen entweder direkt die Störbeeinflussung von Implantaten innerhalb eines Modells des menschlichen Körpers untersucht wird oder die durch elektromagnetische Felder in den Sonden induzierte Spannung ermittelt wird. Dabei versteht man unter einem Phantom-Modell

die Nachbildung eines Körpers oder Körperteils mit gewebeähnlichen Eigenschaften und Ausmaßen (Mobashsher und Abbosh, 2015). In einem Phantom-Modell können die Reaktion von Implantaten auf unterschiedliche elektromagnetische Felder sowie der Einfluss der Sonden (unipolar, bipolar, Sondenlage) auf die Störbeeinflussung getestet werden. Der Vorteil dieses Studientyps liegt in der Möglichkeit, mit überschaubarem Aufwand Implantat- und Sonden-bezogene Parameter variieren, die Versuche unter standardisierten Bedingungen mehrfach wiederholen und somit die Ergebnisse reproduzieren zu können. Außerdem ist es möglich, Kopplungsmodelle aufzustellen, d.h. den Zusammenhang zwischen der Feldstärke eines externen elektromagnetischen Feldes und der Störspannung an der Sonde zu ermitteln. Der Nachteil liegt in der Nachbildung des menschlichen Körpers. Es können nicht alle individuellen Charakteristika und Details berücksichtigt werden, weshalb die Übertragbarkeit der Ergebnisse auf den Menschen begrenzt ist.

Bei **Benchmarktests** werden definierte Prüfsignale auf ein nicht implantiertes Implantat gegeben und dessen Reaktion analysiert. Die Prüfsignale simulieren dabei die Exposition mit elektromagnetischen Feldern. Sie werden als Störspannung über eine Gewebenachbildung (Widerstandsnetzwerk) an den Implantat-Eingängen angelegt (galvanische Kopplung). So kann die Störfestigkeit von Implantaten auf beliebige Störsignale getestet werden. Benchmarktests sind auch im Rahmen von Produktnormen beschrieben (EN 45502-2-1:2004, 2004; EN 45502-2-2:2008, 2008; ISO 14117:2012, 2012) und somit von Implantat-Herstellern durchzuführen. Der Vorteil liegt in der Möglichkeit, mit einfacher Testmethodik die Störbeeinflussung (Prüfgrenze) von Implantaten verschiedener Hersteller bei unterschiedlichen Einstellungen bewerten zu können. Es ist möglich, ohne aufwendigen Expositionsaufbau, wie er bei Phantom-Studien oder Provokationsstudien nötig ist, die Störfestigkeit bei beliebigen Störsignalen zu testen. Der Nachteil ist, dass Benchmarktests auf die Untersuchung des Implantats (Art des Implantats, Hersteller und Einstellungen) beschränkt sind. Der Einfluss individueller Faktoren oder der Sonden kann nicht berücksichtigt werden. Zudem ist die Übertragbarkeit auf externe elektromagnetische Felder und konkrete elektrische Geräte nur mittels Kopplungsmodellen möglich. Obwohl Benchmarktests eine allgemein anerkannte Methode sind, um die Störfestigkeit von Implantaten zu untersuchen, bevorzugen viele Autoren die Durchführung von ***in vitro-Test (in air)***. In solchen Tests werden Implantate mit oder ohne Sonden gegenüber einer Feldquelle exponiert, ähnlich wie bei Phantom-Modell-Untersuchungen, aber ohne den Korpus des Phantoms. Mit Hilfe dieser *in vitro*-Tests (*in air*) ist es möglich, eine Störung mit Feldstärken externer Felder bzw. mit Feldstärken von realen Expositionsszenarien, d.h. elektronischen Geräten, zu korrelieren. Die Aussagekraft der Ergebnisse steht nach Meinung der Autoren aber aufgrund der fehlenden Nachbildung von Gewebe-Eigenschaften in Frage.

**Simulationsstudien** sind sogenannte *in silico*-Studien, in denen mittels numerischer Berechnungen am Computer die Exposition eines Menschen durch elektromagnetische Felder simuliert wird. Der Mensch ist als Körpermodell nachgebildet, je nach Untersuchungsziel mit oder ohne Sonde. Es können so im Rahmen der numerischen Genauigkeit interindividuelle Unterschiede (wie Körperumfang, Körpergröße, Gewicht) sowie der Einfluss der Sonden auf die Störbeeinflussung von aktiven Implantaten bei beliebigen äußeren elektromagnetischen Feldern untersucht werden. Häufig geht es auch um die Berechnung der Störspannungen, die durch externe Felder induziert werden, also die Entwicklung eines Kopplungsmodells. Der Vorteil von Simulationsstudien liegt in der Möglichkeit der unkomplizierten Variabilität von Körper-, Sonden- und EMF-Parametern. Die bisherigen Simulationsmodelle sind allerdings in der Nachbildung des Körpers und der Sonden noch zu ungenau und sie müssen immer durch experimentelle Untersuchungen

verifiziert werden. Sie haben aber grundsätzlich das Potential, zukünftig eine Risikobewertung, beispielsweise für Arbeiter mit Implantaten, präventiv durchführen zu können.

### 6.1.3 Fachbegriffe

Tabelle 6.1 listet die im vorliegenden Review verwendeten wichtigsten technischen Fachbegriffe und entsprechende Erklärungen auf.

**Tabelle 6.1:** Fachbegriffe, die im Review verwendet werden, und entsprechende Erklärungen.

Fachbegriff	Erklärung
Elektromagnetische Interferenz (EMI)	Störung der Funktion eines aktiven (elektrischen) Implantats durch die Einkopplung einer intrakorporalen Störspannung, verursacht durch elektrische, magnetische oder elektromagnetische Felder (EMF); <i>Synonyme: Störbeeinflussung, Störanfälligkeit</i>
externe EMF (Störfeld)	EMF, emittiert durch ein elektronisches Gerät, z.B. Magnetfeld (gemessen in Tesla [T] oder Ampere/Meter [A/m]) oder elektrisches Feld (gemessen in Volt/Meter [V/m])
Störspannung	Intrakorporale Spannung, die am Eingang eines aktiven Implantats auftritt, erzeugt durch EMF; auch <i>induzierte Spannung</i> genannt, wenn durch ein magnetisches Feld erzeugt
Feld-Störschwelle	Minimale Feldstärke eines externen EMF/Störfelds, das erforderlich ist, um EMI zu erzeugen
Störsignal	Signal, das die reguläre Funktion eines aktiven Implantats stören kann
CW, AM, PW, Pulse	Wellenformen (kontinuierliche Welle (CW), Amplitudenmodulation (AM), gepulste Modulation (PW), Pulse) eines Störfelds oder Störsignals
mV-Störschwelle	Spannung eines Störsignals, das eine Störung der Funktion eines aktiven Implantats verursachen kann
Prüfgrenze	Minimum-mV-Störschwelle von aktiven Implantaten, die in Produktnormen definiert wird, angegeben in mV (Millivolt)
Induktionsfläche	Fläche, die durch die Schleife aus Implantat, Sonde und Gewebe aufgespannt wird und in die ein Magnetfeld einkoppeln kann

## 6.2 Methoden

### 6.2.1 Literaturrecherche

Die systematische Literatursuche nach relevanten Artikeln wurde in der thematisch spezialisierten Literaturdatenbank EMF-Portal ([www.emf-portal.org](http://www.emf-portal.org)) durchgeführt. Das EMF-Portal ist die weltweit umfangreichste wissenschaftliche Literaturdatenbank zu biologischen und gesundheitsbezogenen Wirkungen von EMF und wurde von der WHO als Referenzdatenbank anerkannt<sup>8</sup>. Sie besteht seit über 15 Jahren, ist öffentlich zugänglich und umfasst derzeit ca. 26.000 wissenschaftliche Veröffentlichungen (Stand: Januar 2018). Relevante Studien werden täglich anhand systematischer Suchstrategien in internationalen Literaturdatenbanken wie Medline/PubMed<sup>9</sup> und IEEE Xplore Digital Library<sup>10</sup> identifiziert und in das EMF-Portal aufgenommen. Wissenschaftliche Zeitschriften, die in diesen

<sup>8</sup> <http://www.who.int/peh-emf/research/database/en/index1.html>, abgerufen am 23.01.18

<sup>9</sup> <https://www.ncbi.nlm.nih.gov/pubmed/>, abgerufen am 23.01.18

<sup>10</sup> <http://ieeexplore.ieee.org/Xplore/home.jsp>, abgerufen am 23.01.18

Datenbanken nicht enthalten sind, werden separat geprüft. Alle in das EMF-Portal eingehenden Studien werden nach grundlegenden Merkmalen wie Expositionsparameter (z.B. Frequenz, Art des Feldes), Art der Veröffentlichung (z.B. Originalartikel, Review, Kommentar) und Studiendesign (z.B. experimentelle Studie, epidemiologische Studie) kategorisiert. So wird jeder Artikel mit zusätzlichen Details auf der Grundlage eines standardisierten Schemas charakterisiert, um hochspezifische Suchen zu ermöglichen.

Bei der Primärsuche im EMF-Portal wurde in einem ersten Schritt nach allen Artikeln, die den Begriff „elektromagnetische Interferenz“ enthalten, gesucht<sup>11</sup>. Zusätzlich wurde eine etwas spezifischere Suche im Frequenzbereich < 10 MHz und in der Kategorie „Störbeeinflussung“ durchgeführt. Beide Suchergebnisse wurden auf Dubletten bereinigt. Zudem wurden die Referenzlisten der Artikel der Primärsuche durchgesehen, um weitere relevante Artikel zu identifizieren.

### **6.2.2 Studienauswahl, Ein- und Ausschlusskriterien**

Eingeschlossen wurden alle experimentellen Studien zu EMI mit aktiven (elektronischen) Implantaten im Frequenzbereich von 300 Hz bis 1 MHz. Akzeptiert wurden Provokationsstudien, Studien mit Phantom-Modellen, Benchmarktests und Simulationsstudien. Es wurden nur englisch- und deutschsprachige Artikel, die in Fachzeitschriften mit Peer-Review-Verfahren veröffentlicht wurden, eingeschlossen.

Ausgeschlossen wurden Studien, die Implantat-Programmiergerät-Interferenzen, Implantat-Implantat-Interferenzen, EMI mit passiven Implantaten oder durch eine Strom-Applikation (z.B. durch TENS (transkutane elektrische Nervenstimulation) oder andere medizinische Geräte) untersuchten. Darüber hinaus wurden Studien ohne Angabe des getesteten Frequenzbereichs ausgeschlossen. Review-Artikel, Fallstudien, Editorials, Kommentare und unveröffentlichte Artikel sowie Artikel, die eindeutig keinem Peer-Review-Prozess unterzogen wurden, wurden ebenfalls ausgeschlossen.

Alle potenziell relevanten Artikel wurden anhand der Ein- und Ausschlusskriterien in zwei Schritten überprüft. Zuerst wurden Titel und Abstracts unabhängig von zwei Autoren durchgesehen (SD, LB) (Vorauswahl, vgl. Abbildung 6.1). Anschließend wurden die Volltexte der möglicherweise relevanten Artikel unabhängig von beiden Autoren überprüft (Eignung) und gemeinsam über deren Ein- bzw. Ausschluss entschieden.

### **6.2.3 Studien-Extraktion**

Das Extraktionsprotokoll wurde vor Beginn des Projekts erstellt. Die extrahierten Daten umfassten bibliographische Daten, Studientyp (Provokationsstudie, Phantom-Studien, Benchmarktest, Simulation), Expositionsparameter (Feldquelle, Frequenz und Feldstärke (falls vorhanden)), Anzahl der Patienten/Implantate und Ergebnis (Störung). Die Daten der eingeschlossenen Studien wurden unabhängig voneinander von zwei Autoren (SD, DS) extrahiert. Unstimmigkeiten und technische Unklarheiten wurden zwischen beiden Autoren diskutiert und ggf. durch weitere Recherche geklärt.

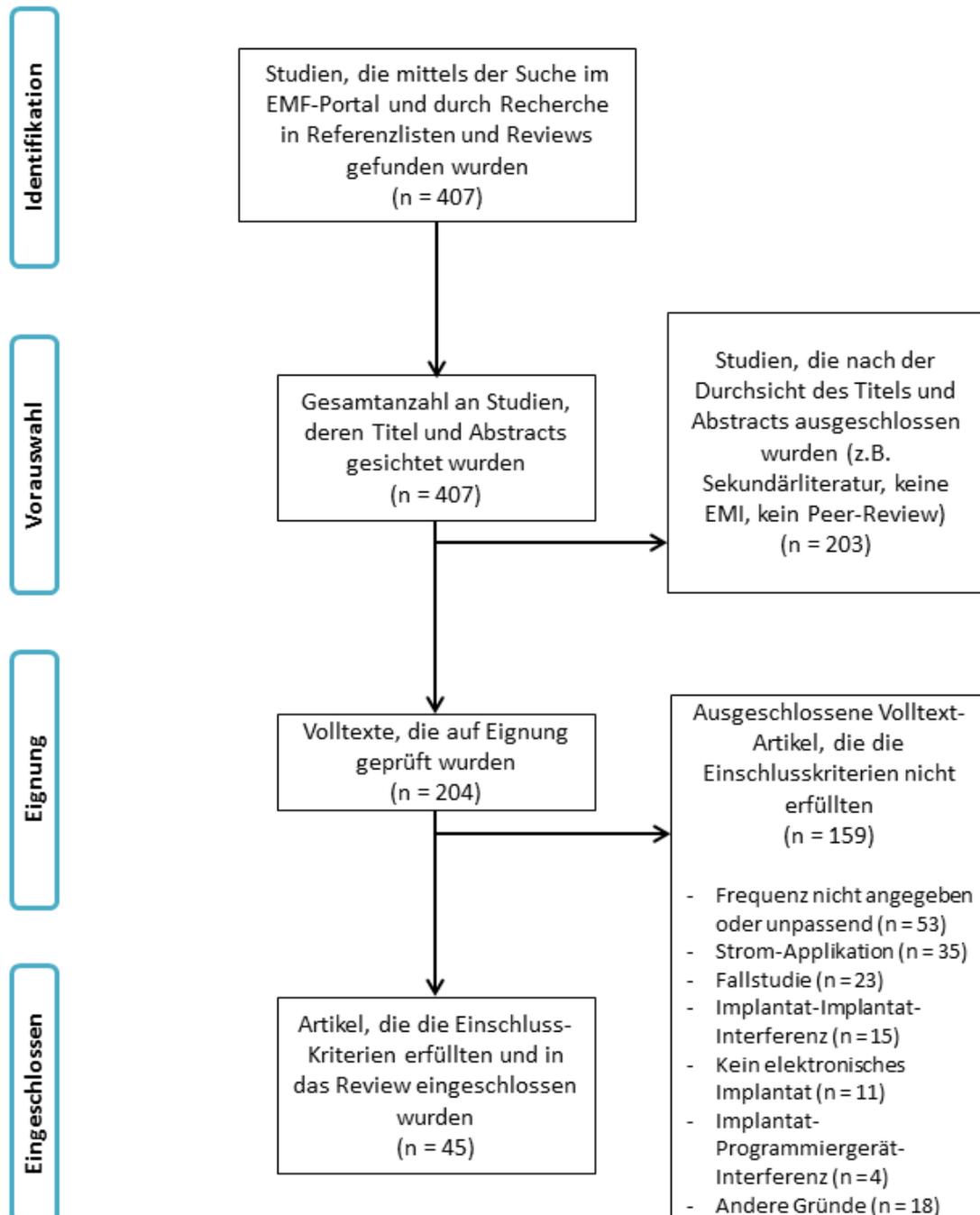
---

<sup>11</sup> Link zur Suche: <https://www.emf-portal.org/de/article/search/results?keywords=%22electromagnetic+interference%22+&logicalOperator=0&authors=&journals=&years=&topics%5B%5D=0&topics%5B%5D=1&topics%5B%5D=2&topics%5B%5D=3&topics%5B%5D=4&topics%5B%5D=5&topics%5B%5D=6&topics%5B%5D=7&topics%5B%5D=8&topics%5B%5D=9&frequencyRanges%5B%5D=0&frequencyRanges%5B%5D=1&frequencyRanges%5B%5D=2&frequencyRanges%5B%5D=3&frequencyRanges%5B%5D=4&timeSpan=0>

## 6.3 Ergebnisse

### 6.3.1 Studienlage

Mit Hilfe der systematischen Literatursuche konnten 407 Publikationen identifiziert werden, die die Suchkriterien erfüllten. Nach dem Screening von Titel und Abstract wurden 203 Artikel aus verschiedenen Gründen ausgeschlossen (z.B. Sekundärliteratur, keine Störbeeinflussung, kein Peer-Review-Verfahren).



**Abbildung 6.1:** Flussdiagramm des Studienauswahlprozesses nach PRISMA-Richtlinien, basierend auf Moher et al. (2009).

Von den verbliebenen 204 Artikeln wurden die Volltexte auf Eignung geprüft. Von diesen wurden 159 aus den folgenden Gründen ausgeschlossen: Frequenzbereich nicht angegeben oder nicht passend (n = 53), Strom-Applikation (n = 35), Fallstudien (n = 23), Implantat-

Implantat-Interferenz (n = 15), kein aktives Implantat (n = 11), Implantat-Programmiergerät-Interferenz (n = 4) oder andere Gründe (n = 18). 45 Artikel erfüllten die Auswahlkriterien und wurden in das Review eingeschlossen (siehe Abbildung 6.1).

17 Studien nutzten verschiedene Untersuchungsansätze (z.B. Phantom-Modell und *in vivo*), um eine Störbeeinflussung zu untersuchen, 15 Studien nutzten ausschließlich Phantom-Modelle, elf Artikel untersuchten die Störbeeinflussung ausschließlich am Patienten (*in vivo*) und eine Studie nutzte ausschließlich *in vitro*-Tests (*in air*). Zusätzlich wurde eine Simulationsstudie gefunden. Detaillierte Auswertungen aller Studien befinden sich, sortiert nach den Feldquellen, die im Rahmen der Störbeeinflussung untersucht wurden, in Tabelle 6.2 – Tabelle 6.5.

Zehn der 45 Studien näherten sich dem Problem einer möglichen Störbeeinflussung aktiver Implantate im Rahmen eines allgemeinen Ansatzes, d.h. ohne Bezug auf eine bestimmte Feldquelle, dafür aber mit Hilfe eines breiteren Frequenzbereiches oder unter Betrachtung verschiedener Signalstärken oder -formen. 19 der 45 Publikationen befassten sich mit der Störbeeinflussung aktiver Implantate durch Sicherungssysteme, wie RFID, elektronische Artikelsicherungssystem (EAS-Systeme) oder Metalldetektoren (Kapitel 6.3.3 und Tabelle 6.3). Sie stellen damit die größte Gruppe zur Untersuchung eines bestimmten Feldquellentyps dar. Fünf Studien befassten sich mit Induktionsherden (Kapitel 6.3.4 und Tabelle 6.4). Tiikkaja et al. (2013) untersuchten sowohl Sicherungssysteme als auch Induktionsherde und wurde in beiden Kategorien separat gezählt. Die restlichen zwölf Publikationen (Kapitel 6.3.5 und Tabelle 6.5) berücksichtigen verschiedene medizinische Geräte (n = 7), Systeme zur kabellosen Energieübertragung (n = 2) sowie eine Magnetschwebbahn, Lawinenschütteten-Suchgeräte und verschiedene iPods (jeweils n = 1).

35 Studien untersuchten ausschließlich aktive kardiale Implantate (HSM (n = 19), ICD (n = 4), implantierbare Ereignisrekorder (n = 1) oder verschiedene (n = 11)). Fünf Studien verwendeten keine aktiven kardialen Implantate, sondern ein modifiziertes Implantat-Gehäuse, um die Störspannung am Implantat-Eingang zu messen. Zusätzlich untersuchten drei Studien ausschließlich Neurostimulatoren (Pantchenko et al., 2011a, 2011b; Seidman et al., 2010b) und zwei Studien umfassten sowohl kardiale Implantate als auch Neurostimulatoren (Buzduga et al., 2007; Guag et al., 2017).

In einigen Studien wurden zusätzlich Frequenzen oder Feldquellen außerhalb des Zwischenfrequenzbereichs untersucht. Diese Daten wurden in dem vorliegenden Review, soweit nicht anders vermerkt, nicht berücksichtigt.

### **6.3.2 Auswertung der Studien ohne Feldquellen-Bezug**

In den zehn Studien, die sich dem Problem der möglichen Störbeeinflussung aktiver Implantate im Rahmen eines allgemeinen Ansatzes, d.h. ohne Bezug auf eine bestimmte Feldquelle genähert haben (Tabelle 6.2), wurden bis auf zwei Studien ausschließlich HSM untersucht. Buzduga et al. (2007) untersuchten neben HSM auch Neurostimulatoren und Tiikkaja et al. (2012b) untersuchten ICD. Insgesamt wurden in den zehn Studien > 45 HSM (keine genau Anzahl in van Wijk van Brievingh et al. (1974)), 17 ICD und 2 Neurostimulatoren untersucht. Ziele der Studien waren die Ermittlung einer Feld-Störschwelle, die Ermittlung der Störspannung an den Implantat-Eingängen bzw. der mV-Störschwelle und/oder die Methoden-Entwicklung bzw. -Evaluierung. Es wurde meist über einen breiteren Frequenzbereich (2 Hz – 250 MHz) untersucht. Häufig zum Einsatz kommende Methoden waren Simulationen, Benchmarktests, Phantom-Studien oder deren Kombinationen. Provokationsstudien wurden nicht durchgeführt.

Das Ziel von Buzduga et al. (2007) war es, ein geeignetes Phantom-Modell zu entwickeln, mit dessen Hilfe Feld-Störschwellen für verschiedene Implantate (HSM und Neurostimulatoren) ermittelt werden können. Auf Basis ihrer Daten nahm die Störbeeinflussung mit steigender Frequenz zu, d.h. mit steigender Frequenz waren geringere magnetische Feldstärken notwendig, um eine Störung zu verursachen und der geringste Wert für eine Störbeeinflussung lag im Bereich von 100 kHz – 1 MHz bei  $< 2$  A/m (d.h.  $2,5 \mu\text{T}$ ) für HSM und bei ca. 8 A/m (d.h.  $10 \mu\text{T}$  bei 1 MHz) für Neurostimulatoren.

Tiikkaja et al. (2012a) und Tiikkaja et al. (2012b) konnten im Rahmen ihrer Studien mit Phantom-Modellen bei den hier relevanten Frequenzen (500 Hz (max.  $66 \mu\text{T}$ ) und 1 kHz (max.  $39 \mu\text{T}$ )) weder für HSM noch für ICD eine Störung feststellen.

Das Ziel von Gustrau et al. (2002) war es nicht, Feld-Störschwellen zu ermitteln, sondern mit Hilfe von Simulationen und Körpermodellen die durch EMF induzierten Spannungen am Implantat-Eingang zu bestimmen, wobei sie Werte von  $0,126$  mV –  $131$  mV für 1 kHz – 1 MHz ermittelten (bei 1 A/m, d.h.  $1,26 \mu\text{T}$ ).

Bei der Autoren-Gruppe Andretzko, Babouri, Hedjiedj sowie bei van Wijk van Brievingh et al. (1974) ging es in fünf Studien um die Entwicklung einer Transferfunktion (Kopplungsmodell, vgl. auch Kapitel 6.1.2), d.h. um die Beziehung zwischen externen Feldern und der dadurch im Körper verursachten Störspannung am Implantat-Eingang. Die in den fünf Studien vorgestellten Transferfunktionen wurden mit Hilfe numerischer Ansätze bestimmt, basierend auf Daten, die in Phantom-Studien oder Benchmarktests bzw. *in vitro*-Tests (*in air*) gewonnen wurden.

Hedjiedj et al. (2002) entwickelten eine Transferfunktion auf Basis eines einfachen Phantom-Modells und fanden mV-Störschwellen ab  $> 55/104$  mV bei 10/25 kHz für eine HSM-Empfindlichkeit von  $0,7$  mV. Im Rahmen ihrer Benchmarktests wurden für 10 kHz bzw. 25 kHz mV-Störschwellen ab  $150$  mV bzw.  $130$  mV bestimmt (Empfindlichkeit von  $1$  mV).

In zwei umfassenden Studien von Andretzko und Ko-Autoren wurde ein numerisches Modell zur Bestimmung einer Transferfunktion zwischen elektrischen Feldern (Andretzko et al., 2007) und magnetischen Feldern (Andretzko et al., 2008) und der Störspannung bestimmt. Die erhaltenen Ergebnisse stimmten gut mit den experimentellen Daten aus Benchmarktests und Phantom-Studien überein. Die mV-Störschwelle nahm mit steigendem HSM-Empfindlichkeitswert zu; zusätzlich hing die Feld-Störschwelle von der Induktionsfläche ab, die vom HSM-Gehäuse und seiner Sonde gebildet wird, d.h. für eine große Fläche ( $300 \text{ cm}^2$ ) lag die Feld-Störschwelle bei  $20 \mu\text{T}$  und für eine Standardfläche ( $225 \text{ cm}^2$ ) bei  $26 \mu\text{T}$  (unipolare Sonde).

In einer weiteren Studie derselben Autoren-Gruppe (Babouri et al., 2009) wurden die niedrigsten realistischen Feld-Störschwellen berechnet und für eine unipolare Sonde ( $200 \text{ cm}^2$ ) mit  $33,36 \mu\text{T}$  (25 kHz) bzw.  $79,18 \mu\text{T}$  (10 kHz) angegeben. Das Kopplungsmodell wurde jedoch nicht validiert und die Ergebnisse aus den Tests *in air* und dem Phantom waren unterschiedlich. Die Ergebnisse aus dieser Studie und den o.a. drei anderen Studien deuten darauf hin, dass die mV-Störschwellen der untersuchten Implantate signifikant oberhalb der Prüfgrenzen lagen, die in Produktnormen (vgl. Kapitel 2, Tabelle 2.2) definiert sind, d.h. die Prüfgrenzen in den Normen wurden eingehalten, obwohl die untersuchten Magnetfelder ( $30 - 85,4 \mu\text{T}$ ) oberhalb der Grenzwerte lagen, die von ICNIRP vorgeschlagen werden (d.h.  $27 \mu\text{T}$ ).

Ob die Transferfunktion der französischen Forschergruppe als solide Basis für die Berechnung von Störspannungen durch externe elektrische, magnetische und elektromagnetische Felder dienen könnte, müsste mit Hilfe von weiteren umfassenden,

realistischen Daten aus Benchmarktests, Phantom-Studien und Provokationsstudien überprüft werden. Zusammenfassend kann festgehalten werden, dass die niedrigsten mV-Störschwellen auf Grundlage der Studien der französischen Forschergruppe bei 55 mV (10 kHz) (Hedjiedj et al., 2002) bzw. bei 95 mV (25 kHz) (Andretzko et al., 2008) lagen. mV-Störschwellen mit einer ähnlichen Größenordnung wurden auch in einer früheren Studie derselben Autorengruppe gefunden, in denen Benchmarktests mit einem Phantom-Modell kombiniert wurden (Babouri et al., 2006).

Auch van Wijk van Brievingh et al. (1974) ermittelten mit Hilfe von Benchmarktests und Phantom-Modellen Feld-Störschwellen, die auf Basis ihres Kopplungsmodells zwischen 0,1 – 100 A/m (d.h. 0,126 – 126  $\mu$ T) für 100 Hz bzw. 250 kHz lagen. Allerdings fehlten Daten zu induzierten Spannungen.

Zusammenfassend kann festgestellt werden, dass nur wenige (n = 10) und sehr unterschiedliche Studien im Frequenzbereich von 300 Hz – 1 MHz die mögliche Störbeeinflussung von aktiven Implantaten durch elektrische, magnetische und elektromagnetische Felder systematisch und unabhängig von einer bestimmten Feldquelle untersucht haben. In sieben von zehn der vorliegenden Studien standen unipolare HSM im Mittelpunkt. In fünf der zehn Studien stand die Bestimmung einer allgemeingültigen Transferfunktion im Vordergrund. Die Ergebnisse dieser fünf Studien deuteten darauf hin, dass die Störschwelle abhängig ist von der Induktionsfläche, der Frequenz des externen Feldes, der Empfindlichkeitseinstellung des Implantats und dem Implantat-Typ selbst (HSM oder ICD, Modell).

**Tabelle 6.2:** Feldquellen-unabhängige Studien zur Untersuchung der Störbeeinflussung aktiver Implantate im Bereich 300 Hz – 1 MHz.

Publikation	Studientyp	Feldquelle	Frequenz	Implantat	Störung
Andretzko et al. (2007)	Simulation (Bestimmung einer Transferfunktion), validiert über Phantom-Studie, Benchmarktest (ohne Herz-Simulation)	Generator (E-Feld)	50 Hz – 500 kHz (Sinus-Signal)	2 HSM (Einkammer, unipolar)	konkrete Ergebnisse, d.h. Störspannungen, nicht angegeben in Simulationen und Phantom-Studie; Transferfunktion sowohl bei Simulationen als auch bei Phantom-Messungen in Größe und Phase ähnlich bei beiden HSM; HSM 1 zeigt Tiefpassverhalten mit Grenzfrequenz bei ca. 10 kHz und HSM 2 zeigt Tiefpassverhalten mit Grenzfrequenz bei ca. 100 kHz (Daten aus Abbildung entnommen); Benchmarktest: mV-Störschwelle: 10 kHz (105 – 230 mV), 25 kHz (2,32 – 5 V) (entnommen aus Tabelle 3 der Publikation)
Andretzko et al. (2008)	Simulation (Bestimmung einer Transferfunktion), validiert durch Phantom-Studie, Benchmarktest (ohne Herz-Simulation), <i>in vitro</i> -Test ( <i>in air</i> )	Spulen (Niederfrequenz-Generator)	10 – 50 kHz (Sinus-Signal), 30 $\mu$ T Effektivwert	1 HSM (unipolar)	mV-Störschwelle zwischen 105 – 135 mV (bei 10 kHz) und 95 – 165 mV (bei 25 kHz) für Empfindlichkeit von 1 mV und 310 – 340 mV (bei 10 kHz) und 385 – 420 mV (bei 25 kHz) für Empfindlichkeit von 2 mV; Feld-Störschwelle von 20 $\mu$ T für 300 cm <sup>2</sup> -Induktionsfläche und bei 26 $\mu$ T für 225 cm <sup>2</sup> bei 25 kHz; vermehrte Störung mit größerer Induktionsfläche; berechnete und gemessene Daten ähnlich
Babouri et al. (2006)	Benchmarktest (ohne Herz-Simulation), Phantom-Studie	Generator (E-Feld)	50 Hz, 60 Hz, 10 kHz, 25 kHz (Sinus-Signal)	5 HSM (Zweikammer, unipolar)	Benchmarktest: Störung ab < 100 mV bei 10/25 kHz (angelegt am Atrium-Kanal) Phantom: Störung ab 110 mV (Spannung des Expositions-geräts) bei 10 kHz) für einen HSM; mV-Störschwellen variierten von wenigen 10 bis wenigen 100 mV, abhängig von der Frequenz des Störsignals, des Implantats und den eingestellten Empfindlichkeiten; keine Daten für externe Feldstärken angegeben; die meisten Daten nur in Abbildungen dargestellt
Babouri et al. (2009)	Simulation, <i>in vitro</i> -Test ( <i>in air</i> ), Phantom-Studie	Helmholtz-Spulen	50 Hz (max. 157,6 $\mu$ T), 60 Hz (max. 153,1 $\mu$ T), 10 kHz (max. 8,5 $\mu$ T), 25 kHz (max. 7,92 $\mu$ T) (Sinus-Signal)	11 HSM (6 Einkammer, 5 Zweikammer); Sonden mit zusätzlicher Schleife als Rechteck mit entweder 30 oder 90 Windungen (künstlicher Testaufbau)	Feld-Störschwelle für 1 Einkammer-HSM (10 kHz) zwischen 1.09 $\mu$ T – 1.51 $\mu$ T ( <i>in air</i> ) und 0.69 – 1.04 $\mu$ T (im Phantom); <b><i>in air</i></b> : niedrigste Feld-Störschwellen von 4 Zweikammer-HSM (25 kHz) lagen bei 0,54 – 4 $\mu$ T und zwischen 1,8 – 3,8 $\mu$ T (10 kHz); niedrigste Feld-Störschwellen von 2 Einkammer-HSM (25 kHz) lagen zwischen 2,98 – 8,89 $\mu$ T und 1,8 – 2,9 $\mu$ T (10 kHz); alle bei den gleichen Empfindlichkeits-einstellungen und Sonde mit 90 Windungen; <b>Phantom</b> : niedrigste Feld-Störschwelle von 1 Zweikammer-HSM mit Sonde mit 30 Windungen lag bei 1,34 $\mu$ T (25 kHz) und 3,18 $\mu$ T (10 kHz) und für 2 Einkammer-HSM mit Sonde mit 90 Windungen bei 0,41 $\mu$ T (25 kHz) und 0,84 $\mu$ T (10 kHz); alle bei den gleichen Empfindlichkeitseinstellungen; realistische niedrigste Feld-Störschwellenwerte wurden

Publikation	Studientyp	Feldquelle	Frequenz	Implantat	Störung
					berechnet: sie lagen bei 33,36 $\mu\text{T}$ (25 kHz) und 79,18 $\mu\text{T}$ (10 kHz) für unipolare Sonden (200 $\text{cm}^2$ ); keine vollständige Darstellung der Ergebnisse; Ergebnisse für verschiedene Test-Bedingungen nur für ein oder zwei HSM dargestellt
Buzduga et al. (2007)	Phantom-Studie (Entwicklung eines Test-Systems)	Spulen	58 kHz und 100 kHz; 1 kHz – 1 MHz (CW)	4 HSM (unipolar), 2 Neurostimulatoren	1 HSM: Feld-Störschwelle zwischen 50 – 120 A/m bei 58 kHz; ein anderer HSM (Atrium-Empfindlichkeit 0,5 mV): Störschwelle zwischen 165 A/m – 3 A/m zwischen 1 kHz bzw. 100 kHz (aus Abbildung abgeschätzt) und unter 2 A/m zwischen 100 kHz und 1 MHz (laut Text); Neurostimulator: Störschwellen von ca. 120 – 8 A/m (1 kHz – 1 MHz; aus Abb. abgeschätzt); Daten nur als Beispiele, nicht im Detail präsentiert
Gustrau et al. (2002)	Simulation, Validierung über Phantom (Ziel der Studie war Validierung des numerischen Ansatzes)	Simulation: Empire-Software (elektrische und magnetische Felder); Phantom: Helmholtz-Spulen	50 Hz – 1 MHz (Sinus-Signal)	1 HSM und Sonde (unipolar); es wurden verschiedene Implantationslagen berücksichtigt	induzierte Spannung für ein frontales Magnetfeld 1 A/m bei 50 Hz (0,00637 mV), 1 kHz (0,126 mV), 10 kHz (1,29 mV), 100 kHz (12,9 mV), 1 MHz (131 mV), Störspannung für vertikales elektrisches Feld 1 V/m bei 50 Hz (0,0311 $\mu\text{V}$ ), 1 kHz (0,529 $\mu\text{V}$ ), 10 kHz (4,79 $\mu\text{V}$ ), 100 kHz (44,5 $\mu\text{V}$ ), 1 MHz (310 $\mu\text{V}$ ); höchste Spannung für abdominale Implantation für vertikales elektrisches Feld
Hedjiedj et al. (2002)	Benchmarktest (ohne Herz-Simulation), Phantom-Studie (um Transferfunktion abzuleiten und um die Daten aus dem Benchmarktest zu validieren)	Generator (E-Feld)	50 Hz, 60 Hz, 10 kHz, 25 kHz (Sinus-Signal)	5 HSM (unipolar)	direkte Applikation des Störsignals durch galvanische Einkopplung (Benchmarktest: Störung bei 2 von 5 HSM (ab > 150/130 mV bei 10/25 kHz je nach eingestellter Empfindlichkeit (1 mV)); Phantom: ab > 55 mV (10 kHz) und ab > 104 mV (25 kHz) (berechnet mit Angaben aus der Veröffentlichung) bei Empfindlichkeit von 0,7 mV)
Tiikkaja et al. (2012a)	Phantom-Studie	Helmholtz-Spulen	2 Hz – 1 kHz (sinusförmig, Rampe, gepulst, Rechteck), bis 580 $\mu\text{T}$ , bei 500 Hz: max. 58 $\mu\text{T}$ für sinusförmiges	16 HSM (unipolar und bipolar); HSM und Sondenlage unter Worst-Case-Bedingung, maximale Empfindlichkeit	keine Störung bei 500 Hz und 1 kHz; Störung bei 6 von 16 HSM bei 2 – 100 Hz

Publikation	Studientyp	Feldquelle	Frequenz	Implantat	Störung
			und 66 $\mu\text{T}$ für rechteckiges Signal; bei 1 kHz: max. 39 $\mu\text{T}$ für sinusförmiges und rechteckiges Signal		
Tiikkaja et al. (2012b)	Phantom-Studie	Helmholtz-Spulen	2 Hz – 1 kHz (sinusförmig, Rampe, gepulst, Rechteck), bis 580 $\mu\text{T}$ , bei 1 kHz: max. 39 $\mu\text{T}$ für sinusförmiges und rechteckiges Signal	17 ICD (ICD und Sondenlage unter Worst-Case-Bedingung, maximale Empfindlichkeit)	keine Störung bei 500 Hz und 1 kHz; Störung bei 11 von 17 HSM bei 2 – 100 Hz
van Wijk van Brievingh et al. (1974)	Benchmarktest (mit und ohne Herz-Simulation), Phantom-Studie (Plastik-Thorax-Skelett, bedeckt mit Plastik-Haut und gefüllt mit Salz-Lösung; nur Sonden; Bestimmung einer Transferfunktion)	<b>Benchmarktest:</b> Spannungsgenerator (Sinus-Signal); <b>Phantom:</b> Helmholtz-Spulen und Stabantenne	<b>Benchmarktest:</b> 50 Hz – 250 MHz; <b>Phantom:</b> 50 Hz – 250 kHz und 1 MHz – 250 MHz (Sinus-Signal)	<b>Benchmarktest:</b> verschiedene HSM; <b>Phantom:</b> eine unipolare Sonde; Messung der Störspannung	<b>Benchmarktest:</b> mV-Störschwelle von 1 – 4 V zwischen 100 Hz – 100 kHz (gemäß Abb. der Publikation) <b>Kombination aus Benchmarktest und Phantom</b> ergab verschiedene Feld-Störschwellen-Werte; die Schwellenwerte werden für 1 HSM gezeigt und berechnet mit 0,1 – 100 A/m zwischen 100 Hz – 250 kHz

### 6.3.3 Warensicherungssysteme, RFID und Metalldetektoren

RFID (Radio Frequenz Identifikation)-Systeme dienen der berührungslosen Identifikation und Lokalisation von Objekten mit Hilfe von elektromagnetischen Feldern. Sie bestehen im Wesentlichen aus einem Transponder (Tag), der sich am Objekt befindet, und einem Lesegerät zum Lesen und Schreiben von Daten auf den Transponder. Es gibt viele Einsatzmöglichkeiten für RFID-Systeme, dazu zählen z.B. Personalausweise, elektrische Schlösser, Skipässe, Mautsysteme oder Systeme zur Tierkennzeichnung. Abhängig von der Anwendung, der Herstellerfirma und der Technologie werden verschiedene Frequenzen genutzt. Auch die Systeme zur elektronischen Artikelsicherung (EAS) sind RFID-Systeme. Das Grundprinzip einer EAS besteht ebenfalls darin, dass auf der gegen Diebstahl zu sichernden Ware ein aktivierter Transponder angebracht ist. Bei Bezahlung der Ware wird dieser Transponder an der Kasse deaktiviert oder abgenommen. Im Ausgangsbereich (nach den Kassen) sind Sende-/Empfangsantennen montiert (Detektoren), deren Feldbereich vom Kunden beim Verlassen des Kaufhauses durchschritten werden muss. Wird ein aktivierter Transponder (z.B. auf nicht bezahlter Ware) in diesen Feldbereich gebracht, so tritt er in Wechselwirkung mit dem Feld, was vom Empfänger des Systems detektiert werden kann und im Allgemeinen mit einer Alarmauslösung gekoppelt ist. Die genutzten Frequenzbereiche der EAS-Systeme sind technologieabhängig. Es gibt folgende Technologien von EAS-Systemen: Radiofrequenz-Systeme mit Frequenzen zwischen 1,8 und 8,7 MHz, Mikrowellen-Systeme im ISM-Frequenzband bei 2,45 GHz oder 5,8 GHz, elektromagnetische Systeme zwischen 10 Hz und 20 kHz sowie akustomagnetische Systeme bei typischerweise 58 kHz.

Metalldetektoren dienen dem Aufspüren von verborgenem Metall und werden z.B. an Flughäfen und in öffentlichen Gebäuden eingesetzt. Die Detektion kann mittels modulierter oder nicht-modulierter Felder erfolgen. Bei der modulierten Messung gehen von der Sendespule periodische magnetische Feld-Pulse aus, die im Metall Wirbelströme erzeugen, wodurch an der Empfangsspule gedämpfte Feld-Pulse registriert werden. Bei der nicht-modulierten Messung (kontinuierliche Welle) wird durch die Sendespule ein dauerhaftes niederfrequentes Feld (einige 10 kHz) erzeugt und von der Empfangsspule Amplitude und Phasenlage des Signals ausgewertet. Stößt das System auf Metall, ändern sich Amplitude oder Phasenlage des Empfangssignals.

Zur Störbeeinflussung aktiver Implantate durch Sicherungssysteme, wie RFID, EAS-Systeme oder Metalldetektoren, liegen insgesamt 19 Publikationen vor (Tabelle 6.3). Diese Feldquellen-Gruppe umfasst damit die meisten der 45 identifizierten Studien zur Störbeeinflussung aktiver Implantate im Zwischenfrequenzbereich.

13 Studien haben das Auftreten einer möglichen Störbeeinflussung durch EAS- bzw. RFID-Systeme untersucht, vier Studien durch Metalldetektoren und zwei Studien haben sowohl die mögliche Störbeeinflussung durch RFID/EAS-Systeme als auch durch Metalldetektoren (De Cock et al., 2000; Kainz et al., 2005) untersucht. Fünf Studien berücksichtigten ausschließlich Patienten, d.h. es handelte sich um reine Provokationsstudien, sechs Studien nutzten ausschließlich Phantom-Studien, um eine mögliche Störbeeinflussung zu untersuchen, und weitere sechs Studien umfassten verschiedene Untersuchungsansätze. Darüber hinaus wurde eine *in vitro*-Studie (*in air*) (Lucas et al., 1994) und eine Simulationsstudie (Leitgeb et al., 2013) identifiziert. 15 der 19 Studien zu Sicherungssystemen haben ausschließlich kardiale Implantate untersucht, drei Studien ausschließlich Neurostimulatoren (Pantchenko et al., 2011a, 2011b; Seidman et al., 2010b) und eine Studie hat sowohl kardiale Implantate als auch Neurostimulatoren (Guag et al., 2017) untersucht.

**Tabelle 6.3:** Studien zur Störbeeinflussung aktiver Implantate durch Sicherungssysteme (z.B. EAS, RFID).

Publikation	Studientyp	Feldquelle	Frequenz	Implantat	Störung?
De Cock et al. (2000)	Provokationsstudie und <i>in vitro</i> -Test ( <i>in air</i> ) in der Mitte der Schleuse	5 EAS-Systeme, Flughafen-Metalldetektor-Schleuse (außerdem noch MRT und GSM-Handy)	EAS (a) 5 und 7,5 kHz; b) 60 kHz (gepulst bei 50 – 90 Hz); c) 1,95 und 8,2 MHz; d) 8,2 MHz; e) 8 MHz; Metalldetektor-Schleuse: Pulse bei 45 – 65 Hz; keine Feldstärken angegeben	2 Patienten mit implantierbarem Ereignis-Rekorder (d.h. Langzeit-EKG-Rekorder) und 3 nicht-implantierbare Ereignisrekorder; Details zu Hersteller und Modell angegeben	keine Störung im Zwischenfrequenzbereich, aber bei HF-EAS-Systemen (d.h. 1,95/8,2 MHz) und MRT
Dodinet et al. (1993)	<i>in vitro</i> -Test ( <i>in air</i> ) und Provokationsstudie	3 EAS-Systeme, magnetisches EAS, gepulstes EAS, hochfrequentes (HF) EAS	300 Hz (rms 0,14 mT) und 10 kHz (rms 1,13 mT) (magnetisches EAS AM 1 – 2 Hz), 132 kHz (gepulstes EAS, 1,4 – 7 $\mu$ T Spitze, AM 15 Hz), 7,4 – 9 MHz (HF EAS)	28 HSM ( <i>in vitro</i> ; unipolare Sonde, außer 4 bipolare); 32 Patienten (HSM, 22 Einkammer, 10 Zweikammer; unipolar, außer 2 bipolare); verschiedene Empfindlichkeiten getestet inkl. maximale Empfindlichkeit; Details zu Herstellern/Modellen vorhanden	<b>magnetisches EAS:</b> <i>in vitro</i> -Tests, ca. die Hälfte der HSM gestört (beide Frequenzen); <i>in vivo</i> : 7 wurden inhibiert bei 10 kHz <b>gepulstes EAS:</b> weder Störung in <i>in vitro</i> -Tests noch bei Patienten
Guag et al. (2017)	Phantom-Studie	Sicherheitssystem-Simulator von 3 verschiedenen begehbaren Metalldetektoren	3 – 14 kHz (CW), 200 – 250 Hz (gepulst), 7 verschiedene Signalformen (22,9 – 80 A/m rms; (realistische Feldstärken der Metalldetektoren: 21,1 – 27,9 A/m RMS))	6 HSM, 6 ICD, 5 Neurostimulatoren, 3 Insulinpumpen; keine Angaben zu Herstellern/Modellen; maximale und nominelle Empfindlichkeit; unipolar und bipolar	Störungen bei 2 HSM (nur unipolar) und bei 1 Neurostimulator (nur bei 200 – 250 Hz) bei realistischen Feldstärken (5 HSM und 1 Neurostimulator bei stärkeren Feldern > 27,9 A/m); keine Störung bei ICD und Insulinpumpen
Kainz et al. (2005)	Phantom-Studie und <i>in vitro</i> -Test ( <i>in air</i> ); Ziel der Studie war die Entwicklung eines EAS-Simulator-Systems zur Untersuchung der elektro-magnetischen Verträglichkeit von aktiven Implantaten	Sicherheitssystem-Simulator, der ein gleichförmiges Magnetfeld generiert und 12 verschiedene Metalldetektoren bzw. begehbare EAS-Systeme reproduziert; zusätzlich 2 begehbare Metalldetektor-Schleusen zur Verifikation	100 Hz – 8 kHz (sinusförmig (CW); gepulst/komplex); 15 verschiedene Testsignale	4 HSM (Sonden-Typ nicht näher spezifiziert)	Daten sind nur in Grafiken und nicht im Detail dargestellt; Störung bei 3 von 4 HSM (Phantom und <i>in air</i> ); Störung bei ca. 15 A/m Spitze-Spitze-Wert (nach Grafik); Grad der Störung der komplexen Felder niedriger als der der einfachen Signale; Grad der Störung <i>in air</i> niedriger als in der Phantom-Studie; Grad der Störung bei gepulsten Wellen (PW) niedriger als bei kontinuierlichen Wellen (CW); HSM-Verhalten im Phantom und <i>in air</i> ähnlich

Publikation	Studientyp	Feldquelle	Frequenz	Implantat	Störung?
Keshishian et al. (1972)	Provokationsstudie	3 Metalldetektoren (2 Handgeräte und 1 Schleuse)	100 Hz und 1 kHz (Schleuse; 135 $\mu$ T (100 Hz) in der Nähe des Implantats), 10 kHz und 450 kHz (Handgeräte; 50 $\mu$ T in der Nähe der Geräte)	48 Patienten (HSM, 17 VVI, 17 VVT, 8 AAT, 3 VAT, 3 DDT, nur unipolar, verschiedene Empfindlichkeiten, Details für Hersteller/Modell vorhanden); Tests im Stimulationsbetrieb durchgeführt	ja (6 Patienten in der Schleuse beeinflusst; unklar, ob Störung bei 100 Hz oder 1 kHz auftrat)
Kolb et al. (2003)	Provokationsstudie	Flughafen-Metalldetektor	3 Spitzen-Werte mit Pulsraten von 3,73 kHz, 4,98 kHz, 5,98 kHz (max. 42 $\mu$ T (nicht klar, wo gemessen))	348 Patienten (200 HSM (53 Einkammer, 140 Zweikammer, 9 VDD mit einer Elektrode, 1 kardiales Resynchronisations-Therapie-Gerät); Empfindlichkeit blieb unverändert) und 148 ICD (101 Einkammer, 46 Zweikammer, 4 kardiale Resynchronisations-Therapie-Geräte; maximale Empfindlichkeit); unipolar und bipolar; Details zu Herstellern/Modellen angegeben)	keine Störung
Leitgeb et al. (2013)	Simulationsstudie	EAS-System	10 Hz – 100 MHz (1 mT)	1 HSM, 1 ICD (mit unipolarer Sonde); HSM und ICD simulativ identisch und Simulation nur für 1 HSM durchgeführt; verschiedene Implantationslagen und Körpermodelle	induzierte Spannung überschreitet die Prüfgrenze unter Worst-Case-Bedingungen um das 28,2-fache im NF-Bereich (ca. 77 Hz, abgelesen aus Abb.) und um das 3,2-fache bis 13,5-fache im Zwischenfrequenzbereich (jeweils bei 60 kHz bzw. 5 kHz; abgelesen aus Abb.); induzierte Spannung hängt von der Implantationslage und dem Körpermodell ab (leptosom vs. adipös); keine Angaben zur induzierten Spannung
Lucas et al. (1994)	<i>in vitro</i> -Test ( <i>in air</i> )	6 EAS-Systeme: magnetisches (218 Hz – 9 kHz), akustomagnetisches (60 kHz), HF (3,25 MHz) und UHF (915 MHz)	218 Hz, 875 Hz, 7 kHz/9 kHz, 60 kHz, 3,25 MHz, 915 MHz; Feldstärken nicht angegeben	5 HSM (unipolar und bipolar)	Störung mit allen EAS-Systemen, außer UHF; keine detaillierten Daten angegeben; unipolare HSM häufiger beeinflusst als bipolare
Mattei et al. (2013)	Phantom-Studie (Entwicklung eines	2 Antennen mit Mehrfach-Windungen, die RFID-	125 kHz und 13,56 MHz (Sinus-Signal); 10 cm Antenne: 125 kHz	1 modifizierter HSM, verbunden mit unipolarer/bipolarer Sonde zur Messung	max. Störspannung, unipolar: 62,2 mV (125 kHz, 30 cm Antenne) und 102 mV

Publikation	Studientyp	Feldquelle	Frequenz	Implantat	Störung?
	Testsystems; Messung der Störspannung und Bestimmung von Worst-Case-Szenarien; Einfluss der Sonden-Lage)	Antennen simulieren (Durchmesser 10 und 30 cm)	(27,9 A/m) und 13,56 MHz (8,2 A/m); 30 cm Antenne: 125 kHz (5,9 A/m) und 13,56 MHz (1,3 A/m); Abstand zum HSM 2,5 cm; nicht klar, bei welchem Abstand die Feldstärken gemessen wurden	der Störspannung am HSM-Eingang und der Sonde; verschiedene Sonden-Positionen getestet	(13,56 MHz); bipolar: 19,8 mV (125 kHz, 30 cm Antenne) und 38,5 mV (13,56 MHz); Worst-Case abhängig von Frequenz und Sonden-Konfiguration; höhere Spannungen bei unipolaren als bei bipolaren Bedingungen
Mattei et al. (2016)	Phantom-Studie	RFID und Nahfeld-Kommunikations-Lesegerät (HF-Empfänger)	125 kHz, 13,56 MHz, 900 MHz (gepulstes und kontinuierliches Wellen-Signal)	10 HSM (unipolar), maximale Empfindlichkeit; verschiedene Sonden-Positionen untersucht	Stimulationsbetrieb: Störung in allen Frequenz-Bereichen: gepulstes Signal (125 kHz): 1 HSM bei 40 A/m (Schleusen-Antenne), 2 HSM gestört bei 100 A/m und 9 HSM bei 500 A/m (handgehaltene Antenne); 9 HSM bei 210 A/m (Schleusen-Antenne); CW-Signal (125 kHz): 2 HSM bei 200 A/m und 5 HSM bei 500 A/m (handgehaltene Antenne); 3 HSM bei 60 A/m und 6 HSM bei 210 A/m (Schleusen-Antenne)
Mcivor et al. (1998)	Provokationsstudie	6 EAS-Systeme: 1 akustomagnetisches, 2 elektromagnetische EAS-Systeme, 3 Radiofrequenz-Systeme	218 Hz – 8,2 MHz; akustomagnetisches System (58 kHz, 14 – 310 A/m, gepulst), elektromagnetisches EAS-System (218 und 532 Hz, 18 – 503 A/m), Radiofrequenz-Systeme (2 – 8,2 MHz, 0,01 – 9,98 A/m); Feldstärken abhängig vom Abstand	75 Patienten (50 HSM (unipolar und bipolar (keine genaue Anzahl angegeben); maximale/teilweise nominelle Empfindlichkeit) und 25 ICD (25 bipolare (2 epikardiale, 23 transvenöse))	keine Störung bei ICD; akustomagnetisches System störte 48 von 50 HSM; 1 elektromagnetisches EAS-System störte 2 von 50 HSM; Radiofrequenz-System: keine Störung
Mugica et al. (2000)	Provokationsstudie	EAS-Systeme (1 akustomagnetisches und 1 elektromagnetisches EAS-System)	akustomagnetisches System: 58 kHz (7,3 µT; 5,8 A/m; gepulst; Exposition in stehender Position); elektromagnetisches EAS-System: 73 Hz (670 µT, 530 A/m; Exposition auf dem Rücken liegend); nicht klar bei welchen	204 Patienten (HSM), unipolar und bipolar (129 DDD, 71 VVI, 4 VDD); Details zu Herstellern/Modellen nur für gestörte Implantate angegeben	Störung mit beiden Systemen, 17 % (35) der Patienten (doppelt so viele (23 vs. 10) bei 58 kHz im Vergleich zu 73 Hz), 23 Patienten mit akustomagnetischem System in einem Abstand von 30 – 50 cm

Publikation	Studientyp	Feldquelle	Frequenz	Implantat	Störung?
			Abständen die Feldstärken auftraten		
Pantchenko et al. (2011a)	Entwicklung eines Phantom-Modells; Simulation	RFID-Antenne	134,2 kHz (Puls-Wiederholungsrate 10,7 Hz; 269 A/m im Abstand von 2,5 cm von Antenne)	1 implantierbarer Neurostimulator mit 2 Sonden (75 cm); Worst-Case-Test-Bedingung	keine Störung
Pantchenko et al. (2011b)	Phantom-Studie	22 verschiedene RFID-Systeme (21 Lesegeräte und 1 aktives Tag)	125 kHz, 134 kHz, 13,56 MHz (1,2 – 269 A/m (2,5 cm Abstand), 433 MHz, 915 MHz, 2,45 GHz (0,02 – 97,3 V/m (10 cm Abstand))	6 implantierbare Neurostimulatoren mit Sonden (41 – 135 cm); bipolar; Hersteller/Modell nicht angegeben	Störung von 1 Neurostimulator bei 134 kHz (bis 15 cm Abstand; ca. 60 A/m in einem Abstand von 10 cm; abgeschätzt aus Abbildung); Störung abhängig von Sonden-Länge
Seidman et al. (2007)	Phantom-Studie	7 verschiedene RFID-Lesegeräte	134 kHz (n = 2, 60 – 65 A/m), 13,56 MHz (n = 4, 2 – 7 A/m), 915 MHz (n = 1,3 A/m); im Abstand von 2,3 cm, gepulstes Signal	18 HSM und 19 ICD (unipolare und bipolare Sonde; maximale und nominelle Empfindlichkeit)	83 % HSM und 71 % ICD wurden gestört bei 134 kHz, 18 % bzw. 11 % bei 13,56 MHz und 6 % bzw. 0 % bei 915 MHz; HSM-Reaktion ab < 51,3 cm, ICD < 61,3 cm; keine klare Korrelation mit Sonden-Konfiguration, kein Unterschied zwischen maximaler und nomineller Empfindlichkeit
Seidman et al. (2010b)	<i>in vitro</i> -Test ( <i>in air</i> ), Phantom-Studie	Metalldetektor-Schleusen (Simulations-system, n = 12) und Handgeräte (n = 32)	Schleusen: 210 Hz – 7,4 kHz (gepulst und CW; 18,8 – 473,6 A/m) Handgeräte: 10 – 1856 kHz (gepulst und CW; 2,1 – 67,3 A/m, ein Gerät > 600 A/m)	3 implantierbare Neurostimulatoren; unipolar und bipolar; Hersteller/Modell angegeben	Störung bei einem Implantat mit einer Schleuse (240 Hz, 219,9 A/m, gepulstes Signal); keine Störung mit Handgeräten
Seidman et al. (2010a)	Phantom-Studie	13 verschiedene RFID-Lesegeräte	a) 134 kHz (n = 5, 68 – 269 A/m, Spitzenwert, CW und gepulst), b) 13,56 MHz (n = 6; 4,6 – 8,8 A/m, Spitze, CW und gepulst), 915 MHz (n = 2, gepulst); gemessen im Abstand von 2,5 cm	15 HSM und 15 ICD; bipolare Sonde	67 % HSM und 47 % ICD gestört bei 134 kHz; nur gepulstes Signal verursachte EMI bei 174 von 204 HSM-Tests (85 %) und 69 von 116 ICD-Tests (60 %), HSM-Reaktion ab < 60 cm und ICD < 40 cm; 6 % bzw. 1 % bei 13,56 MHz und je 0 % bei 915 MHz

Publikation	Studientyp	Feldquelle	Frequenz	Implantat	Störung?
Tiikkaja et al. (2013)	Provokationsstudie	EAS-System	58 kHz +/-200 Hz, max. 210 $\mu$ T	24 Patienten: 11 HSM (bipolar, 3 ebenso mit unipolarer Einstellung (3 DDD, 4 DDIR, 1 DDDR, 1 DDI, 1 AAR, 1 VVIR)), 13 ICD (9 VVI, 2 DDD, 2 DDI); Details für Hersteller/Modell vorhanden; HSM wurden mit maximaler Empfindlichkeit eingestellt	ja, Störung von 1 HSM mit unipolarer Einstellung
Wilke et al. (1998)	Provokationsstudie und Phantom-Studie	2 installierte Sicherheitssysteme, 1 Diebstahlsicherung und 1 elektromagnetisches Zugangsgesetz	120 kHz (gepulst); Sicherheitssysteme (1600 und 2700 mA/m in einem Abstand von 50 cm); Diebstahlsicherung (50 mA/m in einem Abstand von 50 cm); elektromagnetisches Zugangsgesetz (300 mA/m in einem Abstand von 50 cm)	53 Patienten (HSM; VVI, DDD, VDD (exakte Anzahl nicht angegeben); 38 unipolare, 15 bipolare; Details zu Herstellern angegeben; Test durchgeführt mit nomineller/maximaler Empfindlichkeit und im Stimulationsbetrieb); 9 HSM ( <i>in vitro</i> , unipolar, nur Diebstahlsicherung), verschiedene Empfindlichkeiten	<i>In vivo</i> : EMI bei 7 von 53 Patienten innerhalb der Sicherheitssysteme ab 2700 mA/m und bei 2 Patienten ab 1600 mA/m; <i>in vitro</i> : EMI bei allen HSM < 10 cm (213 mA/m im Abstand von 20 cm)

## Kardiale Implantate

In den Provokationsstudien wurden insgesamt 756 Patienten untersucht, 570 mit einem HSM und 186 mit einem ICD. In den Phantom-Studien wurden zudem 121 HSM und 25 ICD untersucht und in den *in vitro*-Tests (*in air*) 37 HSM. Zwei Studien nutzten außerdem einen modifizierten HSM, um die Störspannung am Eingang des HSM zu untersuchen (Leitgeb et al., 2013; Mattei et al., 2013) und eine Studie untersuchte implantierbare Ereignisrekorder (De Cock et al., 2000).

Die Ergebnisse von drei Studien zeigten, dass akustomagnetische EAS-Systeme (58 kHz) Störungen bei HSM-Patienten hervorrufen können (Mcivor et al., 1998; Mugica et al., 2000; Tiikkaja et al., 2013). Es gab keinen Hinweis, dass auch ICD gestört werden konnten. Allerdings wurden in den drei Studien auch nur 38 ICD-Patienten untersucht, im Vergleich zu 265 HSM-Patienten. Eine mögliche Störbeeinflussung wurde auch mit anderen Sicherungssystemen gefunden, die bei höheren (120 kHz) (Wilke et al., 1998) oder niedrigeren (300 Hz und 10 kHz) (Dodinot et al., 1993) Frequenzen arbeiteten. Dabei deuteten die Daten von Wilke et al. (1998) darauf hin, dass die HSM von Patienten bei magnetischen Feldstärken unterhalb der ICNIRP-Grenzwerte (d.h. 21 A/m, vgl. Kapitel 2, Tabelle 2.1) negativ beeinflusst werden konnten.

Zwei weitere Studien konnten keine Störbeeinflussung während der Exposition bei Metalldetektoren (Kolb et al., 2003) oder EAS-Systemen (De Cock et al., 2000) finden, wobei die letztgenannte eine der Studien war, die implantierbare Ereignisrekorder untersucht hatte. In einer weiteren Studie blieb unklar, ob die Störung durch einen 100 Hz- oder 1 kHz-Metalldetektor hervorgerufen wurde (Keshishian et al., 1972); diese Studie wurde jedoch 1972 publiziert und die Relevanz der Daten ist somit fraglich.

Die Ergebnisse von zwei Studien von Seidman et al. (2010a, 2007) zeigten, dass der Großteil der untersuchten HSM (67 – 83 %) und ICD (47 – 71 %) durch 134 kHz-RFID-Systeme bis zu einem Abstand von 61,3 cm gestört werden konnte. Es gab keine klare Korrelation zwischen maximaler und nomineller Empfindlichkeit, wahrscheinlich aufgrund der hohen applizierten Feldstärken. Mattei et al. (2016) untersuchte typische Expositionsmuster von RFID-Systemen und identifizierte Störungen ab 40 A/m bei 125 kHz für ein gepulstes Signal und ab 60 A/m für ein kontinuierliches Signal.

In einer früheren Studie von Mattei et al. (2013) stand die Entwicklung eines Testsystems (Phantom-Modell) im Vordergrund, um unter verschiedenen Worst-Case-Szenarien die maximale Störspannung am Eingang eines HSM mit uni- oder bipolarer Sonde zu ermitteln, die durch zwei verschiedene RFID-Antennen induziert wurde. Für die 125 kHz-Antenne konnten die Autoren eine maximale Spannung von 62,2 mV (unipolare Sonde) und 19,8 mV (bipolare Sonde) bei einer magnetischen Feldstärke von 5,9 A/m (7,4  $\mu$ T) feststellen. Dies deutet darauf hin, dass die Prüfgrenzen (d.h. 375 mV für unipolare und 37,5 mV für bipolare Sonden) unter den hier vorliegenden Bedingungen nicht überschritten wurden. Spannungen, die unter unipolaren Bedingungen induziert wurden, waren generell höher als unter bipolaren Bedingungen. In der späteren Studie der Autoren (Mattei et al., 2016) (s.o.) wurden jedoch Störbeeinflussungen gefunden und somit stellt sich die Frage, ob die Prüfgrenzen doch überschritten wurden.

Die Überschreitung der Prüfgrenzen wurde ebenfalls mit Hilfe numerischer Simulationen von Leitgeb et al. (2013) gezeigt, der bei Exposition mit einer magnetischen Flussdichte von 1000  $\mu$ T unter Worst-Case-Bedingungen (z.B. linksseitige Implantation, frontale Orientierung zum Magnetfeld) eine Überschreitung der Prüfgrenze um das 2-fache bis 13,5-fache im

Zwischenfrequenzbereich (jeweils bei 60 kHz bzw. 5 kHz) und um das 28,2-fache im NF-Bereich (77 Hz) berechnete.

Bei Kainz et al. (2005) stand die Entwicklung eines Testsystems (EAS-Simulator) im Vordergrund. Sie untersuchten Magnetfelder von EAS-Systemen und Metalldetektoren (100 Hz – 8 kHz) und fanden sowohl in ihrer *in vitro*-Untersuchung (*in air*) als auch in ihrem Phantom eine Störbeeinflussung bei drei der vier untersuchten HSM. Lucas et al. (1994) führten ebenfalls *in vitro*-Tests (*in air*) mit HSM durch und fanden eine Störung durch Geräte im kHz-Bereich (875 Hz – 60 kHz). Dabei deuteten die Daten darauf hin, dass unipolare HSM öfter betroffen waren als bipolare.

Guag et al. (2017) bestätigte diese Ergebnisse. Sie fanden im Rahmen ihrer Phantom-Studie, dass unipolare HSM durch einen Metalldetektor (3 – 14 kHz) bei für Metalldetektoren realistischen Feldstärken (21,1 – 27,9 A/m, d.h. 26,5 – 35,1  $\mu$ T) gestört werden konnten. ICD, die nur mit bipolaren Sonden betrieben werden können, wurden dagegen nicht gestört.

In einer Studie von Mattei et al. (2013) wurde ein Kopplungsmodell aufgestellt für den Zusammenhang zwischen der induzierten Spannung am Implantat-Eingang und der magnetischen Feldstärke der Exposition. Auf Basis dieses Kopplungsmodells (induzierte Spannung von 62,2 mV für unipolare Sonden und 19,8 mV für bipolare Sonden bei 125 kHz und 5,9 A/m) würde es ab einer magnetischen Feldstärke/Flussdichte von 71,1 A/m/89,3  $\mu$ T (unipolare Sonde) bzw. 22,3 A/m/28  $\mu$ T (bipolare Sonde) zu einer Störung kommen, wenn die Prüfgrenzen aus der Produktnorm zugrunde gelegt werden (unipolar: 750 mV, bipolar: 75 mV für  $f = 125$  kHz, vgl. Kapitel 2, Tabelle 2.2). Allerdings war nicht klar, bei welchem Abstand die Feldstärken gemessen wurden. Vergleicht man diese theoretischen Feld-Störschwellen (22,3 A/m und 71,1 A/m) mit Untersuchungen von Seidman et al. (2010a, 2007), zeigt sich eine deutlich niedrigere tatsächliche Feld-Störschwelle. Bei Seidman et al. (2010a, 2007) traten bereits Störbeeinflussungen in einem Abstand von 60 cm zum RFID-System auf, was einer magnetischen Feldstärke von maximal 11,2 A/m entspricht (berechnet mittels Abstandsgesetz  $1/r$  aus der max. gemessenen Feldstärke von 269 A/m bei 2,5 cm). Es lässt sich somit vermuten, dass die Produktnormen für RFID-Signale nicht eingehalten werden. Dies könnte mit der unterschiedlichen Modulation des Prüfsignals der Produktnorm und der RFID-Signale zusammenhängen. Zukünftige Forschung sollte an diesem Punkt ansetzen und überprüfen, für welche Prüfsignalformen die Produktnormen eingehalten werden bzw. ab welcher Amplitude eine Störung bei verschiedenen Prüfsignalen auftritt.

Der Großteil der vorliegenden Phantom- und Provokationsstudien zur möglichen Störbeeinflussung von HSM und ICD durch RFID- und EAS-Systeme fand Belege für Störungen. Es gab eine leichte Tendenz dahingehend, dass Störungen seltener bei bipolaren HSM und ICD auftraten als bei unipolaren HSM. Systematische Untersuchungen für die verschiedenen EAS-Systeme, ab welcher magnetischen Flussdichte oder ab welchem Abstand keine Störung mehr auftritt, fehlen. Dies sollte im Fokus zukünftiger Forschung stehen. Die vorliegende Provokationsstudie zu einem Flughafen-Metalldetektor zeigte für eine große Anzahl an Patienten ( $n = 348$ ) mit kardialem Implantat keine Störung (Kolb et al., 2003), aber aufgrund der unzureichenden Expositionserfassung lässt sich dieses Ergebnis nur schlecht auf andere als den verwendeten Metalldetektor übertragen. Guag et al. (2017) fanden in ihrer Phantom-Studie dagegen Hinweise, dass Metalldetektoren HSM stören können.

Für eine allgemeine Risikoabschätzung sind die Daten der hier vorliegenden Studien nicht ausreichend. Obwohl es viele Studien mit einem breiten Untersuchungsansatz gibt, bleibt die Übertragbarkeit der Ergebnisse auf andere Anwendungen oder ähnliche

Expositionsszenarien aufgrund der unzureichenden dosimetrischen Daten bzw. der fehlenden Korrelation dieser Daten mit der Störung begrenzt.

### Neurostimulatoren

Zur möglichen Störbeeinflussung von implantierbaren Neurostimulatoren durch Metalldetektoren und EAS-Systeme liegen vier Phantom-Studien vor. Seidman et al. (2010b) haben zusätzlich *in vitro*-Tests (*in air*) durchgeführt. Provokationsstudien zur Störbeeinflussung von Neurostimulatoren konnten im Rahmen des vorliegenden systematischen Reviews nicht gefunden werden. Insgesamt wurden in den vier vorliegenden Studien 15 Neurostimulatoren untersucht.

Guag et al. (2017) fanden im Rahmen ihrer Phantom-Studie im Zwischenfrequenzbereich für die untersuchten Neurostimulatoren keine Störung. Seidman et al. (2010b) untersuchten ebenfalls die mögliche Störbeeinflussung von implantierbaren Neurostimulatoren durch Metalldetektoren (210 Hz – 7,4 kHz). Obwohl drei verschiedene Neurostimulatoren mit 12 verschiedenen simulierten Schleusen-Systemen und 32 Handgeräten bei unterschiedlichen Stärken und Frequenzen exponiert wurden, trat im Zwischenfrequenzbereich keine Störung auf.

Pantchenko et al. (2011a) entwickelten für die systematische Untersuchung von implantierbaren Neurostimulatoren und RFID-Systemen ein Testsystem (Phantom-Modell) und konnten für eine RFID-Antenne (134,2 kHz) im Abstand von 2,5 cm keine Störung provozieren. In einer weiteren Untersuchung derselben Autorengruppe (Pantchenko et al., 2011b) mit 22 verschiedenen RFID-Systemen (125 kHz – 2,45 GHz) und sechs verschiedenen implantierbaren Neurostimulatoren konnte jedoch bei einem Neurostimulator bei 134 kHz und einem Abstand bis 15 cm eine Störung hervorgerufen werden.

Zusammenfassend kann aus den vier Studien geschlossen werden, dass es vereinzelte Hinweise (Pantchenko et al., 2011b) gibt, dass implantierbare Neurostimulatoren durch Metalldetektoren und EAS-Systeme gestört werden können. Um dieses Ergebnis zu verifizieren, sollten in Zukunft umfassendere *in vitro*-Untersuchungen (Benchmarktests), Phantom-Studien sowie Provokationsstudien durchgeführt werden.

### **6.3.4 Induktionsherde**

Zur Störbeeinflussung durch Induktionsherde liegen drei Provokationsstudien (Binggeli et al., 2005; Rickli et al., 2003; Tiikkaja et al., 2013) vor, die insgesamt 83 Patienten untersucht haben, davon 51 HSM-Träger und 32 Patienten mit ICD. Die Ergebnisse der drei Studien zeigten, dass die Sicherheit der Patienten gewährleistet war, wenn ein Sicherheitsabstand eingehalten wurde, d.h. es wurden keine Störungen in einem Abstand von 20 – 35 cm zum Induktionsherd beobachtet. Es wurde in den Studien jedoch nicht dokumentiert, ob Störungen bei kleineren Abständen aufgetreten waren.

Auch die beiden Studien, die eine mögliche Störbeeinflussung durch Induktionsherde mit Hilfe eines Phantom-Modells untersucht haben (Binggeli et al., 2005; Hirose et al., 2005), fanden heraus, dass Störungen in Abhängigkeit vom Abstand zum Induktionsherd und vom Vorhandensein/Fehlen eines Kochtopfes bzw. der Position des Topfes auf dem Kochfeld auftraten. Allerdings ging aus diesen beiden Studien nicht hervor, welche Feldstärken bei bestimmten Abständen auftraten. Zusätzlich untersuchten Irnich und Bernstein (2006) ein Worst-Case-HSM-Phantom-Modell (d.h. linksseitige Implantation, unipolarer HSM) und fanden induzierte Spannungen im Bereich von 6 – 800 mV in Abhängigkeit vom Abstand und der Kochtopf-Position. In Kombination mit ihren Benchmarktests zeigten sie, dass 14,8 % der HSM gestört werden konnten, aber nie bei Abständen größer als 35 cm. Auch die Prüfgrenzen der Produktnormen wurden mit einem Abstand von ca. 35 cm zum Thorax des

Patienten eingehalten. Ergebnisse, wonach die Prüfgrenzen bei geringeren Abständen überschritten werden, sind mit einem HSM-Modell entstanden, das vor 1998 in Verkehr gebracht wurde, als es noch keine Produktnormen gab. Insgesamt bestätigen die Ergebnisse damit die Daten aus den o.a. Phantom- und Provokationsstudien.

Die Details aller aufgelisteten Studien finden sich in Tabelle 6.4. Es konnten im Rahmen des vorliegenden Reviews keine Studien identifiziert werden, die implantierbare Neurostimulatoren oder andere aktive Implantate untersucht haben. Insgesamt ist die Datengrundlage zur Störung von aktiven Implantaten durch Induktionsherde mit fünf Publikationen relativ gering.

**Tabelle 6.4:** Studien zur Störbeeinflussung aktiver Implantate durch Induktionsherde.

Publikation	Studientyp	Feldquelle	Frequenz	Implantat	Störung?
Binggeli et al. (2005)	Provokationsstudie, Phantom-Studie (keine Details zum Aufbau angegeben)	Induktionsherd	20 kHz (AM mit 50 Hz; max. 72 $\mu$ T/5 $\mu$ T (Topf verschoben/zentriert in Position A, d.h. Patient war aufrecht in nächster Nähe zum Kochtopf, ca. 20 cm, gemäß Abb.), Abstand Patient zum Induktionsherd mindestens 25 cm	19 Patienten (ICD (12 DDD, 7 VVI), bipolar; Empfindlichkeit blieb unverändert; Details zu Hersteller/Modell vorhanden); 1 ICD (für Phantom)	keine Störung bei Patienten im Abstand von 25 cm zum Kochtopf; Störung mit Phantom < 20 cm; Topf verschoben; nicht klar, in welchem Abstand zum Kochtopf 72 $\mu$ T auftraten; nicht klar, welche magnetische Flussdichte bei 25 cm auftrat
Hirose et al. (2005)	Phantom-Studie	Induktionsherd	25 – 34 kHz (Sinus-Signal; gepulst bei 34 kHz (Erkennungsmodus) und CW bei 25 kHz (Erwärmungsmodus)); 0,03 – 3,7 mT, je nach Abstand, mit/ohne Topf	4 HSM (unipolar, maximale Empfindlichkeit)	Störung je nach Konfiguration bis zu einem Abstand von 34 cm (während des Erwärmungsmodus mit einer Pfanne); nicht klar, welche Feldstärke bei 34 cm auftrat
Irnich und Bernstein (2006)	Phantom-Studie, Benchmarktest	Phantom: 11 Induktionsherde mit Töpfen verschiedener Größen; Benchmarktest: Spannungsgenerator? (unzureichende Beschreibung)	Phantom: 25 – 48 kHz (AM bei 100 Hz und in einem Fall bei 33 Hz); Benchmarktest: Sinus-Signal bei 24 kHz (AM bei 100 Hz)	Phantom: 1 modifizierter HSM zur Messung der Spannung mit unipolarer Sonde; Worst-Case-HSM-Patienten-Modell (z.B. linksseitige Implantation, unipolar, Körper nah zum Herd, Topf exzentrisch positioniert) Benchmarktest: 224 HSM mit hochempfindlicher Einstellung (z.B. unipolarer Modus)	Phantom: induzierte Spannung zwischen 6 –800 mV (je nach Abstand und Topf-Platzierung); Benchmarktest: mV-Störschwelle des empfindlichsten HSM bei 90,5 mV (älteres Modell, das 1998 vom Markt genommen wurde), Mittelwert bei 3,08 V (Spitze-Spitze-Werte); Kombination aus Phantom-Studie und Benchmarktest führte zu 14,8 % HSM, die unter Worst-Case-Bedingungen gestört werden konnten; 0 % im Abstand von 35 cm

Publikation	Studientyp	Feldquelle	Frequenz	Implantat	Störung?
Rickli et al. (2003)	Provokationsstudie	Induktionsherd	15 – 25 kHz (2 – 6 $\mu$ T in einem Abstand von 20 cm); Abstand Patient - Herd: 20 cm	40 Patienten (HSM, 15 DDD, 21 VVI, 3 VDD, 1 AAI; unipolar); Empfindlichkeit blieb unverändert oder auf nominelle Empfindlichkeit eingestellt; Details vorhanden zu Hersteller/Modell; verschiedene Koch-Szenarien	keine Störung bis zu einem Abstand von ca. 20 cm vom Kochtopf
Tiikkaja et al. (2013)	Provokationsstudie	Induktionsherd	48 kHz, 3 $\mu$ T (35 cm oberhalb der Kochplatten)	24 Patienten: 11 HSM (bipolar, 3 ebenso mit unipolarer Einstellung (3 DDD, 4 DDIR, 1 DDDR, 1 DDI, 1 AAR, 1 VVIR)), 13 ICD (9 VVI, 2 DDD, 2 DDI); Details zu Hersteller/Modell vorhanden; HSM mit maximaler Empfindlichkeit	keine Störung bis zu einem Abstand von 35 cm

Die Ergebnisse der eingeschlossenen Studien deuten darauf hin, dass HSM und ICD unter den beschriebenen Bedingungen in einem Abstand von mindestens 20 cm nicht gestört werden. Dies gilt für uni- und bipolare Systeme unter der Bedingung nominell eingestellter Empfindlichkeit bei den Implantaten. Es kann keine Aussage getroffen werden für den Fall eines kleineren Abstands, maximaler Empfindlichkeit, anderer aktiver Implantate oder anderer Induktionsherde mit unterschiedlichen Expositionscharakteristika. Das Ziel zukünftiger Forschung sollte sein, systematisch die Feld-Störschwellen zu bestimmen, also ab welcher magnetischen Flussdichte eine Störung auftritt. Es kann dann mittels dosimetrischer Daten ein Mindestabstand für die Sicherheit von Menschen mit Implantaten festgelegt werden.

### **6.3.5 Sonstige dokumentierte Störbeeinflussungen im Bereich 300 Hz – 1 MHz**

Neben Studien ohne besonderen Feldquellen-Bezug (Kapitel 6.3.2), Studien zu Sicherungssystemen (Kapitel 6.3.3) und zu Induktionsherden (Kapitel 6.3.4) konnten im Rahmen des vorliegenden systematischen Reviews sieben weitere Publikationen identifiziert werden, die die Störbeeinflussung aktiver Implantate durch verschiedene medizinische Geräte untersucht haben, zwei Studien zu Systemen der kabellosen Energieübertragung sowie jeweils eine Studie zu einer Magnetschwebbahn, zu Lawinenschüttungs-Suchgeräten und verschiedenen iPods. Alle Studien haben ausschließlich kardiale Implantate berücksichtigt.

**Tabelle 6.5:** Studien zur Störbeeinflussung aktiver Implantate durch sonstige Feldquellen.

Publikation	Studientyp	Feldquelle	Frequenz	Implantat	Störung?
Bassen (2008)	Phantom-Studie	4 verschiedene iPods (iPod Nano, iPod shuffle, iPod Video, Standard-iPod), verbunden mit Kopfhörern	0 – 5 MHz (0,2 $\mu$ T oder weniger bei 100 kHz, stark lokalisierter Bereich von 1 cm <sup>2</sup> )	1 modifizierter HSM zur Messung der Störspannung am HSM-Eingang und den 2 Sonden (unipolar)	Störspannung nicht höher als Rauschen (nicht höher als 0,5 mV pp (0 –1 kHz) bzw. 2 mV pp (0 –5 MHz))
Corbett et al. (2014)	<i>in vitro</i> -Test ( <i>in air</i> ) mit Herz-Simulation und Provokationsstudie	1 magnetisches Endoskop (ScopeGuide)	9 – 11 kHz (70 db $\mu$ V/m $\approx$ 0,1 nT im Abstand von 3 m (Anmerkung: 3 m ergeben keinen Sinn in Bezug zum Patienten))	2 explantierte Implantate (HSM und ICD); 100 Patienten (65 HSM, 16 ICD, 19 kardiale Resynchronisationstherapie-Geräte (10 ICD, 9 HSM)); keine Angaben zu den Implantat-Einstellungen bei den Patienten oder zu den Sonden; verschiedene Empfindlichkeits-Einstellungen; 1 Patient mit einem kardialen Resynchronisationstherapie-Gerät	keine Störungen bei den <i>in vitro</i> - und <i>in vivo</i> -Tests
Dorenkamp et al. (2013)	Provokationsstudie	4 Lawinenverschütteten-Suchgeräte	457 kHz, gepulstes Signal; Grenze der ausgehenden Feldstärke von 2,23 $\mu$ A/m in einem Abstand von 10 m	101 Patienten (41 HSM (5 Einkammer, 33 Zweikammer, 3 kardiale Resynchronisationstherapie-Geräte) und 60 ICD (35 Einkammer, 10 Zweikammer, 15 kardiale Resynchronisationstherapie-Geräte); unipolar und bipolar; Implantat-Einstellungen und Sonden-Polaritäten blieben unverändert; Details zum Hersteller/Modell angegeben	keine Störung mit Implantat, aber mit Programmiergerät
Fukuta et al. (2005)	Phantom-Studie	Magnetschwebbahn (Phantom wurde innerhalb und in der Nähe getestet)	50 Hz – 2 kHz (0,04 – 0,2 mT), 2 – 400 kHz (0,054 – 123 nT); 100 kHz – 3 GHz (0,36 – 2,95 V/m); alle Daten für verschiedene Bedingungen innerhalb und in der Nähe des Zuges	3 HSM und 1 ICD; unipolar und bipolar	keine Störung

Publikation	Studientyp	Feldquelle	Frequenz	Implantat	Störung?
Hikage et al. (2016)	Phantom-Studie und Simulation (eines Phantoms mit HSM mit unipolarer Sonde)	14 verschiedene Systeme zur drahtlosen Energieübertragung (12 für die mobile Anwendung mit modulierten Feldern (im Lade- und Standby-Modus), 2 für Elektrofahrzeuge (CW))	70 – 460 kHz, 6,78 MHz, 0,2 – 3 kW; Feldstärken nicht angegeben; Simulation für 8 – 13 MHz	25 HSM und ICD; keine genaue Zahlen angegeben, unipolar und bipolar	Phantom-Studie: Störung bei 5 der 12 Ladesystemen für die mobile Anwendung (maximaler Abstand der HSM $\leq$ 2 cm und der ICD $\leq$ 1 cm)
Joglar et al. (2009)	Provokationsstudie	elektromagnetisches Artikulographie-Gerät	10 – 20 kHz (140 – 160 $\mu$ T an der Oberfläche der Übertragungsspule und 14 – 16 $\mu$ T im Zentrum des Helms in einem Abstand von 7,5 cm von der Übertragungsspule)	12 Patienten (10 ICD, 2 HSM); maximale Empfindlichkeit; keine Details zur Sonde; Details zu Hersteller/Modell angegeben	keine Störung mit Implantat, aber mit Programmiergerät
Magnani et al. (2012)	Phantom-Studie	elektromagnetisches Navigations-Bronchoskop	2,5 – 3,5 kHz, max. 12 $\mu$ T und 4,4 V/m am Implantat (ebenso wurden statische Magnetfelder emittiert)	7 ICD (mit bipolaren Sonden), maximale Empfindlichkeit	keine Störung
Maiorana et al. (2013)	Provokationsstudie	Ultraschall-Zahnstein-Entferner	24 – 32 kHz (keine Angaben zu Feldstärken)	12 Patienten (ICD); Details zu Hersteller/Modell vorhanden; keine Details zu Sonden; Implantat-Einstellungen blieben unverändert	keine Störung
Salcedo et al. (2016)	Provokationsstudie	Hochfrequentes chirurgisches Schwamm-Detektions-System	145 kHz (Trägerfrequenz), Pulse; keine Feldstärken angegeben	50 Patienten: 20 HSM, 20 ICD, 10 nicht-implantierte HSM (29 DDD, 8 VVI, 2 DDI, 1 AAI); unipolar (n = 3) und bipolar; nominelle Empfindlichkeit; Hersteller/Modell nicht angegeben	Störung in 2 temporären HSM im Synchron-Modus (DDT)
Salmi et al. (1990)	Phantom-Studie	Spule, um das Mikrotron zu imitieren (wird in der Krebs-Therapie verwendet; erzeugt magnetische Felder und ionisierende Strahlung)	10 Hz – 10 kHz (bis 1 mT)	6 HSM mit unipolarer Sonde	keine Störung im kHz-Bereich, niedrigste Feld-Störschwelle lag bei 40 $\mu$ T (für 40 – 70 Hz) und bei 70 $\mu$ T für 125 Hz

Publikation	Studientyp	Feldquelle	Frequenz	Implantat	Störung?
Seckler et al. (2015)	Phantom-Studie	Helmholtz Spulen und induktive Ladestation Qi-A13	beide Systeme: 111 kHz (Sinus-Burst-Signal), Helmholtz Spulen: 5 – 27 $\mu$ T, Ladestation Qi-A13: max. 127 $\mu$ T in einem Abstand von 2 cm	Modifiziertes Implantat zur Messung der induzierten Spannung am Implantat-Eingang und zwei Sonden (bipolar und unipolar); verschiedene Sondenlagen getestet	Helmholtz-Spulen: Prüfgrenze ab 11 $\mu$ T überschritten; Qi-A13: beim Ladevorgang maximal 10,8 % und im Such-Modus 45,7 % (2,2 % im Abstand von 10 cm) der Prüfgrenze erreicht (keine Störung bei einem Abstand ab 10 cm erwartet)
Simon et al. (1975)	Provokationsstudie	13 nicht näher beschriebene zahnärztliche Geräte	Frequenz nur für ein Gerät angegeben (induktives Gießgerät: 270 kHz); bis zu 9 V/m im Abstand von 1 m zum Gerät	14 Patienten und 3 Hunde (HSM; keine Angaben zur Sonden-Konfiguration); Details zu Hersteller/Modell vorhanden	1 HSM-Modell (bei 2 von 3 Patienten) wurde durch 4 verschiedene Geräte gestört (Frequenz nicht bekannt, bei 1 V/m); keine Störung durch das 270 kHz-Gerät

## Medizinische Geräte

In vier Provokationsstudien zu einem chirurgischen Schwamm-Detektions-System (Salcedo et al., 2016), einem magnetischen Endoskop (Corbett et al., 2014), einem Ultraschall-Zahnstein-Entferner (Maiorana et al., 2013) und einem elektromagnetischen Artikulographie-Gerät (Joglar et al., 2009) wurden keine Störungen gefunden. Insgesamt wurden in den Studien 87 HSM-Patienten, 58 ICD-Patienten und 19 Patienten mit einem kardialen Resynchronisationstherapie-Gerät untersucht. Dagegen schienen verschiedene zahnärztliche Geräte eine mögliche Störung bei HSM-Patienten zu verursachen (Simon et al., 1975). Allerdings war bei dieser Studie nur für ein Gerät die Frequenz angegeben und es ist unklar, ob die anderen zahnärztlichen Geräte ebenfalls Felder im Zwischenfrequenzbereich emittierten. Zusätzlich stammt die Studie aus dem Jahr 1975, was die Relevanz der Daten fragwürdig erscheinen lässt.

Magnani et al. (2012) untersuchten mit Hilfe eines Phantom-Modells die Störbeeinflussung von sieben ICD durch ein elektromagnetisches Navigationsbronchoskop. Dabei konnten sie Werte von 12  $\mu\text{T}$  und 4,4 V/m am ICD ermitteln, die insgesamt zu keiner Störung führten. Auch Salmi et al. (1990) nutzten ein Phantom-Modell, um die Störung von sechs HSM durch ein Mikrotron-Gerät zu untersuchen und fanden keine Störung.

## Kabellose Energieübertragung

Zu Systemen der kabellosen Energieübertragung und einer möglichen Störbeeinflussung von aktiven Implantaten konnten zwei Studien identifiziert werden.

Hikage et al. (2016) untersuchten im Rahmen einer Phantom-Studie 14 verschiedene Systeme (70 – 460 kHz und 6,78 MHz) und ihre Wirkung auf insgesamt 25 HSM und ICD. Dabei wurde eine Störbeeinflussung für fünf der zwölf Systeme für die mobile Anwendung mit modulierten Feldern und bis zu einem Abstand von  $\leq 2$  cm für HSM und  $\leq 1$  cm für ICD gefunden. Die zwei Systeme der kabellosen Energieübertragung für Elektrofahrzeuge verursachten keine Störungen. Allerdings wurden in der Studie keine Angaben zu den aufgetretenen Feldstärken gemacht, und es wurden auch keine Details zu den Systemen und zur Art der Störung zur Verfügung gestellt.

Seckler et al. (2015) untersuchten ebenfalls mit Hilfe eines Phantoms ein System zur kabellosen Energieübertragung (Qi-A-13) und verglichen die Ergebnisse mit denen, die mit einem standardisierten Helmholtz-Spulen-Aufbau gewonnen wurden (beide Systeme mit 111 kHz). Unter den Bedingungen eines standardisierten Expositionsaufbaus wurden die Prüfgrenzen (d.h. 333 mV für kardiale Implantate mit unipolaren und 33,3 mV für bipolare Sonden) schon bei 11  $\mu\text{T}$ , und somit unterhalb der empfohlenen ICNIRP-Werte von 27  $\mu\text{T}$  (ICNIRP, 2010), überschritten. Dahingegen wurden die Prüfgrenzen mit der Qi-A-13-Ladestation nicht überschritten, auch wenn die Ladestation das Phantom berührte: das System erreichte lediglich 45,7 % der Prüfgrenze, obwohl die örtliche magnetische Flussdichte 12,5  $\mu\text{T}$  betrug. Dies zeigt den Einfluss der Feldverteilung (homogen vs. inhomogen) auf die Störbeeinflussung. Für die Übertragbarkeit der Ergebnisse auf Patienten mit einem kardialen Implantat erwarten die Autoren unter Berücksichtigung von Messungenauigkeiten keine Störbeeinflussung in einem Abstand ab 10 cm (Abstand Thorax – Qi-A13-Ladestation). Außerdem fanden die Autoren heraus, dass die induzierte Spannung am Eingang des Implantats abhängig war vom Sonden-Typ (unipolar/bipolar) und von der Sondenlage, d.h. der Sonden-Position und Orientierung. Diese umfassende Studie hebt die Wichtigkeit hervor, die emittierten Feld-Muster (z.B. Puls, kontinuierliche Welle) und dosimetrische Daten genau zu charakterisieren.

## Weitere Studien

Fukuta et al. (2005) haben mit Hilfe eines Phantom-Modelles drei HSM und einen ICD unter unterschiedlichen Bedingungen innerhalb und in der Nähe einer Magnetschwebbahn getestet und konnten keinerlei Störung feststellen.

Darüber hinaus liegt noch eine Provokationsstudie mit vier verschiedenen Lawinenschütteten-Suchgeräten vor (Dorenkamp et al., 2013). Dabei wurden 41 HSM- und 60 ICD-Patienten untersucht, und es wurde keine Störbeeinflussung festgestellt.

Bassen (2008) ermittelte für vier verschiedene iPods mit einem Phantom-Modell die Störspannungen, konnte jedoch keine Werte oberhalb des Rauschlevels der Messgeräte ( $\approx 2$  mV) feststellen. Er kam zu dem Schluss, dass keine Störbeeinflussung zu erwarten ist.

## **6.4 Zusammenfassung und Schlussfolgerung**

Ziel dieser systematischen Untersuchung war die Bewertung der elektromagnetischen Interferenz von aktiven Implantaten im Zwischenfrequenzbereich. Elektrische, magnetische und elektromagnetische Felder im Zwischenfrequenzbereich werden von vielen neuartigen Elektrogeräten wie Elektrofahrzeugen, RFID-Systemen, Induktionsherden oder drahtlosen Ladesystemen erzeugt. Hierfür wurden Provokationsstudien, Phantom-Studien, Benchmarktests und Simulationsstudien ausgewertet ( $n = 45$ ). 35 Studien untersuchten ausschließlich aktive kardiale Implantate (HSM ( $n = 19$ ), ICD ( $n = 4$ ), implantierbare Ereignisrekorder ( $n = 1$ ) oder verschiedene ( $n = 11$ )). Fünf Studien verwendeten keine aktiven kardialen Implantate, sondern ein modifiziertes Implantat-Gehäuse, um die Störspannung am Implantat-Eingang zu messen. Zusätzlich untersuchten drei Studien ausschließlich Neurostimulatoren (Pantchenko et al., 2011a, 2011b; Seidman et al., 2010b) und zwei Studien umfassten sowohl kardiale Implantate als auch Neurostimulatoren (Buzduga et al., 2007; Guag et al., 2017). Andere aktive Implantate, wie z.B. Cochlea-Implantate wurden nicht untersucht.

In den Studien zu Neurostimulatoren gab es Hinweise, dass sie durch die hier untersuchten elektromagnetischen Felder (Metalldetektoren und EAS-Systeme) in ihrer Funktion beeinflusst werden können. Allgemeine Bedingungen für das Auftreten von Störungen können aber aus den wenigen durchgeführten Studien nicht abgeleitet werden.

Insgesamt gibt es auch nur begrenzte Daten über die Störbeeinflussung von kardialen Implantaten im Zwischenfrequenzbereich und nur wenige der ausgewerteten Studien korrelierten die dokumentierten Störungen mit genauen Expositionsdaten (z.B. Mattei et al. (2016); Seckler et al. (2015); Wilke et al. (1998)). Aber auch die Studien, die keine Störbeeinflussung nachweisen konnten, lieferten nur selten detaillierte Daten zu den Expositionsbedingungen (Joglar et al., 2009; Magnani et al., 2012; Rickli et al., 2003; Tiikkaja et al., 2012a, 2012b, 2013).

Mehr als ein Drittel der Studien zu kardialen Implantaten untersuchte ihre Störanfälligkeit gegenüber Sicherheitssystemen, wie EAS-Systeme, Metalldetektoren und RFID ( $n = 19$ ), und fünf Studien untersuchten potenzielle elektromagnetische Interferenzen in der Nähe von Induktionsherden. Einzelne Studien untersuchten auch andere elektronische Geräte wie iPods (Bassen, 2008), eine Magnetschwebbahn (Fukuta et al., 2005), drahtlose Ladesysteme (Hikage et al., 2016; Seckler et al., 2015), Lawinenschütteten-Suchgeräte (Dorenkamp et al., 2013) oder verschiedene medizinische Geräte (Corbett et al., 2014; Magnani et al., 2012).

Es gab im Rahmen der hier eingeschlossenen Studien Hinweise darauf, dass elektronische Geräte des täglichen Lebens, wie z.B. Sicherheitssysteme, Störungen bei kardialen

Implantaten hervorrufen können (Mattei et al., 2016; Mcivor et al., 1998; Mugica et al., 2000; Seidman et al., 2007; Tiikkaja et al., 2013; Wilke et al., 1998). Auch Induktionsherde scheinen in unmittelbarer Nähe elektromagnetische Interferenzen zu provozieren (Binggeli et al., 2005; Hirose et al., 2005; Rickli et al., 2003; Tiikkaja et al., 2013). Auch für drahtlose Ladesysteme gab es Hinweise, dass sie Störungen hervorrufen können bzw. es zur Überschreitung der Prüfgrenzen kommen kann (Hikage et al., 2016; Seckler et al., 2015). Andere untersuchte elektronische Geräte hingegen riefen keine elektromagnetischen Interferenzen hervor. Daraus kann jedoch nicht geschlussfolgert werden, dass diese Geräte oder Anwendungen grundsätzlich sicher sind, da einige Studien nur wenige Implantate oder Patienten (sieben ICD (Magnani et al., 2012) oder drei HSM und einen ICD (Fukuta et al., 2005)) untersuchten oder in manchen Studien die Expositionsparameter nur unzureichend beschrieben waren (Bassen, 2008; Dorenkamp et al., 2013).

Obwohl Studien mit fehlender Frequenz-Angabe von diesem systematischen Review ausgeschlossen wurden, halten die Autoren es für erwähnenswert, dass es mehrere Studien gab, die elektronische Geräte (z.B. digitale Musikplayer) untersuchten, die Magnetfelder im Zwischenfrequenzbereich emittieren, und in diesem Zusammenhang eine Störanfälligkeit zeigten (Chiu et al., 2009; Thaker et al., 2009).

#### **6.4.1 Expositions-bezogene Faktoren**

Die meisten Studien, die in dem vorliegenden systematischen Review berücksichtigt wurden, führten Untersuchungen mit Expositionen gegenüber einem einzelnen elektronischen Gerät durch. Nur zehn der 45 Studien verwendeten einen standardisierten Expositionsaufbau, z.B. Helmholtz-Spulen oder Antennen-Aufbauten. Für eine allgemeine Risikobewertung haben Studien mit einer Einzelgerät-Exposition jedoch nur einen begrenzten Wert, oft aufgrund der fehlenden korrekten Dosimetrie. Auch die Übertragbarkeit der Daten auf andere Expositionssituationen wird dadurch begrenzt. Im Gegensatz dazu können unter standardisierten Laborbedingungen elektrische, magnetische und elektromagnetische Felder einer definierten Frequenz und Feldstärke erzeugt und appliziert werden. Mit standardisierten Expositionsaufbauten ist es möglich, die genauen Expositionsparameter zu bestimmen, bei denen es wahrscheinlich oder unwahrscheinlich ist, dass Störungen bei aktiven Implantaten hervorgerufen werden. Darüber hinaus lassen sich bei einer ausreichenden Anzahl von Patienten oder Implantaten, Patienten-, Implantat- und Sonden-bezogene Prädiktoren für die Wahrscheinlichkeit einer elektromagnetischen Interferenz ausmachen.

Gemäß den Produktnormen (EN 45502-2-1:2004, 2004; EN 45502-2-2:2008, 2008; ISO 14117:2012, 2012) steigen die Prüfgrenzen im Zwischenfrequenzbereich linear an (von 3 kHz bis 167 kHz liegen die Prüfgrenzen zwischen 18 mV und 1 V für unipolare HSM, vgl. Kapitel 2, Tabelle 2.2). Im Gegensatz dazu deuten die Daten von Andretzko et al. (2008) darauf hin, dass die mV-Störschwellen mit abnehmender Frequenz zunehmen. Die Daten einer früheren Studie derselben Forschungsgruppe (Andretzko et al., 2007) und anderer Forschungsgruppen (Gustrau et al., 2002; Leitgeb et al., 2013) fanden jedoch niedrigere Störschwellen bei niedrigeren Frequenzen im Vergleich zu höheren Frequenzen.

Einige der ausgewerteten Studien deuten darauf hin, dass der Zeitverlauf der applizierten Felder von entscheidender Bedeutung ist. Sowohl Mcivor et al. (1998) als auch Seidman et al. (2010a) stellten fest, dass die Feldstärke, Frequenz und Modulation (z.B. AM, PW) die kritischen Parameter für eine elektromagnetische Interferenz waren. Mcivor et al. (1998) kamen weiter zu dem Schluss, dass die Störanfälligkeit durch das mit 60 Hz gepulste Signal erhöht wurde. Zusätzlich fanden Hikage et al. (2016) heraus, dass eine elektromagnetische

Interferenz wahrscheinlicher war, wenn kardiale Implantate gepulsten Signalen mit einer Wiederholungsfrequenz nahe am physiologischen Herzrhythmus ausgesetzt waren.

Für zukünftige Studien empfehlen die Autoren die Verwendung standardisierter Expositionsaufbauten. Studien, die ein einzelnes Gerät untersuchen, sollten mit einem standardisierten Expositionsaufbau kombiniert werden, wie in Seckler et al. (2015). Dies ermöglicht die Übertragbarkeit und die Validierung von Daten aus verschiedenen Expositionsszenarien. Zukünftige Studien sollten auch genaue dosimetrische Daten zur Exposition liefern, wie Feldstärke, Frequenz und Modulation, da dies die kritischen Parameter von elektrischen, magnetischen und elektromagnetischen Feldern sind, die die Störanfälligkeit von aktiven Implantaten beeinflussen. Schließlich sollten die Feld-Eigenschaften mit den identifizierten elektromagnetischen Interferenzen korreliert werden.

#### **6.4.2 Kardiale Implantate und Sonden-bezogene Faktoren**

Neben einer exakten Beschreibung der verwendeten Expositionsparameter sollten zukünftige Studien auch verschiedene Implantat-Typen, -Einstellungen und Sonden-Konfigurationen berücksichtigen, da mehrere Studien gezeigt haben, dass die Wahrscheinlichkeit für eine Störung abhängig ist vom Implantat-Typ (d.h. PM oder ICD, Modell (Seidman et al., 2010a, 2007; Tiikkaja et al., 2012b)), von der Empfindlichkeitseinstellung (Lucas et al., 1994; Mugica et al., 2000) oder von den Sonden-Parametern (bipolar, unipolar (Tiikkaja et al., 2012a)) und von der Sondenlage (Mattei et al., 2013; Seckler et al., 2015). Seidman et al. (2007) fanden jedoch keinen eindeutigen Zusammenhang zwischen der Sonden-Konfiguration (unipolar oder bipolar) und der Implantat-Empfindlichkeit gegenüber elektromagnetischer Interferenz. In der klinischen Praxis hat sich die Verwendung von bipolaren statt unipolaren Sonden bei kardialen Implantaten durchgesetzt, jedoch sind auch bipolare Sonden in Gegenwart starker elektromagnetischer Felder nach wie vor störanfällig (Seckler et al., 2017). In einer systematischen Untersuchung zur Sonden-Konfiguration zeigten Seckler et al. (2017), dass die Position und Orientierung der Sondenspitze zusammen mit der Empfindlichkeitseinstellung des Implantats und dem Spitze-Ring-Abstand die vier wichtigsten Parameter sind, die das Risiko für eine Störung bei bipolaren Sonden beeinflussen, zumindest für elektrische und magnetische Felder, die von 50/60 Hz-Quellen erzeugt werden. Die Kombination von Benchmarktests, Phantom- und Provokationsstudien kann helfen, den Einfluss von Implantat- und Sonden-bezogenen Faktoren systematisch zu bestimmen.

#### **6.4.3 Grenzwerte**

Die ausgewerteten Studien lieferten Hinweise, dass die für die Allgemeinbevölkerung vorgeschlagenen Grenzwerte für elektrische, magnetische und elektromagnetische Felder (z.B. ICNIRP (2010), 27  $\mu$ T und 21 A/m für 3 kHz – 10 MHz) von alltäglichen Elektrogeräten, die Felder im Zwischenfrequenzbereich emittieren, überschritten werden können. Wie in Kapitel 3.3 zusammengefasst, können z.B. bei EAS oder Induktionsherden die Referenzwerte von ICNIRP zum Teil beträchtlich überschritten werden. Dies bedeutet jedoch nicht automatisch, dass die Allgemeinbevölkerung (einschließlich Personen mit aktiven Implantaten) gefährdet ist, aber Vorsicht ist geboten. Umgekehrt bedeutet die Einhaltung der ICNIRP-Empfehlungen nicht, dass die Sicherheit von Patienten mit aktiven Implantaten in jedem Fall gewährleistet ist, da ICNIRP Implantat-Träger in ihren Empfehlungen nicht berücksichtigt. Darüber hinaus liefern die Ergebnisse einzelner Studien des vorliegenden systematischen Reviews Hinweise, dass eine elektromagnetische Interferenz auch unterhalb der vorgeschlagenen ICNIRP-Grenzwerte induziert werden kann (Seckler et al., 2015; Wilke

et al., 1998). Laut des Reviews von Beinart und Nazarian (2013) kann eine elektromagnetische Interferenz bei kardialen Implantaten zu schweren Fehlfunktionen des Implantats führen, z.B. zur Beschädigung der Implantat-Elektronik, zu Inhibition, asynchroner Stimulation oder zu unangemessenen Schocks. Störungen in den hier ausgewerteten Studien führten z.B. zu Fehlwahrnehmungen (Mugica et al., 2000; Tiikkaja et al., 2013), asynchroner Stimulation (Mcivor et al., 1998) und Inhibition (Dodinot et al., 1993). Es ist aus Sicht der Autoren deswegen dringend erforderlich, Grenzwerte für Patienten mit aktiven Implantaten festzulegen, damit klar ist, welche elektronischen Geräte für Patienten mit aktiven Implantaten sicher sind oder welche Abstände gegebenenfalls zu verschiedenen elektronischen Geräten eingehalten werden sollten.

#### **6.4.4 Fazit**

Es gibt Hinweise, dass aktive Implantate, wie HSM, ICD oder Neurostimulatoren anfällig für Fehlfunktionen durch Felder im Zwischenfrequenzbereich sind. Elektromagnetische Interferenz kann insbesondere durch Sicherheitssysteme (RFID-, EAS-Systeme) und Induktionsherde hervorgerufen werden. Die Ergebnisse der in diesem systematischen Review ausgewerteten Studien und die Ergebnisse von Studien aus anderen Frequenz-Bereichen deuten darauf hin, dass die Wahrscheinlichkeit für eine Störbeeinflussung von Expositions-bedingten Parametern (Feldstärke, Frequenz, Modulation) und von Implantat-sowie von Sonden-bezogenen Parametern (Modell, Implantat-Typ, Einstellung der Implantat-Empfindlichkeit, Sonden-Konfiguration, Implantationslage) abhängig ist. Um die Faktoren, die eine Störung beeinflussen, besser charakterisieren zu können, sollten zukünftige Studien alle diese Faktoren systematisch berücksichtigen. Darüber hinaus sollten Benchmarktests und Phantom-Studien nach internationalen Standards (EN 45502-2-1:2004, 2004; EN 45502-2-2:2008, 2008; ISO 14117:2012, 2012) durchgeführt werden. In Bezug auf Provokationsstudien, für die es keine vergleichbaren Empfehlungen gibt, haben die Autoren gute Erfahrungen in der Zusammenarbeit zwischen Kardiologen mit fundierten Kenntnissen in der Elektrophysiologie und Elektroingenieuren mit fundierten Kenntnissen in Bezug auf Expositionsaufbauten gemacht (Napp et al., 2014; Stunder et al., 2017).

Zusätzlich sollten, sofern möglich, Worst-Case-Szenarien berücksichtigt werden (d.h. unipolare Einstellung, maximale Empfindlichkeit, Atrium-Wahrnehmung, anhaltende Stimulation des Implantats, linksseitige Implantation, laterale Position der Sondenspitze, vertikale Orientierung der Sondenspitze, homogene Feld-Exposition, Thorax senkrecht zur Magnetfeldexposition). Die Autoren möchten mit diesem systematischen Review Wissenschaftler, die sich mit diesem Thema beschäftigen, für einen systematischeren Forschungsansatz in zukünftigen Studien sensibilisieren. Auf diese Weise könnten in Zukunft Grenzwerte für elektrische, magnetische und elektromagnetische Felder auch für Patienten mit elektrischen Implantaten abgeleitet werden.

#### **6.5 Hinweis zu Kapitel 6**

Wesentliche Inhalte dieses Kapitels beruhen auf: *Electromagnetic interference in cardiac electronic implants caused by novel electrical appliances emitting electromagnetic fields in the intermediate frequency range: a systematic review*, Europace 2018, doi: 10.1093/Europace/euy155. Teile dieser Publikation, insbesondere die Einleitung, die Methoden und Diskussion, wurden für Kapitel 6 des vorliegenden Forschungsberichts in Deutsch übersetzt. Allerdings umfasst Kapitel 6 einen größeren Frequenzbereich, berücksichtigt sämtliche aktive Implantate (und nicht nur kardiale Implantate) und die Art der Auswertung (Ergebnisse) wurde modifiziert.

Die Publikation ist verfügbar unter <http://doi.org/10.1093/europace/euy155>.

## 7 Identifizierung der wissenschaftlichen Kenntnislücken

### 7.1 Immissions- und Expositionsdaten

Die Recherche bezüglich vorliegender Immissions- und Expositionsdaten im Zwischenfrequenzbereich von 300 Hz – 1 MHz für unterschiedliche elektrische und elektronische Geräte mit Immissionsanteilen im Zwischenfrequenzbereich zeigte sehr unterschiedliche Ergebnisse im Hinblick auf die Verwertbarkeit und Nachvollziehbarkeit der Daten. Zum einen reichen die Oberwellen von herkömmlichen 50 Hz-Geräten und Anlagen (Motoren, Maschinen, Haushalts- und Bürogeräte) zum Teil weit in den Zwischenfrequenzbereich, die Datenlage lässt aber in vielen Fällen, aufgrund der oftmals nicht frequenzselektiv erfassten Daten, keine Analyse der im Zwischenfrequenzbereich wirksamen Immissionen und Expositionen zu. In ähnlicher Weise zeigt sich bei elektronischen Geräten mit im kHz-Bereich arbeitenden Schaltreglern oftmals ein nicht ausschließlich auf den Frequenzbereich unterhalb von 1 MHz beschränktes Frequenzspektrum. Eine gezielte Charakterisierung der Immission und Exposition im Frequenzbereich innerhalb eines vorgegebenen Frequenzbereichs (300 Hz – 1 MHz) ist vor diesem Hintergrund nur bei Datensätzen möglich, die mit entsprechenden frequenzselektiven Messverfahren ermittelt wurden, was bei vielen der grundsätzlich zahlreich vorliegenden Publikationen nicht der Fall war.

Beispiele für Gerätekategorien, bei denen dieses Problem besonders gegeben war, sind medizinische Geräte (MRT), Geräte für die drahtlose Energieübertragung, Fahrzeuge mit Elektroantrieb, invertergesteuerte Schweißgeräte und typische 50 Hz-Haushaltsgeräte mit Elektromotoren oder Schaltnetzteilen.

Bei Gerätegruppen, bei denen die Datenlage vergleichsweise gut ist, zeigen die Auswertungen, dass – die Allgemeinbevölkerung betreffend – insbesondere Sicherungssysteme (Metalldetektoren, EAS, RFID) sowie Induktionsherde relevante Spektralanteile im Zwischenfrequenzbereich haben, die in der Praxis zu Expositionen bzw. Immissionen oberhalb der gegenwärtig auf europäischer Ebene empfohlenen Basis- bzw. Referenzwerte führen können. Auch bei den auswertbaren Daten der drahtlosen Energieübertragung ergaben sich Expositionsindizes (=Verhältnis von Messwert zu Referenzwert bzw. Auslöseschwelle) größer 10, wenn die Referenzwerte gemäß EU-Ratsempfehlung 1999/519/EG zugrunde gelegt werden. Bei beruflich exponierten Personen zeigen sich insbesondere bei diversen industriellen Erwärmungsanlagen, Schweißanlagen sowie Deaktivatoren und bei der Elektrochirurgie Expositionsindizes größer oder gleich 10 bei Zugrundelegung der Auslöseschwellen gemäß EU-Richtlinie 2013/35/EU.

### 7.2 Biologische Wirkungen

Die Auswertung im Hinblick auf biologische Wirkungen hat gezeigt, dass bei *in vitro*-Studien bei den meisten Endpunkten und bei Tierstudien generell die Datenlage nicht ausreichend oder zu inkonsistent ist, um mögliche Wirkungen einschätzen zu können. Dies trifft auch auf die Humanstudien zu, die ausschließlich Wirkungen auf das Gehirn und die Kognition untersucht haben. Die den gegenwärtigen Basisgrenzwerten und Referenzwerten zugrundeliegenden Endpunkte Nervenreizung und Erwärmung wurden in keiner Studie untersucht. Neben fehlenden untersuchten Endpunkten weisen viele der vorhandenen Studien unterschiedliche methodische Schwächen auf. Sowohl Frequenzspektrum als auch Feldstärke sind ungleichmäßig erforscht. So wurde insbesondere der Frequenzbereich bis 100 kHz untersucht, jedoch wurden nur bei wenigen Studien Frequenzen zwischen 100 kHz und 1 MHz verwendet.

Im Rahmen der auswertbaren *in vitro*-Studien wurden Hinweise auf mögliche Auswirkungen auf die Zellproliferation und Zellebensfähigkeit durch Felder im Zwischenfrequenzbereich gefunden, wohingegen genotoxische Wirkungen bei Magnetfeldern <100 kHz als unwahrscheinlich eingeschätzt werden können.

### **7.3 Mögliche Störbeeinflussung elektronischer Implantate**

Es haben sich mögliche Störbeeinflussungen von aktiven Implantaten wie HSM, ICD oder Neurostimulationen insbesondere durch Sicherheitssysteme (EAS und RFID) sowie Induktionsherde gezeigt. Die Wahrscheinlichkeit für eine Störbeeinflussung ist von Expositions-bedingten Parametern und von Implantat- sowie von Sonden-bezogenen Parametern abhängig. Zukünftige Studien sollten diese Faktoren systematisch berücksichtigen. Überdies sollte die Durchführung von Benchmarktests und Phantom-Studien nach internationalen Standards erfolgen. Zusätzlich sollten, sofern möglich, Worst-Case-Szenarien, wie z.B. maximale Empfindlichkeit, linkspektorale<sup>12</sup> Implantation usw. berücksichtigt werden.

### **7.4 Zusammenfassende Bewertung der wissenschaftlichen Kenntnislücken**

Für eine aussagekräftige Bewertung möglicher gesundheitlicher Auswirkungen von elektrischen, magnetischen und elektromagnetischen Feldern im Zwischenfrequenzbereich bedarf es einer soliden Datenbasis bezüglich des Ausmaßes der Exposition der Bevölkerung. Diese ist bislang nicht in zufriedenstellendem Umfang verfügbar. Hauptgrund dafür ist die Tatsache, dass in vielen vorliegenden Untersuchungen die erhobenen Immissions- bzw. Expositionsdaten nicht oder nur ungenügend frequenzselektiv erfasst wurden, so dass eine Separation des Zwischenfrequenzanteils nur in einer relativ geringen Anzahl von Fällen (nur für eine relativ geringe Anzahl von Geräten bzw. Quellen) möglich ist. Systematische frequenzselektive Messungen an repräsentativen Geräte-Stichproben jener Gerätekategorien mit besonders starker Verbreitung bzw. für die bereits Einzelbefunde mit Hinweisen auf hohe Immissionen bzw. Expositionen vorliegen, sind daher zu empfehlen.

Bezüglich der biologischen Wirkungen wurden generell nur wenige Studien zu elektrischen und elektromagnetischen Feldern durchgeführt, was sich jedoch auch mit der Tatsache deckt, dass die meisten relevanten Zwischenfrequenzquellen dominant magnetischen Feldcharakter zeigen. Jedenfalls sollten zukünftige Studien gezielter Bias-Risiken bezüglich des Designs, der Durchführung sowie der Dokumentation der Studie minimieren. Insbesondere den Schlüsselfaktoren Verblindung, Charakterisierung der Exposition bzw. Charakterisierung der Felder sowie die vollständige Beschreibung der Ergebnisse sollten besser berücksichtigt werden. Weiterer Forschungsbedarf besteht an Studien, die ein breiteres Spektrum des Zwischenfrequenzbereiches abdecken, speziell Tier- und Humanstudien. Die Befunde dieses Reviews decken sich somit mit den Einschätzungen von SCENIHR (2015) und der WHO (2007a) sowie den bisherigen Reviews zum Zwischenfrequenzbereich (siehe Kapitel 1). Auch ist es aus Sicht der Autoren erforderlich, fundierte Grenzwerte für Zwischenfrequenzimmissionen im Hinblick auf Patienten mit aktiven Implantaten festzulegen.

---

<sup>12</sup> Bei der linkspektoralen Implantation eines Herzschrittmachers oder eines Implantierbaren Cardioverter Defibrillators (ICD) wird der Schrittmacher bzw. ICD im linken oberen Brustbereich implantiert. Aufgrund der anatomischen Situation (Lage des Herzens, Verlauf der Venen durch die die Elektroden des Implantats in Richtung Herz geführt werden) ergibt sich dabei eine, im Vergleich zur rechtpektoralen Implantation, große vom Elektrodenverlauf aufgespannte Projektionsfläche, in die externe Störfelder einkoppeln können. Die linkspektorale Implantationsart wird daher im Hinblick auf elektromagnetische Störbeeinflussungen als „worst case“ angesehen.

## 8 Literatur

- Abart, A., Flohberger, M., Hirtler, R., 2017. Assessment of EMF-Exposure in residential buildings caused by smart metering systems using PLC. 24th International Conference on Electricity Distribution.
- ACGIH, 2012. Threshold Limit Values for Chemical Substances and Physical Agents and Biological Exposure Indices, 1st ed. ACGIH.
- Acri, G., Testagrossa, B., Causa, F., Tripepi, M.G., Vermiglio, G., Novario, R., Pozzi, L., Quadrelli, G., 2014. Evaluation of occupational exposure in magnetic resonance sites. *Radiol med* 119, 208–213. <https://doi.org/10.1007/s11547-013-0324-5>
- Adair, E.R., Ashley, R., Chou, C.K., Curtis, R., Erdreich, L.S., Lapin, G.D., Mild, K.H., Petersen, R., Reilly, J.P., Sheppard, A.R., 1997. Biological and health effects of electric and magnetic fields from video display terminals-A technical information statement. IEEE-INST ELECTRICAL ELECTRONICS ENGINEERS INC 345 E 47TH ST, NEW YORK, NY 10017-2394.
- Adey, W.R., 1981. Tissue interactions with nonionizing electromagnetic fields. *Physiological Reviews* 61, 435–514.
- Adey, W.R., Bawin, S.M., 1977. BRAIN INTERACTIONS WITH WEAK ELECTRIC AND MAGNETIC-FIELDS. *Neurosciences Research Program Bulletin* 15, 1–129.
- Aerts, S., Calderon, C., Valič, B., Maslanyj, M., Addison, D., Mee, T., Goiceanu, C., Verloock, L., Van den Bossche, M., Gajšek, P., Vermeulen, R., Rössli, M., Cardis, E., Martens, L., Joseph, W., 2017. Measurements of intermediate-frequency electric and magnetic fields in households. *Environmental Research* 154, 160–170. <https://doi.org/10.1016/j.envres.2017.01.001>
- Ahlbom, A., Green, A., Kheifets, L., Savitz, D., Swerdlow, A., 2004. Epidemiology of Health Effects of Radiofrequency Exposure. *Environ Health Perspect* 112, 1741–1754. <https://doi.org/10.1289/ehp.7306>
- Ainsbury, E.A., Conein, E., Henshaw, D.L., 2005. An investigation into the vector ellipticity of extremely low frequency magnetic fields from appliances in UK homes. *Phys. Med. Biol.* 50, 3197. <https://doi.org/10.1088/0031-9155/50/13/016>
- Alanko, T., Puranen, L., Hietanen, M., 2011. Assessment of exposure to intermediate frequency electric fields and contact currents from a plasma ball. *Bioelectromagnetics* 32, 644–651. <https://doi.org/10.1002/bem.20675>
- Alizadeh, Z., Halabchi, F., Mazaheri, R., Abolhasani, M., Tabesh, M., 2016. Review of the Mechanisms and Effects of Noninvasive Body Contouring Devices on Cellulite and Subcutaneous Fat. *Int J Endocrinol Metab* 14. <https://doi.org/10.5812/ijem.36727>
- Allen, Blackwell, Chadwick, Driscoll, Pearson, Unsworth, Whillock, NRPB, 1994. Review of Occupational Exposure to Optical Radiation and Electric and Magnetic Fields with Regard to the Proposed CEC Physical Agents Directive. NRPB·R265.
- Andretzko, J.P., Hedjiedj, A., Guendouz, L., 2008. A model for determining the induced voltage at the terminals of a pacemaker exposed to a low frequency magnetic field. *Physiol. Meas.* 29, 1121. <https://doi.org/10.1088/0967-3334/29/9/009>
- Andretzko, J.P., Hedjiedj, A., Guendouz, L., 2007. Calculation of the induced voltage at the terminals of cardiac pacemakers submitted to conducted disturbances. *Physiol. Meas.* 28, 363. <https://doi.org/10.1088/0967-3334/28/4/003>
- Andreuccetti, D., Contessa, G.M., Falsaperla, R., Lodato, R., Pinto, R., Zoppetti, N., Rossi, P., 2013. Weighted-peak assessment of occupational exposure due to MRI gradient fields and movements in a nonhomogeneous static magnetic field. *Med. Phys.* 40, n/a-n/a. <https://doi.org/10.1118/1.4771933>
- ARPANSA, 2002. Maximum exposure levels to radiofrequency fields - 3 kHz to 300 GHz. Radiation Protection Series.

- Asghari, A., Khaki, A.A., Rajabzadeh, A., Khaki, A., 2016. A review on Electromagnetic fields (EMFs) and the reproductive system. *Electron Physician* 8, 2655–2662. <https://doi.org/10.19082/2655>
- Azanza, M.J., Del Moral, A., 1994. Cell membrane biochemistry and neurobiological approach to biomagnetism. *Progress in neurobiology* 44, 517–601.
- Babouri, A., Hedjeidj, A., Guendouz, L., 2009. Experimental and Theoretical Investigation of Implantable Cardiac Pacemaker Exposed to Low Frequency Magnetic Field. *J Clin Monit Comput* 23, 63–73. <https://doi.org/10.1007/s10877-008-9157-5>
- Babouri, A., Hedjiedj, A., Guendouz, L., Andretzko, J.P., 2006. The behavior of dual-chamber pacemakers exposed to a conducted low-frequency disruptive signal. *Physiol. Meas.* 27, 725. <https://doi.org/10.1088/0967-3334/27/8/007>
- Bakos, J., Nagy, N., Juhász, P., Thuróczy, G., 2010. Spot measurements of intermediate frequency electric fields in the vicinity of compact fluorescent lamps. *Radiat Prot Dosimetry* 142, 354–357. <https://doi.org/10.1093/rpd/ncq276>
- Barabáš, J., Radil, R., Malíková, I., 2015. Modification of *S. cerevisiae* growth dynamics using low frequency electromagnetic fields in the 1-2 kHz range. *BioMed research international* 2015.
- Barabas, J., Zabovsky, M., Zabovska, K., Janousek, L., Radil, R., Malikova, I., 2016. Reduced viability of two prokaryotic organisms treated by low frequency electromagnetic field, in: 2016 IEEE Radio and Antenna Days of the Indian Ocean (RADIO). Presented at the 2016 IEEE Radio and Antenna Days of the Indian Ocean (RADIO), pp. 1–2. <https://doi.org/10.1109/RADIO.2016.7772024>
- Bassen, 2008. Low frequency magnetic emission  
s and resulting induced voltages in a pacemaker by iPod portable music players. *Biomed Eng Online* 7, 7.
- Baumann, S., Cooper, R., Berman, E., House, D., Joines, W., 1989. Lack of effects from 2000-Hz magnetic fields on mammary adenocarcinoma and reproductive hormones in rats. *Bioelectromagnetics* 10, 329–333. <https://doi.org/10.1002/bem.2250100310>
- Beers, G.J., 1989. Biological effects of weak electromagnetic fields from 0 Hz to 200 MHz: A survey of the literature with special emphasis on possible magnetic resonance effects. *Magnetic Resonance Imaging* 7, 309–331. [https://doi.org/10.1016/0730-725X\(89\)90556-0](https://doi.org/10.1016/0730-725X(89)90556-0)
- Behrens, T., Terschüren, C., Kaune, W.T., Hoffmann, W., 2004. Quantification of lifetime accumulated ELF-EMF exposure from household appliances in the context of a retrospective epidemiological case–control study. *J Expo Anal Environ Epidemiol* 14, 144–153. <https://doi.org/10.1038/sj.jea.7500305>
- Beinart, R., Nazarian, S., 2013. Effects of External Electrical and Magnetic Fields on Pacemakers and Defibrillators: From Engineering Principles to Clinical Practice. *Circulation* 128, 2799–2809. <https://doi.org/10.1161/CIRCULATIONAHA.113.005697>
- Benecke, R., Meyer, B.-U., Schönle, P., Conrad, B., 1988. Transcranial magnetic stimulation of the human brain: responses in muscles supplied by cranial nerves. *Exp Brain Res* 71, 623–632. <https://doi.org/10.1007/BF00248756>
- Bereta, M., Janoušek, L., Cifra, M., Červinková, K., 2016. Low frequency electromagnetic field effects on ultra-weak photon emission from yeast cells, in: 2016 ELEKTRO. Presented at the 2016 ELEKTRO, pp. 478–481. <https://doi.org/10.1109/ELEKTRO.2016.7512122>
- Bernhardt, J.H., 1992. Non-ionizing radiation safety: radiofrequency radiation, electric and magnetic fields. *Phys. Med. Biol.* 37, 807. <https://doi.org/10.1088/0031-9155/37/4/001>
- BfS, 2018. Was sind elektromagnetische Felder? [WWW Document]. URL <http://www.bfs.de/DE/themen/emf/einfuehrung/einfuehrung.html> (accessed 1.18.18).
- Binggeli, C., Rickli, H., Ammann, P., Brunckhorst, C., Hufschmid, U., Luechinger, R., Duru, F., 2005. Induction Ovens and Electromagnetic Interference: What Is the Risk for

- Patients with Implantable Cardioverter Defibrillators? *Journal of Cardiovascular Electrophysiology* 16, 399–401. <https://doi.org/10.1046/j.1540-8167.2005.40611.x>
- Blackman, C.F., Benane, S.G., Elliott, D.J., House, D.E., Pollock, M.M., 1988. Influence of electromagnetic fields on the efflux of calcium ions from brain tissue in vitro: A three-model analysis consistent with the frequency response up to 510 Hz. *Bioelectromagnetics* 9, 215–227. <https://doi.org/10.1002/bem.2250090303>
- Blank, M., Goodman, R., 2000. Stimulation of the stress response by low-frequency electromagnetic fields: possibility of direct interaction with DNA. *IEEE Transactions on Plasma Science* 28, 168–172. <https://doi.org/10.1109/27.842894>
- Blumenthal, N.C., Ricci, J., Breger, L., Zychlinsky, A., Solomon, H., Chen, G.-G., Kuznetsov, D., Dorfman, R., 1997. Effects of low-intensity AC and/or DC electromagnetic fields on cell attachment and induction of apoptosis. *Bioelectromagnetics* 18, 264–272. [https://doi.org/10.1002/\(SICI\)1521-186X\(1997\)18:3<264::AID-BEM10>3.0.CO;2-P](https://doi.org/10.1002/(SICI)1521-186X(1997)18:3<264::AID-BEM10>3.0.CO;2-P)
- Boivin, W., Coletta, J., Kerr, L., 2003. Characterization of the magnetic fields around walk-through and hand-held metal detectors. *Health Phys* 84, 582–593.
- Börner, F., 2013. Elektromagnetische Felder an handgeführten Mittelfrequenz-/Inverter-Punktschweißszangen.
- Börner, F., 2009. BGIA-Report 2/2009 – Elektromagnetische Felder an handgeführten Punktschweißszangen. Sankt Augustin: BGIA-Institut für Arbeitsschutz der Deutschen Gesetzlichen Unfallversicherung.
- Boss, A., Graf, H., Berger, A., Lauer, U.A., Wojtczyk, H., Claussen, C.D., Schick, F., 2007. Tissue warming and regulatory responses induced by radio frequency energy deposition on a whole-body 3-Tesla magnetic resonance imager. *J. Magn. Reson. Imaging* 26, 1334–1339. <https://doi.org/10.1002/jmri.21156>
- Brecher, Disk, Fugate, Jacobs, Joshi, Kupferman, Mauri, Valihura, U.S Department of Transportation- FRA, 2002. Electromagnetic Field Characteristics of the Transrapid TR08 Maglev System. U.S. Department of Transportation-FRA 1–224.
- Brent, R.L., 1999. Reproductive and teratologic effects of low-frequency electromagnetic fields: A review of in vivo and in vitro studies using animal models. *Teratology* 59, 261–286. [https://doi.org/10.1002/\(SICI\)1096-9926\(199904\)59:4<261::AID-TERA12>3.0.CO;2-K](https://doi.org/10.1002/(SICI)1096-9926(199904)59:4<261::AID-TERA12>3.0.CO;2-K)
- Brent, R.L., Gordon, W.E., Bennett, W.R., Beckman, D.A., 1993. Reproductive and teratologic effects of electromagnetic fields. *Reproductive Toxicology* 7, 535–580. [https://doi.org/10.1016/0890-6238\(93\)90033-4](https://doi.org/10.1016/0890-6238(93)90033-4)
- Bryan, T.E., Gildersleeve, R.P., 1988. Effects of nonionizing radiation on birds. *Comparative Biochemistry and Physiology Part A: Physiology* 89, 511–530. [https://doi.org/10.1016/0300-9629\(88\)90827-4](https://doi.org/10.1016/0300-9629(88)90827-4)
- Budinger, T.F., Fischer, H., Hentschel, D., Reinfelder, H.-E., Schmitt, F., 1991. Physiological Effects of Fast Oscillating Magnetic Field Gradients. *Journal of Computer Assisted Tomography* 15, 909.
- Bullo, Dughiero, Sieni, 2013. Analysis of Stray EM Fields Generated by Induction Cooktops. *IEEE Electromagnetic Compatibility Magazine* 2, 49–58. <https://doi.org/10.1109/MEMC.2013.6550933>
- Bundesamt für Gesundheit, Moser, Plaschy-Gruber, Meier, Ryf, Gerber, 2006. Nichtionisierende Strahlung und Gesundheitsschutz in der Schweiz: Grundlagen. Bundesbehörden der Schweizer Eidgenossenschaften 1–109.
- Bundesamt für Strahlenschutz, 2008. Strahlung und Strahlenschutz - Eine Information des Bundesamtes für Strahlenschutz. BfS 1–60.
- Bundesamt für Umwelt, 2009. Niederfrequente Magnetfelder und Krebs. Bundesbehörden der Schweizer Eidgenossenschaften 1–118.

- Bundesbehörden der Schweizerischen Eidgenossenschaften, 1999. Verordnung vom 23. Dezember 1999 über den Schutz vor nichtionisierender Strahlung (NISV) (Stand 1. Juli 2012).
- Buzduga, V., Witters, D., Casamento, J., Kainz, W., 2007. Testing the Immunity of Active Implantable Medical Devices to CW Magnetic Fields up to 1 MHz by an Immersion Method. *IEEE Transactions on Biomedical Engineering* 54, 1679–1686. <https://doi.org/10.1109/TBME.2007.893502>
- Calin, M.D., Ursachi, C., Helerea, E., 2013. Electromagnetic environment characteristics in an urban area, in: 2013 4th International Symposium on Electrical and Electronics Engineering (ISEEE). Presented at the 2013 4th International Symposium on Electrical and Electronics Engineering (ISEEE), pp. 1–6. <https://doi.org/10.1109/ISEEE.2013.6674381>
- Capstick, M., 2008. An investigation into occupational exposure to electromagnetic fields for personnel working with and around medical magnetic resonance imaging equipment. Report on Project VT/2007/017 of the European Commission Employment.
- Casamento, 1999. Characterizing Electromagnetic Fields of Common Electronic Article Surveillance Systems. *CE* 16, 42–52.
- Chadwick, Lowes, 1998. Magnetic fields on British trains. *Ann Occup Hyg* 42, 331–335.
- Chadwick, P., 1999. Industrial exposures to electromagnetic fields in the frequency range 300 Hz–10 MHz. Health effects of electromagnetic fields in the frequency range 300, 7–8.
- Chen, X.L., Santis, V.D., Umenei, A.E., 2014. Theoretical assessment of the maximum obtainable power in wireless power transfer constrained by human body exposure limits in a typical room scenario. *Phys. Med. Biol.* 59, 3453. <https://doi.org/10.1088/0031-9155/59/13/3453>
- Chernoff, N., Rogers, J.M., Kavet, R., 1992. A review of the literature on potential reproductive and developmental toxicity of electric and magnetic fields. *Toxicology* 74, 91–126. [https://doi.org/10.1016/0300-483X\(92\)90132-X](https://doi.org/10.1016/0300-483X(92)90132-X)
- Chiu, C.C., Huh, J., De Souza, L., Alfaro-Ramirez, A., Clegg, R., Fenwick, L., Hamilton, R.M., Kirsh, J.A., Gross, G.J., Gao, D., Stephenson, E.A., 2009. A Prospective Pediatric Clinical Trial of Digital Music Players: Do They Interfere with Pacemakers? *Journal of Cardiovascular Electrophysiology* 20, 44–49. <https://doi.org/10.1111/j.1540-8167.2008.01270.x>
- Choi, Y.-K., Urnukhsaikhan, E., Yoon, H.-H., Seo, Y.-K., Cho, H., Jeong, J.-S., Kim, S.-C., Park, J.-K., 2017. Combined effect of pulsed electromagnetic field and sound wave on In vitro and In vivo neural differentiation of human mesenchymal stem cells. *Biotechnol Progress* 33, 201–211. <https://doi.org/10.1002/btpr.2389>
- Christ, A., Douglas, M., Nadakuduti, J., Kuster, N., 2013. Assessing Human Exposure to Electromagnetic Fields From Wireless Power Transmission Systems. *Proceedings of the IEEE* 101, 1482–1493. <https://doi.org/10.1109/JPROC.2013.2245851>
- Christ, A., Guldemann, R., Bühlmann, B., Zefferer, M., Bakker, J.F., van Rhoon, G.C., Kuster, N., 2012. Exposure of the Human Body to Professional and Domestic Induction Cooktops Compared to the Basic Restrictions. *Bioelectromagnetics* 33, 695–705. <https://doi.org/10.1002/bem.21739>
- Cleary, S.F., 1987. Cellular Effects of Electromagnetic Radiation. *IEEE Engineering in Medicine and Biology Magazine* 6, 26–30. <https://doi.org/10.1109/MEMB.1987.5006371>
- Clements-Croome, D., 2004. *Electromagnetic Environments and Health in Buildings*. Routledge.
- Cook, C. m., Thomas, A. w., Prato, F. s., 2002. Human electrophysiological and cognitive effects of exposure to ELF magnetic and ELF modulated RF and microwave fields: A

- review of recent studies. *Bioelectromagnetics* 23, 144–157. <https://doi.org/10.1002/bem.107>
- Cooper, 2002. Occupational Exposure to Electric and Magnetic Fields in the Context of the ICNIRP Guidelines. NRPB-W Series 10, 1–54.
- Corbett, G.D., Lim, Y.C., Lee, J.C., Chernoleskiy, A., Pugh, P.J., Cameron, E.A., 2014. Safety of the colonoscope magnetic imaging device (ScopeGuide) in patients with implantable cardiac devices. *Endoscopy* 46, 135–138. <https://doi.org/10.1055/s-0033-1359044>
- Dawson, B.V., Robertson, I.G.C., Wilson, W.R., Zwi, L.J., Boys, J.T., Green, A.W., 1998. Evaluation of potential health effects of 10 kHz magnetic fields: A rodent reproductive study. *Bioelectromagnetics* 19, 162–171. [https://doi.org/10.1002/\(SICI\)1521-186X\(1998\)19:3<162::AID-BEM4>3.0.CO;2-#](https://doi.org/10.1002/(SICI)1521-186X(1998)19:3<162::AID-BEM4>3.0.CO;2-#)
- De Cock, C.C., Spruijt, H.J., Van Campen, L.M. c., Plu, A.W., Visser, C.A., 2000. Electromagnetic Interference of an Implantable Loop Recorder by Commonly Encountered Electronic Devices. *Pacing and Clinical Electrophysiology* 23, 1516–1518. <https://doi.org/10.1046/j.1460-9592.2000.01516.x>
- de Greef, M., Ipek, O., Raaijmakers, A.J.E., Crezee, J., van den Berg, C.A.T., 2013. Specific absorption rate intersubject variability in 7T parallel transmit MRI of the head. *Magn Reson Med* 69, 1476–1485. <https://doi.org/10.1002/mrm.24378>
- De Santis, V., Douglas, M., Nadakuduti, J., Benkler, S., Chen, X.L., Kuster, N., 2015. Human exposure from pulsed magnetic field therapy mats: A numerical case study with three commercial products. *Bioelectromagnetics* 36, 149–161. <https://doi.org/10.1002/bem.21894>
- de Vocht, F., Liket, L., De Vocht, A., Mistry, T., Glover, P., Gowland, P., Kromhout, H., 2007. Exposure to alternating electromagnetic fields and effects on the visual and visuomotor systems. *BJR* 80, 822–828. <https://doi.org/10.1259/bjr/22263979>
- de Vocht, F., Olsen, R.G., 2016. Systematic Review of the Exposure Assessment and Epidemiology of High-Frequency Voltage Transients. *Front Public Health* 4. <https://doi.org/10.3389/fpubh.2016.00052>
- Dennis, J.A., Muirhead, C.R., Ennis, J.R., 1992. Human Health and Exposure to Electromagnetic Radiation. National Radiological Protection Board.
- Deutsche Gesetzliche Unfallversicherung, Börner, 2011. Elektromagnetische Felder an Anlagen, Maschinen und Geräten. IFA Report 5, 1–72.
- Dodinot, B., Godenir, J.-P., Costa, A.B., Zeller, C., Broschart, M., 1993. Electronic Article Surveillance: A Possible Danger for Pacemaker Patients. *Pacing and Clinical Electrophysiology* 16, 46–53. <https://doi.org/10.1111/j.1540-8159.1993.tb01534.x>
- Dorenkamp, M., Blaschke, F., Voigt, K., Fleck, E., Goetze, S., Roser, M., 2013. Electromagnetic Interference of Avalanche Transceivers with Cardiac Pacemakers and Implantable Cardioverter Defibrillators. *Pacing and Clinical Electrophysiology* 36, 931–938. <https://doi.org/10.1111/pace.12159>
- Dürrenberger, Klaus, Bundesamt für Energie, Bundesamt für Gesundheit, 2004. EMF von Energiesparlampen. Bundesbehörden der Schweizer Eidgenossenschaften 1–30.
- Elmas, O., 2016. Effects of electromagnetic field exposure on the heart: a systematic review. *Toxicol Ind Health* 32, 76–82. <https://doi.org/10.1177/0748233713498444>
- EMF-Portal, 2017. Das elektromagnetische Spektrum [WWW Document]. URL <https://www.emf-portal.org/de/cms/page/technology-general-electromagnetic-spectrum> (accessed 1.18.18).
- EN 45502-2-1:2004, 2004. Active implantable medical devices - Part 2-1: Particular requirements for active implantable medical devices intended to treat bradyarrhythmia (cardiac pacemakers). European Committee for Electrotechnical Standardization (CENELEC).

- EN 45502-2-2:2008, 2008. Active implantable medical devices - Part 2-2: Particular requirements for active implantable medical devices intended to treat tachyarrhythmia (includes implantable defibrillators). European Committee for Electrotechnical Standardization (CENELEC).
- EN 45502-2-3:2010, 2010. Active implantable medical devices - Part 2-3: Particular requirements for cochlear and auditory brainstem implant systems. European Committee for Electrotechnical Standardization (CENELEC).
- EPA, 1992. EMF in your Environment- Magnetic Field Measurements of Everyday Electrical Devices, 1st ed. EPA.
- EU, 2013. Directive 2013/35/EU on minimum health and safety requirements regarding the exposure of workers to the risks arising from physical agents (electromagnetic fields). Official Journal of the European Union L179/1-L179/21.
- EU, 1999. 1999/519/EC: Council recommendation of 12 July 1999 on the limitation of exposure of the general public to electromagnetic fields (0 Hz to 300 GHz). *Amtsblatt der Europäischen Gemeinschaften* 42, 59–70.
- Europäische Gemeinschaft, 1999. 1999/519/EG: Empfehlung des Rates vom 12. Juli 1999 zur Begrenzung der Exposition der Bevölkerung gegenüber elektromagnetischen Feldern (0 Hz - 300 GHz). *Amtsblatt Nr. L 199 vom 30/07/1999 S. 0059-0070*.
- European Commission, McKinlay AF, 1996. Non-ionizing radiation - Sources, exposure and health effects, 1st ed. Office for Official Publications of the European Communities.
- Farag, A.S., Dawoud, M.M., Selim, S.Z., Cheng, T.C., Marcus, A.M., Penn, D., 1998. Electromagnetic fields in the home. *Electric Power Systems Research* 45, 73–89. [https://doi.org/10.1016/S0378-7796\(97\)01224-8](https://doi.org/10.1016/S0378-7796(97)01224-8)
- Farrag, S.I., 2014. Numerical computation of specific absorption rate and induced current for workers exposed to static magnetic fields of MRI scanners, in: 2014 IEEE Conference on Biomedical Engineering and Sciences (IECBES). Presented at the 2014 IEEE Conference on Biomedical Engineering and Sciences (IECBES), pp. 612–617. <https://doi.org/10.1109/IECBES.2014.7047576>
- Flexikon DocCheck, 2018. Erythrozytensedimentationsrate [WWW Document]. URL <http://flexikon.doccheck.com/de/Erythrozytensedimentationsrate> (accessed 1.18.18).
- Floderus, B., Stenlund, C., Carlgren, F., 2002. Occupational exposures to high frequency electromagnetic fields in the intermediate range (>300 Hz–10 MHz). *Bioelectromagnetics* 23, 568–577. <https://doi.org/10.1002/bem.10050>
- Fugate, Jacobs, U.S. Department of Transportation-FRA, 2006. EMF Monitoring on Amtrak's Northeast Corridor: Post-Electrification Measurements and Analysis. U.S. Department of Transportation-FRA 1–206.
- Fukuta, M., Mizutani, N., Waseda, K., 2005. Influence of electromagnetic interference on implanted cardiac arrhythmia devices in and around a magnetically levitated linear motor car. *J Artif Organs* 8, 154–160. <https://doi.org/10.1007/s10047-005-0305-0>
- Gajšek, P., Ravazzani, P., Wiart, J., Grellier, J., Samaras, T., Thuróczy, G., 2015. Electromagnetic field exposure assessment in Europe radiofrequency fields (10 MHz–6 GHz). *Journal of Exposure Science and Environmental Epidemiology* 25, 37–44. <https://doi.org/10.1038/jes.2013.40>
- Glover, P.M., Eldeghaidy, S., Mistry, T.R., Gowland, P.A., 2007. Measurement of visual evoked potential during and after periods of pulsed magnetic field exposure. *J. Magn. Reson. Imaging* 26, 1353–1356. <https://doi.org/10.1002/jmri.21155>
- Goodman, E.M., Greenebaum, B., Marron, M.T., 1995. Effects of Electromagnetic Fields on Molecules and Cells, in: Jeon, K.W., Jarvik, J. (Eds.), *International Review of Cytology*. Academic Press, pp. 279–338. [https://doi.org/10.1016/S0074-7696\(08\)62489-4](https://doi.org/10.1016/S0074-7696(08)62489-4)
- Goodman, R., Henderson, A.S., 1986. Sine waves enhance cellular transcription. *Bioelectromagnetics* 7, 23–29. <https://doi.org/10.1002/bem.2250070104>

- Gottwald, E., Wobus, A.M., Guan, K., Sontag, W., Weibezahn, K.-F., Dertinger, H., 2002. Interferential Electric Field Treatment Revealed a Low Increase of Spontaneous Cardiac Differentiation but No Cyclic Amp Changes nor Induction of Cardiac-Specific Gene Expression in Pluripotent Embryonal Carcinoma P19 Cells. *Electromagnetic Biology and Medicine* 21, 105–118. <https://doi.org/10.1081/JBC-120006783>
- Greenspon, A.J., Patel, J.D., Lau, E., Ochoa, J.A., Frisch, D.R., Ho, R.T., Pavri, B.B., Kurtz, S.M., 2011. 16-Year Trends in the Infection Burden for Pacemakers and Implantable Cardioverter-Defibrillators in the United States: 1993 to 2008. *Journal of the American College of Cardiology* 58, 1001–1006. <https://doi.org/10.1016/j.jacc.2011.04.033>
- Gryz, K., Leszko, W., 2009. Magnetic field related to transient currents of electric transportation systems - Assessment of human's exposure in metro cars, in: 2009 2nd International Symposium on Applied Sciences in Biomedical and Communication Technologies. Presented at the 2009 2nd International Symposium on Applied Sciences in Biomedical and Communication Technologies, pp. 1–3. <https://doi.org/10.1109/ISABEL.2009.5373613>
- Guag, J., Addissie, B., Witters, D., 2017. Personal medical electronic devices and walk-through metal detector security systems: assessing electromagnetic interference effects. *BioMedical Engineering OnLine* 16, 33. <https://doi.org/10.1186/s12938-017-0328-9>
- Guldimann, Meier, Staatssekretariat für Wirtschaft SECO, Bundesamt für Gesundheit, 2011. Magnetfeld-Expositionen durch professionelle Induktionskochherde - Gesundheitsschutz am Arbeitsplatz. Messerhebung an Gastroarbeitsplätzen im Jahr 2009/2010. Bundesbehörden der Schweizer Eidgenossenschaften 1–93.
- Gustrau, F., Bahr, A., Goltz, S., Eggert, S., 2002. Active medical implants and occupational safety-measurement and numerical calculation of interference voltage. *Biomedizinische Technik/Biomedical Engineering* 47, 656–659.
- Gwechenberger, M., Rauscha, F., Stix, G., Schmid, G., Strametz-Juranek, J., 2006. Interference of programmed electromagnetic stimulation with pacemakers and automatic implantable cardioverter defibrillators. *Bioelectromagnetics* 27, 365–377. <https://doi.org/10.1002/bem.20217>
- Gye, M.C., Park, C.J., 2012. Effect of electromagnetic field exposure on the reproductive system. *Clinical and Experimental Reproductive Medicine* 39, 1–9. <https://doi.org/10.5653/cerm.2012.39.1.1>
- Habash, R.W., Brodsky, L.M., Leiss, W., Krewski, D., Repacholi, M., 2003a. Health risks of electromagnetic fields. Part I: Evaluation and assessment of electric and magnetic fields. *Critical Reviews™ in Biomedical Engineering* 31.
- Habash, R.W., Brodsky, L.M., Leiss, W., Krewski, D., Repacholi, M., 2003b. Health risks of electromagnetic fields. Part II: Evaluation and assessment of radio frequency radiation. *Critical Reviews™ in Biomedical Engineering* 31.
- Halgamuge, M.N., Abeyrathne, C.D., Mendis, P., 2010. Measurement and analysis of electromagnetic fields from trams, trains and hybrid cars. *Radiat Prot Dosimetry* 141, 255–268. <https://doi.org/10.1093/rpd/ncq168>
- Hareuveny, Sudan, Halgamuge, Yaffe, Tzabari, Namir, Kheifets, 2015. Characterization of Extremely Low Frequency Magnetic Fields from Diesel, Gasoline and Hybrid Cars under Controlled Conditions. *Int J Environ Res Public Health* 12, 1651–1666. <https://doi.org/10.3390/ijerph120201651>
- Harris, C., Boivin, W., Boyd, S., Coletta, J., Kerr, L., Kempa, K., Aronow, S., 2000. Electromagnetic field strength levels surrounding electronic article surveillance (EAS) systems. *Health Phys* 78, 21–27.
- Hatch, M., 1992. The epidemiology of electric and magnetic field exposures in the power frequency range and reproductive outcomes. *Paediatric and Perinatal Epidemiology* 6, 198–214. <https://doi.org/10.1111/j.1365-3016.1992.tb00761.x>

- Health Canada, 2015. Limits of Human Exposure to Radiofrequency Electromagnetic Energy in the Frequency Range from 3 kHz to 300 GHz - Safety Code 6 (2015). Safety Code of Health Canada 1–16.
- Health Council of the Netherlands, 2005. Electromagnetic Fields: Annual Update 2005. Jaarbericht van de Gezondheidsraad.
- Health Council of the Netherlands, 2000. Exposure to electromagnetic fields (0 Hz - 10 MHz). Jaarbericht van de Gezondheidsraad 1–68.
- Health Protection Agency, Advisory Group on Non-ionising Radiation AGNIR, 2012. Health Effects from Radiofrequency Electromagnetic Fields - RCE 20, 1st ed. Health Protection Agency.
- Hedjiedj, A., Goeury, C., Nadi, M., 2002. A methodological approach for the characterization of cardiac pacemaker immunity to low frequency interferences: case of 50 Hz, 60 Hz, 10 kHz and 25 kHz led disruptions. *Journal of Medical Engineering & Technology* 26, 223–227. <https://doi.org/10.1080/03091900210156896>
- Heynick, L.N., Johnston, S.A., Mason, P.A., 2003. Radio frequency electromagnetic fields: Cancer, mutagenesis, and genotoxicity. *Bioelectromagnetics* 24, S74–S100. <https://doi.org/10.1002/bem.10162>
- Heynick, L.N., Merritt, J.H., 2003. Radiofrequency fields and teratogenesis. *Bioelectromagnetics* 24, S174–S186. <https://doi.org/10.1002/bem.10127>
- Hikage, T., Nojima, T., Fujimoto, H., 2016. Active implantable medical device EMI assessment for wireless power transfer operating in LF and HF bands. *Phys. Med. Biol.* 61, 4522. <https://doi.org/10.1088/0031-9155/61/12/4522>
- Hirose, M., Hida, M., Sato, E., Kokubo, K., Nie, M., Kobayashi, H., 2005. Electromagnetic Interference of Implantable Unipolar Cardiac Pacemakers by an Induction Oven. *Pacing and Clinical Electrophysiology* 28, 540–548. <https://doi.org/10.1111/j.1540-8159.2005.09565.x>
- Hours, M., Khati, I., Hamelin, J., 2014. Interference between Active Implanted Medical Devices and Electromagnetic Field Emitting Devices is Rare but Real: Results of an Incidence Study in a Population of Physicians in France. *Pacing and Clinical Electrophysiology* 37, 290–296. <https://doi.org/10.1111/pace.12269>
- Huang, C.Y., Boys, J.T., Covic, G.A., Budhia, M., 2009. Practical considerations for designing IPT system for EV battery charging, in: 2009 IEEE Vehicle Power and Propulsion Conference. Presented at the 2009 IEEE Vehicle Power and Propulsion Conference, pp. 402–407. <https://doi.org/10.1109/VPPC.2009.5289821>
- Hunt, R.W., Zavalin, A., Bhatnagar, A., Chinnasamy, S., Das, K.C., 2009. Electromagnetic Biostimulation of Living Cultures for Biotechnology, Biofuel and Bioenergy Applications. *International Journal of Molecular Sciences* 10, 4515–4558. <https://doi.org/10.3390/ijms10104515>
- Huuskonen, H., Lindbohm, M.-L., Juutilainen, J., 1998. Teratogenic and reproductive effects of low-frequency magnetic fields. *Mutation Research/Reviews in Mutation Research* 410, 167–183.
- IARC, 2013. Non-ionizing radiation, Part 2: Radiofrequency electromagnetic fields. *IARC Monogr Eval Carcinog Risks Hum* 102, 1–460.
- IARC, 2002. Non-ionizing radiation, Part 1: static and extremely low-frequency (ELF) electric and magnetic fields. *IARC Monogr Eval Carcinog Risks Hum* 80, 1–395.
- Ibrahim, M., Pichon, L., Bernard, L., Razek, A., Houivet, J., Cayol, O., 2015. Advanced Modeling of a 2-kW Series–Series Resonating Inductive Charger for Real Electric Vehicle. *IEEE Transactions on Vehicular Technology* 64, 421–430. <https://doi.org/10.1109/TVT.2014.2325614>
- ICNIRP, 2017. ICNIRP Statement on Diagnostic Devices Using Non-ionizing Radiation: Existing Regulations and Potential Health Risks. *Health Phys* 112, 305–321. <https://doi.org/10.1097/HP.0000000000000654>

- ICNIRP, 2010. Guidelines for limiting exposure to time-varying electric and magnetic fields (1 Hz to 100 kHz). *Health Phys* 99, 818–836. <https://doi.org/10.1097/HP.0b013e3181f06c86>
- ICNIRP, 2009. Exposure to high frequency electromagnetic fields, biological effects and health consequences (100 kHz-300 GHz). International Commission on Non-Ionizing Radiation Protection.
- ICNIRP, 2008. ICNIRP statement on EMF-emitting new technologies. *Health Phys* 94, 376–392. <https://doi.org/10.1097/01.HP.0000304155.41715.73>
- ICNIRP, 2004. ICNIRP statement related to the use of security and similar devices utilizing electromagnetic fields. *Health Phys* 87, 187–196.
- ICNIRP, 2003. Exposure to Static and Low Frequency Electromagnetic Fields, Biological Effects and Health Consequences (0-100 KHz).
- ICNIRP, 1998. Guidelines for limiting exposure to time-varying electric, magnetic, and electromagnetic fields (up to 300 GHz). *Health Phys* 74, 494–522.
- IEEE C95.1-2005, 2006. IEEE Standard for Safety Levels With Respect to Human Exposure to Radio Frequency Electromagnetic Fields, 3 kHz to 300 GHz. IEEE Std C95.1-2005 (Revision of IEEE Std C95.1-1991) 0\_1-238. <https://doi.org/10.1109/IEEESTD.2006.99501>
- IEEE C95.1-2345-2014, 2014. IEEE Standard for Military Workplaces – Force Health Protection Regarding Personnel Exposure to Electric, Magnetic, and Electromagnetic Fields, 0 Hz to 300 GHz. IEEE Std C95.1-2345-2014 1–69. <https://doi.org/10.1109/IEEESTD.2014.6820718>
- IEEE C95.6-2002, 2002. IEEE Standard for Safety Levels With Respect to Human Exposure to Electromagnetic Fields, 0-3 kHz. IEEE Std C95.6-2002 1–43. <https://doi.org/10.1109/IEEESTD.2002.94143>
- IEH, Hofmann, Mohrmann, Rathke, 2012. BMU-Studie: Ökologische Auswirkungen von 380-kV-Erdleitungen und HGÜ-Erdleitungen (Bericht der Arbeitsgruppe Technik/Ökonomie) Band 4.3, 1st ed. Cuvillier Verlag.
- Irnich, W., Bernstein, A.D., 2006. Do induction cooktops interfere with cardiac pacemakers? *Europace* 8, 377–384. <https://doi.org/10.1093/europace/eul014>
- Ishihara, S., Onishi, T., Hirata, A., 2015. Magnetic Field Measurement for Human Exposure Assessment near Wireless Power Transfer Systems in Kilohertz and Megahertz Bands. *IEICE Transactions on Communications* E98.B, 2470–2476. <https://doi.org/10.1587/transcom.E98.B.2470>
- ISO 14117:2012, 2012. Active implantable medical devices - Electromagnetic compatibility - EMC test protocols for implantable cardiac pacemakers, implantable cardioverter defibrillators and cardiac resynchronization devices. International Organization for Standardization (ISO).
- Israel, M., Zaryabova, V., Ivanova, M., 2013. Electromagnetic field occupational exposure: Non-thermal vs. thermal effects. *Electromagnetic Biology and Medicine* 32, 145–154. <https://doi.org/10.3109/15368378.2013.776349>
- Joglar, J.A., Nguyen, C., Garst, D.M., Katz, W.F., 2009. Safety of Electromagnetic Articulography in Patients With Pacemakers and Implantable Cardioverter-Defibrillators. *J Speech Lang Hear Res* 52, 1082–1087. [https://doi.org/10.1044/1092-4388\(2009/08-0028\)](https://doi.org/10.1044/1092-4388(2009/08-0028))
- Jokela, K., Puranen, L., Gandhi, O.P., 1994. Radio frequency currents induced in the human body for medium-frequency/high-frequency broadcast antennas. *Health Phys* 66, 237–244.
- Joosten, S., Pammler, K., Silny, J., 2009. The influence of anatomical and physiological parameters on the interference voltage at the input of unipolar cardiac pacemakers in low frequency electric fields. *Phys. Med. Biol.* 54, 591. <https://doi.org/10.1088/0031-9155/54/3/008>

- Joseph, W., Goeminne, F., Vermeeren, G., Verloock, L., Martens, L., 2012a. Occupational and public field exposure from communication, navigation, and radar systems used for air traffic control. *Health Phys* 103, 750–762. <https://doi.org/10.1097/HP.0b013e31825f78d5>
- Joseph, W., Goeminne, F., Vermeeren, G., Verloock, L., Martens, L., 2012b. In situ exposure to non-directional beacons for air traffic control. *Bioelectromagnetics* 33, 274–277. <https://doi.org/10.1002/bem.21706>
- Joseph, W., Vermeeren, G., Verloock, L., Goeminne, F., 2012c. In situ magnetic field exposure and ICNIRP-based safety distances for electronic article surveillance systems. *Radiat Prot Dosimetry* 148, 420–427. <https://doi.org/10.1093/rpd/ncr206>
- Juutilainen, J., 2005. Developmental effects of electromagnetic fields. *Bioelectromagnetics* 26, S107–S115. <https://doi.org/10.1002/bem.20125>
- Juutilainen, J., 2003. Developmental effects of extremely low frequency electric and magnetic fields. *Radiat Prot Dosimetry* 106, 385–390. <https://doi.org/10.1093/oxfordjournals.rpd.a006376>
- Juutilainen, J., 1991. Effects of low-frequency magnetic fields on embryonic development and pregnancy. *Scandinavian Journal of Work, Environment & Health* 17, 149–158.
- Juutilainen, J., Björk, E., Saali, K., 1988. Epilepsy and electromagnetic fields: effects of simulated atmospherics and 100-Hz magnetic fields on audiogenic seizure in rats. *Int J Biometeorol* 32, 17–20. <https://doi.org/10.1007/BF01623987>
- Juutilainen, J., Lahtinen, T., 1985. Effects of low frequency electric fields on the sedimentation rate of human blood. Preliminary observations. *Int J Biometeorol* 29, 243–252. <https://doi.org/10.1007/BF02189656>
- Juutilainen, J., Saali, K., 1986. Development of chick embryos in 1 Hz to 100 kHz magnetic fields. *Radiat Environ Biophys* 25, 135–140. <https://doi.org/10.1007/BF01211737>
- Kainz, W., Casamento, J.P., Ruggera, P.S., Chan, D.D., Witters, D.M., 2005. Implantable cardiac pacemaker electromagnetic compatibility testing in a novel security system Simulator. *IEEE Transactions on Biomedical Engineering* 52, 520–530. <https://doi.org/10.1109/TBME.2004.843293>
- Kainz, W., Chan, D.D., Casamento, J.P., Bassen, H.I., 2003. Calculation of induced current densities and specific absorption rates (SAR) for pregnant women exposed to hand-held metal detectors. *Phys. Med. Biol.* 48, 2551. <https://doi.org/10.1088/0031-9155/48/15/319>
- Kameda, T., Ohkuma, K., Ishii, N., Sano, N., Ogura, H., Terada, K., 2012. Electric toothbrushes induce electric current in fixed dental appliances by creating magnetic fields. *Dental Materials Journal* 31, 856–862. <https://doi.org/10.4012/dmj.2012-129>
- Kang, W.G., Jun, H.Y., Park, Y.H., Pack, J.K., 2013. Investigation of the assessment method for human exposure from a wireless power transfer system, in: 2013 Asia-Pacific Microwave Conference Proceedings (APMC). Presented at the 2013 Asia-Pacific Microwave Conference Proceedings (APMC), pp. 836–838. <https://doi.org/10.1109/APMC.2013.6694950>
- Karpowicz, J., Gryz, K., 2013. The pattern of exposure to static magnetic field of nurses involved in activities related to contrast administration into patients diagnosed in 1.5 T MRI scanners. *Electromagnetic Biology and Medicine* 32, 182–191. <https://doi.org/10.3109/15368378.2013.776428>
- Kaune, W. t., Miller, M. c., Linet, M. s., Hatch, E. e., Kleinerman, R. a., Wacholder, S., Mohr, A. h., Tarone, R. e., Haines, C., 2002. Magnetic fields produced by hand held hair dryers, stereo headsets, home sewing machines, and electric clocks. *Bioelectromagnetics* 23, 14–25. <https://doi.org/10.1002/bem.94>
- Kavet, R., Tell, R.A., 1991. VDTs: Field Levels, Epidemiology, and Laboratory Studies. *Health Physics* 61, 47.

- Keshishian, J.M., Smyth, N.P., Hood, O.C., Hoffman, A.A., Baker, N.R., Podolak, E., Basu, A.P., 1972. The behavior of triggered unipolar pacemakers in active magnetic fields. *J Thorac Cardiovasc Surg* 64, 772–778.
- Kim, H., Song, C., Kim, J., 2015. Coil design for high efficiency and low magnetic field leakage of wireless charging system for electric vehicle, in: 2015 IEEE Wireless Power Transfer Conference (WPTC). Presented at the 2015 IEEE Wireless Power Transfer Conference (WPTC), pp. 1–3. <https://doi.org/10.1109/WPT.2015.7140180>
- Kim, Y.S., Cho, Y.S., 2001. Exposure of Workers to Extremely Low Frequency Magnetic Fields and Electric Appliances. *Journal of Occupational Health* 43, 141–149. <https://doi.org/10.1539/joh.43.141>
- Kirsner, R.S., Federman, D.G., 1998. Video display terminals: risk of electromagnetic radiation. *South Med J* 91, 12–16.
- Knave, B., 1994. Electric and magnetic fields and health outcomes - an overview. *Scandinavian Journal of Work, Environment & Health* 20, 78–89.
- Koch, W.E., Koch, B.A., Martin, A.H., Moses, G.C., 1993. Examination of the development of chicken embryos following exposure to magnetic fields. *Comparative Biochemistry and Physiology Part A: Physiology* 105, 617–624. [https://doi.org/10.1016/0300-9629\(93\)90261-2](https://doi.org/10.1016/0300-9629(93)90261-2)
- Kolb, C., Schmieder, S., Lehmann, G., Zrenner, B., Karch, M.R., Plewan, A., Schmitt, C., 2003. Do airport metal detectors interfere with implantable pacemakers or cardioverter-defibrillators? *Journal of the American College of Cardiology* 41, 2054–2059. [https://doi.org/10.1016/S0735-1097\(03\)00424-8](https://doi.org/10.1016/S0735-1097(03)00424-8)
- Kondur, A.K., Afonso, L.C., Berenbom, L.D., Lakkireddy, D.R., 2008. Implantable Cardioverter Defibrillators Save Lives from Lightning-Related Electrocution Too! *Pacing and Clinical Electrophysiology* 31, 256–257. <https://doi.org/10.1111/j.1540-8159.2007.00980.x>
- König, H.L., Krüger, A.P., Lang, S., Sönning, W., 1981. *Biologic Effects of Environmental Electromagnetism*. Springer Science & Business Media.
- Kos, B., Valič, B., Miklavčič, D., Kotnik, T., Gajšek, P., 2011. Pre- and post-natal exposure of children to EMF generated by domestic induction cookers. *Phys. Med. Biol.* 56, 6149. <https://doi.org/10.1088/0031-9155/56/19/001>
- Koyama, S., Narita, E., Shinohara, N., Miyakoshi, J., 2014. Effect of an Intermediate-Frequency Magnetic Field of 23 kHz at 2 mT on Chemotaxis and Phagocytosis in Neutrophil-Like Differentiated Human HL-60 Cells. *International Journal of Environmental Research and Public Health* 11, 9649–9659. <https://doi.org/10.3390/ijerph110909649>
- Krylov, V.V., 2010. Effects of electromagnetic fields on parthenogenic eggs of *Daphnia magna* Straus. *Ecotoxicology and Environmental Safety* 73, 62–66. <https://doi.org/10.1016/j.ecoenv.2009.03.005>
- Krylov, V.V., Chebotareva, Y.V., Izyumov, Y.G., 2016. Delayed consequences of extremely low-frequency magnetic fields and the influence of adverse environmental conditions on roach *Rutilus rutilus* embryos. *J Fish Biol* 88, 1283–1300. <https://doi.org/10.1111/jfb.12869>
- Kumari, K., Capstick, M., Cassara, A.M., Herrala, M., Koivisto, H., Naarala, J., Tanila, H., Viluksela, M., Juutilainen, J., 2017. Effects of intermediate frequency magnetic fields on male fertility indicators in mice. *Environmental Research* 157, 64–70. <https://doi.org/10.1016/j.envres.2017.05.014>
- Kurokawa, Y., Nitta, H., Kabuto, M., 2004. Evaluation of residential exposure to intermediate frequency magnetic fields. *Arch. Environ. Health* 59, 693–699. <https://doi.org/10.1080/00039890409602955>

- Laakso, I., Hirata, A., 2013. Evaluation of the induced electric field and compliance procedure for a wireless power transfer system in an electrical vehicle. *Phys. Med. Biol.* 58, 7583. <https://doi.org/10.1088/0031-9155/58/21/7583>
- Laakso, I., Hirata, A., Fujiwara, O., 2014. Computational dosimetry for wireless charging of an electrical vehicle, in: 2014 International Symposium on Electromagnetic Compatibility, Tokyo. Presented at the 2014 International Symposium on Electromagnetic Compatibility, Tokyo, pp. 202–205.
- Laakso, I., Kännälä, S., Jokela, K., 2013. Computational dosimetry of induced electric fields during realistic movements in the vicinity of a 3 T MRI scanner. *Phys. Med. Biol.* 58, 2625. <https://doi.org/10.1088/0031-9155/58/8/2625>
- Laakso, I., Tsuchida, S., Hirata, A., Kamimura, Y., 2012. Evaluation of SAR in a human body model due to wireless power transmission in the 10 MHz band. *Phys. Med. Biol.* 57, 4991. <https://doi.org/10.1088/0031-9155/57/15/4991>
- Lacy-Hulbert, A., Metcalfe, J.C., Hesketh, R., 1998. Biological responses to electromagnetic fields. *FASEB J.* 12, 395–420.
- Lahor-Soler, E., Miranda-Rius, J., Brunet-Llobet, L., Sabaté de la Cruz, X., 2015. Capacity of dental equipment to interfere with cardiac implantable electrical devices. *Eur J Oral Sci* 123, 194–201. <https://doi.org/10.1111/eos.12183>
- Landesanstalt für Umwelt, M. und N.B.-W., Bayerisches Landesamt für Umwelt, 2010. *Elektromagnetische Felder im Alltag - Aktuelle Informationen über Quellen, Einsatz und Wirkungen*, 1st ed. LUBW Landesanstalt für Umwelt, Messungen und Naturschutz Baden-Württemberg und Bayerisches Landesamt für Umwelt.
- Landesanstalt für Umweltschutz Baden-Württemberg, 2002. *Elektromagnetische Felder im Alltag*. LUBW 1–82.
- Lee, S., Fu, K., Kohno, T., Ransford, B., Maisel, W.H., 2009. Clinically significant magnetic interference of implanted cardiac devices by portable headphones. *Heart Rhythm* 6, 1432–1436. <https://doi.org/10.1016/j.hrthm.2009.07.003>
- Lee, W., Yang, K.-L., 2014. Using medaka embryos as a model system to study biological effects of the electromagnetic fields on development and behavior. *Ecotoxicology and Environmental Safety* 108, 187–194. <https://doi.org/10.1016/j.ecoenv.2014.06.035>
- Leitgeb, N., Cech, R., Schröttner, J., 2008a. Electric emissions from electrical appliances. *Radiat Prot Dosimetry* 129, 446–455. <https://doi.org/10.1093/rpd/ncm479>
- Leitgeb, N., Cech, R., Schröttner, J., Lehofer, P., Schmidpeter, U., Rampetsreiter, M., 2008b. Magnetic emission ranking of electrical appliances. A comprehensive market survey. *Radiat Prot Dosimetry* 129, 439–445. <https://doi.org/10.1093/rpd/ncm460>
- Leitgeb, N., Cech, R., Schröttner, J., Lehofer, P., Schmidpeter, U., Rampetsreiter, M., 2008c. Magnetic emissions of electric appliances. *International Journal of Hygiene and Environmental Health* 211, 69–73. <https://doi.org/10.1016/j.ijheh.2007.03.005>
- Leitgeb, N., Niedermayr, F., Loos, G., 2013. Impact of EAS Systems on Implanted Cardiac Pacemakers and Defibrillators 2013. <https://doi.org/10.4236/jemaa.2013.52011>
- Levallois, P., 2002. Hypersensitivity of human subjects to environmental electric and magnetic field exposure: a review of the literature. *Environ Health Perspect* 110, 613–618.
- Levin, M., Ernst, S.G., 1995. Applied AC and DC magnetic fields cause alterations in the mitotic cycle of early sea urchin embryos. *Bioelectromagnetics* 16, 231–240. <https://doi.org/10.1002/bem.2250160405>
- Lewicka, M., Henrykowska, G.A., Pacholski, K., Szczyński, A., Dziejczak-Buczyńska, M., Buczyński, A., 2015. The impact of electromagnetic radiation of different parameters on platelet oxygen metabolism-in vitro studies. *Adv Clin Exp Med* 24, 31–35.
- Li, C., Wu, T., 2015. Dosimetry for infant exposures to electronic article surveillance system: Posture, physical dimension and anatomy. *Bioelectromagnetics* 36, 319–324. <https://doi.org/10.1002/bem.21901>

- Li, C., Wu, T., 2014. Numerical evaluation of exposure to the electromagnetic fields of an electronic article surveillance system with postured infant model, in: 2014 International Symposium on Electromagnetic Compatibility, Tokyo. Presented at the 2014 International Symposium on Electromagnetic Compatibility, Tokyo, pp. 206–209.
- Li, Q., Gandhi, O.P., 2005. Calculation of magnetic field-induced current densities for humans from EAS countertop activation/deactivation devices that use ferromagnetic cores. *Phys. Med. Biol.* 50, 373. <https://doi.org/10.1088/0031-9155/50/2/014>
- Liljestrand, B., Sandström, M., Mild, K.H., 2003. RF Exposure During Use of Electrosurgical Units. *Electromagnetic Biology and Medicine* 22, 127–132. <https://doi.org/10.1081/JBC-120024622>
- Lindbohm, M.-L., Hietanen, M., 1995. Magnetic Fields of Video Display Terminals and Pregnancy Outcome. *Journal of Occupational and Environmental Medicine* 37, 952.
- Litvak, E., Foster, K. r., Repacholi, M. h., 2002. Health and safety implications of exposure to electromagnetic fields in the frequency range 300 Hz to 10 MHz. *Bioelectromagnetics* 23, 68–82. <https://doi.org/10.1002/bem.99>
- Liu, F., Zhao, H., Crozier, S., 2003. Calculation of electric fields induced by body and head motion in high-field MRI. *Journal of Magnetic Resonance* 161, 99–107. [https://doi.org/10.1016/S1090-7807\(02\)00180-5](https://doi.org/10.1016/S1090-7807(02)00180-5)
- Low, L., Ruddle, A.R., 2013. Investigation of human exposure due to unintended electromagnetic emissions in electric vehicles, in: 2013 7th European Conference on Antennas and Propagation (EuCAP). Presented at the 2013 7th European Conference on Antennas and Propagation (EuCAP), pp. 1285–1289.
- Lucas, E.H., Johnson, D., McELROY, B.P., 1994. The Effects of Electronic Article Surveillance Systems on Permanent Cardiac Pacemakers: An In Vitro Study. *Pacing and Clinical Electrophysiology* 17, 2021–2026. <https://doi.org/10.1111/j.1540-8159.1994.tb03793.x>
- Maaroufi, K., Save, E., Poucet, B., Sakly, M., Abdelmelek, H., Had-Aissouni, L., 2011. Oxidative stress and prevention of the adaptive response to chronic iron overload in the brain of young adult rats exposed to a 150 kilohertz electromagnetic field. *Neuroscience* 186, 39–47. <https://doi.org/10.1016/j.neuroscience.2011.04.003>
- Mader, D.L., Peralta, S.B., 1992. Residential exposure to 60-Hz magnetic fields from appliances. *Bioelectromagnetics* 13, 287–301. <https://doi.org/10.1002/bem.2250130404>
- Magnani, A., Matheoud, R., Brambilla, M., Valzano, S., Occhetta, E., Marino, P., Balbo, P., 2012. In vitro tests of electromagnetic interference of electromagnetic navigational bronchoscopy to implantable cardioverter defibrillators. *Europace* 14, 1054–1059. <https://doi.org/10.1093/europace/eur417>
- Maiorana, C., Grossi, G.B., Garramone, R.A., Manfredini, R., Santoro, F., 2013. Do ultrasonic dental scalers interfere with implantable cardioverter defibrillators? An in vivo investigation. *Journal of Dentistry* 41, 955–959. <https://doi.org/10.1016/j.jdent.2013.08.006>
- Malíková, I., Janousek, L., Fantova, V., Jíra, J., Kříha, V., 2015. Impact of Low Frequency Electromagnetic Field Exposure on the Candida Albicans. *Journal of Electrical Engineering* 66, 108.
- Mantiply, E.D., Pohl, K.R., Poppell, S.W., Murphy, J.A., 1997. Summary of measured radiofrequency electric and magnetic fields (10 kHz to 30 GHz) in the general and work environment. *Bioelectromagnetics* 18, 563–577. [https://doi.org/10.1002/\(SICI\)1521-186X\(1997\)18:8<563::AID-BEM5>3.0.CO;2-0](https://doi.org/10.1002/(SICI)1521-186X(1997)18:8<563::AID-BEM5>3.0.CO;2-0)
- Marcus, M., 1990. Epidemiologic studies of VDT use and pregnancy outcome. *Reproductive Toxicology* 4, 51–56. [https://doi.org/10.1016/0890-6238\(90\)90081-6](https://doi.org/10.1016/0890-6238(90)90081-6)

- Marcus, M., McChesney, R., Golden, A., Landrigan, P., 2000. Video display terminals and miscarriage. *J Am Med Womens Assoc* (1972) 55, 84–8, 105.
- Mattei, E., Censi, F., Delogu, A., Ferrara, A., Calcagnini, G., 2013. Setups for in vitro assessment of RFID interference on pacemakers. *Phys. Med. Biol.* 58, 5301. <https://doi.org/10.1088/0031-9155/58/15/5301>
- Mattei, E., Lucano, E., Censi, F., Triventi, M., Calcagnini, G., 2016. Provocative Testing for the Assessment of the Electromagnetic Interference of RFID and NFC Readers on Implantable Pacemaker. *IEEE Transactions on Electromagnetic Compatibility* 58, 314–322. <https://doi.org/10.1109/TEMC.2015.2504602>
- MAUDE, n.d. Manufacturer and User Facility Device Experience [WWW Document]. URL <https://www.accessdata.fda.gov/scripts/cdrh/cfdocs/cfMAUDE/search.CFM> (accessed 2.7.18).
- McCann, J., Dietrich, F., Rafferty, C., 1998. The genotoxic potential of electric and magnetic fields: an update. *Mutation Research/Reviews in Mutation Research* 411, 45–86. [https://doi.org/10.1016/S1383-5742\(98\)00006-4](https://doi.org/10.1016/S1383-5742(98)00006-4)
- McCann, J., Dietrich, F., Rafferty, C., Martin, A.O., 1993. A critical review of the genotoxic potential of electric and magnetic fields. *Mutation Research/Reviews in Genetic Toxicology* 297, 61–95. [https://doi.org/10.1016/0165-1110\(93\)90008-B](https://doi.org/10.1016/0165-1110(93)90008-B)
- Mcivor, M.E., Reddinger, J., Floden, E., Sheppard, R.C., Johnson, D., Becker, G.I., Mayotte, M., 1998. Study of Pacemaker and Implantable Cardioverter Defibrillator Triggering by Electronic Article Surveillance Devices (SPICED TEAS). *Pacing and Clinical Electrophysiology* 21, 1847–1861. <https://doi.org/10.1111/j.1540-8159.1998.tb00002.x>
- McKay, J.C., Prato, F.S., Thomas, A.W., 2007. A literature review: The effects of magnetic field exposure on blood flow and blood vessels in the microvasculature. *Bioelectromagnetics* 28, 81–98. <https://doi.org/10.1002/bem.20284>
- Mild, K.H., Oberg, P.A., 1982. Neurophysiological effects of electromagnetic fields. A critical review. *Electroencephalography and clinical neurophysiology. Supplement* 36, 715.
- Misiri, J., Kusumoto, F., Goldschlager, N., 2012a. Electromagnetic Interference and Implanted Cardiac Devices: The Medical Environment (Part II). *Clin Cardiol* 35, 321–328. <https://doi.org/10.1002/clc.21997>
- Misiri, J., Kusumoto, F., Goldschlager, N., 2012b. Electromagnetic Interference and Implanted Cardiac Devices: The Nonmedical Environment (Part I). *Clin Cardiol* 35, 276–280. <https://doi.org/10.1002/clc.21998>
- Miyakoshi, J., Horiuchi, E., Nakahara, T., Sakurai, T., 2007. Magnetic fields generated by an induction heating (IH) cook top do not cause genotoxicity in vitro. *Bioelectromagnetics* 28, 529–537. <https://doi.org/10.1002/bem.20334>
- Mobashsher, A.T., Abbosh, A.M., 2015. Artificial Human Phantoms: Human Proxy in Testing Microwave Apparatuses That Have Electromagnetic Interaction with the Human Body. *IEEE Microwave Magazine* 16, 42–62. <https://doi.org/10.1109/MMM.2015.2419772>
- Moher, D., Liberati, A., Tetzlaff, J., Altman, D.G., The PRISMA Group, 2009. Preferred Reporting Items for Systematic Reviews and Meta-Analyses: The PRISMA Statement. *PLOS Medicine* 6. <https://doi.org/10.1371/journal.pmed.1000097>
- Molla-Djafari, H., Rabitsch, G., Neubauer, G., 2008. Belastung von Schweisssern durch elektromagnetische Felder am Arbeitsplatz. Vienna, Austria: Allgemeine Unfallversicherungsanstalt.
- Molla-Djafari, H., Winkler, N., Neubauer, G., Pühringer, K.-D., Garn, H., Preiß, H., Schmid, G., Heissensberger, K., 1998. Messung und sicherheitstechnische Beurteilung der elektromagnetischen Felder an verschiedenen elektrochirurgischen Generatoren. AUYA Report Nr. 22. Allgemeine Unfallversicherungsanstalt, Wien.

- Mond, H.G., Proclemer, A., 2011. The 11th World Survey of Cardiac Pacing and Implantable Cardioverter-Defibrillators: Calendar Year 2009—A World Society of Arrhythmia's Project. *Pacing and Clinical Electrophysiology* 34, 1013–1027. <https://doi.org/10.1111/j.1540-8159.2011.03150.x>
- Morales, J., Garcia, M., Perez, C., Valverde, J.V., Lopez-Sanchez, C., Garcia-Martinez, V., Quesada, J.L., 2009. Low frequency electromagnetic radiation and hearing. *The Journal of Laryngology & Otology* 123, 1204–1211. <https://doi.org/10.1017/S0022215109005684>
- Morandi, M.A., Pak, C.M., Garen, R.P., Caren, L.D., 1996. Lack of an EMF-induced genotoxic effect in the ames assay. *Life Sciences* 59, 263–271. [https://doi.org/10.1016/0024-3205\(96\)00291-3](https://doi.org/10.1016/0024-3205(96)00291-3)
- Moreno-Torres, P.C., Lourd, J., Lafoz, M., Arribas, J.R., 2013. Evaluation of the Magnetic Field Generated by the Inverter of an Electric Vehicle. *IEEE Transactions on Magnetics* 49, 837–844. <https://doi.org/10.1109/TMAG.2012.2214787>
- Moulder, J.E., 1998. Power-Frequency Fields and Cancer. *CRB* 26. <https://doi.org/10.1615/CritRevBiomedEng.v26.i1-2.10>
- Mugica, J., Henry, L., Podeur, H., 2000. Study of Interactions Between Permanent Pacemakers and Electronic Antitheft Surveillance Systems. *Pacing and Clinical Electrophysiology* 23, 333–337. <https://doi.org/10.1111/j.1540-8159.2000.tb06758.x>
- Murbach, M., Neufeld, E., Kainz, W., Pruessmann, K.P., Kuster, N., 2014. Whole-body and local RF absorption in human models as a function of anatomy and position within 1.5T MR body coil. *Magn. Reson. Med.* 71, 839–845. <https://doi.org/10.1002/mrm.24690>
- Nadakuduti, J., Douglas, M., Capstick, M., Kühn, S., Benkler, S., Kuster, N., 2010. Assessment of EM Exposure of Energy-Saving Bulbs & Possible Mitigation Strategies.
- Nadakuduti, J., Douglas, M., Capstick, M., Kühn, S., Kuster, N., 2012. Application of an induced field sensor for assessment of electromagnetic exposure from compact fluorescent lamps. *Bioelectromagnetics* 33, 166–175. <https://doi.org/10.1002/bem.20696>
- Nadakuduti, J., Douglas, M., Lu, L., Christ, A., Guckian, P., Kuster, N., 2015. Compliance Testing Methodology for Wireless Power Transfer Systems. *IEEE Transactions on Power Electronics* 30, 6264–6273. <https://doi.org/10.1109/TPEL.2015.2400455>
- Nakagawa, Koana, 1993. EMF Issues with Maglev in Japan. *Electricity and Magnetism in Biology and Medicine: First World Congress for Electricity and Magnetism in Biology and Medicine*, Orlando, Florida, 1992 264–266.
- Nakagawa, M., 1997. A Study on Extremely Low-Frequency Electric and Magnetic Fields and Cancer: Discussion of EMF Safety Limits. *Journal of Occupational Health* 39, 18–28. <https://doi.org/10.1539/joh.39.18>
- Nakasono, S., Ikehata, M., Dateki, M., Yoshie, S., Shigemitsu, T., Negishi, T., 2008. Intermediate frequency magnetic fields do not have mutagenic, co-mutagenic or gene conversion potentials in microbial genotoxicity tests. *Mutation Research/Genetic Toxicology and Environmental Mutagenesis* 649, 187–200. <https://doi.org/10.1016/j.mrgentox.2007.09.003>
- Napp, A., Joosten, S., Stunder, D., Knackstedt, C., Zink, M., Bellmann, B., Marx, N., Schauerte, P., Silny, J., 2014. Electromagnetic Interference With Implantable Cardioverter-Defibrillators at Power Frequency An In Vivo Study. *Circulation* 129, 441–450.
- Napp, A., Stunder, D., Maytin, M., Kraus, T., Marx, N., Driessen, S., 2015. Are patients with cardiac implants protected against electromagnetic interference in daily life and occupational environment? *Eur Heart J* 36, 1798–1804. <https://doi.org/10.1093/eurheartj/ehv135>

- National Research Council, 1997. Possible health effects of exposure to residential electric and magnetic fields, 1st ed. National Academies Press.
- Navarro, E.A., Gomez-Perretta, C., Montes, F., 2016. Low intensity magnetic field influences short-term memory: A study in a group of healthy students. *Bioelectromagnetics* 37, 37–48. <https://doi.org/10.1002/bem.21944>
- Neitzke, Osterhoff, Voigt, 2006. EMF-Handbuch Elektromagnetische Felder: Quellen, Risiken, Schutz, 1st ed. ECOLOG-Institut für sozial-ökologische Forschung und Bildung gGmbH.
- Nishimura, I., Imai, S., Negishi, T., 2009. Lack of chick embryotoxicity after 20 kHz, 1.1 mT magnetic field exposure. *Bioelectromagnetics* 30, 573–582. <https://doi.org/10.1002/bem.20513>
- Nishimura, I., Oshima, A., Shibuya, K., Mitani, T., Negishi, T., 2016. Acute and subchronic toxicity of 20 kHz and 60 kHz magnetic fields in rats. *J. Appl. Toxicol.* 36, 199–210. <https://doi.org/10.1002/jat.3161>
- Nishimura, I., Oshima, A., Shibuya, K., Mitani, T., Negishi, T., 2012. Absence of reproductive and developmental toxicity in rats following exposure to a 20-kHz or 60-kHz magnetic field. *Regulatory Toxicology and Pharmacology* 64, 394–401. <https://doi.org/10.1016/j.yrtph.2012.10.005>
- Nishimura, I., Oshima, A., Shibuya, K., Negishi, T., 2011. Lack of teratological effects in rats exposed to 20 or 60 kHz magnetic fields. *Birth Defects Research Part B: Developmental and Reproductive Toxicology* 92, 469–477. <https://doi.org/10.1002/bdrb.20316>
- Nishimura, I., Tanaka, K., Negishi, T., 2013. Intermediate frequency magnetic field and chick embryotoxicity. *Congenital Anomalies* 53, 115–121. <https://doi.org/10.1111/cga.12018>
- NRPB, 2004. Review of the scientific evidence for limiting exposure to electromagnetic fields (0–300 GHz). *Doc NRPB* 15, 1–224.
- NRPB, 2001. ELF electromagnetic fields and the risk of cancer. *Doc NRPB* 12, 1–179.
- NRPB, 1994. Health Effects Related to the Use of Visual Display Units: Report of an Advisory Group on Non-Ionising Radiation. *Doc NRPB* 5, 1–81.
- NRPB, 1993. Board statement on Restrictions on Human Exposure to Static and Time Varying Electromagnetic Fields and Radiation. *Doc NRPB* 4, 1–69.
- NTP, 2015a. Handbook for Conducting a Literature-Based Health Assessment Using OHAT Approach for Systematic Review and Evidence Integration. Office of Health Assessment and Translation (OHAT).
- NTP, 2015b. OHAT Risk of Bias Rating Tool for Human and Animal Studies. Office of Health Assessment and Translation (OHAT).
- Ochatt, S., 2013. Plant cell electrophysiology: Applications in growth enhancement, somatic hybridisation and gene transfer. *Biotechnology Advances* 31, 1237–1246. <https://doi.org/10.1016/j.biotechadv.2013.03.008>
- Panagopoulos, D.J., 2016. Pulsed electric field increases reproduction. *International Journal of Radiation Biology* 92, 94–106. <https://doi.org/10.3109/09553002.2016.1115911>
- Pantchenko, O.S., Seidman, S.J., Guag, J.W., 2011a. Analysis of induced electrical currents from magnetic field coupling inside implantable neurostimulator leads. *BioMedical Engineering OnLine* 10, 94. <https://doi.org/10.1186/1475-925X-10-94>
- Pantchenko, O.S., Seidman, S.J., Guag, J.W., Witters, D.M., Sponberg, C.L., 2011b. Electromagnetic compatibility of implantable neurostimulators to RFID emitters. *BioMedical Engineering OnLine* 10, 50. <https://doi.org/10.1186/1475-925X-10-50>
- Paz, J.D., Milliken, R., Ingram, W.T., Frank, A., Atkin, A., 1987. Potential Ocular Damage from Microwave Exposure During Electrosurgery: Dosimetric Survey. *Journal of Occupational and Environmental Medicine* 29, 580.

- Persinger, M.A., Ludwig, H.W., Ossenkopp, K.-P., 1973. Psychophysiological Effects of Extremely Low Frequency Electromagnetic Fields: A Review. *Percept Mot Skills* 36, 1131–1159. <https://doi.org/10.2466/pms.1973.36.3c.1131>
- Petri, A.-K., Schmiedchen, K., Stunder, D., Dechent, D., Kraus, T., Bailey, W.H., Driessen, S., 2017. Biological effects of exposure to static electric fields in humans and vertebrates: a systematic review. *Environmental Health* 16, 41. <https://doi.org/10.1186/s12940-017-0248-y>
- Polk, C., 1991. Biological effects of low-level low-frequency electric and magnetic fields. *IEEE Transactions on Education* 34, 243–249. <https://doi.org/10.1109/13.85082>
- Polk, C., Postow, E., 1995. *Handbook of Biological Effects of Electromagnetic Fields*, Third Edition - 2 Volume Set. CRC Press.
- Pourlis, A.F., 2009. Reproductive and developmental effects of EMF in vertebrate animal models. *Pathophysiology, Electromagnetic Fields (EMF) Special Issue* 16, 179–189. <https://doi.org/10.1016/j.pathophys.2009.01.010>
- Preece, A.W., Kaune, W., Grainger, P., Preece, S., Golding, J., 1997. Magnetic fields from domestic appliances in the UK. *Phys. Med. Biol.* 42, 67. <https://doi.org/10.1088/0031-9155/42/1/004>
- Preece, A.W., Kaune, W.T., Grainger, P., Golding (INVITED), J., 1999. Assessment of Human Exposure to Magnetic Fields Produced by Domestic Appliances. *Radiat Prot Dosimetry* 83, 21–27. <https://doi.org/10.1093/oxfordjournals.rpd.a032659>
- President of the Council Ministers, 2003. Establishment of exposure limits, attention values, and quality goals to protect the population against electric, magnetic, and electromagnetic fields generated at frequencies between 100 kHz and 300 GHz. GU.
- Raatikainen, M.J.P., Arnar, D.O., Merkely, B., Nielsen, J.C., Hindricks, G., Heidbuchel, H., Camm, J., 2017. A Decade of Information on the Use of Cardiac Implantable Electronic Devices and Interventional Electrophysiological Procedures in the European Society of Cardiology Countries: 2017 Report from the European Heart Rhythm Association. *Europace* 19, ii1-ii90. <https://doi.org/10.1093/europace/eux258>
- Ramon, C., Ayaz, M., Streeter, D.D., 1981. Inhibition of growth rate of escherichia coli induced by extremely low-frequency weak magnetic fields. *Bioelectromagnetics* 2, 285–289. <https://doi.org/10.1002/bem.2250020310>
- Ramon, C., Martin, J.T., Powell, M.R., 1987. Low-level, magnetic-field-induced growth modification of *Bacillus subtilis*. *Bioelectromagnetics* 8, 275–282. <https://doi.org/10.1002/bem.2250080306>
- Reeves, G.I., 2000. Review of extensive workups of 34 patients overexposed to radiofrequency radiation. *Aviat Space Environ Med* 71, 206–215.
- Reilly, J.P., 1989. Peripheral nerve stimulation by induced electric currents: Exposure to time-varying magnetic fields. *Med. Biol. Eng. Comput.* 27, 101. <https://doi.org/10.1007/BF02446217>
- Rickli, H., Facchini, M., Brunner, H., Ammann, P., Sagmeister, M., Klaus, G., Angehrn, W., Luechinger, R., Duru, F., 2003. Induction Ovens and Electromagnetic Interference: what is the risk for patients with implanted pacemakers? *Pacing and Clinical Electrophysiology* 26, 1494–1497. <https://doi.org/10.1046/j.1460-9592.2003.t01-1-00216.x>
- Robert, E., 1999. Intrauterine effects of electromagnetic fields—(low frequency, mid-frequency RF, and microwave): review of epidemiologic studies. *Teratology* 59, 292–298.
- Robert, E., 1996. Teratogen update: Electromagnetic fields. *Teratology* 54, 305–313. [https://doi.org/10.1002/\(SICI\)1096-9926\(199612\)54:6<305::AID-TERA6>3.0.CO;2-X](https://doi.org/10.1002/(SICI)1096-9926(199612)54:6<305::AID-TERA6>3.0.CO;2-X)
- Robertson, I.G.C., Wilson, W.R., Dawson, B.V., Zwi, L.J., Green, A.W., Boys, J.T., 1996. Evaluation of potential health effects of 10 kHz magnetic fields: A short-term mouse

- toxicology study. *Bioelectromagnetics* 17, 111–122. [https://doi.org/10.1002/\(SICI\)1521-186X\(1996\)17:2<111::AID-BEM5>3.0.CO;2-6](https://doi.org/10.1002/(SICI)1521-186X(1996)17:2<111::AID-BEM5>3.0.CO;2-6)
- Rodegerdts, E.A., Grönwäller, E.F., Kehlbach, R., Roth, P., Wiskirchen, J., Gebert, R., Claussen, C.D., Duda, S.H., 2000. In Vitro Evaluation of Teratogenic Effects by Time-Varying MR Gradient Fields on Fetal Human Fibroblasts. *Journal of Magnetic Resonance Imaging* 12, 150–156. [https://doi.org/10.1002/1522-2586\(200007\)12:1<150::AID-JMRI16>3.0.CO;2-9](https://doi.org/10.1002/1522-2586(200007)12:1<150::AID-JMRI16>3.0.CO;2-9)
- Roivainen, P., Eskelinen, T., Jokela, K., Juutilainen, J., 2014. Occupational exposure to intermediate frequency and extremely low frequency magnetic fields among personnel working near electronic article surveillance systems. *Bioelectromagnetics* 35, 245–250. <https://doi.org/10.1002/bem.21850>
- Rooney, A., 2015. Extending a Risk-of-Bias Approach to Address In Vitro Studies [WWW Document]. [https://ofmpub.epa.gov/eims/eimscomm.getfile?p\\_download\\_id=526750](https://ofmpub.epa.gov/eims/eimscomm.getfile?p_download_id=526750) URL
- Rööslä, M., Rapp, R., Braun-Fahrländer, C., 2003. Hochfrequente Strahlung und Gesundheit—eine Literaturanalyse. *Das Gesundheitswesen* 65, 378–392.
- Rubin, G.J., Hillert, L., Nieto-Hernandez, R., van Rongen, E., Oftedal, G., 2011. Do people with idiopathic environmental intolerance attributed to electromagnetic fields display physiological effects when exposed to electromagnetic fields? A systematic review of provocation studies. *Bioelectromagnetics* 32, 593–609. <https://doi.org/10.1002/bem.20690>
- Ruppe, Hentschel, Eggert, 1995. Schienengebundene Transportsysteme. Schienengebundene Transportsysteme. Teil 1: Exposition durch statische und niederfrequente elektrische und magnetische Felder an der Magnetschwebbahn Transrapid 07 (Untersuchungsbericht). *SchrR BAuA* 1–104.
- Rusovan, A., Kanje, M., Mild, K.H., 1992. The stimulatory effect of magnetic fields on regeneration of the rat sciatic nerve is frequency dependent. *Experimental Neurology* 117, 81–84. [https://doi.org/10.1016/0014-4886\(92\)90113-5](https://doi.org/10.1016/0014-4886(92)90113-5)
- Sakurai, T., Kiyokawa, T., Kikuchi, K., Miyakoshi, J., 2009. Intermediate frequency magnetic fields generated by an induction heating (IH) cooktop do not affect genotoxicities and expression of heat shock proteins. *International Journal of Radiation Biology* 85, 883–890. <https://doi.org/10.1080/09553000903184358>
- Sakurai, T., Narita, E., Shinohara, N., Miyakoshi, J., 2013. Alteration of gene expression by exposure to a magnetic field at 23 kHz is not detected in astroglia cells. *J Radiat Res* 54, 1005–1009. <https://doi.org/10.1093/jrr/rrt063>
- Sakurai, T., Narita, E., Shinohara, N., Miyakoshi, J., 2012. Intermediate frequency magnetic field at 23 kHz does not modify gene expression in human fetus-derived astroglia cells. *Bioelectromagnetics* 33, 662–669. <https://doi.org/10.1002/bem.21734>
- Salcedo, J.D., Pretorius, V.G., Hsu, J.C., Lalani, G.G., Schrickler, A.A., Hebsur, S.M., McGARRY, T.J., Hunter, J.A., Lewis, K.E., Krummen, D.E., Feld, G.K., Birgersdotter-Green, U., 2016. Compatibility of Radiofrequency Surgical Sponge Detection Technology with Cardiac Implantable Electronic Devices and Temporary Pacemakers. *Pacing and Clinical Electrophysiology* 39, 1254–1260. <https://doi.org/10.1111/pace.12938>
- Salmi, J., Eskola, H.J., Pitkänen, M.A., Malmivuo, J.A., 1990. The influence of electromagnetic interference and ionizing radiation on cardiac pacemakers. *Strahlenther Onkol* 166, 153–156.
- SCENIHR, 2015. Potential health effects of exposure to electromagnetic fields (EMF). European Commission 1–288. <https://doi.org/10.2772/75635>
- SCENIHR, 2009. Possible effects of electromagnetic fields (EMF) on human health. European Commission 1–64.

- Schaap, K., Christopher-De Vries, Y., Crozier, S., De Vocht, F., Kromhout, H., 2014. Exposure to Static and Time-Varying Magnetic Fields From Working in the Static Magnetic Stray Fields of MRI Scanners: A Comprehensive Survey in the Netherlands. *Ann Occup Hyg* 58, 1094–1110. <https://doi.org/10.1093/annhyg/meu057>
- Scherlag, B.J., Yamanashi, W.S., Hou, Y., Jacobson, J.I., Jackman, W.M., Lazzara, R., 2004. Magnetism and Cardiac Arrhythmias. *Cardiology in Review* 12, 85. <https://doi.org/10.1097/01.crd.0000094029.10223.2f>
- Schmid, G., Cecil, S., Überbacher, R., Petric, B., Hirtl, R., 2014a. Untersuchung des Einflusses von intrakorporalen Feldkomponenten an Gewebegrenzschichten bei der numerischen Bestimmung induzierter Feldstärkeverteilungen in hoch aufgelösten realistischen Computermodellen zur Überprüfung der Einhaltung von Grenzwerten - Vorhaben 3611S70017.
- Schmid, G., Hirtl, R., Schneeweiß, P., Jhala, T., Sainitzer, D., others, 2014b. Ergänzende Analysen von Daten zur Exposition durch RFID Technologien aus FV 3609S80002 und Untersuchungen an Warensicherungsanlagen-Vorhaben 3612S80004.
- Schmid, G., Lager, D., Preiner, P., Überbacher, R., Cecil, S., 2007. Exposure caused by wireless technologies used for short-range indoor communication in homes and offices. *Radiat Prot Dosimetry* 124, 58–62. <https://doi.org/10.1093/rpd/ncm245>
- Schmid, G., Überbacher, R., Cecil, S., Escorihuela-Navarro, A., Sainitzer, D., Weinfurter, A., 2012. Bestimmung der Exposition gegenüber elektromagnetischen Feldern, die durch den Einsatz von Radio Frequency Identification (RFID) Technologien entstehen - Vorhaben 3609S80002.
- Schmid, G., Überbacher, R., Hirtl, R., 2017a. Entwicklung von Messmöglichkeiten und deren Anwendung für Elektromagnetische Felder (EMF) bei verschiedenen Schweißprozessen zur Erfüllung der neuen EMF Richtlinie. Abschlussbericht SL-LE-001/17 zum Forschungsauftrag der Berufsgenossenschaft Holz und Metall (BGHM).
- Schmid, G., Überbacher, R., Hirtl, R., 2017b. Entwicklung von Messmöglichkeiten und deren Anwendung für Elektromagnetische Felder (EMF) bei verschiedenen Schweißprozessen zur Erfüllung der neuen EMF Richtlinie (No. SL-LE-001/17).
- Schmid, Überbacher, Cecil, Petric, Göth, BfS, 2009. Ressortforschungsberichte zur kerntechnischen Sicherheit und zum Strahlenschutz; 21/09 Bestimmung der Exposition durch Magnetfelder alternativer Antriebskonzepte: Abschlussbericht zum Forschungsvorhaben; Vorhaben 3608S04574; SL-LE-0004/09. BfS 1–158.
- Schmiedchen, K., Petri, A.-K., Driessen, S., Bailey, W.H., 2018. Systematic review of biological effects of exposure to static electric fields. Part II: Invertebrates and plants. *Environmental Research* 160, 60–76. <https://doi.org/10.1016/j.envres.2017.09.013>
- Schrafel, P.C., Long, B.R., Miller, J.M., Daga, A., 2016. The reality of safety concerns relative to WPT systems for automotive applications, in: 2016 IEEE PELS Workshop on Emerging Technologies: Wireless Power Transfer (WoW). Presented at the 2016 IEEE PELS Workshop on Emerging Technologies: Wireless Power Transfer (WoW), pp. 152–157. <https://doi.org/10.1109/WoW.2016.7772083>
- Seckler, T., Jagielski, K., Stunder, D., 2015. Assessment of Electromagnetic Interference with Active Cardiovascular Implantable Electronic Devices (CIEDs) Caused by the Qi A13 Design Wireless Charging Board. *International Journal of Environmental Research and Public Health* 12, 5886–5904. <https://doi.org/10.3390/ijerph120605886>
- Seckler, T., Stunder, D., Schikowsky, C., Joosten, S., Zink, M.D., Kraus, T., Marx, N., Napp, A., 2017. Effect of lead position and orientation on electromagnetic interference in patients with bipolar cardiovascular implantable electronic devices. *Europace* 19, 319–328. <https://doi.org/10.1093/europace/euv458>
- Seibersdorf Labor GmbH, 2016a. Gutachten E-EMV 17/16 (vertraulich).
- Seibersdorf Labor GmbH, 2016b. Gutachten E-EMV 103/16 (vertraulich).

- Seibersdorf Labor GmbH, 2016c. Interner Prüfbericht über Magnetfeldmessungen an Punktschweißzangen.
- Seidman, S.J., Brockman, R., Lewis, B.M., Guag, J., Shein, M.J., Clement, W.J., Kippola, J., Digby, D., Barber, C., Huntwork, D., 2010a. In vitro tests reveal sample radiofrequency identification readers inducing clinically significant electromagnetic interference to implantable pacemakers and implantable cardioverter-defibrillators. *Heart Rhythm* 7, 99–107. <https://doi.org/10.1016/j.hrthm.2009.09.071>
- Seidman, S.J., Kainz, W., Casamento, J., Witters, D., 2010b. Electromagnetic Compatibility Testing of Implantable Neurostimulators Exposed to Metal Detectors. *Open Biomed Eng J* 4, 63–70. <https://doi.org/10.2174/1874120701004010063>
- Seidman, S.J., Ruggera, P.S., Brockman, R.G., Lewis, B., Shein, M.J., 2007. Electromagnetic compatibility of pacemakers and implantable cardiac defibrillators exposed to RFID readers. *International Journal of Radio Frequency Identification Technology and Applications* 1, 237–246. <https://doi.org/10.1504/IJRFITA.2007.015848>
- Senatra, D., Perego, A., Giubilaro, G., 1978. Biological effects of low-level, very low-frequency (VLF) electric fields on the blood sedimentation rate. *Int J Biometeorol* 22, 59–66. <https://doi.org/10.1007/BF01553141>
- Shah, A.J., Brunett, J.D., Thaker, J.P., Patel, M.B., Liepa, V.V., Jongnarangsin, K., Thakur, R.K., 2010. Characteristics of Telemetry Interference with Pacemakers Caused by Digital Media Players. *Pacing and Clinical Electrophysiology* 33, 712–720. <https://doi.org/10.1111/j.1540-8159.2009.02672.x>
- Shi, D., Zhu, C., Lu, R., Mao, S., Qi, Y., 2014. Intermediate frequency magnetic field generated by a wireless power transmission device does not cause genotoxicity in vitro. *Bioelectromagnetics* 35, 512–518. <https://doi.org/10.1002/bem.21872>
- Shigemitsu, T., Yamazaki, K., Nakasono, S., Kakikawa, M., 2007. A review of studies of the biological effects of electromagnetic fields in the intermediate frequency range. *IEEEJ Trans Elec Electron Eng* 2, 405–412. <https://doi.org/10.1002/tee.20181>
- Shimamoto, T., Laakso, I., Hirata, A., 2015. In-situ electric field in human body model in different postures for wireless power transfer system in an electrical vehicle. *Phys. Med. Biol.* 60, 163. <https://doi.org/10.1088/0031-9155/60/1/163>
- Shuvy, M., Abedat, S., Beerli, R., Valitzki, M., Stein, Y., Meir, K., Lotan, C., 2014. Electromagnetic fields promote severe and unique vascular calcification in an animal model of ectopic calcification. *Experimental and Toxicologic Pathology* 66, 345–350. <https://doi.org/10.1016/j.etp.2014.05.001>
- Simon, A.B., Linde, B., Bonnette, G.H., Schlentz, R.J., 1975. The individual with a pacemaker in the dental environment. *The Journal of the American Dental Association* 91, 1224–1229.
- Skanyl Norge, n.d. Bodyware Langwellentherapie [WWW Document]. URL <http://skanyl.no/> (accessed 6.13.17).
- SSK, 2001. Grenzwerte und Vorsorgemaßnahmen zum Schutz der Bevölkerung vor elektromagnetischen Feldern. SSK.
- SSM, Scientific Council on Electromagnetic Fields, 2016. Recent Research on EMF and Health Risk: Eleventh report from SSM's Scientific Council on Electromagnetic Fields, 2016. Fields, 2016. SSM Reports of Swedish Radiation Safety Authority 1–112.
- Straume, A., Johnsson, A., Oftedal, G., Wilén, J., 2007. Frequency spectra from current vs. magnetic flux density measurements for mobile phones and other electrical appliances. *Health Phys* 93, 279–287. <https://doi.org/10.1097/01.HP.0000266739.54093.9f>

- Stuchly, M.A., Lecuyer, D.W., 1987. Electromagnetic Fields Around Induction Heating Stoves. *Journal of Microwave Power and Electromagnetic Energy* 22, 63–69. <https://doi.org/10.1080/08327823.1987.11688007>
- Stunder, D., Seckler, T., Joosten, S., Zink, M.D., Driessen, S., Kraus, T., Marx, N., Napp, A., 2017. In Vivo Study of Electromagnetic Interference With Pacemakers Caused by Everyday Electric and Magnetic Fields. *Circulation* 135, 907–909. <https://doi.org/10.1161/CIRCULATIONAHA.116.024558>
- Sun, W., He, Y., Diao, Y., Leung, S.W., Siu, Y.M., Kong, R., 2017. Impact of magnetic field generated by wireless power transfer system of electric vehicle on retinal pigment epithelium cell in vitro, in: 2017 Asia-Pacific International Symposium on Electromagnetic Compatibility (APEMC). Presented at the 2017 Asia-Pacific International Symposium on Electromagnetic Compatibility (APEMC), pp. 385–387. <https://doi.org/10.1109/APEMC.2017.7975506>
- Sunohara, T., Hirata, A., Laakso, I., Onishi, T., 2014. Analysis of in situ electric field and specific absorption rate in human models for wireless power transfer system with induction coupling. *Phys. Med. Biol.* 59, 3721. <https://doi.org/10.1088/0031-9155/59/14/3721>
- Tell, R. a., Sias, G., Smith, J., Sahl, J., Kavet, R., 2013. ELF magnetic fields in electric and gasoline-powered vehicles. *Bioelectromagnetics* 34, 156–161. <https://doi.org/10.1002/bem.21730>
- Tell, R.A., Hooper, H.C., Sias, G.G., Mezei, G., Hung, P., Kavet, R., 2015. Electromagnetic Fields Associated with Commercial Solar Photovoltaic Electric Power Generating Facilities. *Journal of Occupational and Environmental Hygiene* 12, 795–803. <https://doi.org/10.1080/15459624.2015.1047021>
- Tell, R.A., Kavet, R., 2016. Electric and magnetic fields <100 kHz in electric and gasoline-powered vehicles. *Radiat Prot Dosimetry* 172, 541–546. <https://doi.org/10.1093/rpd/ncv533>
- Tell, R.A., Kavet, R., Bailey, J.R., Halliwell, J., 2014. Very-low-frequency and low-frequency electric and magnetic fields associated with electric shuttle bus wireless charging. *Radiat Prot Dosimetry* 158, 123–134. <https://doi.org/10.1093/rpd/nct208>
- Tenforde, T.S., 1992. Biological interactions and potential health effects of extremely-low-frequency magnetic fields from power lines and other common sources. *Annu Rev Public Health* 13, 173–196. <https://doi.org/10.1146/annurev.pu.13.050192.001133>
- Thaker, J.P., Patel, M.B., Shah, A.J., Liepa, V.V., Brunett, J.D., Jongnarangsin, K., Gardiner, J.C., Thakur, R., 2009. Do Media Players Cause Interference with Pacemakers? *Clin Cardiol* 32, 653–657. <https://doi.org/10.1002/clc.20625>
- Ticleanu, C., Littlefair, P., 2015. A summary of LED lighting impacts on health [WWW Document]. [ResearchGate](https://www.researchgate.net/publication/296621681_A_summary_of_LED_lighting_impacts_on_health). URL [https://www.researchgate.net/publication/296621681\\_A\\_summary\\_of\\_LED\\_lighting\\_impacts\\_on\\_health](https://www.researchgate.net/publication/296621681_A_summary_of_LED_lighting_impacts_on_health) (accessed 6.14.17).
- Tiikkaja, M., Alanko, T., Lindholm, H., Hietanen, M., Hartikainen, J., Toivonen, L., 2012a. Experimental study on malfunction of pacemakers due to exposure to different external magnetic fields. *J Interv Card Electrophysiol* 34, 19–27. <https://doi.org/10.1007/s10840-011-9651-4>
- Tiikkaja, M., Alanko, T., Lindholm, H., Hietanen, M., Toivonen, L., Hartikainen, J., 2012b. Interference of low frequency magnetic fields with implantable cardioverter-defibrillators. *Scandinavian Cardiovascular Journal* 46, 308–314. <https://doi.org/10.3109/14017431.2012.716525>
- Tiikkaja, M., Aro, A.L., Alanko, T., Lindholm, H., Sistonen, H., Hartikainen, J.E.K., Toivonen, L., Juutilainen, J., Hietanen, M., 2013. Electromagnetic interference with cardiac pacemakers and implantable cardioverter-defibrillators from low-frequency electromagnetic fields in vivo. *Europace* 15, 388–394. <https://doi.org/10.1093/europace/eus345>

- Tomanova, K., Vacha, M., 2016. The magnetic orientation of the Antarctic amphipod *Gondogeneia antarctica* is cancelled by very weak radiofrequency fields. *Journal of Experimental Biology* 219, 1717–1724. <https://doi.org/10.1242/jeb.132878>
- Trulsson, J., Anger, G., Estenberg, U., 2007. Assessment of magnetic fields surrounding electronic article surveillance systems in Sweden. *Bioelectromagnetics* 28, 664–666. <https://doi.org/10.1002/bem.20359>
- Tuor, M., Ebert, S., Schuderer, J., Kuster, N., 2005. Assessment of ELF Exposure from GSM Handsets and Development of an Optimized RF/EMF Exposure Setup for Studies of Human Volunteers.
- Urbiniello, D., Joseph, W., Verloock, L., Martens, L., Rösli, M., 2014. Temporal trends of radio-frequency electromagnetic field (RF-EMF) exposure in everyday environments across European cities. *Environmental Research, Linking Exposure and Health in Environmental Public Health Tracking* 134, 134–142. <https://doi.org/10.1016/j.envres.2014.07.003>
- Ushiyama, A., Ohtani, S., Suzuki, Y., Wada, K., Kunugita, N., Ohkubo, C., 2014. Effects of 21-kHz intermediate frequency magnetic fields on blood properties and immune systems of juvenile rats. *International Journal of Radiation Biology* 90, 1211–1217. <https://doi.org/10.3109/09553002.2014.930538>
- Valič, B., Kos, B., Gajšek, P., 2015. Typical exposure of children to EMF: exposimetry and dosimetry. *Radiat Prot Dosimetry* 163, 70–80. <https://doi.org/10.1093/rpd/ncu057>
- Van Den Bossche, M., Verloock, L., Aerts, S., Joseph, W., Martens, L., 2015. In situ exposure assessment of intermediate frequency fields of diverse devices. *Radiat Prot Dosimetry* 164, 252–264. <https://doi.org/10.1093/rpd/ncu257>
- van der Togt, R., van Lieshout, E.J., Hensbroek, R., Beinat, E., Binnekade, J.M., Bakker, P.J.M., 2008. Electromagnetic interference from radio frequency identification inducing potentially hazardous incidents in critical care medical equipment. *JAMA* 299, 2884–2890.
- van Wijk van Brievingh, R.P., Hoekstra, A., deBakker, J.M.T., Hemelaar, A., 1974. Measurement techniques for assessing the influence of electromagnetic fields on implanted pacemakers. *Med. & Biol. Engng.* 12, 42–49. <https://doi.org/10.1007/BF02629833>
- Vassilev, A., Ferber, A., Wehrmann, C., Pinaud, O., Schilling, M., Ruddle, A.R., 2015. Magnetic Field Exposure Assessment in Electric Vehicles. *IEEE Transactions on Electromagnetic Compatibility* 57, 35–43. <https://doi.org/10.1109/TEMC.2014.2359687>
- Vereinigung der Metall-Berufsgenossenschaften, 2003. BGI 839 Elektromagnetische Felder in Metallbetrieben.
- Viellard, C., Romann, A., Lott, U., Kuster, N., 2006. B-Field Exposure From Induction Cooking Appliances. ITIS Foundation.
- Viellard C, Romann A, Lott U, Kuster N, ITIS, 2007. B-Field Exposure From Induction Cooking. IT'IS 1–74.
- Vijayalaxmi, Obe, G., 2005. Controversial cytogenetic observations in mammalian somatic cells exposed to extremely low frequency electromagnetic radiation: A review and future research recommendations. *Bioelectromagnetics* 26, 412–430. <https://doi.org/10.1002/bem.20111>
- von Olshausen, G., Rondak, I.-C., Lennerz, C., Semmler, V., Grebmer, C., Reents, T., Ammar-Busch, S., Buiatti, A., Bourier, F., Deisenhofer, I., Kolb, C., 2016. Electromagnetic interference in implantable cardioverter defibrillators: present but rare. *Clin Res Cardiol* 105, 657–665. <https://doi.org/10.1007/s00392-016-0965-1>
- Wake, K., Laakso, I., Hirata, A., Chakarothai, J., Onishi, T., Watanabe, S., Santis, V.D., Feliziani, M., Taki, M., 2017. Derivation of Coupling Factors for Different Wireless Power Transfer Systems: Inter- and Intralaboratory Comparison. *IEEE Transactions*

- on Electromagnetic Compatibility 59, 677–685.  
<https://doi.org/10.1109/TEMC.2016.2636328>
- Wang, J., Tang, N., Xiao, Q., Zhang, L., Li, Y., Li, J., Wang, J., Zhao, Z., Tan, L., 2015. Pulsed electromagnetic field may accelerate in vitro endochondral ossification. *Bioelectromagnetics* 36, 35–44. <https://doi.org/10.1002/bem.21882>
- Wang, X., Chen, Y., Huang, C., Wang, X., Zhao, L., Zhang, X., Tang, J., 2013. Contribution of a 300 kHz alternating magnetic field on magnetic hyperthermia treatment of HepG2 cells. *Bioelectromagnetics* 34, 95–103. <https://doi.org/10.1002/bem.21761>
- WHO, 2007a. Extremely low frequency fields (WHO EHC Monograph No. 238). WHO Environ Health Crit.
- WHO, 2007b. Electromagnetic fields and public health - Exposure to extremely low frequency fields. WHO Factsheets 322.
- WHO, 2007c. 2007 WHO Research Agenda for Extremely Low Frequency Fields. WHO Research Agenda 1–8.
- WHO, 2005. Electromagnetic fields & public health: Intermediate Frequencies (IF). WHO Information Sheet 1–4.
- WHO, 1993. Electromagnetic fields (WHO EHC Monograph No. 137). WHO Environ Health Crit 137.
- WHO, 1987. Magnetic fields. (Environmental Health Criteria 69). WHO Environ Health Crit 1–197.
- WHO, 1981. Radiofrequency and Microwaves (WHO EHC Monograph No. 16). WHO Environ Health Crit.
- Wilén, J., 2010. Exposure assessment of electromagnetic fields near electrosurgical units. *Bioelectromagnetics* 31, 513–518. <https://doi.org/10.1002/bem.20588>
- Wilke, A., Kruse, T., Hesse, H., Funck, R., Maisch, B., 1998. Interactions between Pacemakers and Security Systems. *Pacing and Clinical Electrophysiology* 21, 1784–1788. <https://doi.org/10.1111/j.1540-8159.1998.tb00279.x>
- Wilkening, G.M., Sutton, C.H., 1990. Health Effects of Nonionizing Radiation. *Medical Clinics of North America* 74, 489–507. [https://doi.org/10.1016/S0025-7125\(16\)30575-2](https://doi.org/10.1016/S0025-7125(16)30575-2)
- Win-Shwe, T.-T., Ohtani, S., Ushiyama, A., Fujimaki, H., Kunugita, N., 2013. Can intermediate-frequency magnetic fields affect memory function-related gene expressions in hippocampus of C57BL/6J mice? *The Journal of Toxicological Sciences* 38, 169–176. <https://doi.org/10.2131/jts.38.169>
- Win-Shwe, T.-T., Ohtani, S., Ushiyama, A., Kunugita, N., 2015. Early Exposure to Intermediate-Frequency Magnetic Fields Alters Brain Biomarkers without Histopathological Changes in Adult Mice. *International Journal of Environmental Research and Public Health* 12, 4406–4421. <https://doi.org/10.3390/ijerph120404406>
- Wu, D., Qiang, R., Chen, J., Seidman, S., Witters, D., Kainz, W., 2007. Possible overexposure of pregnant women to emissions from a walk through metal detector. *Phys. Med. Biol.* 52, 5735. <https://doi.org/10.1088/0031-9155/52/19/001>
- Yamaguchi-Sekino, S., Nakai, T., Imai, S., Izawa, S., Okuno, T., 2014. Occupational exposure levels of static magnetic field during routine MRI examination in 3 T MR system. *Bioelectromagnetics* 35, 70–75. <https://doi.org/10.1002/bem.21817>
- Zervins, A., 1973. Chick Embryo Development in a 26-KHz Electromagnetic Field. *American Industrial Hygiene Association Journal* 34, 120–127. <https://doi.org/10.1080/0002889738506818>
- Zhadin, M.N., Deryugina, O.N., Pisachenko, T.M., 1999. Influence of combined DC and AC magnetic fields on rat behavior. *Bioelectromagnetics* 20, 378–386. [https://doi.org/10.1002/\(SICI\)1521-186X\(199909\)20:6<378::AID-BEM7>3.0.CO;2-0](https://doi.org/10.1002/(SICI)1521-186X(199909)20:6<378::AID-BEM7>3.0.CO;2-0)
- Zhang, W., White, J.C., Abraham, A.M., Mi, C.C., 2015. Loosely Coupled Transformer Structure and Interoperability Study for EV Wireless Charging Systems. *IEEE*

Transactions on Power Electronics 30, 6356–6367.  
<https://doi.org/10.1109/TPEL.2015.2433678>

Ziskin, M.C., Morrissey, J., 2011. Thermal thresholds for teratogenicity, reproduction, and development. International Journal of Hyperthermia 27, 374–387.  
<https://doi.org/10.3109/02656736.2011.553769>



# | Verantwortung für Mensch und Umwelt |

**Kontakt:**

Bundesamt für Strahlenschutz

Postfach 10 01 49

38201 Salzgitter

Telefon: + 49 30 18333 - 0

Telefax: + 49 30 18333 - 1885

Internet: [www.bfs.de](http://www.bfs.de)

E-Mail: [ePost@bfs.de](mailto:ePost@bfs.de)

Gedruckt auf Recyclingpapier aus 100 % Altpapier.



Bundesamt für Strahlenschutz