Schweizerische Eidgenossenschaft
Confédération suisse
Confederazione Svizzera
Confederaziun svizra

Eidgenössisches Departement für Umwelt, Verkehr, Energie und Kommunikation UVEK

Bundesamt für Energie BFE
Energieforschung

Statusbericht 2022

EMF von Stromtechnologien

Fachliteratur-Monitoring

FSM – Forschungsstiftung
Strom und Mobilkommunikation
FSM – Swiss Research Foundation for
Electricity and Mobile Communication

Datum: 28. Februar 2023
Ort: Bern

Auftraggeberin:
Bundesamt für Energie BFE
Forschungsprogramm Elektrizitätstechnologien
CH-3003 Bern
www.bfe.admin.ch

Auftragnehmer/in:
FSM – Forschungsstiftung Strom und Mobilkommunikation
c/o ETH Zürich
Gloriastr. 35, ETZ K89
CH-8092 Zürich
emf.ethz.ch

Autoren Statusbericht 2022 (Aktualisierung Statusbericht 2017):
Dr. Reinhold Bräunlich, FKH Fachkommission für Hochspannungsfragen, braeunlich@fkh.ch
Dr. Caroline Dalmus, Fachhochschule Graubünden, SII, caroline.dalmus@fhgr.ch
Dr. Stefan Dongus, Swiss TPH, stefan.dongus@swisstph.ch
Dr. Jürg Eberhard, FSM, juerg.eberhard@emf.ethz.ch
Dr. Giorgio Friedrich, FKH Fachkommission für Hochspannungsfragen, friedrich@fkh.ch
Dr. Jürg Fröhlich, Fields at Work GmbH, juerg.froehlich@fieldsatwork.ch
Prof. Dr. Martin Röösli, Swiss TPH, martin.roosli@swisstph.ch
Dr. David Schürmann, Universität Basel, Departement Biomedizin, david.schuermann@unibas.ch

Autoren Statusbericht 2017 (Basis für Statusbericht 2022):
Dr. Gregor Dürrenberger, ehemals FSM
Dr. Pascal Leuchtmann, ehemals ETH, IEF
Prof. Dr. Martin Röösli, Swiss TPH
Prof. Dr. Michael Siegrist, ETH, IED
Dr. Bernadette Sütterlin, ehemals ETH, IED

BFE-Bereichsleitung: Dr. Michael Moser, michael.moser@bfe.admin.ch
BFE-Programmleitung: Roland Brüniger, roland.brueniger@brueniger.swiss
BFE-Vertragsnummer: SI/502380-01

Für den Inhalt und die Schlussfolgerungen sind ausschliesslich die Autoren dieses Berichts verantwortlich.

Bundesamt für Energie BFE
Mühlestrasse 4, CH-3063 Ittigen; Postadresse: CH-3003 Bern
Tel. +41 58 462 56 11 · Fax +41 58 463 25 00 · contact@bfe.admin.ch · www.bfe.admin.ch

Zusammenfassung

Dieser Bericht stellt wissenschaftliche Literatur zu niederfrequenten elektromagnetischen Feldern (NF-EMF; insbesondere 50/60 Hz und 16.7 Hz) zusammen und ist eine Aktualisierung des letztmals 2017 erschienenen Syntheseberichtes. Im Zentrum stehen biologische und gesundheitliche Wirkungen. Daneben kommen auch der sozialwissenschaftliche Forschungsstand zu Wahrnehmungs-, Kommunikations- und Akzeptanzfragen sowie ausgewählte Fragen im Bereich der elektromagnetischen Verträglichkeit (EMV) einiger neuerer, niederfrequenter Technologien zur Sprache. Weiter widmet sich der Bericht Fragen der Expositionserfassung und der im Alltag und am Arbeitsplatz anzutreffenden niederfrequenten Expositionen. Eingeleitet wird der Bericht mit einer Übersicht über Quellen von NF-EMF der Stromversorgung und von ausgewählten Stromanwendungen. Bezüglich möglicher gesundheitlicher Auswirkungen werden zunächst die im Bericht von 2017 aufgeführten Publikationen erwähnt und dann die seither erschienene, neuere Literatur bis Mitte 2022 kommentiert. Es handelt sich dabei schwerpunktmässig um epidemiologische Studien zu kindlicher Leukämie sowie anderen Krebsarten, neurodegenerativen Erkrankungen, Fruchtbarkeit, Schwangerschaft und Geburt, sowie um experimentelle Humanstudien zu einigen anderen ausgewählten Effekten. Auch elektromagnetische Hypersensibilität wird behandelt. Fast alle Studien beziehen sich auf Magnetfeldexpositionen. Elektrische Felder wie man sie im Alltag antrifft, sind gesundheitlich gesehen, vergleichsweise unproblematisch. Experimentelle Studien mit Zellen oder Tiermodellen dienen als Ergänzung der Befunde aus Humanstudien und der Untersuchung von möglichen Wirkmechanismen. Diese werden hier nur punktuell beschrieben und beschränken sich im Wesentlichen auf den Zeitraum von 2017 bis Mitte 2022. Hinsichtlich biologisch-gesundheitlicher und sozialwissenschaftlicher Forschung wird in einem eigenen Abschnitt jeweils der sich aus dem aktuellen Wissensstand ergebende Forschungsbedarf dargestellt. Insgesamt zeigt die Literaturanalyse, dass die Wissenschaft in den letzten Jahren keine grösseren gesundheitlichen Risiken identifiziert hat, dass aber in mehreren Bereichen Forschungsbedarf besteht, insbesondere auch bezüglich Wirkmechanismen. Ziel muss es sein, mit besseren Daten heute noch nicht klar beurteilbare Risiken robuster einschätzen zu können. Forschungsbedarf besteht weiterhin auch für die Abschätzung der Exposition der Bevölkerung im Zusammenhang mit neuen Technologien und für die sozialwissenschaftliche Forschung, etwa im Zusammenhang mit Akzeptanzfragen. Diese Einschätzungen haben sich gegenüber dem Bericht von 2017 nicht wesentlich verändert.

Résumé

Ce rapport rassemble la littérature scientifique sur les champs électromagnétiques de basse fréquence (champs électromagnétiques extrêmement basses fréquences CEM-EBF; en particulier 50/60 Hz et 16,7 Hz) et constitue une mise à jour du rapport de synthèse publié pour la dernière fois en 2017. L'accent est mis sur les effets biologiques et sanitaires. Il aborde également l'état de la recherche en sciences sociales sur les questions de perception, de communication et d'acceptation, ainsi que des questions sélectionnées dans le domaine de la compatibilité électromagnétique (CEM) de certaines technologies récentes à basse fréquence. Le rapport aborde également les questions de la prise en compte de l'exposition et des expositions aux basses fréquences rencontrées dans la vie quotidienne et sur le lieu de travail. Le rapport commence par un aperçu des sources de champs électromagnétiques extrêmement basses fréquences CEM-EBF de l'alimentation électrique et de certaines applications électriques. En ce qui concerne les effets potentiels sur la santé, les publications citées dans le rapport de 2017 sont d'abord mentionnées, puis la littérature plus récente parue depuis lors jusqu'à la mi-2022 est commentée. Il s'agit principalement d'études épidémiologiques et expérimentales sur l'homme concernant la leucémie infantile, d'autres types de cancer, les maladies neurodégénératives, la fertilité, la grossesse et l'accouchement, l'hypersensibilité électromagnétique, ainsi que quelques autres effets sélectionnés. Presque toutes les études portent sur les expositions aux champs magnétiques. Les champs électriques tels qu'on les rencontre dans la vie de tous les jours ne

posent par comparaison pas de problème pour la santé. Les études expérimentales sur des cellules ou des modèles animaux servent à compléter les résultats des études sur l'homme et à examiner les mécanismes d'action possibles. Celles-ci ne sont décrites ici que ponctuellement et se limitent pour l'essentiel à la période allant de 2017 à mi-2022. En ce qui concerne la recherche en matière de biologie et de santé et en matière de sciences sociales, les besoins de recherche découlant de l'état actuel des connaissances sont présentés dans une section séparée. Dans l'ensemble, l'analyse de la littérature montre que la science n'a pas identifié de risques majeurs pour la santé au cours des dernières années, mais que des recherches sont nécessaires dans plusieurs domaines, notamment en ce qui concerne les mécanismes d'action. L'objectif doit être de pouvoir évaluer de manière plus robuste, grâce à de meilleures données, des risques qui ne sont pas encore clairement estimables aujourd'hui. Des recherches restent également nécessaires pour évaluer l'exposition de la population en lien avec nouvelles technologies et pour la recherche en matière de sciences sociales, par exemple en ce qui concerne les questions d'acceptation. Ces estimations n'ont pas changé de manière significative vis-à-vis du rapport de 2017.

Summary

This report compiles scientific literature on extremely low frequency electric and magnetic fields (ELF-EMF; specifically 50/60 Hz and 16.7 Hz) and is an update of the Synthesis Report last published in 2017. The focus is on biological and health effects. In addition, it addresses the research status in social science with regard to perception, communication and acceptance, as well as selected issues in the field of electromagnetic compatibility (EMC) of some newer low frequency technologies. The report further deals with issues of exposure assessment and low frequency exposures encountered in everyday life and at the workplace. It starts with an overview of sources of ELF-EMF from the power supply and from selected power applications. When addressing potential health effects, it first mentions the publications listed in the 2017 report and then comments the more recent literature published since then and until mid-2022. The focus is on epidemiological studies on childhood leukemia, other cancers, neurodegenerative diseases, fertility, pregnancy and childbirth, electromagnetic hypersensitivity, and experimental human studies on some other selected effects. Almost all studies refer to magnetic field exposures. Electric fields as encountered in everyday life are comparatively unproblematic from a health point of view. Experimental studies with cells or animal models are used to complement findings from human studies and to investigate possible mechanisms of action. These are described here only selectively and are essentially limited to the period from 2017 to mid-2022. With regard to biological health and social science research, the need for research resulting from the current state of knowledge is presented in a separate section in each case. Overall, the literature review shows that science has not identified any major health risks in recent years, but that there is a need for research in several areas, especially also regarding mechanisms of action. The goal must be to use better data to more robustly assess risks that are not yet clearly assessable today. Research is also still needed for estimating population exposure in connection with new technologies as well as research in the field of social science, for example in connection with acceptance issues. These assessments have not changed significantly compared to the 2017 report.

Inhaltsverzeichnis

Zusammenfassung **4**

Résumé **4**

Summary **5**

Inhaltsverzeichnis **6**

1. Ziel, Methodik und wichtige Begriffe **9**

1.1 Ziel **9**

1.2 Vorgehen und Abgrenzung **9**

1.3 Struktur des Berichts **9**

1.4 Wichtige Begriffe und Abkürzungen **10**

2. NF-EMF von elektrischen Energieanwendungen **14**

2.1 NF-EMF in der Elektrizitätsversorgung aktuelle Situation **14**

2.1.1 Grundsätzliche Eigenschaften der EMF 14

2.1.2 Netzebenen 16

2.1.3 EMF von Leitungen 17

2.1.4 Vergleich der EMF von Freileitungen und Kabeln 20

2.1.5 EMF an Netzknoten: Kraftwerke, Unterwerke, Transformatorstationen 21

2.1.6 EMF der Wechselstrombahnen und deren Stromversorgung 22

2.1.7 Emissionen von Gleichstrombahnen 23

2.1.8 Frequenzen der EMF von Energieversorgungsnetzen 23

2.2 Beispiele aktueller technologischer Entwicklungen und Untersuchungen **24**

2.2.1 Netzqualität, Oberschwingungen 25

2.2.2 Emission von Harmonischen und Interharmonischen am Beispiel von Umrichterwerken der Bahnstromversorgung 26

2.2.3 EMF von Trägerfrequenzsignalen im Verteilnetz 28

2.2.4 Drahtlose Datenkommunikation/Steuerung des Niederspannungsnetzes (WiFi, WLAN) 31

2.2.5 Streuströme, Ströme in Neutralleitern und im Erdungssystem 33

2.2.6 Massnahmen zur Reduktion der EMF von elektrischen Energieversorgungsnetzen 34

2.2.7 Schlussfolgerungen betreffend die aktuellen Entwicklungen der EMF in Energieversorgungssystemen 35

2.3 NF-EMF und EMV von ausgesuchten Komponenten und Anwendungen **36**

2.3.1 Allgemein 36

2.3.2 LED-Leuchtmittel 36

2.3.3 Elektrische Fahrzeuge 37

2.3.4 Drahtlose Energieübertragung ... 37
2.3.5 Stromerzeuger für Erneuerbare ... 39
2.3.6 Implantate ... 40
2.3.7 RFID ... 41

3. NF-EMF Expositionen ... 42
3.1 Konzepte ... 42
3.1.1 Emission und Immission gegenüber EMF-ELF ... 42
3.1.2 Persönliche Exposition und Dosis ... 43
3.1.3 Messung und Modellierung ... 43
3.1.4 Vorbemerkung zu den nachfolgenden Abschnitten ... 45
3.2 Daten zu Expositionen ... 46
3.2.1 Schweizerisches Monitoring ... 46
3.2.2 Haushalte ... 46
3.2.3 Öffentliche Orte ... 49
3.2.4 Arbeitsplätze ... 52
3.2.5 Alltagsexpositionen ... 54
3.3 Forschungsbedarf ... 56

4. NF-EMF und Gesundheit ... 57
4.1 Vorbemerkung ... 57
4.2 Wichtige Review-Berichte ... 59
4.2.1 WHO ... 59
4.2.2 IARC ... 60
4.2.3 SCENIHR ... 61
4.2.4 ICNIRP ... 63
4.2.5 IEEE / ICES ... 63
4.2.6 BioInitiative ... 64
4.2.7 ARIMMORA ... 65
4.2.8 Ausgewählte nationale Reports ... 65
4.2.9 Bewertung ... 74
4.3 Studien zu ausgewählten Themen ... 75
4.3.1 Kindliche Leukämie ... 75
4.3.2 Andere Krebsarten ... 87
4.3.3 Neurodegenerative Erkrankungen ... 99
4.3.4 Fruchtbarkeit, Schwangerschaft, Geburt ... 111
4.3.5 Elektromagnetische Hypersensibilität ... 116
4.3.6 Andere Wirkungen ... 123
4.4 Forschungsbedarf ... 137
4.4.1 Kinderleukämie ... 137

4.4.2 Neurodegenerative Erkrankungen ... 137
4.4.3 Elektromagnetische Hypersensibilität ... 137
4.4.4 Andere Themen ... 138

5. Sozialwissenschaftliche Studien zu NF-EMF ... 139
5.1 Akzeptanz von Energieinfrastrukturen ... 139
5.2 Einflussfaktoren ... 140
5.2.1 Physikalische Charakteristiken ... 140
5.2.2 Psychologische Faktoren und Prozesse ... 141
5.2.3 Prozedurale Faktoren ... 143
5.3 Forschungsbedarf ... 144
5.3.1 Einfluss von Emotionen auf die Akzeptanz ... 144
5.3.2 Analyse der Bedenken bezüglich Gesundheitsrisiken ... 145
5.3.3 Chancen und Risiken der Diskussion im Rahmen der Energiewende ... 146
5.3.4 Akzeptanz verschiedener Um- und Ausbauarten der Netzinfrastruktur ... 146

6. Anhang Regulierung ... 148
6.1 Die schweizerische Verordnung NISV ... 148
6.1.1 Geltungsbereich ... 148
6.1.2 Schutz und Vorsorge ... 148
6.1.3 Immissionsgrenzwerte und Anlagegrenzwerte ... 148
6.2 Internationale und nationale Grenzwerte ... 150
6.2.1 Die ICNIRP ... 150
6.2.2 Übersicht ICNIRP Richtlinien ... 150
6.2.3 Relevante Unterschiede zwischen der ICNIRP Richtlinie 2020 (100 kHz bis 300 GHz) und früheren Richtlinien ... 151
6.2.4 Grenzwerte für die Allgemeinbevölkerung ... 152
6.2.5 Grenzwerte für berufliche Expositionen ... 152
6.3 Herleitung der niederfrequenten Grenzwerte ... 152
6.3.1 Induzierte elektrische Wirbelfelder ... 152
6.3.2 Basisgrenzwerte ... 152
6.3.3 Ableitung von Referenzwerten ... 153

Verantwortlichkeiten / Beiträge ... 154

Abbildungsverzeichnis ... 155

Referenzen ... 157

1. Ziel, Methodik und wichtige Begriffe

1.1 Ziel

Es wurden während 2015-2017 jährliche Syntheseberichte erstellt, welche Forschungserkenntnisse und Forschungstrends zu elektromagnetischen Feldern (EMF) im niederfrequenten Bereich (vornehmlich im Bereich der Frequenzen 50/60 Hz und 16,7 Hz) zusammenfassend darstellten und kommentieren. Der vorliegende Bericht ist eine Aktualisierung des Berichtes von 2017 und stellt den Forschungsstand bis Sommer 2022 zusammenfassend dar. Bei ausgewählten Anwendungen werden auch Zwischenfrequenzen thematisiert und wo relevant wird auch auf verwandte Themen im Hochfrequenzbereich (vor allem bezüglich Mobilfunk) verwiesen. Die Literaturauswahl fokussiert auf gesundheitsrelevante Publikationen und solche mit Bezug zu elektromagnetischer Verträglichkeit (EMV). Wo immer möglich wurde auf Publikationen abgestützt, welche einer Begutachtung durch Fachexperten (Peer Review) unterworfen waren. Das Hauptgewicht liegt bei Gesundheitsstudien, wobei im vorliegenden Bericht neu auch Tier- (in vivo) und Zellstudien (in vitro) aufgeführt werden.

1.2 Vorgehen und Abgrenzung

Die relevante Literatur wurde aus folgenden Datenbanken zusammengestellt: EMF-Portal der RWTH in Aachen, Xplore von IEEE, PubMed von NCBI. Basisstichworte, in verschiedenen “und” Kombinationen verwendet, waren: ELF, 50 Hz, powerline, magnetic fields, health, epidemiology, leukaemia, neurodegenerative, EMC, powerline, WPT, exposure. Daneben konnte auf entsprechende Literaturabfragen und die Datenbank der BERENIS (Beratende Expertengruppe NIS des Bundesamtes für Umwelt)[1] abgestützt werden.

Über Linklisten in den Datenbanken und Literaturverweise in den (elektronisch erfassten) Papers wurden weitere, thematisch relevante Veröffentlichungen gefunden. Die meisten, aber nicht alle Veröffentlichungen sind fachlich begutachtet worden. Zu den nicht-begutachteten gehören insbesondere die von mandadierten Expertengremien oder eigens formierten Fachpanels herausgegebenen Review-Berichte. Die nicht EMV-relevante Literaturauswahl beschränkte sich bisher auf Humanstudien. Neu werden im vorliegenden Bericht ebenfalls Artikel zu Zellexperimenten und Tierstudien berücksichtigt.

Beim vorliegenden Literaturradar handelt es sich nicht um eine streng systematisch durchgeführte und vollständige Literaturanalyse. Vielmehr war es das Ziel, einen Überblick über die publizierte Literatur zu gesundheitlichen Effekten niederfrequenter EMF und zu EMV-Problemen ausgewählter Anwendungen für nicht-Fachwissenschaftler verständlich zusammenzustellen. Das Hauptgewicht liegt auf den neueren Arbeiten, insbesondere bezügliche gesundheitlichen Auswirkungen. Medizinisch/therapeutische Anwendungen von NF-EMF sind nicht Bestandteil dieses Berichtes.

1.3 Struktur des Berichts

Die Struktur des Berichtes wurde gegenüber dem Bericht von 2017 geändert. In Kapitel 2 wird zunächst das Auftreten von EMF in der Elektrizitätsversorgung grundsätzlich erläutert. Zudem werden verschiedene weitere niederfrequente Anwendungen und Technologien bezüglich EMF und EMV be-

[1] https://www.bafu.admin.ch/bafu/de/home/themen/elektrosmog/newsletter/beratende-expertengruppe-nis-berenis.html

leuchtet. Kapitel 3 widmet sich dann ausgehend von den in Kapitel 2 erläuterten EMF-Emissionsquellen Fragen zur Immissions- und Expositionserfassung und der im Alltag und am Arbeitsplatz anzutreffenden niederfrequenten Expositionen. Der Hauptteil des Berichts (Kapitel 4) fokussiert auf gesundheitliche Studien. Einleitend werden die Einschätzungen wichtiger internationaler Gremien zitiert, anschliessend die Studienlage zu den wichtigsten gesundheitlichen Themenbereichen: kindliche Leukämie, andere Krebsarten, neurodegenerative Erkrankungen, Fruchtbarkeit, Schwangerschaft und Geburt, elektromagnetischer Sensibilität, und einigen anderen ausgewählten Themen. Im Anschluss daran wird der Forschungsbedarf in diesen Bereichen umrissen. In Kapitel 5 wird die sozialwissenschaftliche Studienlage dargestellt. Erörtert werden insbesondere die Faktoren, welche die Akzeptanz von Infrastrukturen beeinflussen können. Im letzten Abschnitt wird wiederum der Forschungsbedarf erörtert. In Kapitel 6 wird – der Vollständigkeit halber – noch die rechtliche Situation, wie sie durch die Schweizerische Verordnung über den Schutz vor nichtionisierender Strahlung (NISV) geregelt ist, dargestellt. Abgeschlossen wird der Bericht mit dem Literaturverzeichnis.

1.4 Wichtige Begriffe und Abkürzungen

In diesem Abschnitt werden einige grundlegende im Bericht verwendete Begriffe und Abkürzungen kurz erläutert.

AGW	Anlagengrenzwert	Der Anlagegrenzwert gemäss NISV muss an «Orten mit empfindlicher Nutzung» eingehalten sein. Es handelt sich um vorsorgliche Emissionsbegrenzungen von einzelnen, ortsfesten Anlagen.
ALS	Amyotrophe Lateralsklerose	ALS ist eine Erkrankung des Nervensystems.
	Basisgrenzwert	Grenzwert gemäss ICNIRP zum Schutz der Gesundheit unter Berücksichtigung von Sicherheitsfaktoren
	Dosimetrie	Messung/Berechnung der Strahlendosis
	Dosis	Die Strahlung, welche ein Organismus aufnimmt.
EEG	Elektroenzephalographie	Messung der elektrischen Aktivität des Gehirns
E-Feld	Elektrisches Feld	
EHS	Elektromagnetische Hypersensibilität	siehe IEI-EMF
EMF	Elektromagnetische Felder	Den Bereich des elektromagnetischen Spektrums von den statischen elektrischen und magnetischen Feldern bis zur Infrarot-Strahlung bezeichnet man üblicherweise mit dem Oberbegriff elektromagnetische Felder.
	Emission	EMF, welche von Geräten und Anlagen abgegeben werden.
EMV	Elektromagnetische Verträglichkeit	Elektromagnetische Verträglichkeit bezeichnet die Aspekte der Beeinflussung von Geräten und Infrastrukturen auf andere Geräte sowie die Störfestigkeit der Geräte und Anlagen. Es beinhaltet zudem auch

		die eigene Funktionalität, die durch interne elektromagnetische Felder z.B. durch Übersprechen beeinträchtigt sein kann.
	Exposition	Die Exposition bezeichnet die Befeldung (Aussetzung gegenüber einem elektromagnetischen Feld) eines Organismus.
	Feldstärke	Die Feldstärke ist ein Mass für die Kraft, welche ein elektrisches oder magnetisches Feld auf ein geladenes (bei Magnetfeld: sich auch bewegendes) Teilchen ausübt. Die Stärke von elektrischen Feldern wird in Volt pro Meter (V/m) angegeben, die Stärke von magnetischen Feldern in Ampere pro Meter (A/m) oder als magnetische Flussdichte in Tesla (T).
HF-EMF	Hochfrequente elektromagnetische Felder	Elektromagnetische Felder im Frequenzbereich von 1 MHz bis 300 GHz
H-Feld	magnetisches Feld	Häufig auch als B-Feld bezeichnet
HGÜ	Hochspannungs-Gleichstrom-Übertragung	Verfahren der elektrischen Energieübertragung mit hoher Gleichspannung
HSL	Hochspannungsleitung	
IARC	International Agency for Research on Cancer	Organisation der WHO für Krebsforschung https://www.iarc.who.int/
ICES	International Committee on Electromagnetic Safety	Organisation des IEEE für die Entwicklung von Normen für den sicheren Gebrauch von elektromagnetischer Energie https://www.ices-emfsafety.org/
ICNIRP	International Commission on Non-Ionizing Radiation Protection	Internationale Kommission zum Schutz vor Nicht-Ionisierender Strahlung https://www.icnirp.org/
IEI-EMF	Idiopathic Environmental Intolerance Attributed to Electromagnetic Fields	Idiopathische Umweltintoleranz, die elektromagnetischen Feldern zugeschrieben wird. Subjektive Zuschreibung von Symptomen zu einer erhöhten Empfindlichkeit gegenüber nieder- und/oder hochfrequenten elektromagnetischen Feldern
IF-EMF	Zwischenfrequente elektromagnetische Felder («Intermeditate Frequencies»)	Der Zwischenfrequenz-Bereich ist ein nicht klar definierter Frequenz-Bereich zwischen den niederfrequenten Feldern (0,1 Hz–1 kHz) und dem Hochfrequenz-Bereich (10 MHz–300 GHz), der laut WHO zwischen 300 Hz und 10 MHz liegt. Andere Organisationen wie z.B. das EMF-Portal fassen die Grenzen enger und es wird schon ab 1-10 kHz von Zwischenfrequenzen gesprochen.
	Immission	Bezeichnet die zeitliche und räumliche Verteilung der

		totalen EMF-Emissionen aller Quellen im Raum.
IGW	Immissionsgrenzwert	Der Immissionsgrenzwert gemäss NISV muss an allen Orten, wo sich Menschen aufhalten können, eingehalten sein.
	in vitro Studien	Experimente, die im «Reagenzglas», in einer kontrollierten künstlichen Umgebung ausserhalb eines lebenden Organismus durchgeführt werden.
	in vivo Studien	Experimente die am lebenden Organismus (v. a. Tieren) durchgeführt werden.
	Korona-Entladung	Elektrische Entladung, die durch Ionisation der Luft um Freileitungen entsteht.
	Kriechstrom	Ein Strom, der nicht über das elektrische Leitungsnetz fliesst, sondern über andere leitfähige Medien.
NF-EMF	Niederfrequente elektromagnetische Felder	Elektrische und magnetische Felder im Frequenzbereich von 0 Hz bis 300 Hz
NF-MF	Niederfrequente Magnetfelder	
	Nicht-lineare Verbraucher	Geräte wie beispielsweise Netzteile, die mittels elektronischer Bauteile die sinusförmige Netzspannung in andere, anwendungsbedingte Spannungs- (und Strom-) verläufe umwandeln.
NIS	Nicht-ionisierende Strahlung	Unter nicht-ionisierender Strahlung zählt man im Frequenzspektrum die elektromagnetischen Felder, die Infrarotstrahlung und die optische Strahlung. Die UV-Strahlung bildet den Übergang zur sog. ionisierenden Strahlung. Letztere ist so energiereich, dass sie Atome und Moleküle ionisieren kann. Bei NIS ist das nicht der Fall.
NISV	Schweizerische Verordnung über den Schutz vor Nicht-ionisierender Strahlung	https://www.fedlex.admin.ch/eli/cc/2000/38/de
	Nozebo-Effekt	Das Auftreten unerwünschter Wirkungen durch eine negative Erwartungshaltung. Das Gegenteil des Placebo-Effekts.
OR	Odds-Ratio Chancenverhältnis	Statistische Masszahl, die etwas über die Stärke eines Zusammenhangs von zwei Merkmalen aussagt.
PLC	Power Line Communication	Nutzung von vorhandenen elektrischen Leitungen zum Aufbau eines lokalen Netzwerks zur Datenübertragung.
	Referenzwert	Grenzwerte gemäss ICNIRP für die Feldstärken der extern einstrahlenden elektromagnetischen Felder damit die Basisgrenzwerte eingehalten werden können. In der NISV sind dies die IGW.

ROS	Reactive oxygen species Reaktive Sauerstoffspezies	Sauerstoffhaltige Moleküle, die sehr unstabil und hochreaktiv sind.
SAR	Spezifische Absorptionsrate	Die spezifische Absorptionsrate beschreibt, wieviel Leistung pro Kilogramm Körpergewicht (bzw. biologischem Material) absorbiert wird (W/kg), wenn der Körper in einem elektromagnetischen Feld exponiert ist.
WPT	Wireless Power Transfer	Drahtlose Energieübertragung

2. NF-EMF von elektrischen Energieanwendungen

2.1 NF-EMF in der Elektrizitätsversorgung aktuelle Situation

2.1.1 Grundsätzliche Eigenschaften der EMF

Die Betriebsmittel der Elektrizitätsversorgungsnetze erzeugen in ihrer Umgebung je nach ihrer Funktion, Konstruktion und Spannungsebene elektrische und magnetische Felder in unterschiedlichem Ausmass. Nur bei Freileitungen und luftisolierten Hochspannungsanlagen entstehen elektrische Felder in der Umgebung der Betriebsmittel. Andere Hochspannungskomponenten verfügen üblicherweise über einen metallischen Schirm oder eine metallische Kapselung, welche das elektrische Feld auf das Innere der Komponente beschränken. Magnetische Felder entstehen bei allen Betriebsmitteln, auch bei unterirdischen Kabelleitungen und im Bereich von Unterwerken und Trafostationen. Letztere befinden sich zum Teil in Gebäuden mit häufigem Personenaufenthalt. Da die Netzspannungen konstant gehalten werden, die Ströme aber den schwankenden Lasten unterworfen sind, bleiben die elektrischen Felder auch bei Schwachlast konstant, wohingegen die Magnetfelder sich proportional zum Energietransport bzw. Verbrauch verhalten.

Im Niederfrequenzbereich werden Magnetfelder anders als die elektrischen Felder durch schwach leitfähige Feststoffe (typische Baumaterialien) nicht abgeschwächt und dringen deshalb auch von aussen durch Wände in Innenräume ein. Daher stehen die magnetischen Felder bezüglich ihrer Auswirkung auf die Umwelt und den Menschen im Vordergrund. Im Folgenden werden deshalb die Magnetfelder ausführlicher behandelt und auf die elektrischen Felder (E-Feld in V/m) nur eingegangen, wo sie sich bemerkbar machen. Bei den Magnetfeldern (H-Feld oder B-Feld) sind grundsätzlich die magnetischen Flussdichtefelder gemeint, Symbol B in der Einheit Tesla (1 T = 1 Vs/m^2 = 10 kGauss). Im Allgemeinen sind die Effektivwerte (zeitliches quadratisches Mittel des Feldvektorbetrags) gemeint. Ausnahmen sind Hochfrequenzimpulsfelder, bei denen Spitzen- oder Quasi-Spitzenwerte angegeben werden (siehe entsprechende Hinweise im Text).

Elektrische Energiesysteme zeigen im Abklingverhalten ihrer magnetischen Flussdichtestreufelder mit der Distanz unterschiedliches Verhalten auf. Felder von linearen Quellen, wie Freileitungen und Bahnlinien nehmen langsamer mit der Distanz ab als jene von räumlich begrenzten Apparaten. Abbildung 1 zeigt typische Wertebereiche der magnetischen Flussdichte einiger elektrischer Systeme in Funktion des Abstands. Drei unterschiedlich steile Abklingcharakteristiken sind in dieser Darstellung erkennbar (a, b, c).

Der physikalische Hintergrund der Unterschiede in den drei Fällen wird vereinfacht in Abbildung 2 erklärt: Der asymptotische Verlauf der magnetischen Flussdichte in Funktion der Entfernung von der Quelle ist in grafischer Form dargestellt und als Formelbeziehung angegeben. Die Beziehungen zeigen im Übrigen, dass die abstandsabhängigen magnetischen Streuflussdichten von Betriebsmitteln in einfachen Fällen mit kleinem Rechenaufwand zuverlässig bestimmt werden können (Bräunlich & Bräunlich, 2009). Magnetfelder von Bahnlinien klingen am langsamsten ab, da 20% bis 30% des Traktionsrückstroms nicht in den Schienen und Rückleitern, sondern in einem breiten Korridor von mehreren 100 m Breite im Erdboden zurückfliesst. Das Bahntrassee, welches einen Nettostrom (Hin- minus Teilrückstrom) führt, fungiert damit quasi als grosser Einzelleiter. Erst in grösserer Entfernung geht das Abklingverhalten in eine inverse quadratische Abhängigkeit über.

Streuflussdichtefelder von Leitungen (Typ b, mit einem Zwei- oder Dreiphasensystem) besitzen ebenfalls eine grössere Reichweite (insb. Freileitungen). Sie klingen mit dem inversen Abstand im Quadrat

ab. Entscheidend ist der mittlere Abstand zwischen den Phasen, der proportional in die Amplitude der magnetischen Flussdichte eingeht.

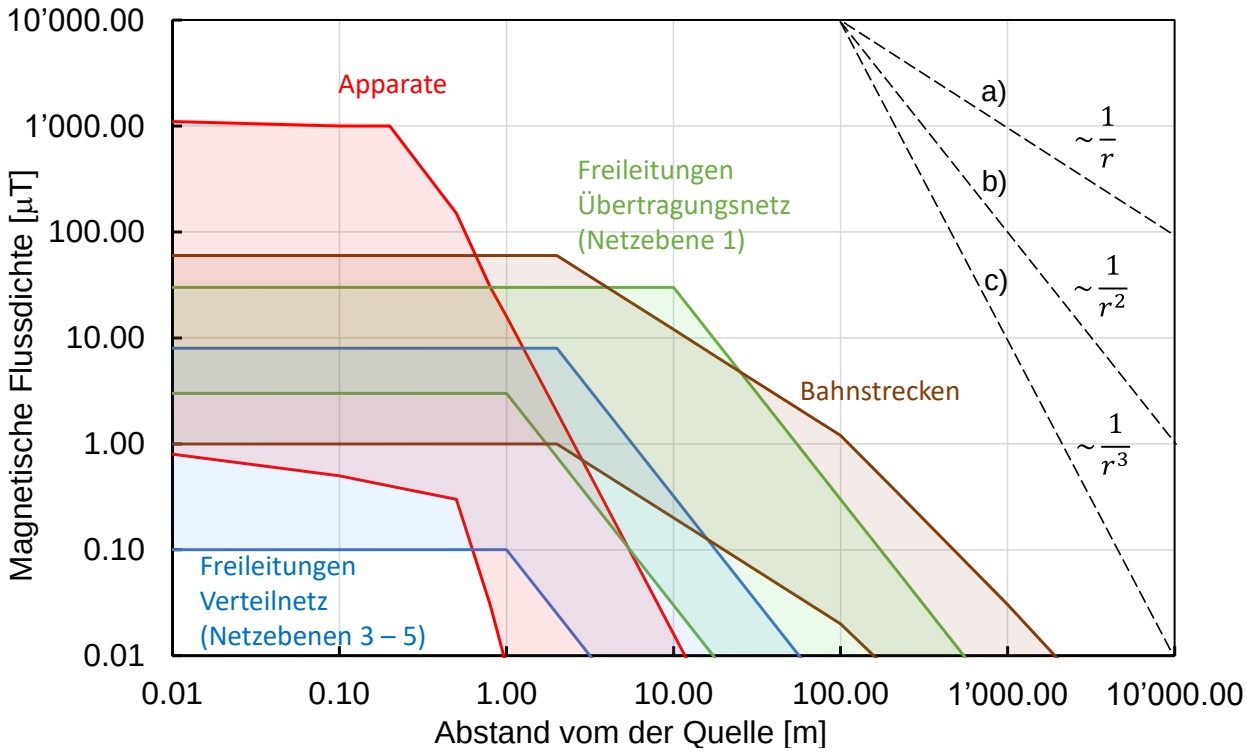
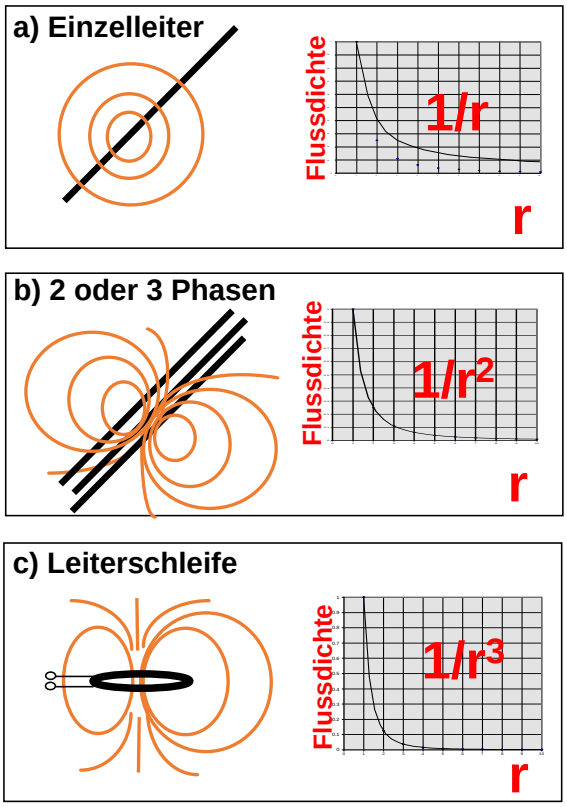


Abbildung 1: Typische Reichweite von magnetischen Feldern (adaptiert aus OTA, 1989 (OTA, 1989))

Die magnetische Flussdichte von Apparaten (z.B. Transformatoren) klingt nahezu invers zur dritten Potenz des Abstands ab (Abbildung 2, Typ c, Leiterschleife). Deshalb fallen z.B. Felder ausserhalb von Transformatorstationen nur bei sehr kleinen Abständen ins Gewicht. Wegen der dritten Potenz im Nenner klingen diese Felder sehr rasch ab.

Im Dreiphasenenergieversorgungsnetz fliessen grosse Rückströme nur im Fehlerfall durch den Erdboden. In diesem Fall entstehen ebenfalls ausgedehntere Magnetfelder im Bereich der fehlerstromführenden Starkstromleitung. Im Niederspannungsnetz entstehen durch Asymmetrien und durch mehrfache Erdung des Neutralleiters kleine Rückströme, die als Streuströme bezeichnet werden und geringe, aber messbare Magnetfelder erzeugen (siehe Kapitel 2.2.5).



Feld eines Einzelleiters
(Bahntraktionsstrom Rückleitung im Erdboden)

$$B = \frac{\mu}{2\pi \cdot r} \cdot I$$

Zwei- oder Dreiphasenleitungen

$$B \cong \frac{\mu \cdot d}{2\pi \cdot r^2} \cdot I$$

d: Phasenabstand

$$d = \sqrt{(d_1^2 + d_2^2 + d_3^2)/2}$$

➔ 2-Dimensionales Dipolfeld

Schleife
(Streufeld eines elektrischen Apparats)

➔ 3-Dimensionales Dipolfeld ortogonal zur Schleifenfläche:

$$B \cong \frac{\mu \cdot A}{2\pi \cdot r^3} \cdot I$$

A: Schleifenfläche

Abbildung 2: Abklingverhalten der magnetischen Flussdichten bei unterschiedlichen Leiteranordnungen bzw. Starkstromeinrichtungen (Quelle: Autoren).

2.1.2 Netzebenen

In der Schweiz wird zwischen 7 Netzebenen unterschieden (Abbildung 3). Die Emissionen in der Umgebung der Hochspannungsbetriebsmittel der oberen Spannungsebenen zeichnen sich durch eine besonders grosse Reichweite aus. Die Flächen mit erhöhten Feldern, auf denen sich Personen aufhalten, sind bei Hoch- und Höchstspannungsleitungen (Netzebenen 1-4) und Anlagen ausgedehnter als in den unteren Netzspannungsebenen.

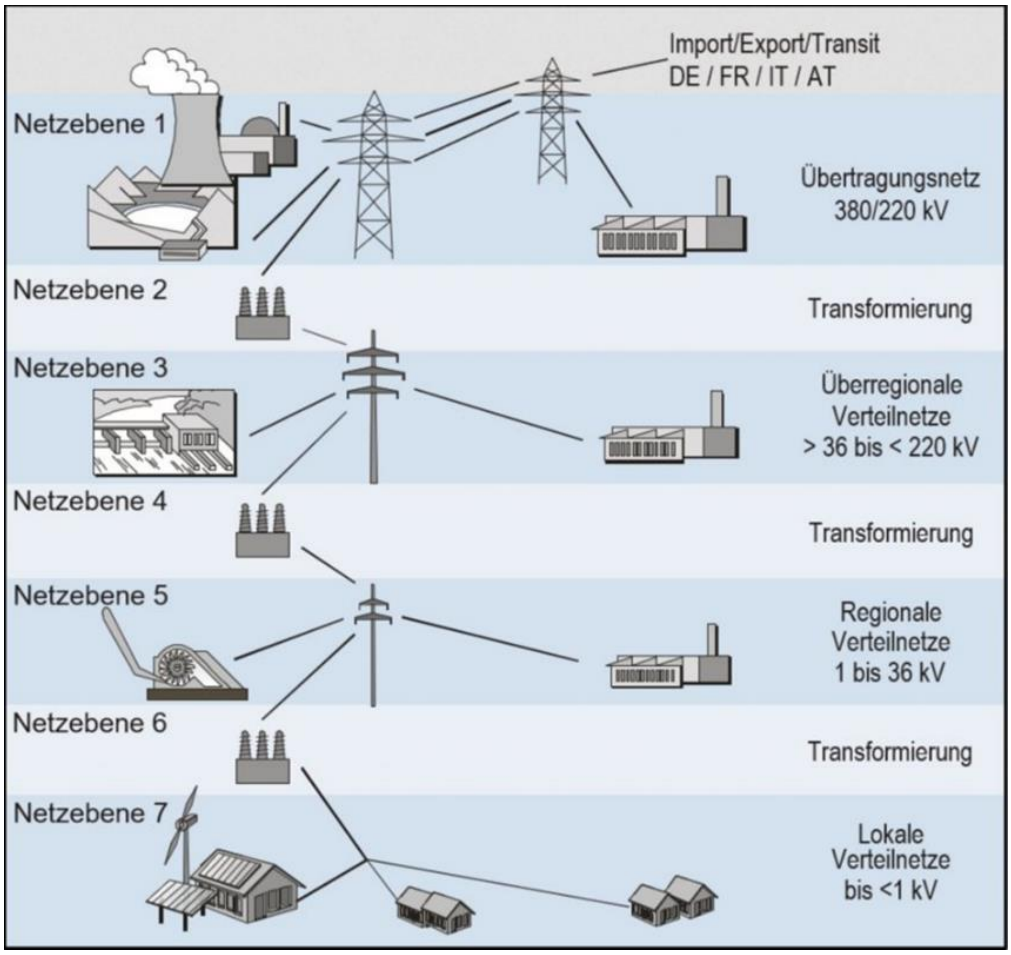


Abbildung 3: Definitionen der Netzebenen 1-7 (Quelle: Website VSE)

Neben den allgemeinen Elektrizitätsversorgungsnetzen, die mit der Frequenz von 50 Hz betrieben werden, gehören auch die elektrischen Bahnen, d.h. das Schienen- und Versorgungsnetz der SBB, zu den ausschlaggebenden Verursachern von EMF in der Umwelt (siehe auch Kapitel 2.1.6).

2.1.3 EMF von Leitungen

Die Starkstromleitungen für die Energieversorgung, von der Erzeugung bis zum einzelnen Haushalt tragen flächenmässig am meisten zu den niederfrequenten magnetischen Feldern im Lebensraum der Bevölkerung bei. Abbildung 4 und Abbildung 5 zeigen ein Beispiel für die räumliche Ausdehnung eines Magnetfelds mit zwei Dreiphasen-Strängen mit Volllast (1920 A) betrieben. Im Umkreis der sechs stromführenden Leiterseile tritt die stärkste Belastung auf. Sie beträgt innerhalb der rot markierten schlauchförmigen Bereiche in Abbildung 4 mehr als 100 µT und unterschreiten bei der Hülle des grossen tunnelförmigen grau markierten Bereichs den Grenzwert von 1 µT. Die typische 1-µT-Korridorbreite liegt bei ca. +/- 50 m.

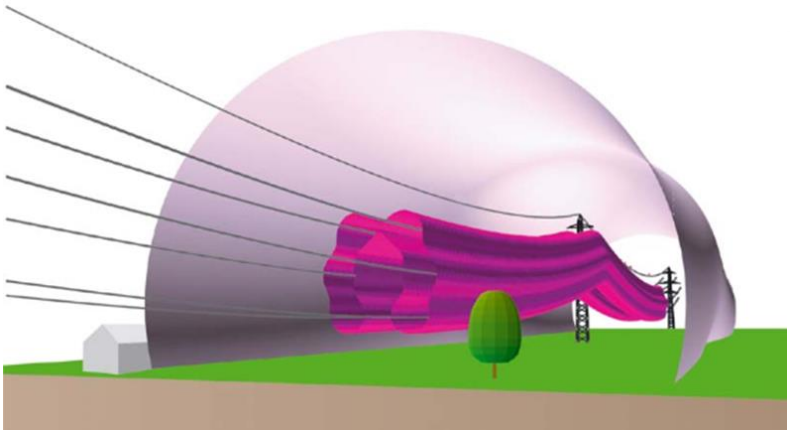


Abbildung 4: Räumliche Darstellung des Magnetfelds einer typischen 380kV-Leitung (Quelle: Website BAFU)

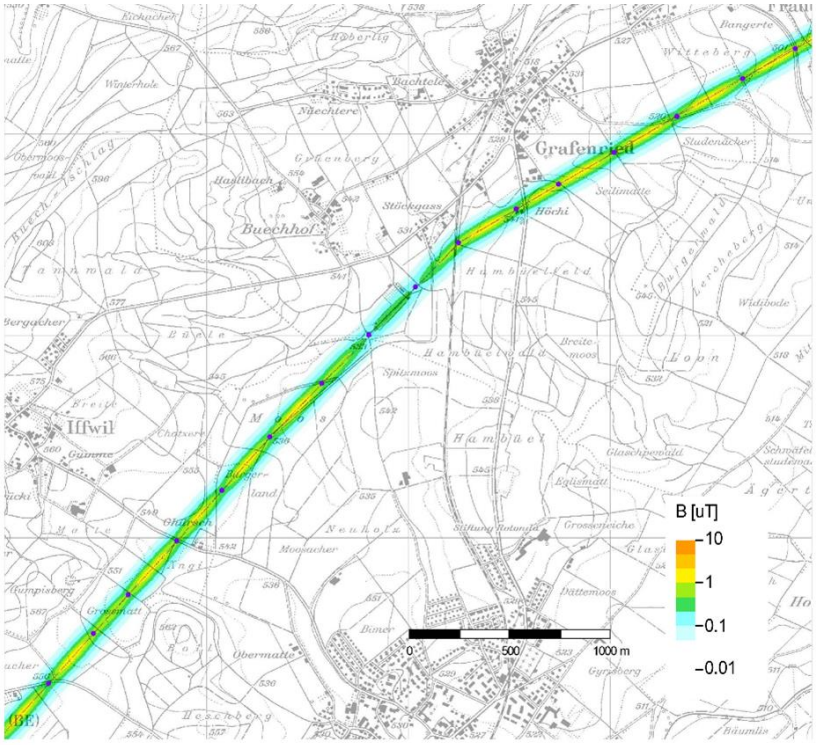


Abbildung 37: Feldstärkekarte (5) für das Gebiet Iffwil - Grafenried – Fraubrunnen. Hintergrundkarte PK25 © Bundesamt für Landestopografie.

Abbildung 5: Beispiel eines Korridors für eine 220-kV-Hochspannungsleitungen im Mittelland, 220-kV-Korridor der BKW und Swissgrid. (Quelle: (Bürgi, 2011)).

Tabelle 1 zeigt die aus der Literatur geschätzten totalen Leitungslängen pro Netzebene und die Gesamtheit der dadurch entstehenden Flächen mit erhöhten magnetischen Feldern (> AGW, 1 µT, bzw. > 0.1 µT).

Netzebene	Freileitungs-länge in der Schweiz	1 μT/0.1 μT Distanz von der Leitungsachse*	Kabellängen 1 m unter dem Boden	1 μT/0.1 μT
Netzebene 1 380 kV/220 kV	6'700 km	20 m / 50 m		
Netzebene 3, 110 kV-36 kV	6'919 km	8 m / 40 m	1'980 km	7 m / 23 m
Netzebene 5, 1 bis < 36 kV	11'570 km	7 m / 30 m	32'170 km	<<7 m / <<23 m
Netzebene 7, 220 V/380 V bis <1 kV	10'835 km	43 cm / 140 cm**	73'382 km	14 cm / 45 cm

Tabelle 1: Vergleich der Distanzen mit Flussdichte-Werten von 1 μT und 0.1 μT bei durchschnittlicher Belastung der Starkstromleitungen (Bräunlich & Biasiutti, 1992; Bürgi, 2011)

Kommentare zu Tabelle 1:
*Die Korridorbreite umfasst die Doppelte Distanz
**4 x 60 W Zimmer-Halogenleuchte, 20 A/12 V

Aus den Korridorbreiten kann das Ausmass der Flächen- bzw. Personenbelastung mit erhöhten magnetischen Flussdichten durch Starkstromleitungen grob abgeschätzt werden. Vorausgeschickt wird, dass sich aus einer Feldexpositionsstudie für die schweizerische Bevölkerung aus dem Jahr 1995 (Stratmann et al., 1995) durch Stichprobenuntersuchung eine über die Zeit und die Bevölkerung gemittelte magnetische Flussdichte von 0.21 μT ergab.

Die Leitungskorridorfläche der Hochspannungsnetzebenen 1 bis 5, auf welcher die magnetische Flussdichte über 1 μT liegt, wird aufgrund der Tabelle 1 zu 270 km^2. geschätzt. Dabei wird angenommen, dass der grösste Teil als Doppelleitungen ausgeführt ist. Mit einer Landesfläche von 41'285 km^2 wird der Flussdichtewert von 1 μT demnach auf einem Flächenanteil der Schweiz von ca. 0.7 % überschritten. In aller Regel wird allerdings die Korridorbreite, die als Freihaltezone für Orte Empfindlicher Nutzung betrachtet wird, weniger häufig frequentiert, so dass der Bevölkerungsanteil, der einer mittleren Flussdichte von 1 μT ausgesetzt ist, deutlich geringer ausfallen dürfte (siehe Abbildung 5). Die Leitungen der Netzebene 1 der Swissgrid 380 kV und 220 kV von total 6'700 km Länge bestehen fast ausschliesslich aus Freileitungen (mit 12'000 Masten). Dabei stellen 41 Leitungen die Verbindung ins Ausland, d.h. zum Europäischen Verbundnetz der UCTE[2] her. Die Swissgrid betreibt im schweizerischen Verbundnetz ausserdem 147 Schaltanlagen als Energieknotenpunkte, meist mit Transformation auf tiefere Spannungsebnen. Die in der Umgebung der Unterwerke entstehenden Bereiche mit erhöhter magnetischer Flussdichte sind vernachlässigbar klein und ausserdem von der Öffentlichkeit wenig frequentiert. Die Netzebene 3, meist als Verteilnetz der Kantone mit 110 kV bis 36 kV betrieben, ist grossflächig angeordnet und besteht aus 6'919 km Freileitung (auf Holz und Betonmasten) und 1'980 km Kabel. Erst in der Netzebene 5 bestehen die Leitungen in der Schweiz vornehmlich aus Erdkabel, mit 32'174 km, gegenüber der Freileitung von 11'570 km. Ein noch höherer Kabelanteil ist bei

[2] Union for the Co-ordination of Transmission of Electricity

Netzebene 7 zu verzeichnen: 73‘382 km, gegenüber 10‘835 km Freileitung zu abgelegenen Verbrauchern im landwirtschaftlichen Gebiet fast ausschliesslich auf Holzmasten. Bei der Verkabelung wird im Mittelspannungsbereich (Netzebene 3) oft mit einzelnen Rohrblöcken pro Phasenleiter gearbeitet, währendem in der Netzebene 5 ein Rohrblock für ein dreipoliges oder drei einpolige Kabel im gleichen Rohr verwendet werden. Im Niederspannungsnetz (Netzebene 7) werden in der Regel 4-polige Kabel, d.h. inkl. neutralem Rückleiter verwendet. Die typische Verlegetiefe beträgt 1 m unter der Erdoberfläche.

2.1.4 Vergleich der EMF von Freileitungen und Kabeln

Bei den elektrischen Freileitungen der höchsten Spannungsebenen werden beim Mindestbodenabstand nach Leitungsverordnung (11.3 m bei Weitspannleitungen), die nach NISV zulässigen elektrischen Feldstärken teilweise überschritten. An einigen Stellen mussten Freileitungen im Netz der Swissgrid auf den höchsten Spannungsebenen angepasst werden. Die maximal zulässige magnetische Flussdichte an öffentlich-zugänglichen Orten von 100 µT wird aber bei den heute in der Schweiz betriebenen Freileitungen nicht erreicht.

Wegen des geringeren Phasenabstands erzeugen Kabelleitungen grundsätzlich enger begrenzte magnetische Streufelder verglichen mit Freileitungen. Vergleicht man das B-Feldprofil einer Kabelleitung mit demjenigen einer entsprechenden Freileitung bei gleichem Betriebsstrom, so stellt man im Fernbereich (Abstand zur Leitungsachse grösser etwa 10 m) bei Kabeln erheblich geringere Flussdichten fest als bei Freileitungen. Ein entsprechender Vergleich der B-Feldprofile von Kabeln und Freileitungen ist in Abbildung 6 dargestellt (Bräunlich & Biasiutti, 1992).

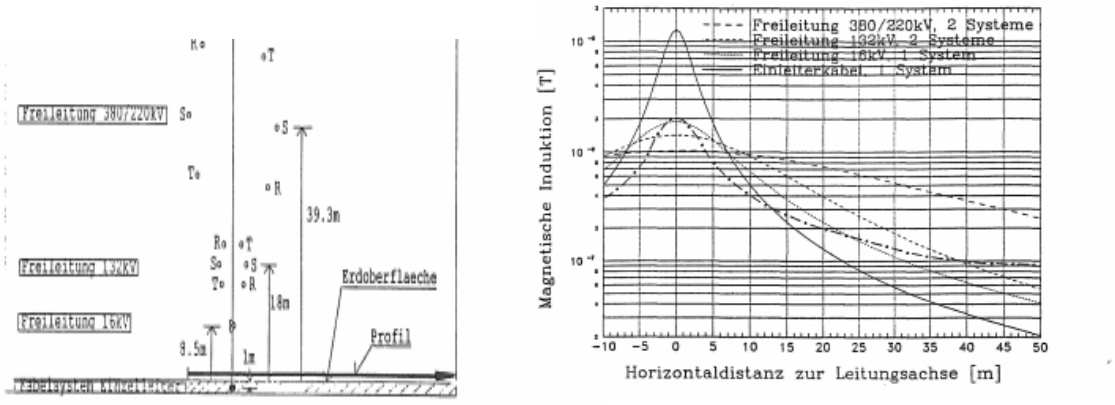


Abbildung 6: Querprofile von B-Feldern von Freileitungen / Einleiterkabelsystem. Links: typische Leiteranordnungen bei verschiedenen Starkstromleitungen, Rechts: Querprofile des B-Feldeffektivwertes der linken Anordnung.

Kommentare zu Abbildung 6:

Links:
Typische Leiteranordnung bei verschiedenen Leiteranordnungen und einer Einleiter-Kabelanlage: Profilachse für Figur rechts: 380 kV/220 kV-Freileitung / 132 kV-Freileitung / 16 kV-Regelleitung / Einleiter-Kabelanlage, in Ebene, Achsabstand 0.3 m, 1 m Verlegetiefe.

Rechts:
Vergleich von Querprofilen des B-Feldeffektivwertes im Abstand von 1 m über Erdoberfläche für typische Leitungsanordnungen gemäss linker Figur. Strangströme 500 A, keine Phasenverschiebung bei Systemen mit 2 Strängen. Die strichpunktierte Kurve steht für einen Ausgleichsstrom von 20 A auf einer Erdleitung, anstelle der Kabelanlage.

Je nach Bauweise des Kabelrohrblocks, bzw. Gestaltung des Mastbildes sowie der Phasenbelegung können die Verhältnisse sehr unterschiedlich liegen. Im Falle von Einleiterkabeln, bei welchen die Phasen in separaten Rohren im typischen Abstand von 30 cm bis 50 cm liegen, wird man jedoch üblicherweise in einem Korridor von ca. 7 m Breite entlang dem Kabelsystem höhere magnetische Flussdichten in 1 m Abstand zum Boden feststellen als bei entsprechenden Freileitungen.

Bei Hochspannungsfreileitungen mit einem oder zwei mitgeführten Erdseilen, verursacht die Längsspannungsinduktion auf dem Erdseil einen Kreisstrom mit dem Erdreich als Rückstromleiter. Dies führt im Betrieb zu Streuströmen im Korridor von einigen 100 m Breite (vgl. Kapitel 2.2.5). Die daraus resultierenden Magnetfelder sind sehr gering, erzeugen jedoch störende Einkopplungen in parallel verlaufende Signal- und Rohrleitungen.

2.1.5 EMF an Netzknoten: Kraftwerke, Unterwerke, Transformatorstationen

Kraftwerke und Unterwerke sind örtlich begrenzt in abgesperrten Bereichen, z.T. in Gebäuden oder auch unterirdisch unter-gebracht. Die elektrischen und magnetischen Felder sind durch folgende Umstände bestimmt: Die Sammelschienen und Transformatoren führen oft grössere Ströme als Leitungen, da sich Ströme aus mehreren Leitungen addieren (Stromknoten). In aller Regel weisen Unterwerke einen grösseren Abstand zu öffentlich zugänglichen Orten auf. Die Felder klingen ausserdem rascher ab als jene von Starkstromleitungen (vgl Abbildung 1). In bewohnten Gebieten werden Schaltanlagen oft unterirdisch und in gekapselter Bauart ausgeführt. Aus diesen Gründen erzeugen Unterwerke nur in Ausnahmefällen relevante magnetische Felder an öffentlich zugänglichen bzw. personenfrequentierten Orten. Für die Exposition im Innern der Werke werden aber weit höhere Felder gemessen. So ist es ratsam, in Eisenbahnunterwerken das Personal vor der Exposition von hochfrequenten EMF bis 10 kHz zu warnen (Kuznetsov & Zakirova, 2019). Es werden Sicherheitszonen definiert, welche durch Abschirmungen und beschränkte Aufenthaltszeiten gekennzeichnet sind. Zusätzlich werden Arbeitsabläufe/-Organisation so bestimmt, dass das Personal möglichst minimal EMF ausgesetzt wird, bis hin zu speziellen Schutzbekleidungen und begehbaren Wegen, welche abgeschirmt sind.

Bei Freiluftschaltanlagen können besonders bei Leitungseinführungen mit niedrigem Bodenabstand in der letzten Spannweite erhöhte elektrische Feldstärken und magnetische Flussdichten auftreten. Auf diesen Aspekt muss beim Bau der Schaltanlagen geachtet werden. Bei Einführung der NISV im Jahr 2000 mussten einige Leitungseinführungen angepasst werden. Die Leiter mit hohen Betriebsströmen und die Transformatoren sind in der Regel ausreichend weit von der Umzäunung entfernt, so dass der Immissionsgrenzwert von 100 µT für magnetische Streuflussdichten bei 50 Hz mit grosser Reserve unterschritten wird.

In Südafrika wurden drei 132-kV-Umspannwerke hinsichtlich EMF-Emissionen statistisch genauer untersucht, mit der Feststellung, dass für die allgemeine Bevölkerung und für Arbeiter die typischen magnetischen mittleren Feldstärken zwischen 1.15 µT und 1.24 µT liegen (Rathebe & Mbonane, 2018); somit weit unterhalb den ICNIRP Richtlinien, welche 1000 µT (Occupational) und 200 µT (General Public) vorgeben.

Eine besondere Herausforderung stellen Transformatorenstationen dar, die sich in Siedlungen oder gar in grossen Geschäfts- und Wohngebäuden befinden. Trotz schnellem Abklingen der magnetischen Streuflussdichten müssen bei eng benachbarten Räumen mit empfindlicher Nutzung Massnahmen zur Verringerung der magnetischen Flussdichte durch Optimierung der Geometrie, durch Abschirmung und kompakten Apparaten /Leitungsführungen ergriffen werden. Orte mit geringen Abständen zwischen Transformatorstationen und Wohn- oder Arbeitsbereichen sind seit Jahrzehnten Bestandteil von vielen Untersuchungen: Im einem aktuellen Beispiel (Cangemi et al., 2015) wird eine 2-mal 500 kVA-Trafostation (Italien) vermessen, wobei die erreichten Feldmesswerte nach 2 m Distanz (ausserhalb der Kabine) bereits auf unter 3 µT abgefallen sind.

Die Abstrahlung einer 1000 kVA Anlage – auf der Niederspannungsseite /Kabelausleitung – kann maximale Felder in der Grössenordnung von typischerweise 50 µT bis 200 µT aufweisen, ausserhalb der Unterstation aber fallen die Werte auf 1 µT (Said et al., 2010). Bei entsprechender Auslegung/Materialwahl kann eine um Faktor 10 reduzierte Emission nachgewiesen werden: Merkpunkte und Grundsätze werden erarbeitet, um bei einem typ. 30 kVA, 20 kV/400 V Trafo in Häusern möglichst geringe EMF-Emissionen zu verursachen bzw. Immissionen zu vermeiden (Seymenliyski et al., 2018).

2.1.6 EMF der Wechselstrombahnen und deren Stromversorgung

Das Übertragungsnetz der Eisenbahnen weist eine Länge von ca. 2‘300 km auf. Seine Spannung ist mit 132 kV niedriger als im 50-Hz-Höchstspannungsnetz und wird durch zahlreiche Bahnkraftwerke (Fluss - und Hochdruckkraftwerke) sowie Frequenzumformwerke aus dem 50-Hz-Netz gespeist. Das Stromnetz der Bahnen wird mit 16.7 Hz betrieben. Die Fahrleitungsspannung beträgt 15 kV. Für das 132-kV-Hochspannungsnetz der SBB und die Unterwerke gelten die gleichen Aussagen wie in den Kapiteln 2.1.3 und 2.1.5. Die dreimal tiefere Frequenz der Magnetfelder führt zu entsprechend geringeren induzierten Spannungen. Deshalb gilt in nach NISV ein dreimal höherer Immissionsgrenzwert von 300 µT für 16.7 Hz-Magnetfelder.

Der vermehrte Einsatz von Leistungselektronik in Form von Frequenzumrichtern zur Deckung des steigenden Energiebedarfes der Bahn- und Elektrizitätsnetze, verursacht allerdings höhere Frequenzanteile als nur die Netzfrequenzen 16.7 Hz bzw. 50 Hz. Hochfrequente, überlagerte Ströme und Spannungen und daraus resultierende elektrische und magnetische Felder treten bis in den MHz-Bereich auf (vgl. Kapitel 2.2.2). Dieser Befund wird auch durch die Vermessung eines italienischen Hochgeschwindigkeitszuges (2-gleisig, AC 25 kV Trasse) bestätigt (Bellan et al., 2013). Die Stromquelle sitzt im Zug (Triebeinheit); die Resultate erlauben nun die max. Ströme zu bestimmen, welche gemäss, IEC 62236-2, 2008[3] die Feld-Limiten im Frequenzband von 60 bis120 kHz nicht überschreiten. Die Messungen zeigen allerdings auch, dass sowohl im unteren Frequenzband bis 160 kHz und weiter bis zu 1 GHz die EM-Felder nicht die obige IEC-Norm überschreiten. Die Emissionen sind stark vom Triebsatz / Leistung und vom Layout der Bahninfrastruktur abhängig (Einspeisung, Feeder, Erdleitungen / Beiseil, Masterdung, Schiene usw.).

Die bauliche Infrastruktur des Schienennetzes bildet eine besondere Quelle für ausgedehnte magnetische Streuflussdichten, die aufgrund des Fahrbetriebs mit sich zeitlich und örtlich bewegenden Lasten, grosse Strom-Schwankungen mit kurzzeitigen Maximalwerten aufweisen. Der Traktionsstrom wird einphasig über eine Fahrleitung zur Lokomotive herangeführt und der Rückstrom zum Unterwerk erfolgt über Schiene, Erdreich und Rückleiter-Erdungsseile entlang der Fahrmasten. Die Tatsache, dass der Betriebsstrom teilweise über das Erdreich geführt wird, ist bei Bahnen einzigartig und hat prinzipiell ein langsameres Abklingen der Magnetfelder mit zunehmenden Abstand r vom Gleis zur Folge (im Nahbereich proportional zu 1/r, vgl. Abbildung 1). Dieser Aspekt ist besonders bei Spitalinfrastrukturen nahe dem Geleise im Hinblick auf einen störungsfreien Betrieb von medizinischen Geräten wichtig, bei welchem das Layout der Trassen der Bahn einen entscheidenden Einfluss hat. So kann die fehlerfreie Funktion eines ECG-Gerätes (0.2 bis 0.4 µT) nur bei einer Distanz von 300 m gewährt werden (ohne Erdleiter), bei entsprechender Ausrüstung mit 2 Erdrückleitern verkleinert sich die Distanz auf 190 m (Schmautzer et al., 2010).

Die Reduktion des B-Feldes wird durch die Anbringung eines Erdrückleiters gemäss den rumänischen Staatsbahnen nachweislich reduziert. Das elektrische Layout der Elektrifizierung - mit/ohne Längsbooster und Erdrückleiter hat entscheidenden Einfluss auf die Reduktion der peripheren Magnetfelder

[3] https://webstore.iec.ch/publication/6621

(Oancea et al., 2019). Ziel ist es, die Felder zu minimieren bzw. die Einhaltung der EMC-Richtlinien in EN 50121-2 («Railway applications - Electromagnetic compatibility - Part 2: Emission of the whole railway system to the outside world»). In den Rückleiterseilen fliessen rund 40%, in den Schienen ebenso 40% und im Erdreich noch 20% des Rückstromes (Biesenack et al., 2006) (Kap. 5.3.3.2).

Für die EMF-Belastung im Zug selbst wird das magnetische Feld mit einem 3-D-Modell berechnet (Buccella & Feliziani, 2003). Die Grundlage bilden die Parameter des italienischen Zuges Freccia Rossa (Mailand-Rom) mit Erdrückleitern. Im Innern der Wagons wird mit 1-10 µT gerechnet, hingegen an den Wagenübergängen wird ein erhöhtes Feld von 150 µT ausgewiesen. Diese Werte stimmen recht gut überein mit den gemessenen Werten im Thalys Zug (Brüssel-Paris) und liegen dort im Bereich von 3 µT bis 18 µT im Innern der Wagons. Diese Werte sind umso wichtiger einzuhalten, da Italien im Frequenzbereich bis zu 10 kHz neue Vorsorgewerte definierte: für alte Installationen bis zu 10 µT, für neue Anlagen nur noch 3 µT.

2.1.7 Emissionen von Gleichstrombahnen

Strassen- und Nahverkehrsbahnen zeichnen sich durch eine stark frequentierte Infrastruktur mit zahlreichen Haltestellen aus. Naturgemäss ist dort mit einer hohen Zahl an Fahrgästen zu rechnen. Obwohl diese Schienenfahrzeuge im Grundsatz mit DC-Fahrleitungsspannungen im Bereich von 600 V betrieben werden, entstehen gerade an den Stationen ausgeprägte Anfahr-/Bremsströme, im 1000-A-Bereich, welche als leicht moduliert angesehen werden können (zunehmend/abnehmend). Dies gilt vor allem im Haltestellenbereich, wo Fahrzeuge beschleunigt und / oder abgebremst werden. Die zeitlichen Stromänderungen führen überschlagsmässig zu Immissionen auf dem Bahnsteig in 5 m Distanz in der Grössenordnung von 200 µT bis 300 µT, (bei einem Betriebsstrom von 1000 A sind das 200 A/m*1.257 µT -> 250 µT, wobei es sich um «langsam» veränderliche Gleichfelder handelt. Aufgrund der zugelassenen Gleichfelder bis 50‘000 µT und der kurzen Expositionszeit der Fahrgäste ist nicht von einer Grenzwertverletzung auszugehen. Für Langzeitexpositionswerte gibt die SUVA als Grenzwert für statische Magnetfelder am Arbeitsplatz für Kopf und Rumpf 2‘000 µT an, für elektrische Felder 40 kV/m und übernimmt damit die Empfehlung der ICNIRP Guidelines 2009 (ICNIRP, 2009).

2.1.8 Frequenzen der EMF von Energieversorgungsnetzen

Die elektrischen und magnetischen Felder von Einrichtungen der elektrischen Energieversorgung können in drei Bereiche eingeteilt werden (Abbildung 7): (1) Netzfrequenzen, (2) harmonische Oberwellen der Netzfrequenzen, (3) interharmonische Oberwellen und impulsförmige Emissionen im höheren Frequenzbereich, verursacht durch leistungselektronische Apparate und der sogenannten Power Line Communication (PLC), siehe Kapitel 2.2.3. Die Emissionen sind in Abbildung 7 als transparent eingefärbte Säulen und Flächen dargestellt: blau für das elektrische Feld, rot für die magnetische Flussdichte und violett für elektromagnetische Abstrahlungen im Hochfrequenzbereich. Zum Vergleich sind die Grenzwerte für die Personenbelastung nach NISV, aber auch solche aus der Normierungsbereich elektromagnetische Verträglichkeit miteingezeichnet. Die Grenzwerte im Hochfrequenzbereich sind situationsabhängig. Es wurde deshalb die Grössenordnung der höchsten zulässigen Werte eingezeichnet. Dabei handelt es sich im Impulsspitzenwerte.

Beim Vergleich der Einschränkungen durch die NISV und die EMV-Normen zeigt sich, dass die Grenzwerte der ICNIRP und NISV für Energieanlagen nur im Netzfrequenzbereich ausschlaggebend sind (Bereich (1)). Im Hochfrequenzbereich (3) liegen die Emissionen der elektrischen Energieanlagen im öffentlichen Bereich zwei bis drei Zehnerpotenzen unter den Werten der NISV. Ausschlaggebend sind aber die umfangreichen EMV-Reglementierungen (ITU, CISPR/CENELEC). Sie dienen dem Schutz der funktechnischen Kommunikation vor Störungen aus Energieanlagen.

Die Funkkommunikation erzeugt somit wesentlich grössere Hochfrequenzfelder im öffentlichen Raum als die energietechnischen Anlagen. Die Einschränkungen der Hochfrequenzemissionen aus grossen Anlagen mit Leistungselektronik stellen für Funksignale einen notwendigen Störabstand in der Grössenordnung von 40 dB sicher. Dies entspricht einem Faktor 100 in den elektromagnetischen Feldstärken. Dieser Störabstand soll im ganzen Empfangsbereich, also auch in grösserer Entfernung der Sendeantennen, eingehalten werden (vgl. Kapitel 2.2.2 -> Frequenzumrichterstationen).

Die wichtigste Rolle bei den EMF-Emissionen von Energieanlagen spielen die Netzfrequenzen. Hier werden die Grenzen der zugelassenen Amplituden nach NISV, an einigen Stellen im Elektrizitätsversorgungsnetz ausgeschöpft. Oberwellenströme und deren Magnetfelder (Bereich (2)) liegen, von Ausnahmen abgesehen, im Bereich von einigen Prozenten der Grundwelle und nehmen ebenso eine untergeordnete Rolle ein.

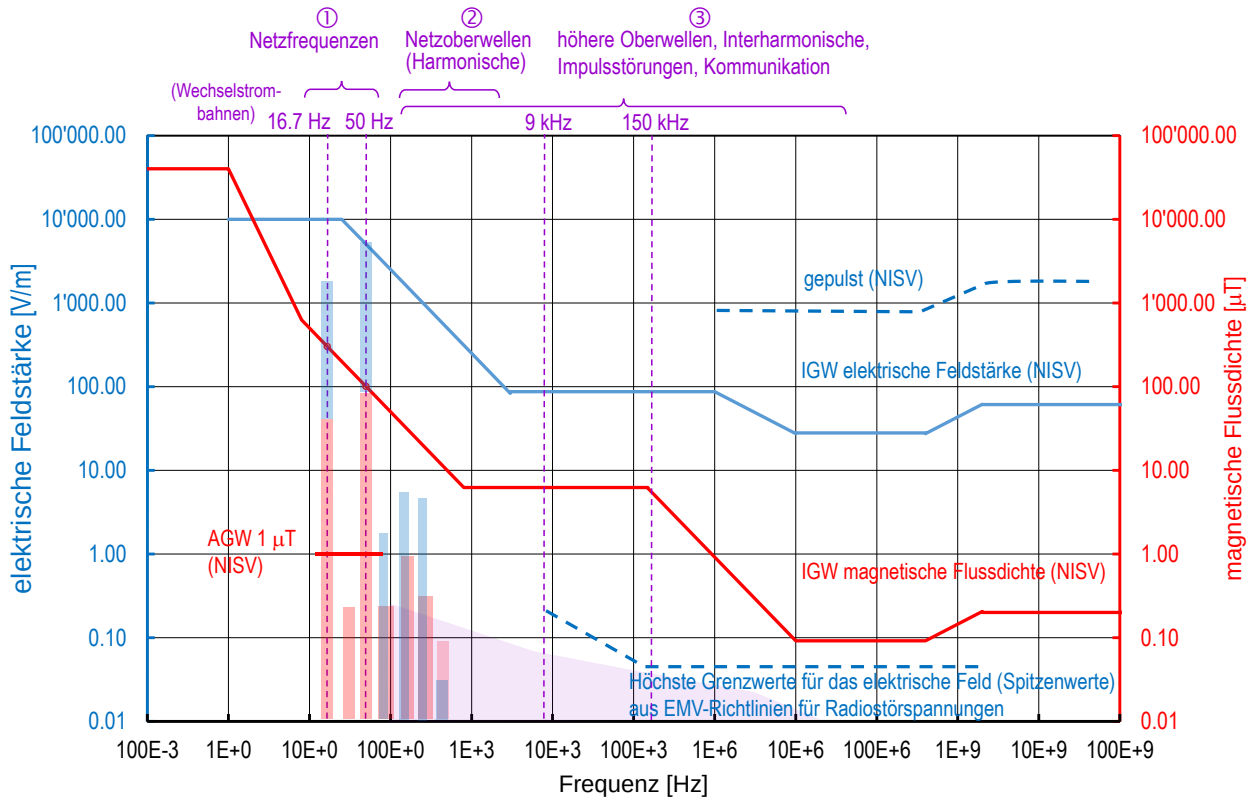


Abbildung 7: Frequenzen und maximale Feldstärken von EMF-Emissionen von Energieversorgungssystemen als transparent eingefärbte Säulen und Flächen: blau: elektrische Felder, rot: magnetische Felder, violett: elektromagnetische Emissionen. Eingezeichnet sind ausserdem die Grenzwerte der NISV und der EMV Norm, CISPR 18. (Quelle: Autoren)

2.2 Beispiele aktueller technologischer Entwicklungen und Untersuchungen

In diesem Abschnitt werden aktuelle technologische Entwicklungen exemplarisch anhand neuerer Publikationen vorgestellt.

2.2.1 Netzqualität, Oberschwingungen

Die Netzqualität, allem voran die Oberschwingungen, werden anhand der Spannungsqualität beurteilt. Lastströme, die von der Sinusform der Netzfrequenz abweichen, werden nicht beurteilt, solange die Spannungsform am Übergabepunkt im zulässigen Rahmen bleibt. Quantitative Angaben der Netzqualität (d.h. der Spannungsqualität) lassen Rückschlüsse auf die elektrischen Felder zu aber nicht auf die magnetischen Felder. Im Niederspannungsnetz entstehen zwar magnetische Felder, aber kaum relevante elektrische Felder. Das Ausmass der EMF im Oberschwingungsbereich aufgrund von Angaben über die Netzqualität kann deshalb nur grob geschätzt werden. Ein Zusammenhang zwischen Strömen und Spannungen ergeben sich aus dem Netzimpedanzspektrum an den Verknüpfungspunkten. Die hauptsächlich induktiven Netzimpedanzen liegen z.B. in Transformatorstationen bei 50 Hz auf der Niederspannungsseite je nach Transformatorleistung und Kurzschlussspannung zwischen 0.01 Ω und 0.1 Ω. Sie müssen auf die Oberschwingungsfrequenzen umgerechnet werden und können anschliessend zur groben Abschätzung der Oberschwingungsströme und der Magnetfelder benutzt werden.

Die höchsten Werte der Spannungsvariationen, Flicker und vor allem Oberschwingungen werden in der Praxis auf der Niederspannungsebene gemessen. Tendenziell steigt die Netzqualität mit der Netzspannungsebene. Einerseits mitteln sich Schwingungsverformungen teilweise durch sehr viele Einzellastströme aus. Andererseits wirken sich die Streureaktanzen der Transformatoren dämpfend auf die höheren Oberschwingungen aus. Probleme der Netzqualität entstehen auf den oberen Spannungsebenen in der Regel nur bei Schwerindustrieanlagen (Schmelzöfen, Steinbrecher, Grosspressen etc.). Zur Beschränkung des Oberschwingungsgehalts im Netz dient in der Schweiz das vom VSE herausgegebene Regelwerk: „D-A-CH-CZ, Technische Regeln zur Beurteilung von Netzrückwirkungen, dritte Ausgabe (2021)“ (VSE, 2021). Die Werte sind in weiten Teilen deckungsgleich mit den Europäischen Normen EN 50160 und EN 61000-3-2.

Oberschwingungen werden durch folgende Elektrizitätsverbraucher erzeugt:

- Geräte mit Gleichrichterspeisegeräten für alle IT-Anwendungen
- Beleuchtung je nach Lampenprinzip in unterschiedlichem Mass
- Elektronische Antriebe
- Traktionsgleichrichter für Strassenbahnen
- Ladestationen für Batterieladestationen

Traditionell erzeugen Apparate mit ferromagnetischen Kernen (Transformatoren und Wandler) durch ihre nichtlinearen Hauptinduktivitäten tiefe ungerade Oberschwingungen (ca. bis zur 11. Harmonischen). Hinzu kommen in zunehmenden Mass die elektronischen Netzkomponenten und Energieerzeuger:

- Frequenzumrichter-Anlagen im Versorgungsnetz
- Blindleistungskompensationsanlagen
- Dezentrale Energieerzeuger erneuerbarer Energie (Solar-, Windkraft-, Biogas- und Wärme-Kraft-Kopplungsanlagen)

Die steigende Anzahl an dezentralen Kleinerzeugern und Speicheranlagen kann dem angestrebten Energiewandel zugeschrieben werden. Da solche Anlagen vermehrt auf der Mittelspannungsebene 5 oder der Transportebene 3 angeschlossen sind, muss die Netzqualität in den höheren Spannungsebenen immer mehr im Auge behalten werden.

Dies gilt schliesslich auch für die oberste Netzebene 1, auf welche sich die Oberwellen durchkoppeln. Abbildung 8 zeigt eine aktuelle Messung der Spannungsoberschwingungen an einer Phase einer 380-kV-Freileitung (Netzebene 1). Auffällig ist die hohe Amplitude der 7. Spannungsharmonische gefolgt

von der 5. und der 11. Harmonischen (300 Hz, 250 Hz und 550 Hz). Die Werte liegen noch unterhalb der Planungspegel nach IEC/TR 61000-3-6 von 1.8%.

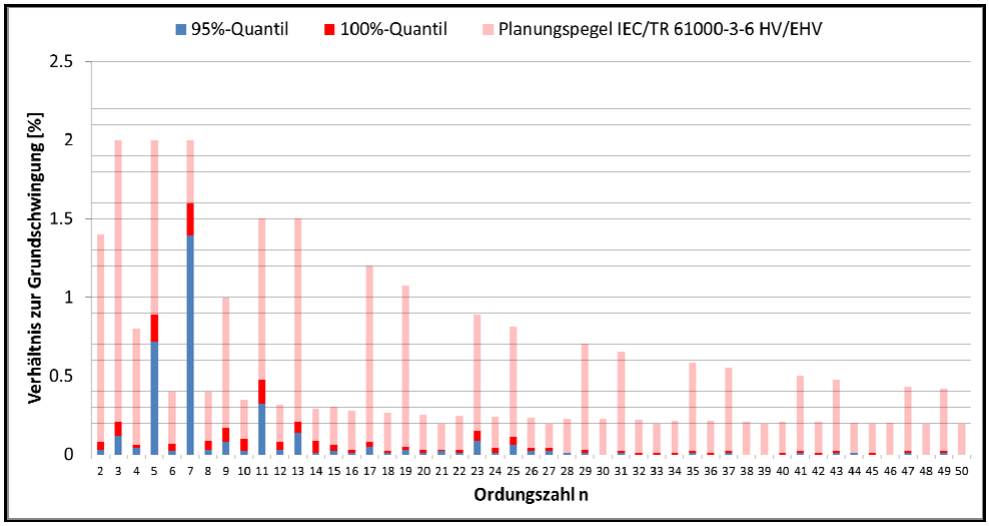


Abbildung 8: harmonische Oberwellen: Spannungsharmonische der Phase L1 bis Ordnung 50 im Verhältnis zur Grundschwingung: blaue Balken; 95%-Quantil, rote Balken; 100%-Quantil, hellrote Balken; Planungspegel aus IEC/TR 61000-3-6, aus Bericht A16/101-2, FKH 2016 (Brügger & Bräunlich, 2016).

Ungerade Oberschwingungen bilden die charakteristischen Oberschwingungsanteile in den heutigen Stromversorgungsnetzen. Aufgrund der weitgehend symmetrischen Belastung der dreiphasigen Netze im Höchstspannungsnetz bleibt die Symmetrie auch bei Spannungsverzerrungen erhalten. Geradzahlige Oberschwingungen können nur aus Belastungen entstehen, die in der Polarität unsymmetrisch sind.

Die Oberschwingungen auf Hochspannungsfreileitungen werden proportional zur Spannung auf das elektrische Feld und proportional zu den Strömen auf das magnetische Feld übertragen. Der Anteil auf die Ausschöpfung des Emissionsgrenzwerts nach ICNIRP und NISV ist trotz linearer Addition der Oberwellen zur Grundwelle noch gering.

2.2.2 Emission von Harmonischen und Interharmonischen am Beispiel von Umrichterwerken der Bahnstromversorgung

Durch den stetigen Weiterausbau des öffentlichen Schienenverkehrs in der Schweiz steigt der Energiebedarf im Bahnstromversorgungsnetz vor allem im Kurzlastbereich. In der Folge reichen die eigenen 16.7-Hz-Kraftwerke nicht mehr aus, so dass Netzkopplungsstellen verteilt über das ganze Land gebaut werden müssen, welche die Frequenzumwandlung (50 Hz zu 16.7 Hz) besorgen. Auch der Wechsel von bestehenden rotierenden Maschinengruppen auf statische Umrichteranlagen mit Leistungshalbleitern verursacht Emissionen oberhalb der Betriebsfrequenz 16.7 Hz / 50 Hz. Durch EMV-Massnahmen beim Bau und Betrieb können die Emissionen, bzw. Immissionen am Rande von solchen Grossanlagen so beschränkt werden, dass die Bahnrichtlinien eingehalten werden. Mit Messungen von Emissionsspektren muss jeweils nachgewiesen werden, dass die Richtlinien erfüllt sind (Oancea et al., 2019).

Abbildung 9 zeigt ein aktuelles Emissionsspektrum bei Nennbetrieb einer Umrichterstation. Dargestellt ist das gemessene Spektrum der Störaussendungen im Frequenzbereich zwischen 150 kHz und 1 GHz. Der Verlauf des Emissionsgrenzwerts nach EN 50121-2 ist als rote Linie eingezeichnet. Die Norm verlangt eine Beurteilung der Emissionen im Abstand von 10 m vom Gebäude bzw. der Anlagenbegrenzung. Die Nachbildung in einer RFI semi-anechoischen Kammer im typischen Frequenzbereich von 150 kHz bis 1 GHz zeigen auch gute Resultate im Vergleich zu realen Messungen am Gleis (Paonessa et al., 2020).

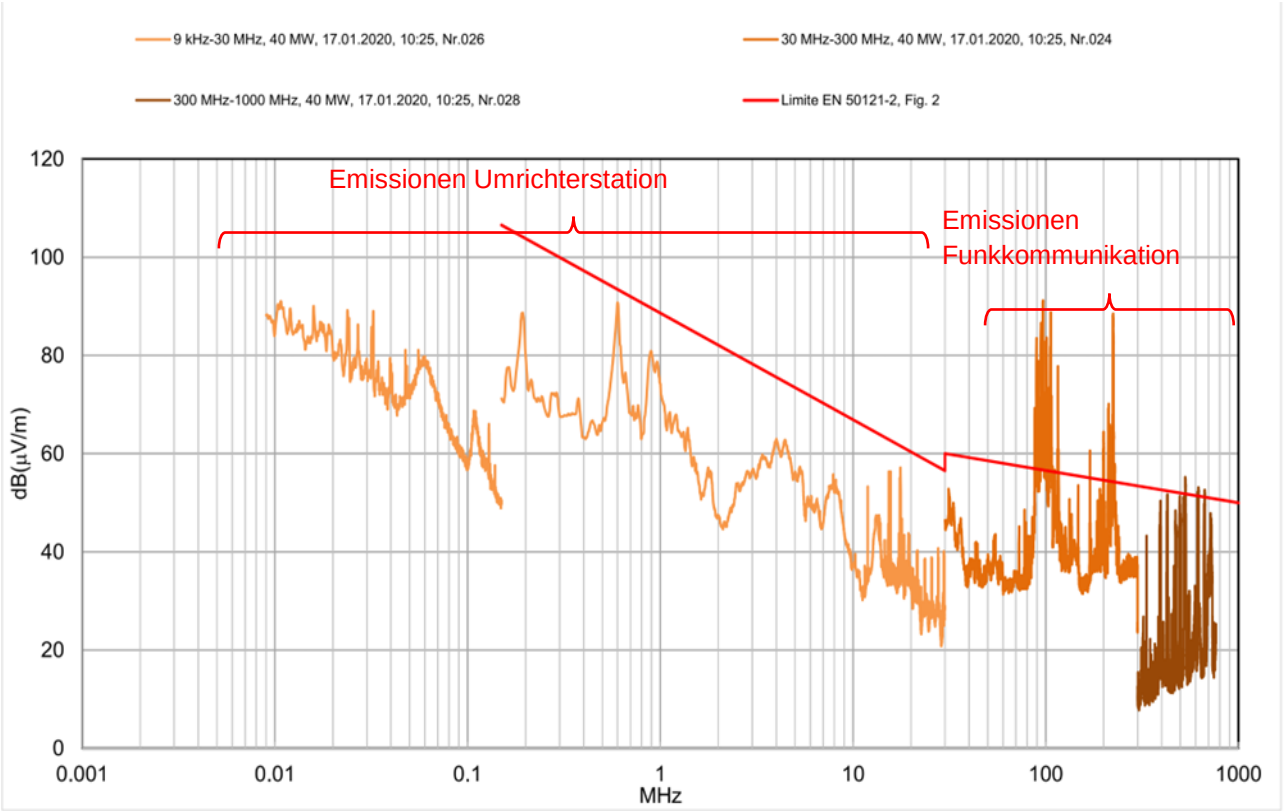


Abbildung 9: Störspektrum in unmittelbarer Nähe eines Bahnumformerwerkes, bei ausgeschaltetem-, und im Betrieb des Umrichters bei 40 MW, in Rot die Grenzwerte gemäss EN50121-2, aus Bericht A20/007, FKH 2020 (Friedli & Bräunlich, 2020).

Emissionen von Umformerwerken können bis zu Frequenzen von 30 MHz festgestellt werden. Im Frequenzbereich zwischen 30 MHz und 1 GHz dominieren Hintergrundemissionen von Kommunikationssignalen ausserhalb der Umrichterstation. Der obige Bericht von S. Paonessa et al. (Paonessa et al., 2020) bestätigt auch diesen Befund der FKH (Fachkommission für Hochspannungsfragen) in Abbildung 9. Letztere werden von den Hintergrundstörfeldern der Kommunikation UKW und DAB im Bereich 100 MHz bis 200 MHz, Funkfeuern und der Mobilkommunikation im Bereich 900 MHz bis 1.8 GHz Band erzeugt und sind nicht ohne weiteres eindeutig identifizierbar (vgl. Kapitel 2.1.8). Die Spitzenwerte (quasi-peak-Werte) der Spektren im Bereich oberhalb von 30 MHz liegen damit immer noch um einen Faktor 30 unter den Grenzwerten für gepulste elektrische Felder im Bereich 10-860 MHz von 900 V/m. Dies gibt einen Hinweis darauf, dass die Felder von Leistungselektronischen Anlagen gegenüber jenen der Funktechnologie für die Umwelt vernachlässigbar sind.

2.2.3 EMF von Trägerfrequenzsignalen im Verteilnetz

Das Verteilnetz wird traditionell für Tonfrequenz-Rundsteuer-Anlagen (TRA) zur Zu- und Abschaltung von Warmwasserspeicher, Wärmepumpen u.Ä. genutzt. Für solche Signale wird von den Netzbetreibern der Frequenzbereich zwischen 150 Hz bis 3 kHz mit einer Pulssendeleistung in der Grössenordnung von 100 W verwendet. Dabei werden Spannungsamplituden bis 20 V der Netzspannung überlagert. Ab 500 Hz können die überlagerten Spannungen reduziert werden (Abbildung 10).

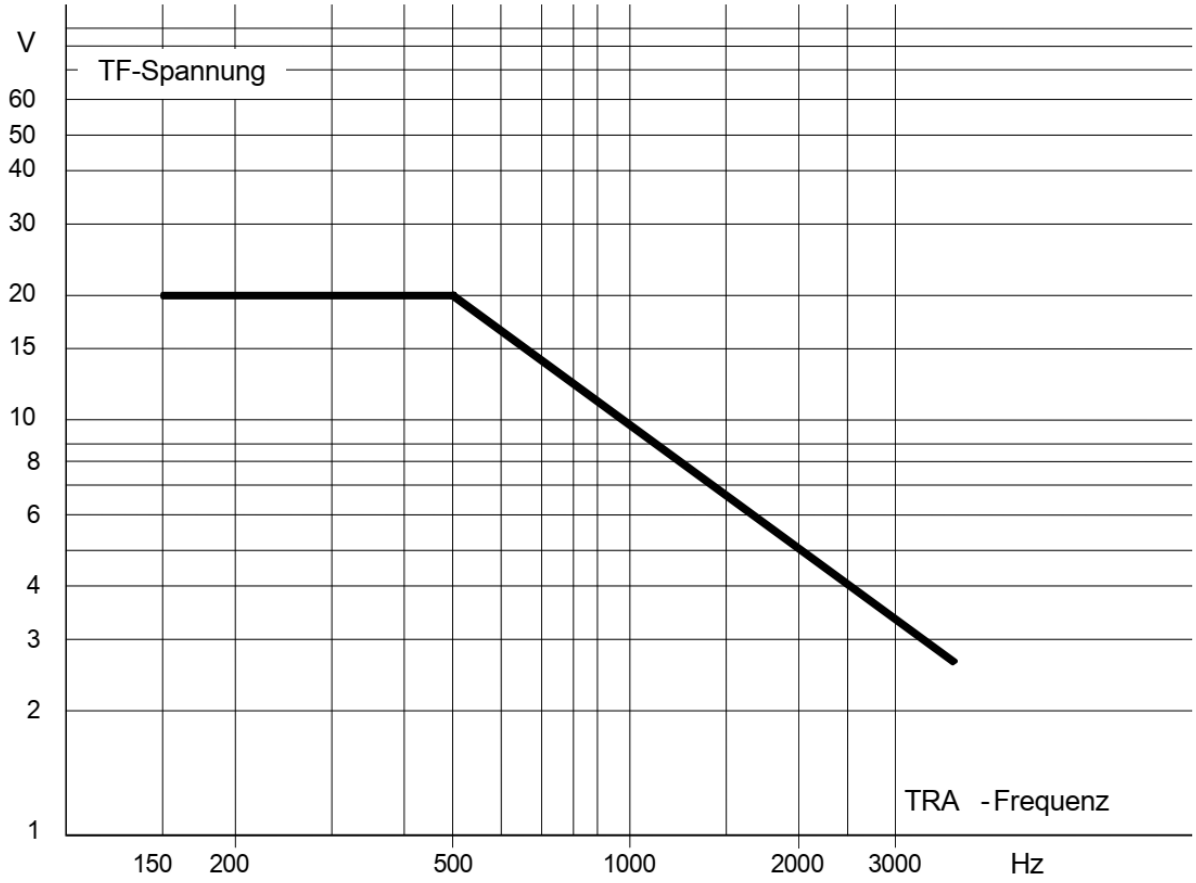


Abbildung 10: Höchstwert der TF-Spannung (L-N) im Netz, aus D-A-CH-CZ, technische Regeln zur Beurteilung von Netzrückwirkungen, 2007 (3. Ausgabe von 2021: (VSE, 2021))

Über das Ausmass der EMF-Emissionen durch Rundsteuersignale sind keine Literaturstellen bekannt. Aufgrund der Ströme im Bereich von mehreren Ampere und der frequenzabhängigen Gewichtung entsprechen dem ICNIRP-Immissionsgrenzwert ist offensichtlich, dass EMF von Rundsteuersignale während der Sendedauer der Telegramme einen relevanten Beitrag zur Wirbelstrominduktion in leitfähigen Materialien, wie auch in biologischem Gewebe beitragen können. Die Signale sind aber von kurzer Dauer und nur zu bestimmten Tageszeiten aktiv. In der Literatur wird dem Beitrag der Rundsteuersignale zu den EMF keine besondere Bedeutung beigemessen.

Seit den letzten zwei Jahrzehnten werden über Trägerfrequenzen vermehrt auch digitale Daten über

den Energieverbrauch und Produktion übertragen, sowie Lasten gesteuert. Diese für den leitungsgebundene Datenaustausch (PLC) verwendeten Signale benutzen Frequenzbänder, die in der CENELEC-Norm EN 50065-1 festgeschrieben sind (vgl. Abbildung 11).

Für die durch PLC aber auch GSM-Funknetze nutzbar gewordenen IT-Funktionalitäten wurde das Schlagwort „Smartgrid“ geschaffen. Unter diesem Begriff werden in der Literatur die neuen Möglichkeiten und Auswirkungen des digitalen Austausches von Netzleitdaten im Verteilnetz ausgiebig diskutiert. Wichtiger Bestandteil sind auch automatisiert übermittelte Energiedaten für Verrechnungs- und Optimierungszwecke. Für sie wurde der Begriff „Smartmetering“ eingeführt. Bei der PLC wird wegen der Abstrahlung die eingespeiste Leistung auf 5 mW (Cenelec-Norm EN50065-1) limitiert.

CENELEC-Band	Frequenzbereich	Nutzer
-	3 - 9 kHz	Energieversorger
A	9 - 95 kHz	Energieversorger
B	95 - 125 kHz	Kundenanlagen
C	125 - 140 kHz	Kundenanlagen
D	140 - 148,5 kHz	Kundenanlagen

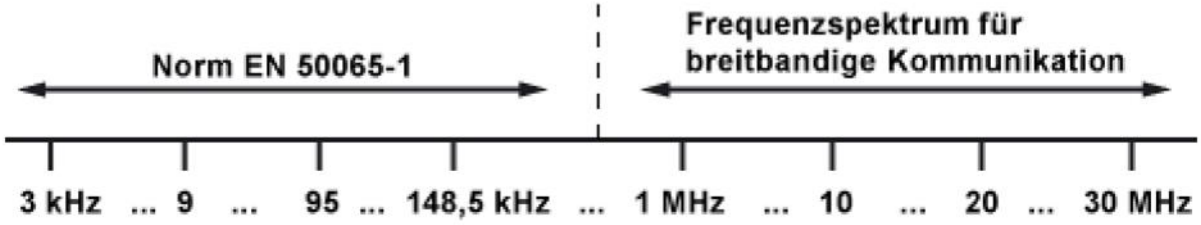


Abbildung 11: Grundsätzliche Aufteilung der PLC-Frequenzbänder, gemäss CENELEC Norm EN 50065-1.

Zum Schutz vor Störungen und zur Gewährleistung der elektromagnetischen Verträglichkeit regelt die CENELEC-Norm EN 50065-1 die Kommunikation über Stromnetze im Frequenzbereich von 3 bis 148.5 kHz. Aus diesem Grund arbeiten alle Firmen, die Powerline im Megahertz-Bereich nutzen, ausserhalb der CENELEC-Norm.

Aus EMV-Sicht ergeben sich zunächst die Problemkreise der ungewollten Abstrahlung in den freien Raum bzw. der Einstrahlung von Fremdsignalen aus diesem. Ein zweiter Problemkreis ist die Erfassung wechselnder Umgebungsbedingungen, etwa wenn Geräte zu- oder abgeschaltet werden. Ein weiteres Thema ist die Immunität der Komponenten in Bezug auf leitungsgebundene Störsignale, z.B. schwach gefilterte Oberwellen aus Stromrichtern. Weil insbesondere im Niederspannungsnetz verschiedene PLC-Nutzer die Leitungen gleichzeitig belegen können, sind schliesslich auch die Modulationsschemen für alle Dienste festzulegen und entsprechend zu normieren. Dies ist zwar kein typisches EMV-Thema, denn es handelt sich hier zunächst um die Nutzsignale. Das Powernetz ist im Vergleich zu einem reinen Datennetz kaum abgeschirmt. Die rauen Umgebungsbedingungen bei PLC machen es daher nötig, dass die immer vorhandenen störenden Einflüsse von allem Anfang an miteinbezogen werden. Je höher die Frequenzen desto leichter können die zugehörigen Energien in den freien Raum

abgestrahlt werden. Das Niederspannungsnetz im Haus wird zur Antenne, siehe Abbildung 12.

Im Zusammenhang mit dem Smart Grid kann PLC sinngemäss auch für die Steuerung der Komponenten und das Powermanagement verwendet werden. In diesem Fall müssen besonders hohe Anforderungen an die Übertragungs- und Störsicherheit gestellt werden. Es kann festgehalten werden, dass die grundsätzlichen technischen Problemfelder bei PLC erkannt und auch lösbar sind (betreffend Smart Meters siehe etwa (Kotsampopoulos et al., 2017). Allerdings sind die aktuell eingesetzten Modulationsverfahren nicht beliebig robust (Pakonen et al., 2013). Will man höhere Störpegel zulassen, müssen unter Umständen die PLC-Verfahren/Codierung angepasst werden (Girotto & Tonello, 2017).

Untersuchungen verschiedener Kanalmodelle, Modulations-Schemen, Channel Soundings etc. sind der Nachrichtentechnik entlehnt. Dabei ist immer zu unterscheiden, wozu PLC benützt wird. Wird PLC als LAN-Ersatz im Wohnhaus verwendet, sind die Ansprüche an die Höhe der Datenrate möglicherweise höher, als wenn es ausschliesslich um das Powermanagement im „Smart Grid“ geht (Teixeira & dos Santos, 2016). Wenn es in einem klinischen Umfeld um Störaussendungen auf medizinische Apparate geht, müssen die technischen Interferenzen noch enger geregelt werden (Ishida et al., 2016). Für robustere EMV-Kriterien soll nicht die Peakleistung über 200 Hz angesehen werden, sondern eher die spektrale totale Leistung, um NB-PLC (narrowband Power line communication) sicherer abgrenzen zu können (Uribe Perez et al., 2020). Man stellt fest, dass viele Anwendungen in der Praxis im Smart Metering Bereich durch andersweitige Netzstörungen in diesem Frequenzbereich zu Fehlfunktionen führen. Der Artikel weist auf eine EMV-Normierungslücke im Frequenzbereich von 2 kHz bis 150 kHz hin.

Zur EMV im engeren Sinne zählen Immissions-Untersuchungen über Störungen der Datenübertragung durch Stromrichter und Schalt-Netzteile bis hin zu einzelnen LED-Lampen oder (halb) defekten Komponenten, etwa ausgetrockneten Kondensatoren in Gleichrichternetzteilen. Während in den klassischen EMV-Limiten oft maximal zulässige Feldstärken oder Spannungen definiert werden, wird bei der Datenübertragung die Bit-error-rate (BER) als Messgrösse für die „Signal Integrity“ herangezogen. Da die BER eine statistisch definierte Grösse ist, kann sie nur bedingt in die klassischen Grenzwerte umgerechnet werden. Es ist aber klar, dass die BER den eigentlichen Sachverhalt viel besser erfasst. Eine hohe BER wird signaltechnisch durch einen hohen Signal-Rauschabstand erzeugt. Da aber sowohl die Sendeleistung eingeschränkt wird, das Störumfeld durch den Einsatz neuer Stromrichteranwendungen in Haushalt und Industrie eher zunimmt, müssen die aus der Nachrichtentechnik bereits geläufigen EMV-Richtlinien teilweise noch für den Powerbereich adaptiert werden. Bedingt durch die nicht abgeschirmten Niederspannungsleitungen in Gebäuden wurde die durch PLC verursachte Emission untersucht (Ronkainen et al., 2014). Diese Problematik unterscheidet sich in der Sache nur unwesentlich von jener in der allgemeinen Nachrichtentechnik. Die Mess- und Testverfahren müssen möglicherweise teilweise angepasst werden und bedingen neue Messmethoden/Prozeduren für die Trägerfrequenzen im MHz-Bereich (Zhang et al., 2019). Messungen weisen auf Feldstärken im Freifeld im 3-MHz-Band in einer Messdistanz von 10 m von bis zu 56.5 dBµV/m (Peak) auf, im Boden in den Zuleitungen zu einer Trafostation werden Felder in 90m Abstand von 52.3 dBµV/m Peak gemessen. Interessant in diesem Kontext ist, dass eine frühere Arbeit (Schneider et al., 2004) eine doch erhöhte Emission über der Norm EN55022 feststellte, siehe Abbildung 12.

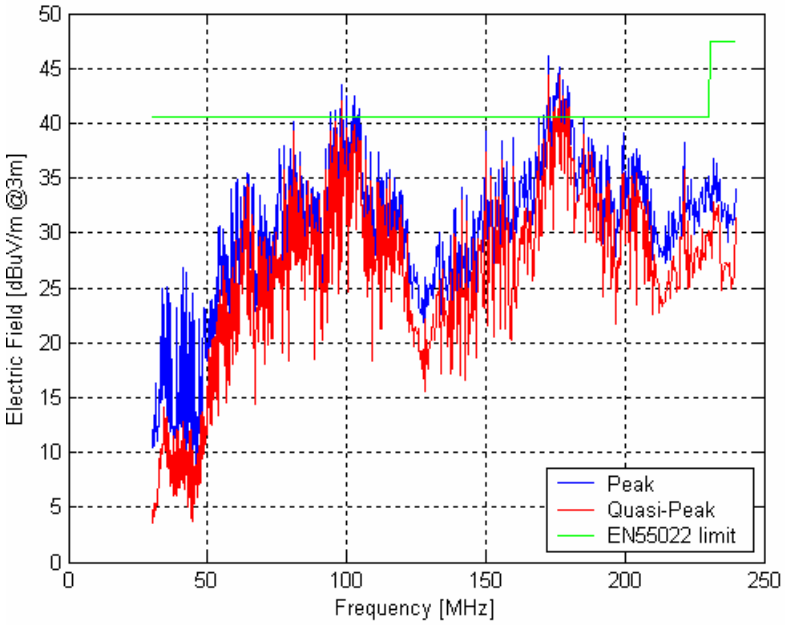


Abbildung 12: Im reflexionsfreien EMV-Labor gemessene Abstrahlung in 3 m Distanz von einem PLC-Modem (im standby mode), horiz. Polarisation, aus (Schneider et al., 2004).

Die Modems halten die Norm zur Abstrahlung gemäss EN 55022 nicht ein. Die Abstrahlung liegt typischerweise über 25 dB höher als vorgesehen. Die Emissionsproblematik wird auch in den 2 folgenden Publikationen näher beleuchtet (Aderibole et al., 2022; Fujdiak et al., 2018): Es geht übereinstimmend hervor, dass aktive PLC-Adapter unterschiedlicher Hersteller im 70 MHz bis 80 MHz Bereich deutlich die gesetzten Grenzwerte von 40 dBµV/m überschreiten.

Wegen der Empfindlichkeit der PLC-Adapter bezüglich Kurzzeit-Impulsen / Transienten im low voltage 230V-Netz bedingt durch innere und äussere Überspannungen wird zur Erhöhung der Zuverlässigkeit der PLC Übertragung die Chirp-BOK Modulation verwendet (siehe die beiden obigen Publikationen). Andrerseits wird wegen der verursachten Störungen/Emissionen durch die PLC die Verwendung stark reglementiert, so dass auch Frequenzbänder in der Schweiz definiert werden, von welchen die PLC ausgeschlossen wird (BAKOM, 2020).

Die zunehmende Komplexität mit entgegengesetzten Auswirkungen bezüglich Störstrahlung (Quelle PLC) und den drahtgebundenen Störungen auf dem Netz hat zur Folge, dass wegen höherer Störeinflüsse der nicht abgeschirmten Zuleitungen/Verteilnetze in den Haushaltungen die Industrie sich immer mehr von dieser Technik der Breitbandkommunikation verabschiedet und nur noch ein Nischendasein feststellbar ist (lokale Smart-Metering-Datenauslese). Die Technologie befindet sich längerfristig im Rückzug (oder wird nur noch als Nischentechnik verwendet werden) und wird von der WiFi-Technologie abgelöst werden.

2.2.4 Drahtlose Datenkommunikation/Steuerung des Niederspannungsnetzes (WiFi, WLAN)

Die Drahtlose Datenkommunikation bedient sich als Träger der Information weit höherer Frequenzbereiche, welche typisch bis in den Giga-Hz-Bereich reichen. Der weitverbreitete Standard wird in IEEE802.11 festgehalten und zeigt die folgenden Eckwerte auf (WIFI IEEE802.11, Tabelle 2):

	802.11b	802.11g	802.11h	802.11n	802.11ac
Frequenzbereich (GHz)	2.4	2.4	5	2.4 & 5	5
Reichweite Indoor (m)	30	30	30	50	30
Anzahl Kanäle	3	4	19	4 & 19	wie n
Kanalbandbreite (MHz)	20	20	20	10, 20, 40	160
max. Datenrate (Mbps)	11	54	54	450	6936
reale Datenrate (Mbps)	5	20	30	150	1300
Frequenzwahl DFS	nein	nein	ja	optional*	ja
Leistungsregelung TPC	nein	nein	ja	optional	ja
max. Leistung EIRP (mW)	100	100	variabel**	variabel**	variabel**
gemittelte Leistung (mW)	variabel	variabel	variabel	variabel	variabel

* obligatorisch für 5 GHz Band (Störungsgefahr gegenüber anderen Funkdiensten)
** siehe Grafik unten

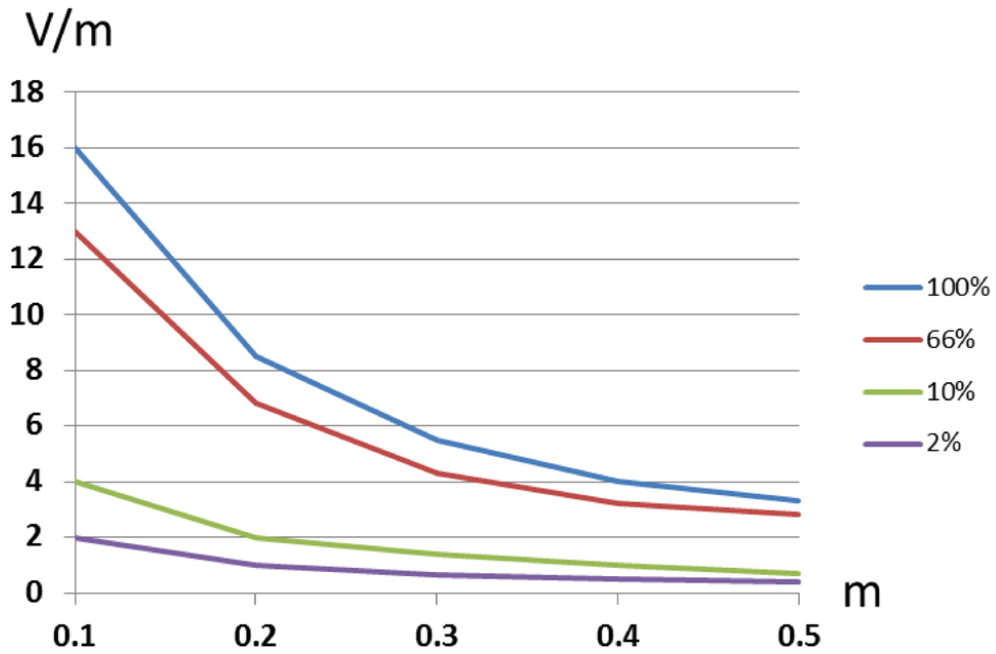
Technische Daten zu WLAN-Standards. Quelle: FSM

Tabelle 2: Frequenzen / IEEE-Standards von WiFi (Quelle: FSM)

Dieser Standard – allgemein umgangssprachlich auch als W-LAN bezeichnet, gemeint ist aber in aller Regel WiFi nach obigem IEEE-Standard, wird nicht nur für Computerverbindungen genutzt, sondern zunehmend auch für die Steuerung von elektrischen Geräten und Solaranlagen eingesetzt oder aber für die Steuerung von Netzen und die Auslese von Daten, z. Bsp. des Stromzählers. Die grundlegenden technischen Standards von W-LAN bzw. WiFi sind diejenigen von IEEE. Sie wurden im Wesentlichen von der europäischen Regulierungsbehörde ETSI übernommen und wo nötig an geltende Vorschriften angepasst. Die meisten W-LAN-Anwendungen nutzen die Standards 802.11b und 802.11g im 2.4-GHz-Band. Zunehmend wichtig ist das 5-GHz-Band, welches in Europa durch den Standard 802.11h reguliert wird. 802.11n ermöglicht die Nutzung beider Frequenzbänder gleichzeitig. Allerdings sind nicht alle erhältlichen W-LAN Produkte so konfiguriert, dass sie die vollen Möglichkeiten der NORM 802.11n zulassen. 802.11ac ist eine Weiterentwicklung von «…n» mit grösseren Bandbreiten, effizienterer Modulation und grösserer Anzahl Mehrfachverbindungen (MIMO).

Die Standards begrenzen die maximale Sendestärke im 2.4-GHz-Band auf 100 mW, mit TPC “Transmit Power Control”, können aber in Europa die Sendeleistungen von 100 mW / 500 mW im 5-GHz-Bereich überschreiten. Dies führt nun zu Emission / EMF-Belastungen an den Accesspoints und dessen Nähe, siehe nachfolgende Abbildung 13, welche in Abhängigkeit des Auslastungsgrades aufgezeichnet sind. Sind mehrere Accesspoints vorhanden, so überlagern sich diese Felder am Aufpunkt nach dem Gesetz der quadratischen Summe (Wurzel aus den quadrierten und addierten Einzelwerten). Der Bereich liegt zwischen 16 V/m bis typ. 3 V/m.

Im Haushalt ist die Immission stark von der Art der Nutzung abhängig. Die statistisch gerechnete Feldexposition liegt in Innen-Räumen im Bereich von 2.2 - 96.1 mV/m (Medianwert) und eine 90% Perzentile von 4.9 - 209.3 mV/m (Chiaramello et al., 2021). Für weitere Aspekte zur Immission und Exposition siehe Kapitel 3.



Elektrische *Feldstärke* in Abhängigkeit von der Distanz zur Antenne und vom Auslastungsgrad eines Access-Points. Quelle: FSM (Rohdaten: Joseph et al. (2013)

Abbildung 13: E-Feld in Abhängigkeit der Distanz (Quelle: FSM, www.emf.ethz.ch)

2.2.5 Streuströme, Ströme in Neutralleitern und im Erdungssystem

Unter dem Begriff „Streuströme“ werden Erdausgleichsströme im Boden und in leitfähigen Leitungs- und Gebäudestrukturen verstanden. Sie treten überall auf, wo Elektrizitätsversorgungsnetze installiert sind, die an mehreren Stellen geerdet sind. Dies ist im Hochspannungsnetz auf den Netzebenen 1 bis 3 und insbesondere auf der Niederspannungsebene 7 der Fall, sowie im Schienennetz der Wechselstrombahnen.

Die Streuströme sind eine Folge Ohm’scher oder induktiver Spannungsabfälle zwischen den Orten der Erdung. Im Niederspannungsnetz wird zwischen der Erdung in der Transformatorenstation und den Erdungen bei der primären Gebäudeverteilung der Stromkonsumenten immer ein Neutral- bzw. PEN-Leiter parallel zu den Phasen mitgeführt, der bei asymmetrischer Netzbelastung den Nullleiterstrom führt. Ein kleiner Spannungsabfall über diesem Leiter führt aber grundsätzlich dazu, dass ein Teilstrom seinen Weg über das Erdreich und unterschiedliche Metallstrukturen nimmt.

Streuströme können auch durch magnetische Induktion in Leiterschleifen hervorgerufen werden. Solche Ausgleichsströme (Streuströme) können demnach in allen Gebäuden mit Elektroinstallationen festgestellt werden. In der Diskussion über mögliche negative Auswirkungen von Streuströmen - vor allem in Tierhaltungsbetrieben - wird oft ins Feld geführt, dass Teile der Ströme durch die Körper der Nutztiere fliessen könnten oder dass sich die Magnetfelder, welche diese Streuströme hervorrufen, sich nachteilig auswirken könnten.

Die Magnetfelder fallen aufgrund ihrer geringen Intensität als besondere Belastung ausser Betracht, da sie im Vergleich mit anderen Magnetfeldern der Elektrizitätsnutzung kaum relevant sind. Selbst ein

hoher, selten festgestellter Ausgleichstrom in einem metallischen Leiter von 1 A klingt schon nach 20 cm auf einen Wert von 1 µT ab, was dem Vorsorgewert an empfindlich genutzten Orten entspricht. Für allfällige Körperströme durch Nutztiere sind die Spannungen ausschlaggebend, welche die Tiere zwischen Metallteilen oder zwischen Boden und metallischen Teilen abgreifen können. Für Rinder stehen Melkständer, Futterkrippen, Tränken und Abschrankungen im Vordergrund.

Da die Frage der möglichen Beeinträchtigung von Nutztieren in den betroffenen Kreisen seit Jahren grosse Verunsicherung hervorruft, haben das ESTI und die Technische Kommission Erdungen des CES im Jahr 2018 je einen Informationsartikel über diese Frage publiziert[4]. Eine umfassende Literaturstudie hat die Forschungsstiftung Strom und Mobilkommunikation FSM zuhanden der Swissgrid AG erarbeitet[5].

Umfangreiche Expositionsstudien an Rindern in USA und Frankreich haben Mindestdifferenzspannungen im Bereich 1 V bis ca. 5 V ermittelt, ab welchen mit einer Beeinträchtigung der Tiere zu rechnen ist (Deschamps et al., 2010; Reinemann, 2008). Bei diesen Studien werden Versuchstiere in ihrer üblichen Stallumgebung über längere Zeit definierten Berührungsspannungen ausgesetzt, wobei nachteilige Auswirkungen im Verhalten, in der Nahrungsaufnahme, in der Milchleistung und aus medizinischer Sicht überprüft werden. Nebst individuellen Unterschieden spielen bei solchen Versuchen über längere Versuchsdauern auch Gewöhnungseffekte eine entscheidende Rolle.

Hinweise auf Beeinträchtigungen von Tieren mit Wechselspannungen unter 1 V konnten aus Tierexpositionsstudien bisher keine gefunden werden. Es ist wichtig festzuhalten, dass bei den Studien in USA reproduzierbare, medizinische (klinische) Auswirkungen nur dann festgestellt wurden, wenn die Spannungen die Schwelle der Wahrnehmung (d.h. > 1 V Berührungsspannung) überstiegen und dabei auch Verhaltensstörungen auftraten.

Ohne Fehler in der elektrischen Installation oder im Erdungssystem liegen die Berührungsspannungen im Stallbereich deutlich unter 1 V. Deshalb ist mit einer Beeinträchtigung von Nutztieren nur in Ausnahmefällen zu rechnen. Die abgreifbaren Spannungen können leicht überprüft werden (vgl. auch IEEE Std 1695 – 2016 „IEEE Guide to understanding, diagnosing, and mitigating stray and contact voltages“)[6].

2.2.6 Massnahmen zur Reduktion der EMF von elektrischen Energieversorgungsnetzen

Seit dem Aufkommen von gesundheitlichen Bedenken infolge der Personenbelastung durch EMF in den Neunzigerjahren befassen sich Fachleute der Energieversorgung und der Elektroindustrie mit den Massnahmen und Methoden zur Reduktion von elektrischen und vor allem magnetischen Feldern. Der Querschnitt durch die Publikationsthemen hat sich in den letzten Jahrzehnten wenig verändert. Im Vordergrund stehen die Aspekte der Feldoptimierung bei:

- Hochspannungsfreileitungen
- Transformatorstationen
- Bahninfrastruktur, Trasseebau und Art der Elektrifizierung/Auslegung der Erdleiter

[4] bulletin.ch 12 / 2018 Seiten 71 und Seite 82

[5] https://www.emf.ethz.ch/fileadmin/redaktion/public/downloads/3_angebot/wissensvermittlung/studien_fachartikel/Kriechstrom.pdf

[6] https://standards.ieee.org/ieee/1695/6002/

Eine umfassende Übersicht über die Fachliteratur gibt die Broschüre: 2009, Cigré 373, Mitigation techniques of power-frequency magnetic fields originated from electric power systems, WG C4.204[7]. Hier werden verschiedenste techn. Massnahmen (Abschirmungstechniken u. a. m.) im Detail erläutert und die Wirkungsmechanismen der Feldreduktion aufgezeigt.

Bei den Hochspannungsfreileitungen wird in erster Linie die Geometrie der Leiterseile diskutiert. Die Massnahmen reichen von magnetfeldkompensierender Phasenanordnung auf Leitungen mit mehreren Übertragungssystemen, Aufteilung der Übertragungssysteme bis zu Kompaktanordnungen mit Isolatorabstandshaltern etc. (Raj et al., 2020).

Ähnliche Überlegungen werden auch bei Kabelleitungen angestellt. Dabei spielen Dreiphasenhochspannungskabel (Kombination aller drei Phasen in einem Kabel) bis zu den höchsten Spannungsebenen eine dominante Rolle (Dolder et al., 2018). Da diese in einem Rohr verlegt werden, entfällt nach der NISV die Umweltverträglichkeitsprüfung bezüglich EMF.
Bei den Trafostationen trifft man ebenfalls auf eine grosse Zahl von Fachbeiträgen über folgende Massnahmen:

- Kompakte Anordnungen von Niederspannungsverteilungen Kabelverbindungen insbesondere in Kabelkanälen
- Streufeldarme Verteiltransformatoren
- Raumabschirmungen
- Erdungskonfigurationen zur Vermeidung von Nullströmen ausserhalb der Verbindungstrassen
- Phasenanordnungen in Kabelkanälen

Es sei in diesem Zusammenhang auf das folgende Projekt hingewiesen, welches die Immissionen minimalisieren will (bereits im Kapitel 2.1.5 zitiert (Seymenliyski et al., 2018).

2.2.7 Schlussfolgerungen betreffend die aktuellen Entwicklungen der EMF in Energieversorgungssystemen

Im Zuge der Energiewende und der aktuellen Marktentwicklung sind folgende Entwicklungen feststellbar:

- Zuwachs an volatilen dezentralen Energieerzeugern und Energiespeichern
- Zuwachs an grösseren temporären Lasten im Niederspannungsnetz (Elektromobilität)
- Genereller Kapazitätsausbau der Netze auf allen Ebenen aufgrund grösserer Leistungsschwankungen für den Energietransport
- Zunahme des Kabelanteils in den Hochspannungsnetzen
- Einführung von Automatisierungsfunktionen auf den unteren Spannungsebenen („Smartgrid“, Smart Metering) bedeutet vermehrter Einsatz von PLC/WiFi.

Der Netzausbau dient in erster Linie der Sicherstellung einer höheren Flexibilität im Energieaustausch. Im Vordergrund steht die Erweiterung der maximalen Transportkapazitäten, die oft nur kurzzeitig zu bewältigen sind. Proportional zu den maximalen Transportleistungen steigen die maximal möglichen Magnetfelder im Bereich von Leitungen, was hinsichtlich der Einhaltung des Vorsorgegrenzwerts berücksichtigt werden muss. Dies wird durch die Optimierung von Leiter- bzw. Mastgeometrien bei Freileitungen und kompakte Verlegung von Kabeln erreicht.

[7] https://e-cigre.org/publication/373-mitigation-techniques-of-power-frequency-magnetic-fields-originated-from-electric-power-systems

Der Einsatz lokaler Energieerzeugungsanlagen, Netzkupplungen und Kompensationsanlagen (Kabelkapazitäten) trägt durch vermehrten Einsatz von leistungselektronischen Apparaten, Wechselrichtern und Umrichter zu höheren Netzoberschwingungen und Interharmonischen bei. Die dadurch entstehenden Anteile an Oberschwingungen und auch die abgestrahlten elektromagnetischen Felder reichen bis zu einigen 10 MHz. Sie liegen aber ausserhalb der Anlagengrenzen und sind verglichen mit den elektromagnetischen Felder der Funk-Kommunikationsnetze vernachlässigbar klein.

Die Exposition von Personen durch die „Power Line Communication“ (Kapitel 2.2.3) für die IT-gestützte Steuerung von Energieerzeugung und -verbrauch und als Datenkanal für andere IT-Anwendungen ist ein aktuelles Thema der Fachliteratur. Je nach Anwendung können Hochfrequenzfelder aufgrund der Datenübertragung im Niederspannungsnetz einen Beitrag liefern, welcher mit der Feldbelastung der Funknetze vergleichbar ist.

2.3 NF-EMF und EMV von ausgesuchten Komponenten und Anwendungen

2.3.1 Allgemein

Viele neue Komponenten in den heutigen Energienetzen arbeiten intern mit höheren Frequenzen. Dies ist nicht nur bei den kleinen und mittleren Endverbrauchern, sondern auch bei Stromrichtern, Kompensatoren, Phasenschiebern etc. bei höherer Leistung der Fall. Somit muss auch der EMV bei diesen Frequenzen vermehrt Beachtung geschenkt werden. Da grundsätzlich die Oberschwingungsströme von Geräten und Anlagen in den Normen SN EN 61000-3-X sowie SN EN 61000-6-X limitiert sind, können viele EMV-Aspekte als „im Prinzip geregelt und gelöst“ betrachtet werden. Die genannten Normen enthalten allerdings eine Lücke im Frequenzbereich 2 kHz bis 150 kHz. CISPR 11 enthält einen Grenzwert nur für Induktionsherde. Da viele Stromrichter auch in diesem Frequenzbereich arbeiten, sind entsprechende Vorschläge seit Längerem in Bearbeitung.

Ein weiteres grundsätzliches Problem bei der Regulierung ist die teilweise unterschiedliche Zielsetzung der Normen und Begrenzungen. Das Ziel von EMV-Normen (gegenseitige Verträglichkeit von Geräten und Anlagen) unterscheidet sich etwa vom Ziel der NISV (Limitierung der Gesamtbestrahlung des Menschen). Einzelne Feldanteile sind für technische Anlagen unter Umständen irrelevant und werden deshalb nicht limitiert.

Im Folgenden soll auf die spezifischen EMV-Probleme einzelner Komponenten eingegangen werden.

2.3.2 LED-Leuchtmittel

LED-Leuchtmittel sind aus EMV-Sicht in doppelter Hinsicht interessant. Zum einen sind sie im Gegensatz zu konventionellen Glühbirnen nichtlineare Verbraucher und beeinträchtigen damit die Qualität des Stromversorgungsnetzes. Zum anderen sind sie auch Quellen für hochfrequente Strahlung und können etwa den UKW-Radio-Empfang stören.

Da eine LED bei wenigen Volt Gleichspannung funktioniert, muss die Netzspannung auf diese Werte transformiert werden. Die dazu notwendige Elektronik lässt den Strom im Unterschied zu einer konventionellen Glühbirne nicht spannungsproportional fliessen. Die Lampe wird damit zum nichtlinearen Verbraucher und beeinträchtigt die Qualität des Stromversorgungsnetzes. Eine ähnliche Problematik zeigen auch die CFL (Compact Fluorescent Lamps); siehe (Dürrenberger & Klaus, 2009), (George et al., 2011). Die Hersteller setzen offenbar Elektronik mit unterschiedlicher Neigung zu Oberwellen ein, und auch die Dimmung von Leuchten hat einen Einfluss auf das Auftreten von Harmonischen im

Stromverlauf (Uddin et al., 2012). Diese Variabilität mildert den Gesamteinfluss auf das Netz, falls kein Produkt dominant eingesetzt wird. Die Problematik der Nichtlinearität von LED-Lampen wird denn insgesamt auch als mässig beurteilt, solange der relative Anteil an der Gesamtlast beschränkt bleibt.

Wegen der schnellen Elektronik haben LED-Lampen auch Störpotential im DVB (Wan et al., 2016), allerdings nur, wenn die Lampe sehr nahe beim DVB-Empfänger angeordnet ist. Eine LED-Lampe ist nämlich wegen ihrer Kleinheit keine effiziente Antenne im UKW-Bereich, und anderseits werden UKW-Frequenzen durch die in Hausinstallationen übliche PVC-Isolation der Drähte gedämpft. Sollte dies ein Problem darstellen, kann dieses nur über die Emission der LED-Lampen, nicht aber über die Immunität des DVB-Empfängers gelöst werden, denn für letzteren ist UKW ein Nutzsignal.

Berichte, wonach die unnatürliche Farbe von weissen LED-Lampen gesundheitsschädlich sein soll, sind mit der Verbesserung der Lichtzusammensetzung, die heute sehr nahe beim Halogenlicht konventioneller Glühlampen liegt, und mit der Möglichkeit des „Smart Lighthing“ relativiert worden (Berlov et al., 2015), (Curcio et al., 2016), (Ye et al., 2016).

Zu EMV in Zusammenhang mit LED gibt es bislang keine neuen Studien.

2.3.3 Elektrische Fahrzeuge

Elektrische Fahrzeuge sind relativ grosse Energieverbraucher. Die elektrische Spitzenleistung eines E-Fahrzeuges kann auf der Strasse rund 500 kW betragen. Der Lader eines E-Fahrzeuges kann 22 kW verlangen, eine normale Haushaltsteckdose liefert bis zu 2.3 kW. Anderseits können neuere E-Fahrzeuge auch als Zwischenspeicher eingesetzt werden. Damit übernehmen die Akkus der Fahrzeuge zeitweilig die Rolle von Energie-Einspeiser. Die zugehörige Steuerung und automatische Regelung im Netz stellt keine EMV-Problematik im engeren Sinne dar, ist aber selbstverständlich im Rahmen von Netzstabilitätsüberlegungen des Smart Grid mit einzubeziehen. Zu beachten ist allenfalls die Tatsache, dass gewisse Stromrichter auf ein unverschmutztes Netz optimiert sind und bei bereits im Netz vorhandenen Harmonischen selber vermehrt abstrahlen (Muller et al., 2014).

Die EMV-Immunität des Fahrzeugs im Verkehr im Hinblick auf ausserhalb des Fahrzeugs verursachte elektrische und magnetische Felder ist an sich keine neue Fragestellung, wird aber verschärft, weil immer mehr Elektronik in die Fahrzeuge eingebaut wird. Dies gilt speziell für elektrisch betriebene Fahrzeuge, deren Bordelektronik Stromrichter für das Laden der Akkus und der Antriebe miteinschliesst.

Andere Quellen sind durch neue Technologien für das teilautonome Fahren und das automatische Regulieren der Beleuchtung (Distanzradar) gegeben. Diese Quellen verwenden normalerweise aber Frequenzen in den höheren GHz Bändern.

Eine spezielle EMV-Problematik ergibt sich bei den Ladestationen und darunter ausgeprägt bei den drahtlosen (WPT – Wireless Power Transfer) Stationen.

2.3.4 Drahtlose Energieübertragung

Unter dem Stichwort WPT findet man Leistungsübertragung mit grösseren Leistungen für Fahrzeuge, mit mittleren Leistungen z.B. für Laptops und solche mit kleinen Leistungen unter einem Watt, etwa zum Aufladen von Smartphones bis hin zur Versorgung von RFID’s im Mikrowattbereich. Weit verbreitet sind erst Ladestationen für kleine Konsumgüter. In einem Bericht der Forschungsstiftung Strom und Mobilkommunikation für das BFE sind letztere hinsichtlich Energieverbrauch und EMF untersucht worden (Zahner et al., 2017). Das induktive Aufladen benötigt mehr Energie aus der Steckdose als das kabelgebundene Laden. Der Gesamtverbrauch beträgt über alles gesehen etwa das Doppelte.

Wenn ein Endgerät über Nacht auf dem Sendemodul liegen bleibt, dann ist der Verbrauch sogar dreimal höher. Die magnetischen Streufelder während des Ladebetriebs liegen bei 10-25 µT, im Stand-by-Betrieb können sie zehnmal höher sein. Die im Gewebe induzierten elektrischen Feldstärken liegen unterhalb der ICNIRP-Basisgrenzwerte. Die Reserven sind allerdings nicht beliebig gross, so dass bei zukünftigen Geräten mit höheren Leistungen die Einhaltung der Grenzwerte geprüft werden muss. Für weitere Studien zu induktivem Laden von Mobiltelefonen siehe auch: (Park & Kim, 2016), (Wake et al., 2017), (Nguyen et al., 2016), (Nadakuduti et al., 2015), (Liu et al., 2015).

Noch wenig verbreitet sind Anwendungen mit kapazitivem und resonantem (drahtlosen) Laden – dazu etwa: (Yi, 2016), (Yusop et al., 2016), (Kibum et al., 2016), (Koohestani et al., 2017), (Pinto et al., 2015).

Ein zunehmend wichtiges Anwendungsgebiet ist das drahtlose Aufladen von Elektrofahrzeugen (Dürrenberger et al., 2014). Dazu sind grosse Leistungen im hohen ein- bzw. im zweistelligen kW-Bereich angezeigt. Die dafür nötigen Feldstärken erreichen schnell die Grenzwerte der NISV. Dies bedeutet, dass der Raum zwischen Sender und Empfänger nicht mehr frei zugänglich sein darf. Abbildung 14 zeigt als Beispiel den Verlauf der zur Übertragung von 300 W Leistung minimal nötigen Fläche als Funktion der Frequenz unter der Annahme, dass die ICNIRP-Grenzwerte in jedem Punkt gerade erreicht werden.

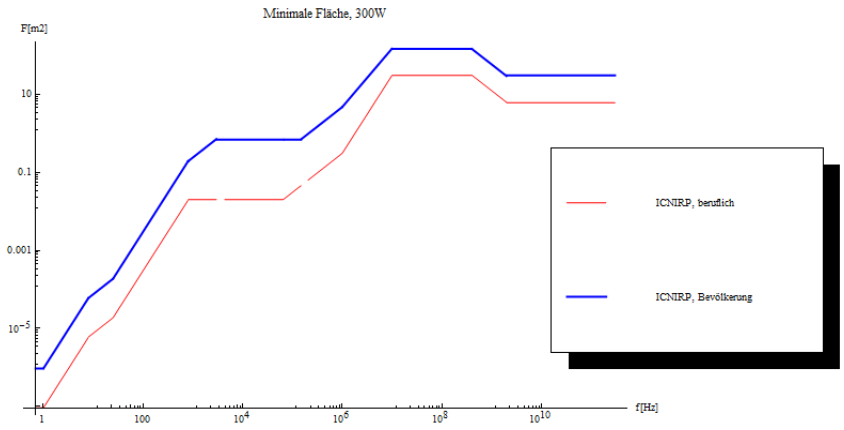


Abbildung 14: Die Maximalwerte für die elektrische Feldstärke E und die magnetische Feldstärke H sind nach ICNIRP begrenzt. Zur drahtlosen Übertragung von Leistung kann pro Quadratmeter höchstens die Leistung E x H übertragen werden. Die Grafik zeigt den entsprechenden Verlauf der minimal nötigen Fläche zur Übertragung von 300 W in Funktion der Frequenz.

Die für WPT zuständige EMV-Norm IEC 61980-1: 2015 ist seit Mitte 2015 in Kraft und wurde letztmals im Januar 2017 angepasst.

Im Zeitrahmen bis 2017 hat die Publikationstätigkeit zu drahtlosem Aufladen von Elektroautos deutlich zugenommen. Neben rein technischen Fragen – (Cimala et al., 2015), (Yashima et al., 2015), (Guo et al., 2016), (Liu et al., 2016), (Shijo et al., 2016), (Kibum et al., 2016) – werden insbesondere auch Fragen zur Modellierung von im Körper induzierten Wirkungen (elektrische Felder, SAR) untersucht, etwa: (Cimala et al., 2016), (Sunohara et al., 2014), (Schrafel et al., 2016), (Zang et al., 2017), (Yavolovskaya et al., 2016), (Laakso & Hirata, 2013). Bei diesen Expositionsstudien geht es wesentlich um Fragen der Grenzwerterfüllung bei WPT-Anwendung (die Exposition von Insassen gegenüber Magnetfeldern von und in Fahrzeugen allgemein wird in Kapitel 3.2.3.2 dargestellt).

Zwischen 2017 und heute sind nebst zahlreichen Reviews noch ein paar Studien zu den vorherig ge-

nannten Themen dazugekommen. In Zheng et al. (Z. Zheng et al., 2019) werden verschiedene Spulenanordnungen numerisch auf Ihre Kopplungseigenschaften untersucht. Cirimele et al. (Cirimele et al., 2018) evaluieren verschiedene dynamische Ladesysteme, die in der Strasse eingelassen werden. Campi et al. (Campi et al., 2019), gehen anhand eines kleinen Stadtautos der Frage der Exposition unter und neben dem Fahrzeug nach. Dabei zeigt sich wie in anderen Studien, dass die maximal zulässige Übertragungsleistung durch die einzuhaltenden Grenzwerte bestimmt ist. In Miwa et al. (Miwa et al., 2019) werden Kopplungsfaktoren für die verschiedenen in den Standards definierten Körperregionen anhand eines typischen Fahrzeugs in Abhängigkeit der Karosseriematerialien bestimmt. Auch hier liegt der Fokus auf der zulässigen maximalen Leistung beim Laden. Wang et al. (Q. D. Wang et al., 2019) beschäftigt sich mit einer neuen Methode zur Bestimmung des Versatzabstandes eines WPT-Systems und mit einer experimentellen Validierung der Methode. Arduino et al. und Liorni et al. (Arduino et al., 2020; Liorni et al., 2020) gehen auf numerische Aspekte der Simulation von WPT-Systemen ein. In Arduino et al. (Arduino et al., 2020) werden statistische Verfahren zur Korrektur numerischer Artefakte vorgeschlagen. In Liorni et al. (Liorni et al., 2020) werden nebst den numerischen Simulationen auch Messungen an grossen elektrisch betriebenen Fahrzeugen durchgeführt. Diese Publikation beinhaltet Resultate, die im europäischen Projekt EMPIR-16ENG08 MICEV erarbeitet wurden. Dieses Projekt beschäftigt sich mit Messmethoden für die Erfassung der Effizienz von WPT/IPT Ladesystemen im realen Umfeld. Eine weitere Publikation dazu ist Zucca et al. (Zucca et al., 2021). Lagouanelle et al. und Haussmann et al. (Haussmann et al., 2022; Lagouanelle et al., 2021) sind zwei Publikationen, die sich mit technischen Aspekten für die Berechnung von WPT-Anordnungen beschäftigen.

Es gibt weitreichende Bestrebungen die Standardisierung der WPT-Systeme voranzutreiben. Alle Aspekte werden dabei einbezogen so auch die Einhaltung der Grenzwerte für die Exposition des Menschen gemäss ICNIRP. Die Exposition ist von der spezifischen Anordnung der Spulen (Abstand, Positionierung) aber vor allem von der übertragenen Leistung abhängig. In den meisten Fällen führt dies zu einer Beschränkung der maximal zugelassenen Ladeleistung. Technisch gesehen bleiben immer noch verschiedene Aspekte, die weiter optimiert werden können.

Verschiedene neue Anwendungen für WPT wurden untersucht wie zum Beispiel das drahtlose Laden für Drohnen (Ahn et al., 2020). Inwieweit sich diese Anwendungen wirklich durchsetzen, ist aufgrund der limitierten Effizienz immer noch fraglich.

In der Literatur werden auch Konzepte für MPNs (Mobile power network) diskutiert. Dabei sollen die Netzversorgung mit mobilen Einheiten ergänzt werden, die zum Teil mit drahtlosen Energieübertragungssystemen ausgestattet sind. Auch in diesem Zusammenhang ist die Effizienz stark von der jeweiligen Konfiguration abhängig. Inwiefern solche Konzepte in Zukunft eingesetzt werden, ist im Moment schwer abzuschätzen.

2.3.5 Stromerzeuger für Erneuerbare

Zur EMV von Photovoltaik-Anlagen siehe (Klaus, 2013), dort S. 24 auch alles über bestehende Normierungslücken zwischen 2kHz und 30 MHz. Eine Photovoltaik-Anlage besteht neben den Solarpanels und deren Verschaltung sowie allfälligen Regeleinrichtungen aus einem Stromrichter, der die Gleichspannung der Solarzellen in die Netzspannung umwandelt und der mit dem Netz verbunden ist. Anlageteile ab dem Stromrichter bis zum Netz unterscheiden sich nicht wesentlich von jenen, die Akkuanlagen oder elektrische Fahrzeuge ans Netz ankoppeln. Daher sind die EMV-Aspekte ebenfalls sehr ähnlich. Als Beispiele siehe etwa: (Jiraprasertwong & Jettanasen, 2016), (Boyuan et al., 2016). Zu beachten sind hier zum einen die Tatsache, dass die Einspeisung von Harmonischen (Strom) stark variieren kann mit den bereits vorhandenen Spannungsharmonischen im Netz (Muller et al., 2014), zum anderen die Regulierungslücke im Bereich 2 bis 150 kHz.

Windturbinen sind vom Netz aus gesehen gewöhnliche, möglicherweise nicht ganz konstante Energieerzeuger. Die EMV-Problematik unterscheidet sich aus dieser Sicht nicht besonders von anderen Erzeugern. Diskussionen gibt es im Hochfrequenzbereich, wo die Rotoren grosser Turbinenfarmen allenfalls den Rundfunk oder Radardienste (Flugsicherung) stören können (Guseinoviene et al., 2014). Die Meinungen zur Relevanz sind kontrovers. In Deutschland wurde im Rahmen des Projekt WERAN (Wechselwirkung Windenergieanlagen und Radar/Navigation) die möglichen Einflüsse von Windanlagen auf die Navigation erfasst und entsprechende Korrekturmassnahmen vorgeschlagen. Leider fehlt eine Zusammenfassung der Resultate und man ist auf die Details im Text zurückgeworfen, die den Rahmen einer Übersichtsstudie sprengen.

Ein weiteres Konzept, dass im Zusammenhang mit erneuerbaren Technologien für die Energieproduktion diskutiert wird, sind sogenannte «Microgrids». Dabei handelt es sich um lokale Netze die Energie aus erneuerbaren Quellen produzieren, speichern und verteilen. Diese Netze können sowohl im Inselbetrieb wie auch innerhalb eines Versorgungsnetzes betrieben werden. Im Zusammenhang mit diesen Netzen wird festgestellt, dass die Haupteinflüsse bezüglich EMW von den geführten Effekten durch die Beeinflussung des Stromes durch die ganzen Schaltvorgänge dominiert werden. Abgestrahlte Anteile werden als ein um ein Vielfaches schwächer eingestuft.

2.3.6 Implantate

In der Medizin werden zunehmend elektronische Geräte in den Körper implantiert. Dazu gehören etwa Herzschrittmacher, Defibrillatoren, Cochlea-Implantate oder aktive Stimulatoren von Muskeln, Organen oder Nerven. Das Risiko von Störungen und potenziellen Fehlfunktionen an diesen Geräten durch externe elektromagnetische Felder muss minimal sein. Die allermeisten Geräte sind störsicher gegenüber Alltagsimmissionen von, beispielsweise, Stromleitungen, elektronischen Artikelsicherungsanlagen, Metalldetektoren oder RFID-Anlagen. Trotzdem gilt es, die EMV-Empfindlichkeit von Geräten gegenüber Sendern oder neuen Anwendungen laufend zu testen. Wir verweisen an dieser Stelle beispielhaft auf einige ausgewählte Artikel, stellvertretend für die reichhaltige medizinaltechnische Literatur auf diesem Gebiet.

Betreffend Herzschrittmachern: (Babouri et al., 2009), (Irnich & Steen-Mueller, 2011), (Magne et al., 2014), (Tiikkaja et al., 2012), (Tiikkaja et al., 2013b), (Korpinen et al., 2015), (Korpinen et al., 2016), (Napp et al., 2015), (Seckler et al., 2016). Betreffend Defibrillatoren: (Akhtar et al., 2014), (Katrib et al., 2013), (Napp et al., 2014), (Souques et al., 2011), (Tiikkaja et al., 2013a). Anderes: (Leitgeb et al., 2012), (Leitgeb et al., 2013), (Hikage et al., 2016).

Ein zunehmend wichtiges Gebiet ist die drahtlose Aufladem̈oglichkeit bei Implantaten: (Campi et al., 2016a), (Campi et al., 2016b), (Campi et al., 2016c), (Kwan et al., 2016), (Guo et al., 2015), (Varghese & Bobba, 2016), (Xiao et al., 2016).

Ein systematischer Review von Driessen et al. (Driessen et al., 2019), geht der Frage nach, ob hinreichend geklärt ist, von welchen Faktoren potentielle Probleme bezüglich EMV von Implantaten bestimmt sind. Das Resultat zeigt, dass es einerseits von Parametern der Exposition (Frequenz, Amplitude, etc.) abhängt, wie auch von spezifischen Charakteristiken der Implantate und der Elektroden. Zusammenfassend wird festgestellt, dass die relevanten Faktoren noch nicht hinreichend identifiziert und charakterisiert sind, um allgemeine Grenzwerte für Implantatsträger abzuleiten.

Ein neues Thema ist auch die EMV zwischen Implantaten, siehe Yalcin et al. und Gordon et al. (Gordon et al., 2021; Yalcin et al., 2020). Dies ist aber im Zusammenhang mit diesem Bericht nicht als relevant anzusehen

Ein weiteres Review beschäftigt sich mit EMV bei “Deep brain stimulation devices” (Rahimpour et al.,

2021) und zeigt den Status, die offenen Fragen und die nächsten Schritte um solche Systeme bezüglich EMV sicherer zu machen.

2.3.7 RFID

RFID (Radio Frequency Identification) steht für die Technologie, die eine Identifizierung von Objekten, Personen und Tieren über elektromagnetische Wellen ermöglicht. Das technische System besteht aus sogenannten RFID-Chips (engl. «Tag») und einem dazugehörigen Lesegerät. Je nach Technologie kann die Information, die auf dem Tag gespeichert ist, über kurze oder längere Distanzen ausgelesen werden. Je nach Hersteller und Verwendungszweck unterscheiden sich die Funktionsweise und die genutzte Übertragungsfrequenz. Der Aufbau der Tags ist allerdings stets gleich: Jeder Tag besteht aus einer Antenne, einem analogen Schaltkreis zum Senden und Empfangen von Daten, einem digitalen Schaltkreis sowie einen Speicher. Es wird zwischen aktiven und passiven Tags unterschieden. Aktive Tags sind mit einer Batterie oder einem Akku ausgerüstet. Passive Tags werden durch die Lesestation mit der Leistung versorgt, die zum Zurückschicken der Daten benötigt wird. Der wesentliche Unterschied zwischen den beiden Technologien ist die mögliche Distanz zwischen dem Tag und der Leseeinheit. Bei aktiven Tags kann diese Distanz bis zu 10 m betragen. Bei der passiven Variante beträgt diese normalerweise weniger als 1 m. Aktive Tags mit Akku müssen regelmässig aufgeladen werden. Diejenigen mit einer Batterie haben eine beschränkte Lebensdauer.

Beispiele von Anwendungen der RFID-Technologie sind Diebstahlsicherungen in Warenhäusern, Skipässe, EC-Karten, Maut-Systeme, Lagerverwaltung, Identifikation von Nutztieren und Haustieren und jegliche Kennzeichnung von Produkten und Geräten. Auch die bekannten Formen des kontaktlosen Bezahlens verwenden RFID-Technologie. In diesen Zusammenhängen wird es jedoch als NFC (Near Field Communication) bezeichnet.

Die üblichen Frequenzbänder für RFID sind in den ISM-Bändern angesiedelt: Bei tiefen Frequenzen (LF) das 125 bis 134 kHz Band, bei den höheren Frequenzen (HF) 13.56 MHz, bei den sogenannten ultra-hohen Frequenzen (UHF) 433 MHZ und das 860 bis 956 MHz Band und schlussendlich die üblichen Frequenzen des Bluetooth- und WLAN-Frequenzbereiches im 2.45 bis zum 5.8 GHz Band.

Je nach Frequenz ändert sich die mögliche Einsatzdistanz. In diesen Frequenzbändern ist die zugelassene Sendeleitung begrenzt und verhindert dadurch die Interferenzen mit anderen Kommunikations- und Rundfunktechnologien.

Eine neue Variante des RFID stellen die sogenannten druckbaren chiplosen RFID-Tags dar. Mit dieser Technik lassen sich auf fast allen Dingen ausdruckbare Identifikationscodes anbringen. Die Tags können mit konventionellen Druckern angebracht werden und verwenden eine spezielle leitfähige Tinte (Amendola et al., 2018). Diese Technologie kommt ohne elektronische Bauteile aus und kann deshalb kostengünstig (wenige Rappen) angewendet werden. Es ist damit zu rechnen, dass sich diese Technologie in alle Lebensbereiche ausweiten wird und daher auch die Anzahl der Leseeinrichtungen zunehmen wird. Szenarien wie in einigen «Science Fiction»-Filmen schon illustriert, wie zum Beispiel das personalisierte Ansprechen von Passanten durch elektronische Werbetafeln werden durchaus möglich.

Die relevanten Aspekte bezüglich der Stromnetze beziehen sich vor allem auf die Verbreitung von Leseeinrichtungen und deren Leistungsaufnahme. Zudem wird sich ein breiter Einsatz solcher Systeme allenfalls auf die Struktur und den Verlauf des Strombedarfs auswirken. Die Rückwirkungen auf das Stromnetz sollten sich nicht von denjenigen unterscheiden, welche durch das Mobilfunknetz verursacht werden.

Bezüglich der Emissionen und der Exposition sind diese Technologien durch die bestehenden Normen und Standards ebenfalls abgedeckt.

3. NF-EMF Expositionen

3.1 Konzepte

Im Statusbericht 2017 zuhanden des BFE wurden die Expositionskonzepte und Expositionsansätze referenziert (Durrenberger et al., 2012; Dürrenberger et al., 2014) oder (Röösli, 2014) und kurz beschrieben. Es sollen hier kurz die wesentlichen Aspekte nochmals aufgeführt und teilweise leicht angepasst beschrieben werden. Es hat sich gezeigt, dass der Begriff der Exposition in verschiedenen Zusammenhängen verwendet wird. In den neueren Aktivitäten wird zunehmend versucht, zwischen den verschiedenen Konzepten zu unterscheiden. Die Unterscheidung bezieht sich im Wesentlichen darauf, welche Grössen gemessen oder berechnet werden. Dabei wird aus der Sicht von Personen zwischen elektromagnetischen Feldern ausser- oder innerhalb des Körpers unterschieden. Dies wird in den Guidelines zum Strahlenschutz als Referenz- (elektrische oder magnetische Feldstärken oder Flussdichten) respektive Basisgrenzwerte (induzierte Ströme oder aber absorbierte Leistung pro Gewebevolumen) wiedergegeben. Messgrössen der Strahlung, wie sie von Geräten und Anlagen abgegeben wird, bezeichnet man als Emission. Die Überlagerung aller Quellen und wie sich die Messgrösse im Raum verteilt bezeichnet man als Immission. Aus der Perspektive der Person wird die Immission am Ort der Person als Exposition bezeichnet. Die Absorption innerhalb des Körpers, die durch die entsprechende Immissionssituation erzeugt wird, kann je nach Auswertung als induzierter Strom, als spezifische Absorptionsrate oder als kumulierter Energiewert als Dosis angegeben werden. In vielen Publikationen werden diese Grösse auch als Exposition bezeichnet.

Entlang dieser Linien wird auch zwischen Emissions-, Immissions- und Expositionsmonitoring unterschieden. Der Stand des Expositionsmonitorings in Europa wurde im Statusbericht 2017 festgehalten. Neue Aktivitäten wurden inzwischen in der Schweiz und in Deutschland gestartet. In der Schweiz hat der Bundesrat 2019 mit der Revision der Verordnung über den Schutz vor nichtionisierender Strahlung (NISV) das BAFU beauftragt, ein Monitoring der Strahlenbelastung aufzubauen, um mit periodischen Messungen eine nationale Übersicht zu gewinnen.

In Deutschland werden im Zusammenhang mit der Energiewende die bestehenden Stromnetze ausgebaut und verstärkt. Im Rahmen des Stromnetzausbaus wurde ein Forschungsprogramm des Bundesamtes für Strahlenschutz (BfS) zum «Strahlenschutz beim Stromnetzausbau»[8] aufgesetzt. Dieses Forschungsprogramm beinhaltet auch Projekte, die die Exposition der Menschen gegenüber den Hochspannungsleitungen und Erdkabeln vermessen. Auf die verfügbaren Resultate dieser Aktivitäten wird Kapitel 3.2 noch weiter eingegangen.

3.1.1 Emission und Immission gegenüber EMF-ELF

Als Emission wird die von einer Anlage oder einem Gerät abgegebene elektromagnetische Leistung verstanden, entweder ausgedrückt als zeitlicher Spitzenwert, Momentanwert oder zeitlich gemittelter Durchschnittswert. Im niederfrequenten Bereich wird zwischen magnetischem Feld (H-Feld Emissionen) und elektrischem Feld (E-Feld Emissionen) unterschieden. Die Bestimmung der Emissionen dienen den Behörden dazu, die Stärke von Quellen (Infrastrukturen, Konsumgüter) zu beschränken und zu kontrollieren. Dabei handelt es sich meist um «worst-case»-Annahmen, nicht um Alltagsdurchschnitte. Weil Emissionen immer quellenbezogen sind, lassen sich daraus häufig keine Aussagen zur

[8] https://www.bfs.de/DE/bfs/wissenschaft-forschung/bfs-forschungsprogramm/stromnetzausbau/netzausbau_node.html

Immissionslage ableiten (Immissionen setzen sich meist aus vielen verschiedenen Quellen zusammen). Eben so wenig können aus Emissionsdaten persönliche Expositionen berechnet werden, denn diese hängen vom konkreten Gebrauch/Verhalten (Expositionsdauer, Distanz, Orientierung, etc.) gegenüber Quellen (Infrastrukturen, Konsumgüter) ab.

Als Immission bezeichnet man die an einem Ort im Raum gemessene elektrische oder magnetische Feldstärke bzw. Flussdichte, ausgedrückt als Spitzenwert oder zeitlich gemittelter Durchschnittswert. Die Werte können z.B. in Immissionskatastern erfasst und/oder mit Immissionskarten visualisiert werden. Meist setzen sich Immissionen aus verschiedenen Quellen zusammen. Bei EMF dominiert in der Regel die an einem Ort gemessene stärkste Quelle das Immissionsniveau. Häufig werden nur Felder von fixen Installationen berücksichtigt und mobile Quellen vernachlässigt. Für niederfrequente Magnetfelder lassen sich von Outdoor-Immissionen die Indoor-Immissionen abschätzen, für alle anderen Felder ist das wegen Dämm- und Schirmwirkungen nicht vernünftig leistbar. Aus Immissions-Zeitreihendaten können allgemeine Trends ersichtlich werden. Aussagen über persönliche Expositionen lassen sich hingegen, wie bei Emissionsdaten, keine gewinnen.

3.1.2 Persönliche Exposition und Dosis

Als persönliche Exposition bezeichnet man die "am Ort eines Menschen" gemessene elektrische oder magnetische Feldstärke bzw. Flussdichte. Der „Ort des Menschen“ impliziert ein Referenzvolumen (ganzer Körper oder Teil des Körpers). Für ein definiertes Referenzvolumen kann grundsätzlich die maximale Exposition (Spitzenwert) oder eine zeitlich gemittelte Exposition bestimmt werden. Diese Art der Expositionsbestimmung bezieht sich immer auf den entsprechenden Ort.

Eine andere Art der Bestimmung der persönlichen Exposition beinhaltet nebst der zeitlichen Mittelung auch eine räumliche, wenn das Aufenthaltsmuster der jeweiligen Person innerhalb eines Gebietes mitberücksichtigt wird. In den Messkonzepten für die Ermittlung der durchschnittlichen Exposition von Personen gegenüber elektromagnetischen Quellen werden deshalb auch Routenmessungen durchgeführt, um genau diesem Umstand Rechnung zu tragen.

Als Dosismass im Zusammenhang mit elektromagnetischen Feldern wird häufig die im Körper oder einer spezifischen Körperregion absorbierte Energie verwendet. Dies erlaubt verschiedene Anteile der elektromagnetischen Strahlung unabhängig von der jeweiligen Frequenz zusammenzufassen. Abhängig vom untersuchten Gegenstand kann der Dosisbegriff auch anders verwendet werden und sich auf Anteile des Spektrums oder Feldstärken beziehen. Die Dosis innerhalb des Körpers wird in aller Regel messtechnisch an Phantomen oder mit Computersimulationen bestimmt.

3.1.3 Messung und Modellierung

Die Qualität von Expositionsdaten ist durch konzeptionelle, messtechnische und datentechnische Unsicherheiten bestimmt. Diese Unsicherheiten sind im NIS-Bereich beträchtlich und die Erfassung (Messung) oder Abschätzung (Modellierung) der „wahren“ Exposition eines Menschen (eines Kollektivs) oder der „wahren“ Immissionen im Raum ist immer mit Unsicherheiten verbunden. Am wenigsten Unsicherheiten bestehen bei Emissionsdaten, sofern diese von den Anlagenbetreibern regelmässig erfasst werden. Für gesundheitliche Fragestellungen sind die persönliche Exposition und die Dosis die relevanten Konzepte.

3.1.3.1 Messungen

Expositionsmessungen: Die messtechnische Erfassung der vorher beschriebenen Zielgrössen ist je nach Anspruch mit unterschiedlichem Aufwand verbunden. Erhoben werden kann die NF-Exposition durch Installationen mit portablen Messgeräten, die die magnetische Flussdichte erfassen (Exposimeter). Da der Körper das elektrische Feld beeinflusst, ist dessen Messung mit einem grösseren Aufwand verbunden und es werden normalerweise stationäre Messungen mit Messgeräten auf einem Stativ durchgeführt. Typischerweise wird deshalb meistens das Magnetfeld gemessen, insbesondere auch bei persönlichen Messungen. Die Genauigkeit von Magnetfeldmessungen an ausgewählten Standorten bei Hochspannungsleitungen wird von (Ztoupis et al., 2013) mit 10% angegeben. Ungenauer sind Messungen (der persönlichen Exposition) mit am Körper getragenen Messgeräten – vgl. etwa mit (Hwang et al., 2016), (Durrenberger et al., 2014) – und da sind insbesondere Daten von Expositionen gegenüber Haushaltsgeräten wegen der ausgeprägten Distanzabhängigkeit der Feldstärken nur schwer interpretierbar. Bezüglich dieser Aspekte sei des Weiteren auf den ersten Jahresbericht des schweizerischen Monitorings der Strahlenbelastung verwiesen (SwissNIS, 2022).

Dosismessungen: Grundsätzlich können neben den Emissionen, Immissionen, und persönlichen Expositionen auch Dosen messtechnisch erfasst werden. Weil man im Körperinnern (in aller Regel) die elektrischen Feldstärken (Dosismass für die Basisgrenzwerte im niederfrequenten Bereich; im hochfrequenten Bereich ist es die spezifische Absorptionsrate SAR) nicht messen kann, werden für die messtechnische Erfassung der Dosis Phantome verwendet, welche die elektrischen Eigenschaften des Körpers möglichst gut repräsentieren. Weil dazu Elektrolyten verwendet werden, vermisst man homogene Körpermodelle, die die unterschiedlichen elektrischen Eigenschaften von Geweben nicht differenzieren können. Die Aussagekraft bleibt damit eingeschränkt. Zusätzlich ist die Bestimmung der entsprechenden elektrischen Parameter unterhalb einer gewissen Frequenz mit zusätzlichen Unsicherheiten behaftet, da die Elektrodenpolarisation berücksichtigt und zum Teil herausgerechnet werden muss.

3.1.3.2 Modellierungen

Expositionsmodellierungen: Man kann die Exposition auch durch Berechnung zu bestimmen versuchen. Entsprechende Modelle müssen an messtechnisch erhobenen Daten kalibriert sein. Im NF-Bereich kennt man solche grossräumigen Simulationsrechnungen der zeitlich gemittelten Magnetfeld-Immissionen durch Hochspannungsleitungen und durch Fahrleitungen und Transportleitungen der Eisenbahn (Bürgi, 2011). Häufig werden die Immissionen für eine bestimmt Höhe über Grund gerechnet und in Form von Katasterplänen grafisch dargestellt. Die Ergebnisse sagen nichts aus über die reale Exposition der Bevölkerung. Dazu muss deren Aufenthaltszeit im Raum mitberücksichtigt werden. Mit entsprechenden Mobilitätsdaten können grundsätzlich auch auf der Basis von Simulationen statistische Aussagen zur persönlichen Exposition gegenüber Anlagen generiert werden, allerdings dürften die darin enthaltenen Unsicherheiten (mit Sicherheit im Hochfrequenzbereich, etwas weniger ausgeprägt im Falle von NF-Magnetfeldexpositionen) beträchtlich sein. Dabei bezieht im Falle von 16.7 Hz und 50 Hz Modellierungen die Unsicherheit primär auf die Mobilitätsdaten, denn die Variabilität von berechneten Immissionen gegenüber Messwerten liegt im einstelligen Prozentbereich. Mit sehr grossen Unsicherheiten behaftet ist auch die Modellierung von niederfrequenten Magnetfeldexpositionen gegenüber nahe am Körper verwendeten Gütern (Haushaltsgeräte, Maschinen). In diesem Bereich besteht ein ausgeprägter Forschungsbedarf.

Dosismodellierungen: Neben den erwähnten messtechnischen Verfahren mit Phantomen werden zur Bestimmung der Dosis v.a. Computermodellierungen eingesetzt. Die Fortschritte der letzten Jahre im Bereich der numerischen Simulation sind gewaltig, primär dank der hochauflösenden Körpermodelle, welche die MRI-Technologie möglich machte, und dank der immer leistungsfähigeren Computer Hard-

und Software. Das vielleicht wichtigste Anwendungsgebiet ist der Bereich „compliance“, also das Testen von Produkten hinsichtlich ihrer Einhaltung der Basisgrenzwerte. Simulationen werden aber auch zur Überprüfung der Grenzwerte selber verwendet wie in (Findlay, 2017) beschrieben. Dabei wird bei maximal zulässiger Exposition (externe Feldstärke, Grenzwert der magnetischen Flussdichte) die Dosis in interessierenden Geweben oder Körperbereichen berechnet und mit den Basisgrenzwerten (elektrische Feldstärke im Gewebe, SAR) verglichen. Bei allfälligen Überschreitungen muss über eine Anpassung der Grenzwerte nachgedacht werden. Eine aktuelle Übersicht über den Stand der Wissenschaft auf diesem Gebiet (Bereich Niederfrequenz) gibt eine neue Ausgabe der Zeitschrift *Physics in Medicine & Biology* (2016, 61, 12) mit über einem Dutzend Artikeln zu den Themen: Elektrostimulationsmodelle, anatomische Modelle, Dosimetrie, Grenzwerte und medizinische Anwendungen (Reilly & Hirata, 2016). Speziell erwähnenswert hier ist die Bedeutung der Haut-Modellierung. Werden realitätsnähere Zwei-Schicht Modelle (statt einem Modell mit einer homogenen Hautschicht) verwendet, so sinken die induzierten elektrischen Feldstärken (Dosismass) etwa um einen Faktor 5–10 (Schmid & Hirtl, 2016).

In einem neuen Reviewartikel geben Hirata et al. (Hirata et al., 2021) eine Übersicht über bestehende Methoden und offene Forschungsfragen bezüglich der Modellierung von Expositionsszenarien vom Niedrig- bis zum Hochfrequenzbereich. Den grössten Forschungsbedarf sehen die Autoren bei den neuen Mobilfunktechnologien, speziell bei Anwendungen oberhalb von 6 GHz für 5G- und 6G- Technologien. Im Niedrigfrequenzbereich bleibt die genaue Bestimmung der Gewebeparameter ein Thema. Neuere Resultate zu Messungen in diesem Frequenzbereich deuten auf eine höhere Leitfähigkeit der Haut und von Hirngewebe hin. Neue Methoden zur Bestimmung der Gewebeparameter basierend auf Magnetresonanztechnologie könnten helfen, die Unsicherheiten in diesem Bereich zu reduzieren (z.B. (Wake et al., 2016)).

3.1.3.3 Fazit zu NF-EMF

Im Zentrum des Interesses stehen Immissionen und persönliche Expositionen. Die Messtechnik für NF-EMF Immissionen ist etabliert. Dies gilt ebenso für die Modellierung von Immissionen durch Infrastrukturanlagen. Die grösste Unsicherheit bei der Immissions-Modellierung besteht bei den Inputdaten, z.B. den historischen Lastdaten von Hochspannungsleitungen. Solche Zahlen sind für die Schweiz nicht verfügbar, so dass ein gewisser Klärungsbedarf besteht im Zusammenhang mit der Exposition der Bevölkerung gegenüber dem 50–380 kV Verteilnetz. Unklar ist auch wie sich die Verkabelung vom Verteilnetz auf die Bevölkerungsexposition auswirkt.

3.1.4 Vorbemerkung zu den nachfolgenden Abschnitten

Die nachfolgenden Ausführungen orientieren sich an der Zusammenstellung von (Bowman, 2014), ergänzt durch weitere relevante Literatur. Es handelt sich nicht um einen systematischen Überblick über die Expositionsliteratur, sondern um eine einführende Darstellung im Hinblick auf die in den nachfolgenden Kapiteln diskutierten Studien.

Fast ausnahmslos alle Arbeiten zu Expositionen beziehen sich auf 50/60 Hz. Eine Ausnahme ist beispielsweise (Aerts et al., 2017). Oberschwingungen, auch als „dirty electricity“ und potenziell gesundheitsgefährdendes Agens bezeichnet – dazu: (Graham, 2000), (Milham & Stetzer, 2013) – werden kaum explizit berücksichtigt. Ein Review (de Vocht & Olsen, 2016) legt nahe, dass entsprechende Hinweise wissenschaftlich nicht begründet sind. (Fiocchi et al., 2015) haben in ihrer dosimetrischen Studie die Bedeutung der harmonischen Komponenten hinsichtlich ihres Beitrags zur gewebeinternen Feldbelastung berechnet. Nicht zuletzt wegen der strengen Standards zur Netzqualität des Stroms (der Gesamtgehalt der Harmonischen – THD – wird auf tiefem Niveau normiert), sind die Beiträge der Oberschwingungen bzw. der „dirty electricity“ an der Gesamtdosis klein. Sie belaufen sich im «worst-case» auf etwa 10%.

3.2 Daten zu Expositionen

3.2.1 Schweizerisches Monitoring

Der erste Bericht zum Monitoring der nichtionisierenden Strahlung in der Schweiz liegt nun vor (SwissNIS, 2022). Das Messkonzept umfasst drei verschiedene Messmethoden. Mit mobilen Messgeräten in einem Mess-Rucksack werden sogenannte Routenmessungen durchgeführt. Abgedeckt werden so öffentliche Aufenthaltsbereiche und der öffentliche Verkehr. Es kommen Messgeräte für hochfrequente Strahlung, wie bspw. Mobilfunk oder WLAN, und auch solche für niederfrequente Felder, etwa von Hochspannungsleitungen, zum Einsatz. In privaten Innenräumen werden sogenannte Spotmessungen durchgeführt, die aus mobilen Messungen in der ganzen Wohnung und einer 24-Stunden-Messung im Schlafzimmer bestehen. Schliesslich erfolgen noch stationäre Dauermessungen mit ortsfesten Messstationen. Mit diesem Konzept wird in rund 70 Gemeinden, verteilt über die ganze Schweiz, die Strahlung gemessen.

Bezüglich der gemessenen NF-EMF Werte wurden vergleichbare Werte wie in vorherigen Studien in der Schweiz und Italien (Struchen B., 2016) und auch schon länger zurückliegenden Studien wie derjenigen in den 90er Jahren auch durch das PSI durchgeführten umfassenden Messstudie (Stratmann et al., 1995) festgestellt. Medianwerte liegen bei Aussenmessungen Bereich von 0.1 µT. Die Messungen werden kontinuierlich fortgeführt und alle zwei Jahre an den gleichen Orten wiederholt.

Hirata et al. (Hirata et al., 2021) analysieren in einem Reviewartikel die bestehenden Methoden und Quellen und die dazugehörigen Instrumente zur Erfassung der Exposition in den verschiedenen Frequenzbereichen. Zudem geben Sie zukünftige Entwicklungen und den dazugehörigen Forschungsbedarf an. Der Artikel identifiziert die drahtlosen Ladestationen, medizinische Anwendungen und den Einfluss von elektromagnetischen Feldern auf elektrische Implantate als zukünftigen Fokus. Andere neuere Quellen werden nicht identifiziert.

3.2.2 Haushalte

3.2.2.1 Quellen

Bezüglich der Quellen in den Haushalten hat sich seit dem Statusbericht von 2017 nichts verändert. Die hauptsächlichsten Quellen niederfrequenter Magnetfelder in Haushalten sind die stromführenden Leitungen elektrischer Hausinstallationen, elektrisch betriebene Haushaltsgeräte und von aussen einstrahlende Felder von Strominfrastrukturen (Trafostationen, nahe gelegene Hochspannungsleitungen und/oder Fahrdrähte von Eisenbahntrassen und Trams). Einen Überblick geben (Gajsek et al., 2016). Sodann sind auch die Felder von vagabundierenden Strömen unvorteilhaft geerdeter Hausinstallationen zu nennen. Solche Ströme sind zwar vergleichsweise klein, aber weil sie nicht durch die Magnetfelder von Rückleitern kompensiert werden, sind sie nicht in jedem Fall zu vernachlässigen (Dürrenberger, 2016).

3.2.2.2 Immissionen und Emissionen

Seit dem letzten Statusbericht gibt es keine neuen Studien zu systematischen Erfassungen der Feldwerte im Haushalt. Die neuen Monitoringprojekte werden darüber weiter Auskunft geben, sobald die Daten in Innenräumen erfasst wurden. Insgesamt sind die Immissionen von Hausinstallationen klein. Der 24-Stunden-Durchschnitt, über alle Räume gemittelt, wird für die USA mit 0.01 µT angegeben, mit Spitzen um 0.7 µT (Bowman, 2014). In der Metaanalyse von (Kheifets et al., 2006) lagen 70-80% aller Haushalte unterhalb 0.1 µT. (Karipidis, 2015) gibt als durchschnittlichen Pegel 0.05 µT an. Diesen Wert erhielt er aus Messungen in ca. 300 Wohnungen in Melbourne. Dasselbe Resultat zeigen die

Daten von (Tomitsch et al., 2010) oder (Tomitsch & Dechant, 2015) für Österreich, mit einer über die letzten Jahre eine leicht fallende Tendenz. Messungen in Spanien (Calvente et al., 2014), sowie in Griechenland (Kottou et al., 2015), (Nikolopoulos et al., 2015) und Kanada (Richman et al., 2014) ergaben durchschnittliche Magnetfeldimmissionen in der Grössenordnung von 0.1-0.2 µT. Gemäss (Grellier et al., 2014) betragen die Flussdichten in 80% der Haushalte in der EU27 Region weniger als 0.05 µT, 30% der Haushalte liegen unter 0.01 µT. Vergleichbar tiefe Werte zeigten auch Pilotmessungen in Rumänien (Ursache et al., 2016).

Hinsichtlich Expositionen im Bereich der Zwischenfrequenzen (IF-EMF) haben Messungen von (Aerts et al., 2017) in 42 Wohnungen in Belgien, in Slowenien und in U.K. nur sehr schwache Magnetfeld-Expositionen im Bereich von 1% des Grenzwertes gezeigt (dabei wurden die unterschiedlichen Frequenzen gemäss ICNIRP aufsummiert).

Nur Wohnungen im Umfeld von grösseren Strominfrastrukturen weisen höhere Pegel auf. (Vulevic & Osmokrovic, 2011) geben als Grössenordnung der Immissionen hochexponierter Wohnungen im direkten Umfeld von Hochspannungsleitungen Werte von 2-4 µT an (siehe auch: (Nicolaou et al., 2011), (Nikolopoulos et al., 2015)). Allerdings liegen nur wenige Häuser sehr nahe bei Hochspannungsleitungen. Nach (Huss et al., 2009) befinden sich in einem Korridor von 50 m um 220 und 380 kV Höchstspannungsleitungen in der Schweiz unter 0.5% aller Haushalte. Für Frankreich beträgt der Wert 0.2% (für Mittelspannung: 0.5%; (Sermage-Faure et al., 2013), für England 0.1% (de Vocht & Lee, 2014). Nach (Bessou et al., 2013) liegen die Feldstärken ausserhalb dieses 50 m Korridors fast durchwegs unter 1 µT (Ausnahme: 400 kV Leitungen). (Maslanyj et al., 2007) haben den Beitrag von Hochspannungsleitungen an den Innenraum NF-Pegeln im Vereinigten Königreich gemessen und kamen zum Resultat (p. 41):

„High-voltage (HV) sources, including the HV overhead power lines that are the focus of public concern, accounted for 23% of the exposures above 0.2 µT, and 43% of those above 0.4 µT".

In mehreren Arbeiten wurden auch die Immissionen durch Transformatoren, die in Gebäuden untergebracht sind, gemessen. In den Räumen direkt oberhalb der Trafos wurden Werte um 0.3–1 µT gemessen (Ilonen et al., 2008), (Roosli et al., 2011), (Zaryabova et al., 2013), (Shalamanova et al., 2015).

Die Immissionen von Haushaltsgeräten sind stark betriebs- und produkt- bzw. modellabhängig. Abbildung 15 zeigt Angaben des BAFU.

In einer Emissions-Messkampagne von über 1000 Geräten kommen (Leitgeb et al., 2008a) zum Schluss (p.69):

„More than 1000 electric appliances have been investigated regarding their emission of magnetic fields. It was found that complex frequency spectra are common and single frequency emissions are rare. Since exposure assessment requires frequency-weighted sums, root-mean-square values are not appropriate for comparison with exposure reference levels. It could be shown that they may underestimate emissions up to two orders of magnitude. Analysis of device groups showed a wide span of emission values of up to two orders of magnitude with only weak associations to power consumption. This demonstrates that there is a considerable potential to reduce fields without loss of performance. Exposure to magnetic fields of electric appliances are not negligible in daily life. Many devices considerably exceeded permitted reference levels and would require a closer analysis to demonstrate conformity with basic limits".

In 73 von 166 Gütergruppen lagen die Magnetfeld-Emissionen, bei Berücksichtigung der spektralen Peaks, oberhalb der ICNIRP Referenzwerte, teilweise bis zwei Grössenordnungen (Faktor 100). Allerdings gilt es hier zu berücksichtigen, dass die gemessenen Emissionen nicht in jedem Fall als Immissionen (auf welche sich die ICNIRP-Werte beziehen) angesehen werden können. Dort, wo der Gebrauchsabstand grösser ist als der in der Messung verwendete Abstand zwischen Sonde und Gerät,

werden die Körperimmissionen kleiner sein als die von Leitgeb und Kollegen angegebenen Emissionswerte. Die Zahlen liegen (denn auch) teilweise deutlich oberhalb der Werte, die in der BAFU-Tabelle gelistet sind. Aus Sicht der Autoren (Leitgeb et al., 2008b) ist es unklar, ob bei ihren Werten, die sie als “worst-case”-Immissionswerte interpretieren, die Basisgrenzwerte eingehalten sind.

	3 cm	30 cm	100 cm
Radiowecker	3-60	0.1-1	0.01-0.03
Heizdecke	bis 30		
Fernsehapparat	2.5-50	0.04-2	0.01-0.15
Heizofen	10-180	0.15-5	0.01-0.25
Energiesparlampe	1	0.1	
Haarfön	6-2000	0.01-7	0.01-0.3
Rasierapparat	15-1500	0.08-9	0.01-0.3
Bohrmaschine	400-800	2-3.5	0.08-0.2
Staubsauger	200-800	2-20	0.1-2
Waschmaschine	0.08-50	0.15-3	0.01-0.15
Wäschetrockner	0.3-8	0.1-2	0.02-0.01
Bügeleisen	8-30	0.1-0.3	0.01-0.03
Elektroherd	1-50	0.15-8	0.01-0.04
Mikrowelle	40-200	4-8	0.25-0.6
Kühlschrank	0.5-2	0.01-0.3	0.01-0.04
Kaffeemaschine	1-10	0.1-0.2	0.01-0.02
Mixer	60-700	0.6-10	0.02-0.25

Abbildung 15: Immissionen von Haushaltsgeräten in drei Abstandskategorien; in µT (Quelle: (BUWAL, 2005)*; Seiten 31-33).*

In der bereits erwähnten Messkampagne von (Aerts et al., 2017) wurden 279 Geräte in 20 und 50 cm Gebrauchsabstand unter Berücksichtigung des emittierten Frequenzspektrums vermessen. Fast alle Werte lagen im Bereich unterhalb weniger Prozente der ICNIRP-Grenzwerte. Induktionsherde wiesen die höchsten Felder auf. Sie lagen im Bereich um 10% der Grenzwerte. Bei Distanzen die weniger als 20 cm betragen, können die Grenzwerte allerdings übertroffen werden (Van Den Bossche et al., 2015).

Eine neue Studie aus Korea beschäftigt sich auch in diesem Zusammenhang mit den magnetischen Feldern, die von 10 verschiedenen Handventilatoren ausgehen, wie sie gerne in Korea benutzt werden und auch sehr verbreitet sind. Bei diesen Geräten werden Gleichstrommotoren verwendet und es wurden innerhalb einer Distanz von 10 cm Werte bis zu 218.7 µT gemessen. Diese Werte nehmen aber wie bei den anderen Geräten mit zunehmender Distanz sehr schnell ab (Choi et al., 2019).

Es ist wichtig, an dieser Stelle festzuhalten, dass sich die zitierten ICNIRP Grenzwerte (Referenzwerte) auf eine homogene Körperbefeldung beziehen. Bei Nahkörperanwendungen von Geräten ist diese Bedingung nicht mehr gegeben und deutlich zu konservativ. (ICNIRP, 2010) schreibt denn auch (p. 827):

“(…) for a very localized source with a distance of a few cm from the body, the only realistic option for the exposure assessment is to determine dosimetrically the induced electric field, case by case.”

Für drahtlose Ladegeräte sind entsprechende Mess- und Simulationswerte publiziert worden (Zahner et al., 2017). Sie zeigen, dass die Magnetfeldstärken in nächster Gerätenähe die Grenzwerte zwar um

mehrere Zehnerfaktoren übersteigen, die im Körper induzierten Feldstärken (die für die gesundheitliche Beurteilung der Strahlung relevant sind) den Grenzwert jedoch einhalten; siehe dazu auch (Nadakuduti et al., 2015). Für drahtlose Ladesystemen siehe auch Kapitel 2.3.4.

(SCENIHR, 2015) bemerkt, dass bei vielen Geräten die zeitliche Mittelung (auch über kurze Perioden von 1 s) problematisch sei, weil Spitzenbelastungen im Millisekundenbereich auftreten können und Nerven stimulieren. Die Einhaltung von Produktenormen sei deshalb kein allgemein zuverlässiges Kriterium, um möglicherweise gesundheitlich belastenden Expositionen auszuschliessen.

(Mathys, 2005), (Mathys, 2012), (Moser, 2014) und (Bräunlich, 2014) beziffern die in Wohngebäuden messbaren Kriechströme auf Rohrleitungen auf 0.5–1 A in stark belasteten Liegenschaften (siehe auch: 2.2.5). Diese Ströme verursachen in 20 cm Abstand Magnetfeldimmissionen von 0.5 -1 µT. (Virnich, 2012) spricht von gemessenen Spitzenbelastungen von mehreren Ampere und Magnetfeldimmissionen bis 4 µT. Als Faustregel kann man sich merken, dass im schlechten Fall in Wohngebäuden Kriechströme die Stromstärke von 1 A erreichen können und die damit verbundene Magnetfeldbelastung in unmittelbarer Nähe im Bereich des Anlagegrenzwertes der NISV von 1 µT zu liegen kommt. Bei sehr starken Belastungen können doppelt so hohe Werte erreicht werden. In Geschäftshäusern oder grossen Mehrfamilienhäusern mit vielen nicht-linearen Verbrauchern können gemäss (Mathys, 2012) jedoch deutlich höhere Kriechströme auftreten.

(Does et al., 2011) haben in über 200 Häusern in Kalifornien die Spannungsabfälle an Sanitärinstallationen (Badezimmer) gemessen und einen Mittelwert von knapp 6 mV erhalten (Höchstwerte: 10 mV). Sie stellten dabei eine sehr schwache Korrelation mit der Magnetfeldimmission fest, so dass man schlussfolgern kann, dass im untersuchten Sample Kriechströme vorwiegend durch die Hausanschlussart bedingt sind.

Mehrere Studien wurden mit Modellen von schwangeren Frauen durchgeführt, um die elektrischen Feldstärken in Föten zu berechnen, wenn die werdende Mutter den maximal zulässigen magnetischen Flussdichten bzw. Kontaktströmen ausgesetzt ist (Chan et al., 2015), (Fiocchi et al., 2015), (Kavet, 2015), (Liorni, Parazzini, Fiocchi, et al., 2016), (Hocking, 2015). Insgesamt kommen die Studien zum Schluss, dass die Referenzwerte den Fötus schützen. Einige Unsicherheiten bleiben allerdings bestehen und zusätzliche Überprüfungen sind nötig.

Ob sich das Problem mit Kriechströmen in Zukunft verschärfen oder eher entspannen wird, ist schwierig abzuschätzen. Elektrotechnische Sanierungen tragen mit Sicherheit zu einer Entspannung bei. Andererseits verschärft sich das Problem der Oberwellenbelastung. Weil für höhere Frequenzen die Impedanz der Netz-PEN-Leiter höher ist, sinkt der Parallelwiderstand der Kriechstromwege im Verhältnis zum Widerstand des PEN-Leiter-Weges. Das führt, ceteris paribus, zu einer Erhöhung der Kriechströme

3.2.3 Öffentliche Orte

3.2.3.1 Quellen

Die Immissionen in öffentlichen Gebäuden sind von der Grössenordnung her vergleichbar mit den Immissionen im Haushalt. Unterschiede sind im Wesentlichen auf den Gerätepark und dessen Nutzungsmuster zurückzuführen. Sodann gilt es, die Infrastrukturanlagen zu berücksichtigen. Emittenten von niederfrequenten Feldern sind Trafostationen, elektrischen Transport- und Verteilleitungen (Freileitungen wie Erdkabel), sowie die Fahrdrähte des öffentlichen Verkehrs. Trams und Trolleybusse nutzen Gleichstrom. Deren Felder sind biologisch wenig problematisch und schon wenige Meter ausserhalb des Fahrleitungstrassees liegen die Feldstärken in der Grössenordnung des natürlichen Erdmagnetfeldes bzw. des natürlichen elektrischen Feldes der Atmosphäre. Aus diesem Grund werden diese Emissionen und Immissionen nicht weiter betrachtet. Eisenbahnen verwenden Wechselstrom

von 16.7 Hz (für die interne Stromversorgung in den Wagen manchmal auch 50 Hz). Hier gilt es insbesondere, die Immissionen in den Wagen zu beachten. Im Zusammenhang mit dem Verkehr kann schliesslich auch noch die niederfrequente Magnetfeldbelastung im Auto, verursacht durch die Bordelektrik, elektrische Geräte wie die Lüftung und durch nicht entmagnetisierte Reifen, berücksichtigt werden.

3.2.3.2 Immissionen

Indoor-Immissionen in Schulen oder anderen öffentlichen Gebäuden können mit den Pegeln in Privathaushalten verglichen werden. Die konkrete Situation (Lage gegenüber Infrastrukturanlagen) und die gerätetechnische Ausstattung sind die wesentlichen Determinanten, welche Unterschiede erklären.

Die Outdoor-Immissionen sind zur Hauptsache durch Infrastrukturen bestimmt. In der Nähe grosser Anlagen (Hochspannungsleitungen, Verteilleitungen, Niederspannungs-Erdkabel, Eisenbahn-Fahrleitungen, Umspannwerke, Trafostationen) können vergleichsweise grosse Felder gemessen werden. Zunächst zu Infrastrukturen des Netzstroms: Eine 380 kV Leitung mit 2 Strängen (6 Leiterseile) kann bei Volllast (gegen 2000 A) direkt unterhalb der Seile auf Bodenhöhe magnetische Flussdichten von über 10 µT erzeugen (Immissionsgrenzwert: 100 µT; Angaben: (BUWAL, 2005)). Ausserhalb eines Korridors von 50 m betragen die Feldstärken, insbesondere von kleineren Transport- und bei Verteilleitungen weniger als 1 µT. Aufgrund des schwankenden Strombedarfs der Nutzer (Wirtschaft, Haushalte) variieren die Stromstärken und damit die Magnetfelder dauernd, wobei sich die Immissionen bis zu einem Faktor 4–5 verändern können (im Vergleich mit den oben erwähnen Maximalwerten: Reduktion). Gemäss den Angaben von (Nicolaou et al., 2011) sind die Schwankungen noch grösser (bis Faktor 10), wenn man “worst-case”-Phasenbelegungen berücksichtigt. Erdkabel weisen direkt oberhalb der Kabelkanäle grösser Magnetfelder auf als vergleichbare Freileitungen, weil die Schächte meist nur 1–2 m unter der Oberfläche liegen. Weil die stromführenden Kabel näher beieinander liegen als im Fall von Freileitungen, wird die Distanz zum Trassee, bis der Grenzwert unterschritten ist, deutlich verkürzt: schon nach wenigen Metern liegen die Magnetfelder unterhalb von 1 µT. Bei Quartiertransformatoren können die magnetischen Flussdichten an den Aussenwänden der Gebäude recht hoch sein, wenn Konstruktion und Betrieb nicht optimiert sind. In 2–3 m Distanz liegen die Feldstärken bei neuen oder sanierten Anlagen unterhalb 1 µT. In nächster Umgebung von Unterwerken haben Messungen Werte bis in den Bereich von 1 oder einigen wenigen µT gezeigt (Djuric et al., 2016), (Gajsek et al., 2016).

Zuletzt gilt es noch, das Transportwesen zu beachten. Bei den Eisenbahnen betreffen die relevanten Immissionen die Nahumgebung der Fahrtrassen (Anwohner) und das Wageninnere (Passagiere). Im Vergleich zu Hochspannungsleitungen schwanken die Stromstärken in Fahrleitungen viel stärker. So fliesst etwa in Abschnitten, in denen keine Züge fahren, gar kein Strom. Erst wenn eine Lok in den Abschnitt einfährt, wird die Strecke bestromt. Sodann ist der Elektrizitätsbedarf stark von der Leistung abhängig. Beim Anfahren wird deutlich mehr Energie benötigt als währen der gleichmässigen Fahrt. Beim Bremsen kann Strom rekuperiert und ins Netz zurückgespiesen werden, was die Magnetfeldimmissionen ansteigen lässt. Die kurzzeitigen Schwankungen können leicht einen Faktor 4–5 nach oben und unten – im Vergleich zum 24-Stunden-Mittelwert – ausmachen. Da zwischen Hin- und Rückleitung (Fahrleitungen und Schienen) eine grosse Distanz besteht, kompensieren sich die entgegengesetzt gerichteten Magnetfelder kaum. Das führt dazu, dass die Magnetfelder mit der Distanz vom Trassee langsam abnehmen und selbst bei relativ geringen Stromflüssen beträchtliche Magnetfelder auftreten können. Auf vielbefahrenen Strecken kann der Mittelwert 10 Meter ausserhalb des Fahrtrasses 1 µT betragen. Zu beachten gilt: Die Eisenbahn fährt mit 16.7 Hz. Der Immissionsgrenzwert beträgt hier 300 µT (bei 50 Hz: 100 µT). In den Passagierwagen innerhalb des Zuges misst man ebenfalls niederfrequente Magnetfelder, einerseits von den Rückströmen, andererseits von der Stromversorgung der Wagen selber. Immissionsmessungen variieren stark mit dem Standort. Vergleichsweise grosse Felder misst man direkt hinter der Lokomotive über der Zugsammelschiene (Bündelleitung für

die interne Stromversorgung). Erhöhte Expositionen treten auch bei modernen Kompositionen auf, wo der Motor über die ganze Komposition verteilt ist (z.B. ICN-Züge). Hier können die Flussdichten im Mittel einige µT betragen. In der Studie von (Roosli et al., 2008) betrugen die Magnetfeldbelastungen bei Zugbegleitern im Durchschnitt 4 µT. Maximale Werte unter 1 µT (rms-Breitbandmessungen 40–800 Hz) geben dagegen (Halgamuge et al., 2010) an.

Wie einleitend erwähnt, sind die elektrischen und magnetischen Felder von mit Gleichstrom betriebenen öffentlichen Nahverkehrsmitteln (Tram, Trolleybus, U-Bahnen, einige Schmalspurbahnen) schon in wenigen Metern Abstand vom Fahrtrassee sehr klein. Zudem sind biologischen Wirkungen dieser Felder unbedeutend. Jedoch zeigt die Praxis, dass in einem dicht befahrenen Netz mit vielen schnellen Änderungen der Stromflüsse, durchaus transiente Felder auftreten können, die von Wechselfeldmessgeräten erfasst werden. Innerhalb von Trams wurden niederfrequente Magnetfelder (Breitbandmessung 40–800 Hz) mit Flussdichten um 2 µT (Spitzen bis 7 µT) gemessen (Halgamuge et al., 2010).

Die Bordelektrik im Auto erzeugt elektromagnetische Felder von wenigen Hertz bis ca. 1000 Hz. Je nach geometrischer Anordnung (Standorte) der elektrischen Geräte (Batterie, Lichtmaschine, Zündung, Klimaanlage, etc.) misst man unterschiedliche Expositionen im Bereich der einzelnen Sitze. Meist sind die Felder sehr klein. Messungen (Vedholm, 1996) ergaben für breitbandig gemessene niederfrequente Magnetfelder Werte die in der grossen Mehrheit der Fälle unter 1 µT lagen, mit Spitzenwerten von einigen wenigen Mikrotesla. Eine neue Messreihe (Hareuveny et al., 2015) bei 10 verschiedenen Modellen ergab Werte unter 0.2 µT. Eine gemäss Leitgeb (Leitgeb et al., 2008b) durchgeführte Summierung der Peak-Werte würde allerdings in beiden Fällen höhere Immissionen zeigen. Simulationen kommen frequenzabhängig teilweise auch zu höheren Werten (Concha et al., 2016). Von Fahrzeugen mit elektrischem Antrieb (auch Hybridfahrzeuge) gehen zusätzliche Feldbelastungen aus (für eine jüngere Zusammenstellung siehe (Wang et al., 2014). Messungen haben ergeben, dass die Stärke dieser zusätzlichen Felder in der Grössenordnung der in jedem Auto durch die Bordelektrik erzeugten Magnetfelder liegt. Die Messwerte schwanken jedoch stärker und die Spitzen sind bei hohen Geschwindigkeiten grösser – über 0.5 µT (Hareuveny et al., 2015). Eine weitere Quelle für niederfrequente Magnetfelder sind nicht-entmagnetisierte Reifen. Bei einer Fahrgeschwindigkeit von 80 km/h beträgt die Frequenz der Felder 10–12 Hz. Bei der Mehrheit der Autos wurden von (Stankowski et al., 2006) im Fussbereich Flussdichten über 2 µT gemessen, mit Spitzenwerten bis 10 µT. Allerdings wird mit diesen vergleichsweise hohen Zahlen der ICNIRP Grenzwert erst zu etwa 10% ausgeschöpft. Diese Grössenordnungen sind vergleichbar mit den Werten von (Halgamuge et al., 2010), (Vassilev et al., 2015) und den Zahlen von (Paniagua et al., 2017), die Maximalwerte von 2 µT angeben.

In einer aktuellen Übersichtsstudie (Tognola et al., 2022) werden die Arbeiten zur Exposition gegenüber verschiedener Kommunikationstechnologien und deren Kombination in vernetzten Fahrzeugen zusammengefasst und analysiert. Diese Technologien decken den Hochfrequenzbereich ab, der von einigen hundert MHz (z. B. bei fahrzeug-internen Sensornetzen) bis zu Hunderten von GHz (z. B. bei Fahrzeugradar zur Erkennung von Fahrzeuginsassen und fortschrittliche Fahrerassistenzsysteme) reicht. Fahrzeuginsassen und Verkehrsteilnehmer in der Nähe des vernetzten Fahrzeugs sind daher täglich einem elektromagnetischen Feld ausgesetzt, das aus mehreren Quellen und Bändern besteht und von diesen Technologien erzeugt wird. Diese Übersichtsarbeit fasst die Ergebnisse aus der aktuellen Literatur über die Eigenschaften und den Anwendungsbereich der wichtigsten Technologien für das vernetzte Auto zusammen, die von Technologien für die interne Fahrzeug-Konnektivität bis hin zu Technologien für die Fahrzeugsensorik reichen.

Die Arbeit beschreibt auch ausführlich die Expositionsszenarien und die EMF-Dosis, die für Insassen von Fahrzeugen, die mit solchen Technologien ausgestattet sind, einschliesslich der generischen Technologien für die persönliche Konnektivität im Fahrzeug (z. B. Smartphones, Tablets, etc.) auftreten. Alle in dieser aktuellen Übersichtsarbeit analysierten Studien belegen, dass die Exposition und

die von den Fahrzeuginsassen absorbierte Dosis nicht über den Grenzwerten für die Exposition der allgemeinen Bevölkerung zu liegen kommen. Dennoch sollte die Forschung zur EMF-Exposition im vernetzten Auto in den kommenden Jahren auf noch offene Fragen angehen, insbesondere die Entwicklung von realistischeren Szenarien, die noch nicht untersuchte Aspekte berücksichtigen, wie die gleichzeitige und kombinierte Exposition gegenüber Feldern aus mehreren Quellen mit unterschiedlichen Frequenzen. Dazu gehören auch weitere Aspekte wie die Auswirkungen der Variabilität des Expositionsszenarios und die Auswirkungen der neuen 5G- und 6G-Technologien insbesondere der sehr hohen Frequenzen in den mm-Wellen-Bändern auf die EMF-Exposition im Auto.

Neuere Studien über öffentliche Orte publiziert seit 2017 beziehen sich vor allem auf Spielplätze und Schulen. In (Christopoulou & Karabetsos, 2019) wurden 319 Kinderspielplätze in 16 Gemeinden in Griechenland in der Zeitspanne zwischen 2013-2018 vermessen. Die resultierenden Werte sind vergleichbar mit den gemessenen Werten in den entsprechenden urbanen und sub-urbanen Umgebungen. Eine andere Studie in Griechenland erfasste die durchschnittlichen Werte von Magnetfeldern im Bereich zwischen 1-400 Hz in Schulen in urbanen und sub-urbanen Umgebungen. Der durchschnittliche Wert lag bei 0.21 µT. Eine Studie aus Korea erfasste die magnetischen Flussdichten in 5 Klassenzimmern in vier verschiedenen Schulen während des Unterrichts. Es ergaben sich Unterschiede in den Maximalwerten zwischen den Schulen und auch zwischen den Sitzplätzen innerhalb der Räume. Die Werte lagen alle unterhalb der Grenzwerte. Der gemessene Maximalwert betrug 0.28 µT.

3.2.4 Arbeitsplätze

3.2.4.1 Quellen

Von besonderem Interesse sind im Zusammenhang mit Arbeitsplatzbelastungen die Immissionen von besonders exponierten Arbeitsplätzen, etwa in der Stromwirtschaft, im Bau- und Metallgewerbe, im Transportwesen oder im Medizinal- und Gesundheitsbereich; für ein umfassende Literatur-Review siehe: (Stam, 2014). Entsprechende Quellen an diesen Arbeitsplätzen sind: Generatoren, Stromsammelschienen, Hochspannungsleitungen, Transformatorenstationen, Schweissgeräte, Lokomotivenmotoren oder Magnetresonanztomographen. Durchschnittliche Immissionen werden häufig mit sog. Job-Exposure-Matrices (JEM) nach Berufsgattung, Tätigkeiten und Branchentypen kategorisiert, um grobe Anhaltspunkte für die Exposition von Beschäftigten zu erhalten. Meist basieren die Daten auf Immissionsmessungen an den relevanten Aufenthaltsorten der Beschäftigten. Über Aufenthaltsdauern werden daraus ungefähre persönliche Berufsexpositionen verschiedener Beschäftigungskategorien berechnet (siehe 3.2.4.3). Die maximalen Immissionen liegen meist unterhalb der Grenzwerte für Arbeitsplätze, insbesondere unterhalb der Grenzwerte für die Stimulation des zentralen Nervensystems. Ausnahmen finden sich im Umfeld von Induktionsöfen und MRI-Geräten. An diesen Arbeitsplätzen können die Maximalwerte auch die Limiten für die Stimulation von peripheren Nerven (zum Teil deutlich) übersteigen.

Es konnten bislang keine neuen Quellen in der Arbeitsplatzsituation bestimmt werden. Es fehlen aber bislang ebenfalls systematische Erfassungen von verschiedenen Arbeitsplätzen. Der Fokus liegt mehrheitlich auf der Exposition von Privatpersonen, obwohl ein wesentlicher Teil der Exposition durchaus am Arbeitsplatz erfolgen kann. Schutz der Öffentlichkeit und der Arbeitswelt sind stark getrennte Aspekte, die üblicherweise auch auf Behördeneben getrennt behandelt werden.

3.2.4.2 Immissionen/Expositionen

In der Elektrizitätswirtschaft betragen die durchschnittlichen Immissionen im Bereich der Sammelschienen von Generatoren gemäss einer Literaturübersicht von (Bowman, 2014) um 10 µT, mit Maximalwerten bis 40 µT. Eine spätere Arbeit hat die Grössenordnung bestätigt (Ozen et al., 2015). Bei Arbeiten an den Masten von Hochspannungsleitungen können magnetische Flussdichten bis in den

mT-Bereich auftreten, bei Arbeiten am Boden bis einige wenige µT (vgl. auch mit 3.2.3.2). In Umspannwerken liegen die durchschnittlichen Immissionen in der Grössenordnung einiger µT, an exponierten Orten können jedoch Maximalwerte von über 100 µT gemessen werden. Sehr hohe Maximalwerte können in Kabelkanälen von Höchstspannungsleitungen herrschen (5-10 mT), die durchschnittlichen Immissionen werden mit 10 µT angegeben. (Stam, 2014) referiert für maximale Expositionen Literaturwerte im Bereich zwischen 100 µT und 1 mT. (McCallum et al., 2014) massen die Immissionen von Windturbinen. Die Flussdichten am Fuss der Turbinen lagen um 0.01 µT und waren in 2 m Entfernung nicht mehr vom Grundrauschen zu unterscheiden.

Im Transportwesen interessieren v.a. die Magnetfelder der Traktion (Zugmotoren). Messungen von (Roosli et al., 2007a) ergaben in Führerständen von Lokomotiven durchschnittliche Immissionen im Bereich von 20 µT, für Werkstätte um 5 µT.

Sehr grosse Immissionen verursachen viele im Metallwesen eingesetzte elektrische Verfahren, die mit Strömen von mehreren hundert Ampere arbeiten. Bei Widerstands-Schmelzöfen sind im Arbeitsbereich durchschnittliche Immissionen von 500 µT und maximale Flussdichten von mehreren mT anzutreffen (Bowman, 2014). Wegen der grossen Hitze befinden sich Arbeiter kaum je in noch stärker belasteten Zonen. Auch bei Induktionsöfen und beim Widerstandspunktschweissen können vergleichbar hohe maximale Flussdichten (bis 10 mT) auftreten, wobei insbesondere bei industriellen Induktionsöfen das Frequenzspektrum breit ist (relevante Spitzenwerte bis über 10 kHz). Andere elektrische Schweissarten erzeugen deutlich tiefere, aber immer noch vergleichsweise grosse Immissionen im Bereich von 10 bis einige 100 µT (Stam, 2014).

Andere Branchen. Gemäss Messungen von (Roivainen et al., 2014) gibt es sehr grosse Unterschiede im Verkaufsbereich bzw. an Kassenarbeitsplätzen. Meist liegen die Messwerte unterhalb 0.5 µT. Spitzenwerte können aber in Ausnahmefällen mehrere µT betragen. In Büros liegen die Immissionen im Bereich von 0.1–0.2 µT. Im Gesundheitswesen wurden v.a. Immissionen in Spitälern gemessen. Für 50 Hz werden Maximalwerte von einigen 100 µT für Arbeitsplätze im Bereich Phototherapie und Intensivpflege angegeben, einige 10 µT für Magnettherapie (Stam, 2014). Hohe Immissionen sind auch beim MRI-Personal vorhanden. Bei den Gradientenfeldern (kHz-Bereich) werden Flussdichten bis über 1 mT gemessen, dasselbe gilt für TMS-Arbeiten (transkranielle Magnetfeldstimulation).

3.2.4.3 Expositionen

Ansatz. Hier geht es um die die Frage, welchen Feldern und welchen Feldstärken ein Arbeitnehmer am Arbeitsplatz im Durchschnitt ausgesetzt ist. Für epidemiologische Zwecke werden dafür häufig sog. Job-Exposure-Matrices (JEMs) verwendet. In ihnen sind die Expositionen nach statistisch ausgewiesenen Berufs- und Arbeitsplatzkategorien zusammengestellt, wobei die mittleren Aufenthaltszeiten berücksichtigt und für die Schätzung der Durchschnittsexpositionen gewichtet sind. Welches Mass als Durchschnitt am besten geeignet ist, haben (Oraby et al., 2017) untersucht. Wie andere Arbeiten schlagen sie das geometrische Mittel vor.

Meist werden bereits publizierte Daten aus entsprechenden Messkampagnen verwendet. Eine häufig genutzte Zusammenstellung haben (Bowman et al., 2007) vorgelegt. Updates dieser Arbeit finden sich bei (Koeman et al., 2013) und bei (Turner et al., 2014). Ein weiterer Vorschlag verwendet Expertenschätzungen (H. J. Fischer et al., 2015), andere stärker individualisierte Daten aus verschiedenen zugänglichen Quellen, die auf Aussagekraft und Plausibilität geprüft und in einer „Occupational Exposure Measurement Database“ zusammengefasst sind (Vila et al., 2016), bzw. die an (vergleichbaren) Arbeitsplätzen vorkommenden Expositionsunterschiede (z.B. aufgrund unterschiedlicher Arbeitsabläufe) statistisch berücksichtigt (Greenland et al., 2016). Es wurde auch ein Vorschlag publiziert, in dem Schätzungen durch nicht-Experten beschrieben und evaluiert wurden (El-Zein et al., 2016).

Im Folgenden seien einige Werte von durchschnittlichen persönlichen Berufsexpositionen aufgelistet (vereinfacht aus: (Bowman, 2014); Frequenzen bis 400 Hz). Stromwirtschaft. Generatoren/Kraftwerke:

1 µT; Unterwerke/Trafostationen: 1.8 µT (bei (Li et al., 2015), die Messungen in einer chinesischen Trafostation durchführten, betrug die Durchschnittsexposition 7 µT); Hochspannungsfreileitungen: 1.4 µT. Büros. Lehrberufe, Sekretariate, Büro allg.: 0.1–0.2 µT. Metallindustrie. Hüttenwesen: 1 µT; Schweissen: 0.8 µT; Giessen: 0.5 µT; Produktion. Nähen: 0.8 µT; Elektro-/Maschinenindustrie: 0.2 µT; Nahrung/Plastik: 0.1 µT. Transportwesen. Lokführer: 13 µT (Bergstrecken: 27 µT, Flachstrecken: 5 µT); Tram/Trolley/U-Bahn: 0.3 µT; Piloten: 1 µT; Taxi/Lastwagenfahrer: 0.1 µT.

Zwei neuere Studien beschäftigen sich mit Expositionen in verschiedenen Umgebungen. Bottauscio et al. (Bottauscio et al., 2020) untersuchten die Exposition der Arbeiter an Hochspannungsanlagen unter Spannung. Die Studie wird als Erweiterung einer früheren Studie von Dawson et al. (Dawson et al., 2002) mit verbesserten numerischen Phantomen gesehen. In keiner betrachteten Situation wurden Überschreitungen der Grenzwerte festgestellt. Die andere Studie (Choi et al., 2018) beschäftigt sich mit der Exposition von Arbeitern in der Halbleiterproduktion. Mit Messungen wurden verschiedene spezifisch Berufsgruppen unterschieden. Die durchschnittliche magnetische Flussdichte für die Mitarbeiter in der Produktion betrug 0.56 µT, diejenige für «chip-packaging workers» 0.59 µT und 0.89 µT für die Ingenieure, die in den Spezialabteilungen wie «testing» arbeiten. Die Unterschiede bezüglich der Art der Tätigkeit werden hervorgehoben sind aber nicht wirklich überraschend.

3.2.5 Alltagsexpositionen

3.2.5.1 Ansatz

Hier geht es um die persönliche Exposition, also um die Frage, welchen Feldern und welchen Feldstärken ein Mensch im Alltag während einer gewissen Zeit, etwa während eines (typischen) Tages oder einer (typischen) Woche, ausgesetzt ist. Messtechnisch stehen ausreichend genaue und vom Handling her ausreichend einfache Messgeräte (persönliche Exposimeter) zur Erfassung der relevanten Expositionen zur Verfügung (das neueste solcher Geräte: (Zahner et al., 2016).

Zur Messung der Exposition von im Alltag nahe am Körper genutzten Geräten (Elektrogeräte, Funkanwendungen, Mobiltelefone) gibt es allerdings noch keine wissenschaftlich erprobte Methodik. Nur bei Messungen im Labor unter genau definierten Bedingungen können die Expositionen bestimmt werden. Ein Haupthindernis für die Interpretation von Messdaten aus Messkampagnen mit persönlichen Exposimetern ist die Tatsache, dass der Messwert primär von der Distanz zwischen Messgerät und NIS-Quelle abhängt. Um die Stärke der NIS-Quelle zu bestimmen, wäre es notwendig, diese Distanz zu kennen. Gegenwärtig ist nicht absehbar, wie dieses Problem gelöst werden könnte. Eine Ausnahme sind Mobiltelefone, deren Sendeleistungen vom Telefon selber aufgezeichnet werden. Schätzungen zur Bedeutung von lokalen Expositionen gegenüber Geräten sind uneinheitlich (siehe 3.2.2.2).

Für statistisch zuverlässige Aussagen der Exposition gegenüber Installationen ist eine vergleichsweise grosse Stichprobe von einigen hundert Personen notwendig, wobei die Messungen mindestens einen Tag lang (24 Stunden) korrekt durchgeführt werden sollten. Bei einer kleineren Stichprobe sind längere Messperioden angezeigt. Zur Dateninterpretation ist es nötig, dass ein (einfaches) Tagebuch geführt wird, in welchem das expositionsrelevante Verhalten festgehalten ist.

3.2.5.2 Quellen

Erhoben werden können grundsätzlich alle Expositionen (sowohl im niederfrequenten als auch im hochfrequenten Bereich). Im praktischen Einsatz geht es aber primär um Expositionen gegenüber fixen Installationen (selten: nahe am Körper benutzte Geräte). Der Begriff (persönliche) Alltagsexposition umfasst also Feldeinflüsse in Privathaushalten, im Freien, in Verkehrsmitteln, in öffentlichen Gebäuden und Läden, und während der Arbeit am Arbeitsplatz. Die Liste der relevanten Quellen deckt sich mit den in Kapitel 3.2.2.1 diskutierten Installationen und Geräten.

3.2.5.3 Expositionen

Persönliche Expositionen an ausgewählten Orten: Gemäss (Bowman, 2014) betragen die durchschnittlichen persönlichen Expositionen in Haushalten in Europa um 0.04 µT, in Nordamerika werden sie als doppelt so hoch angegeben. Der Anteil der Haushaltsgeräte wird dabei auf etwa einen Drittel veranschlagt (Behrens et al., 2004). Andere Schätzungen gehen, wegen der lokal begrenzten Einwirkung von Geräten und dem modernisierten Gerätepark der letzten Jahre, von deutlich geringeren Anteilen aus (Roosli et al., 2014). Auf die Bedenken seitens SCENIHR wurde bereits hingewiesen (3.2.2.2).

Für Schulen und Büros gibt (Bowman, 2014) persönliche Durchschnittsexpositionen um 0.1 µT an. Aussenmessungen von (Roosli et al., 2015) in der Schweiz zeigen mittlere Magnetfeldexpositionen (40–800 Hz) von: 0.3 µT für Stadtzentren, um 0.2 µT in öffentlichen Verkehrsmitteln, und unterhalb 0.2 µT für Wohn- und Industriegebiete. Unterschiede sind v.a. hinsichtlich der Lage zu verzeichnen: In Stadtzentren und Grosszentren sind die Belastungen höher als in ländlichen Regionen und Einzelzentren. Tageszeit und Wochentage haben demgegenüber wenig Einfluss auf die durchschnittlichen Feldstärken in diesen Mikroumgebungen.

Exposimeterdaten zu durchschnittliche Alltagsexpositionen gegenüber niederfrequenten Feldern haben (Kheifets et al., 2006) in einer Literaturarbeit zusammengestellt. Dabei referenzieren sie Daten aus Belgien, Kanada, Deutschland, Korea und den USA. Die Anteile der Personen in der niedrigsten Expositionskategorie (≤ 0.1 µT; geometrisches Mittel) betrugen in diesen Ländern 92%, 64%, 74% (arithmetisches Mittel, AM), 64% (AM) und 73%. In der höchsten Expositionskategorie (> 0.4 µT): 1%, 5%, 4% (AM), 8% (AM) und 2%. Stratmann und Kollegen ermittelten in den 90er Jahren die typische Belastung der Schweizer Bevölkerung durch 50 Hz Magnetfelder (Stratmann et al., 1995). Insgesamt wurden 552 Personen mit Exposimetern ausgerüstet, welche während 24 Stunden die relevanten Felder massen. Die täglichen Mittelwerte lagen für 75% der Teilnehmer unterhalb von 0.2 µT. Die höchsten Werte wurden an Arbeitsplätzen gemessen. Bei Abwesenheit von nahe beim Messgerät positionierten netzbetriebenen Geräten konnte ein Einfluss von sich in der unmittelbaren Umgebung befindenden Freileitungen auf die Expositionshöhe festgestellt werden. (B. Struchen et al., 2015) führten im Rahmen des europäischen Projekts ARIMMORA (ARIMMORA, 2015) persönliche Expositionsmessungen bei 172 Kindern aus der Schweiz und Italien durch. Die mittlere persönliche Exposition betrug – ähnlich wie in der holländischen Studie von (Bolte et al., 2015) – um 0.04 µT (geometrisches Mittel; GM), der höchste 48-Stunden-Wert 0.26 µT (GM); 2% der Messwerte lagen über 0.4 µT. Dabei zeigte sich, dass der geometrische Mittelwert der Schlafzimmerimmissionen gut als Näherung der mittleren persönlichen Exposition genommen werden kann (Benjamin Struchen et al., 2015), (Liorni, Parazzini, Struchen, et al., 2016). (Lewis et al., 2015) und (Lewis et al., 2016b) kommen in ihrer Studie in North Caroline bzw. Massachusetts zu vergleichbaren Schlüssen: das geometrische Tagesmittel der persönlichen Exposition (gemessen über portable Exposimeter) repräsentiert gut den Wochendurchschnitt (nicht aber die Maximalbelastungen; für zuverlässige Aussagen zu diesen sind Messungen über mehrere Tage notwendig). Die durchschnittliche Exposition in diesen Studien, die mit schwangeren Frauen bzw. mit Männern, die eine Fertilitätsklinik aufsuchten, durchgeführt wurden, betrug um 0.1 µT (zu beachten ist, dass in den USA tiefere Netzspannungen verwendet werden, was zu einer Erhöhung der Magnetfelder führt). In einer französischen Studie (Magne et al., 2011) mit 977 Kindern und 1052 Erwachsenen, die alle mit persönlichen Messgeräten (24 Stunden) ausgestattet waren wurden mittlere Expositionen von 0.09 µT (arithmetisches Mittel, AM) bzw. 0.02 µT (GM) für Kinder und 0.14 µT (AM) bzw. 0.03 µT (GM) gemessen. Knapp 1% der Kinder waren Magnetfeldern > 0.4 µT ausgesetzt (Magne et al., 2016). Einen Ansatz, der verschiedene Mess- und Simulationsmethoden integriert, haben (Gallastegi et al., 2016) vorgeschlagen, um die Exposition von Kindern und Jugendlichen zu erfassen. Resultate aus dieser Studie wurden noch nicht publiziert.

Die aktuellen Resultate aus dem schweizerischen Monitoring für die Alltagsexposition sind eingangs

schon erwähnt worden. Weitere Details können dem Jahresbericht (SwissNIS, 2022) entnommen werden.

3.3 Forschungsbedarf

Grosser Forschungsbedarf besteht nach wie vor zu Expositionen gegenüber neuen Anwendungen (siehe Kapitel 2.3). Potentiell besonders kritisch können Anwendungen zur drahtlosen Energieübertragung sein (2.3.4). Dabei soll nicht nur überprüft werden, ob neue Anwendungen die Grenzwerte einhalten, sondern wie gross die Expositionen für die Allgemeinbevölkerung bei typischer Nutzung sind. Solche Informationen sind wichtig für die Risikoabschätzung und Risikokommunikation. Es gibt dazu nun einige neue Studien, die eine Einschätzung des Risikos besser zulassen und eine Einordnung erlauben (siehe Referenzen im Kapitel 2.3.4). Ebenfalls relevant sind Anlagen bzw. Geräte für die Spannunsumwandlung (Transformer, Wechselrichter), welche potentiell lokal hohe Magnetfelder erzeugen können.

Weiterhin gibt es Wissenslücken zur Exposition gegenüber komplexen Frequenzspektren mit harmonischen Oberwellen bis in den Kilohertzbereich. Dabei gibt es einerseits Fragen der Messtechnik zu klären aber auch Fragen zur Summierung der verschiedenen Frequenzen für die Risikobewertung.

Immer noch gibt es wenige NF-EMF Messungen im beruflichen Umfeld. Hier gibt es für Berufsfelder mit einem starken technologischen Wandel in den letzten Jahren einen Nachholbedarf.

In Bezug auf die Alltagsexposition gibt es offene Fragen zur Relevanz von elektrischen Kleingeräten im Vergleich zur Exposition durch Grossanlagen (Hochspannungsleitungen, Transformer). Es ist auch unklar, wie die beiden Expositionssituationen adäquat verglichen werden können (integrale Expositionsabschätzung), da sowohl das zeitliche Muster wie auch die Verteilung der Felder im Körper typischerweise unterschiedlich ist. Dazu sind weitere dosimetrische Arbeiten nötig. Als Beispiel wurden in diesem Bericht auch Autos genannt, da in diesen verschiedenste fixe wie auch mobile Komponenten zu Immissionen unterschiedlicher Frequenzen mit unterschiedlichen zeitlichen Verläufen führen können.

Neue Messungen zeigen, dass insbesondere im urbanen Gebiet, aufgrund der unterirdischen Verkabelung, niederfrequente Magnetfelder in den Strassen recht hoch sein können. Auch die Auswirkungen von Erdverkabelung von Höchstspannungsleitungen auf die Expositionssituation der Bevölkerung wurden bisher nicht systematisch erforscht. Einerseits nimmt bei einer solchen Verkabelung das Magnetfeld mit zunehmender Distanz rascher ab als bei Freileitungen. Andererseits treten deutlich höhere Maximalpegel auf, weil man sich in aller Regel, wenn man auf dem Boden steht, näher bei den stromführenden Kabeln befindet.

Die umfassende Expositionsabschätzung für die Schweizer Bevölkerung ist nun auf den Weg gebracht worden. Erste Resultate sind im Jahresbericht zum schweizerischen Monitoring enthalten (SwissNIS, 2022).

Generell müssen Expositionsabschätzungen für zukünftig neuartige Infrastrukturen, die im Zusammenhang mit der Energiewende sehen (erneuerbare Erzeugung, neue Speichertechnologien, etc.) im Auge behalten werden. Bei Batterieströmen handelt es sich im Prinzip häufig um Gleichströme, welche gesundheitlich unproblematische statistische Magnetfelder verursachen. Ist der Stromfluss jedoch stark fluktuierend, entstehen zeitlich variierende Magnetfelder, welche im Körper Induktionsströme verursachen können. Zumindest für Transportleitungen für Hochspannungs-Gleichstrom sowie kombinierte Transportleitungen für Gleichstrom und Wechselstrom sind in Deutschland Untersuchungen in Angriff genommen worden.

4. NF-EMF und Gesundheit

4.1 Vorbemerkung

Die nachfolgenden Ausführungen konzentrieren sich auf Studien zu gesundheitlichen Effekten niederfrequenter elektromagnetischer Felder (NF-EMF) des Netzstroms (50/60 Hz). Einzelne Arbeiten handeln auch vom Eisenbahnstrom (16.7 Hz) und Zwischenfrequenzen (IF-EMF). Generell kann gesagt werden, dass seit ca. 30 Jahren die Anzahl Studien im Bereich EMF und Gesundheit deutlich zunimmt. Ausgelöst wurde das gestiegene Interesse vor allem durch mögliche Effekte von Hochfrequenzstrahlung (HF-EMF), insbesondere im Zusammenhang mit der rasant wachsenden Anwendung von Mobilkommunikationstechnologien. In vielen Ländern wurden entsprechende Forschungsprogramme lanciert. In der Schweiz hat der Nationalfonds mit dem NFP 57 ein vergleichsweise kleines Programm finanziert, das ebenfalls hauptsächlich hochfrequente Strahlung untersuchte. Im Jahr 2022 hat das BAFU einen Projektaufruf für Forschungsprojekte zu nicht-ionisierender Strahlung gemacht[9]. Der Aufruf hat einen Schwerpunkt auf Studien zu HF-EMF, hat aber Projektförderung zu NF-EMF nicht explizit ausgeschlossen.

Das ist wesentlich politisch-gesellschaftlich bestimmt. Mit Fukushima und der Energiewende sind die Strominfrastrukturen wieder ins Bewusstsein breiter Bevölkerungsteile gerückt. Inzwischen ist den meisten klar, dass für die Energiestrategie 2050 neue Strominfrastrukturen nötig sind. Ohne Anpassungen/Sanierungen bestehender Hochspannungsleitungen bzw. den Bau neuer Trassen werden die Ziele der Strategie nicht zu realisieren sein (Swissgrid, 2015). Der Neubedarf wird dabei auf lokale und regionale Opposition stossen. Diese gilt es demokratisch zu bewältigen. Eine wichtige Rolle in dieser Auseinandersetzung spielen dabei – wie in der Vergangenheit – gesundheitliche Effekte bedingt durch die Exposition. Ohne Forschung, d.h. den Tatbeweis, dass sich Politik und Industrie aktiv um gesundheitliche Risiken kümmern, dürfte sich die Akzeptanz gegenüber grossen Investitionsprojekten nicht verbessern lassen. Zudem haben die jüngeren Forschungsresultate vermehrt Hinweise auf solche Risiken erbracht und es scheint dringend und wichtig, die wissenschaftliche Aussagekraft dieser Hinweise zu verbessern und Befunde wenn möglich robust zu verifizieren oder zu falsifizieren. So hat beispielsweise das deutsche Bundesamt für Strahlenschutz (BfS) ein Forschungsprogramm zum Stromnetzausbau lanciert[10].

Im Hinblick auf die kommenden Abschnitte sei der folgende, wichtige inhaltliche Punkt erwähnt: Falls Alltagsexpositionen gegenüber niederfrequenten elektromagnetischen Feldern gesundheitliche Risiken verursachen, gehen sie von den Magnetfeldern (MF) und nicht von den elektrischen Feldern (EF) aus. Die üblichen Feldstärken von NF-EF, denen man im Alltag ausgesetzt ist, dürften biologische Prozesse kaum beeinflussen, denn sie bewirken im Körperinnern elektrische Kräfte, die Grössenordnungen unterhalb der natürlichen, biologisch verursachten Kräfte liegen (demgegenüber induzieren NF-MF deutlich stärkere körperinterne elektrische Feldstärken). Aus diesem Grund gibt es nur wenige gesundheitliche Studien über niederfrequente elektrische Felder. Kheifets, Renew, et al. (2010) fassten in einem Review-Artikel (mit Bezug zu Krebs) die Sachlage und den Wissensstand folgendermassen zusammen (p. 89):

„The existing epidemiology on residential electric-field exposures and appliance use does not support

[9] https://www.bafu.admin.ch/bafu/de/home/themen/elektrosmog/fachinformationen/forschung.html
[10] https://www.bfs.de/DE/bfs/wissenschaft-forschung/bfs-forschungsprogramm/stromnetzausbau/netzausbau_node.html

the conclusion of adverse health effects from electric-field exposure (…) Overall, there seems little basis to suppose there might be a risk for electric fields, and, in contrast to magnetic fields, and with a possible exception of occupational epidemiology, there seems little basis for continued research into electric fields".

Verstärkt wird dieses geringe Forschungsinteresse an NF-EF auch durch die Tatsache, dass es sehr schwierig ist, die Exposition gegenüber elektrischen Feldern zuverlässig zu messen oder zu modellieren, weil leitende Gegenstände (wozu auch der Mensch selber zählt) diese Felder stark beeinflussen.

In den nachfolgenden Kapiteln werden die wichtigsten Studien, inklusive Review-Berichte von internationalen und nationalen Expertenpanels, zu gesundheitlichen Wirkungen von NF-EMF dargestellt. Dabei wird hauptsächlich auf epidemiologische Arbeiten und Humanstudien verwiesen, da diese die höchste Aussagekraft bezüglich Gesundheit haben. Zudem werden auch einige aktuelle Tier- oder Zellstudien beschrieben. Dabei gilt zu beachten, dass diese in erster Linie dazu dienen, die Befunde aus epidemiologischen Arbeiten und experimentellen Humanstudien zu untermauern beziehungsweise mögliche biologische Wirkungsmechanismen zu untersuchen. Tier- ebenso wie Zellstudien arbeiten häufig mit starken Feldern, die viele Grössenordnungen oberhalb der durchschnittlichen Alltagsexposition des Menschen liegen. Dadurch lassen sich aber auch Dosis-Wirkungs-Beziehungen untersuchen, was ein wichtiges Konzept von toxikologischen Studien darstellt. Direkte Schlussfolgerungen für die Gesundheit des Menschen sind aber aus solchen Versuchen ohne entsprechende Hinweise in Humanstudien schwierig zu machen. Einerseits ist Vorsicht geboten, wenn man aus Tiermodellen auf den Menschen schliessen will, bedingt durch unterschiedliche Physiologie und Anatomie. Andererseits können Befunde, die unter hohen Expositionen erzielt wurden, nicht einfach auf Alltagsexpositionen verallgemeinert werden. Noch heikler sind entsprechende Schlussfolgerungen zu Gesundheitsauswirkungen aus Zellstudien. Letztere dienen hauptsächlich dazu, mögliche Wirkmechanismen und zugrundeliegende biologische Effekte auf molekularer und zellbiologischer Ebene zu finden und zu studieren. Bedingt durch das Fehlen eines Wirkungsmechanismus der EMF ist es gerade bei Zellstudien deshalb schwierig, die Befunde und Beobachtungen, selbst wenn sie stark ausgeprägt und reproduzierbar sind, in Bezug auf Relevanz und Auswirkung auf die Gesundheit einzuordnen. Zudem lassen sich viele der untersuchten Funktionen und molekularen Mechanismen nicht direkt einem Krankheitsbild zuordnen, da sie in verschiedenen pathologischen Situationen verändert sind. Deshalb haben wir in diesem Bericht auf eine umfangreiche Beschreibung solcher Befunde im Rahmen der ausgewählten Themen zu Krankheitsbildern (Kapitel 4.3) verzichtet.

Eine abschliessende Beurteilung der Einflüsse von NF-EMF auf die menschliche Gesundheit lässt sich also erst machen, wenn ausreichend Daten von epidemiologischen und experimentellen Humanstudien vorhanden sind, deren Befunde im Idealfall durch Tierstudien unterstützt sind, und dessen Wirkungsweise in Zellstudien belegt wurden. Diesbezüglich ist eine Diskrepanz in der Datenlage feststellbar: Einigen wenigen epidemiologischen und experimentellen Humanstudien stehen jeweils zahlreiche Tier- und Zellstudien mit einer Vielzahl von biologischen Endpunkten gegenüber. Erschwerend kommt dazu, dass die Aussagekraft vieler dieser experimentellen Studien durch konzeptionelle, technische und dosimetrische Unsicherheiten herabgesetzt wird. So wurde beispielsweise für experimentelle Studien im Bereich HF-EMF-Exposition eine negative Korrelation zwischen dem Berichten von Effekten und der Studienqualität (gemessen an den Bemühungen mögliche Fehlerquellen, «risk of bias», auszuschliessen) beobachtet (Simko et al., 2016; Vijayalaxmi & Prihoda, 2019). Dementsprechend werden rigorose Anwendung von Qualitätskriterien bei der Risikobewertung von EMFs und systematischen Übersichtsarbeiten gefordert. Dies betrifft im Besonderen experimentelle Studien mit HF-EMF der neuen Generation der Mobilkommunikation (Mattsson et al., 2021; Vijayalaxmi & Foster, 2021), die mit erhöhten technischen und dosimetrischen Herausforderungen bezüglich Exposition verbunden ist, gilt aber in den Grundzügen auch für Studien zu NF-EMF. Publikation mit Unsicherheiten bezüglich Exposition oder Methodik werden in den Review-Berichten von Expertengremien (Kapitel

4.2) ausgeschlossen oder zumindest weniger stark gewichtet, anders als in vielen narrativen Übersichtsarbeiten und den Originalstudien. Dies wird auch so gehandhabt in den wiederkehrenden Berichten von Expertenpanelen zum aktuellen Forschungsstand im Auftrag der Strahlenschutzbehörden der Schweiz (BAFU, Kapitel 0) und Schweden (SSM, Kapitel 4.2.8.2). Die Auswahl der hier vorgestellten Studien orientiert sich ebenso an diesen Qualitätskriterien.

Die in Kapitel 4.2 referierten Review-Berichte liefern die Einschätzungen von Expertenpanels zum Zeitpunkt der Veröffentlichung (sie sind heute in Teilen nicht mehr aktuell). Die Berichte richten sich in aller Regel an Interessierte und Entscheidungsträger in Behörden, Industrie und Zivilgesellschaft (Verbände, NGOs, Medienschaffende). Sie betonen deshalb weniger die wissenschaftlichen Unsicherheiten, Unklarheiten und offenen Fragen. Aus diesem Grund soll das Kapitel primär die generelle Gesamtsicht, wie sie von den zitierten Expertengremien gesehen wird, darstellen. Die für die konkrete Detailsicht relevanten und aktuellen Einzelstudien zu den wichtigsten Gesundheitsthemen finden sich demgegenüber im umfangreicheren Kapitel 4.3 Auf dieses beziehen sich auch die Bewertungen zum Forschungsbedarf (Kapitel 0).

Narrative Review-Studien von Einzelpersonen oder kleineren Forschungsgruppen werden nicht explizit behandelt und höchstens als Referenzsammlung zu spezifischen Themen erwähnt.

4.2 Wichtige Review-Berichte

4.2.1 WHO

Die Weltgesundheitsorganisation WHO stellt im Rahmen des internationalen EMF-Projekts den Wissenstand zu möglichen Gesundheitsrisiken von elektromagnetischen Feldern zusammen und bewertet ihn. Auf “Fact Sheets” publiziert sie Einschätzungen zu einzelnen Themen und in der Buchreihe “Environmental Health Criteria” (EHC) ist die umfassende Analyse der wissenschaftlichen Literatur nachzulesen. Bislang sind vier Monographien zu EMF erschienen. Die jüngsten zwei sind der 2006 erschienene Band #232 zu statischen Feldern (WHO, 2006) und der 2007 erschienene Band #238 zu NF-EMF (WHO, 2007). HF-EMF wurde 1993 (Band #137) bewertet (WHO, 1993). Aufgrund neuer technischer Entwicklungen, insbesondere des Mobilfunks, und aufgrund der grossen Anzahl von neuen Studien auf diesem Gebiet, wurde eine wissenschaftliche Neubeurteilung möglicher Gesundheitsrisiken durch Hochfrequenzstrahlung als dringend und notwendig erachtet. Die WHO hat deshalb 10 systematische Reviews von internationalen Forschungsgruppen zu verschiedenen gesundheitlichen Auswirkungen in Auftrag gegeben. Die Studienprotokolle sind in einer Spezialausgabe der Zeitschrift Environment International publiziert worden[11]. Die Publikation der Reviews wird 2023 erwartet.

Im Folgenden wird die WHO-Einschätzung zu gesundheitlichen Wirkungen von NF-EMF, wie sie im Monograph #238 zu finden ist, zitiert. Auf der WHO-Website findet sich eine darauf aufbauende Zusammenfassung[12]. Die nachfolgenden Passagen stammen aus der wissenschaftlichen Serie der Environmental Health Criteria (WHO, 2007), p. 5ff:

„High field strength, rapidly pulsed magnetic fields can stimulate peripheral or central nerve tissue (…) The function of the retina, which is a part of the CNS, can be affected by exposure to much weaker ELF magnetic fields than those that cause direct nerve stimulation (…) The evidence for other neurobehavioural effects in volunteer studies, such as the effects on brain electrical activity, cognition, sleep, hypersensitivity and mood, is less clear (...) Studies investigating whether magnetic fields affect

[11] https://www.sciencedirect.com/journal/environment-international/special-issue/109J1SL7CXT
[12] http://www.who.int/peh-emf/about/WhatisEMF/en/index1.html

sleep quality have reported inconsistent results (…)

Some people claim to be hypersensitive to EMFs in general. However, the evidence from double-blind provocation studies suggests that the reported symptoms are unrelated to EMF exposure (…) There is only inconsistent and inconclusive evidence that exposure to ELF electric and magnetic fields causes depressive symptoms or suicide (…)

The results of volunteer studies as well as residential and occupational epidemiological studies suggest that the neuroendocrine system is not adversely affected by exposure to power-frequency electric or magnetic fields. This applies particularly to the circulating levels of specific hormones of the neuroendocrine system, including melatonin, released by the pineal gland, and to a number of hormones involved in the control of body metabolism and physiology, released by the pituitary gland (...)

It has been hypothesized that exposure to ELF fields is associated with several neurodegenerative diseases. For Parkinson disease and multiple sclerosis the number of studies has been small and there is no evidence for an association with these diseases. For Alzheimer disease and amyotrophic lateral sclerosis (ALS) more studies have been published. Some of these reports suggest that people employed in electrical occupations might have an increased risk of ALS (…)

Evidence for the effects of ELF electric or magnetic fields on components of the immune system is generally inconsistent. Many of the cell populations and functional markers were unaffected by exposure. However, in some human studies with fields from 10 µT to 2 mT, changes were observed in natural killer cells, which showed both increased and decreased cell numbers, and in total white blood cell counts, which showed no change or decreased numbers (…)

On the whole, epidemiological studies have not shown an association between adverse human reproductive outcomes and maternal or paternal exposure to ELF fields. There is some evidence for an increased risk of miscarriage associated with maternal magnetic field exposure, but this evidence is inadequate (...)

The IARC classification of ELF magnetic fields as "possibly carcinogenic to humans" (IARC, 2002) [siehe den nachfolgenden Abschnitt]*) is based upon all of the available data prior to and including 2001. The review of literature in this EHC monograph focuses mainly on studies published after the IARC review. The IARC classification was heavily influenced by the associations observed in epidemiological studies on childhood leukaemia. The classification of this evidence as limited does not change with the addition of two childhood leukaemia studies published after 2002 (…) Thus, on balance, the evidence is not strong enough to be considered causal, but sufficiently strong to remain a concern".*

4.2.2 IARC

Die zur WHO gehörende Internationale Krebsforschungsagentur untersucht Stoffe und Prozesse auf ihre kanzerogene Wirkung hin. Auch elektromagnetische Felder hat die IARC durch eine von ihr einberufene internationale Expertengruppe bewerten lassen. 2002 erschien die Monographie #80, welche kanzerogene Wirkungen von statischen und niederfrequenten elektrischen und magnetischen Feldern zum Thema hatte. Niederfrequente Felder werden im Monograph als ELF-Felder bezeichnet (ELF = Extremely Low Frequency). Das Frequenzfenster wurde definiert als zwischen 3 Hz und 3 kHz liegend. Die Schlussfolgerungen der (IARC, 2002), p. 338:

„Extremely low-frequency magnetic fields are possibly carcinogenic to humans (Group 2B). Static electric and magnetic fields and extremely low-frequency electric fields are not classifiable as to their carcinogenicity to humans (Group 3)".

Zum adäquaten Verständnis dieser Bewertungen muss man zunächst die Klassifizierungsmethodik der IARC berücksichtigen:

Gruppe 1: Der Stoff ist nachgewiesenermassen krebserregend. Beispiele: Tabak, Cadmium, Asbest, ionisierende Strahlung, Radon, alkoholische Getränke (Total 122 Stoffe, Stand 2022).

Gruppe 2a: Der Stoff ist wahrscheinlich krebserregend. Eine kanzerogene Wirkung ist im Tierversuch nachgewiesen worden und begrenzte Hinweise auf erhöhte Tumorhäufigkeiten sind in epidemiologischen Studien vorhanden. Beispiele: Acrylamid, Feinstaub von Cheminées, UV-Strahlung, Dieselabgase, Solarien (Total 93 Stoffe, Stand 2022).

Gruppe 2b: Der Stoff ist möglicherweise krebserregend. Epidemiologische Studien liefern begrenzte, Tierversuche nicht genügend Hinweise auf kanzerogene Wirkungen; oder auch: Epidemiologische Studien liefern zwar nicht genügend Hinweise, Tierversuche jedoch belegen kanzerogene Wirkungen. Beispiele: DDT, eingelegtes Gemüse, hochfrequente EMF, Autoabgase (Total 319 Stoffe, Stand 2022).

Gruppe 3: Der Stoff ist in seiner Wirkung noch nicht klassifizierbar, weil die Datenbasis zu klein oder die Datenqualität der Studien ungenügend ist. Beispiele: Tee, Kaffee, Silikonimplantate, Glaswolle (Total 501 Stoffe, Stand 2022).

Gruppe 4: Der Stoff ist wahrscheinlich nicht krebserregend.

Die Bewertung von NF-EMF durch die IARC basiert auf folgenden Detail-Beurteilungen (p. 338):

“There is limited evidence in humans for the carcinogenicity of extremely low-frequency magnetic fields in relation to childhood leukaemia.

There is inadequate evidence in humans for the carcinogenicity of extremely low-frequency magnetic fields in relation to all other cancers.

There is inadequate evidence in humans for the carcinogenicity of static electric or magnetic fields and extremely low-frequency electric fields.

There is inadequate evidence in experimental animals for the carcinogenicity of extremely low-frequency magnetic fields.

No data relevant to the carcinogenicity of static electric or magnetic fields and extremely low-frequency electric fields in experimental animals were available,“

Die von der IARC berücksichtigten epidemiologischen Primärstudien und Metaanalysen zeigten ein erhöhtes Leukämierisiko bei Kindern, die langzeitig gegenüber 50/60 Hz Magnetfeldern von Hochspannungsleitungen exponiert waren (Flussdichte > 0.3 bzw. 0.4 µT). Die berechnete Risikoerhöhung lag im Bereich von Faktor 1.5 bis 2. Zur Gesamteinschätzung von „möglicherweise kanzerogen“ geführt haben aber auch die Tatsachen, dass hinsichtlich aller anderen Krebsarten (bei Kindern wie bei Erwachsenen) keine verwertbaren Hinweise auf eine krebsfördernde Wirkung von ELF-Magnetfeldern vorlagen (inadequate evidence) und dass aus Tiermodellen keine relevanten Daten zu kanzerogenen Wirkungen von NF-EMF vorlagen.

Die IARC hat im Jahr 2011ebenfalls HF-EMF der Gruppe 2b zugeordnet. Die Advisory Group für die IARC-Monografien empfahl 2019, dass HF-EMF in der zweiten Hälfte des Zeitraums 2020-2024 mit hoher Priorität neu beurteilt werden sollten. Bislang wurden dazu noch keine Informationen veröffentlicht. Über eine allfällige Neubeurteilung auch von NF-EMF liegen keine Informationen vor.

4.2.3 SCENIHR

Die Europäische Kommission beruft regelmässig unabhängige Komitees ein zur Beurteilung von Risiken, welche im Zusammenhang mit neuen Technologien oder Produkten entstehen könnten. Das Komitee SCENIHR (Scientific Committee on Emerging and Newly Identified Health Risks) befasst sich mit Gesundheitsrisiken. Es hat ein laufendes Mandat der Europäischen Kommission zur Beurteilung

möglicher Gesundheitsrisiken durch Exposition gegenüber elektromagnetischen Feldern. Zwei Beurteilungen (Opinions) sind 2007 und 2009 publiziert worden, der dritte Bericht liegt inzwischen ebenfalls vor (SCENIHR, 2015). Das Komitee zieht hinsichtlich NF-EMF folgende Schlussfolgerungen (p. 226f):

"Studies investigating possible effects of ELF MF exposure on the power spectra of the waking EEG of volunteers are too heterogeneous with regard to applied fields, duration of exposure, number of considered leads, and statistical methods to draw any sound conclusion. The same applies for the results concerning behavioural outcomes and cortical excitability.

Only a few new epidemiological studies on neurodegenerative diseases have been published since the previous Opinion. They do not provide support for the previous conclusion that ELF magnetic field exposure could increase the risk for Alzheimer's disease or any other neurodegenerative diseases or dementia. Animal studies that have suggested beneficial effects of strong magnetic fields require confirmation.

The evidence with respect to self-reported symptoms is discordant. While most studies have not found an effect of exposure, two experimental studies have identified individual participants who may reliably react to magnetic fields. However, replication of these findings is essential before weight is given to these results.

The new epidemiological studies are consistent with earlier findings of an increased risk of childhood leukaemia with estimated daily average exposures above 0.3 to 0.4 µT. As stated in the previous Opinions, no mechanisms have been identified and no support from experimental studies could explain these findings, which, together with shortcomings of the epidemiological studies prevent a causal interpretation".

In Bezug auf kanzerogene Effekte im Tierversuch kommt SCENIHR zum Schluss, dass die neuen Studien keine Hinweise geben, dass die Exposition gegenüber Magnetfeldern ausreicht, um Tumore zu initiieren oder deren Wachstum zu beschleunigen. Allerdings wird auf die Bedeutung von Studien mit neuen, inzwischen verfügbaren Tiermodellen (akute lymphoblastische Leukämie) verwiesen, und insbesondere wird der Bedarf an in-vitro Zellstudien herausgestrichen (p.164):

"However, some studies provide interesting findings that justify additional research efforts. Thus, there are indications that DNA damage occurs in cultured human cells during certain exposure conditions. (…) MF exposure has been shown to stimulate proliferation. The effect can possibly be related to effects on signal transduction and gene expression. An intriguing observation is that certain studies report exposure effects due to intermittent, but not due to continuous exposure. The area has not received much attention, but can be an opener of studies into mechanisms".

Besonders interessant sind hier Studien zu freien Radikalen (etwa: reaktive Sauerstoffspezien, sog. ROS), die durch Magnetfeldexposition vermehrt gebildet werden (Mattsson & Simko, 2014) und von grosser physiologischer Bedeutung sind.

Die Studie wurde auch, wie das bei gewichtigen Arbeiten der Fall ist, kritisiert, insbesondere von Vertretern der BioInitiative (siehe 4.2.6) (Sage et al., 2015). Die Antwort darauf seitens SCENIHR ist bei Leitgeb zu finden (Leitgeb, 2015a).

An dieser Stelle sei auf den Forschungsbedarf im NF-Bereich hingewiesen, wie ihn SCENIHR im Bericht auflistet: Als Themen mit hoher Priorität nennen die Experten:

- Studien mit neuen (oben erwähnt) Tiermodellen
- Epidemiologische Studien zu Alzheimer-Erkrankungen
- Laborstudien zu Alzheimer-Erkrankungen
- Replikationsstudien mit Personen, die sehr empfindlich auf NF-Felder reagieren

Mit mittlerer Priorität werden folgende zwei Forschungsbereiche belegt:

- Studien zur Sensitivität verschiedener Zelltypen
- Replikationen zum möglichen Zusammenhang zwischen NF-EMF und Asthma (und Fettleibigkeit)

4.2.4 ICNIRP

Die Internationale Kommission zum Schutz vor nicht-ionisierender Strahlung (ICNIRP – International Commision on Non-Ionising Radiation Protection) ist ein gemeinnütziger, in Deutschland domizilierter Verein von Fachexperten, der Empfehlungen zum Schutz vor nicht-ionisierender Strahlung formuliert. Die Empfehlungen der Organisation gründen ausschließlich auf etablierten wissenschaftlichen Prinzipien. Die ICNIRP ist von WHO, ILO, EU und weiteren internationalen und nationalen Organisationen als eine massgebliche Institution zur Festlegung / Empfehlung von NIS-Grenzwerten anerkannt.

2010 veröffentlichte die ICNIRP neue Richtlinien für NF-EMF (ICNIRP, 2010), siehe auch Kapitel 6.2 Als Basis für die Grenzwertfestsetzung dienten wissenschaftlich belegte biologische Wirkungen (p. 821):

„Thus, the perception of surface electric charge, the direct stimulation of nerve and muscle tissue and the induction of retinal phosphenes are well established and can serve as a basis for guidance".

Die Grenzwertempfehlungen wurden so festgelegt, dass die von niederfrequenten elektromagnetischen Feldern verursachten oben erwähnten Wirkungen keine Grössenordnung erreichen können, die ein gesundheitliches Risiko darstellen würde. In der Richtlinien-Publikation wurde aber auch der Stand der Forschung zu gesundheitlichen Wirkungen schwacher Strahlung (unterhalb, meist sogar massiv unterhalb der empfohlenen Grenzwerte) berücksichtigt. Zwei ausgewählte Bewertungen der ICNIRP hierzu (p. 821f):

„In addition, there is also indirect scientific evidence that brain functions such as visual processing and motor co-ordination can be transiently affected by induced electric fields. However, the evidence from other neurobehavioral research in volunteers exposed to low frequency electric and magnetic fields is not sufficiently reliable to provide a basis for human exposure limits (…)

The studies investigating the association between low frequency exposure and Alzheimer's disease are inconsistent. Overall, the evidence for the association between low frequency exposure and Alzheimer's disease and ALS is inconclusive".

Aus Sicht der ICNIRP sind die Hinweise zu einem Zusammenhang zwischen kindlicher Leukämie und chronischer niederfrequenter Magnetfeldexposition zu schwach, um Kausalität zu postulieren. Das gilt nach Meinung der ICNIRP noch deutlicher für Krebsrisiken von Erwachsenen. Zur Festsetzung der Grenzwerte wurden diese Hinweise deshalb nicht berücksichtigt.

Auf Ihrer Website kommt die ICNIRP zum generellen Schluss[13]*:*

„Overall research has not shown to date that long-term low-level LF exposure has detrimental effects on health".

4.2.5 IEEE / ICES

Die ICES (International Committee on Electromagnetic Safety) ist eine Unterorganisation von IEEE (Institute of Electrical and Electronics Engineers). Sie ist hinsichtlich Grenzwertempfehlungen das amerikanische Pendant zur stärker in Europa verwurzelten ICNIRP. Allerdings haben beide Organisationen globale Bedeutung und sind bestrebt, ihre Empfehlungen zu harmonisieren. In manchen Details

[13] http://www.icnirp.org/en/frequencies/low-frequency/index.html

sind die Spezifikationen unterschiedlich, die Empfehlungen für maximale Expositionen (Grenzwerte) sind häufig gleich bzw. ähnlich. Was die Einschätzung der gesundheitlichen Wirkungen schwacher Strahlung betrifft, unterscheiden sich ICNIRP und ICES kaum, so dass an dieser Stelle auf eine Darstellung der Meinung von ICES verzichtet werden kann; dies nicht zuletzt auch deshalb, weil der letzte systematische Literatur-Review durch ICES 2003 publiziert wurde (Bioelectromagnetics, 2003). Das aktuellste Update der Grenzwertempfehlungen von ICES ist von 2019 (IEEE, 2019). Für diese Beurteilung hat ICES neuere Literatur und Reviews berücksichtigt. ICES kommt bezüglich negativen gesundheitlichen Effekten von EMF zu keinen fundamental neuen Schlüssen und hält fest:

"Research on the biological effects of electromagnetic interactions with tissues has not changed the scientific basis of the adverse effect levels (i.e., electrostimulation for low frequencies and heating for high frequencies)."

4.2.6 BioInitiative

Es handelt sich um eine Gruppe von Wissenschaftlern, welche der „Mainstream"-Meinung, wie sie insbesondere durch ICNIRP oder ICES vertreten wird, kritisch gegenüberstehen, und die in der jüngeren Forschung erzielten Ergebnisse als hinreichend erachten, um eine gesundheitliche Gefährdung durch EMF auch unterhalb der geltenden Grenzwerte zu proklamieren. Die Gruppe plädiert folglich für eine Revision (deutliche Senkung) der heute üblichen Grenzwerte (siehe dazu auch: Belyaev et al. (2016)). Viele Wissenschaftler dieser Gruppierung haben unter dem Namen "EMF Scientist 2015" einen entsprechenden politischen Appell an UNO und WHO lanciert[14]. Der Appell wurde 2019 erneut an das United Nations Environment Programme (UNEP) gerichtet mit der spezifischen Forderung, die möglichen biologischen Auswirkungen von 4G und 5G Mobilkommunikation auf Menschen, Tiere und Pflanzen neu zu beurteilen. Ein erster Report mit der wissenschaftlichen Evidenz für ihre Einschätzung erschien 2007, ein Update 2012[15]. Beide Berichte sind innerhalb der wissenschaftlichen Gemeinschaft heftig diskutiert und kommentiert worden. Zu einzelnen Themen wurden 2022 Updates veröffentlicht[16].

Im Folgenden wird die Lagebeurteilung gemäss „Zusammenfassung für die Öffentlichkeit" (Sektion 1; Supplement 2014, ohne Seitenzahlen), die von der Ko-Editorin des Berichts geschrieben wurde, dargestellt. Diese Beurteilung deckt sich nicht immer mit den differenzierten Darstellungen der einzelnen Kapitel. Letztere lagen in der Verantwortung der federführenden Autoren. Insofern handelt sich beim BioInitiative Report nicht um ein explizit verabschiedetes Konsensus-Dokument der BioInitiative Gruppe, wie das beispielsweise beim SCENIHR-Report der Fall ist. Eine zentrale Aussage des Reports ist:

„There is reinforced scientific evidence of risk from chronic exposure to low-intensity electromagnetic fields and to wireless technologies (radiofrequency radiation including microwave radiation). The levels at which effects are reported to occur is lower by hundreds of times in comparison to 2007".

Hinsichtlich NF-EMF fasst der Report die Befunde folgendermassen zusammen:

„Fifty nine (59) new ELF-EMF papers and two static magnetic field papers that report on genotoxic effects of ELF-EMF published between 2007 and early 2014 are profiled. Of these, 49 (83%) show effects and 10 (17%) show no effect (…)

[14] www.emfscientist.org
[15] https://bioinitiative.org
[16] https://bioinitiative.org/research-summaries/).

One hundred five (105) new ELF-EMF papers (including two static field papers) that report on neurological effects of ELF-EMF published between 2007 and early 2014 are profiled. Of these, 95 (90%) show effects and 10 (10%) show no effect (…)

Sufficient evidence exists from epidemiological studies of an increased risk from exposure to EMF (power frequency ELF-EMF magnetic fields) and cannot be attributed to chance, bias or confounding. Therefore, according to the rules of IARC such exposures can be classified as a Group 1 carcinogen (Known Carcinogen) (…)

There is sufficient evidence to conclude that long-term relatively high ELF MF exposure can result in a decrease in melatonin production, which may increase risk for breast cancer (…)

There is strong epidemiologic evidence that exposure to ELF MF is a risk factor for AD [Alzheimer]. (…) There is considerable in vitro and animal evidence that melatonin protects against AD. Therefore it is certainly possible that low levels of melatonin production are associated with an increase in the risk of AD".

Im Update von 2022 werden aktualisierte Zahlen für genotoxische Effekte angegeben (von total 311 Studien berichten 91% Effekte), ebenso für neurologische Effekte (von total 307 Studien berichten 84% Effekte).

In den späteren Kapiteln des vorliegenden Fachliteraturmonitorings wird auf Differenzen zwischen Bewertungen des BioInitiative Reports und weniger alarmistischen Einschätzung eingegangen.

4.2.7 ARIMMORA

Das EU-Projekt ARIMMORA ("Advanced Research on Interaction Mechanisms of electroMagnetic exposures with Organisms for Risk Assessment") hatte zum Ziel, mögliche biologische Mechanismen zu untersuchen, die den empirisch festgestellten Zusammenhang zwischen Kinderleukämie und Exposition gegenüber Magnetfeldern erklären könnten. Zum Abschluss des Projektes wurde eine Risikoabschätzung nach der Methode der IARC durchgeführt (Schuz et al., 2016). Das 22-köpfige Studienkonsortium kam zu folgenden Schlussfolgerungen:

„…there is limited evidence of carcinogenicity in humans and inadequate evidence of carcinogenicity in experimental animals, with only weak supporting evidence from mechanistic studies. New exposure data from ARIMMORA confirmed that if the association is nevertheless causal, up to 2% of childhood leukemias in Europe, as previously estimated, may be attributable to ELF-MF. In summary, ARIMMORA concludes that the relationship between ELF-MF and childhood leukemia remains consistent with possible carcinogenicity in humans. While this scientific uncertainty is dissatisfactory for science and public health, new mechanistic insight from ARIMMORA experiments points to future research that could provide a step-change in future assessments."

4.2.8 Ausgewählte nationale Reports

4.2.8.1 Deutschland (SSK)

Die deutsche Strahlenschutzkommission (SSK) veröffentlicht regelmässig Bewertungen der wissenschaftlichen Literatur. Über den möglichen Zusammenhang zwischen NF-EMF und Krebs schreibt die (SSK, 2011), p. 49 und p. 52:

„Epidemiological studies offer incomplete evidence for a link between exposure to ELF magnetic fields and the risk of developing childhood leukaemia, but this is not supported by action models or other investigative approaches. Overall, therefore, there is only weak evidence for a link with childhood leu-

kaemia; this conclusion is in agreement with IARC's classification (Table 6). There is a lack of or insufficient evidence for a link with other types of cancer in adolescents and with cancer, including leukaemia, in adults".

„Given the lack of interaction mechanisms and the absence of any evidence for a dose-effect, and in view of the effective shielding of the body from external electric fields, it can be concluded, overall, that despite the inconsistencies in the data from epidemiological studies, there is no evidence for an association between low-frequency electric fields and cancer, including childhood leukaemia".

Damit nimmt sie eine andere Haltung ein als IARC und WHO, welche die Assoziation als belegt (statistisch, nicht kausal) betrachten. Die Argumentation der SSK basiert auf ihrer Einschätzung, dass ein physikalisches Wirkmodell unbekannt sei, Daten und theoretische Kenntnisse für einen möglichen Dosis-Wirkungs-Zusammenhang fehlen und aus in-vitro und in-vivo Studien keine (kindliche Leukämie) oder widersprüchliche (andere Krebserkrankungen bei Kindern und Erwachsenen) Daten vorlägen.

Bezüglich Exposition gegenüber Hochspannungs-Gleichstrom-Übertragung (HGÜ) schreibt die (SSK, 2013), p. 28:

„Elektrische Gleichfelder können nicht in das Körperinnere eindringen und daher dort keine gesundheitlichen Beeinträchtigungen hervorrufen. (…) Wirkungen an der Körperoberfläche, z. B. Kraftwirkungen auf Haare oder Mikroentladungen sowie indirekte Wirkungen infolge von Funkenentladungen auf oder von Objekten sind jedoch bei elektrischen Feldstärken nachgewiesen, wie sie unter HGÜ-Leitungen zu erwarten sind. (…) die es grundsätzlich erforderlich machen, auch elektrische Gleichfelder zu begrenzen".

Es sei angemerkt, dass die schweizerische Gesetzgebung (NISV) keine Grenzwerte für elektrische Gleichfelder vorgibt. Auf HGÜ-Leitungen können Konverter Wechselfrequenzen – 50 Hz Harmonische – übertragen, die gemäss Simulationen von (Wu et al., 2016) u.U. beachtliche Grössenordnungen erreichen). Als weiteres Gesundheitsrisiko diskutiert die SSK die Störfestigkeit von Implantaten und schlägt vor, dass die Exposition gegenüber 50 Hz Magnetfeldern 10 µT pro Quelle im üblichen Gebrauchsabstand (15 µT bei singulärer Quelle) nicht überschreiten sollte.

4.2.8.2 Schweden (SSM)

Ein internationales wissenschaftliches Expertenpanel analysiert im Auftrag der schwedischen Strahlenschutzbehörde (SSM) die Literatur zu gesundheitlichen Risiken nichtionisierender Strahlung. Der erste Bericht wurde 2003 publiziert. Der aktuelle (sechzehnte) Bericht datiert aus dem Jahr 2022 (SSM, 2022). Die wichtigsten Einschätzungen hinsichtlich der epidemiologischen Studien zu niederfrequenten Feldern sind (p. 8):

«The studies presented in this report do not resolve whether the consistently observed association between ELF magnetic field (ELF-MF) exposure and childhood leukaemia in epidemiology is causal or not. New epidemiological studies on childhood leukaemia in relation to paternal exposure or residential exposure are in line with previous research: studies indicated an absence of associations with paternal exposure, whereas previously observed associations with residential exposure were observed again in Mexico City. A Californian study did not indicate that dwelling type may be a critical confounder for this research question."

Betreffend der Humanstudien, p. 6:

"The number of studies continued to be very low, last year only three were published. A methodologically weak study observed effects of chest exposure in four out of six parameters of heart rate variability, which were not observed in a group of unexposed subjects. The second, methodologically sound, study did not observe any effects on postural modulation in subjects with right-sided ELF-EMF exposure at the vestibular system. The third study underlines that ELF-MF exposure induces phosphene

perception at individually varying thresholds when the head is exposed to a homogeneous 50 Hz sinusoidal signal."

In Bezug auf Tierstudien wurde geschlossen (p. 6):

"Again, and similar to the previous Council reports, studies used mostly 50/60 Hz ELF and exposure levels around 1 mT magnetic fields (MF) or between 5 and 35 kV/m electric fields (EF), respectively. Rats' chronic exposure to 50 Hz, 0.03 mT to 1.5 mT ELF-MF had no significant clinical and biological effects in the animals. Short-term application of different pulsed magnetic fields (PMF) of 1 mT led to contradictory answers on pain sensitivities in rats. A further mouse study addressing ultrahigh voltage (UHV) transmission technology and using ELF-EF (50 Hz, 35 kV/m) demonstrated morphological kidney alterations after up to 3 weeks exposure, which recovered after longer lasting exposure. An ELF-EF of 50 Hz and 5.4 kV/m caused oxidative stress and spermatogonia degeneration in rats. In honeybees exposed to the same range of 50 Hz EF (5 – 34.5 kV/m) increased enzyme activities of the antioxidant and proteolytic systems are interpreted as a general first defence mechanism against an environmental stressor. Also, cockroach nymphs were shown to be stressed by a 5 months lasting exposure to 50 Hz, 10 mT ELF-MF. And in the nematode C. elegans, chronic exposure to a 50 Hz 3 mT MF over multiple generations can increase body length and boost antioxidant capacity.

Overall, the diverse animal models describing dissimilar effects following ELF-MF exposure in the 1 mT range and below again demonstrate the absence of knowledge on biologically relevant mechanisms of ELF-MF, except oxidative stress."

Bezüglich Zwischenfrequenzen macht der Bericht folgende Aussage (p 4):

"Despite the increasing use of applications in the intermediate frequency (IF) range of the electromagnetic spectrum (300 Hz-10 MHz), scientific evaluation of potential health risks in that range is scarce. However, the few studies identified by the council in this area have not indicated any health effects below current reference levels."

4.2.8.3 United Kingdom (NRPB)

2004 veröffentlichte das "National Radiation Protection Board" (NRPB; heute: PHE – Public Health England, zwischenzeitlich: HPA – Health Protection Agency) den Bericht „Review of the Scientific Evidence for Limiting Exposure to Electromagnetic Fields (0–300 GHz)" (NRPB, 2004). Das Gremium kommt betreffend der wissenschaftlichen Evidenz zu Wirkungen von Feldern unterhalb der geltenden Grenzwerte zu denselben Einschätzungen wie ICNIRP und schlussfolgerte (p. 6):

„(…) that currently the results of these studies on EMFs and health, taken individually or as collectively reviewed expert groups, are insufficient to derive quantitative restrictions on exposure to EMFs".

Erwähnenswert ist die sog. "Stakeholder Advisory Group on ELF EMFs" (SAGE). Sie wurde 2004 einberufen, um die Regierung des Vereinigten Königreichs hinsichtlich möglicher gesundheitlicher Risiken schwacher niederfrequenter Expositionen und allfälliger Vorsorgemassnahmen zu beraten. Die Gruppierung ist zusammengesetzt aus Experten von Regierung, Industrie und Zivilgesellschaft. 2007 veröffentlichte sie den ersten Assessment Report zu Hochspannungsleitungen, Hausinstallationen und Elektrogeräten, 2010 den zweiten Assessment Report zum Verteilnetz. Sie führte keine wissenschaftliche Beurteilung der Forschung durch, sondern formulierte Empfehlungen für Massnahmen. Die Meinungen zu möglichen Gesundheitsrisiken waren innerhalb der Gruppe uneinheitlich und nicht konsensual.

4.2.8.4 Schweiz (BAFU)

Das Bundesamt für Umwelt (BAFU) ist mit dem Dossier NISV betraut. Die Zuständigkeit umfasst den Schutz des Menschen vor Gefährdungen durch nicht-ionisierende Strahlung, wobei für NIS-Immissionen von Geräten das Bundesamt für Gesundheit zuständig ist. In dieser Funktion verfolgt das BAFU auch den aktuellen Stand der wissenschaftlichen Diskussion, sowohl intern als auch durch Vergabe von entsprechenden Aufträgen an externe Wissenschaftler. Zur fachlichen Unterstützung hat das BAFU 2014 die Gruppe BERENIS (Beratende Expertengruppe NIS) zur Evaluation der aktuellen Literatur hinsichtlich eines möglichen neuen Handlungsbedarfs des BAFU einberufen. Dabei geht es um Emissionen von Anlagen. Der ganze Frequenzbereich von 0 Hz–300 GHz wird dabei berücksichtigt.

Ein Literaturbericht des BAFU von 2009 ist dem Zusammenhang zwischen Krebs und NF-EMF Expositionen gewidmet (Hug et al., 2009). Die Schlussfolgerungen (p. 11f):

„Der stärkste Befund aus den humanepidemiologischen Untersuchungen ist eine begrenzte Evidenz für ein erhöhtes Leukämierisiko bei Kindern durch Magnetfelder von Einrichtungen der Stromversorgung. Die Tierstudien liefern Evidenz, dass Magnetfelder keine Tumoren auslösen, und unzureichende Evidenz dafür, dass das Wachstum eines chemisch oder physikalisch induzierten Tumors verstärkt wird. Zelluntersuchungen ergeben begrenzte Evidenz für eine Verstärkung der gentoxischen Wirkung bestimmter chemischer oder physikalischer Mutagene sowie für eine Beeinflussung der Wachstumskontrolle bei Tumorzellen. Ob diese zellulären Veränderungen tatsächlich für die Entstehung und das Wachstum von Tumoren eine Rolle spielen, ist noch nicht geklärt. Für alle anderen in Zellstudien untersuchten Endpunkte ist die Evidenz für eine Wirkung des Magnetfeldes unzureichend. (…) Weder einzeln noch in ihrer Gesamtheit stellen die in diesem Bericht beurteilten wissenschaftlichen Studien eine ausreichende Basis dar, um die Immissionsgrenzwerte der NISV anzupassen. Da jedoch nicht abschliessend beurteilt werden kann, ob diese Grenzwerte auch vor langfristigen Schäden genügend Schutz bieten, ist weiterhin ein vorsorgeorientierter Ansatz im Umgang mit niederfrequenten Magnetfeldern angezeigt“.

Sodann werden weitere gesundheitliche Endpunkte bewertet:

„Verschiedene Studien weisen jedoch auf biologische Effekte hin, die durch niederfrequente Felder mit einer Intensität deutlich unterhalb der internationalen Grenzwerte ausgelöst werden. Entsprechende Effekte werden als unterschwellige Wirkungen bezeichnet. In Experimenten mit Menschen und Tieren konnten unter anderem Veränderungen im Verhalten und in Bezug auf die Lernfähigkeit sowie eine Beeinflussung des Hormonsystems festgestellt werden. Zum Beispiel wurde das Hormon Melatonin in einer geringeren Menge als üblich ausgeschüttet. Melatonin (…) hat einen stimulierenden Effekt auf das Immunsystem und hemmt das Wachstum von Tumoren. Ein reduzierter Melatonin-Spiegel wird mit Schlafstörungen, Müdigkeit oder depressiven Verstimmungen in Verbindung gebracht. Als weitere Wirkung von schwachen niederfrequenten Feldern wurden Veränderungen des Wachstums und des Stoffwechsels von Zellen beobachtet. Dass es unterschwellige Wirkungen gibt, ist also unbestritten. Wie solche Effekte zustande kommen, ist jedoch nicht bekannt. Ebenso wenig lässt sich beim heutigen Kenntnisstand sagen, ob und unter welchen Bedingungen sie zu einem Gesundheitsrisiko werden“.

4.2.8.5 Niederlande (Health Council)

Das “Health Council” der Niederlande hat 2018 einen umfassenden Bericht zu Hochspannungsleitungen und Kinderleukämie publiziert (Health Council of the Netherlands, 2018a, 2018b, 2018c). Die Autoren haben zwei Arten von epidemiologischen Studien separat evaluiert. Die erste Art von Studien hat das Risiko von Kinderleukämie in Abhängigkeit von der Distanz des Wohnortes von Hochspannungsleitungen untersucht. Die zweite Art von Studien haben die Magnetfeldexposition gemessen oder modelliert. Für beide Arten von Studien fanden sich Hinweise, dass das Risiko für Kinderleukämie

erhöht ist. Dabei stellten die Autoren fest, dass Studien, welche eine besonders sorgfältige Expositionsabschätzung gemacht haben und die Magnetfeldexposition an allen Wohnorten seit der Geburt der Kinder erfasst haben, die höchsten Risiken fanden. In diesem Fall war das Erkrankungsrisiko 2.5-fach erhöht bei einer Exposition von 0.3 bis 0.4 µT oder höher. Höhere Risiken in Studien mit besserer Expositionsabschätzung im Vergleich zu Studien mit groben Abschätzungen ist kompatibel mit einem realen Risiko, das bei grober Expositionsabschätzung aufgrund der Expositionsmissklassifikation unterschätzt wird. Die Autoren schreiben (Health Council of the Netherlands, 2018c: p. 3):

"There is considerable uncertainty in this risk estimate, but the Committee considers it highly unlikely that in reality there is no increased risk. These new analyses confirm the earlier conclusions of the Health Council."

In Bezug auf andere Tumoren bei Kindern erachten die Autoren die Datenlage nur zu Hirntumoren als genügend gut für eine Evaluation. Diese Studien fanden ein 1.5-fach erhöhtes Risiko für Kinder, welche langfristig 0.3 bis 0.4 µT oder höher exponiert sind. Die Datenlage ist aber weniger robust und die Schlussfolgerung lautet (Health Council of the Netherlands, 2018c: p. 3):

"There is considerable uncertainty in this risk estimate and the Committee considers it more likely that the increase is a chance finding than in the case of leukaemia."

Abbildungen aus Health Council of the Netherlands (2018a):

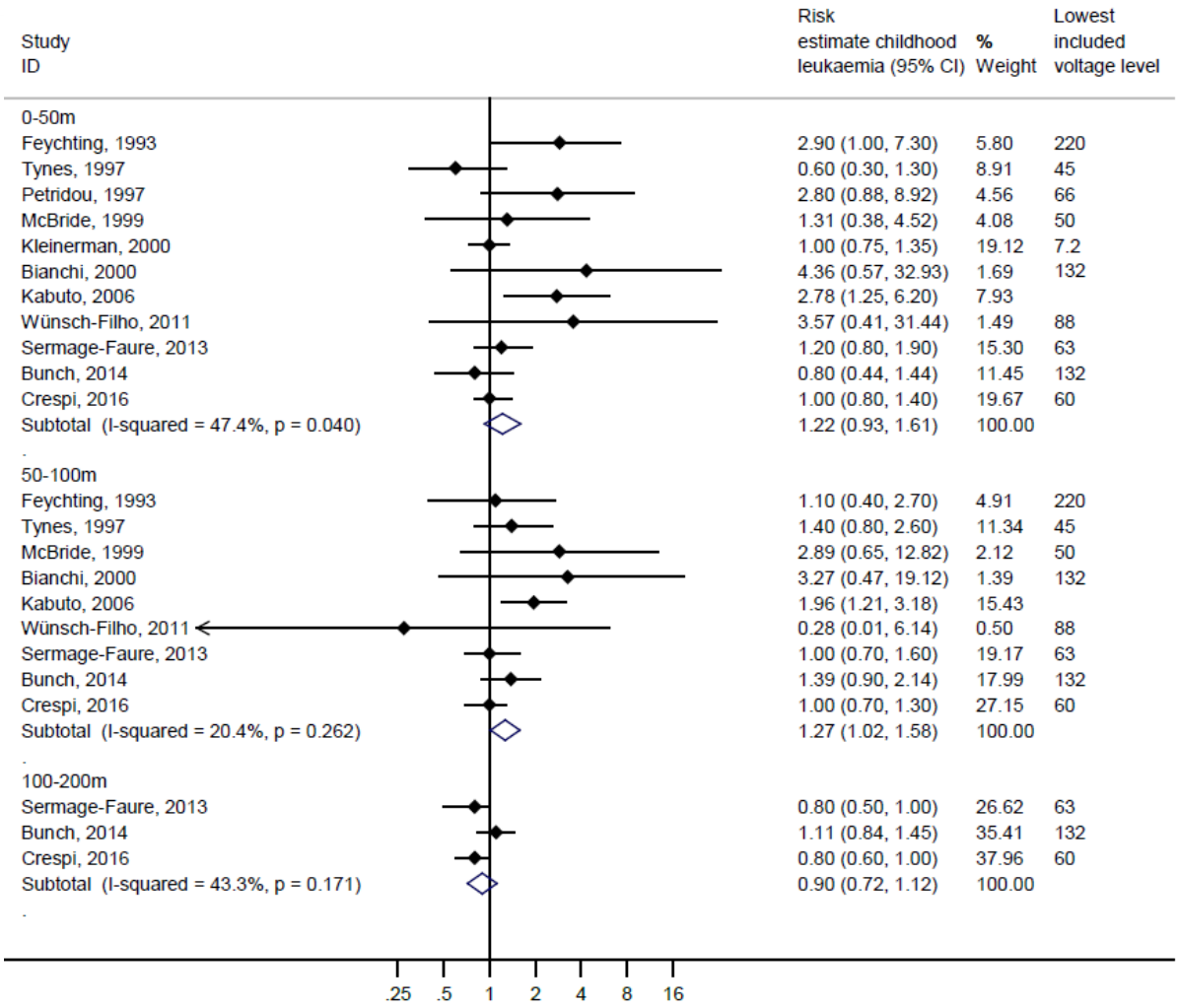


Abbildung 16.: Meta-Analyse für die Studien mit Entfernungskategorien (0-50, 50-100 und 100-200 m. Für jede Studie ist die Risikoschätzung, das 95%-Konfidenzintervall und die Gewichtung der Studie in der Analyse angegeben. Die "Zwischensumme" ist der Risikoschätzer mit Konfidenzintervall für alle Studien in dieser Kategorie. Der Faktor 'I-Quadrat' gibt einen Hinweis auf die Heterogenität der Daten: je höher der Prozentsatz, desto größer die Variation zwischen den Studien (Quelle: Figure 1 in Health Council of the Netherlands (2018a)).

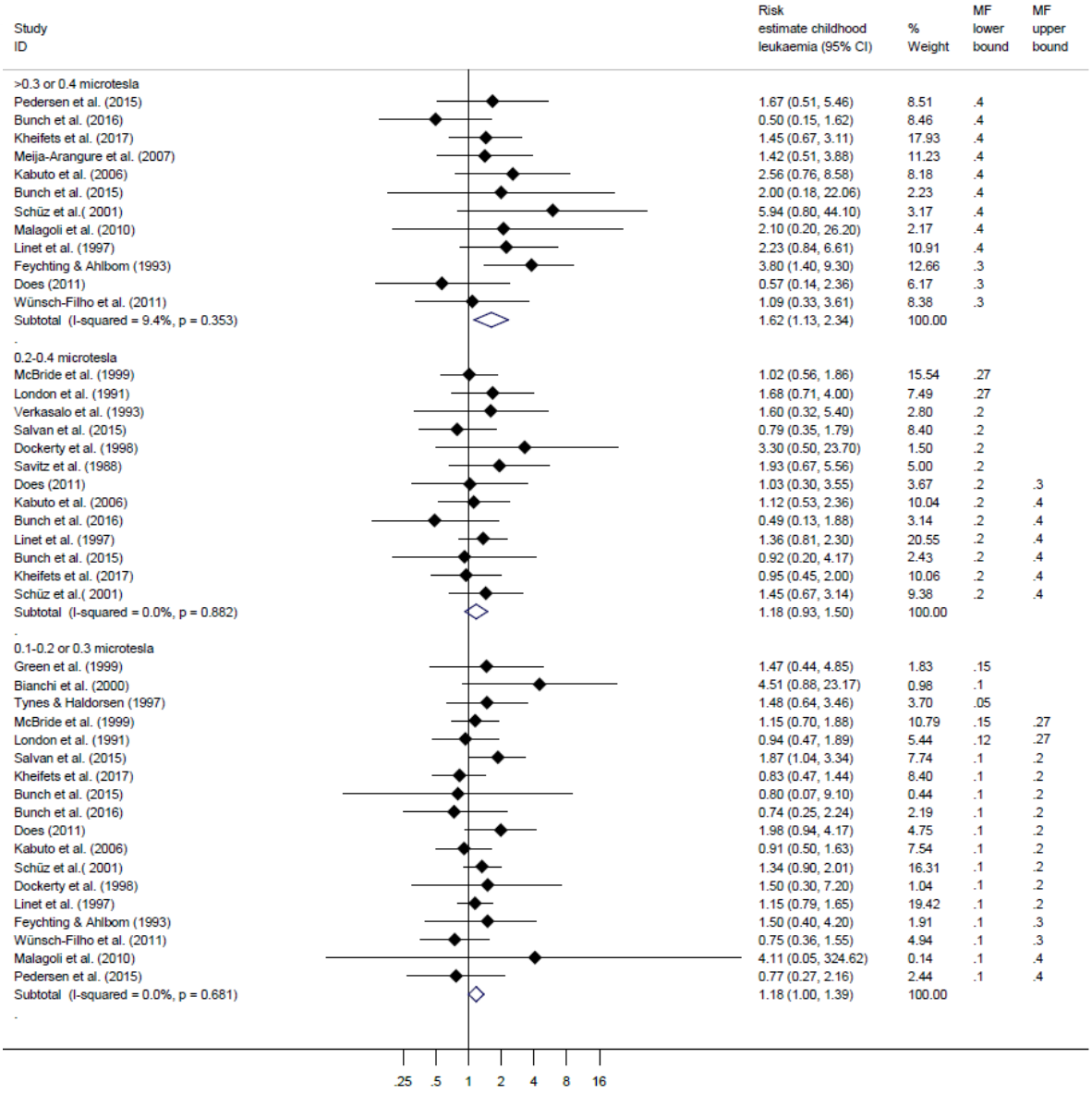


Abbildung 17: Meta-Analyse der Studien zu magnetischer Feldstärke. Für jede Studie wurden die Risikoschätzung, das 95%ige Konfidenzintervall und das Gewicht der Studie in der Analyse angegeben. Die "Zwischensumme" ist der Risikoschätzer mit Konfidenzintervall für alle Studien in dieser Kategorie. Der Faktor 'I-Quadrat' gibt einen Hinweis auf die Heterogenität der der Daten: je höher der Prozentsatz, desto größer die Variation zwischen den Studien (Quelle: Figure 4 in Health Council of the Netherlands (2018a)).

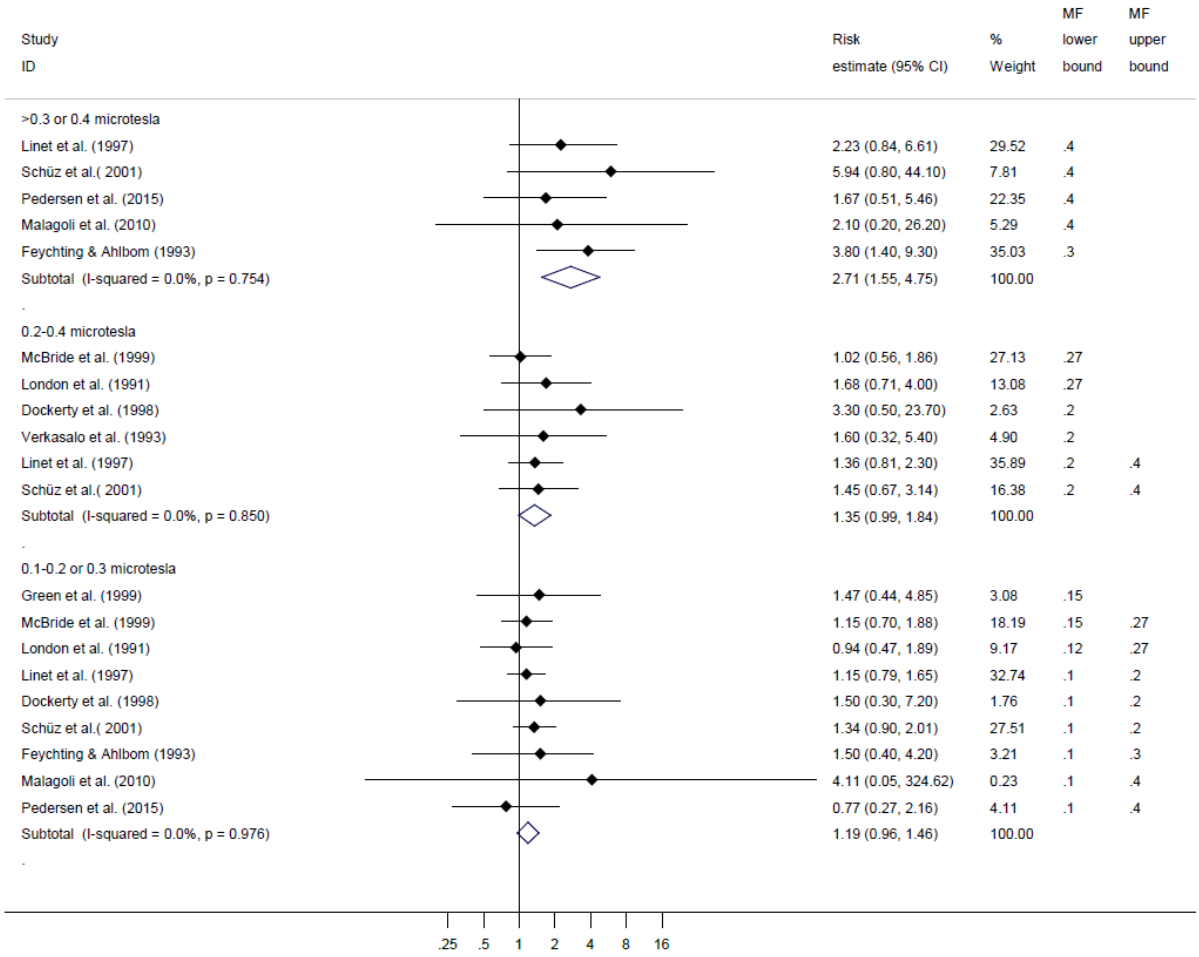


Abbildung 18: Sensitivitätsanalyse zur Meta-Analyse der Studien zu magnetischer Feldstärke. Eingeschlossen wurden nur Studien mit Expositionsabschätzung an allen Adressen zwischen (oder vor) Geburt und Diagnose. Für jede Studie wurden die Risikoschätzung, das 95%ige Konfidenzintervall und das Gewicht der Studie in der Analyse angegeben. Die "Zwischensumme" ist der Risikoschätzer mit Konfidenzintervall für alle Studien in dieser Kategorie. Der Faktor 'I-Quadrat' gibt einen Hinweis auf die Heterogenität der der Daten: je höher der Prozentsatz, desto größer die Variation zwischen den Studien (Quelle: Figure 5 in Health Council of the Netherlands (2018a)).

Im Juni wurde vom holländischen “Health Council” ein weiterer Bericht zu Krebs bei Erwachsenen im Zusammenhang mit Hochspannungsleitungen publiziert. Zurzeit ist nur die Zusammenfassung verfügbar (Health Council of the Netherlands, 2022a). Das Komitee kommt zum Schluss, dass Studien Hinweise für einen Zusammenhang zwischen der Nähe von Hochspannungsfreileitungen und einem erhöhten Leukämierisiko bei Erwachsenen finden. Auch in epidemiologischen Studien zu Magnetfeldexposition am Arbeitsplatz wurden erhöhte Risiken beobachtet. Das Komitee interpretiert dies als einen Hinweis auf einen kausalen Zusammenhang. In Bezug auf die anderen untersuchten Krebsarten zeigten Studien zur häuslichen Magnetfeldexposition keinen Zusammenhang zwischen der Nähe zu Freileitungen und dem Krankheitsrisiko. Allerdings sind der Umfang und die Qualität dieser Untersuchungen begrenzt. Der Ausschuss hält daher die Ergebnisse der Studien zu Wohngebieten für unzureichend, um einen kausalen Zusammenhang zwischen der Nähe von Hochspannungsleitungen und dem Risiko, an diesen Krebsarten zu erkranken abzuleiten. Bei Berufsgruppen mit wesentlich höheren Expositionen gegenüber Magnetfeldern als in Wohngebieten wurden Assoziationen auch für mehrere

andere Krebsarten wie Brustkrebs bei Männern, Hirntumoren und Bauchspeicheldrüsenkrebs gefunden. Das Komitee ist der Ansicht, dass diese Zusammenhänge als Hinweis auf einen kausalen Zusammenhang interpretiert werden können, dass jedoch für eine abschliessende Beurteilung zusätzliche Informationen aus experimenteller Forschung (einschliesslich Tierstudien) und mechanistischen Studien erforderlich sind. Die neuesten Übersichten über solche Studien liefern jedoch keine zusätzliche Unterstützung für einen kausalen Zusammenhang.

Ebenso wurde im Juni 2022 vom “Health Council” ein Bericht zu neurodegenerativen Erkrankungen im Zusammenhang mit Hochspannungsleitungen publiziert. In der veröffentlichten Zusammenfassung finden sich folgende Schlussfolgerungen (Health Council of the Netherlands, 2022b):

In Bezug auf die Parkinson-Krankheit kommt das Komitee zum Schluss, dass ein Kausalzusammenhang mit der beruflichen Exposition gegenüber Magnetfeldern unwahrscheinlich ist. Auch Studien in Wohngebieten haben keinen Zusammenhang gezeigt zwischen der Nähe von Hochspannungsleitungen und dem Risiko, an der Parkinson-Krankheit zu erkranken.

Bei amyotropher Lateralsklerose (ALS) und der Alzheimer-Krankheit ist das Bild weniger klar. Es gibt nur wenige Studien zur Exposition im Wohnort und diese fanden keine Zusammenhänge zwischen der Nähe von Hochspannungsleitungen und diesen Krankheiten. Für Berufsgruppen mit einer wesentlich höheren Exposition gegenüber Magnetfeldern als in Wohngebieten zeigten die Studien ein erhöhtes Risiko für die beiden Krankheiten, obwohl die Datenlage für die Alzheimer-Krankheit weniger deutlich ist als für ALS. Das Komitee hält Ergebnisse für Wohngebiete als unzureichend, um einen kausalen Zusammenhang zwischen der Nähe von Hochspannungsleitungen und dem Risiko für eine der beiden Krankheiten abzuleiten. Das Komitee hält die Assoziationen für berufliche Exposition als suggestiv für einen Kausalzusammenhang. Die wenigen verfügbaren Daten aus experimentellen Studien bieten keine weitere Unterstützung für einen kausalen Zusammenhang.

Für multiple Sklerose wurden weder in den Studien zu Wohn- noch zu Arbeitsplatzexpositionen Zusammenhänge gefunden. Allerdings ist die Anzahl der Studien zu gering, um endgültige Aussagen über einen kausalen Zusammenhang mit Magnetfeldern machen zu können.

4.2.8.6 Frankreich (ANSES)

Eine unabhängige Expertenkommission bestehend aus 16 französischen Experten und fünf Vertretern seitens der ANSES sowie einer grossen Begleitgruppe hat die von April 2009 bis Juli 2016 veröffentlichte Literatur evaluiert (ANSES, 2018). Ziel des Berichts war es, Elektrohypersensitivität (EHS) in ihrer Komplexität zu erfassen, zu charakterisieren und bezüglich der Ursache und Krankheitsentstehung zu ergründen. Dabei wurden sowohl Studien zu niederfrequenter als auch zu hochfrequenter EMF berücksichtigt. Die Literaturanalyse (ohne Bewertung und Empfehlungen) wurde einer öffentlichen Konsultation unterzogen. Zusätzlich wurden 64 Briefe von EHS-Personen an die ANSES berücksichtigt. Der Bericht beschreibt umfassend Symptome, Krankengeschichte, Prävalenz (die aufgrund der 14 analysierten Studien auf etwa 5% geschätzt wird) und den gesellschaftlichen Kontext von EHS, beispielsweise hinsichtlich Organisationen und Medien.

EHS wird gemäss WHO aufgrund von drei Kriterien definiert: unspezifische Symptome, keine diagnostizierte Ursache, Attribution der „Ursache EMF“ durch Betroffene. Die 16-köpfige Expertengruppe stellte fest, dass die Studienlage insgesamt mit grossen methodischen Defiziten behaftet ist. Insbesondere die Rekrutierung sei sehr heterogen, da es keine objektiven und allgemein gültigen Kriterien für die Charakterisierung von EHS-Patienten gibt. Ebenso heterogen sei die Erhebung der Symptome und der Quellen. Erhebungen zur Häufigkeit von EHS werden entsprechend mit Vorbehalt bewertet, die Studienlage der letzten Jahre lasse etwa fünf Prozent annehmen, insbesondere nicht zunehmend. Dass experimentelle Provokationstests negativ ausgefallen seien, könne heissen, dass es keinen Zusammenhang gibt, es könnte aber auch sein, dass die methodischen Defizite der Studien – vor allem bei

der Rekrutierung – der Grund sind, warum ein tatsächlich vorhandener Zusammenhang verkannt werden könne. Auch wäre es möglich, dass sich die Effekte nur unter bestimmten Bedingungen oder Expositionssituationen manifestieren, welche bisher noch nicht verstanden sind. Insgesamt wurden 18 Hypothesen zur Krankheitsentstehung der EHS untersucht. Der wissenschaftlich wiederholt beschriebene Nocebo-Effekt begünstige die Persistenz der Beschwerden, schliesse eine NIS-Quelle als Auslöser jedoch nicht aus. Aufgrund der Studienlage dürfe ausgesagt werden, dass EHS-Patienten ein weniger gutes Wohlbefinden haben und depressiver und ängstlicher sind als ein Vergleichskollektiv, wobei chronische und seltene Krankheiten typischerweise mit erhöhter Ängstlichkeit und Depression einhergehen. Die Prävalenz pathologischer Persönlichkeiten oder psychiatrischer Erkrankungen sei nicht erhöht. Es fänden sich Verbindungen zu MCS (multiple Chemikaliensensibilität, Fibromyalgie, Migräne und Tinnitus.

Die ANSES Expertengruppe erläutert verschiedene Hypothesen zu EHS, denen vor allem ärztliche Beobachtungen zugrunde liegen:

(1) Gibt es Biomarker? Antwort: es gibt bislang keinen einzigen Kandidaten
(2) Ist ein bestimmter Phänotyp vegetativer Nervensysteme mit EHS verknüpft? Antwort: Das kann heute weder bestätigt noch ausgeschlossen werden
(3) Sind Effekte im zentralen Nervensystem verantwortlich, zum Beispiel
    a. eine veränderte Bluthirnschranke? Antwort: hierzu gibt es keine belegten Hinweise
    b. eine veränderte Ausschüttung von Neurotransmittern? Antwort: zu wenig Studien, Evidenz unzureichend
    c. eine Veranlagung zu Migräne? Antwort: lässt sich nicht belegen, die Thematik sei aber aus ärztlicher Sicht interessant und weitere Forschung dazu nötig
    d. eine dysfunktionale zerebrale Aktivität, inklusive Blutfluss und Metabolismus? Antwort: unzureichende Evidenz im Sinne von „offen“. Mögliche Verbindungen mit Fibromyalgie sollten näher geprüft werden, insbesondere EHS-assoziierte Hautsymptome könnten mit der bei Fibromyalgie verifizierten Anomalie kleiner peripherer Hautnerven zusammenhängen.
(4) Können Schlafprobleme bzw. Unstimmigkeiten im Wach-Schlaf-Rhythmus eine Ursache sein? Antwort: Störungen im zirkadianen Rhythmus („innere Uhr“) könnten eine – wenn auch bislang nicht belegte – Erklärung sein.
(5) Ebenfalls interessant findet die Expertengruppe die Hypothese, dass EHS durch Persönlichkeitszüge mitverursacht sein könnte (reduzierte Selbstaufmerksamkeit steigert die Neigung zu Externalisierungen). Hier wäre gemäss Experten neue Forschung wichtig.

Die Expertengruppe kommt zu der Schlussfolgerung, dass es unklar ist, ob Veränderungen in der Exposition etwas am Gesundheitszustand der Betroffenen ändern. Strahlenfreie Zonen und Räume seien so gesehen wissenschaftlich nicht gerechtfertigt. Ein Hauptgewicht liege aber bei der Forschungsförderung. Es werden entsprechende Empfehlungen gemacht.

4.2.9 Bewertung

Die internationalen und nationalen Expertengremien kommen insgesamt zum Schluss, dass es offene Fragen zu den gesundheitlichen Wirkungen von NF-EMF gibt. Ungelöst ist laut den meisten Expertenpanels nach wie vor die Frage, ob der statistische Zusammenhang zwischen NF-Magnetfeldexposition und kindlicher Leukämie, den viele epidemiologische Studien zeigen, auf eine kausale Beziehung (Verursachung der Krankheit durch niederfrequente Magnetfelder) hindeutet oder nicht (methodisches Artefakt). Tier- und Zellstudien weisen gemäss den meisten der oben gelisteten Berichte nicht auf eine kausale Wirkung hin (Abwesenheit einer Verursachung). Allerdings wurden in Zellexperimenten wiederholt Effekte auf die DNS nachgewiesen, und bei schwachen Magnetfeldexpositionen ein Anstieg

der Konzentration von freien Radikalen beobachtet. Diese Befunde könnten auf einen möglichen Wirkmechanismus hinweisen und sollten gezielt weiter untersucht werden.

Sodann weisen die Review-Berichte darauf hin, dass die Frage, ob NF-EMF-Exposition das Risiko für Alzheimer und ALS (Amyotrophe Lateralsklerose) erhöht oder nicht, gegenwärtig keine endgültige Antwort kennt. Falls es ein Risiko gibt, ist es bei Alltagsexpositionen mit einiger Sicherheit klein und wenn, im beruflichen Kontext relevanter. Für fast alle anderen untersuchten gesundheitlichen Endpunkte finden sich laut den zitierten Experteneinschätzungen in der wissenschaftlichen Literatur wenige Belege für eine Beeinträchtigung.

Zur Prävalenz von EHS werden verschiedene Angaben gemacht. Bezüglich der Ursachen bleiben Fragen offen, wobei die Berichte den Schluss nahelegen, dass NF-EMF als Ursache ungenügend belegt sind.

Eine Minderheit von Forschenden, die sich Grossteils in der BioInitiative zusammengefunden hat, interpretiert die Studienlandschaft deutlich kritischer und ist sogar überzeugt, dass eine Erhöhung des kindlichen Leukämierisikos durch langzeitige NF-EMF-Exposition wissenschaftlich als sehr wahrscheinlich angesehen werden muss, und dass auch bei anderen Endpunkten (etwa neurodegenerative Erkrankungen) mit erhöhten Risiken gerechnet werden muss.

4.3 Studien zu ausgewählten Themen

4.3.1 Kindliche Leukämie

4.3.1.1 Ausgangslage

In den im Kapitel 4.2 referierten Review-Reports ist die allgemeine Datenlage bereits dargestellt worden. An dieser Stelle wird sie nochmals kurz zusammengefasst und mit einigen neueren Studienergebnissen ergänzt. Hinsichtlich der Risikofaktoren von kindlicher Leukämie ist wenig bekannt. Mezei et al. (2014) fassen zusammen (p. 479):

“Although many epidemiologic studies have examined a variety of environmental exposures, ionizing radiation remains the only generally accepted environmental risk factor for childhood leukemia. Among suspected risk factors, infections, exposure to pesticides, and extremely low frequency magnetic fields are notable“.

Die IARC (2002) hat niederfrequenter Magnetfelder als „möglicherweise kanzerogen für Menschen“ (Gruppe 2B) eingestuft. Die WHO (2007) hat diese Beurteilung übernommen. Die Bewertung basierte massgeblich auf den Metaanalysen (pooled analyses) von Greenland et al. (2000) und Ahlbom et al. (2000). Gemäss den meisten Expertenberichten haben die seither publizierten Einzelstudien insgesamt den statistischen Zusammenhang zwischen NF-Magnetfeldbelastung und kindlicher Leukämie bestätigt. Der quantitative Befund: bei langfristiger erhöhter Magnetfeldbelastung durch Hochspannungsleitungen (die am häufigsten gewählte Expositionsgrenzen: für erhöhte Belastung 0.3–0.4 µT; für die Referenz: > 0.1 µT) ergibt sich eine ungefähre Verdoppelung des Risikos von Kindern, an Leukämie zu erkranken.

Die Umschreibung „möglicherweise kanzerogen“ begründet einen Verdacht, bedeutet aber keinen Nachweis einer kanzerogenen Wirkung. Sodann: Nur ein kleiner Prozentsatz der Bevölkerung ist auf Dauer erhöhten Magnetfeldbelastungen ausgesetzt (Schätzungen variieren meist um 1–3% der Kinder). Das bedeutet für das absolute Risiko, dass – falls ELF-Magnetfelder tatsächlich / ursächlich bei Kindern das Leukämierisiko erhöhen (Grössenordnung 50–100%) – die Anzahl zusätzlicher Erkrankungen klein ist. Für die Schweiz wird geschätzt, dass es maximal 2–3 Fälle pro Jahr wären.

4.3.1.2 Epidemiologische Studien publiziert bis 2017

Studienresultate und Diskussionen befeuerten die uneinheitliche Datenlage weiter, weshalb nach wie vor Interpretationsspielraum vorliegt.

Review-Studien: Wichtig ist die gepoolte Analyse von Kheifets, Ahlbom, Crespi, Draper, et al. (2010), in der 7 neuere Arbeiten berücksichtigt wurden (Bianchi et al., 2000), (Schuz, Grigat, et al., 2001), (Kabuto et al., 2006), (Lowenthal et al., 2007), (Kroll et al., 2010), (Malagoli et al., 2010), (Wunsch-Filho et al., 2011). Der Gesamtbefund (siehe auch Abbildung 19; p. 1128):

"Our results are in line with previous pooled analyses showing an association between magnetic fields and childhood leukaemia. Overall, the association is weaker in the most recently conducted studies, but these studies are small and lack methodological improvements needed to resolve the apparent association. We conclude that recent studies on magnetic fields and childhood leukaemia do not alter the previous assessment that magnetic fields are possibly carcinogenic".

In der gepoolten Analyse zu den Überlebenschancen und zum Rückfallrisiko von mit Leukämie diagnostizierten Kindern (Schuz et al., 2012) wurden die Fälle aus 7 Studien zusammen analysiert. Durch einen Vergleich der Fälle untereinander sollte einer allfälligen Verzerrung durch nicht-repräsentative Teilnahmen der Kontrollen in den einzelnen Studien begegnet werden. Die gepoolte Analyse fand keine Risikoerhöhungen.

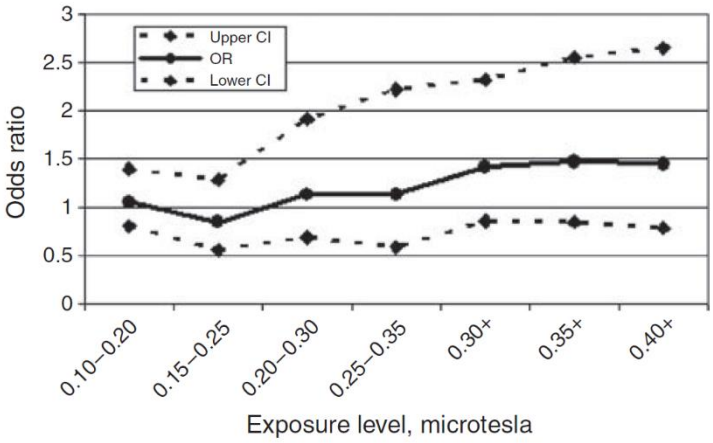


Abbildung 19: Risikoschätzer (korrigiert nach Geschlecht, Alter und sozioökonomischem Status) zu kindlicher Leukämie aus der gepoolten Analyse von (Kheifets, Ahlbom, Crespi, Draper, et al., 2010). Referenzniveau: < 0.1 µT.

Eine Meta-Analyse mit 9 Studien (die grösstenteils schon früher in den erwähnten gepoolten Analysen berücksichtigt worden sind) publizierten Zhao et al. (2014). Sie kamen zum Schluss (p. 269):

"A total of 11,699 cases and 13,194 controls in 9 studies were stratified by different exposure cut-off points. On condition of the reference < 0.1 µT, statistical association between magnetic field intensity ≥ 0.4 µT and childhood leukemia was exhibited (for total leukemia: OR = 1.57, 95% CI = 1.03–2.40; for acute lymphocytic leukemia: OR = 2.43, 95% CI = 1.30–4.55). (…) The result in this meta-analysis indicated that magnetic field exposure level may be associated with childhood leukemia".

Über die Einschätzungen von SCENIHR und ARIMMORA – beide sprechen von einer möglicherweise kanzerogenen Wirkung von ELF-Magnetfeldern in Bezug auf kindliche Leukämie – haben wir im Kapitel 4.2 berichtet.

Sodann wird an dieser Stelle noch auf zwei eher problematische Übersichtsarbeiten hinweisen:

Ein indischer Review (Kokate et al., 2016) kam zum qualitativ gleichen Schluss wie SCENIHR oder ARIMMORA, allerdings überzeugt die Arbeit methodisch nicht, da es sich in wesentlichen Teilen „nur“ um qualitative Experteneinschätzungen handelt. Interessanter ist die synoptische Analyse von Leitgeb (2015b). Er interpretiert alle publizierten Studien unabhängig von ihrer wissenschaftlichen Qualität und Aussagekraft, um ein Gesamtbild der Risikoschätzer zu erhalten. Dieser Ansatz ist aus Untersuchungen des sog. „publication bias“ bekannt, wo mit auch von Leitgeb eingesetzten “funnel plots” mögliche Publikationsverzerrungen studiert werden. Leitgeb zeigt, dass es mit zunehmender Samplegrösse der Studie einen klaren Trend hin zum Nullrisiko gibt. Weil grosse Studien in aller Regel zuverlässiger sind, ist für Leitgeb klar, dass es keinen Zusammenhang zwischen kindlicher Leukämie und Magnetfeldexposition gibt.

Die Expertengruppe der SSM (SSM, 2016) kommt bei der Diskussion dieser Studie zu einem anderen Schluss und steht Leitgeb’s Arbeit kritisch gegenüber (p. 45):

„Leitgeb’s approach is, however, flawed. First, it is not clear which risk estimates were considered. It seems that original study results and pooled as well as meta-analysed estimates were mixed, producing multiple counting of study results. In addition, if authors presented results referring to different exposure metrics, all risk estimates were included in the paper. Second, the assumption that risk estimates based on a high number of cases are most reliable is not necessarily true. Detailed exposure assessment may not be feasible in large studies, which may produce non-differential exposure misclassification biasing risk estimates to null (in case of an association). Third and most relevant, Leitgeb did not consider the level of exposure. Obviously, high ELF-MF exposure scenarios are rare and thus risk estimates for highly exposed children groups are based on few cases only. In contrast, risk estimates based on several hundreds of cases can only refer to low exposure groups. Thus, absence of risks for low exposure groups is not informative for the risk of children exposed above 0.3/0.4 µT. In summary, the chosen approach mixes study results in an inappropriate manner and is not suitable to draw any conclusions on the association between childhood leukaemia and ELF-MF exposure.”

Als nächstes sollen wichtige Einzelstudien zur Sprache kommen: Die dannzumal grösste zu Kinderleukämie und Hochspannungsleitungen erschien 2005 (Draper et al., 2005). Die Studie errechnete einen Risikofaktor von 1.7 für Kinder, die näher als 200 m von einer Hochspannungsleitung leben. Bemerkenswert war dabei, dass in der Zone 200–600 m, in der die Magnetfeldstärken kaum erhöht sind gegenüber der Hintergrundstrahlung, ebenfalls eine signifikante Risikoerhöhung beobachtet wurde (RR = 1.23). Eine Erklärung dafür haben die Autoren nicht. Sie glauben, dass das nicht auf Magnetfeldexposition zurückgeführt werden kann und vermuten einen anderen auslösenden Faktor im Zusammenhang mit dem Betrieb von Hochspannungsleitungen (p. 1294).

“There was also a slightly increased risk for those living 200-600 m from the lines at birth (relative risk 1.2, P for trend < 0.01); as this is further than can readily be explained by magnetic fields it may be due to other aetiological factors associated with power lines”.

Eine Neuauswertung durch die Gruppe (Kroll et al., 2010), die Eingang in die Meta-Analyse von (Kheifets, Ahlbom, Crespi, Draper, et al., 2010) fand, bestätigte die Originalbefunde. Für die Konfirmation wurden für die Expositionsschätzung statt Distanzen Simulationen der Netzbelastungen verwendet und so magnetische Flussdichten für die Wohnadressen der Studienteilnehmer berechnet. Die Autoren warnen aber wiederum aufgrund der vergleichsweise wenigen Fälle vor Überinterpretationen.

Eine erneute Analyse mit erweitertem Datensatz (bis 2008) wurde 2014 vorgelegt (Bunch et al., 2014). Darin zeigte sich eine deutliche Abnahme der Risikoschätzer über die Zeit (1962–2008), wenn man die 4 Dezennien miteinander vergleicht. Die Autoren kommen deshalb zum Schluss (p. 1402):

“A risk declining over time is unlikely to arise from any physical effect of the powerlines and is more likely to be the result of changing population characteristics among those living near powerlines”.

Möglicherweise handelt es sich hier aber „nur“ um ein methodisches Konstrukt aufgrund der Zusammensetzung des Studienkollektivs, insbesondere der Kontrollen (siehe auch Kheifets et al. (2005)). Während in den ersten drei Dezennien drei Mal weniger Kontrollen als Fälle rekrutiert worden sind, wurden in den letzten beiden Dezennien gleichviele bzw. mehr Kontrollen als Fälle berücksichtigt.

2014 erschienen die Ergebnisse einer dänischen Studie (Pedersen, Raaschou-Nielsen, et al., 2014), die mit derselben Methodik arbeitete wie die britische von Draper. Pedersen et al. konnten den Befund der britischen Studie nicht belegen: insgesamt zeigten sich keine erhöhten Risiken. Teile der Resultate könnten jedoch wegen kleiner Fallzahlen zufallsbedingt, also nicht sehr aussagekräftig, sein, und in der höchsten Expositionskategorie wurde kein Fall protokolliert. Das Update der Studie, die neu die Zeit von 1968–2003 umfasst (Pedersen et al., 2015), ist in dieser Hinsicht robuster und ergab einen Risikoschätzer von 1.63 (statistisch nicht signifikant), was in etwa den Risikowerten aus gepoolten Analysen entspricht. Der Risikoschätzer blieb auch stabil unter Berücksichtigung von Störgrössen (Radon und NO_x), wie eine Zusatzanalyse ergab (Pedersen, Brauner, et al., 2014).

Eine französische Arbeit (Sermage-Faure et al., 2013) errechnete ein erhöhtes Leukämierisiko von 1.7 für Kinder die näher als 50 m von Höchstspannungsleitungen (> 225 kV) entfernt wohnen. Eine ähnliche Grössenordnung (1.4 – ebenfalls statistisch nicht signifikant) publizierte die kalifornische Studiengruppe um Leeka Kheifets (Crespi et al., 2016).

Andere / weitere Studien: Keine Assoziationen mit häuslichen niederfrequenten Magnetfeldexpositionen stellten eine tschechische (Jirik et al., 2012) und eine italienische (Salvan et al., 2015) Untersuchung fest. Die Resultate der letzteren Studie sind jedoch, wie die Autoren festhalten, statistisch nicht robust. Eine Risikoerhöhung von über 2 ergab eine, allerdings nicht begutachtete, iranische Studie (Sohrabi et al., 2010). Eine zweite iranische Studie, die allem Anschein nach doppelt publiziert wurde (Dechent & Driessen, 2016), bezifferte den Risikofaktor auf über 3.5 (Tabrizi & Hosseini, 2015), (Tabrizi & Bidgoli, 2015). Die Expositionsangaben sind aber so mangelhaft, dass der Studie kaum Aussagekraft zukommt. Auch die Studie von Wunsch-Filho et al. (2011) ist in ihre Aussagekraft unklar, insbesondere weil eine Auswahlverzerrung wahrscheinlich ist, da sich nur 23% der Fälle bereit erklärten, an der Studie mitzuwirken. Insgesamt sind / wären die publizierten Risikoschätzer sowohl auf der Basis von Distanzen zu HSL als auch auf der Basis von indoor gemessenen magnetischen Flussdichten mit einer leichten Risikoerhöhung kompatibel.

Die Arbeiten von Hug et al. (2010) und Reid et al. (2011) untersuchten, ob berufliche Expositionen der Eltern vor der Geburt ihrer Kinder das Leukämierisiko (bei Hug auch das Lymphom und Hirntumorrisiko) des Nachwuchses erhöht. Beide Fall-Kontroll Studien fanden keine entsprechenden Hinweise. Auch die neueste Studie zu diesem Zusammenhang, die Metaanalyse von 12 publizierten Arbeiten von (Su et al., 2016), kam zu demselben Schluss. Die Autoren fassen zusammen (p. 1):

„In conclusion, our data indicate no association between parental occupational ELF-MF exposure and childhood leukemia risk, and the elevated OR under certain subgroup analysis is likely due to chance”.

Bunch et al. (2015) untersuchten den Zusammenhang zwischen kindlicher Leukämie und Magnetfeldexposition für unterirdisch verlegte Hochspannungskabel. Der Vorteil hier ist, dass keine elektrischen Felder als mögliche Störgrösse auftreten, der Nachteil, dass die Expositionen mit zunehmender Distanz vom Kabeltrasse viel schneller abnehmen als bei Überlandleitungen. Obwohl über 50‘000 Fälle und ebenso viele Kontrolle in die Studie eingeschlossen wurden, betrug die Anzahl der Fälle innerhalb von 50 m Entfernung vom Trasse nur 33. Da das stark exponierte Gebiet um eine Kabeltrasse nur einige Meter beträgt, ist die Aussagekraft der Studie damit limitiert. Die Autoren stellten keine Zusammenhänge zwischen Leukämierisiko und Exposition fest.

4.3.1.3 Neue epidemiologische Studien seit 2017

Swanson und Bunch (Swanson & Bunch, 2018) publizierten 2018 eine Neuanalyse der oben erwähnten Studie aus Grossbritannien (Bunch, 2015). Sie stellten fest, dass das erhöhte Kinderleukämierisiko in der Nähe von Hochspannungsleitungen, welche in den 1960er und 1970er Jahren beobachtet wurden, ab 1980 nicht mehr ersichtlich war. Zudem wurde für die Daten vor 1980 bei Höchstspannungsleitungen (275 und 400 kV) das grösste Risiko im Abstand von 100 und 200 m gefunden, während bei Distanzen <100 m das Risiko weniger stark erhöht war. Bei 132 kV Leitungen wurde das gleiche Muster gefunden, jedoch war dort das höchste Erkrankungsrisiko zwischen 50 und 100 m zu finden. Gemäss den Autoren spricht dieser zeitliche Trend und die beobachtete Abstandsabhängigkeit gegen eine Kausalität von Kinderleukämie und magnetischen Feldern von Hochspannungsleitungen. Es ist jedoch zu beachten, dass die Fallzahlen insgesamt relativ gering waren, obwohl dies bei weitem die grösste Studie zu Kinderleukämie und niederfrequenten Magnetfelder ist. Insgesamt traten von den 16'042 eingeschlossenen Kinderleukämieerkrankungen 105 Fälle in der Nähe von Hochspannungsleitungen auf (<200 m). Zufällige Schwankungen über die Zeit und in Bezug auf den Abstand sind daher zu erwarten.

Seit 2017 wurden zwei neue und grössere Originalstudien publiziert. In einer kalifornischen Fall-Kontrollstudie wurden 5’788 Leukämiefälle von Kindern eingeschlossen, welche zwischen 1986 und 2008 in Kalifornien geboren und diagnostiziert wurden (Kheifets, Crespi, et al., 2017). Die Exposition gegenüber NF-MF am Geburtsort wurde modelliert. Nach Berücksichtigung von möglichen Störgrössen wurde für die am stärksten exponierten Kindern (≥0.4 µT) ein nicht-signifikant erhöhtes Risiko beobachtet (Odds Ratio: 1.50, 95% Konfidenzintervall: 0.70 bis 3.23). Die Autoren merken an, dass die Studienergebnisse für sich keinen eindeutigen Nachweis für ein Risiko zeigen, dass sie aber konsistent sind mit früheren Befunden eines erhöhten Risikos.

In einer retrospektiven Kohorte von 784’944 Neugeborenen in Quebec, Kanada, zwischen 2006 und 2016 wurde der Zusammenhang zwischen Kinderleukämie und Distanz zur nächsten Hochspannungsleitung und Transformatorstation zum Wohnort zum Zeitpunkt der Geburt evaluiert (Auger, Bilodeau-Bertrand, et al., 2019). Insgesamt sind 1114 Kinderkrebsfälle in die Analyse eingeschlossen worden. Die Nähe zu Transformatoren war mit einem etwas höheren Krebsrisiko verbunden, aber es gab keinen Zusammenhang mit Hochspannungsfreileitungen. Im Vergleich zu 200 m war ein Abstand von 80 m zu einer Trafostation mit einem relativen Erkrankungsrisiko von 1.08 (95% KI 0.98 bis 1.20) für alle Krebsarten, 1.04 (95% KI 0.88 bis 1.23) für hämatopoetischen Krebs und 1.11 (95% KI 0.99 bis1.25) für solide Tumore assoziiert. Bei der Analyse berücksichtigt wurden das Alter und Erkrankungen der Mutter, Geschlecht und Anzahl Geschwister des Neugeborenen, Zwillingsgeburt, Urbanität, sozioökonomischer Status und Zeitperiode. Eine Stärke der Studie ist der Einschluss der ganzen Bevölkerung ohne Selektionsbias. Eine Schwäche ist die Expositionsabschätzung, welche die Magnetfeldstärke und die Wohnhistorie nicht berücksichtigt. Das führt zu zufälligen Fehlern, welche eine Unterschätzung des Risikos bewirken, falls es ein Risiko gibt.

Amoon, Crespi, et al. (2018) haben eine gepoolte Analyse von elf Studien gemacht, welche den Zusammenhang zwischen Kinderleukämie und Distanz des Wohnortes zu Hochspannungsleitungen untersucht haben. Insgesamt wurden 29’049 Kinder mit Leukämie und 68’231 Kontrollkinder eingeschlossen. Teilweise wurden auch Daten von Studien eingeschlossen, die bisher nicht publiziert wurden wie zum Beispiel aus der Schweiz. Das Leukämieerkrankungsrisiko für Kinder, die < 50 m von ≥ 200 kV-Freileitungen lebten, war nicht signifikant leicht erhöht im Vergleich zu Kindern, welche mehr als 300 m entfernt wohnten (relatives Risiko: 1.33; 95% KI: 0.92 bis 1,93). Das Risiko war bei unter 5-jährigen Kindern etwas höher (OR: 1.65; 95% CI: 1.02–2.67). In acht Studien, welche auch die Magnetfelder gemessen oder berechnet hatten, wurde kein Zusammenhang mit NF-MF beobachtet. Aus der Schweiz wurden 1’109 Kinderleukämiefälle, diagnostiziert zwischen 1985 und 2014, sowie 5'545 Kontrollkinder eingeschlossen. In den Schweizer Daten wurde kein erhöhtes Risiko beobachtet für

Kinder innerhalb von 50 m von irgendeiner Freileitung und ein nicht-signifikant erhöhtes Risiko (relatives Risiko: 1.34; 95% KI: 0.50 bis 3.59) bei Höchstspannungsleitungen (>200 kV).

Amoon et al. (2022) führten eine gepoolte Analyse der vier neuesten epidemiologischen Studien zu Kinderleukämie und Magnetfeldexposition durch. Diese Studien aus Dänemark (Pedersen et al., 2015), Italien (Salvan et al., 2015), Kalifornien (Kheifets et al., 2015) und Grossbritannien (Bunch et al., 2016) waren nicht Bestandteil von früheren gepoolten Analysen, welche Hinweise auf ein erhöhtes Kinderleukämierisiko fanden (Kheifets, Ahlbom, Crespi, Draper, et al., 2010). Es wurden individuelle Daten von 24'994 Kinder mit Leukämie und 30'769 Kontrollkinder eingeschlossen. Im Gegensatz zu früheren gepoolten Analysen wurde hier kein erhöhtes Leukämierisiko bei Kindern beobachtet und es wurde auch ein Rückgang des Risikos im Laufe der Zeit verzeichnet. Die Autoren meinen, der Befund könnte auf methodische Probleme, Zufall oder auf einen tatsächlichen Rückgang des Effekts zurückzuführen sein. Es ist jedoch zu beachten, dass das Ergebnis dieser Analyse hauptsächlich von der britischen Studie bestimmt wurde, welche deutlich mehr als die Hälfte der Daten beigesteuert hat. Beide Resultate wurden auch in den britischen Daten alleine gefunden (Swanson et al., 2019).

Eine Reihe von weiteren neuen Studien hat das Kinderkrebsrisiko evaluiert, wenn die Eltern im Beruf hohen Magnetfeldern ausgesetzt waren. In einer gepoolten Analyse von 11 Fall-Kontroll-Studien mit 9'723 Kinderleukämiefällen und 17'099 Kontrollkinder wurde sowohl für mütterliche wie auch väterliche berufliche Exposition kein Zusammenhang beobachtet (Talibov et al., 2019).

4.3.1.4 Hypothesen zu Störgrössen

Zu möglichen intervenierenden Variablen wurden in den Jahren bis 2017 einige Studien veröffentlicht. Eine Variable ist der sozioökonomische Status (SES), eine andere Kontaktströme, eine Dritte die Ionen aus der Koronaentladung.

Hinsichtlich SES: Es wurde beobachtet, dass das Leukämierisiko bei Familien mit höherem sozioökonomischem Status grösser ist. Eine Erklärung für diesen Befund könnten Infektionen sein. Zwei verschiedene Argumente sind vorgebracht worden. Zum einen vermutete man (Kinlen, 1997) schon vor 20 Jahren, dass Eltern mit höherem SES mehr und verschiedenartigere soziale Kontakte aufweisen als Eltern mit tieferem SES. Mehr Sozialkontakte bedeuten höheres Infektionsrisiko, dem dann auch die Kinder zu Hause ausgesetzt sind. Greaves (2006) postuliert, dass die frühe Kindheit (erste zwei Lebensjahre) für die Entwicklung des Immunsystems zentral ist und in Familien mit höherem SES die Kleinkinder wegen grösserer Sorgfalt bei der Hygiene „besser" gegenüber Keimen geschützt werden als in Familien mit tieferem SES. Dies aber schwächt die Immunabwehr, so dass das Risiko für Leukämie im späteren Kindesalter bei Familien mit höherem SES grösser ist (unbestritten bleiben die Vorteile von Hygienemassnahmen zur Minderung anderer gesundheitlicher Risiken). Die zwei Erklärungen schliessen sich gegenseitig nicht aus.

In zwei Studien (Keegan et al., 2012), (Kroll et al., 2011) wurde der Zusammenhang zwischen SES und Kinderleukämie bestätigt. Eine systematische Übersichtsarbeit kommt dagegen zum Schluss, dass die Resultate heterogen sind und falls es einen Zusammenhang gibt, dieser schwach ausgeprägt sei und sich auf die 10-20% am meisten sozial benachteiligten Gruppen bezieht (Adam, Rebholz, et al, 2008) In der Studie von Bunch et al. (2014) wird die Beobachtung, dass der Zusammenhang zwischen Leukämierisiko und Magnetfeldexposition während der letzten 40 Jahre abgenommen hat, mit der SES-Hypothese erklärt: die Autoren vermuten, dass die wohlhabenderen Familien überproportional häufig aus Wohngebieten in der Nähe von Hochspannungsleitungen weggezogen sind, was die Anzahl Leukämiefälle im Umfeld dieser Anlagen tendenziell senkt. Allerdings sind damit die erhöhten Werte in den Ausgangsjahren nicht erklärt. Es ist auch nicht plausibel, dass SES einen solch starken konfundierenden Einfluss haben kann, da der Zusammenhang zwischen SES und Kinderleukämie als nicht erwiesen gilt. Es wird hingegen vermutet, dass methodische Problem bei der Auswahl der Kontrollen, die Ergebnisse beeinflusst haben könnten (Kheifets et al., 2005). Die Gesamtsachlage scheint

weiterhin unklar; siehe dazu auch: Adam et al. (2008).

Hinsichtlich Kontaktströme: Anfang der 2000er Jahre wurde von Kavet und Kollegen die Hypothese vorgebracht, dass Kontaktströme (insbesondere Kriechströme auf leitfähigen Wasserrohren; siehe 2.2.5) das Leukämierisiko im Umfeld von Hochspannungsleitungen erklären könnten.

Ist ein Haus durch Kriechstrom auf Wasserrohren belastet, so ist der elektrische Strom, der über ein badendes Kind, das eine Wasserarmatur berührt, fliesst zwar über alles gesehen klein, kann aber im Knochenmark des Unterarms eine Stärke erreichen, die biologische Prozesse beeinflussen kann. Das könnte die bislang ungelöste Beobachtung erklären, warum das Leukämierisiko von Kindern im Umfeld von HSL erhöht ist. Kontaktströme sind prinzipiell eine plausible Erklärung füreine (indirekte) Wirkung, denn: (i) sie können im Unterschied zu den durch die Magnetfelder induzierten elektrischen Feldstärken im Körper, eine Stärke annehmen, die biologisch relevant ist. (ii) Messungen zeigten, dass die in Haushalten anzutreffenden Berührungsspannungen an Wasserleitungen in der Nähe von HSL grösser sind als andernorts: Kavet et al. haben in mehreren Messstudien einen signifikanten Zusammenhang zwischen Magnetfeldern und Kontaktströmen (Spannungen) in Häusern festgestellt (Kavet et al. (2000), (Kavet and Zaffanella (2002), (Kavet et al. (2004), (Kavet (2005), (Kavet et al., 2011). Dieser Zusammenhang ist allerdings wenig robust. Bei Does et al. (2011) ist er schwach ausgeprägt, Lilien et al. (2009) fanden gar keinen Bezug und Kavet et al. (2011) betonen in ihrer neuesten Publikation, dass die grosse Mehrzahl der Kontaktströme in Haushalten konduktiv (und nicht induktiv über HSL) verursacht ist. Manche dieser Studien sind klein und haben nur beschränkte Aussagekraft. Daher sind weitere Arbeiten zum Thema nötig, damit die Frage abschliessend beurteilt werden kann.

Chan et al. (2013) und Chan et al. (2015) erhalten bei ihren Simulationen mit hochauflösenden und nach Gewebearten differenzierten Körpermodellen bei einem Kontaktstrom von 0.5 mA (das liegt am oberen Rand der von Kavet und Kollegen bezifferten Kontaktströme badender Kinder) interne elektrische Feldstärken von mehreren V/m für Muskel- und Fettgewebe, sowie 0.5-1 V/m für Nervengewebe. Die Werte für Kinder liegen dabei etwa um das doppelte höher als diejenigen für Erwachsene und sie übersteigen die ICNIRP Basisgrenzwerte teilweise massiv. Simulationen von Tarao et al. (2013) zeigen geringere Werte. Ein Kontaktstrom von 0.5 mA bewirkt danach körperinterne elektrische Feldstärken, je nach Gewebeart und Lokalisierung, im Bereich von einigen Zehntel V/m wobei Spitzenwerte um 1 V/m auftreten können. Im Unterschied zu den Kontaktströmen induziert ein externes, 10 µT starkes 50 Hz-Magnetfeld ein tausend bis mehrere tausend Mal schwächeres elektrisches Feld im Knochenmark. Einschränkend gilt es festzuhalten, dass die Variabilität unter den dosimetrischen Simulationen noch recht gross ist und die Daten deshalb mit der gebührenden Vorsicht zu betrachten sind.

Gemäss WHO (2007) muss ein elektrisches Feld im Knochenmark mindestens 10 mV/m betragen, um biologisch bedeutsam zu sein, gemäss NIEHS (1999) genügt 1 mV/m. Die durch Körperströme erzeugten Feldstärken liegen damit grob gesehen im Bereich der biologischen Wirksamkeit, die durch externe Magnetfelder induzierten körperinternen elektrischen Feldstärken hingegen nicht.

Leukämie entsteht im blutbildenden System (Knochenmark), indem die normale Entwicklung von Blutzellen im noch nicht ausgereiften Stadium entartet und es so zu einer unkontrollierten Vermehrung der Zellen kommt. Neben den Stammzellen besteht das blutbildende System noch aus Binde- und Stützgewebe (sog. Stroma). Stammzellen sind sehr klein. Selbst Feldstärken von 1 V/m können die Membranspannung nicht wesentlich beeinflussen (McLeod, 1992). Anders sieht es bei den bis hundert Mal grösseren Zellen des Stroma aus. Ein Feld von 0.1 V/m kann hier Membranspannungen von 0.1-1 mV aufbauen (Kavet et al., 2008), (Dawson et al., 2001). Chiu and Stuchly (2005) berechneten eine ähnliche Grössenordnung: eine interne Feldstärke um 1 V/m kann Transmembranpotenziale bis einige mV erzeugen.

Wie bereits gesagt reicht nach NIEHS (1999) 1 mV für eine biologische Wirkung. Im Vergleich zum

Ruhepotenzial von über 50 mV ist das wenig, soll aber ausreichend gross sein, um auf zelluläre biochemische Prozesse einwirken zu können (etwa Beeinflussung der Signalübermittlung). Alle diese im Wesentlichen auf Modellannahmen beruhenden Argumente und Grössenordnungen sollten mit Vorsicht interpretiert werden; nicht zuletzt, weil die Gültigkeit der Kontaktstrom-Hypothese wissenschaftlich nicht bewiesen ist und epidemiologische Daten zum postulierten Zusammenhang kaum vorhanden sind.

Ähnliches liegt vor für die Hypothese, dass Ionen der Koronaentladung mit dem Wind in die Umgebung getragen werden und sich dort an Luftschadstoffe anlagern, insbesondere Benzol, welches als Kanzerogen für Leukämie bekannt ist. Weil elektrisch nicht-neutrale Luftschadstoffe besser vom Organismus absorbiert werden, könnte demnach das Risiko für Leukämie in der Nähe von Hochspannungsleitungen grösser sein als im weiteren Umfeld. Die Hypothese wurde von einer englischen Forschungsgruppe formuliert und untersucht (Fews et al., 1999). Eine Studie von Swanson et al. (2014), in der die Windrichtung modelliert und statistisch berücksichtigt wurde, konnte diese Hypothese nicht bestätigen. Jeffers (2015) kam mit einem differenzierteren Verbreitungsmodell zu demselben Befund. Auch wurde die Bedeutung im Vergleich mit Hintergrundbelastungen und mit Umwelteinflüssen beispielsweise des Strassenverkehrs relativiert (Jayaratne et al., 2008), (Jayaratne et al., 2015). Nicht zuletzt sei darauf hingewiesen, dass Koronaionen v.a. bei Gleichstromleitungen (HGÜ) gebildet werden und räumlich weiter diffundieren als bei Wechselstromleitungen (Fews et al., 2002). Auch ist zu erwähnen, dass der Zusammenhang zwischen ionisierten Luftschadstoffen, Atemwegserkrankungen und Leukämie weitgehend ungeklärt ist, siehe dazu etwa: Alexander et al. (2013).

Neue Studien seit 2017

Seit 2017 haben mehrere Publikationen evaluiert, ob der Zusammenhang zwischen Kinderleukämie und NF-MF auf Störgrössen zurückzuführen ist. In einer Review von fast 70 Publikationen wurde wenig Hinweise für ein Confounding gefunden (Kheifets, Swanson, et al., 2017). Der Einfluss der Wohnsitzmobilität auf das Studienergebnis ist komplex und kann sich als Selektionsbias, Confounding oder Expositionsmissklassifikation manifestieren. Eine vertiefte Analyse anhand der kalifornischen Fall-Kontrollstudiendaten kam jedoch zum Schluss, dass es unwahrscheinlich ist, dass die Wohnsitzmobilität zu einem Bias führt (Amoon, Oksuzyan, et al., 2018), obwohl in einer zusätzlichen Simulationsstudie ein gewisser Effekt gefunden wurde (Amoon et al., 2019). Die Art des Hauses ist ebenfalls ein unwahrscheinlicher Confounder für Kinderleukämie und NF-MF (Amoon, Crespi, et al., 2020).

Viele Studien zu Kinderleukämie beruhen entweder auf der Distanz des Wohnortes zur nächsten Hochspannungsleitung oder des NF-MF, welches entweder berechnet oder modelliert wurde. Amoon, Swanson, et al. (2020) haben anhand von Daten aus Grossbritannien und den U.S. den Zusammenhang dieser beiden Grössen evaluiert. Sie kamen zum Schluss, dass die berechneten NF-MF mit zunehmender Entfernung von Freileitungen linear abnehmen, insbesondere bei Freileitungen von 200 kV und darüber. Diese Ergebnisse sind in den britischen Daten stärker ausgeprägt. Innerhalb von 100 m korreliert der Abstand zu Hochspannungsleitungen stark mit den berechneten NF-MF, und beide können als Proxy für das jeweils andere Mass genommen werden.

In diesem Zusammenhang wurde eine Neu-Analyse der kalifornischen Daten durchgeführt und es zeigte sich, dass das erhöhtes Kinderleukämierisiko auf die Gruppe beschränkt war, die sowohl sehr nahe an Hochspannungsleitungen (< 50 m) als auch hohen berechneten Feldern (≥0,4 µT) ausgesetzt war (Odds Ratio: 4.06, 95% CI 1.16, 14.3) (Crespi et al., 2019). Ausserdem waren hohe berechnete Felder (≥ 0,4 µT), die ausschliesslich auf Niederspannungsleitungen (< 200 kV) zurückzuführen waren, nicht mit einem erhöhten Risiko verbunden. Die Autoren sehen in den Ergebnissen einen Hinweis, der gegen Magnetfelder als alleinige Erklärung für den Zusammenhang zwischen Entfernung und Leukämie im Kindesalter spricht und dass auch andere Eigenschaften von Hochspannungsleitungen eine Rolle spielen könnten. Sie geben aber keine konkreten Mutmassungen ab, was das sein könnte. Es ist auch denkbar, dass es sich bei der Gruppe in der Nähe von Hochspannungsleitungen

mit hohen berechneten Feldern um eine Gruppe handelt, die besonders stark exponiert ist. Eine solche Erklärung ist plausibel mit dem hohen beobachteten Effektschätzer.

4.3.1.5 Befunde aus experimentellen Tier- und Zellstudien

Obwohl die Entstehung von kindlicher Leukämie möglicherweise in einem kausalen Zusammenhang mit NF-EMF steht, gibt es nach wie vor wenige experimentelle Studien, die dem gezielt nachgegangen sind. Dies auch weil sich bis heute kein wissenschaftlich fundiertes Konzept über die Wirkungsweise von EMF durchgesetzt hat (Juutilainen et al., 2018; Karimi et al., 2020; Maes & Verschaeve, 2016a). Drei dieser kürzlich veröffentlichten Publikationen sind aus dem von der Europäischen Kommission unterstützten Forschungsprogramm ARIMMORA (siehe Kapitel 4.2.7) hervorgegangen (Campos-Sanchez et al., 2019; Kapri-Pardes et al., 2017; Manser et al., 2017). In der Studie von Campos-Sanchez wurde ein neues Maus-Modell für die häufigste Form der Kinderleukämie (B-ALL: akute lymphatische Leukämie der B-Zellen) entwickelt, die sich durch eine übermässige Vermehrung von nicht-ausreifender Leukozyten manifestiert (Campos-Sanchez et al., 2019). Dazu wurde genetisch eine Vorstufe der Leukämie (*ETV6-RUNX1*-Fusion) geschaffen, was die Frequenz der Erkrankung an B-ALL erhöht. In einem Pilotexperiment mit einer kleiner Anzahl Tiere wurden die heranwachsenden Mäuse bis zum Alter von drei Monaten mit einem intermittierenden (10/5 Min an/aus) 50 Hz NF-MF bei 1.5 mT Feldstärke für 20 Std/Tag exponiert und danach lebenslang auf die Entwicklung einer Leukämie untersucht. Dabei trat ein Fall von B-ALL in den exponierten Tieren auf (n=34) während keiner in den Kontrolltieren (n=27) beobachtet wurde. Im Weiteren wurden in exponierten Tieren ein Trend zu mehr B-Zellen und weniger T-Zellen festgestellt, was auf eine Beeinträchtigung des Immunsystems hindeuten könnte. Allerdings handelte es sich bei den Kontrollen um sogenannte Käfigkontrollen und nicht scheinexponierte Mäuse und die limitierte Gruppengrösse lässt noch keine statistisch fundierte Schlussfolgerung bezüglich des Einflusses auf die Leukämieentstehung zu.

Das Ramazzini-Institut in Bologna, Italien, hat lebenslange «Bioassays» zur Krebsentstehung in Ratten durchgeführt (siehe auch Kapitel 4.3.2), die schon vor der Geburt einem 50 Hz NF-MF (5, 20, 100, 1000 µT) ausgesetzt waren und dabei auch das Auftreten von Leukämien analysiert. Diese Resultate wurden in mehreren Publikationen veröffentlicht (Bua et al., 2018; Soffritti & Giuliani, 2019; Soffritti, Tibaldi, Padovani, Hoel, Giuliani, Bua, Lauriola, Falcioni, Manservigi, Manservisi, & Belpoggi, 2016; Soffritti, Tibaldi, Padovani, Hoel, Giuliani, Bua, Lauriola, Falcioni, Manservigi, Manservisi, Panzacchi, et al., 2016). Es wurde beobachtet, dass die alleinige NF-MF-Exposition keine Zunahme von Leukämien auslöste. In Kombination mit bekannten Leukämie-fördernden akuten Behandlungen wie Formaldehyd oder Gammastrahlung wurde hingegen von einer signifikanten Zunahme von Leukämien in männlichen Ratten berichtet, was auf eine Beschleunigung des kanzerogenen Prozesses durch NF-MF hindeuten könnte.

In einigen Studien zu kultivierten Zellen wurden zudem Mechanismen nachgegangen, die zur Entstehung von Leukämien beitragen könnten. Kapri-Pardes untersuchten den Einfluss von 50 Hz NF-MF (0.15, 0.5, 1, 10 µT) auf die Aktivierung von Signalwegen der Zellen, die eine zentrale Rolle bei Regulierung der Zellproliferation spielt und typischerweise in entarteten Krebszellen überaktiv sind (Kapri-Pardes et al., 2017). Die Autoren fanden, dass der Signalweg der mitogen-aktivierten Protein-Kinase (MAPK), aber nicht andere (p38, JNK oder AKT), unmittelbar nach Expositionsbeginn aktiviert wurde, was selbst bei tiefen Feldstärken von 0.15 µT nachweisbar war. Diese Aktivierung wurde in verschiedene Zelllinien gefunden, wobei nichttransformierte Zellen im Allgemeinen mehr auf die Exposition ansprachen als Krebszellen. Auch wurde eine gewisse Dosis-Wirkungs-Abhängigkeit gefunden und postuliert, dass die ROS-produzierende NADH-Oxidase eine übergeordnete Rolle als EMF-Sensor spielt. Allerdings war die Aktivierung der MAPK durch das NF-MF nicht sehr ausgeprägt und verhielt sich bezüglich intrazellulärer Verteilung anders als die Positivkontrolle, sodass sie physiologisch und pathologisch als nicht relevant eingestuft wurde. Die Autoren schlussfolgerten diesbezüglich:

"However, the small increase in ERK1/2 phosphorylation is probably insufficient to affect proliferation and oncogenic transformation. Therefore, the results cannot be regarded as proof of the involvement of ELF-MF in cancer in general or childhood leukemia in particular."

Von einer Verstärkung der MAPK-Aktivierung und der ROS-Produktion durch die Exposition mit einem 2 mT 50 Hz NF-MF wurde auch in einer anderen, therapeutisch ausgerichteten, Zellstudie berichtet (Provenzano et al., 2018). Dies wurde in NB-4 Leukämiezellen beobachtet, die durch «all-trans Retinolsäure» (ATRA) zum Ausdifferenzieren angeregt wurden. In diesem Zellmodel verstärkte NF-MF dosis-abhängig den Ausdifferenzierungsprozess einer entarteten Leukämiezelle.

Keinen Einfluss eines 1 mT 50 Hz NF-MF (5/10 an/aus) auf die Ausdifferenzierung von gesunden menschlichen Blutstammzellen wurde hingegen in einer weiteren Studie beobachtet (Manser et al., 2017). Ziel dieser Arbeit war, epigenetische Veränderungen durch die NF-MF-Exposition zu untersuchen. Veränderte Histon-Codes und DNS-Methylierung sind charakteristisch für Kinderleukämien, ebenso wie für viele andere Tumortypen, und gelten neben Mutationen und genetischer Instabilität als Treiber des kanzerogenen Prozesses. Die Autoren fanden weder in Leukämiezellen noch in den differenzierenden Immunzellen einen Einfluss des NF-MF auf die epigenetischen Profile. Allerdings gab es Hinweise, dass ein Unterschied in der Variabilität der epigenetischen Information zwischen NF-MF- und scheinexponierten Zellen existiert, der potentiell die Reaktion auf weitere Einflüsse verändern könnte.

4.3.1.6 Bewertung

Neuere epidemiologische Studien finden tendenziell kleinere oder gar keine Zusammenhänge zwischen Kinderleukämie und NF-MF Exposition am Wohnort. Dies wird teilweise als Hinweis interpretiert, dass es keinen kausalen Zusammenhang gibt und früher ein anderer Faktor, welcher mit der Nähe zu Hochspannungsleitungen assoziiert ist, für eine Scheinkorrelation gesorgt hat. Ein solcher Faktor konnte jedoch bisher nicht identifiziert werden und es ist alternativ auch möglich, dass die neuen Studien wegen methodischen Problemen keine Assoziation mehr finden. Eine mögliche Erklärung ist, wenn auch bisher nicht mit empirischen Daten gestützt, dass in den neuen Fall-Kontrollstudien bei den Kontrollen ein Selektionsbias stattgefunden hat, im Sinne, dass aufgrund der geringeren Teilnahmerate bei nichtexponierten Kontrollkinder einen Selektionsbias stattgefunden hat. So ist bekannt, dass sozioökonimisch besser gestellte Personen eher an Studien mitmachen als schlechter gestellte. Da bei ersteren Kinderleukämie tendenziell häufiger auftritt, würde damit die Kinderleukämierate bei der Kontrollpopulation überschätzt werden. Bei den exponierten Kindern ist das weniger wahrscheinlich, weil dort typischerweise die Teilnahmerate hoch ist aufgrund der subjektiven Wichtigkeit des Studienthemas. Dies sind jedoch rein theoretische Überlegungen.

Trotz dieser Unklarheit bleibt insgesamt aber die Einschätzung der IARC, dass niederfrequente Magnetfelder „möglicherweise kanzerogen“ sind, aktuell. Das bestätigen auch die Resultate des ARIMMORA Projekts der EU (Schuz et al., 2016). Einzelne Wissenschaftler vertreten allerdings pointiertere Meinungen, wie etwa das folgende Beispiel zeigt.

Carpenter schreibt in einem Review Artikel (Carpenter, 2019):

“*Several meta-analyses dating from about 2000 all report significant associations between exposure and risk of leukemia. By examining subsequent reports on childhood leukemia it is clear that almost all government or independent studies find either a statistically significant association between magnetic field exposure and childhood leukemia, or an elevated risk of at least OR=1.5, while almost all industry supported studies fail to find any significant or even suggestive association.”.*

Dabei stützt er sich u.a. auf eine eigene Meta-Analyse. Diese ist aber nicht-systematisch in der Auswahl der Studien und auch die Zuschreibung von Industriefinanzierung erfolgte anhand von unklaren Kriterien und ist somit eher der aktivitistischen Wissenschaft zuzuordnen.

Eine besondere Schwierigkeit bei der Erforschung dieses Themas ist, dass die Expositionssituation und die Krankheit sehr selten sind. So finden einzelne Studien kaum je einen signifikanten Zusammenhang. Abbildung 20 zeigt mit allen wichtigeren Studien, d.h. den Einzelstudien der gepoolten Analysen von Greenland et al. (2000) und von Kheifets, Ahlbom, Crespi, Draper, et al. (2010) sowie den zuvor gezeigten neueren Studien einen Risikoschätzer von 1.20 (95% CI = 1.08–1.34; Heterogenitätstest: I^2 = 0.0%, p = 0.51) für die jeweils höchste Expositionskategorie. Dies ist in den meisten Studien eine Exposition höher als 0.3 / 0.4 µT (oder näher als 50 m von einer HSL entfernt wohnen) im Vergleich zu wenig exponierten Kindern (< 0.1 µT).

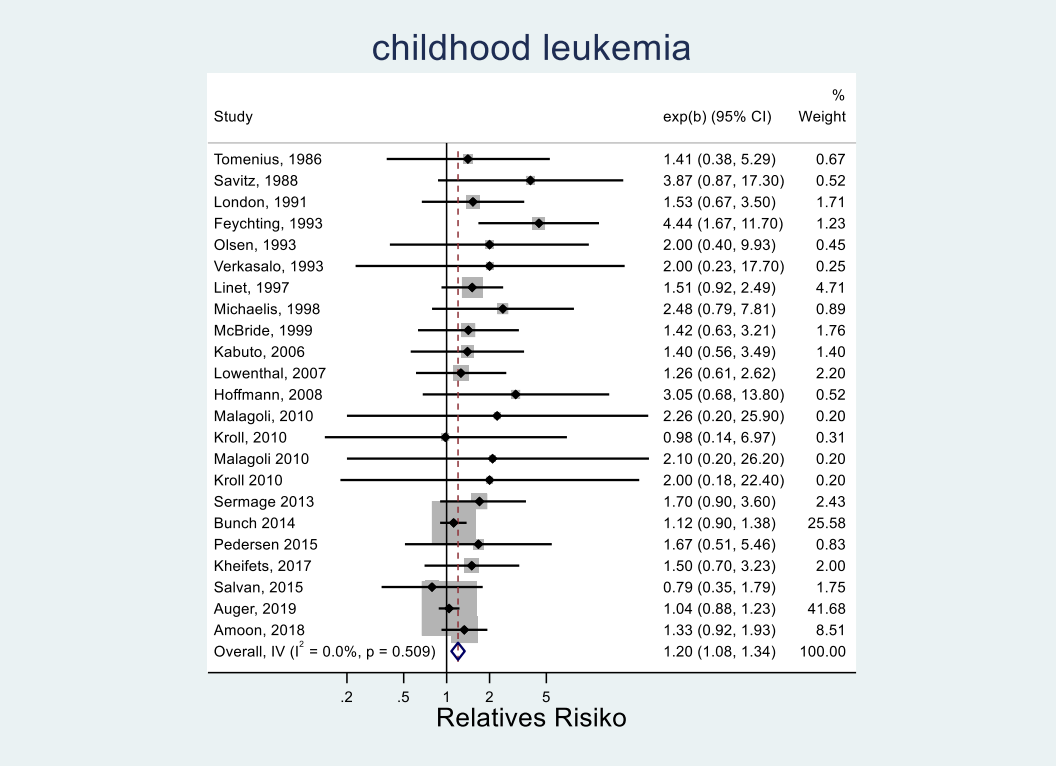


Abbildung 20: Meta-Analyse kindliches Leukämierisiko mit festen Effekten aller Studien der gepoolten Analysen von Greenland et al. (2000) und Kheifets, Ahlbom, Crespi, Draper, et al. (2010) – zwei Studien ohne Kontrollen und zwei Studien ohne Fälle nicht gezeigt – sowie wichtiger neuerer Untersuchungen.

Ohne Berücksichtigung von Bunch et al. (2014), die wegen der Rekrutierung der Kontrollen problematisch scheint, sowie Auger (nur Transformer berücksichtigt) und Amoon (nur Distanzanalyse und die meisten Daten dieser Studie sind als Magnetfeldstudie in der Meta-Analyse enthalten) ergibt sich ein Risikoschätzer von OR = 1.60 (95% CI = 1.29–2.00), siehe Abbildung 21. Eine zentrale Schwierigkeit bei diesen epidemiologischen Arbeiten ist die korrekte Erfassung der Exposition. Meistens ist nichtdifferenzielle Fehlklassifikation zu erwarten (ein ähnlich grosser Prozentsatz der Fälle und der Kontrollen wird in eine falsche Expositionsklasse eingeteilt), welche in eine Unterschätzung des Risikos, wenn es dieses gibt, mündet.

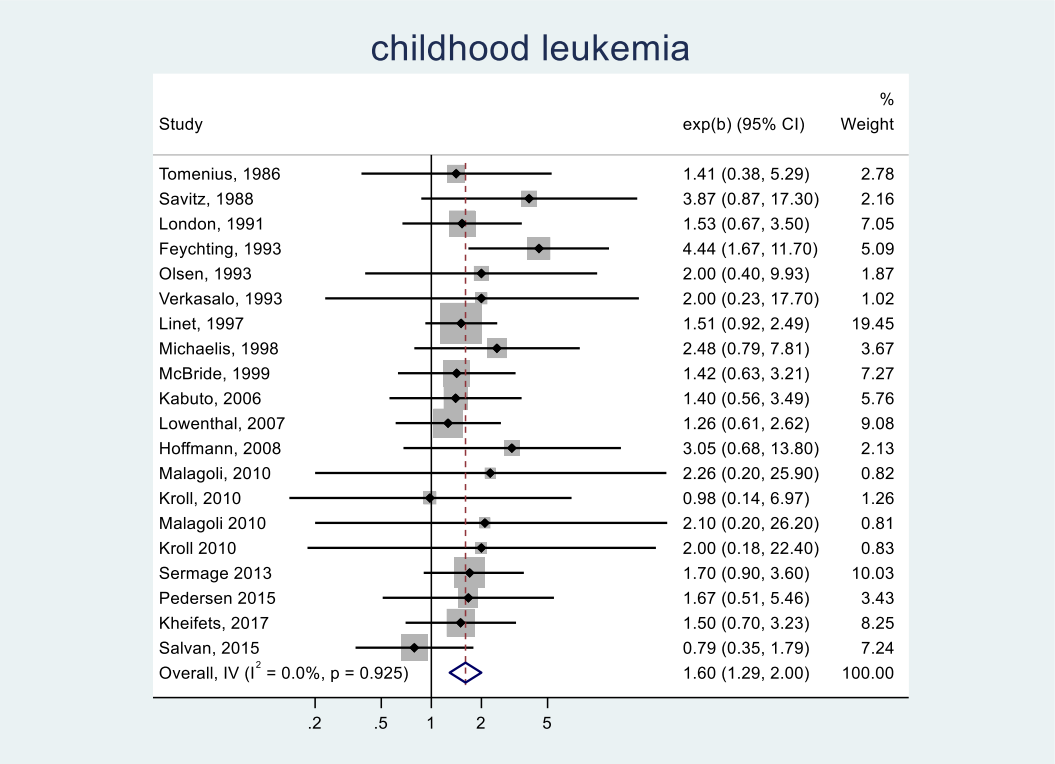


Abbildung 21: Meta-Analyse kindliches Leukämierisiko mit festen Effekten aller Studien der gepoolten Analysen von Greenland et al. (2000) und Kheifets, Ahlbom, Crespi, Draper, et al. (2010) ohne Bunch, Auger, Amoon.

Es gibt aber auch einige Argumente, die gegen einen kausalen Zusammenhang sprechen: (i) das Fehlen von überzeugenden Daten aus Tier- und Zellversuchen sowie (ii) von Erklärungen zu möglichen Wirkmechanismen. Diesbezüglich hat sich die Datenlage auch in den Jahren 2017-2021 kaum verändert. Immerhin steht jetzt ein neues Mausmodell zur Verfügung (Campos-Sanchez et al., 2019), um den kausalen Zusammenhang zwischen kindlicher Leukämie und NF-MF-Exposition spezifisch zu untersuchen. Allerdings bedeutet fehlende Evidenz für ein Risiko nicht, dass ein solches damit ausgeschlossen ist. Aus diesem Grund ist die Beurteilung der IARC, niederfrequente magnetische Felder als 2B-Risiko (möglicherweise kanzerogen) einzustufen, nachvollziehbar. Die Forschung der letzten Jahre hat, wie wir oben zu zeigen versucht haben, wenig an dieser Einschätzung geändert, so dass sie insgesamt ihre Gültigkeit behält.

Mit grosser Sicherheit ist das absolute Risiko (die Anzahl zusätzlicher jährlicher Leukämieerkrankungen von Kindern aufgrund von Hochspannungsleitungen) vergleichsweise klein, auch wenn ein nicht-konservativer Risikoschätzer zugrunde gelegt wird: die Grössenordnung für die Schweiz dürfte bei wenigen Fällen pro Jahr liegen. In der gängigsten Annahme (ungefähre Verdoppelung des Risikos bei Magnetfeldexpositionen über 0.4 µT) beläuft sich die Zahl, falls das Risiko real ist, auf 1–2 Fälle pro Jahr. Ein Grund für diese „kleine“ Zahl ist, dass nur wenige Kinder gegenüber magnetischen Flussdichten höher als 0.4 µT exponiert sind. Schlussfolgerungen für das Risikomanagement sind uneinheitlich (Maslanyj et al., 2010).

4.3.2 Andere Krebsarten

4.3.2.1 Hirntumore bei Kindern

Mezei et al. (2008) analysierten in einer Metastudie 13 Artikel zum Zusammenhang zwischen Hirntumoren bei Kindern und niederfrequenter Magnetfeldbelastung und fanden keine Hinweise auf erhöhte Risiken. 2010 publizierten Kheifets, Ahlbom, Crespi, Feychting, et al. (2010) eine gepoolte Analyse, in der 10 Studien – teilweise dieselben wie Mezei et al. (2008) – berücksichtigt wurden. Dies waren: (Savitz et al., 1988), (Feychting & Ahlbom, 1993), (Olsen et al., 1993), (Verkasalo et al., 1993), (Tynes & Haldorsen, 1997), (Preston-Martin et al., 1996), (UKCCS, 1999), (Schuz, Kaletsch, et al., 2001), (Kroll et al., 2010), (Saito et al., 2010). Die exponierten Fälle wurden in 5 Expositionskategorien mit Schritten von jeweils 0.1 µT eingeteilt. Die Autoren kommen zum Schluss (p. 759):

"Although our results contained hints of a risk increase in some subanalyses, as is expected when numerous analyses are performed, these increases were small, highly dependent on particular studies included in the subset, and inconsistent with regard to increasing exposure for all models chosen. Taken as a whole, our results provide little evidence for an association between ELF-MF exposure and childhood brain tumors".

Zur grundsätzlich gleichen Beurteilung kommt (Schuz, 2011) in einer Literaturarbeit (p. 339):

„Recent pooled analyses for childhood brain tumour show little evidence for an association with ELF-MF, also at exposures ≥0.4 µT".

(Bunch et al., 2014), kommen in Ihrer Studie zu Hochspannungsleitungen und Krebs bei Kindern ebenfalls zu einem entwarnenden Fazit (p. 3):

„In all subsequent analyses, there were some sporadic elevated or reduced risks for CNS tumours in some year/distance categories, and some of these are statistically significant. To a lesser extent, this is also the case for 'other solid tumours'. However, these variations in risks do not form any pattern, and we consider them likely to be chance findings".

(Bunch et al., 2015) untersuchten an derselben Population auch den Zusammenhang mit Magnetfeldexpositionen von unterirdisch verlegten Hochspannungskabeln. Die Anzahl der stark exponierten Fälle (0-50 m Entfernung vom Trassee) betrug für Tumore des zentralen Nervensystems (u.a. Hirntumore) lediglich 25, für andere Tumorarten (ausser Leukämien) 39. Die Aussagekraft der Studie ist damit limitiert. Die Autoren stellten für Tumore des zentralen Nervensystems ein erhöhtes Risiko bei den stark exponierten Fällen fest. Bei allen anderen Tumorarten gab es keine Auffälligkeiten.

(Parodi et al., 2014) untersuchte, welche Umwelt-Expositionen der Mütter während der Schwangerschaft das Hirntumorrisiko ihrer Kinder erhöhen würden. Niederfrequente Magnetfelder waren dabei eine Expositionskategorie. Signifikante Assoziationen ergaben sich u.a. zu aromatischen Kohlenwasserstoffen wie Benzol, jedoch nicht zu NF-Magnetfeldern. Dieses Resultat entspricht dem früheren Befund einer deutschen Fall-Kontroll-Studie (Hug et al., 2010), in der kein Zusammenhang zwischen elterlicher Magnetfeldbelastung (berufliche Exposition) in der Zeit bevor ein Kind zur Welt kam und dem späteren Hirntumorrisiko des Kindes identifiziert werden konnte. Hingegen hat die kanadische Studie von (Li et al., 2009) einen Zusammenhang zwischen mütterlicher Magnetfeldexposition während der Schwangerschaft und dem Hirntumorrisiko von Kindern gezeigt. Die Daten sind jedoch nicht einfach zu interpretieren und müssen als Verdachtsmomente angesehen werden.

<u>Neue epidemiologische Studien seit 2017</u>

In einer grossen und aufwendig konzipierten Fall-Kontroll-Studie («MOBI-Kids») wurde anhand von Daten aus 14 Ländern untersucht, ob die Nutzung von Mobil- und Schnurlostelefonen und die daraus resultierende Exposition mit HF-EMF und NF-MF das Risiko von Hirntumoren bei jungen Menschen erhöht (Castano-Vinyals et al., 2022). NF-MF entstehen durch die Batterieströme, welche abhängig

von der Variabilität des Stromflusses als zeilich variierende Magnetfelder emittiert werden. Das Studienkollektiv setzte sich zusammen aus 899 Menschen im Alter von 10 bis 24 Jahren, bei denen zwischen 2010 und 2015 ein Hirntumor diagnostiziert wurde, und 1'910 Kontrollpersonen im selben Alter und aus derselben Region, bei denen zum entsprechenden Zeitpunkt eine Blinddarmoperation durchgeführt wurde. Daten zur Nutzung von Mobil- und Schnurlostelefonen sowie anderen relevanten Faktoren wurden rückwirkend mit den Betroffenen und/oder den Eltern anhand von Fragebogen-Interviews erhoben. Zusätzlich wurde eine EMF-Dosisberechnung durchgeführt für HF-EMF und für NF-MF. Das Dosismass für im niederfrequenten Bereich war die Stromdichte (in µA*Stunden/m²). Die Exposition ist sehr lokal und daher nicht mit anderen epidemiologischen Studien vergleichbar, die hauptsächlich Ganzkörperexpositionen untersuchten. Details zur NF-MF Exposition durch Mobiltelefone finden sich in (Calderon et al., 2022).

Gemäss den Hauptanalysen korrelierte eine zunehmende Nutzung von Mobil- und Schnurlostelefonen mit einer Abnahme des Risikos für Hirntumoren, insbesondere bei der Gruppe der 15-19-jährigen. Auch wenn die Analyse mit der kumulierten NF- oder HF-EMF-Dosis am Ort des Tumors statt mit der Nutzung durchgeführt wurde, ergaben sich ebenfalls abnehmende Risiken bei zunehmender Dosis. Weitergehende Analysen deuten jedoch darauf hin, dass dieser «schützende» Effekt nicht kausal, sondern methodisch bedingt ist. Die Autorinnen und Autoren schlussfolgern, dass die Studie keinen Anhaltspunkt für einen kausalen Zusammenhang zwischen der Nutzung von Mobil- und Schnurlostelefonen und dem Auftreten von Gehirntumoren in der untersuchten Altersgruppe liefert, auch wenn ein geringes Restrisiko nicht vollständig auszuschliessen sei. Die von öffentlichen Geldern der beteiligten Länder und der EU finanzierte MOBI-Kids-Studie ist in dieser Altersgruppe die bisher grösste Studie zum Thema. Weitere Stärken der Studie sind beispielsweise, dass zahlreiche Sensitivitätsanalysen durchgeführt wurden, und dass sowohl hoch- als auch niederfrequente Strahlung eingeschlossen wurde.

Eine Meta-Analyse zum Hirntumorrisiko bei Kindern durch NF-MF am Wohnort fand ein Erkrankungsrisiko von 0.95 (95% KI: 0.59-1.56) bzw. 1.25 (95% CI: 0.93-1.61) bei Kindern welche zwischen 0.2 und 04 µT bzw. darüber exponiert waren (Seomun et al., 2021). Die Anzahl der exponierten Fälle war in jeder Studie sehr gering, mit insgesamt 28 bzw. 10 Fällen in der mittleren und hohen Expositionskategorie.

4.3.2.2 Weitere Krebsarten bei Kindern

Epidemiologische Studien seit 2017

In einer Meta-Analyse von 21 Fall-Kontrollstudien und einer Kohortenstudie, welche bis Ende 2017 publiziert wurden, war die elterliche berufliche NF-MF-Exposition signifikant mit einem erhöhten Risiko für Tumore des Nervensystems in der Kindheit verbunden (OR=1,11, 95% CI=1,02-1,21) (Su et al., 2018). Dieser Zusammenhang blieb in Studien zu Tumoren des Zentralnervensystems (ZNS) bestehen (OR=1,13, 95% CI=1,02-1,27), nicht aber bei Neuroblastomen (OR=1,02, 95% KI=0,92-1,14). Ausserdem war die mütterliche (OR=1,14, 95% CI=1,05-1,23), nicht aber die väterliche (OR=1,05, 95% CI=0,98-1,13) Exposition signifikant mit Tumoren des Nervensystems assoziiert. Ein erhöhtes Risiko für ZNS-Tumore im Kindesalter war signifikant mit der mütterlichen Exposition verbunden (OR=1,16, 95% CI= 1,06-1,26), aber nicht mit der väterlichen (OR = 1,15, 95% CI = 0,98-1,34) beruflichen ELF-MF-Exposition.

In einer britischen Fall-Kontrollstudie wurden 5’369 Knochentumore (Sarkome) im Kindesalter, die zwischen 1962 und 2010 aufgetreten sind, und 5’380 Kontrollkinder eingeschlossen (Kendall et al., 2020). Es zeigte sich ein signifikanter positiver Zusammenhang zwischen Rhabdomyosarkom und väterlicher Exposition gegenüber EMF (Odds Ratio: 1.67, KI: 1.22 bis 2.28). Es wurde jedoch kein Zusammenhang für alle Knochentumore insgesamt beobachtet. Auch Weichteilsarkome, Osteosarkome

und Ewing-Sarkom waren nicht mit väterlicher NF-MF Exposition assoziiert. Die Autoren merken an, dass die Ergebnisse mit Vorsicht interpretiert werden sollten, da viele Signifikanztests durchgeführt wurden und zufällige Ergebnisse zu erwarten sind.

4.3.2.3 Tumore bei Erwachsenen (häusliche Exposition)

Studien zu Leukämien und Lymphomen bei Erwachsenen unter häuslicher Magnetfeldbelastung liegen nur wenige vor. (Lowenthal et al., 2007) stellten fest, dass das Leukämie- und Lymphomrisiko bei Erwachsenen (n = 783) höher ist, je näher sie in ihrem Leben je einmal (mindestens 3 Monate) bei einer Hochspannungsleitung wohnten. Besonders massgebend waren dabei die frühen Jahre (0–15; OR = 3.2, statistisch signifikant), nicht entscheidend war die kumulierte Exposition (Berücksichtigung der Wohndauer am exponierten Ort). Die Daten sind schwierig zu interpretieren, denn die hohen Risiken (Expositionszeitpunkt im Alter 0–15 Jahre) bezogen sich auf Expositionen in einem Korridor bis 300 m von der Hochspannungsleitung entfernt. Die meisten Fälle waren also wenig bis kaum exponiert. In einer brasilianischen Studie (Marcilio et al., 2011) wurde für die Leukämie (n = 1857) eine (statistisch nicht signifikante) Risikoerhöhung (OR = 1.47) errechnet, insbesondere für Wohnlagen die < 50 m von der nächsten Hochspannungsleitung entfernt waren. Für die anderen Distanzkategorien zeigten sich keine erhöhten Risiken.

In einer grossen Fall-Kontroll-Studie (genauer: Fall-Fall-Studie) aus England (Elliott & Toledano, 2013) wurden die Risiken von vier Krebsarten bei Erwachsenen in Abhängigkeit von Hochspannungsleitungen untersucht. Gegen 8‘000 Leukämiefälle wurden eingeschlossen. Es wurde kein erhöhtes Risiko errechnet.
Hinsichtlich Hirntumorrisiken bei Erwachsenen liegen nur zwei neuere Studien vor, welche die älteren Befunde bestätigen. Auch in den Studien von (Marcilio et al., 2011) und (Elliott & Toledano, 2013) fanden sich keine Zusammenhänge zwischen Hirntumorrisiko und häuslicher Magnetfeldbelastung.

Erren publizierte 2001 eine Metaanalyse zum Zusammenhang zwischen Brustkrebsrisiko (Frauen und Männer) und NF-Magnetfeldbelastung (Erren, 2001). Die statistischen Daten zeigten leicht erhöhte Risiko bei Frauen (RR = 1.12) und bei Männern (RR = 1.37). Die in die Analyse eingegangenen Einzelstudien waren jedoch sehr heterogen, so dass der Autor zum Schluss kam (p. S117):

“*But the lack of consistency in results from the individual studies that contribute to the average statistics, the doubts about whether the differing indices of exposure may really be regarded as valid reflections of the same phenomenon, and the uncertainty about whether covariates and the disease itself were assessed accurately, persuades me that it is premature to conclude that the observations reflect a real, rather than artifactual, association”.*

(Chen et al., 2010) kamen in einer Meta-Analyse von 15 Studien, die zwischen 2000 und 2009 publiziert wurden und ca. 25‘000 Fälle und 60‘000 Kontrollen umfassten, zum Befund, dass niederfrequente Magnetfeldexposition das Brustkrebsrisiko von Frauen nicht erhöht (OR = 0.998). Auch in den mit (Erren, 2001) vergleichbaren Detailanalysen zeigten sich keine Risikoerhöhungen. Sie folgern (p. 569):

“The results showed no significant association between ELF-EMF exposure and female breast cancer risk in total analysis (OR = 0.988, 95% CI = 0.898–1.088) and in all the subgroup analyses by exposure modes, menopausal status, and estrogen receptor status. (…) In conclusion, this meta-analysis suggests that ELF-EMF exposure has no association with the susceptibility of female breast cancer”.

In der erwähnten Studie von (Elliott & Toledano, 2013) zu vier Krebsarten bei Erwachsenen in Abhängigkeit von Hochspannungsleitungen wurde kein erhöhtes Brustkrebsrisiko bei Frauen (n = 29‘902) errechnet. Die Autoren kommen (auch für Leukämien und Brustkrebs) zur Schlussfolgerung (p.189):

“In summary, our results do not support an epidemiologic association of adult cancers with proximity to residential magnetic fields from high-voltage overhead power lines. Unless new biologic hypotheses

emerge, our findings should help to settle a long-standing debate on the safety of residential exposures to extremely low-frequency magnetic fields from high-voltage overhead power lines and adult cancers".

(Schuz, 2013) mahnt allerdings hinsichtlich der Übungsanlage der Studie zu einer gewissen Zurückhaltung, denn die Resultate können nur zum Nennwert genommen werden, wenn die Risiken der als Kontrollen verwendeten Krebsarten nicht mit NF-Magnetfeldern assoziiert sind. Wäre das der Fall, könnten grundsätzlich keine Risikoanstiege nachgewiesen werden, selbst wenn es diese gäbe. (Kato et al., 2015) untersuchten in einer sehr grossen Studie den Zusammenhang zwischen Schilddrüsenkrebs bei Frauen und der Exposition gegenüber Magnetfeldern von Heizdecken. Sie fanden keine Hinweise auf eine Risikoerhöhung aus dem Gebrauch elektrischer Heizdecken.

Neue epidemiologische Studien seit 2017

Khan et al. führten in Finnland eine Kohortenstudie zu NF-MF-Exposition durch Transformatoren in Wohngebäuden und Hautkrebs durch (Khan et al., 2022). In die Studie eingeschlossen wurden 225'492 Personen, die in Gebäuden mit Transformatorräumen lebten. Die durchschnittliche Nachbeobachtungszeit betrug rund 15 Jahre. Auf Grundlage einer Datenbank zu Gebäuden in Finnland mit Transformatoren im Innenbereich wurden 8'617 Personen, die seit mindestens sechs Monaten in einer Wohnung direkt über oder neben dem Transformatorraum lebten, als "exponiert" eingestuft. Diese wohnten alle entweder im Erdgeschoss oder im ersten Stock. Die übrigen Bewohnerinnen und Bewohner des Erdgeschosses und der ersten Etage (n=46'169) sowie der oberen Etagen (n=170'706) bildeten die Vergleichsgruppe. Anhand des finnischen Krebsregisters wurde für die Studienteilnehmenden ermittelt, ob Hautkrebsdiagnosen (Melanome und Plattenepithelkarzinome) ab einem Alter von 18 Jahren oder darüber vorlagen. Bei der Datenanalyse wurde auch das Alter beim Einzug sowie Geschlecht und Geburtsjahr berücksichtigt. Insgesamt war das Risiko für exponierte Personen nicht erhöht, wobei 559 Fälle von Melanomen und 355 Fälle von Plattenepithelkarzinome ausgewertet werden konnten. Allerdings war bei exponierten Personen, die in den Wohnungen wohnten bevor sie das 15. Altersjahr erreichten, das relative Risiko etwa um den Faktor 2.5 erhöht (95% Konfidenzintervall 1.15 bis 5.69). Dieses erhöhte Risiko war hauptsächlich auf die Exposition vor dem 10. Altersjahr zurückzuführen. Dieses Ergebnis basiert jedoch auf nur sieben exponierten und 42 nicht exponierten Melanom-Fällen. Die Gesamtanalyse deutet nicht auf einen Zusammenhang zwischen häuslicher NF-MF-Exposition und Hautkrebs hin. Es kann aber nicht ausgeschlossen werden, dass eine NF-MF-Exposition in der Kindheit in ganz seltenen Fällen die Entwicklung eines Melanoms im späteren Leben begünstigen könnte. Die gleiche Schlussfolgerung wurde in derselben Kohorte auch in Bezug auf Leukämien und Hirntumoren gemacht: insgesamt wurde auch dort kein Zusammenhang beobachtet, jedoch in einer Subgruppenanalyse ein signifikant erhöhtes Risiko von akuter lymphatischer Leukämie basierend auf vier exponierten Fällen in der Kindheit (Khan et al., 2021)

Der Studienansatz ist innovativ, da er keinen Kontakt mit den Studienteilnehmenden erforderte und somit kein Selektionsbias auftreten konnte. Eine Stärke der Studie ist zudem die Expositionsabschätzung, da gut belegt ist, dass die NF-MF-Exposition in Wohnungen in der Nähe von Transformatoren deutlich erhöht ist. In der Analyse wurden nur wenige Störfaktoren berücksichtigt. Da für Bewohner im gleichen Haus systematische Unterschiede in Bezug auf die Wohnlage und die Lage des Transformatorraums unwahrscheinlich sind, wird aber mit diesem Studiendesign implizit für viele mögliche Störfaktoren kontrolliert. Der kritischste Störfaktor ist die UV-Belastung, und es lässt sich nicht völlig ausschließen, dass Kinder, die im Erdgeschoss wohnen und sich somit eher in der Nähe eines Transformators aufhalten, sich auch eher im Freien aufhalten. In einer Sensitivitätsanalyse, die sich auf Studienteilnehmende im Erdgeschoss und im ersten Stock beschränkte, wurden jedoch keine Hinweise auf einen derartigen Störfaktor gefunden. Die wichtigste Einschränkung der Studie ist die kleine Stichprobe von Teilnehmenden, die während ihrer Kindheit exponiert waren, so dass für diese Auswertung eine Bestätigung durch zusätzliche Studien erforderlich ist.

In der CERENAT bevölkerungsbezogenen Fall-Kontroll-Studie wurde der Zusammenhang zwischen Nähe des Wohnortes zu Hochspannungsleitungen und Hirntumore, welche zwischen die 2004-2006 in Frankreich diagnostiziert wurden, untersucht (Carles et al., 2020). Es wurden signifikante Zusammenhänge zwischen der kumulierten Wohndauer in einer Entfernung von weniger als 50 m zu Hochspannungsleitungen und allen Hirntumoren (OR 2.94; 95%CI 1.28-6.75) sowie Gliome (OR 4.96; 95%CI 1.56-15.77) festgestellt. Die Analysen wurden für Geschlecht, Alter, Bildungsgrad, Tabak- und Alkoholkonsum, berufliche und häusliche Exposition gegenüber Pestiziden, häusliche Exposition gegenüber ELF-MF und Mobiltelefonnutzung bereinigt. Die Analysen beruhten aber nur auf 17 bzw. 11 exponierten Probanden mit Hirntumoren bzw. Gliome. Sie ist damit deutlich weniger aussagekräftig als die oben erwähnte britische Studie (Elliott & Toledano, 2013).

Als alternative Erklärung für beobachtete Assoziationen zwischen Krebs und Nähe zu Hochspannungsleitungen wurde Corona Entladung für respiratorische Tumore postuliert, da elektrisch geladene Feinstaubpartikel möglicherweise im Atemwegstrakt besser absorbiert werden. Elektrische Felder dringen nicht in den Körper ein aber es wurde die Hypothese aufgestellt, dass sie Hautkrebs verursachen könnten.

In einer neuen Publikation der oben erwähnten britischen Studie (Elliott & Toledano, 2013) wurde gezeigt, dass die modellierten Luftionendichte (pro cm³) im Umkreis von 600 m von Hochspannungsleitungen in England und Wales und das berechnete elektrischen Feld im Umkreis von 25 m keinen Zusammenhang mit dem Auftreten der entsprechenden Krebserkrankungen zwischen 1974 und 2008 hatten. Die Analysen wurden bereinigt für Alter, Geschlecht, soziale Benachteiligung und Ländlichkeit. Im höchsten Fünftel der Nettoluftionendichte (0.504-1) im Vergleich zum niedrigsten Fünftel (0-0.1879) betrugen die Risiken 0.94 [95 % Konfidenzintervall (KI) 0.82-1.08] für Mundhöhlenkrebs bis 1.03 (95 % KI 0.97-1.09) für Krebserkrankungen der Atemwege, wobei es keine Tendenz zu einer Expositions-Wirkungsbeziehung gab. Die Resultate waren ähnlich bei Verwendung eines alternativen Koronaionen-Schätzungsmodells. Für Keratinozytenkarzinome war das angepasste Erkrankungsrisiko in der höchsten E-Feld Kategorie (1.06-4.11 kV/m) im Vergleich zur niedrigsten Expositionsgruppe (<0.70 kV/m) 1.23 (95% CI 0.65- 2.34), wiederum ohne Trend zu einer Expositions-Wirkungsbeziehung. Die Autoren folgern, dass es damit keine Belege gibt für die Hypothese, dass die Luftionendichte oder elektrische Felder in der Nähe von Hochspannungsleitungen mit dem Krebsrisiko bei Erwachsenen zusammenhängen. Anzumerken ist, dass die Modellierung von Luftionen sehr komplex ist und unklar bleibt, wie gut das Prädiktionsmodell war, da keine unabhängigen Validierungsdaten präsentiert wurden.

4.3.2.4 Krebsrisiko bei beruflicher Exposition

In einer Schweizer Nachfolgestudie zu (Minder & Pfluger, 2001) über die Mortalität beim Eisenbahnpersonal resümierten (Roosli et al., 2007a) hinsichtlich Leukämie- und Lymphomrisiko bei niederfrequenter Magnetfeldexposition (p. 558):

"We found indications of an exposure–response association for myeloid leukaemia and Hodgkin's disease, but, not for other haematopoietic and lymphatic malignancies (…). The association was less pronounced than previously observed because leukaemia mortality rates among train attendants and station masters, who were only exposed to low levels, have been increasing since the early nineties. A plausible explanation for this observation could not be identified and random data variability is considered to be the most likely explanation. Additional analyses in a few years may clarify this finding".

Inzwischen liegen neuere Studien vor.

In einer gepoolten Analyse aller relevanten Publikationen bis 2007 durch (Kheifets et al., 2008) wurde

u.a. das Leukämierisiko bei beruflicher Exposition[17] errechnet. Die Autoren stellten ein leicht erhöhtes Risiko fest, das aber eher als zufälliges Resultat denn als kausale Folge der Exposition angesehen wurde, insbesondere auch, wenn die Resultate mit vergangenen Metaanalysen verglichen wurden. Kheifets et al. folgern, dass die Resultate auf eine Abwesenheit einer kausalen Verknüpfung von niederfrequenten beruflichen Magnetfeldbelastungen mit Leukämie hindeuten (p. 677):

"Overall, for new studies, (…) leukemia showed small increases in risk estimates, (…) 13% (…). Notably, pooled risk estimates were lower than in past meta-analyses, and leukemia subtypes showed no consistent pattern when past and present meta-analyses were compared. (…) The lack of a clear pattern of EMF exposure and outcome risk does not support a hypothesis that these exposures are responsible for the observed excess risk. Findings were not sensitive to assumptions, influential studies, weighting schemes, publication bias, study characteristics, or funding source".

(Koeman et al., 2014) untersuchten an einer (prospektiven) holländischen Kohorte (17.3 Jahre follow-up) den Zusammenhang zwischen beruflicher ELF-Magnetfeldexposition und verschiedenen Krebsarten, u.a. auch Lymphome und Leukämien. Es zeigten sich bei einer Lymphom- und einer Leukämieart (FL = follikuläres Lymphom; AML = Akute Myeloische Leukämie) erhöhte Risiken. Die Autoren ziehen folgende vorsichtige Schlussfolgerung (p. 213):

"We did observe associations between ELF-MF exposure and follicular lymphoma and acute myeloid leukemia in men, although AML did not show a clear exposure–response relationship. These results indicate that ELF-MF exposure may be related to certain subtypes of haemato-lymphoproliferative malignancies and warrant further investigation".

(Guxens et al., 2014) sowie (Talibov et al., 2015) untersuchten in einer grossen Berufskohorte aus Finnland, Island, Norwegen und Schweden den Zusammenhang zwischen beruflicher Exposition (niederfrequente Magnetfelder und Elektroschocks) und Krebsrisiko. Die Ergebnisse zu Lymphomen und Leukämien zeigten keine erhöhten Risiken.

Hinsichtlich Hirntumorrisiko und beruflicher Magnetfeldexposition liegen eine Reihe von älteren und neueren Studien vor. In den bereits zitierten Arbeiten von (Roosli et al., 2007a) mit Eisenbahnangestellten, (Koeman et al., 2014) mit einer niederländischen Kohorte, (Koeman et al., 2014) mit einer skandinavischen Kohorte und (Sorahan, 2014) mit Angestellten von Elektrizitätsunternehmen (siehe unten) zeigten sich keine erhöhten Risiken. Auch die Studie von (Karipidis et al., 2007) über Gliome (Tumor des Stützgewebes) bei Berufstätigen in Melbourne und die Arbeit von (Johansen et al., 2007) über dänische Angestellte von EVUs wiesen keine Auffälligkeit aus.

Ein (statistisch nicht-signifikantes) leicht erhöhtes Risiko für Hirntumore stellten (Villeneuve et al., 2002) für ausgewählte Berufe mit erhöhter beruflicher Magnetfeldexposition fest. Der Befund basiert massgeblich auf dem Risikoschätzer für Astrozytome (OR = 5.36; 95% CI = 1.16–24.78), in den 18 Fälle und 6 Kontrollen eingegangen sind. Der Befund muss deshalb mit gebührender Vorsicht behandelt werden. (Navas-Acien et al., 2002) stellten in ihrer schwedischen Studie keine erhöhten Risiken fest, ausser im Zusammenspiel mit ausgewählten chemischen Substanzgruppen (Lösungsmittel, Blei, Pestizide/Herbizide). (Hakansson et al., 2002) dagegen eruierten erhöhte Risiken für Astrozytome bei schwedischen berufstätigen Frauen mit niederfrequenten Magnetfeldbelastungen. Die bereits erwähnte Metaanalyse von (Kheifets et al., 2008) mit allen relevanten Publikationen von 1993-2007 stellte ein leicht erhöhtes Risiko fest (10%). Die Autoren interpretieren es gleich wie den Leukämiebefund (siehe oben). (Coble et al., 2009) fanden in einer spitalbasierten Fall-Kontroll-Studie in den USA keine erhöhten Risiken für drei Tumorarten (Gliome, Glioblastome, Meningiome). (Baldi et al., 2011)

[17] In epidemiologischen Untersuchungen zur beruflichen Exposition werden die Expositionen meist über eine „Job-Exposure Matrix" den Personen zugeordnet. Die Matrix enthält für die verschiedenen statisch erfassten Berufs- und Tätigkeitsgruppen den relevanten Expositionsgrad, der häufig über Expertenschätzungen und/oder Messungen erhoben worden ist.

untersuchten in Frankreich den Zusammenhang. Bei den Hirnhauttumoren (Meningiome, 13 Fälle) zeigte sich eine statistisch signifikante Risikoerhöhung.

Die neueste Studie zum Thema (Turner et al., 2014) untersuchte im Rahmen des INTEROCC-Projekts die Situation für Gliome und Hirnhauttumore in 7 Ländern. Insgesamt zeigten sich keine erhöhten Risiken hinsichtlich Gesamtexposition (kumulierte lebenslange Berufsexposition), durchschnittlicher Exposition, maximaler Exposition und Expositionsdauer in Jahren. Auch eine neuere Simulation (Oraby et al., 2017) mit unterschiedlichen Expositionsmassen bestätigte diese Befunde (p.7):

„This analysis provided no evidence that cumulative lifetime occupational exposure to ELF is associated with brain tumour risk. This was seen using the AM, GM, and MGM as exposure surrogates, as well as when exposure was adjusted for Berkson error. These findings are in accordance with those recently reported by (Bowman et al., 2007) for cumulative lifetime exposure in the full seven country INTEROCC study, as well as those in a prospective cohort study in the Netherlands conducted by (Koeman et al., 2014)“.

Die Daten zur längsten Expositionszeit (über 25 Jahre) zeigten jedoch ein statistisch signifikant erhöhtes Risiko für Hirnhauttumore (OR = 1.3) und ein erhöhtes (OR = 1.22) aber nicht signifikantes Risiko für Gliome. Sodann ergab sich in der Detailanalyse (bei korrigiertem Beschäftigungsstatus) für den Expositionszeitraum 1–4 Jahre vor der Diagnose eine statistisch signifikante dosisabhängige Risikoerhöhung für Gliome, nicht aber für Meningiome. Für die zwei anderen Expositionszeitfenster (4–9 Jahre und ≥ 10 Jahre vor der Diagnose) zeigten sich keine Auffälligkeiten. Die Autoren interpretieren diesen Befund als Hinweis auf einen möglicherweise wachstumsfördernden (promotionalen) Effekt niederfrequenter elektromagnetischer Felder.

Positive Assoziationen mit beruflicher niederfrequenter Magnetfeldexposition zeigten Studien aus den 90er Jahren zum Brustkrebsrisiko. Die 2005 publizierte schwedische Untersuchung von beruflich exponierten Frauen (Forssen et al., 2005) konnte dagegen keine erhöhten Risiken feststellen. Dasselbe gilt für die chinesische Arbeit über Brustkrebs und Magnetfeldexposition bei Textilarbeiterinnen in Shanghai (Li et al., 2013). Auch die bereits zitierten Studien von (Johansen et al., 2007), (Sorahan, 2012), (Koeman et al., 2014) und (Guxens et al., 2014) stellten keine erhöhten Risiken fest.
(Sun et al., 2013) hingegen legte eine Meta-Analyse von 18 Studien von beruflich exponierten Männern (darunter 2 Studien mit häuslicher Exposition) vor: (Demers et al., 1991), (Matanoski et al., 1991), (Loomis, 1992), (Tynes et al., 1992), (Guenel et al., 1993), (Floderus et al., 1994), (Theriault et al., 1994), (Rosenbaum et al., 1994), (Savitz & Loomis, 1995), (Fear et al., 1996), (Stenlund & Floderus, 1997), (Cocco et al., 1998), (Feychting et al., 1998), (Johansen & Olsen, 1998), (Floderus et al., 1999), (Pollan et al., 2001), (Park et al., 2004), (Nichols & Sorahan, 2005). Die Autoren errechneten ein statistisch signifikant erhöhtes Risiko für Brustkrebs (OR = 1.32; 95% CI = 1.14–1.52). Wesentliche Beiträge zum Befund lieferten dabei zwei ältere Studien (Demers et al., 1991), (Tynes et al., 1992), und die neuen fast durchwegs entwarnenden Arbeiten ab Mitte 2005 wurden nicht berücksichtigt. Das Resultat sollte deshalb mit der nötigen Vorsicht behandelt werden. Dasselbe gilt für die neueste Arbeit, in der kanadische Arbeiter untersucht wurden (Grundy et al., 2016). Die Arbeit weist für die höchsten Expositionsgruppen (es wurden verschiedene Expositionsmasse eingesetzt) erhöhte Risiken aus, diese basieren aber auf sehr kleinen Fallzahlen (meist unter 10 Fällen; Spanne von 3 bis 14 Fällen) und sind statistisch nicht signifikant. Insgesamt können die neueren Studien im Sinne einer Entwarnung interpretiert werden (SSM, 2016).

Erwähnenswert sind noch zwei Studien zu anderen Tumorarten. (Behrens et al., 2010) studierten den Einfluss beruflicher niederfrequenter Magnetfeldexposition auf das Augentumorrisiko (Aderhautmelanom). In früheren Arbeiten, insbesondere im Zusammenhang mit hochfrequenter Exposition (Stang et al., 2001), (Stang et al., 2009), wurde eine Risikoerhöhung berechnet. Auch Behrens et al. schlussfolgerten, dass ihre Daten ein erhöhtes Risiko – insbesondere für Personen mit dunkler Augenfarbe – für Berufe und Tätigkeiten mit überdurchschnittlich hoher Magnetfeldexposition (kumulierte Dosis in µT-

Jahren) nahelegen. (Beranger et al., 2013) publizierte eine umfassenden Literatur-Analyse mit 72 Studien zum Einfluss von Umweltexpositionen, worunter auch EMF, auf Hodenkrebs. In 5 Studien, meist älteren Datums, wurde EMF berücksichtigt oder war das Hauptthema. Die Resultate waren heterogen und liessen keine eindeutige Aussage zu. Insgesamt sind die Autoren der Meinung, dass Umwelteinflüsse am Arbeitsplatz vermutlich keine oder nur eine untergeordnete Rolle spielen, und die Exposition der Eltern (vor oder während der Schwangerschaft) und möglicherweise frühkindliche Expositionen eine grössere Bedeutung haben dürften.

Mehrere Studien haben die Krebshäufigkeit bei Arbeitnehmenden in der Elektrizitätsindustrie untersucht. Frühe Arbeiten (Savitz & Loomis, 1995), (Kelsh & Sahl, 1997), (Johansen & Olsen, 1998) stellten keine erhöhten Risiken im Zusammenhang mit Magnetfeldern fest, ausser eine Assoziation mit Hirntumoren bei Savitz und Loomis. Auch die spätere Studie von (Johansen et al., 2007) zu dänischen Angestellten zeigte keine Risikoerhöhungen für die untersuchten Endpunkte (Leukämien, Hirntumore, Brustkrebs). Die Studie von (Sorahan, 2012) bei britischen Beschäftigten zeigte hinsichtlich der häufig mit Magnetfeldern in Verbindung gebrachten Leukämien, Lymphomen, Hirntumoren und Brustkrebs keine auffälligen Resultate. Einige teilweise (nicht-signifikant) erhöhten Risikoschätzer dürfen nach Meinung der Autoren in ihrer Bedeutung nicht überschätzt werden (p. 504):

„(…) it seems unwise to attach too much importance to the non-significant excess shown".

Bezüglich Hirntumoren hat (Sorahan, 2014) ein Update einer früheren Analyse der Arbeitnehmenden von EVUs im Vereinigten Königreich (Sorahan et al., 2001), vorgelegt. Die Daten zeigten folgendes Bild (p. 157):

„Findings for glioma and for the generality of all brain tumours were unexceptional; risks were close to (or below) unity for all exposure categories and there was no suggestion of risks increasing with cumulative (or recent or distant) magnetic field exposures. There were no statistically significant dose–response effects shown for meningioma, but there was some evidence of elevated risks in the three highest exposure categories for exposures received >10 years ago".
Die Bedeutung der erhöhten Risiken bei den Hirnhauttumoren sollte nicht überschätzt werden, denn die Befunde basieren teilweise auf tiefen Fallzahlen, so dass es sich auch um Zufallsresultate handeln könnte, und mit einer Ausnahme waren die Befunde statistisch nicht signifikant und zeigten kein erkennbares Dosis-Wirkungs-Muster.

Neue epidemiologische Studien seit 2017

In einer Reihe von Fall-Kontrollstudien aus Schweden wurde bei Anwendung der INTERROC Job-Expositionsmatrix kein Zusammenhang zwischen beruflicher NF-EMF Exposition und Gliomen (Carlberg et al., 2017), Menigiomen (Carlberg et al., 2018) und Akustikusneurinomen (Carlberg et al., 2020) gefunden.

In der oben erwähnten INTERROC Studie (Turner et al., 2014) wurde in einer zusätzlichen Analyse untersucht, ob es eine Interaktion zwischen beruflicher Exposition gegenüber NF-MF und gegenüber Chemikalien (Turner et al., 2017) gibt. Dies konnte aber weder für Gliome noch für Meningiome bestätigt werden.

(Huss, Spoerri, et al., 2018) untersuchten die Exposition gegenüber NF-MF in der Schweizerischen Nationalen Kohortenstudie die Sterblichkeit für verschiedene Arten von hämatolymphopoetischen Krebsarten unter Verwendung einer Job-Expositionsmatrize. Eingeschlossen wurden 3.1 Millionen Arbeitnehmeende, die in unterschiedlichem Ausmass NF-MF ausgesetzt waren. Analysiert wurde das Sterberisiko für akute myeloische Leukämie, chronischer myeloischer Leukämie, lymphatischer Leukämie, diffusen grosszelligen B-Zell-Lymphomen, follikulären Lymphomen, Waldenström-Makroglobulinämie, multiplem Myelom und Hodgkin-Lymphom. Die Sterblichkeit an hämatolymphopoetischen Krebserkrankungen war nicht mit der Exposition gegenüber NF-MF assoziiert mit Ausnahme eines Anstiegs von myeloischen Leukämien bei jemals hoch exponierten Männern (HR 1.31, 95% CI 1.02-

1.67), und akute myeloische Leukämie (HR 1.26, 95% CI 0.93-1.70). Wenn die Arbeitnehmenden sowohl 1990 und 2000 hoch exponiert waren, stieg das relative Risiko auf 2.24 (95%CI 0.91-5.53) bzw. 2.75 (95%CI 1.11-6.83) an. Die Autoren schliessen, dass ihre Analyse keine überzeugenden Beweise für ein erhöhtes Sterberisiko für eine Reihe von hämatolymphopoetischen Krebserkrankungen bei Arbeitnehmern, die hohen oder mittleren ELF-Magnetfeldern ausgesetzt waren liefert, ausser den beiden Diagnosen bei Langzeitexpositionen. Sie präsentierten auch eine Meta-Analyse von ihren Ergebnissen mit früheren Studien. Damit ergab sich ein mittleres relatives Risiko von 1.21 (95%CI 1.08-1.37).

(Sorahan, 2019) verglichen die Krebsinzidenz von 81'616 Beschäftigten der britischen Stromerzeugungs und -übertragungsbranche für den Zeitraum 1973-2015 mit der Allgemeinbevölkerung. Die Gesamtkrebsmorbidität lag bei Männern leicht unter den Erwartungen, was mit dem sogenannten "Health Worker"-Effekt erklärbar ist, da keine Confounder ausser Alter und Geschlecht in die Analyse eingeflossen sind. Signifikante Überschreitungen wurden festgestellt bei Arbeitnehmern für Mesotheliom, Hautkrebs (Nicht-Melanom) und Prostatakrebs, und bei Arbeitnehmerinnen für Dünndarmkrebs, Nasenkrebs und Brustkrebs. Dies könnte auf nichtberücksichtige Confounder zurückzuführen sein wie UV-Strahlung bei Arbeit im Freien oder Asbestexposition.

In einer gepoolten Analyse von elf Studien zu Magenkrebs wurden 5'279 Magenkrebsfälle und 12'297 Kontrollpersonen eingeschlossen (Shah et al., 2020). Es wurde für eine Vielzahl von beruflichen Expositionen das Erkrankungsrisiko evaluiert. Exposition gegenüber ionisierende-, UV-Strahlung oder NF-MF war mit einer höheren Wahrscheinlichkeit für Magenkrebs vom diffusen Typ assoziiert. Da keine separaten Analysen für Magnetfeldexposition alleine gemacht wurden, ist diese Auswertung diesbezüglich nicht informativ.

4.3.2.5 Experimentelle Untersuchungen zur Krebsentstehung

Wie schon im vorangegangenen Kapitel zu Kinderleukämie diskutiert, schufen die experimentellen Studien bis dato keine Datenlage, die Schlüsse zum Wirkungsmechanismus und eine abschliessende Risikobewertung von NF-MF-Exposition zulassen würde (Juutilainen et al., 2018; Karimi et al., 2020; Kocaman et al., 2018). In Bezug auf die Karzinogenität von EMF ist nach wie vor die Verursachung von Schädigung der Erbsubstanz durch ROS einer der häufigsten Studienansätzen neben der Veränderung der Zellproliferation und -vitalität. Dazu gibt es einige Übersichtarbeiten, die den Einfluss von EMF auf das oxidative Gleichgewicht der Zellen und ROS-Bildung (Lai, 2019; Schuermann & Mevissen, 2021; Wang & Zhang, 2017) und DNS-Schäden (Juutilainen et al., 2018; Lai, 2021; Maes & Verschaeve, 2016a) zusammengestellt und diskutiert haben. Zudem gibt es unzählige andere Mechanismen, die im Zusammenhang der Entstehung beziehungsweise der Progression von Tumoren stehen. Einige davon werden im Kapitel 0 näher erläutert.

Bezüglich Gentoxizität im Menschen wurden über die Jahre einige zytogenetische Studien veröffentlicht, die aber kaum eine klare Schlussfolgerung erlauben (Maes & Verschaeve, 2016a). Die Autoren dieser Übersichtsarbeit fassen dies folgendermassen zusammen:
"According to above investigations presenting a number of shortcomings and contradictions between the study results, no firm conclusion can be drawn with respect to alleged ELF-EMF induced genetic effects in exposed subjects. We still should be alert as some indications of induced genetic effects and carcinogenesis cannot be simply disregarded. (…) For this reason, we believe that more thorough and better controlled investigations using the right genetic endpoints on adequate numbers of cells and individuals still should be envisaged".

An diesen Unsicherheiten ändern auch neuere Humanstudien zu beruflicher NF-MF-Exposition wenig. Eine kleine Fall-Kontroll-Pilotstudie von (Villarini et al., 2015) mit Elektroschweissern, deren DNA auf Schäden untersucht wurde, ergab keine Hinweise auf einen Einfluss der Magnetfelder. Der Pilotstudie

darf wegen der geringen Fallzahl (n = 21) nicht viel Gewicht beigemessen werden. Die Untersuchungen iranischer Forschungsgruppen bei Arbeitern der Elektrizitätsindustrie deuteten hingegen auf eine Zunahme von DNS-Schäden, analysiert mittels dem Kometen-Assay von Blutzellen (Hosseinabadi et al., 2019; Zendehdel et al., 2019). In der Querschnittsstudie von Zendehdel wurde diese Zunahme beim Vergleich von 29 exponierten männlichen Arbeitern (Median: 11 µT) mit weniger belastetem Servicepersonal (Median: 0.85 µT) (Zendehdel et al., 2019) festgestellt, während dieser bei Hosseinabadi in der am stärksten exponierten Gruppe (n = 31) mit mehr als 18.9 µT (zeitgewichteter Mittelwert) auftrat (Hosseinabadi et al., 2019), wobei dieser Zunahme durch antioxidative-wirkende Vitaminsupplementierung entgegengewirkt werden konnte (Hosseinabadi et al., 2020).

Die wohl relevanteste experimentelle Studie der jüngeren Zeit ist die grosse Tierstudie mit Ratten des Stammes «Sprague Dawley», durchgeführt im Ramazzini-Institut in Italien, in der in einem lebenslangen «Bioassay» der Einfluss von Ganzkörperexposition mit 50 Hz NF-MF hinsichtlich Karzinogenität untersucht wurde (Bua et al., 2018). Dabei handelt es sich in den Grundzügen um eine Wiederholung, Bestätigung und Erweiterung der älteren Untersuchungen des amerikanischen «National Toxicology Program» (NTP) aus dem Jahre 1999 (National Toxicology Program, 1999). In diesem wurde das Auftreten von verschiedenen Tumoren in Ratten (Stamm F344/N) und Mäusen (Stamm B6C3F) analysiert, die einem 60 Hz NF-MF ausgesetzt waren. Aus dieser Studie resultierten Hinweise auf vermehrte Schilddrüsentumore in männlichen Ratten, wogegen alle anderen Tumortypen nicht signifikant häufiger auftraten (Boorman et al., 1999; Boorman et al., 2000; McCormick et al., 1999). In den Experimenten des Ramazzini-Institutes konzentrierte man sich auf die histopathologische Analyse von Brust- und Schilddrüsenkrebs, Schwannomas des Herzens, sowie Blutkrebs (Leukämien, Lymphome und histiozytäre Sarkomas). Beginnend vor der Geburt wurden männliche und weibliche Ratten lebenslänglich für 19 Stunden pro Tag einem 50 Hz NF-MF mit unterschiedlichen Feldstärken ausgesetzt, entweder kontinuierlich (2, 20, 100, 1000 µT) oder intermittierend (30/30 Min an/aus) (Bua et al., 2018). In dieser Studie mit mehr als 5'000 Ratten wurde kein erhöhtes Auftreten von Tumoren festgestellt, auch nicht eine Zunahme von Schilddrüsenkrebs. Die Autoren ziehen folgenden Schluss:

"Life-span exposures to continuous and intermittent sinusoidal-50 Hz ELFEMFs, when administered alone, did not represent a significant risk factor for neoplastic development in our experimental rat model".

Andererseits beinhaltete diese grossangelegte und noch laufende Studie auch Experimente zu Ko-Karzinogenität von NF-MF mit bekannten kanzerogenen Faktoren wie Formaldehyd und Gammastrahlung, wobei über eine erhöhte Zunahme verschiedener Tumortypen wie z.B. Brustkrebs durch die zusätzliche NF-MF-Exposition berichtet wurde (Soffritti & Giuliani, 2019; Soffritti, Tibaldi, Padovani, Hoel, Giuliani, Bua, Lauriola, Falcioni, Manservigi, Manservisi, & Belpoggi, 2016; Soffritti, Tibaldi, Padovani, Hoel, Giuliani, Bua, Lauriola, Falcioni, Manservigi, Manservisi, Panzacchi, et al., 2016). Diese Beobachtungen bedürfen weitergehender Untersuchungen, wie auch von den Autoren dieser Studien betont:

"In light of our previous results on the carcinogenic effects of ELFEMF in combination with formaldehyde and γ-radiation, further experiments are necessary to elucidate the possible role of ELFEMF as cancer enhancer in presence of other chemical and physical carcinogens. (…) These findings are relevant in term of public health because, in all industrialized countries, exposure to ELFEMF always combines with concurrent exposures to other chemical or physical agents, at low or high doses, in the workplace or in the general environment".

Bezüglich Karzinogenität sind hier noch einige kleinere Tierstudien erwähnenswert, in der EMF des bis dato wenig untersuchten Zwischenfrequenzbereich (IF-EMF) eingesetzt wurden, der mit dem Aufkommen von Induktionsherden und kabelloser Batterie-Ladungsverfahren zunehmende Bedeutung erfährt. Weibliche Mäuse (80 pro Gruppe) wurden ab dem Alter von 3 Monaten entweder einem 20 kHz (360 µT) IF-EMF für 24 Stunden pro Tag ausgesetzt oder scheinexponiert (Lerchl et al., 2021).

Neben Verhaltensanalysen wurden auch verschiedene Organe histopathologisch auf Tumore untersucht. Dabei wurde keine statistisch signifikante Zunahme von Lymphomas und Tumoren im Hirn, in der Lunge, Milz, Niere und der Leber festgestellt, wobei diese Aussage bedingt durch das seltene Auftreten der Tumore bei dieser Gruppengrösse mit Vorbehalt zu geniessen ist. Die gleiche Schlussfolgerung wurde in einer weiteren, auch eher kleineren Studie zu 20 kHz IF-EMF-Exposition gezogen, in der nach einer Vielzahl von Tumorarten in verschiedenen Organen gesucht wurde (Nishimura et al., 2019). Es wurden je 25 weibliche und männliche Mäuse für 26 Wochen einem 20 kHz IF-EMF bei 200 µT ausgesetzt. Es handelte sich dabei um Tg.rasH2 transgene Mäuse, einem Krebsmodell in dem schnell und gehäuft Tumore auftreten.

Gegen eine Karzinogenität von IF-EMF sprechen auch weitere Publikationen, die Gentoxizität, also die Entstehung von DNS-Schäden und Mutationen, untersuchten. In der Studie von Herrala *et al.* (Herrala et al., 2018) wurden männliche Mäuse für 5 Wochen mit einem kontinuierlichen 7.5 kHz IF-EMF bei 12 oder 120 µT ausgesetzt. Die Analyse von DNS-Schäden in Blutzellen mittels Kometen-Assay und Mikrokern-Test zeigten keine eindeutigen Anzeichen einer Zunahme. Zusätzlich wurden auch *in vitro* Experimente durchgeführt, in welchen primäre Astrozyten der Ratte für 24 Stunden dem 7.5 kHz IF-EMF bei 30 oder 300 µT exponiert und Gentoxizität und Ko-Gentoxizität angeschaut wurden. Obwohl in einigen dieser Experimente Unterschiede angedeutet sind, ergab sich kein konsistenter Hinweis darauf, dass die IF-EMF-Exposition einen gentoxischen Effekt hat. Diese Befunde wurden in einer weiteren Studie bestätigt, in der auch die Orientierung des IF-EMF im Betracht gezogen wurde (Herrala et al., 2019). Keine Hinweise auf Gentoxizität in Blutzellen (Mikrokern- und Pig-a-Test) wurde auch in der Tierstudie von Ohtani *et al.* (Ohtani et al., 2021) gefunden. Männliche Mäuse wurden in einem Zeitraum von 2 Wochen (5 Tage/Woche) täglich eine Stunde mit einem starken (23 mT, 54.1 V/m E-Feld) 82 kHz IF-EMF ausgesetzt und während weiteren 2 Wochen wiederkehrend die gentoxischen Parameter erhoben. Bei höheren Frequenzen von IF-EMF (123.9 kHz, 0.5 mT und 250.8 kHz, 0.1 mT) beobachteten Brech *et al.* (Brech et al., 2019) hingegen im Kometen-Assay eine Zunahme von DNS-Schäden in exponierten Blutzellen. Allerdings war dies ein Zeitfenster von 20 Stunden Exposition beschränkt, was auf Zellzyklus-abhängige Sekundäreffekte hindeuten könnte.

Grundsätzlich herrscht eine grosse Unsicherheit bezüglich eines Mechanismus, der den kausalen Zusammenhang zwischen EMF-Exposition und deren potentiellen Karzinogenität herstellen könnte. Diesbezüglich gibt es einige Hypothesen, die sich in erster Linie an einer gentoxischen Wirkungsweise orientieren, der durch oxidativen Stress ausgelöst wird (Juutilainen et al., 2018; Kocaman et al., 2018; Lai, 2021). Auch in den letzten Jahren gab es zu dieser Thematik einige neue Zellstudien, wobei meist kein gentoxischer Effekt festgestellt wurde. In Neuroblastoma-Zellen, die für 24 Stunden einem 100 µT 50 Hz NF-MF ausgesetzt wurden, stieg weder die Schädigung der DNS (Mikrokern-Test) noch das ROS-Level konsistent an, selbst dann nicht, wenn noch ein zusätzlicher gentoxischer Stress vorhanden war (Höytö et al., 2017). Zum gleichen Schluss kamen auch eine weitere Studie, die auch die gleiche Zelllinie eingesetzt hat und DNS-Schäden mit dem Kometen-Assay mass (Villarini et al., 2017). Eine signifikante Zunahme wurde bei keiner der NF-MF-Expositionsbedingung (50 Hz; 0.01, 0.1. 1 mT; 1 oder 5 Stunden) beobachtet, auch nicht, wenn Aluminium als Ko-Stressfaktor eingesetzt wurde. Auch Su *et al.* (Su et al., 2017) und Zeng *et al.* (Zeng et al., 2017), die einen Biomarker für DNS-Doppelstrangbrüche nach 50 Hz ELF-MF-Exposition (2 mT) für bis zu 24 Stunden in verschiedenen neuronalen Zelllinien untersucht haben, berichten von keinen gentoxischen Effekten. Untersuchungen in Herzmuskelzellen, die für eine Stunde einem kontinuierlichen oder für 75 Minuten einem intermittierenden 100 µT 50 Hz NF-MF ausgesetzt waren, ergaben keinen Einfluss auf das DNS-Schaden-Level (Kometen-Assay) sowie auf verschiedene andere Indikatoren von oxidativen und generellen Zellstress (Y. Wang et al., 2019). Selbst wenn Zellen genetisch sensitiver auf DNS-Schädigungen gemacht wurden, zeigte sich kein gentoxisches Potential des 50 Hz NF-MF in der Studie von Sun *et al.* (Sun et al., 2018). Hier wurden embryonale Fibroblasten der Maus, die entweder eine Mutation eines zentralen

Gens für die Kontrolle von DNS-Strandbrüchen (ATM) hatte oder normal waren, für eine oder 24 Stunden dem 2 mT NF-MF ausgesetzt, gefolgt von einer Analyse der Strangbrüche und DNS-Fragmentierung. Während sich die ATM-Mutation ebenso wie die verwendete Positivkontrolle klar auf das Level der DNS-Schäden auswirkte, wurde kein Unterschied zwischen den NF-MF- und scheinexponierten Zellen festgestellt.

4.3.2.6 Bewertung

Die meisten epidemiologischen Krebsstudien, die sich nicht der kindlichen Leukämie widmen, handeln von Leukämien und Lymphomen bei Erwachsenen, von Hirntumoren bei Kindern und Erwachsenen, sowie von Brustkrebs bei Erwachsenen. Die Risiken Erwachsener sind sowohl bei häuslicher als auch bei beruflicher Exposition untersucht worden. Für Berufsexpositionen liegen mehr Studien vor. Speziell betrachtet wurden auch Angestellte in der Elektrizitätsbranche. Eine Metastudie (Zhang et al., 2016), die 42 Arbeiten einschliesst, allerdings nicht explizit zwischen Kinder und Erwachsenen, Beschäftigten und der allgemeinen Bevölkerung, sowie verschiedenen Krebsarten unterscheidet, kam zum Globalbefund einer OR = 1.08 (95% CI = 1.01–1.15). Die erhöhten Risiken führen die Autoren v.a. auf nordamerikanische (OR = 1.10; 95% CI = 1.01–1.20) und auf Studien zu häuslicher Exposition (OR = 1.18; 95% CI = 1.02–1.37) zurück. Auch tragen interviewbasierte – im Gegensatz zu messbasierten – Untersuchungen zum Resultat bei. Es ist zu beachten, dass in beobachtetenden Studien bei Risiken dieser geringen Grössenordnung kaum eine Chance besteht zwischen wahren Risiken und Bias (inkl. Publikationsbias) zu unterscheiden.

Was das Hirntumorrisiko anbetrifft, kommen die meisten Studien zu einem negativen Befund. Es scheint unwahrscheinlich, dass Magnetfeldexposition das Erkrankungsrisiko erhöht. Das gilt sowohl für Kinder als auch für Erwachsene. Eine Auffälligkeit gilt es jedoch zu erwähnen: Bei starker beruflicher Exposition finden sich in einigen Studien kleine erhöhte Risiken (10–20%), die in Unteranalysen teilweise statistisch signifikant sind. Allerdings basieren diese Daten häufig auf wenigen Fällen, was deren Generalisierbarkeit riskant macht.

In neueren Studien wurden Hinweise zu erhöhten Risiken für Nervensystem- und Knochentumore bei Kindern gefunden, deren Eltern beruflicher NF-MF-Exposition ausgesetzt waren. Die Signifikanz der Ergebnisse ist jedoch bezüglich Tumorarten und väterlicher bzw. mütterlicher Exposition uneinheitlich und die Effektgrösse ist wiederum so klein, dass Bias nicht ausgeschlossen werden kann.

Bezüglich Leukämien und Lymphomen bei Erwachsenen sind die Befunde sowohl bei häuslicher als auch bei beruflicher Exposition uneinheitlich. In den neueren Studien scheinen die Risiken eher abgenommen zu haben. Die Studien welche Risikoerhöhungen ausweisen, sind heterogen bezüglich Tumorarten und Expositionserfassung. Insgesamt kann man von Verdachtsmomenten sprechen.

Bezüglich Brustkrebs ist die Sachlage recht einheitlich. Die grosse Mehrheit der publizierten Arbeiten hat keine erhöhten Risiken, sowohl bei häuslicher als auch bei beruflicher Exposition, festgestellt. Dies gilt auch und v.a. für die neueren Untersuchungen. Für die (SSM, 2016) hat sich die Sachlage inzwischen geklärt (p. 7):

“Progress has been made for research on female breast cancer. Thirteen years ago a possible link was hypothesized but now it is fairly certain that there is no causal relation with exposure to ELF magnetic fields“.

Eine in Finnland durchgeführte Studie hat keinen generellen Zusammenhang zwischen häuslicher NF-MF Exposition und Hautkrebs gefunden. Jedoch kann aufgrund der Ergebnisse nicht ausgeschlossen werden, dass eine NF-MF Exposition im Kindesalter in seltenen Fällen die Entwicklung von Hautkrebs im späteren Leben begünstigen könnte.

Die Studien, welche zu Beschäftigten in Elektrizitätsunternehmen publiziert wurden, zeigten insgesamt gesehen keine Auffälligkeiten. Leicht erhöhte Risiken von Hirntumoren wurden vereinzelt festgestellt.

Die Datenlage dieser auffälligen Befunde ist jedoch schmal und deren Aussagekraft eingeschränkt. Eine neuere britische Studie (Scharan et al., 2018) fand für einige spezifische Krebsarten unterschiedliche Zunahmen für Arbeitnehmerinnen und Arbeitnehmer. Die Resultate könnten auf nicht-berücksichtigte Confounder zurückzuführen sein.

Experimentelle Studien liefern bis dato keine Datenlage, die Schlüsse zum Wirkungsmechanismus und eine abschliessende Risikobewertung für Krebs durch NF-MF-Exposition zulassen würde (Juutilainen et al., 2018; Karimi et al., 2020; Kocaman et al., 2018). Metaanalysen von Zellstudien zeigen, dass ein biologischer Einfluss von ELF-Magnetfelder auf das Genom und die Apoptose nicht ausgeschlossen werden können (Maes & Verschaeve, 2016b), (Mansourian et al., 2016). Untersuchungen zu IF-EMF sprechen gegen eine Karzinogenität von Zwischenfrequenzen. Neuere Tierstudien mit Ratten (Bua et al., 2018) stellten kein erhöhtes Auftreten von Tumoren fest. Allerdings ergaben erweiterte Untersuchungen zur Ko-Karzinogenität von NF-EMF mit anderen kanzerogenen Faktoren Hinweise auf eine Zunahme verschiedener Tumortypen.

4.3.3 Neurodegenerative Erkrankungen

4.3.3.1 Ausgangslage

Neurodegenerative Erkrankungen sind typische Alterserkrankungen. Aufgrund der zunehmenden Lebensdauer rechnet man damit, dass neurodegenerative Erkrankungen in wenigen Jahrzehnten zu den häufigsten Todesursachen zählen werden. Durch Umwelteinflüsse erhöhte Erkrankungsraten hätten deshalb grosse gesundheitspolitische Bedeutung. Zu den untersuchten möglichen Umwelteinflüssen gehören elektromagnetische Felder (siehe dazu: (Terzi et al., 2016), (Consales et al., 2012a)). Im vorliegenden Zusammenhang interessieren niederfrequente Magnetfeldexpositionen. Ihr möglicher Einfluss wurde v.a. bei beruflich exponierten Beschäftigten untersucht. Inzwischen liegen aber auch Studien zu Alltagsexpositionen (Hochspannungsleitungen) bzw. zur Allgemeinbevölkerung vor. Im Zentrum des Interesses stehen Alzheimer und ALS (amyotrophe Lateralsklerose). Diese zwei Erkrankungen zeigen in einzelnen Studien erhöhte Risiken. Die anderen neurodegenerativen Endpunkte zeigen dagegen keine Auffälligkeiten. In den im Kapitel 4.2 zitierten Review-Berichten wird auf die uneinheitlichen Resultate zu Alzheimer und ALS hingewiesen. Es handelt sich deshalb um einen wissenschaftlichen Verdacht, der sich erst noch verdichten müsste, um von einem Risiko sprechen zu können.

Erwähnt werden muss in diesem Zusammenhang auch die Tatsache, dass in der transkraniellen Magnetfeldstimulation starke niederfrequente Magnetfelder (im mT Bereich) u.a. zur Therapie von neurodegenerativen Erkrankungen eingesetzt werden. Wie eine Review zu diesem Gebiet zeigt (Guerriero & Ricevuti, 2016), könnten verschiedene neuroprotektive Mechanismen für die therapeutischen Wirkungen zuständig sein. Der Nachweis- und Forschungsbedarf ist noch gross. Insbesondere gilt es auf zellulärer Ebene mögliche Mechanismen zu identifizieren und zu verstehen (siehe etwa: (Benassi et al., 2016a), (D'Angelo et al., 2015)), um potenziell schädliche als auch potenziell protektive und kurative Wirkungen von ELF-MF-Expositionen zu erkennen.

4.3.3.2 Alzheimer

In der Beurteilung der (WHO, 2007) ist die Evidenz für einen Zusammenhang zwischen niederfrequenten Magnetfeldern und der Alzheimer Erkrankung unzureichend (p. 206):

“The few studies investigating the association between ELF exposure and Alzheimer disease are inconsistent. However, the higher quality studies that focused on Alzheimer morbidity rather than mortality do not indicate an association. Altogether, the evidence for an association between ELF exposure and Alzheimer disease is inadequate”.

Zu einem ähnlichen Schluss kamen (Santibanez et al., 2007) in ihrer kritischen Literaturanalyse (7

Studien), wohingegen (Hug et al., 2006) in ihrer Metaanalyse von 8 Veröffentlichungen ein anderes Fazit zogen (p. 210):

"The epidemiological evidence for an association between occupational exposure to low-frequency electromagnetic fields and the risk of dementia has increased during the last five years. The impact of potential confounders should be evaluated in further studies".

Nach diesen Einschätzungen wurden mehrere Studien publiziert. Zunächst einige Arbeiten zu beruflichen Expositionen. (Sorahan & Kheifets, 2007) kamen in einer Mortalitätsstudie bei Beschäftigten in der Elektrizitätsindustrie zu einem Nullergebnis, ebenso wie (Seidler et al., 2007) in einer Deutschen Kohortenstudie. (Sorahan & Mohammed, 2014) fanden in der Fortführung ihrer ersten Studie (Sorahan & Kheifets, 2007) kein verändertes Resultat. Weder bezüglich Gesamtexposition (lebenslange Dosis) noch in Bezug auf die Exposition in „entfernten" oder „nahen" Lebensjahren (> 10 Jahre vor dem Tod, < 10 Jahre vor dem Tod) zeigte sich kein Einfluss der Exposition auf die Alzheimer-Sterblichkeit (170 Fälle). (Stampfer, 2009) studierte bei Elektroschweissern das Alzheimer-Sterberisiko (442 Fälle) und konnte keine Auffälligkeit im Vergleich mit anderen Beschäftigten in den USA feststellen.

(Roosli et al., 2007b) dagegen fanden in ihrer Untersuchung zu neurodegenerativen Erkrankungen bei Eisenbahnangestellten in der Schweiz, dass für exponierte Lokführer das Risiko an Alzheimer zu erkranken höher ist als für weniger exponierte Angestellte wie Stationsvorsteher (OR = 3.15; 95% CI = 0.9–11.04). Die Resultate basieren auf nur wenigen Fällen, obwohl das Gesamtkollektiv gross war (20'000 Beschäftigte). (Davanipour et al., 2007) errechneten in einem multivariaten Modell mit ca. 1'500 Fällen aus Alzheimer-Kliniken Risiken (OR) von ca. 2 bei mittlerer/hoher beruflicher Exposition. Allerdings gingen auch da nur wenige stark exponierte Fälle und noch weniger Kontrollen in das Modell ein, so dass der Befund mit Vorsicht zu interpretieren ist. Dieselbe Grössenordnung des Risikoanstiegs zeigte eine schwedische Studie mit Zwillingen (141 Alzheimer Fälle) von (Andel et al., 2010). In der separaten Analyse zu Alzheimer lagen die Risikoschätzer bei 1.7 und 1.9 (statistisch nicht signifikant) für mittlere und hohe Expositionen. Das höhere Risiko wurde nur bei Personen, die vor dem 75. Lebensjahr an Alzheimer erkrankten festgestellt und war statistisch signifikant mit dem Faktor „manuelle Arbeit" verknüpft.

Eine Metaanalyse mit 14 Studien aus dem Jahr 2008 (Garcia et al., 2008) kam zum qualitativ gleichen Ergebnis wie Hug et al. zwei Jahre zuvor. Die gepoolten Risikoschätzer betrugen 2 für Fall-Kontroll-Studien und 1.5 für Kohortenstudien (gerundete Werte, statistisch signifikant). Eine neuere Metaanalyse legten (Vergara et al., 2013) vor. Sie beurteilten 42 Studien, worunter auch solche, die sich nicht explizit mit EMF beschäftigt hatten, deren Angaben aber als ausreichend erachtet wurden, um daraus berufliche Magnetfeldexpositionen abzuleiten. In der Studie wurden Alzheimer und ALS (genauer: MND [Motor Neuron Disease], wobei in der Studie der ALS-Anteil 90% betrug) untersucht. Das Ausgangsmaterial war sehr heterogen und über 60 Risikoschätzer wurden berechnet. Insgesamt wurde für beruflich exponierte Personen ein um 27% erhöhtes Risiko beobachtet, welches statistisch signifikant war (95% CI = 15–40%). Aufgrund der Heterogenität der Studien sind die Schlussfolgerungen der Autoren aber vorsichtig (p. 144):

„Overall, we observed moderately increased risk estimates for MND and AD studies, but with considerable heterogeneity, which seems to be at least partially attributable to methodologic differences among the studies".

Interessant ist diesbezüglich eine Meta-Analyse von Huss & Vermeulen (2014), die einen Zusammenhang zwischen den beobachteten Risiken und der durchschnittlichen Höhe der Magnetfeldbelastung in der entsprechenden Berufsgruppe fanden, siehe Abbildung 22.

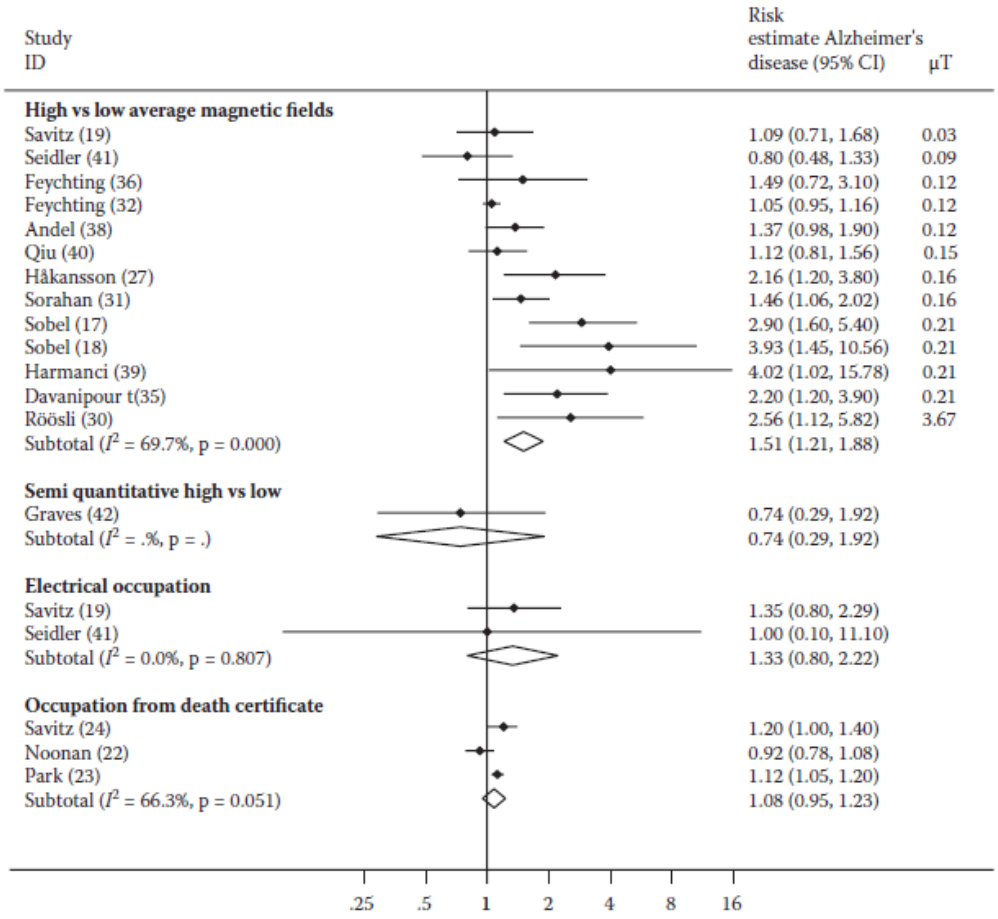


Abbildung 22: Überblick über Studien zu Alzheimererkrankungen und beruflicher niederfrequenter Magnetfeldexposition, sortiert nach der Höhe der Exposition am Arbeitsplatz (Quelle: (Huss & Vermeulen, 2014), p. 193).

Es liegen auch Bevölkerungsstudien vor. 2009 publizierten (Huss et al., 2009) eine Analyse der Situation in der Schweiz. Es wurde der Zusammenhang zwischen den verbreitetsten neurodegenerativen Erkrankungen (Mortalität) und der Exposition gegenüber Hochspannungsleitungen (220-380 kV Leitungen) studiert. Die Resultate zeigten erhöhte Alzheimer-Risiken in einem Korridor bis 50 m zum Leitungstrassee (HR = 1.24; 95% CI = 0.8–1.92). Es konnte auch eine Dosiswirkung nachgewiesen werden: je länger eine Person in diesem Korridor wohnte, desto höher das Sterberisiko. Im Falle von mehr als 15 Jahren betrug der Risikoschätzer 2 und war statistisch signifikant. Eine ähnliche Studie wurde in Dänemark durchgeführt, obwohl dort alle Leitungen ≥132 kV berücksichtigt wurden (Frei et al., 2013). In dieser Arbeit wurde insgesamt kein erhöhtes Risiko beobachtet und im Gegensatz zur Schweizer Studie auch keine Risikozunahme mit zunehmender Wohndauer in der Nähe von einer Hochspannungsleitung. Jedoch war für Personen zwischen 65 und 75 Jahre das Risiko innerhalb von 50 m tendenziell erhöht (relatives Risiko: 1.92; 95% CI = 0.95–3.87) und signifikant erhöht, wenn nur Diagnosen nach 2003 betrachtet wurden (relatives Risiko: 2.59; 95% CI = 1.17–5.76). Obwohl das Studienkollektiv etwa drei Mal grösser als in der Schweizer war, waren nur 5 Fälle innerhalb von 50 m von einer Höchstspannungsleitung (>200 kV) aufgetreten.

Einige Studien haben sich mit Demenzerkrankungen im Allgemeinen befasst. Meist wurde dabei Alzheimer als häufigste Form von Altersdemenz (gesondert) mituntersucht. Hinweise auf einen Zusammenhang mit niederfrequenter Magnetfeldexposition am Arbeitsplatz zeigten dabei 2 Studien: (Roosli et al., 2007b) errechneten in ihrer Arbeit zu neurodegenerativen Erkrankungen bei Eisenbahnangestellten erhöhte Risiken für senile Demenz bei den exponierten Lokführern von 1.96 (CI: 0.98-3.92). (Andel et al., 2010) errechneten für Demenz im Allgemeinen (216 Personen, inklusive die bereits erwähnten 141 Alzheimer Fälle) für mittlere und hohe Expositionen (Referenz: < 0.12 µT durchschnittliche Tagesexposition am Arbeitsplatz) Risiken um den Faktor 2; für die höchste Expositionskategorie und bei Krankheitsbeginn unter 75 Jahren statistisch signifikant. Die erhöhten Risiken betrafen in erster Linie Personen mit manueller Arbeit. Dagegen fanden (Seidler et al., 2007) keinen Zusammenhang, und die Hinweise auf möglicherweise erhöhte Risiken in der höchsten Expositionskategorie sowie bei „blue collar workers“ sind laut den Autoren statistisch unsicher, weil die Aussagkraft der Studie nicht ausreicht, um Risiken unterhalb des Faktors 2.3 nachzuweisen. (Stampfer, 2009) fand in seiner US-amerikanischen Studie zu Schweissern ebenfalls keine erhöhten Risiken für Demenz-Mortalität. Eine kürzlich publizierte Arbeit (Davanipour et al., 2014) kam bei einem Kollektiv von 3’050 mexikanischen Arbeitern in den USA, die über 65 Jahre alt waren zum Schluss, dass grosse oder mittelgrosse berufliche Magnetfeldexpositionen das Demenzrisiko im späten Alter (konkret: über 75 Jahre), insbesondere bei Rauchern, erhöhen. Die Exposition wurde mit Berufsangaben (Job-Exposure-Matrix) erfasst. Nur sehr wenige Personen (101) waren stark exponiert und davon schnitten im Demenz-Test (MMSE) noch weniger Personen so ab, dass sie als Demenz-Fälle kategorisiert werden konnten (insgesamt 5 Personen). Für mittlere Magnetfeldbelastungen lauten die entsprechenden Zahlen: 135 und 1. Es ist klar, dass die statischen Befunde bei derart tiefen Fallzahlen nur mit sehr grosser Vorsicht interpretiert werden dürfen. Die Schlussfolgerung der Autoren ist nur dann faktengerecht, wenn dem Wort „may“ das nötige Gewicht gegeben wird (p. 1641):

„The results of this study indicate that working in an occupation with high or M/H MF exposure may increase the risk of severe cognitive dysfunction”.

(Koeman et al., 2015) untersuchten niederländische Beschäftigte auf einen Zusammenhang zwischen Demenz (Mortalität) und Exposition gegenüber 11 Umweltstoffen, darunter auch niederfrequente Magnetfelder. In der Analyse zeigte sich ein statistisch signifikanter Zusammenhang mit ELF-Magnetfelder, allerdings dürfte es sich dabei um einen Scheinzusammenhang handeln, denn (p.629):

“The robustness of the metal effect in the bivariate combined exposure models in men further indicates that the positive associations with ELF-MF and chlorinated solvents in the single occupational exposure analysis might be attributable to metals”.

Bevölkerungsstudien zu Magnetfeldbelastungen durch Hochspannungsleitungen und Demenz (bzw. neurodegenerative Erkrankungen allgemein) liegen zwei vor: (Huss et al., 2009) berechneten in der Schweizer Studie leicht erhöhte Risiken (HR = 1.23; 95% CI = 0.96–1.59), Frei et al. (2013) dagegen fanden in Dänemark keine Hinweise auf eine höhere Sterblichkeit an Demenz aufgrund von Expositionen gegenüber Magnetfeldern von Hochspannungsleitungen.

Neue epidemiologische Studien seit 2017

Seit 2017 wurden einige Studien zu beruflichen NF-MF-Expositionen publiziert. In Dänemark war die Häufigkeit von Alzheimer-Erkrankungen bei Angestellten in der Elektrizitätsindustrie zwischen 1982 und 2010 nicht höher als in der Allgemeinbevölkerung (Pedersen et al., 2017).

Eine neue italienische Fall-Kontrollstudie untersuchte, ob Alzheimererkrankungen innerhalb von 50 m von einer Hochspannungsleitung gehäuft auftreten. Basierend auf rund 10'000 Fällen, welche zwischen 2011 und 2016 diagnostiziert wurden, ergab sich ein leicht, statistisch nicht-signifikant erhöhtes Risiko von 1.11 (95% KI: 0.95–1.30) (Gervasi et al., 2019). Diese Studie ist deutlich grösser als die

bisher vorliegenden Studien aus der Schweiz und Dänemark. Insgesamt traten 241 Alzheimer Erkrankungen innerhalb von 50 m von einer Hochspannungsleitung auf. Die Stärken der Studie liegen in der Grösse der untersuchten Population, und in der Berücksichtigung wichtiger Störgrössen wie zum Beispiel der Nähe zu viel befahrenen Strassen. Interessant ist auch das Ergebnis einer Kontrollanalyse für Diabetes. Diese Erkrankung war wie erwartet mit Strassennähe aber nicht mit Nähe zu Hochspannungsleitungen assoziiert. Eine Meta-Analyse der drei Studien ergibt kein signifikant erhöhtes Risiko, siehe Abbildung 23. Dennoch kann aufgrund der relativ konsistenten Ergebnisse der drei Studien die Datenlage als schwachen Hinweis interpretiert werden, dass in unmittelbarer Nähe von Hochspannungsleitungen Alzheimer-Erkrankungen vermehrt auftreten könnten.

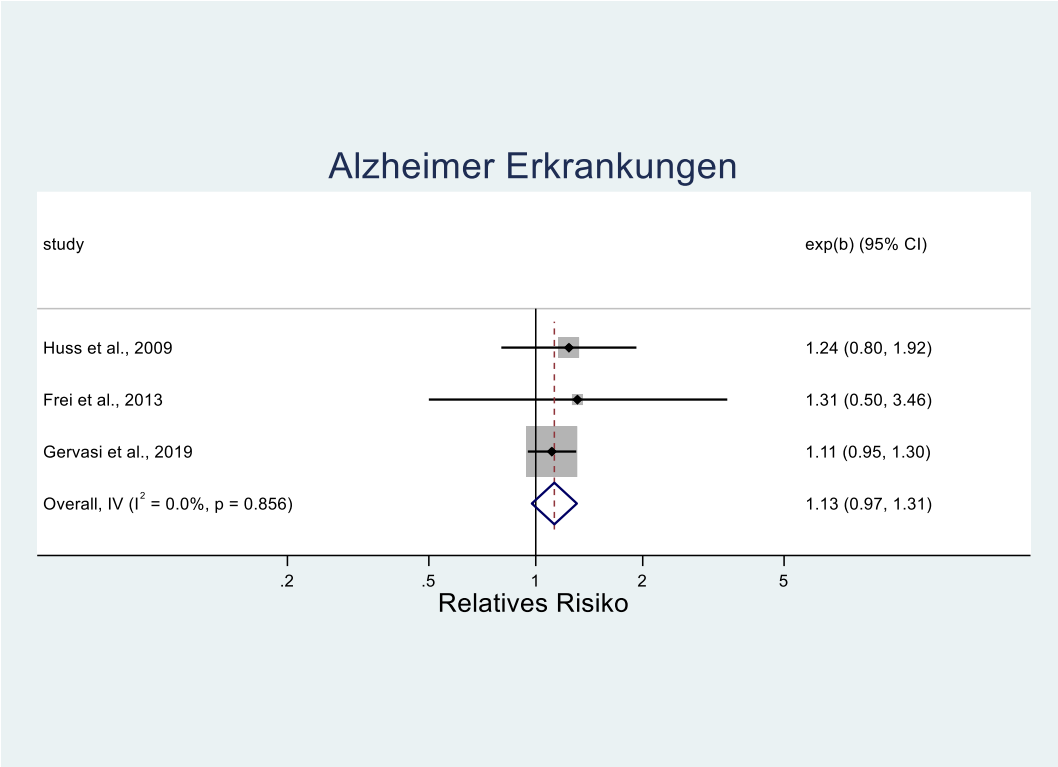


Abbildung 23: Vergleich der Schweizer, Dänischen und Italienischen Studienresultate zu Alzheimer Erkrankungen und Wohnort innerhalb von 50 Meter von einer Höchstspannungsleitung (>200 kV).

Eine 2018 publizierte Meta-Analyse hat 20 Artikel zu beruflicher NF-MF-Exposition und Alzheimer-Erkrankungen gepoolt (Jalilian et al., 2018). Die Ergebnisse deuten auf ein erhöhtes Risiko für Alzheimer hin (RR: 1.63; 95% CI: 1.35-1.96), jedoch wurde eine mässige bis hohe Heterogenität (I2 = 61.0%) und Hinweise auf Publikationsbias (Egger-Test: p < 0,001) festgestellt. Die Autoren merken deshalb an, dass die Ergebnisse mit Vorsicht interpretiert werden sollten.

4.3.3.3 ALS

In der Beurteilung der (WHO, 2007) ist die Evidenz für einen Zusammenhang zwischen niederfrequenten Magnetfeldern und ALS (amyotrophe Lateralsklerose, ein durch das Absterben motorischer Nervenzellen bedingter Verlust an muskulärer Koordination, verknüpft mit Muskelschwund; ein bekanntes Beispiel ist der Physiker Stephen Hawking, der an der sehr seltenen juvenilen ALS erkrankte) unzureichend (p. 206):

“Some of these reports suggest that people employed in electrical occupations have an increased risk

of ALS. So far no biological mechanism has been established which can explain this association, although it could have arisen because of confounders related to electrical occupations such as electric shocks. Overall, the evidence for the association between ELF exposure and ALS is considered inadequate".

Seit 2007 sind eine Reihe von Forschungsarbeiten publiziert worden, welche eine robustere Beurteilung erlauben. Keine erhöhten Risiken bei beruflicher Exposition fand die bereits oben zitierte Studie von (Sorahan & Kheifets, 2007) zu Angestellten in Elektrizitätsunternehmen in U.K. Die "follow-up"-Studie (Sorahan & Mohammed, 2014) fand erneut keinen Zusammenhang zwischen ALS und Magnetfeldexposition. Die Arbeit von (Roosli et al., 2007b) zu neurodegenerativen Erkrankungen bei Eisenbahnangestellten errechnete erhöhte Risiken für ALS, allerdings ist wegen der wenigen Fälle die statistische Unsicherheit bedeutsam, so dass sich keine wirklich robuste Aussage ableiten lässt. (Stampfer, 2009) fand keine erhöhten Risiken in seiner Untersuchung zu Schweissern in den USA. (Parlett et al., 2011) haben in ihrer Untersuchung alle Berufsgruppen, die überdurchschnittlich hohen Magnetfeldern ausgesetzt sind – Expositionsermittlung nach (Bowman et al., 2007) – berücksichtigt und ebenfalls keine erhöhte ALS-Mortalität festgestellt.

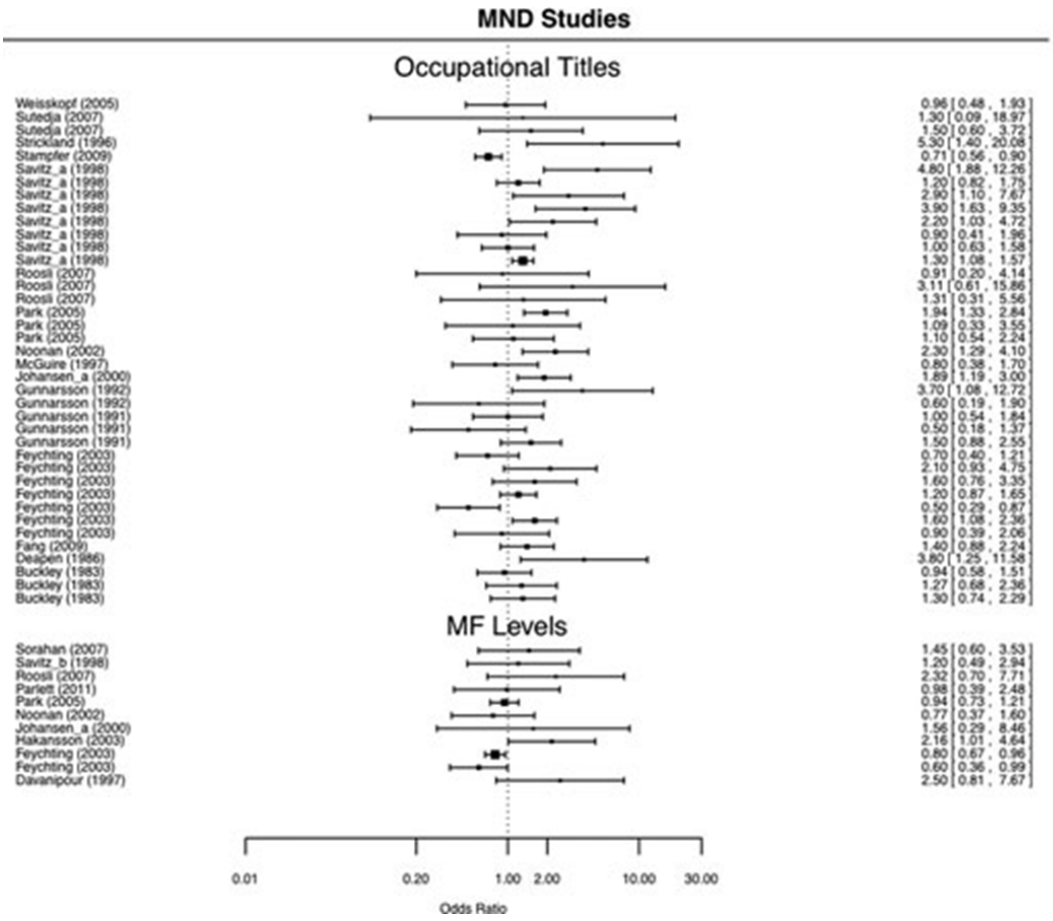


Abbildung 24: Überblick über Studien zu ALS und beruflichen Magnetfeldexpositionen (Quelle: Vergara et al. 2013, p. 140) (Vergara et al., 2013).

(Zhou et al., 2012) führten eine Metanalyse mit 17 Studien durch. Für Fall-Kontroll-Studien und für gepoolte Studien erhielten sie leicht erhöhte, statistisch signifikante Risikoschätzer. Allerdings warnen die Autoren aufgrund der Heterogenität der Studien (p. 1):

"Our data suggest a slight but significant ALS risk increase among those with job titles related to relatively high levels of ELF-EMF exposure. Since the magnitude of estimated RR was relatively small, we cannot deny the possibility of potential biases at work".

(Vergara et al., 2013) kamen in ihrer Meta-Analyse zum Schluss, dass das Risiko für ALS in Berufen mit Magnetfeldern statistisch signifikant erhöht ist (RR = 1.26; 95% CI = 1.10–1.44). Aufgrund der Heterogenität der Studien und von möglichen Expositionsmisklassifikationen verbleiben aber erhebliche Unsicherheiten, siehe Abbildung 24.

In der Studie von Fischer et al. (H. Fischer et al., 2015), in die über 4'500 schwedische ALS-Patienten und mehr als 20'000 Kontrollen einflossen, konnten obige Befunde nicht bestätigt werden. Es wurden keine Zusammenhänge zwischen ALS und Magnetfeldexpositionen (erfasst nach INTEROCC JEM, ergänzt mit Messdaten) gefunden. Ein statistisch signifikanter Zusammenhang zeigte sich in einer Unteranalyse: die Häufigkeit von elektrischen Schlägen geht bei den unter 65-jährigen einher mit einem leicht erhöhten (OR = 1.22; 95% CI = 1.03-1.43) ALS-Risiko.

Erhöhte Risiken wurden in folgenden Originalarbeiten notiert: (Fang et al., 2009) untersuchten in einer Fall-Kontroll-Studie in Neuengland 109 Fälle auf verschiedene Arbeitsplatzbelastungen hin, wobei die Exposition selbsteingeschätzt war. Für Arbeiten mit elektrischen Installationen und Maschinen wurde für die mittlere und die höchste Expositionskategorie ein statistisch nicht signifikantes Risiko von 1.6 bzw. 1.5 berechnet. (Huss et al., 2014) errechneten in ihrer Mortalitätsstudie zu neurodegenerativen Erkrankungen für die nationale Kohorte der Schweiz ein Risiko von 1.55 (95% CI = 1.11–2.15). Auch in Detailanalysen waren die Risiken bei mittlerer bis grosser beruflicher Exposition leicht erhöht. In derselben Studie wurde auch das Risiko elektrischer Schläge berücksichtigt. Die Modelle zeigten keine Auffälligkeit (die systematische Literaturanalyse von (Abhinav et al., 2007) zu ALS und elektrischen Schlägen lässt ein Risiko als unwahrscheinlich erscheinen), so dass (Huss, Spoerri, et al., 2015) schlussfolgern (p. 84):

„In summary, our study provided no evidence that ALS is associated with electrical shocks at work. We did find that ALS is associated with occupational exposure to medium or high levels of extremely low-frequency magnetic fields among workers with a higher likelihood of being long-term exposed to ELF-MF".

Die Studie von Koeman et al. (Koeman et al., 2017) stellt einen Zusammenhang zwischen ALS und Magnetfeldbelastung – nicht aber mit Elektroschocks – fest. Eine Stärke dieser Arbeit ist, dass es sich um eine prospektive Fall-Kontroll-Studie handelt (follow-up 17.3 Jahre) und vergleichsweise viele Fälle (76 Männer, 60 Frauen) dieser sehr seltenen Krankheit vorlagen. Limitationen besitzt wie fast jede epidemiologische Arbeit auch diese, insbesondere wurde die berufliche Magnetfeldbelastung (über eine Job-Exposure-Matrix) nur einmal, bei der Rekrutierung der Beschäftigten, erhoben. Es muss deshalb mit zufälligen Expositions-Missklassifikationen gerechnet werden.

Studien zur Exposition der Allgemeinbevölkerung lagen bis 2017 vier vor: Alle fanden keinen Zusammenhang zwischen der Exposition gegenüber Hochspannungsleitungen und ALS. Drei dieser Studien wurden bereits erwähnt: (Huss et al., 2009), (Marcilio et al., 2011) und (Frei et al., 2013). Die neueste Arbeit ist von (Seelen et al., 2014), eine bevölkerungsbasierte Fall-Kontroll-Studie. Weder für Hoch- (50-150 kV) noch für Höchstspannungsleitungen (220–380 kV) zeigten sich in den untersuchten Distanzkorridoren (Grenzen: 50 m, 200 m, 600 m) Auffälligkeiten. Die Anzahl Fälle war aber in all diesen Studien gering.

Neue epidemiologische Studien seit 2017

Vinceti und Kollegen (2017) untersuchten in Italien das ALS-Risiko in Abhängigkeit von der NF-MF-Exposition von Hochspannungsleitungen mit einer Spannung von 132 kV oder höher (Vinceti et al., 2017). Dazu identifizierten sie alle zwischen 1998 und 2011 in Norditalien (Emilia-Romagna) und Sizilien (Catania) diagnostizierten Fälle sowie vergleichbare gesunde Kontrollpersonen. Die mittlere NF-

MF-Exposition für das Jahr 2001 aller Studienteilnehmenden wurde modelliert. Insgesamt wurden 703 Patienten und 2‘737 Kontrollpersonen in die Studie eingeschlossen. Nur bei sechs Patienten und bei 35 Kontrollpersonen betrug das NF-MF am Wohnort mindestens 0.1 µT. Damit ergab sich kein erhöhtes Risiko (relatives Risiko: 0.65 mit einem Konfidenzintervall von 0.27-1.55). Dies ist die erste Studie, in der NF-MF-Exposition am Wohnort modelliert wurde. Die bisherigen vier Studien aus der Schweiz, Dänemark, Holland und Brasilien berücksichtigten nur die Distanz zu den Hochspannungsleitungen als Mass für die Exposition. Keine dieser fünf Studien fand bisher einen Hinweis, dass NF-MF von Hochspannungsleitungen ALS verursachen könnte. Das deutet darauf hin, dass NF-MF von Hochspannungsleitungen eher kein Risikofaktor für ALS ist. Zu diesem Schluss kommen auch zwei kürzlich publizierte Meta-Analysen (Filippini et al., 2021; Roosli & Jalilian, 2018), welche alle bisher publizierten Studien eingeschlossen haben, siehe Abbildung 25.

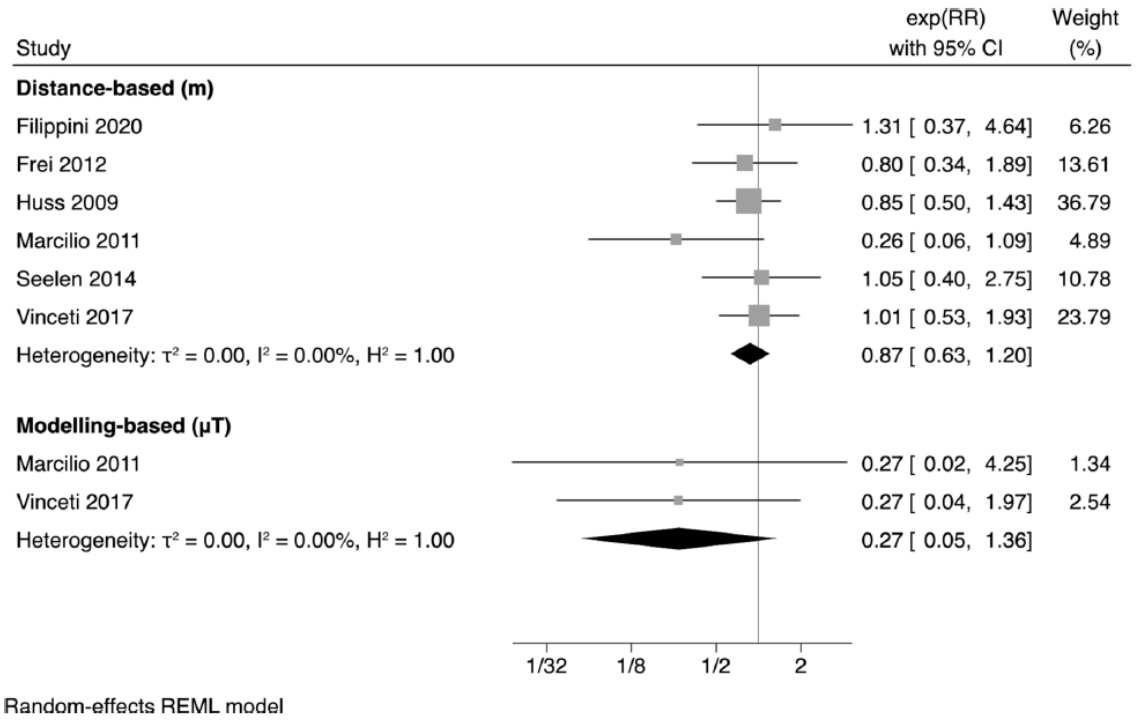


Abbildung 25: Meta-Analyse aller Studien zu häuslicher NF-MF Exposition und ALS (Quelle: (Filippini et al., 2021))

Mehrere Studien zu ALS untersuchten berufliche NF-MF-Expositionen. In einer grossen multinationalen Fall-Kontrollstudie flossen Daten von 1‘323 ALS-Patienten ein, welche zwischen 2010 und 2015 in Irland, Italien und Holland diagnostiziert wurden sowie die Daten von 2‘704 Kontrollpersonen (Peters et al., 2019). Für Personen, die mindestens einmal in ihrem Beruf NF-MF ausgesetzt waren oder ein erhöhtes Risiko für Stromschläge hatten, wurde statistisch signifikant, ein 16% bzw. 23% erhöhtes ALS-Erkrankungsrisiko festgestellt. Die Ergebnisse waren jedoch nicht konsistent zwischen den drei Studienzentren/-Ländern und zeigten in Bezug auf die kumulative Exposition keine Dosis-Wirkungsbeziehung. Die Studie deutet darauf hin, dass sowohl die berufliche NF-MF-Exposition wie auch Stromschläge das Risiko, an ALS zu erkranken, unabhängig voneinander erhöhen.

In einer neuseeländischen bevölkerungsbezogenen Fall-Kontroll-Studie wurde bei 319 ALS-Patienten Zusammenhänge mit beruflicher Exposition gegenüber Elektroschocks und NF-MF untersucht (Chen

et al., 2019). Während für NF-MF-Exposition kein erhöhtes Risiko beobachtet wurde, hatten Arbeitnehmende, welche jemals in einem Beruf gearbeitet hatten, in dem es zu Stromschlägen kommen kann, ein erhöhtes Erkrankungsrisiko, welches knapp nicht signifikant war (OR = 1.35, 95% KI: 0.98 bis 1.86). Für die am stärksten von Stromschlägen betroffenen Arbeitenden, war das Erkrankungsrisiko rund doppelt so hoch (OR = 2.01, 95%CI: 1.31 bis 3.09).

In der oben erwähnten dänischen Studie bei Angestellten der Elektrizitätsindustrie fanden sich Hinweise für ein erhöhtes ALS-Erkrankungsrisiko bei den am stärksten beruflich exponierten Arbeitern (Pedersen et al., 2017). Das Erkrankungsrisiko war rund doppelt so hoch. Die Analyse beruhte aber auf nur neun stark NF-MF-exponierten Fällen.

Soharan verglichen die ALS-Sterblichkeit von 37'986 Angestellten von britischen Elektrizitätsunternehmen zwischen 1987 und 2018 mit der entsprechenden Sterblichkeit in der der Allgemeinbevölkerung (Sorahan & Nichols, 2022). Es wurde keine erhöhte Sterblichkeit beobachtet. Diese Untersuchung hat jedoch keine anderen Faktoren mitberücksichtigt. Damit bleibt der sogenannte "Healthy Worker"-Effekt eine Limitierung bei der Interpretation.

Meta-Analysen zum ALS-Risiko im Zusammenhang mit beruflicher NF-MF berichten von erhöhten Risiken, betonen aber auch die bestehenden Unsicherheiten und Inkonsistenzen zwischen den Studien, welche keine abschliessende Beurteilung zulassen. Insbesondere bleibt unklar, ob NF-MF oder Stromschläge kritisch sind (Jalilian et al., 2021):

"The findings indicate that occupational exposure to ELF-MF, but not electric shocks, might be a risk factor for ALS. However, given the moderate to high heterogeneity and potential publication bias, the results should be interpreted with caution".

Hingegen berichten Filippini et al. (Filippini et al., 2020) über einen Zusammenhang mit Stromschlägen.

Huss et al betonen, dass Studien mit besserer Expositionsabschätzung eher Zusammenhänge finden (Huss, Peters, et al., 2018):

"Highest-longest types of exposure translated into increased risks of ALS if the studies had evaluated the whole occupational history, in contrast to evaluating only few points in time (e.g., from census records); sRR were 1.89 (CI 1.31-2.73, I2 0%) and 1.06 (CI 0.75-1.57, I2 76%), respectively. In this meta-analysis, we observed an increased risk of ALS in workers occupationally exposed to ELF-MF. Results of studies depended on the quality of the exposure assessment."

Eine Literatur-Analyse und Meta-Studie von Gunnarsson und Bodin (Gunnarsson & Bodin, 2018) untersuchte getrennt berufliche Exposition mit RR 1.16 (CI 1.00-1.35, I^2 48.7%) und Exposition gegenüber NF-MF mit RR 1.23 (CI 1.04-1.35, I^2 65.6%) für ALS. Eine weitere Studie von Gunnarsson und Bodin (Gunnarsson & Bodin, 2019) schlussfolgert:

"Occupational exposure to EMFs seemed to involve some 10% increase in risk for ALS and Alzheimer's disease, but no such indication of risk was found for Parkinson's disease."

4.3.3.4 Andere neurodegenerative Erkrankungen

Bezüglich Parkinson liegen mehrere Studien zu beruflicher Exposition vor. In den zwei Arbeiten zu neurodegenerativen Erkrankungen bei Elektrizitätsangestellten in U.K. fanden (Sorahan & Kheifets, 2007) sowie (Sorahan & Mohammed, 2014) keine Belege für erhöhte Parkinson-Sterblichkeit aufgrund von Magnetfeldexpositionen. In der zweiten Studie zeigten sich in einzelnen Expositionskategorien erhöhte Risiken, insgesamt aber sind die Autoren der Meinung, dass die Daten nicht als Hinweise auf einen kausalen Zusammenhang gedeutet werden können. Auch in der Schweizer Studie von (Roosli et al., 2007b) gab es unter den besonders exponierten Lokführern keine Auffälligkeit, und dasselbe gilt für die ebenfalls besonders exponierten Schweisser in den Studien von (Stampfer, 2009) und

(Kenborg et al., 2012). Eine spitalbasierte Fall-Kontroll-Studie mit über 400 Fällen, die sowohl berufliche als auch häusliche Exposition (Gebrauch von elektrischen Geräten und Maschinen) sowie die Rolle von elektrischen Schlägen untersucht (van der Mark et al., 2015), fand keine positiven Zusammenhänge. Im Gegensatz dazu haben (Brouwer et al., 2015) in einer Detailuntersuchung der prospektiven dänischen Kohorte einen Einfluss beruflicher Magnetfeldexposition auf das Parkinson-Risiko berechnet. Allerdings sind die Fallzahlen tief und die Autoren mahnen zur vorsichtigen Interpretation, weil es kein Dosis-Wirkungsmuster gibt.

Eine Metaanalyse von 11 Studien zu beruflich Exponierten (Huss, Koeman, et al., 2015) fand kein erhöhtes Risiko (OR = 1.05; 0.98-1.13).

Bei den zwei bevölkerungsbasierten Studien von (Huss et al., 2009) und (Frei et al., 2013) zeigten sich ebenfalls keine erhöhten Risiken. Dasselbe gilt für (van der Mark et al., 2015), die in einer spitalbasierten Fall-Kontroll-Studie den möglichen Zusammenhang zwischen Parkinson und der kombinierten beruflichen und privaten Exposition untersuchten. Sie stellten keinen Einfluss fest.

Nur wenige Arbeiten gibt es zu Multipler Sklerose im Zusammenhang mit niederfrequenten Magnetfeldexpositionen: zwei bevölkerungsbasierte Studien (Huss et al., 2009), (Frei et al., 2013) und eine zu beruflicher Exposition (Roosli et al., 2007b). Alle drei Studien konnten keine erhöhten Risiken feststellen.

Neue epidemiologische Studien seit 2017

Bei der oben erwähnten italienischen Fall-Kontrollstudie zu neurodegenerativen Erkrankungen innerhalb von 50 m von einer Hochspannungsleitung wurden auch knapp 7'000 Parkinson-Erkrankungen, eingeschlossen (Vinceti et al., 2017). Es wurde ein leicht, statistisch nicht-signifikant erhöhtes Risiko beobachtet 1.09 (95% KI: 0.92–1.30) (Gervasi et al., 2019). In der oben erwähnten dänischen Elektrizitätsarbeiterstudie (Pedersen et al., 2022) war das Erkrankungsrisiko für Parkinson und Multiple Sklerose nicht statistisch signifikant erhöht (Pedersen et al., 2017). Bezüglich Parkinson ist dies auch im Einklang mit der oben erwähnten Metaanalyse von Gunnarsson und Bodin (Gunnarsson und Bodin 2019).

4.3.3.5 Tier- und Zellstudien im Zusammenhang mit neurodegenerativen Erkrankungen

Obwohl der Einfluss von EMF und anderen Umwelteinflüsse auf das Entstehen von neurodegenerativen Erkrankungen regelmässig thematisiert wird, ist die Datenlage bezüglich Mechanismen und ursächliche, Zusammenhang sehr lückenhaft. Auch zum Teil bedingt dadurch, dass die Ätiologien (Ursache für die Entstehung) dieser Krankheiten noch nicht vollumfänglich verstanden sind, obwohl auch hier, neben anderen pathologischen Veränderungen, oxidativer Stress in der Degeneration der Nervenzellen beteiligt ist. Inwieweit der oxidative Stress ursächlich und/oder eine Konsequenz der pathologischen Veränderungen ist, ist nicht klar abgrenzbar. So wurde nach einer vierwöchigen 50 Hz NF-MF-Exposition (22 Std./Tag, 10 kV/m, 4 pT magnetische Induktion) von männlichen Ratten keine Hinweise auf oxidativen Stress (MDA-Level und totaler oxidativer Status, TOS) in verschiedenen Hirnregionen gefunden (Budziosz et al., 2018). Allerdings zeigten sich in einigen Hirnregionen auch Veränderungen des antioxidativen Verteidigungssystem. Unterschwellige Veränderungen des oxidativen Gleichgewichtes könnten also vorhanden sein, ohne dass sich dies zu einer chronischen oxidativen Stresssituation entwickelt. Demgegenüber wurde in einer anderen Studie mit männlichen Ratten Anzeichen von oxidativem Stress in der Hirnrinde und dem Kleinhirn gefunden nach chronischer 50 Hz NF-MF-Exposition bei 2.4 mT Feldstärke für 2 Stunden/Tag während 21 Tagen (Martínez-Sámano et al., 2018). Zudem wurde Veränderung der Profile der fettähnlichen Stoffe in den Hirnregionen gefunden, die einer Stresssituation durch Einengung ähnelt, was in beiden Fällen zu einer Erhöhung des Stressmarker Corticosteron im Blut führte.

Es gibt nur wenige tier- und zellexperimentelle Studien, die sich direkt mit der Fragestellung nach der

Kausalität zwischen neurodegenerativen Erkrankungen und EMF auseinandersetzen. Zusätzlich gibt es aber einige Untersuchungen zu EMF-Einflüssen auf kognitive Fähigkeit und neuronale Funktionen und Entwicklung (siehe Kapitel 0), die auch im Zusammenhang zu neurodegenerativen Erkrankungen stehen. Zudem gilt es bei experimentellen Studien zu beachten, dass in vielen davon EMF zu therapeutischen Interventionen eingesetzt werden und eher schützend wirken (Consales et al., 2012b; Consales, Merla, et al., 2018). Eine neuere Übersichtsarbeit fasst den gegenwärtigen Wissensstand so zusammen (Riancho et al., 2021):

"To date, there is no clear and consistent evidence supporting a causative relationship between electromagnetic field and AD, PD, or ALS. Interestingly, this electromagnetic radiation has been assessed as a therapeutic tool for some of these conditions, especially for PD, with intriguing results. Future epidemiological, clinical, and experimental studies will help to clarify this issue".

In der Tierstudie von Hu et al. (Hu et al., 2016) wurde ein Mausmodel für Alzheimer (und zum Vergleich gesunde Tiere) eingesetzt, um den Einfluss eines 50 Hz NF-MF auf kognitiven Fähigkeiten und molekulare Marker zu untersuchen. Diese Tiere entwickeln Demenzsymptome im Alter von sechs Monaten und wurden ab dem Alter von drei Monaten täglich für 20 Stunden mit einem 500 µT 50 Hz NF-MF ausgesetzt. Die Autoren berichten, dass die exponierten Tiere des Alzheimer-Modells einen reduzierten Verlust der kognitiven Fähigkeiten aufwiesen. Auf molekularer Ebene zeigte sich, dass der Verlust an Proteinen im Hypocampus, die für Gedächtnisleistung wichtig sind, weniger ausgeprägt ist und dass die Exposition auch oxidativem Stress und dem Absterben von Neuronen durch Apoptose entgegenwirkte. Zudem waren die für Alzheimer typische Plaque-Bildung und Aggregation vom Tau-Proteinen weniger ausgeprägt, sodass die Autoren schlussfolgerten, dass die NF-MF-Exposition einen protektiven Effekt auf die Ausbildung von Alzheimer hat. In den gesunden Tieren mit und ohne Exposition hingegen wurden kaum signifikante Unterschiede beobachtet, und wenn, war eher ein Trend zu verbesserten kognitiven Fähigkeiten und höheren Level an den «Gedächtnis»-Proteinen.

Den gleichen protektiven Effekt von NF-MF-Exposition auf kognitiven Verlust wurde auch in einem Alzheimer-Modell der Ratte festgestellt, in dem Plaque-bildenden Amyloid-β-Peptide eingesetzt wurden (Akbarnejad et al., 2018; Zuo et al., 2018). Beobachtet wurde dies in der Studie von Akbarnejad et al. (Akbarnejad et al., 2018) für ein 50 Hz therapeutisches Feld bei 10 mT Feldstärke, das täglich für eine Stunde während 14 Tagen eingesetzt wurde, während ein sinusförmigen 50 Hz NF-MF bei 400 µT mit kontinuierlicher Exposition für 60 Tagen von Zuo et al. (Zuo et al., 2018) verwendet wurde. In der letzteren Studie wurden zudem Veränderungen der Lernfähigkeit zwischen gesunden schein- und NF-MF-exponierten Tieren festgestellt, sowie dem NF-κB Signalweg eine Rolle in der Wirkung der Exposition zugewiesen.

Eine therapeutische Ausrichtung hatte auch die Studie von Jadidi et al. (Jadidi et al., 2016), in der ein Rattenmodell mit chemisch-induziertem Parkinson eingesetzt wurde. Knochenmarkstammzellen wurden während einer Woche täglich für 1 Stunde einem 50 Hz NF-MF bei 40 oder 400 µT Feldstärke ausgesetzt, bevor sie ins Rattenhirn transplantiert wurden. In den Parkinson-Tieren führte dies in einer dosisabhängigen Art und Weise zu einer Verbesserung des Verhaltens, mehr dopaminerge Neuronen und des Neurotrophins BDNF, das für den Erhalt und Neubildung von Neuronen wichtig ist. In der Tat publizierte die gleiche Forschungsgruppe später, dass die ex vivo NF-MF-Exposition die Neubildung von Neuronen fördert (Asadian et al., 2021). Eine stimulierende Wirkung auf die Ausreifung von Neuronen hatte auch ein kontinuierliches 50 Hz NF-MF bei 1 mT Flussdichte, wenn menschliche neuronale Stammzellen untersucht wurden (Özgün et al., 2019). Obwohl diese Beobachtungen in Zellkulturen eher auf eine Wirkung hindeuten, die Neurodegeneration durch Neubildung von Neuronen entgegenwirkt, ist es unklar, ob sich dies auch im Organismus so verhält. So, wurde im Hypocampus von Mäusen, die mit einem 50 Hz NF-MF (8 mT, 4 Stunden/Tag während 28 Tagen) exponiert wurden, eine Reduktion des Neurotrophins BDNF festgestellt (H. Zhang et al., 2017), was mit Veränderungen von Kalzium-abhängigen Signalwegen einherging. Andererseits stellte eine andere Studie in jungen

Mäusen fest, dass eine 50 Hz NF-MF-Exposition bei 1 mT für 3.5 Stunden täglich während 12 Tage zu einer verstärkten Neubildung von Neuronen in der subventrikulären Zone des Hirnes führte (Mastrodonato et al., 2018). Diese Zunahme von Neubildung von Neuronen wurde über den Wnt/β-catenin-Signalweg vermittelt und führte dazu, dass die Mäuse ein verbessertes Erinnerungsvermögen für Gerüche zeigten. Eine Verbesserung der Neuronen-Neubildung und des Wiedererlangens der kognitiven Leistungsfähigkeit wurde auch in einem Rattenmodell für Hirnschläge (ischämische Schlaganfall) beobachtet, wenn diese mit einem 50 Hz NF-MF bei 1 mT Feldstärke für täglich 2 Stunden während 28 Tagen behandelt wurden (Gao et al., 2021).

In einer neueren Zellstudie haben Benassi et al. (Benassi et al., 2016b) ein in vitro-Modell für Parkinson (Parkinson's disease, PD) eingesetzt, um den Einfluss eines 50 Hz NFMF (1 mT, 6-72 Stunden) auf die Ausbildung des Krankheitsbildes zu untersuchen. Dazu wurden menschliche Neuroblastom-Zellen mit dem Neurotoxin MPP+ behandelt, dass im Tiermodel Parkinson auslöst, bedingt durch das Absterben von Neuronen durch oxidativen Stress. In der Tat verstärkte die NF-MF-Exposition den oxidativen Stress und das Absterben der MPP+-behandelten Zellen, was auf eine fördernde Wirkung des NF-MF auf die Progression der Erkrankung hindeuten könnte. Später hat die gleiche Forschungsgruppe in diesem Zellmodel für PD gezeigt, dass die 50 Hz NF-MF-Exposition bei 1 mT keine globalen epigenetischen Veränderungen der Erbsubstanz (DNS-Methylierung) verursacht (Benassi et al., 2019), die typisch für Zellen von Parkinson-Erkrankter sind (Consales, Merla, et al., 2018). Lokale Veränderungen der epigenetischen DNS-Methylierung sowie eine Reduktion der Expression einer anderen epigenetischen Komponente, den sogenannten MikroRNAs (miRNA), durch eine 50 Hz NF-MF-Exposition wurde im gleichen Neuroblastoma-Zellmodel von derselben Forschungsgruppe publiziert, zusammen mit einer Serie von mechanistischen Daten (Consales, Cirotti, et al., 2018). Die Zellen wurden jeweils für 4-72 Stunden bei 1 mT Feldstärke exponiert, wobei teilweise die Neuroblastom-Zellen vorgängig behandelt wurden, was zu dopaminerge Neuronen-ähnlichen Eigenschaften führt, und zur Bestätigung der Befunde auch primäre Mausneuronen eingesetzt wurden. Zudem wurde gezeigt, dass die NF-MF-bedingte Reduktion der Expression bestimmter miRNAs, zu erhöhter ROS-Produktion und einer oxidativen Stresssituation in den dopaminergen Zellen beiträgt und zu einem Anstieg der Menge des Proteins α-Synuklein führt. α-Synuklein ist ein lösliches Protein, dass in Nervenzellen an der Ausschüttung von Dopamin beteiligt ist, und typischerweise bei Parkinson fehlgefaltet wird und aggregiert. Laut Autoren könnte dies eine Erklärung für das Auslösen von Parkinson durch NF-MF liefern.

Abschliessend sollen hier noch zwei weitere Studien kurz erwähnt werden. Consales et al. (Consales et al., 2019) führten auch Untersuchungen zu ALS an einem genetisch-modifizierten Neuroblastoma-Modell durch, dass sich durch erhöhte ROS-Level auszeichnet. Die 50 Hz NF-MF-Exposition für bis zu 72 Stunden (1 mT) zeigte in diesem ALS-Modell keine Auswirkungen auf die Vitalität der Zellen noch wurde erhöhter oxidativer Stress verursacht. Einzig die Aktivität einiger Gene, die an der Regulierung von Eisen beteiligt sind, wurde beeinflusst. Ohtani et al. (Ohtani et al., 2019) haben Mäuse einem starken 85 kHz IF-EMF (25.3 mT) täglich für eine Stunde während 10 Tagen ausgesetzt und danach genomweite Genexpression im Hirn und in der Leber analysiert, um Hinweise auf veränderte Zellfunktion zu finden. Konsistente transkriptionelle Veränderungen durch die Exposition könnten aber nicht identifiziert werden.

4.3.3.6 Bewertung

Inzwischen liegt eine ganze Reihe von Studien über mögliche Zusammenhänge zwischen neurodegenerativen Erkrankungen und niederfrequenten Magnetfeldexpositionen vor. Die meisten Arbeiten beschäftigen sich mit beruflicher Exposition; erst wenige Studien haben auch alltägliche Magnetfeldbelastungen, v.a. im Zusammenhang mit Hochspannungsleitungen, untersucht. Die methodischen Unsicherheiten bei der Expositionserfassung sind gross und es ist unklar, ob sie systematischer oder differentieller Natur sind, sodass man nicht beurteilen kann in welche Richtung die berechneten Risiko-

schätzer beeinflusst sein könnten. Sodann ist auch anzunehmen, dass in Studien, die mit Todesscheinen gearbeitet haben, Demenzerkrankungen untervertreten sind, was eine zusätzliche Fehlerquelle ist. ALS hingegen dürfte in diesen Registern aufgrund der hohen Sterblichkeit in relativ jungem Alter zuverlässiger erfasst sein. Die Heterogenität der publizierten Arbeiten ist sehr gross, so dass auch Meta-Analysen mit der angemessenen Vorsicht interpretiert werden müssen.

Ein vorsichtig formuliertes Gesamtbild sieht folgendermassen aus: Es ist unwahrscheinlich, dass niederfrequente Magnetfeldexpositionen, berufliche wie häusliche, das Risiko von Parkinson und MS erhöhen. Nicht auszuschliessen ist, dass beruflich stark exponierte Personen (spezifische Berufsgruppen und Tätigkeiten) ein leicht erhöhtes Risiko für ALS und Alzheimer, allenfalls auch für andere Demenzerkrankungen, eingehen. Für Alltagsexpositionen ist die Datenlage noch sehr dünn, vereinzelte Hinweise deuten aber auf ein erhöhtes Alzheimer-Risiko hin. Hinsichtlich ALS bleibt unklar, ob berufliche Belastungen an Magnetfeld-exponierten Jobs und Tätigkeiten das Risiko erhöht oder ob auch Stromschläge eine Rolle spielen. Die Studienlage ist diesbezüglich inkonsistent, aber praktisch alle Studien zu beruflichen Expositionen finden entweder für das eine (Magnetfeld) oder für das andere (Stromschläge) ein erhöhtes Risiko. Die Schwierigkeit bei der Erforschung dieser Krankheit ist, dass sie sehr selten ist. Obwohl einige neue Studien publiziert wurden, hat sich an der Einschätzung eines möglichen Risikos seit 2017 wenig geändert. In den neuen Studien sind die Resultate ähnlich wie bisher.

4.3.4 Fruchtbarkeit, Schwangerschaft, Geburt

4.3.4.1 Männliche Fruchtbarkeit

Den Grossteil der Untersuchungen zu dieser Fragestellung machen Tierstudien aus. (de Bruyn & de Jager, 2010) fassen den Wissensstand vor 12 Jahren folgendermassen zusammen (p. 53):

“These studies on reproductive effects in the mammalian system reported mostly non-significant results, but some significant effects were found. (Ramadan et al., 2002) reported a decreased sperm count, sperm motility, and daily sperm production. (Al-Akhras et al., 2006) also reported reduced testicular sperm count”.

(Lee et al., 2014) kommen 4 Jahre später (ähnlich wie die BioInitiative Gruppe) zu einem aus ihrer Sicht klaren Schluss (p. 3):

“There is continuously increasing evidence of adverse effects of ELF-MF on testes in mammals”.

2013 fanden Akdag et al. (Akdag et al., 2013) mit Langzeitexposition (2 Std/Tag, 7 Tage/Woche über 10 Monate; 100 µT und 500 µT) von Ratten keine Auswirkungen auf Spermienzahl und Spermienbeweglichkeit, hingegen wird eine Aktivität verstärkt, die für die Apoptose während der Spermienproduktion verantwortlich ist. Das könnte die Befunde von (Kim et al., 2014) und (Tenorio et al., 2014) erklären. Erstere stellten eine erhöhte Apoptoserate (und eine tiefere Spermienzahl) in ihren Versuchen mit exponierten Mäusen fest (Expositionen 2–200 µT; 24 Std/Tag, 8 Wochen), letztere eine verminderte Erholung bei geschädigter Spermatogenese (Exposition: 3x30 Min/Tag, 15 Tage; 1 mT). (Duan et al., 2014) hingegen kommen nach Exposition von Ratten mit 500 µT starken 50 Hz Magnetfeldern, (4Std/Tag, 7 Tage/Woche, 4 bzw. 8 Wochen lang) zum Schluss (p. 58):

“In conclusion, our study indicates that exposure to low intensity ELF-MF may have no adverse effects on spermatogenesis”.

An dieser unsicheren Datenlage und unterschiedlichen Schlussfolgerungen hat sich auch bis heute wenig geändert. Auch weil die Mehrheit der neueren Publikation, die sich mit der Thematik der männlichen Fruchtbarkeit befasste, aus dem HF-EMF-Bereich stammen (Gautam et al., 2021). In ihrer Übersichtsarbeit fassen Santini *et al.* (Santini et al., 2018) dies so zusammen:

“Many experimental studies have been carried out in order to evaluate the risk of ELF-EMFs on male reproductive function and sperm quality in mammalian species including humans, but data obtained are often contradictory. (..) Contradictions may be due to the different experimental settings or animal models or even explained by different impacts of ELF-EMFs in animals of different sizes”.

In neueren Tierstudien wurde von Veränderungen von Parametern des oxidativen Gleichgewichts im Hodengewebe von männlichen Ratten berichtet, die für einen Monat, 5 Tage pro Woche und 20 Minuten pro Tag einem starken 8.4 mT 50 Hz NF-MF ausgesetzt waren (Kuzay et al., 2017). Dieser Effekt war stärker ausgeprägt in einem Diabetes-Rattenmodel als in gesunden Tieren. Allerdings wurden hier keine Daten zur Spermienqualität erhoben. Chronische Exposition von männlichen Ratten mit einem 60 Hz NF-MF für vier Wochen bei 2, 20 oder 200 µT Feldstärke wurde in der Studie von Park *et al.* (Park et al., 2018) angewendet. Es wurde beobachtet, dass bei der höchsten Dosis, die Anzahl von Zellen in Apoptose im Hodengewebe erhöht und die Spermienzahl reduziert war. Hingegen wurden weder morphologische Gewebeveränderungen noch eine Verringerung der Spermienmotilität gefunden. Keinen Einfluss auf die Spermienzahl und weitere Fertilitäts-Parameter wurde in Ratten und Mäusen gefunden, die chronisch für 20 Stunden/Tag mit einem 50 Hz NF-MF bei 30, 100 und 500 µT Feldstärke exponiert wurden (Ruan et al., 2019). Auch die Testosteronwerte und der Zuchterfolg wurde durch die Exposition nicht signifikant beeinflusst.

Noch lückenhafter ist die Datenlage zur männlichen Fertilität für den IF-EMF-Bereich (Bodewein et al., 2019). Dazu gibt es nur eine neuere Tierstudie, die den Einfluss eines 7.5 kHz IF-EMF bei 12 und 120 µT Feldstärke auf die Spermienqualität und Hodenmorphologie von männlichen Mäusen untersuchte (Kumari, Capstick, et al., 2017). Nach fünf Wochen Exposition wurden keine Beeinträchtigung der Sexualorgane oder der Anzahl und Beweglichkeit der Spermien festgestellt. Im Gegenteil, die Beweglichkeit war sogar tendenziell erhöht in Abhängigkeit der Dosis, wobei diese Beobachtung laut den Autoren nach einer Bestätigung verlangt.

Humanstudien neueren Datums mit Spermiendonatoren gibt es erst eine. Die Studie von (Li et al., 2010) ergab eine dosisabhängige, signifikante Einbusse in der Qualität (Konzentration, Morphologie, Vitalität und Beweglichkeit) der Spermien von 148 Spendern (76 Fälle, 72 Kontrollen; Expositionen gemessen an einem Tag während 24 Stunden mit einem mobilen Dosimeter). Aus dieser Einzelstudie können keine allgemeinen Schlussfolgerungen gezogen werden. Die Exposition der Spender gegenüber EMF und bekannten Störgrössen müsste über 3 Monate (Zeitraum der Spermienbildung) bekannt sein, um einen möglichen direkten Einfluss von EMF feststellen zu können.

Die Publikation von Lewis et al. (Lewis et al., 2016c) ist eine Review von 13 epidemiologischen Arbeiten zum gesamten Themenkreis dieses Kapitels (Fruchtbarkeit, Schwangerschaft, Geburt). Sie identifizierte als einzige begutachtete Publikation die oben erwähnte Studie von (Li et al., 2010). Die Autoren bewerten die Arbeit nicht.

Ein Problem solcher Studien ist die Expositionserfassung. (Lewis et al., 2016b) und (Lewis et al., 2016a) haben hierzu Messungen und Abschätzungen durchgeführt, um minimale Anforderungen für möglichst robuste Expositionswerte zu erhalten. Grundsätzlich muss – mit Blick auf den nachfolgenden Abschnitt – festgehalten werden, dass die Exposition von Föten gegenüber Magnetfeldern des Alltags deutlich unterhalb der Basisgrenzwerte der ICNIRP liegt. Simulationen zeigten erst bei Flussdichten über 1 mT ein Überschreiten der Basisgrenzwerte (Liorni, Parazzini, Fiocchi, et al., 2016).

4.3.4.2 Schwangerschaft/Entwicklung und Geburt

(Juutilainen, 2005) fasste in seiner Überblicksarbeit zu Tierversuchen zum Einfluss von Magnetfeldexpositionen auf die Entwicklung von Föten zusammen (p. S107):

“Taken as a whole*, the results do not show robust adverse effects of ELF (…) fields on development”.*

Zu einer ähnlichen Einschätzung kam die WHO zwei Jahre später (WHO, 2007), p. 8:

“The exposure of mammals to ELF magnetic fields of up to 20 mT does not result in gross external, visceral or skeletal malformations. Some studies show an increase in minor skeletal anomalies, in both rats and mice”.

2014 beschrieben (Lee et al., 2014) den Forschungsstand unverändert in derselben Art: kein Einfluss von pränataler niederfrequenter Magnetfeldexposition bis 20 mT bei Säugetieren auf Fehlgeburtsraten oder embryonales Wachstum. Einzig gäbe es einige Hinweise auf mögliche kleinere, aber gesundheitlich unproblematische Veränderungen in der Skelettentwicklung. Einen Einfluss von (meist langzeitiger) Magnetfeldexpositionen im mT-Bereich auf die Embryonalentwicklung haben (Bernabo et al., 2010) am Schweinemodell, (Borhani et al., 2011) und (Bayat et al., 2012) am Mausmodell oder (Lahijani et al., 2011) und (Lahijani et al., 2013) am Hühnermodell gezeigt. Die Beobachtungen haben kein Wissen über mögliche Wirkmechanismen geliefert.

Diese Einschätzung und Unsicherheiten bezüglich Auswirkungen auf die weibliche Fruchtbarkeit, Schwangerschaft und Entwicklung der Föten werden durch die wenigen neueren Studien kaum verändert. Die schon im Kapitel zur männlichen Fruchtbarkeit erwähnte Tierstudie mit Ratten und Mäusen (Ruan et al., 2019) untersuchte auch den Einfluss einer chronischen 50 Hz NF-MF-Exposition (20 Stunden/Tag, 30, 100 und 500 µT Feldstärke) auf die weibliche Fruchtbarkeit und Schwangerschaft. Dabei führte das NF-MF weder zu Veränderungen der weiblichen Sexualhormone, noch beeinflusste es die Fruchtbarkeit oder die Entwicklung der Jungtiere. Ein Trend hin zu einer Reduktion von weiblichen Sexualhormonen wurden in einer weiteren Studie in Ratten beobachtet, die einem 5 mT starken 30 Hz NF-MF für 2 Stunden/Tag während 12 Wochen ausgesetzt wurden (Alekperov et al., 2019). Zudem wurde eine signifikante Reduktion von primordialen aber nicht primären und sekundären Follikel in den Ovarien festgestellt. Teils gegenläufige Veränderungen der weiblichen Sexualhormone wurde hingegen in einer weiteren Studie gefunden (Burcu et al., 2020). In dieser wurden weibliche Ratten, angefangen schon vor der Geburt, einem 3 mT 50 Hz NF-MF für 4 Stunden/Tag und 5 Tage/Woche ausgesetzt. Zudem wurde in der exponierten Gruppe Anzeichen für oxidative und histologische Veränderungen in den Ovarien festgestellt.

Als letztes sei hier noch eine Studie aus dem spärlich untersuchten IF-EMF-Bereich erwähnt, die allerdings einige Unsicherheit bezüglich der Exposition und dadurch nur eine bedingte Aussagekraft aufweist. Chen *et al.* (Chen et al., 2021) untersuchten in einem *ex vivo* Schweinemodell, den Einfluss eines 40 kHz IF-EMF (2.5, 5, 7.5 und 10 mT) auf die Eizellreifung und frühe Embryonalentwicklung. Es wurden keine signifikanten Veränderungen in der Reifung der Eizellen und im Wachstum der befruchteten Blastozysten gesehen. Allerdings berichteten die Autoren von verstärkter Autophagie, Veränderung der Mitochondrienverteilung und einer reduzierten Rate von Blastozystenbildung, die nicht einem klassischen Dosis-Wirkung-Muster folgten und in erster Linie bei 2.5 mT IF-EMF-Exposition auftraten.

Zur Beurteilung allfälliger gesundheitlicher Risiken für den Menschen relevanter als Tierversuche sind epidemiologische Studien. Bei den neueren Befunden handelt es sich mehrheitlich um Arbeiten zu Magnetfeldexpositionen gegenüber Hochspannungsleitungen. In den frühen Studien wurde auch die berufliche Belastung von Schwangeren durch Bildschirmarbeit (Röhrenmonitore) studiert. In einem Reviewbericht kam (Feychting et al., 2005) zum Schluss (p. S69):

“Most studies of ELF exposures have not demonstrated any consistent risk increases for adverse pregnancy outcomes, but limitations in the exposure assessment methods and very limited power to study high exposure levels prevents any conclusions. Findings of an increased risk of spontaneous abortion in relation to maximum magnetic field exposures in two studies need to be confirmed”.

In einer allgemeinen Literaturanalyse von (Thulstrup & Bonde, 2006) über den Zusammenhang zwischen Geburtsschäden und Umwelteinflüssen am Arbeitsplatz, wobei auch niederfrequente MF berücksichtigt wurde, kamen die Autoren zum Schluss (p. 541):

"(…) epidemiological research has not convincingly demonstrated any workplace exposure as a specific human teratogen but several concerns implying possible teratogenic effects of volatile organic solvents, glycol ethers, some pesticides and some heavy metals call for additional research".

Ein Jahr später schlussfolgerte die (WHO, 2007), p. 8/9:

"On the whole, epidemiological studies have not shown an association between adverse human reproductive outcomes and maternal or paternal exposure to ELF fields. There is some evidence for an increased risk of miscarriage associated with maternal magnetic field exposure, but this evidence is inadequate".

Bei den von Feychting und der WHO erwähnten Studien handelt es sich um (Li et al., 2002) und (Lee et al., 2002). Die erste Arbeit untersuchte mit einer prospektiven Kohortenstudie von gegen 1'000 Schwangere in San Francisco den Zusammenhang zwischen Magnetfeldexposition während der Schwangerschaft und Fehlgeburten. Alle Frauen haben während 24 Stunden mit einem mobilen Feldmessgerät die persönliche Exposition gegenüber 60 Hz Magnetfeldern gemessen. Die Studie fand keine Risikozunahmen mit steigenden durchschnittlichen Magnetfeldstärken, errechnete jedoch einen Risikoanstieg, wenn die maximale Feldstärke über ~1.6 µT lag (RR = 1.8; 95% CI = 1.2–2.7). Auch (Lee et al., 2002) fanden keine Zusammenhänge, wenn die durchschnittliche Exposition als Mass genommen wurde. Bei anderen Metriken (Maximum oder grosse Differenzen) zeigten sich jedoch erhöhte Risikoschätzer (bis maximal 3.1) für die Fehlgeburtsrate. Allerdings waren die so ermittelten Expositionen nicht mit Hochspannungsleitungen assoziiert, sondern mit anderen Quellen (Arbeitsplatz, Gerätegebrauch).

(Malagoli et al., 2012) untersuchten in Reggio Emilia, ob Magnetfeldexpositionen bei Schwangeren das Risiko von Missbildungen bei ihren Kindern erhöhen. Sie berücksichtigten dabei 228 Fälle von Anomalien (aus Lebendgeburten, Totgeburten und Aborten) und rekonstruierten die Magnetfeldexpositionen der Mütter während der Schwangerschaft und verglichen diese mit denjenigen aus einer Kontrollgruppe mit vergleichbaren gesunden Neugeborenen. Die Autoren fanden keine Hinweise auf ein erhöhtes Risiko, aber die Studie ist nicht aussagekräftig, weil nur ein exponierter Fall in die Analyse Eingang fand.

(Auger et al., 2012) studierten den Bezug von Magnetfeldbelastungen mit Totgeburten. Die Exposition wurde mit der Nähe des Wohnortes zu Hochspannungsleitungen erfasst. Die Studie fand, über alles gesehen keinen Zusammenhang zwischen dem Risiko einer Totgeburt und der Distanz zum Leitungstrassee (eine Unteranalyse ergab für die höchste Expositionskategorie – unter 25 m Distanz – eine signifikante Risikozunahme; OR = 2.25). In einer iranischen Fall-Kontroll-Studie (Shamsi Mahmoudabadi et al., 2013) wurden die Expositionen von 56 Frauen mit Totgeburten verglichen mit denjenigen von ungefähr gleich vielen vergleichbaren Kontrollen desselben Krankenhauses. Die Autoren stellten eine signifikant höhere Exposition bei den Fällen fest. Allerdings bleibt unklar wie die Exposition methodisch erfasst wurde, so dass Verallgemeinerungen aus dieser Studie recht gewagt sind. (de Vocht et al., 2014) untersuchten 140'000 Geburten in Nordwest-England hinsichtlich Auffälligkeiten im Zusammenhang mit niederfrequenten Magnetfeldern. Sie fanden zu keinem der untersuchten Endpunkte einen statistisch signifikanten Effekt. Erniedrigtes Geburtsgewicht wurde jedoch in der höchsten Expositionskategorie (< 50 m Distanz zu einer Hochspannungsleitung oder Trafostation) beobachtet. Die Unsicherheit dieser Studie ist hoch, weil das Resultat auf nur 89 Kindern (von ca. 140'000) basiert, die näher als 50 m von einer Hochspannungsleitung wohnen. Das Ergebnis eines leicht tieferen Geburtsgewichts blieb aber auch nach Korrektur mit möglichen Störgrössen stabil (de Vocht & Lee, 2014).

(Mahram & Ghazavi, 2013) fanden in ihrer Analyse zweier Kohorten keine Einflüsse von Hochspannungsleitungen auf die gewählten Endpunkte zu Schwangerschaft und Geburt. Die Studie arbeitete

mit 2 Gruppen. Als exponiert betrachtet wurden alle Fälle (n = 222) die innerhalb eines ± 25 m Korridors einer Hochspannungsleitung wohnten (durchschnittliche magnetische Flussdichte von 0.31 µT). Die nicht-exponierte Gruppe umfasste 158 Fälle. Ebenfalls keine signifikanten Einflüsse von ELF-Magnetfeldexposition auf Entwicklungsparametern während der Schwangerschaft und auf das Geburtsgewicht diagnostizierte eine finnische Studie (Eskelinen et al., 2016).

Mögliche Einflüsse von Magnetfeldexpositionen auf die Embryonalentwicklung untersuchten (Su et al., 2014) an 130 abgetriebenen Föten. Die Frauen erhielten nach dem Eingriff ein Messgerät um die Exposition während 24 Stunden zu erfassen. Die Auswertung ergab ein signifikant erhöhtes Risiko, dass der Fötus exponierter Frauen (> 0.16 µT durchschnittliche Flussdichte) kleiner war als der im täglichen Durchschnitt weniger stark exponierten Frauen. Bezüglich Histologie fanden die Autoren keine Unterschiede. Auch diese Studie ist nur sehr beschränkt aussagekräftig, da nur 5 Fälle als exponiert klassiert wurden.

In zwei prospektiven Kohortenstudien mit einer “follow-up”-Periode von 13 Jahren (Li et al., 2011) und (Li et al., 2012) wurde der Einfluss der Exposition während der Schwangerschaft auf spätere Krankheiten und Auffälligkeiten der Kinder studiert. Es handelt sich um dieselbe Kohorte, die Li für die Studie zu Fehlgeburten nutzte (Li et al., 2002). In der Arbeit von 2011 stellen die Autoren ein mit der durchschnittlichen Magnetfeldexposition (statistisch signifikant) ansteigendes Risiko für Asthma bei Kindern fest (Risikoanstieg pro 0.1 µT: HR = 1.15; 95% CI = 1.04–1.27). In der Publikation von 2012 wurde der Zusammenhang mit kindlicher Fettleibigkeit untersucht und ein statistisch signifikant erhöhtes Risiko (OR = 1.69; 95% CI = 1.01–2.84) von Kindern, deren Mütter über 0.15 µT (24 Std. Durchschnittswert) exponiert waren, errechnet. Beide Befunde sind überraschend und bedürfen einer unabhängigen Bestätigung. Die Tatsache, dass in den drei Studien, obwohl aus demselben Datenpool stammend, verschiedene Expositionskategorien gebildet wurden, führt (SSM, 2013) zur Feststellung (p. 32):

“It remains unclear, however, why different exposure metrics and cut-offs were used in all three studies, since this introduces some concern that the data analysis was data driven in order to obtain significant associations”.

Die bereits erwähnte Publikation (Lewis et al., 2016c) beschreibt 7 Arbeiten zu Schwangerschaft und Geburt, sowie 5 Arbeiten zu neonatalen Effekten, ohne diese Arbeiten zu qualifizieren.

Neue epidemiologische Studien seit 2017

In oben erwähnten kanadischen Kohortenstudie zu mütterlicher niederfrequente Magnetfeldexposition in der Provinz Quebec wurde neben Krebs auch Geburtsdefekte untersucht (Auger, Arbour, et al., 2019). Insgesamt wurden 2‘164‘246 Kinder in die Analyse miteingeschlossen und dabei 123‘575 Geburtsdefekte beobachtet. Mütter, welche zum Zeitpunkt der Geburt weniger als 200 Meter von einer Hochspannungsleitung oder einem Transformer entfernt lebten, hatten ein 2% bzw. 5% höheres Risiko für ein Kind mit einem Geburtsdefekt. Dabei war das Risiko im Umkreis von 50 Metern nicht höher als im Abstand von 200 Metern von einer Hochspannungsleitung. Das Risiko ist zwar statistisch signifikant aber sehr gering und deshalb anfällig auf Confounder odere anderen Bias.

In einer französischen Kohortenstudie (Elfe-Kohorte) wurde untersucht (Migault et al., 2018), ob mütterliche berufliche NF-MF-Exposition während der Schwangerschaft einen Einfluss auf die Wahrscheinlichkeit für eine sogenannte moderate Frühgeburt (33.-37. Woche) oder auf die Grösse von Neugeborenen hat. In die Studie eingeflossen sind 18‘329 Neugeborene, die in der 33. Schwangerschaftswoche oder später geboren worden sind. Es wurde kein Zusammenhang zwischen der kumulativen Magnetfeldexposition und der Wahrscheinlichkeit für eine moderate Frühgeburt beobachtet. Auch die Grösse der Neugeborenen stand nicht im Zusammenhang mit der mütterlichen Magnetfeldexposition während der Schwangerschaft. In einer weiteren Publikation (Migault et al., 2020) wurden die Daten mit einer zweiten französischen Kohortenstudie (Epipage2-Kohorte) gepoolt, die Daten

von 8’400 Geburten beigesteuert hat. Wiederum deuteten die meisten Analysen nicht auf ein erhöhtes Risiko hin. Die Autoren schliessen:

“Some heterogeneous associations between ELF-EMF exposure and prematurity and SGA were observed. However, due to heterogeneity (ie, their independence regarding the level of exposure), associations cannot be definitely explained by ELF-EMF exposure.”

4.3.4.3 Bewertung

Tierstudien zu Einflüssen von niederfrequenten Magnetfeldern auf die Fruchtbarkeit zeigen häufig Effekte. Ihre Interpretation bezüglich menschlicher Gesundheitist ist aber schwierig. So gesehen sind diese Arbeiten für die gesundheitliche Risikoeinschätzung nur sehr begrenzt hilfreich. Aus der vorliegenden Humanstudie kann keine wissenschaftliche Schlussfolgerung gezogen werden. Insgesamt ist somit die Sachlage hinsichtlich menschlicher Fruchtbarkeit mit den verfügbaren Studien nicht seriös beurteilbar.

Betreffend Effekten auf Schwangerschaft und Geburt haben Tierversuche in der Mehrheit keine negativen Resultate gezeigt. Neuere Arbeiten (meist mit Langzeitexpositionen von vergleichsweise starken Magnetfeldern) beobachteten jedoch verschiedene potenziell schädliche Wirkungen. Das Gesamtbild hat sich durch diese Untersuchungen aber nicht grundlegend verändert. Für die Risikobeurteilung wichtiger ist die Gesamtheit der epidemiologischen Studien. Hier wurden in den letzten Jahren einige Arbeiten zu Geburtsgewicht, Frühgeburten, Totgeburten, Missbildungen und Aborten veröffentlicht. Insgesamt fanden die Studien nur vereinzelt und nicht konsistent erhöhte Risiken. Diese Heterogenität könnte auf Zufallseffekte hindeuten. Das ist insofern möglich, als in den meisten Arbeiten nur wenige exponierte Fälle in die Analysen Eingang fanden. Insgesamt gesehen scheint ein Risiko eher unwahrscheinlich, es kann aber aufgrund der wenig zuverlässigen Datenlage gegenwärtig nicht ausgeschlossen werden. Diese Einschätzung hat sich mit den neu publizierten Studien bestätigt. Grosse und qualitativ gute Studien finden wenig Hinweise für einen Zusammenhang, während kleine, qualitativ ungenügende Studien (Ingle et al., 2020; Ren et al., 2019; Sadeghi et al., 2017) teilweise Zusammenhänge finden.

4.3.5 Elektromagnetische Hypersensibilität

4.3.5.1 Allgemein

Das Thema „Elektromagnetische Hypersensibilität“ (EHS) ist seit den 80er Jahren in der Wissenschaft präsent. Die WHO verwendet dafür häufig den Begriff idiopathische Umweltintoleranz durch EMF (IEI-EMF). Auslöser waren die im Zusammenhang mit der aufkommenden Bildschirmarbeit von Beschäftigten geäusserten Beschwerden. Viele Studien dazu wurden damals in Schweden durchgeführt. Gegenwärtig steht eher die Mobilkommunikation im Fokus des Interesses.

Mit elektromagnetischer Hypersensibilität sind unspezifische Gesundheitssymptome gemeint, deren Ursache Betroffene in elektromagnetischen Feldern ihrer Alltagsumgebung sehen (Baliatsas & Rubin, 2014). Fast ausschliesslich handelt es sich dabei um technisch erzeugte Felder von Infrastrukturen und/oder Geräten. Häufig genannte Symptome sind Schlafstörungen und Kopfschmerzen. Ebenfalls verbreitet sind Konzentrationsschwächen, Nervosität, Rheuma, Atemprobleme, Müdigkeit, Schwindel, Hautausschläge sowie Jucken, Brennen oder Rötung der Haut. Eine Symptomskala haben (Eltiti et al., 2007) entwickelt. EHS ist kein objektiv diagnostizierbares Krankheitsbild mit nachweislicher Ursache in elektromagnetischen Feldern. Die Heterogenität des Symptombildes hat sich auch in einer Literaturanalyse von (Baliatsas, Van Kamp, Lebret, et al., 2012), in welcher 28 epidemiologische und 35 experimentelle Studien analysiert wurden, bestätigt (p. 22):

"IEI-EMF is a poorly defined sensitivity. Heterogeneity and ambiguity of the existing definitions and criteria for IEI-EMF show the necessity to develop uniform criteria that will be applicable both in research and clinical practice".

Im Zusammenhang mit EHS wurde auch studiert, ob Betroffene (aber auch nicht-Elektrosensible Personen) EMF wahrnehmen (korrekt detektieren) können. Dazu wurden sog. Provokationsstudien durchgeführt: unter kontrollierten Laborbedingungen mussten die Versuchspersonen angeben, ob zu einem bestimmten Zeitpunkt ein Feld „anwesend" ist oder nicht, allenfalls verknüpft mit Angaben zur subjektiv wahrgenommenen Feldstärke. Die grosse Mehrheit dieser Studien fand keine Hinweise auf eine Detektierbarkeit von niederfrequenten Magnetfeldern (Huss et al., 2016), (van Moorselaar et al., 2017). Letztere Publikation ist besonders interessant, weil sie einen neuen Ansatz zur Behandlung von EHS-Patienten getestet hat. Und zwar wurden Patienten, die angaben innerhalb von kurzer Zeit auf EMF zu reagieren, zuhause mehrfach getestet. Bei diesen Tests konnte kein Patient besser als zufällig wahrnehmen, ob ein EM-Feld eingeschaltet war oder nicht. Diese Erkenntnis hatte keinen Einfluss auf die selbst eingeschätzte Hypersensibilität 2 und 4 Monate nach dem Experiment. Aber die (ursprüngliche) Gewissheit innerhalb von wenigen Minuten auf eine EMF-Exposition zu reagieren hatte sich etwas vermindert und Häufigkeit und Schweregrad von Symptomen waren nach 4 Monaten reduziert. Da die Studie keine Kontrollgruppe hatte, ist nicht klar, ob die Veränderungen auf die Intervention zurückzuführen sind. Interessant ist auch, dass von den 42 Probanden nur 4 ihre Beschwerden auf niederfrequente Magnetfelder zurückgeführt haben, die anderen 38 gaben HF-EMF als Ursache an. In zwei anderen Studien (Maestu et al., 2013), (Koteles et al., 2013) wurden bei sehr tiefen Feldstärken bei Einzelpersonen jedoch Sensitivitäten festgestellt. Möglicherweise ist dies aber auf methodische Unzulänglichkeiten zurückzuführen.

Zur Prävalenz von EHS gibt es verschiedene Untersuchungen. In einer Studie, die in der Region Basel durchgeführt wurde (Schreier et al., 2006b), wird die Anzahl mit 5% angegeben. Diese Grössenordnung deckt sich mit Zahlen aus anderen Ländern: Österreich 3.5% (Schrottner & Leitgeb, 2008), Schweden 1.5% (Hillert et al., 2002), Kalifornien 3.2% (Levallois et al., 2002), U.K. 4% (Eltiti et al., 2007) erhoben; (Mohler et al., 2010) vermerken in ihrer Studie, dass 20.9% der Befragten ihre Gesundheit durch EMF beeinträchtig sähen oder dass sie sensibel auf EMF reagieren würden. Der Begriff wird in dieser Arbeit also recht breit verstanden.

Die erwähnte Studie von (Schreier et al., 2006b) erhob u.a. die Häufigkeit von Quellen, die von Betroffenen für ihre Beschweren verantwortlich gemacht werden: 20% gaben keine spezifische Technologie an, sondern sagten, dass die Symptome generell mit EMF zusammenhingen. Von den explizit genannten Quellen wurden folgende am häufigsten erwähnt: Hochspannungsleitungen 28%, Mobiltelefone 25%, Fernsehgeräte und Computer 21% sowie mit je 15% andere elektrische Geräte und Radio/TV-Sendeanlagen. In anderen Untersuchungen werden Mobilfunk-Basisstationen wesentlich häufiger als Beschwerdeverursacher genannt (Roosli et al., 2004). Insgesamt scheint das Krankheitsbild jedoch nicht quellenspezifisch zu sein (Schuz et al., 2006), (Rubin et al., 2005). So schreiben (Roosli et al., 2004), p. 149:

"One might hypothesize that ELF fields may cause symptoms different from those of sources in the Megahertz range. However, we could not find such differences. From the fact that no symptom patterns were revealed with respect to EMF sources it can be concluded that either EMF acts very unspecifically or the symptom ascription is significantly influenced by other causes. Public debate may play an important role".

Allerdings gibt es auch andere Meinungen (Johansson et al., 2010), p. 37:

"The findings support the idea of a difference between people with symptoms related to specific EMF sources and people with general EHS with respect to symptoms and anxiety, depression, somatization, exhaustion, and stress. The differences are likely to be important in the management of patients".

Hinsichtlich demographischer Charakteristiken sind tendenziell Frauen und ältere Menschen stärker betroffen. Das bestätigt auch die Studie von (Bolte et al., 2015).

Im Folgenden fokussieren wir speziell, aber nicht ausschliesslich, auf Arbeiten zur Elektrosensibilität, die explizit (auch) NF-EMF thematisieren. Tier- und Zellstudien zu dieser Thematik gibt es keine, da weder ein Mechanismus noch eindeutig definierte Symptome bekannt sind, die sich so in diesen Systemen untersuchen lassen würden.

Epidemiologische Studien bis 2017

Es liegen nur wenige epidemiologische Arbeiten zu EHS gegenüber 50/60 Hz Magnetfeldern vor; für eine Übersicht: (Baliatsas, Van Kamp, Bolte, et al., 2012). Die meisten Studien widmen sich dem Symptombild und eruieren die Prävalenz von EHS. Die frühen Arbeiten der 80er und 90er Jahre stehen vor allem im Zusammenhang mit Bildschirmexpositionen. Für die Schweiz wird das Thema Elektrosensibilität im Zusammenhang mit niederfrequenten Magnetfeldern in den Studien von (Roosli et al., 2004) und von (Schreier et al., 2006b) behandelt. (Bolte et al., 2015) veröffentlichten eine Bevölkerungsstudie zu Amsterdam, in der bei Frauen statistisch signifikant erhöhte Symptomangaben gefunden wurden. Allerdings war die Stichprobe klein (48 Frauen) und nur 9 Personen waren mittel bis stark exponiert. Kausale Aussagen lassen sich aus dieser Studienanlage keine ziehen. (Zamanian et al., 2010) studierten psychosoziale Symptome bei Arbeitern und stellten fest, dass Personen die EMF ausgesetzt waren, stärker an solchen Symptomen litten als andere Arbeiter. Allerdings fehlte eine Berücksichtigung von Störfaktoren wie etwa die Arbeitsbelastung, so dass diese Studie nicht zum Nennwert genommen werden kann. (Baliatsas et al., 2011) untersuchten bei über 3’500 Personen in Holland, ob es einen Zusammenhang zwischen der Wohnnähe zu einer Hochspannungsleitung und Symptomen der Elektrosensibilität gibt. Sie fanden einen Zusammenhang zwischen subjektiv geschätzter Distanz und EHS, nicht aber zwischen realer Distanz und EHS. (Monazzam et al., 2014) untersuchten die Schlafqualität bei einem Kollektiv von Arbeitern in der Elektrizitätsbranche. Die gefundenen Unterschiede führten sie nicht auf EMF, sondern auf die abweichenden Arbeitsbedingungen der verschiedenen Arbeitergruppen zurück.

Die einzige epidemiologische Arbeit, die ätiologische Ansprüche stellt, ist diejenige von (Baliatsas et al., 2015). Sie untersucht in den Niederlanden bei 6’000 Personen die Beziehungen zwischen realer Exposition, wahrgenommener Exposition, subjektiven Symptomen (NSPS = non-specific physical symptoms) und von Ärzten erhobenen Gesundheitsangaben. Für die Expositionen im NF-Bereich wurden sowohl die berechnete Nähe von Hochspannungsleitungen als auch der Gebrauch verschiedener elektrischer Geräte und Maschinen berücksichtigt. Die subjektive Exposition wurde auf einer Skala von 0 bis 10 abgefragt. Beobachtete Zusammenhänge zwischen Symptomauftreten und Exposition gegenüber elektrischen Geräten: Am konsistentesten waren Symptome für Personen mit einem Ladegerät in der Nähe (≤50 cm) vom Kopfkissen und für Personen, die elektrische Heizdecken benutzen. In beiden Fällen war aber die Schlafqualität nicht beeinträchtigt. Personen, die weniger als 200 Meter von einer Hochspannungsleitung entfernt leben, hatten nicht mehr Symptome als der Rest des Studienkollektivs. Die selbst berichteten Angaben zur Benutzung von elektrischen Geräten ist nicht validiert worden und mit Unsicherheiten behaftet. Eine weitere Schwäche ist, dass es sich um eine Querschnittsstudie handelt, ohne Daten zum Zeitverlauf. Es gibt also keine Information darüber, ob zuerst die Symptome oder die Exposition aufgetreten sind. Beispielsweise könnte es sein, dass Personen mit Beschwerden häufiger eine Heizdecke benutzen, und nicht umgekehrt. Auffällig an der Studie ist, dass die Assoziationen mit der subjektiven Exposition deutlich ausgeprägter waren und für alle Quellen und Symptome dokumentiert werden konnte (inkl. wahrgenommene Distanz zur nächsten Hochspannungsleitung). Da die Übereinstimmung zwischen realer Exposition und wahrgenommener Exposition generell tief war, deutet das auf einen Nocebo-Effekt hin. Das Fazit der Autoren (p. 1):

"We argue that perceived exposure is an independent determinant of NSPS".

Die einzige bislang vorliegende prospektive Studie zu Elektrosensibilität und Stromleitungen wurde in den Niederlanden durchgeführt (Porsius et al., 2015; Porsius et al., 2014; J. T. Porsius et al., 2016). Die Forschergruppe kommt zum Schluss, dass der Nocebo-Mechanismus die naheliegendste Erklärung für EHS-Symptome ist. Allerdings gilt es festzuhalten, dass die Studie die von EHS-Patienten vertretene kausale Erklärung nicht widerlegt (sondern als kognitives Konstrukt versteht), da keine Expositionsdaten erhoben wurden. Diese kognitive (mentale) Dimension haben auch (Szemerszky et al., 2016) festgestellt. Sie haben eine Studie durchgeführt, in welcher nur Scheinexpositionen zum Einsatz kamen. Sie interpretieren die Resultate so, dass die Attribution von Symptomen keine (rein) emotionale, sondern eine rationale Begleiterscheinung von Technikwahrnehmung sein kann.

Experimentelle Studien bis 2017

Um zu prüfen, ob die von betroffenen Personen berichteten Symptome ursächlich mit EMF zusammenhängen, wurde eine Reihe von Laborexperimenten durchgeführt. Bei diesen sog. Provokationsstudien werden Probanden im Labor unter kontrollierten Bedingungen mehrfach (etwa: 2–4 Mal in wöchentlichem Rhythmus) kurzzeitig (z.B. 10–30 Minuten) oder über eine längere Periode (etwa: während einer Nacht in einem Schlaflabor) bestrahlt. Im üblichen Fall wissen weder die Versuchspersonen noch das Laborpersonal während welcher Sitzung welche Exposition eingesetzt worden ist. Eine Versuchsbedingung ist dabei immer „keine Bestrahlung" (sog. Sham-Bedingung). Mit schriftlichen und/oder mündlichen Befragungen und/oder mit Messungen von physiologischen Parametern können dann die Beziehungen zwischen Exposition und interessierenden Endpunkten studiert werden. Weil Laborsituationen für EHS-Patienten belastend sein und den Feldeffekt maskieren können, haben (Huss et al., 2016) eine Methodik und Testapparatur entwickelt, die in Wohnungen auf die persönliche Empfindlichkeit zugeschnittene, verblindete Experimente ermöglicht.

Review-Studien: (Rubin et al., 2005) haben in einer Literaturarbeit die Ergebnisse der damals vorliegenden Provokationsstudien analysiert. Dabei wurde unterschieden zwischen den (frühen) Studien, welche sich den Röhrenbildschirmen als Quelle gewidmet haben, den (späteren) Studien, die den Mobilfunk thematisierten, und allgemeinen Studien, die keine spezifische oder mehrere unterschiedliche Quellen (worunter meist auch NF-Anwendungen) beinhalteten. Insgesamt wurden 31 Publikationen analysiert. 13 Studien betrafen Bildschirme. 10 dieser 13 Arbeiten fanden keinen Bezug zwischen tatsächlicher Exposition und Gesundheitssymptomen, bei 3 Arbeiten fanden sich in Unteranalysen einzelne signifikante Assoziationen. Ähnlich waren die Ergebnisse der 10 Studien, welche EHS allgemein untersuchten: 8 dieser 10 Arbeiten fanden keine Hinweise auf eine ursächliche Wirkung. Die Schlussfolgerung von (Rubin et al., 2005), p. 224:

"It has proved difficult to show under blind conditions that exposure to EMF can trigger these symptoms. This suggests that "electromagnetic hypersensitivity" is unrelated to the presence of EMF, although more research into this phenomenon is required".

Eine Analyse mit Berücksichtigung von später erschienenen Provokations-Studien erschien 2011 (Rubin et al., 2011). Die Autoren bewerteten 29 Arbeiten bis Publikationsjahr 2009. Die Analyse konnte keine Muster von objektiv messbaren Parametern identifizieren und schlussfolgert (p. 606f):

"This review found no reliable and consistent evidence to suggest that people with IEI-EMF experience any unusual physiological reactions as a result of exposure to EMF. The findings of this review are therefore in line with the results of previous reviews that have found no robust evidence to support a link between acute EMF exposures and symptom reporting in people with IEI-EMF".

Hinsichtlich der Wahrnehmbarkeit von Magnetfeldern zeigten (Mueller et al., 2002) in ihrer Provokati-

ons-Studie mit 49 Elektrosensiblen und 14 Kontrollen, die sie unter kontrollierten, verblindeten Bedingungen 50 Hz Feldern (100 V/m, 7 µT) aussetzten, dass knapp 10% der Personen die Felder überdurchschnittlich gut detektieren konnte. Diese spezifische Sensitivität war in beiden Gruppen vorhanden, so dass die Autoren zum Schluss kommen, dass es eine kleine Gruppe von Menschen geben könnte, die empfindsam genug ist, um schwache Felder wahrzunehmen. Diese Empfindsamkeit muss aber nicht mit Symptomen der Elektronsensibilität eingehen, und umgekehrt (McCarty et al., 2011), (Szemerszky et al., 2015). (Leitgeb & Schrottner, 2003) und (Leitgeb et al., 2007) schliessen aus ihren Experimenten ebenfalls, dass es eine Gruppe von sensitiven Menschen gibt. In ihrem Fall bezieht sich die Empfindlichkeit auf am Unterarm applizierte 50 Hz Ströme. Der Anteil dieser Personen an der Gesamtbevölkerung wird auf 2% geschätzt. Zum gleichen Schluss kamen (Koteles et al., 2013). EHS-Personen können Expositionen eher korrekt erkennen als nicht-EHS Personen (eine elektrosensible Person war sogar fast perfekt fähig, Expositionen von Scheinexpositionen zu unterscheiden). (Landgrebe, Frick, et al., 2008) stellten für Felder wie sie in der transkranialen Magnetfeldstimulation eingesetzt werden keine spezifische Differenz in der Wahrnehmbarkeitsschwelle zwischen EHS-Personen und anderen Personen fest, hingegen waren EHS-Personen häufiger überzeugt, Felder wahrzunehmen als nicht-EHS Personen, auch wenn keine Exposition verabreicht wurde.

Keine spezifische Detektionsfähigkeit gegenüber niederfrequenten Magnetfeldern (auch starken bis 3 mT) stellten (McNamee et al., 2010), (McNamee et al., 2011), (Corbacio et al., 2011) und (Legros et al., 2012) fest (alle Arbeiten aus der Forschungsgruppe um Frank Prato). Ebenfalls keine Sensitivität stellte eine niederländische Gruppe fest, welche mit einer mobilen Expositionseinheit genau die Signale in Blindexperimenten einsetzte, die gemäss Aussagen der Probanden ihre gesundheitlichen Probleme verursachten. Die Forschenden stellten in der späteren Zweitbefragung fest, dass die Symptome abgenommen haben, was sie der Einsicht der Probanden in ihre Nicht-Detektierbarkeit der Felder (ELF, IF oder RF) zuschrieben (van Moorselaar et al., 2017).

Verschiedene Arbeiten konzentrierten sich auf physiologische Parameter. (Kaul, 2009) haben in einem Provokationsexperiment Expositionen gegenüber einem 50 Hz Magnetfeld von 10 µT Flussdichte und gegenüber GSM-Signalen (Typ Mobiltelefon) getestet. Insgesamt wurden 24 auf 50 Hz-Felder sensible Personen, 24 auf GSM-Felder sensible Personen und 96 Kontrollen untersucht. Die Probanden konnten die Magnetfelder nicht detektieren – dasselbe bei: (Frick et al., 2005), (Kim et al., 2012) – und es konnten auch keine physiologischen Wirkungen nachgewiesen werden (p. 6):

“In keinem einzigen Fall konnte im Verlauf des Experiments eine feldabhängige Änderung für die elektrische Hautleitfähigkeit nachgewiesen werden. Auch eine Verzögerung der Wirkung war für den elektrischen Hautleitwert nicht expositionsabhängig nachweisbar. Eher reagierte die elektrische Hautleitfähigkeit auf die Vermutung der Person, dass die Feldexposition gerade aktiv sei. Obwohl die „elektrosensiblen“ Personen sehr häufig angaben, dass sie das Feld wahrnehmen konnten, so lag ihre Trefferrate für die zutreffende Exposition doch nur im Zufallsbereich, wie auch die der Kontrollpersonen”.

Damit stützen die Resultate die Ergebnisse von z.B. (Lonne-Rahm et al., 2000) oder (Wenzel et al., 2005). Letztere haben in ihren Experimenten ebenfalls keine Veränderungen von physiologischen Hautparametern durch Exposition gegenüber 50 Hz Magnetfeldern gefunden. (McNamee et al., 2011) sowie (Kim et al., 2012) testeten hinsichtlich Puls, Blutdruck und Atmung und kamen zu einem Nullergebnis. Sein Namensvetter Kim (S. K. Kim et al., 2013) fand in Laboruntersuchungen mit 30 Erwachsenen und 30 Teenagern ebenfalls keinen Zusammenhang mit der Exposition.

Dagegen beobachteten (Belyaev et al., 2005) Veränderungen im Blutbild von Probanden, die gegenüber EMF, u.a. 50 Hz Magnetfelder, exponiert wurden, wobei es keine Unterschiede gab zwischen Elektrosensiblen und nicht-EHS Personen.

Hinsichtlich verschiedener subjektiver Symptome zeigten die Studien der Kim‘s (Kim et al., 2012), (Kim et al., 2012) Nullbefunde. In einem Sham-Sham Experiment mit unterschiedlichen (supponierten,

nicht realen) 50 Hz Magnetfeldbedingungen demonstrierten (Szemerszky et al., 2010) die Bedeutung der Erwartungshaltung. Wenn elektrosensiblen Personen das vermeintlich starke Magnetfeld „verabreicht“ wurde, fühlten sie sich in ihrem Wohlbefinden deutlich stärker beeinträchtigt als bei Exposition gegenüber einem schwachen oder gar keinem Magnetfeld. In Analogie zum Placebo-Effekt (Hoffnung auf Heilung) spricht man im Fall von Angst vor einer Beeinträchtigung von einem Nocebo-Effekt. Placebo- und Nocebo-Effekte wurden v.a. im Zusammenhang mit Medikamenten studiert, wobei in neueren Arbeiten v.a. die Wirkfaktoren interessieren, z.B. der Einfluss der Wahlmöglichkeit (Bartley et al., 2016) oder das Wissen über Nebenwirkungen (Faasse et al., 2015). Für ein psychologisches bzw. ein psychosomatisches Wirkmodell mit EMF-Bezug siehe: (Kjellqvist et al., 2016) bzw. (Osterberg et al., 2007); für eine Studie zu neuronalen Korrelaten dazu: (Landgrebe, Barta, et al., 2008).

In Provokations-Studien mit HF-EMF, insbesondere Mobilfunkstrahlung, wurde der Nozebo-Effekt mehrfach nachgewiesen. In (Mueller & Schierz, 2004) wurde der Einfluss von 50 Hz Exposition auf den Schlaf von elektrosensiblen Personen getestet. Die Autoren fanden, dass unter Feldeinfluss die Personen ein Ausweichverhalten (weg von der Expositionsquelle) zeigen, dass aber die subjektiv empfundene Schlafqualität bei eingeschaltetem Feld grösser war als ohne Feld.

Hinweise auf einen Zusammenhang zwischen niederfrequenter Magnetfeldexposition und reduziertem Wohlbefinden fanden (McCarty et al., 2011) bei ausführlichen Tests mit einer elektronsensiblen Einzelperson. (Landgrebe, Frick, et al., 2008) fand erhöhte Symptomausprägungen unter TMS (transkranialer Magnetfeldstimulation). Auch (Maestu et al., 2013) arbeiteten mit TMS-Expositionen. Sie untersuchten gegen 54 Patienten mit Fibromyalgie (Weichteilrheuma) die sie in eine Expositions- und eine Schein-Expositionsgruppe unterteilten. Während 8 Wochen wurden die Personen einmal pro Woche mit sehr schwachen Feldern exponiert / scheinexponiert. Die Schmerzempfindlichkeit nahm bei der exponierten Gruppe ab, und auch die Schlafqualität verbesserte sich. Andere untersuchte Symptome blieben unverändert. (Koteles et al., 2013) untersuchten 29 EHS und 41 nicht-EHS Personen. Sie fanden einzelne Hinweise auf möglicherweise durch die Exposition (50 Hz Magnetfeld, 500 µT, appliziert am Unterarm in einer zufälligen Folge von 10 realen und 10 Scheinexpositionen von je 1 Minute) verursachte Symptome, insgesamt aber beurteilen sie die Ergebnisse eher als Unterstützung der These einer psychosomatischen Verursachung (sog. Nozebo-Effekt). In einer neueren Studie (Domotor et al., 2016) bestätigte sich diese Beurteilung. Die niederländische Studie (van Moorselaar et al., 2017) ist hinsichtlich 50 Hz Feldern wenig ergiebig, da nur 5% der Probanden sich auf ELF testen lassen wollten.

Epidemiologische und Humanstudien seit 2017

In der Studie von Adrianome et al (2018) (Andrianome et al., 2018) wurden verschiedene Biomarker im Speichel und Urin bei 30 Personen, welche sich als elektromagnetisch hypersensitiv bezeichneten, mit den entsprechenden Werten einer Kontrollgruppe von 25 Personen verglichen mit ähnlicher Alters- und Geschlechtsverteilung. Die meisten Marker des Immunsystems und zirkadianer Rhythmen (z.B. Kortisol, Immunoglobulin A, C-reaktives Protein, Neopterin) unterschieden sich nicht zwischen den beiden Gruppen. Das Speichelenzym Alpha-Amylase hingegen war in der EHS-Gruppe erhöht. Unklar ist, ob dieser Unterschied auf EMF zurückzuführen ist, oder ob er eine Konsequenz von chronischem Stress in Personen mit EHS ist.

Piras et al. (2020) (Piras et al., 2020) untersuchten das Blutplasma-Metabolom bei IEI-EMF und gesunden Probanden mittels 1H-NMR-Spektroskopie in Verbindung und führten bei allen Probanden psychologische und physische Tests durch. Es wurden keine signifikanten Unterschiede zwischen IEI-EMF-exponierten und Kontrollpersonen in Bezug auf Persönlichkeitsaspekte, Impulskontrolle und Angst festgestellt. Das Metabolom bei IEI-EMF Probanden zeichnete sich durch höhere Werte von Glycin und Pyroglutamat und niedrigere 2-Hydroxyisocaproat, Cholin, Glutamin und Isoleucin im Vergleich zu gesunden Personen aus. Diese Metaboliten sind an mehreren Stoffwechselwegen im Zu-

sammenhang mit oxidativem Stress, Abwehr, Schmerzmechanismen und den Muskelstoffwechsel beteiligt. Die hier erzielten Ergebnisse weisen auf mögliche physiopathologische Mechanismen bei IEI-EMF-Patienten hin, die noch besser definiert werden müssten. Die Studie ist aber nicht darauf ausgelegt zu untersuchen, ob die beobachteten Metaboliten tatsächlich durch EMF beeinflusst werden. Es könnte auch sein, dass die Probanden auf irgendeine Noxe verstärkt reagieren, deshalb mehr Gesundheitsbeschwerden haben und diese dann auf EMF zurückführen (umgekehrte Kausalität).

Eine systematische Übersichtsarbeit von Schmiedchen et al. (2019) (Schmiedchen et al., 2019) evaluierte experimentell durchgeführte verblindete Studien an Freiwilligen, die angaben, an EHS zu leiden. Dabei wurde der gesamte EMF-Frequenzbereich von 0 bis 300 GHz eingeschlossen. Insgesamt waren 28 Studien in die Analyse eingeschlossen, von denen 7 statistisch signifikante Zusammenhänge zwischen EMF-Expositionen und Gesundheitsauswirkungen bei an EHS leidenden Personen fanden. Dabei wurde sowohl vermehrtes wie auch vermindertes Auftreten von Symptomen bei Exposition beobachtet. 21 Studien fanden hingegen keine Anhaltspunkte dafür, dass die von den Studienteilnehmenden angegebenen gesundheitlichen Symptome in einem Zusammenhang mit EMF-Exposition standen. In sechs Studien wurde in den Experimenten ELF-MF appliziert. Signifikante Effekte wurde in zwei von den sech Studien beobachtet. In 82% aller 28 eintschlossenen Studien haben die Autoren die Heterogenität der Studienteilnehmenden bemängelt, da die angewandten Expositions-Szenarien für manche der Teilnehmenden vermutlich nicht geeignet waren. Das könnte zu falsch negativen Ergebnissen (d.h. eine Studie findet keinen Zusammenhang zwischen Exposition und Symptomen, obwohl dieser vorliegt) geführt haben, wenn Effekte nur unter ganz bestimmten Expositionsbedingungen auftreten. Die Ergebnisse der Studien mit vergleichsweise wenigen methodologischen Einschränkungen zeigen weniger häufig expositionsbedingte Effekte. Bei knapp einem Drittel der untersuchten Studien wurden auch mögliche Nocebo-Effekte untersucht, welche konsistent nachgewiesen werden konnten. Gemäss den Autoren spricht ihre Übersichtsarbeit insgesamt eher gegen einen ursächlichen Zusammenhang von EMF-Exposition und Gesundheitseffekten. Nach wie vor könne jedoch nicht ausgeschlossen werden, dass es schwache Gesundheitsauswirkungen oder einige tatsächlich auf EMF reagierende Personen geben könnte. Für zukünftige Studien wird empfohlen, Subgruppen zu identifizieren und insbesondere Studien bei einzelnen Personen durchzuführen.

4.3.5.2 Bewertung

Einige wenige Prozent der Bevölkerung bezeichnen sich als elektrosensibel. Dabei handelt es sich um Symptome wie Kopfschmerzen, Müdigkeit oder Schlafstörungen, deren Ursache Betroffene in elektromagnetischen Feldern sehen. Es ist unklar, ob die Sensibilität genereller Art ist oder sich auf bestimmte Quellen / Frequenzbereiche bezieht. Sowohl Krankheitsbild als auch Ursachenzuschreibung sind nicht objektiv diagnostizier- bzw. belegbar. Bei EHS handelt es sich immer um Selbsteinschätzungen. Die Symptome sind jedoch real.

Inzwischen liegen eine ganze Reihe von epidemiologischen und experimentellen Studien zu EHS vor, welche in ihrer Gesamtheit ein vergleichsweise klares Bild zeichnen: Möglicherweise gibt es eine kleine Gruppe von Personen, die gewisse elektromagnetische Felder physiologisch besser wahrnimmt als andere Menschen (siehe auch Kapitel 4.3.6.1), aber eher nicht im Sinne einer Hypersensibilität bei extrem tiefen Expositionswerten sondern einfach ausserhalb dessen was man bei einer Normalverteilung erwarten würde. Jüngere Studien haben diesen Befund teilweise bestätigt. Es wäre lohnend, diese Gruppe von Menschen genauer zu untersuchen. Insgesamt aber scheint es so, dass die meisten Menschen kein Sensorium für schwache niederfrequente oder hochfrequente Felder besitzen. Personen, die das von sich behaupten, schliessen, von wenigen Ausnahmen abgesehen (siehe oben), in Blindversuchen nicht besser ab als Personen ohne diese vermeintliche Fähigkeit. Die vorliegenden Provokationsstudien zeigen insgesamt auch, dass es keinen nachweisbaren Bezug gibt zwischen Wohlbefinden und der An- oder Abwesenheit von EMF. Hingegen ist das Symptomniveau fast immer mit der Überzeugung verknüpft, ob man gegenüber einem Feld exponiert ist oder nicht, ein

deutlicher Hinweis auf die Wirksamkeit von Nocebo-Effekten. Es deutet somit vieles daraufhin, dass EHS eine mentale und nicht eine physikalische Ursache hat.

4.3.6 Andere Wirkungen

4.3.6.1 Wahrnehmung

Nakatani-Enomoto et al. (Nakatani-Enomoto et al., 2019) haben die Reizschwelle für elektrische Ströme (d. h. die Wahrnehmungsschwelle) bei verschiedenen Frequenzen am rechten Zeigefinger bei 53 gesunden Freiwilligen im Alter zwischen 21 und 67 Jahren evaluiert. Im Einklang mit den Ergebnissen früherer Studien zeigten die Ergebnisse, dass die Wahrnehmungsschwellen bei Männern höher waren als bei Frauen und bei älteren Personen höher als bei jungen Probanden. Die Wahrnehmungsschwelle nahm im Frequenzbereich von 50 Hz bis 300 kHz stark zu. Bei 50 Hz lag sie im Bereich von 0.1 bis 0.4 mA, bei 300 kHz im Bereich von 20 bis 50 mA.

Im Zusammenhang mit Hybridleitungen wurde auch eine Serie von experimentellen Studien zur Wahrnehmungsschwelle von Gleichstrom (DC) elektrischen Feldern (EF), Wechselstrom (AC) EF und Ko-Exposition von DC EF und AC EF (Hybrid EF) unter Ganzkörperexposition gemacht (Jankowiak et al., 2021; Jankowiak et al., 2022; Kursawe et al., 2021). In einer Pilotstudie (Jankowiak et al., 2021) wurden in einem Expositionslabor die Wahrnehmungsschwellen von 11 Teilnehmenden bei unterschiedlichen EF und Luftfeuchtigkeiten untersucht. Dabei wurden die die Signaldetektionstheorie sowie das Ein-Intervall-Anpassungsmatrixverfahren angewandt. Die relative Luftfeuchtigkeit konnte als ein Umweltfaktor identifiziert werden, der die Wahrnehmung von AC-EF und DC-EF auf unterschiedliche Weise beeinflusst. Eine geeignete Rampensteigung für die Expositionszunahme und eine Expositionsdauer für zukünftige Studien konnte erarbeitet werden. Zusätzlich wurde festgestellt, dass die Wahrnehmungs-Schwellenwerte unter Hybrid-EF-Exposition niedriger als unter DC-EF- oder AC-EF-Exposition allein waren. Die kutanen Empfindungen, die unter DC-EF- und AC-EF-Exposition hervorgerufen wurden, waren individuell unterschiedlich und wurden verschiedenen Körperteilen zugeordnet. Mehrere umweltbedingte und experimentelle Faktoren, die die menschliche Wahrnehmung von EF beeinflussen, konnten identifiziert werden und bilden eine wesentliche Grundlage für eine gross angelegte Folgestudie.

Die Studie wurde dann mit einer grossen Stichprobe von 203 Teilnehmenden wiederholt (Kursawe et al., 2021). Neben Gleich-, Wechsel- und Hybrid-EFs wurden in einem Teil der DC- und Hybrid-Experimenten auch Ionenströme angewendet und die Luftfeuchtigkeit verändert. Die Daten wurden mit aus der Signaldetektionstheorie abgeleiteten Methoden analysiert, um die individuellen Wahrnehmungsschwellen zu bestimmen. Wie bei der Pilotstudie zeigte sich, dass die Erkennungsschwellen bei hybriden EF niedriger waren als wenn AC oder DC separat präsentiert wurden. Ionenstromexposition führte zu einer Verringerung der EF-Wahrnehmungsschwelle. Eine hohe relative Luftfeuchtigkeit erleichterte die Wahrnehmung von DC-EF, während eine niedrige relative Luftfeuchtigkeit die Wahrnehmung von AC-EFs verstärkte. Die mittlere Wahrnehmungsschwelle war am tiefsten für Hybrid-EF (6.8 kV/m) und am höchsten bei DC-EF (18.7 kV/m).

In einer weiteren Nachfolgestudie wurden dann 51 Teilnehmende, bei denen vorher eine überdurchschnittlichen Erkennungsfähigkeit beobachtet wurde, in eine doppelblinde Laborstudie (Jankowiak et al., 2022) eingeschlossen, um die untere Wahrnehmungsschwelle von besonders sensiblen Personen zu bestimmen. Es zeigte sich, dass sehr niedrige EF-Stärkekombinationen wie beispielsweise 1 kV/m AC kombiniert mit 1 kV/m DC von mindestens einem Teilnehmenden zuverlässig wahrgenommen werden konnte. Die Erkennung von hybriden EF waren mit zunehmender AC-EF-Stärke signifikant niedriger, was die Schlüsselrolle der AC-Komponente bei der menschlichen Wahrnehmung von hybriden EFs demonstriert.

Die Ergebnisse dieser Studien sind wichtig, um die Auslegung und Konstruktion von hybriden Energieübertragungssystemen zu verbessern und zur Vermeidung unerwünschter Sinneswahrnehmungen durch die Festlegung von entsprechenden Grenzwerten. In der Schweiz liegt der Immissionsgrenzwert des elektrischen Feldes für 50 Hz Felder bei 5 kV/m. Für statische Felder gibt es keinen Immissionsgrenzwert und hybride Leitungen sind in der NISV nicht spezifisch erwähnt. Das bedeutet, dass zu erwarten ist, dass auch bei Einhaltung der Grenzwerte ein Teil der Bevölkerung das elektrische Feld von Hochspannungsleitungen wahrnehmen kann, und dies unabhängig von den hörbaren Coronaentladungen. Die Lärmemissionen von Coronaentladungen sind aus Belästigungs- und gesundheitlicher Sicht bei Hybridleitungen besonders zu beachten. Weil die Belastungen von DC-Lärm bei gutem Wetter höher sind als bei schlechtem und es bei AC genau umgekehrt ist, kann eine AC/DC-Leitung mehr Lärm (in Jahresstunden) verursachen als eine konventionelle Leitung, siehe dazu Dürrenberger et al. (Dürrenberger et al., 2020).

4.3.6.2 Elektrophysiologie

Mehrere experimentelle Humanstudien haben sich mit den Auswirkungen von niederfrequenten Magnetfeldern auf die Hirnphysiologie und kognitive Fähigkeiten beschäftigt. Im Zentrum dieser Untersuchungen steht das EEG (Elektroenzephalogramm), also die Aufzeichnung der elektrischen Gehirnaktivitäten in Form von Summensignalen an der Kopfoberfläche. Dabei kann man den Einfluss eines Stoffes (z.B. Medikament) oder Umweltfaktors (z.B. EMF) auf das Wach-EEG im Ruhezustand untersuchen, oder auf das Schlaf-EEG (das gut reproduzierbare, individuelle Charakteristiken zeigt), oder auf sog. evozierte (auch: ereigniskorrelierte) Potenziale. Letzteres sind durch Sinnesreize (visuell, auditiv, motorisch) oder durch kognitive Stimuli bewusst ausgelöste elektrophysiologische reaktionen. Verändern sich diese unter Exposition, so kann das als Hinweis interpretiert werden, dass die entsprechenden sinnlichen bzw. kognitiven Fähigkeiten durch die Exposition beeinflusst werden.

Elektrophysiologische Studien mit Magnetfeldexpositionen verwenden typischerweise Feldstärken die deutlich über den Alltagsbelastungen, auch von exponierten Standorten nahe bei Hochspannungsleitungen, liegen. In vielen Studien überschreiten die eingesetzten magnetischen Flussdichten die Immissionsgrenzwerte.

Eine Review-Studie aus dem Jahre 2002 (Cook et al., 2002) zählte 10 Veröffentlichungen, die sich dem Wach-EEG im Ruhezustand widmeten, 6 zu evozierten Potenzialen und 8 zu kognitiven Fähigkeiten (ohne EEG-Messungen). Zusätzlich berücksichtigte die Literaturanalyse ein knappes Dutzend Studien über Wirkungen von niederfrequent modulierten Hochfrequenzsignalen. Die Autoren kamen zum Schluss (p. 144, 154):

“The investigation of weak (…), extremely low frequency (…) magnetic field (MF) exposure upon human cognition and electrophysiology has yielded incomplete and contradictory evidence that MFs interact with human biology“ (…) “This makes it extremely difficult to draw any conclusions with regard to functional relevance for possible health risks (…)”.

In einem Update ihres Berichts (Cook et al., 2006) zogen die Wissenschaftler konkretere Schlussfolgerungen (p. 624):

„(…) the evidence suggests that brief exposures can induce measurable changes in human brain electrical activity, particularly in the alpha frequency band (8–13 Hz) over posterior regions of the scalp” (p.622). “Eleven studies in this review observed significant field-related effects upon brain physiology and performance after the EMF was turned off”.

Im ein Jahr später erschienen Bericht der (WHO, 2007) wird die Sachlage hinsichtlich schwacher niederfrequenter Felder nach Analyse von 22 Studien über EEG-Messungen und 16 Arbeiten über Resultate aus kognitiven Tests offen beurteilt (p. 136):

"Generally, while electrophysiological considerations suggest that the central nervous system is potentially susceptible to induced electric fields; cognitive studies have not revealed any clear, unambiguous finding".

Einen weiteren Review-Bericht hat eine italienische Expertengruppe (Di Lazzaro et al., 2013) verfasst. Eine zentrale Schlussfolgerung daraus (p. 470):

"(…) the most consistent finding is the change in the alpha band (8–13 Hz) over occipital-parietal regions of the scalp but the direction of this modification is not clearly defined".

Die Review-Studie von (Warille et al., 2016) zu Einflüssen von EMF auf das Nervensystem von Kindern ist zu unsystematisch und zu generell, als dass sie etwas zum Diskussionsstand beitragen könnte.

Eine Mehrheit der experimentellen Studien dokumentiert höhere Aktivitäten im Alpha-Band nach Exposition mit niederfrequenten Magnetfeldern. (Cvetkovic et al., 2006) und (Cvetkovic & Cosic, 2009) bestätigten in ihrer Studie auch frühere Befunde, dass die Frequenz des Magnetfelds v.a. auf dieselbe Frequenz der Gehirnaktivität wirkt. (Cook et al., 2004), (Cook et al., 2005) und (Cook et al., 2009) stellten zusätzlich fest, dass die Alpha-Aktivitäten hirnregionsspezifisch zu- oder abnehmen, wobei die Veränderungen sowohl personen- als auch expositionsabhängig sind. Vor diesem Hintergrund könnte der Befund von (Legros et al., 2012) verständlich sein: Sie fanden in ihren Experimenten mit 60 Hz Magnetfeldexposition (1 Stunde) keine Veränderungen im EEG der 73 Versuchspersonen. (Legros et al., 2015) untersuchten mit Hilfe der funktionalen Magnetfeldtomographie (fMRI) den Einfluss starker 60 Hz Magnetfelder (über 1.8 und 3 mT) auf die kognitiven Funktionen bei je einem manuellen und kognitiven Test. Sie stellten fest, dass auch nach der Exposition veränderte Aktivitätsmuster im Hirn nachweisbar sind. Die Leistungsfähigkeit (Erfolgsquote) in den Tests blieb jedoch unbeeinflusst.

Studien seit 2017

Modolo et al. (Modolo et al., 2017) haben bei 25 gesunden Probanden EEG-Reaktionen gleichzeitig zusammen mit funktioneller Magnetresonanztomographie (fMRI) untersucht. Zwei Bedingungen von 60 Hz Sinus-MF-Expositionen wurden getestet (3 mT, 10 s, 12 Wiederholungen; 7,6 mT, 2 s, 100 Wiederholungen). Insgesamt konnte unter diesen Bedingungen kein Enfluss der MF-Exposition weder auf die elektrische Gehirnaktivität, wie sie mit dem EEG aufgezeichnet wurde, oder gemessen mit fMRI, festgestellt werden. Die Probanden berichteten auch über keine Wahrnehmungen von Magnetophosphenen.

In der gleichen Forschungsgruppe (Davarpanah Jazi et al., 2017) wurde in einer Pilotstudie mit 10 gesunden Probanden neben EEG auch ein möglicher Einfluss auf menschlichen Tremor untersucht. Die Magnetfeldexposition betrug bis zu 50 mT. Es wurden keine signifikanten Effekte beobachtet. Aufgrund der geringen Studiengrösse sind die Resultate mit Vorsicht zu interpretieren.

Zellexperimentelle elektrophysiologische und dazugehörige Untersuchungen der Fluktuation der Kalziumkonzentration wurden eher selten durchgeführt, meist in primären Neuronen von Nagern oder in Neuroblastoma-Modellzelllinien mit Neuronen-ähnlichen Eigenschaften (Bertagna et al., 2021). Dabei geht es meist um die Analyse der sogenannten spannungsabhängigen Kalziumkanäle ("voltage-gated calcium channels", VGCC) und/oder die davon abhängige Erregbarkeit der Neuronen für die Signalübertragung. Solche Veränderungen könnten durchaus gesundheitliche Auswirkungen haben, sei es über eine Beeinträchtigung kognitiver Funktionen, der Entwicklung des Nervensystems oder Physiologie der Neuronen, was im Zusammenhang mit neurodegenerativen Erkrankungen steht. Die Befunde und Schlussfolgerungen sind dabei recht heterogen, wobei man beachten muss, dass viele Untersuchungen in Rahmen eines therapeutischen Ansatzes (z.B.: Transkraniale Stimulation) gemacht und meist akute (≤ 1 Stunde) oder subchronische (6-48 Stunden) Expositionsbedingungen angewandt wurden. Zudem wurden häufig Feldstärken eingesetzt, die so höchsten im beruflichen Bereich auftreten könnten.

Von den neueren experimentellen Studien sind die Arbeiten zweier Labore besonders erwähnenswert. De Groot *et al.* haben primäre Rattenneuronen chronisch (7 Tage) einem 50 Hz NF-MF (1, 10, 100 und 1'000 µT) ausgesetzt und verschiedene Parameter gemessen. Nach NF-MF-Exposition wurde keine Veränderungen der spontanen elektrischen Aktivität der Neuronen gefunden (de Groot et al., 2016). Andererseits führte die Exposition in Abhängigkeit der Dosis zu veränderten Kalziumlevel nach Stimulation der Neuronen, wobei die basale Kalziumkonzentration nur bei der höchsten Dosis reduziert war. Eine Reduktion der elektrophysiologischen Aktivität (Langzeitpotenzierung, verstärkte synaptische Signalübertragung) und der synaptischen Plastizität von Rattenneuronen aus dem Hypocampus wurde von einer chinesischen Forschungsgruppe nach kurzzeitiger Exposition mit NF-MF berichtet (Dong et al., 2020; Dong et al., 2018; Xia et al., 2021; Y. Zheng et al., 2019). Dabei wurden NF-MF mit Frequenzen von 15, 50 und 100 Hz und 0.5, 1 und 2 mT eingesetzt, wobei die Effekte sich bei 15 Hz am stärksten ausgeprägt zeigten und eine Dosis-Wirkungsabhängigkeit beobachtet wurde (Y. Zheng et al., 2019).

4.3.6.3 Kognition

Nebst den drei oben erwähnten Review-Studien von Cook et al. (2002), (Cook et al., 2006) und (Di Lazzaro et al., 2013), in denen auch kognitive Effekten beurteilt werden, sei ein spezifischer Review-Artikel zum Thema kognitive Funktionen (Crasson, 2003) sowie eine Meta-Studie (Barth et al., 2010) erwähnt. (Crasson, 2003) kam zum Fazit (p.333):

"Overall, laboratory studies that have investigated the acute effects of power frequency fields on cognitive functioning in humans are heterogeneous, in terms of both electric and magnetic field (EMF) exposure and the experimental design and measures used. Results are inconsistent and difficult to interpret with regard to functional relevance for possible health risks. Statistically significant differences between field and control exposure, when they are found, are small, subtle, transitory, without any clear dose–response relationship and difficult to reproduce".

Barth et al. führten 2010 eine Metanalyse zu kognitiven Funktionen unter 50 Hz Magnetfeldexposition durch. Aus der Zeitperiode 1986–2007 konnten nur 9 Studien berücksichtigt werden (u.a. mussten ausreichend detaillierte statistische Angaben vorliegen, damit die Daten für eine Metaanalyse geeignet waren). 14 Parameter wurden analysiert. 3 zeigten statistisch signifikante Effekte. Die Autoren kamen zur Gesamtbeurteilung (Barth et al., 2010), p. 173:

"Taken together, the results of the meta-analysis provide little evidence that ELF-MFs have any effects on cognitive functions".

Im Review-Artikel von (Di Lazzaro et al., 2013) sind die Studienergebnisse nach den untersuchten kognitiven Funktionen beurteilt worden. Hinsichtlich Reaktionszeit und Reaktionsgenauigkeit unter Magnetfeldeinfluss zeigen die 7 in die Analyse aufgenommenen Studien grosse Heterogenität und Gegensätzlichkeit, die sich nicht in ein Gesamtbild fassen lässt. Teilweise zeigten exakte Replikationen von Experimenten gegensätzliche Ergebnisse. Hinsichtlich Gedächtnisleistung wurden 8 Artikel beurteilt. Dabei handelt es sich durchwegs um Leistungen des Kurzzeitgedächtnisses („working memory"). Die Studien zeigten mehrheitlich, aber nicht durchgängig und homogen, (negative) Einflüsse auf die Kurzzeitgedächtnisleistung.

In der Studie von (Corbacio et al., 2011) wurde kognitive Funktionen unter starken Magnetfeldexpositionen (3 mT), denen kurzzeitig Arbeiter im Hochspannungsbereich ausgesetzt sein können, untersucht. Sie stellten eine Abnahme der Lernfortschritte, die üblicherweise bei multiplen Tests eintreten, fest, fanden aber insgesamt keine klaren Expositionseffekte auf die menschliche Kognition. (Huang et al., 2013) untersuchten ausgewählte kognitive Leistungen bei Schulkindern zweier Klassen, die gegenüber einer 500 kV-Hochspannungsleitung unterschiedlich exponiert waren und stellten bei 2 von 4 Tests schlechtere Resultate bei den exponierten Kindern fest. Allerdings bleibt in dieser Studie unklar,

inwiefern sich die zwei Schulkollektive in sozialer Hinsicht voneinander unterschieden, so dass die Befunde schwierig zu interpretieren sind. In der bereits erwähnten Studie von (Szemerszky et al., 2016) wurden von den Probanden kognitive Effekte rapportiert. Da nur Sham-Expositionen eingesetzt worden sind, erklären die Autoren den Befund mit Nocebo-Wirkung.

Studien seit 2017

Zum Thema Kognition und Gedächtnisleistung sind in erster Linie Tierstudien vorhanden, wobei einige davon schon im Bereich «Neurodegenerative Erkrankungen» erwähnt wurden (siehe Kapitel 4.3.3). Einen breiter gefassten Überblick über experimentelle EMF-Studien zu neurologischen Funktionen inklusive Kognition vermitteln neuere Übersichtsarbeiten (Lai, 2022; Riancho et al., 2021). Die Datenlage bezüglich Gesundheitsauswirkung ist nach wie vor unklar. Lai (Lai, 2022) schlussfolgert in seinem Reviewartikel zu NF-MF und statischen Feldern:

"In summary, static/ELF EMF definitely affects many different physiological and behavioral functions in animals and humans. However, there is no definite data showing that these effects are detrimental to human health. Since effects have been observed in vitro, in vivo, and in humans (particularly at levels of occupational exposure), it is advisable that one should limit one's exposure to these fields".

Kognitive Einflüsse in männlichen Mäusen wurde in der Studie von Zhang *et al.* (Y. Zhang et al., 2017) zwischen Exposition mit 50 Hz NF-MF und einem statischen Feld (SF) verglichen. Eingesetzt wurden 1 mT Feldstärke für 2 Stunden tägliche während 7 Tagen, in diesem Zeitraum wurden auch die Verhaltenstests durchgeführt. Während sich die Gedächtnisleistung von schein- und SF-exponierten Mäusen nicht unterschied, war eine progressive Verschlechterung bei Tieren mit NF-MF-Exposition feststellbar. Allerdings muss man beachten, dass den Tieren einen Elektrodenarray für gleichzeitige elektrophysiologische Experimente implantiert wurde, was eine mögliche Störgrösse darstellt. Die Messung der Hirnströme korrespondierte dabei gut mit der jeweiligen Gedächtnisperformanz. In der Tat zeigte eine andere Studie keine Beeinträchtigung des Lernvermögens und sogar tendenziell eine Verbesserung der Gedächtnisleistung (Karimi et al., 2019). Hier wurden männliche Ratten einem 50 Hz NF-MF bei 1, 100, 500 oder 2'000 µT für täglich 2 Stunden während 60 Tagen ausgesetzt, bevor das Verhalten und der oxidative Status des Gehirns untersucht wurden. Die Beobachtungen folgten aber keiner generellen Dosis-Wirkungs-Kurve. Keinen Einfluss der Exposition auf die Lernfähigkeit und Gedächtnisleistung von Mäusen wurde in einer Vergleichsstudie zwischen einem 50 Hz elektrischen und statischen Feld mit 35 kV/m festgestellt (Di et al., 2019). Die Tiere wurden chronisch bis zu 49 Tagen exponiert und das Verhalten und neurologische Parameter zu verschiedenen Zeitpunkten analysiert. Es wurde sogar eine verbesserte Kognition nach 30 Tagen NF-MF-Exposition, korrelierend mit erhöhten Neurotransmitter-Spiegel, beobachtet. Es bleibt aber unklar, ob es sich hier um einen Zufallsbefund handelt.

Letzthin geriet auch der Einfluss von IF-EMF in den Fokus des Interessens. Kumari *et al.* (Kumari, Koivisto, et al., 2017) haben männliche Mäuse ab dem Alter von zwei Monaten mit einem 7.5 kHz IF-EMF bei 12 und 120 µT Feldstärke während 5 Monaten exponiert und verschiedene Verhaltenstest durchgeführt. Eine milde Verminderung der Gedächtnisleistung wurden konstatiert, da in einigen aber nicht allen Testsettings Hinweise auf veränderte Performanz bei 120 µT-exponierten Tieren beobachtet wurden. Die gleiche Forschungsgruppe führte dann auch zusätzliche Experimente der gleichen Art durch an männlichen Mäusen durch, die schon pränatal und bis zum Alter von einem Monat exponiert wurden, um mögliche Einflüsse auf das sich entwickelnde Nervensystem zu untersuchen (Kumari et al., 2018). Verminderte Gedächtnisleistungen wurden nicht beobachtet, einzig das Schwimmverhalten der Mäuse (bei 120 µT) war beeinträchtigt und die motorischen Fähigkeiten (12 µT Gruppe) waren sogar verbessert. Verbesserte motorische Fähigkeit von IF-EMF-exponierten weiblichen Mäusen wurde am ersten aber nicht an den darauffolgenden Testtagen in einer anderen Studie festgestellt (Lerchl et al., 2021). Die Tiere wurden ab einem Alter von 3 Monaten einem kontinuierlichen 20 kHz IF-EMF bei

360 µT Feldstärke ausgesetzt und Verhaltenstest im Alter von 10 Monaten durchgeführt. Zudem wurden keine Hinweise gefunden, dass sich die Exposition negative auf die Gedächtnisleistung auswirkte.

4.3.6.4 Herzkreislaufsystem

Einen Ausgangspunkt bildeten Untersuchungen zur Herzratenvariabilität (HRV), welches ein sensitiver Indikator für die symphatische Aktivität (Stress) ist. In epidemiologischen Arbeiten konnte ein Zusammenhang zwischen reduzierter HRV und erhöhtem (kardiovaskulärem) Morbiditäts- bzw. Mortalitätsrisiko (Erkrankungs- bzw. Sterberisiko) gezeigt werden. (Sastre et al., 1998) stellten fest, dass unter bestimmten Expositionsbedingungen 60 Hz Magnetfelder die HRV kurzfristig senken und damit verknüpfte (akute) Gesundheitsrisiken erhöhen. In mehreren Nachfolgeuntersuchungen wurde dem Befund weiter nachgegangen. Die Forscher kamen am Ende zum Schluss, dass nicht die Magnetfelder die Ursache der Beobachtung waren, sondern ein Drittfaktor, nämlich die durch Blutentnahmen an den schlafenden Patienten hervorgerufene vegetative Störung (Graham et al., 2000).

Ein umfassender Review-Artikel zum Thema niederfrequente Magnetfelder und kardiovaskuläre Erkrankungen erschien 2007 (Kheifets et al., 2007). Er analysiert 10 epidemiologische Studien (1996–2005) die sich mit Herzkreislauferkrankungen im Zusammenhang mit NF-Magnetfeldern befassten. 7 Arbeiten betrafen Mortalitätsstudien zu beruflich Exponierten in der Elektrizitätsbranche, 3 Arbeiten untersuchten die Fragestellung anhand der Berufsangaben (Job-Exposure-Matrix) auf den Todesscheinen bzw. mit Telefoninterviews bei Hinterbliebenen. Insgesamt wurden in zwei Studien statistisch signifikante Risikoerhöhungen (bei einzelnen Krankheitsbildern) gefunden, alle anderen Risikoschätzen zeigten keine Auffälligkeiten. (Kheifets et al., 2007) schlussfolgern vor dem Hintergrund der oben erwähnten experimentellen Erstbefunde (p. 11):

"(…) the initial clinical results were not confirmed. We conclude that the evidence speaks against an etiologic relation between occupational exposure to electric and magnetic fields and CVD".

Zur gleichen Einschätzung kam auch die (WHO, 2007), p. 220:

"(…) while electric shock is an obvious health hazard, other hazardous cardiovascular effects associated with ELF fields are unlikely to occur at exposure levels commonly encountered environmentally or occupationally. Although various cardiovascular changes have been reported in the literature, the majority of effects are small and the results have not been consistent within and between studies".

Dieselbe Ansicht vertritt (ICNIRP, 2010). Bei (SCENIHR, 2015) ist dieser Endpunkt gar nicht thematisiert. Dasselbe gilt, mit Ausnahme pauschaler Aussagen, auch für BioInitiative (2012; Kapitel 24 mit "Key Scientific Evidence"). Zurückhaltender, aber auch selbstkritischer hinsichtlich der Arbeiten der eigenen Zunft, sind (McNamee et al., 2009) nach Durchsicht von über 30 Publikationen (p. 929):

"The effects of exposure to extremely low frequency (ELF) electromagnetic fields (EMFs) on human cardiovascular parameters remain undetermined."

Dabei weisen sie auf die generell schwierige Expositionserfassung hin und auf die Probleme mit kleinen Fallzahlen, wie sie in manchen Studien zu finden sind. Zudem geben sie zu bedenken, dass die Einflüsse der natürlichen Magnetfelder (v.a. Schwankungen aufgrund der geomagnetischen Stürme auf der Sonne), für die Diversität der experimentellen Befunde mitverantwortlich sein könnten (dazu auch: (Dimitrova et al., 2004)). Die Autoren fordern v.a. robuste Laborexperimente. Die Übersichtsarbeit von Elmas Übersichtsarbeit (Elmas, 2016) ist insgesamt wenig ergiebig und nur beschränkt informativ.

Weitere epidemiologische Arbeiten seien erwähnt: (Roosli et al., 2008) untersuchten in ihrer Mortalitätsstudie 4 verschiedene Herzkreislauferkrankungen bei Eisenbahnangestellten der Schweizerischen Bundesbahnen (Magnetfeldexposition: 16.7 Hz). Sie fanden keine Hinweise auf einen Zusammen-

hang. Koeman et al. (2014) führten eine prospektive Kohortenstudie bei niederländischen Beschäftigten durch (n = 120‘852). Sie analysierten 8’200 Fälle von Herzkrauslauf-Sterbefällen und fanden keine Anzeichen, dass berufliche Magnetfeldexposition das Sterberisiko erhöhen könnte. (Fazzo et al., 2009) stellten in ihrer Studie mit 345 Personen, die in der Umgebung einer 60 kV Hochspannungsleitung in Rom lebten, fest, dass die am meisten exponierte Gruppe ein doppelt so hohes Risiko für Herzkranzgefässerkrankungen besitzt. (Liu et al., 2013) dokumentieren eine Reihe von negativen Einflüssen von niederfrequenter Magnetfeldexposition auf kardiovaskuläre und Blutparameter von exponierten im Vergleich zu weniger exponierten Beschäftigten in der Autoindustrie. Da es sich bei den exponierten Personen um Schweisser handelte, die zusätzlich zu EMF einer ganzen Reihe von anderen Immissionen ausgesetzt sind, kann aus der Studie kein Schluss in Bezug auf EMF als möglicher Verursacher der physiologischen Messwerte gezogen werden. Ähnliches gilt für die Studie von (Wang, Wang, et al., 2016), in der das Blut von über 800 Arbeitern in einem Elektrizitätswerk auf einen möglichen Zusammenhang mit der EMF-Exposition untersucht wurde. Die Expositionserfassung ist problematisch, weil alle Frequenzen berücksichtigt und zusammen kategorisiert wurden. Zudem sind nur wenig Confounders berücksichtigt worden.

Weitere experimentelle Arbeiten seien erwähnt: (McNamee et al., 2010) und (McNamee et al., 2011) testeten mit 58 (Studie 2010) bzw. 10 (2011) Probanden in doppelt bzw. einfach verblindeten Versuchen, ob die Exposition gegenüber einem 1’800 µT bzw. einem 200 µT starken 60 Hz Magnetfeld etwas an der Hautdurchblutung und verschiedenen anderen Kreislaufparametern (wie Blutdruck oder Herzfrequenz) ändert. Sie fanden in beiden Untersuchungen keine Hinweise darauf. (Kim et al., 2012) und (S. K. Kim et al., 2013) konnten in ihren Provokationsstudien ebenfalls keine Wirkungen finden. (Touitou et al., 2013) untersuchten bei 15 Freiwilligen, ob Langzeitexpositionen (bis 20 Jahre) gegenüber niederfrequenten Magnetfeldern Parameter des Blutes und des Immunsystems beeinflusst. Auch sie kamen zu einem Nullergebnis. (Adochiei et al., 2012) beobachteten dagegen statistisch signifikante Veränderungen der HRV. Leider beschreiben die Autoren die Versuchsanordnung nicht ausreichend, so dass das Ergebnis nicht wirklich gewürdigt werden kann. (Fang et al., 2016) stellten in Provokationsexperimenten mit gepulster niederfrequenter Strahlung (PEMF-Signale) einen schwachen Einfluss auf das RR-Intervall fest (der RR-Abstand markiert die Dauer einer elektrischen Herzaktion, also den „Abstand“ zwischen zwei R-Zacken im EKG). (Sun et al., 2016) stellten in einer Studie mit 22 Diabetes-Patienten und 21 Kontrollen einen Einfluss von PEMF auf den peripheren Blutfluss (Erhöhung; gemessen am Fuss) in beiden Gruppen fest.

Studien seit 2017

Binboğa et al. (Binboga et al., 2021) untersuchten bei 34 gesunden männliche Probanden Herzschlagrate und HRV. Die Probanden wurden in einer doppelblinden Versuchsanordnung wiederholt während 5 Minuten einem Magnetfeld von 28 µT bei 50 Hz (entspricht einer beruflichen Exposition) auf die Brustregion ausgesetzt. Im Gegensatz zu den früheren Studien wurden statistisch signifikante Veränderungen der HRV festgestellt. Die Autoren diskutieren jedoch verschiedene Faktoren, welche die Resultate beeinflusst haben könnten.

Okano et al. (Okano et al., 2021) untersuchten in einer Pilotstudie, ob MF den Blutfluss erhöhen und damit zu Linderung von Muskelbeschwerden beitragen können. Angewendet wurde ein Sinus-MF bei 50 Hz mit einer Stärke von maximal 180 mT. Die Studie ist von sehr hoher Qualität und die vermutete erhöhte Geschwindigkeit des Blutflusses konnte festgestellt werden.

Eine experimentelle Tierstudie in Ratten lieferte keine Hinweise darauf, dass eine 50 Hz NF-MF-Exposition bei 0.5 mT für 20 Stunden/Tag während 24 Wochen das kardiovaskuläre System beeinflusst (Zhang, Li, et al., 2020). Weder die Herzschlagrate, noch der Blutdruck, die Morphologie des Herzens oder molekulare Marker waren verändert. Dem gleichen experimentellen Protokoll folgend, lieferten die gleichen Forschenden zusätzlich Information zu verschieden Feldstärken (30, 100, 500 µT 50 Hz NF-MF) (Zhang, Wang, et al., 2020). Dabei wurden keine signifikanten Veränderungen der Blutwerte

beobachtet. Zusätzliche Analysen bezüglich oxidativem Stress und Funktion von Leber und Nieren zeigten keine Befunde. Vergleichbare Beobachtungen und Schlussfolgerungen resultieren auch in einer anderen Rattenstudie, in der männliche Tiere für bis zu 4 Wochen täglich 2 Stunden einem 50 Hz NF-MF bei 20, 100 oder 500 µT Feldstärke ausgesetzt waren (Luo et al., 2017). Ob die Langzeitexposition mit einem 50 Hz NF-MF bei 15 µT einen Einfluss auf die Blutkoagulation hat, wurde in Mäusen untersucht (Vallejo et al., 2019). Männliche und weibliche Tiere wurden für 14 Wochen exponiert. Untersucht wurden dann deren Nachwuchs, der auch unterer stetiger Exposition war. Die Autoren berichten von einer reduzierten Koagulationszeit des Blutes von exponierten weiblichen, nicht aber männlichen Tieren.

4.3.6.5 Hormonsystem

Das Interesse in diesem Themenfeld konzentriert sich auf das neuroendokrine System, insbesondere das Zirbeldrüsenhormon Melatonin. Das Melatonin ist insofern speziell beachtet worden, weil es als ein „Schutzfaktor“ gegenüber Krebs, insbesondere Brustkrebs, bekannt ist. Eine Senkung des Melatoninspiegels durch NF-MF hätte folglich die unerfreuliche Konsequenz, dass damit das Krebsrisiko ansteigen würde. Dieser Zusammenhang ist als sog. Melatonin-Hypothese bekannt. Neben dem Melatonin sind aber auch andere Hormone (etwa Wachstums-, Fortpflanzungs- und Stoffwechsel-Hormone der Hypophyse oder das Stresshormon Cortisol der Nebennierenrinde) untersucht worden.

Die WHO hat in ihrer Literatur-Review 27 Humanstudien (experimentelle Provokationsstudien sowie epidemiologische Arbeiten mit beruflicher oder häuslicher Exposition) zu Melatonin und 5 Humanstudien zu Hypophysenhormonen analysiert. In den berücksichtigten Arbeiten geht es hauptsächlich um Magnetfeldexpositionen. Teilweise werden aber auch Wirkungen von niederfrequenten elektrischen Feldern studiert. Die 14 berücksichtigten Laborstudien mit kontrollierten Expositionsbedingungen zeigen fast durchwegs Nullresultate. Die epidemiologischen Arbeiten demgegenüber weisen gemischte Ergebnisse auf, wobei eine Mehrheit zumindest in Teilanalysen erniedrigte Melatoninspiegel gefunden hat. Die Bewertung der Befunde schwierig, insbesondere weil der Einfluss von Störgrössen (etwa der Lebensstil) nicht durchwegs berücksichtigt wird. Angesichts dieser Studienlage und der erwähnten Mängel kommt die (WHO, 2007) zu folgender Schlussfolgerung (p. 185, 186):

„The results of volunteer studies as well as residential and occupational studies suggests that the neuroendocrine system is not adversely affected by exposure to power-frequency electric and/or magnetic fields. This applies particularly to the circulating levels of specific hormones of the neuroendocrine system, including melatonin, released by the pineal gland, and a number of hormones involved in the control of body metabolism and physiology, released by the pituitary gland”. (…) “Overall, these data do not indicate that ELF electric and/or magnetic fields affect the neuroendocrine system in a way that would have an adverse impact on human health and the evidence is thus considered inadequate”.

(ICNIRP, 2010) beruft sich im Wesentlichen auf diese Bewertung der WHO, (SCENIHR, 2015) thematisiert hormonale Effekte nicht. BioInitiative (2012) kommt demgegenüber zum Schluss (Section 13, p. 9):

„Eleven (11) of the 13 published epidemiologic residential and occupational studies are considered to provide (positive) evidence that high ELF MF exposure can result in decreased melatonin production”.

Dabei wird richtigerweise darauf hingewiesen, dass bei Provokationsstudien im Labor generell keine Effekte gefunden wurden. Es wird vermutet, dass nur bei chronischer Exposition Beeinflussungen stattfinden, und es wird (wenig professionell) spekuliert, dass in Laborstudien zu „reine“ Expositionen vorliegen könnten, was immer das genau heissen und bedeuten mag. Insgesamt ist die Bewertung der BioInitiative-Gruppe zu Melatonin recht unkritisch und wenig überzeugend.

Weitere Review-Berichte stammen von (Touitou & Selmaoui, 2012) und (Halgamuge, 2013). Bezüglich des Stresshormons Cortisol listet die erste Arbeit 6 Studien auf, die alle keine Effekte zeigten. Be-

züglich des Melatonins berücksichtigt die Analyse, neben Tier- und Zellstudien, 34 Humanstudien, davon die Hälfte experimentell. Effekte zeigten dabei eine experimentelle und 10 epidemiologische Arbeiten. Nach einer qualitativen Beurteilung der Studien kommen die Autoren zum Schluss (Touitou & Selmaoui, 2012), p. 381:

„Data from the literature reviewed here are contradictory. In addition, we have demonstrated a lack of effect of ELF-EMF on melatonin secretion in humans exposed to EMF (up to 20 years' exposure) which rebuts the melatonin hypothesis".

Die letzte Schlussfolgerung basiert allerdings nicht auf der Literaturanalyse, sondern auf Resultaten ihrer eigenen Einzelstudie (Touitou et al., 2003), in welcher sie beruflich und häuslich chronisch (bis 20 Jahre) stark exponierte Personen mit passenden, aber weniger stark exponierten Personen verglichen und dabei keine Unterschiede hinsichtlich des Melatoninspiegels fanden. (Halgamuge, 2013) kommentiert im Wesentlichen dieselben Studien, kommt aber zu einer vorsichtigeren Schlussfolgerung was mögliche Langzeiteffekte betrifft.

Diese Vorsicht findet sich auch in Einzelstudien. (Vanderstraeten et al., 2012) vermuten, dass nicht der Melatoninspiegel selbst, sondern Veränderungen im täglichen Rhythmus wichtig sind und „modernisieren" deshalb die Melatoninhypothese und stellen sie in den Zusammenhang mit kindlicher Leukämie (ein Einfluss von NF-MF auf Brustkrebs wird ja inzwischen als unwahrscheinlich angenommen, siehe 4.3.2.3). Dabei berufen sie sich auf entsprechende Befunde aus Studien mit magnetosensitiven Tieren. (Bellieni et al., 2012) stellten bei exponierten Neugeborenen tiefere Melatoninspiegel fest. Dabei verglichen sie Babys in Isoletten (Magnetfeldexposition aufgrund der elektrischen Apparaturen) mit Babys in normalen Betten (keine nennenswerte Magnetfeldexposition). Allerdings fehlen in der Studie wichtige Angaben zu Störgrössen, so dass die Resultate nicht als robust gelten dürfen.

Bezüglich des Stresshormons Cortisol listet (Touitou & Selmaoui, 2012) 6 Studien auf, die alle keine Effekte zeigten. Mortazavi et al. (Mortazavi et al., 2012) stellten jedoch tiefere Cortisolspiegel bei exponierten Personen fest. Untersucht wurden Zahnärzte. Dazu verglichen die Autoren eine exponierte mit einer nicht-exponierten Gruppe. Die exponierten Personen benutzten häufig sog. Cavitrons (Gerät zur Entfernung von Zahnstein), die nicht exponierte Gruppe dagegen nicht. Leider fehlen in der Studie nähere Angaben zur Exposition, ebenso wie zum Alter und zu den Arbeitsbedingungen und Arbeitsabläufen der zwei Gruppen. Es ist deshalb schwierig, gültige Aussagen aus diesen Resultaten abzuleiten.

In einer neueren Studie von (Wang, Fei, et al., 2016) ist der Einfluss von EMF auf Hormone und andere Biomarker an 77 Arbeitern untersucht worden, wobei ein Effekt auf den Testosterongehalt (tiefer bei hoher Exposition) festgestellt wurde. In einer zweiten Publikation wurden Effekte auf den Blutfettgehalt festgestellt (Wang, Wang, et al., 2016). Die weiter oben aufgeführte Kritik an der Expositionserfassung gilt auch für diese zwei Arbeit.

Studien seit 2017

Suri et al. (Suri et al., 2020) untersuchten verschiedene für die Reproduktion wichtige Hormone bei Kraftwerksarbeitern und konnten keinen Zusammenhang zwischen den Levels der Hormone und NF-MF im Arbeitsumfeld feststellen.

Neuere tier- und zellexperimentelle Studien zum Hormonsystem gibt es nur wenige. Einige davonwurden schon in anderen Themenbereichen diskutiert (siehe Kapitel 4.3.3 «Neurodegenerative Erkrankungen» und Kapitel 4.3.4.2 «Fruchtbarkeit, Schwangerschaft, Geburt»). Eine japanische Forschungsgruppe veröffentlichte kürzlich einige Beobachtungen zum Stresshormon Glucocorticoid der Nebenniere im Blutplasma von Mäusen (Harakawa et al., 2017; Harakawa et al., 2020; Hori et al., 2017; Hori et al., 2018). Untersucht wurde der Einfluss eines 50 oder 60 Hz elektrischen Feldes (EF) von 10 kV/m während einer Stunde auf die durch Einengung-erzeugten Stress and Anstieg der Glucocorticoid-Spiegel der Tiere. Es zeigte sich, dass die EF-Exposition die Ausschüttung des Stresshormons unter

Stressbedingungen reduzierte. Die Exposition alleine führte hingegen zu keinen signifikanten Unterschieden.

Der Einfluss eines kontinuierlichen 50 Hz NF-MF bei 0.5 mT für 7 Tage auf die Ausschüttung des «Adrenocorticotropen Hormons» (ACTH) der Hypophyse und des Schilddrüsenhormons TSH wurde in mongolischen Rennratten (Gerbil) untersucht, dies nach der Exposition und 7 Tage später in gesunden und Tieren eines Hirnschlag-Modells (Rauš Balind et al., 2020). Nach der Exposition wurde eine Abnahme der ACTH-produzierenden Zellen und eine Zunahme des ACTH-Spiegels im Blutplasma beobachtet, wobei die Werte sich 7 Tage später normalisierten. Der TSH-Spiegel wurde ebenso vorübergehend durch die Exposition erhöht. Zudem wurde von einigen protektiven Effekten des NF-MF im Hirnschlag-Modell berichtet.

4.3.6.6 Weitere Endpunkte

Immunsystem

Untersucht wurden auch die Wirkungen von NF-Magnetfeldern auf das Immunsystem. Die (WHO, 2007) kommt nach Analyse von 6 Humanstudien zum Schluss, dass die Datengrundlage für eine robuste Beurteilung unzureichend ist. Die Studien zeigen widersprüchliche Resultate, entweder keine Effekte oder aber sowohl das Immunsystem schwächende oder stärkende Wirkungen. Das trifft insbesondere auch auf die zahlreicheren Tier- und Zellstudien zu. (Selmaoui et al., 2011) stellten in einem Provokationsexperiment mit 32 jungen Männern für intermittierende Magnetfeldexposition bei einem von 5 untersuchten Immunparametern einen Effekt fest. Insgesamt schliessen sie, dass 50 Hz Magnetfelder keinen Einfluss auf das Immunsystem haben. Eine epidemiologische Arbeit dieser Gruppe (Touitou et al., 2013) bestätigte diesen Schluss: Auch in dieser Studie wurden keine Veränderungen immunologischer Parameter, auch nicht bei bis zu 20 Jahren langzeitexponierten Personen, gefunden. Die Beurteilung von BioInitiative (2012) lautet demgegenüber: NF und HF-EMF haben ein grosses Potenzial, das Immunsystem zu schwächen. Dieses Urteil wird im entsprechenden Kapitel fast ausschliesslich anhand von Studien mit Hochfrequenzexpositionen begründet. Einzige Ergebnisse zu NF-Expositionen betreffen allergische Hautreaktionen bei EHS-Personen, wie sie v.a. in Schweden im Zusammenhang mit Arbeiten an Röhrenbildschirmen aufgetreten sind (siehe4.3.5.1). Die Meinung von BioInitiative ist hier wissenschaftlich wenig überzeugend.

Studien seit 2017

Zur Wirkung von EMF auf das Immunsystem und Immunzellen gibt es mittlerweile einige experimentelle Untersuchungen, die in neueren Übersichtsarbeiten zusammengefasst sind (Mahaki, Tanzadehpanah, et al., 2019; Piszczek et al., 2021), wobei auch viele Studien im hochfrequenten Bereich durchgeführt wurden (Yao et al., 2021). Allerdings lässt die Datenlage nach wie vor kaum eine abschliessende Beurteilung des Gesundheitsrisikos zu. Mahaki *et al.* (Mahaki, Tanzadehpanah, et al., 2019) fasst dies so zusammen:

"Altogether, it is difficult to conclude the beneficial or hazard effects of ELF-EMF on immune cells response, due to the differences in physical (frequency, field density, field direction, and exposure duration) and biological parameters (stimulus, species, cell type, and tissue type) of ELF-EMF".

Nachfolgend werden einige neuere experimentelle Studien im Bereich Immunsystem kurz zusammengefasst. Weitere sind auch im Kapitel 4.3.1 zur Kinderleukämie zu finden. Eine iranische Forschungsgruppe veröffentlichte kürzlich einige Studien in Ratten, die mit NF-MF exponiert wurden (Mahaki et al., 2020; Mahaki, Jabarivasal, et al., 2019; Mahdavinejad et al., 2018; Molaei et al., 2019; Sobhanifard et al., 2019). Männliche Ratten wurden täglich zwei Stunden während 2 Monaten 50 Hz NF-MF (0.01, 0.1, 0.5 oder 2 mT) ausgesetzt und in der Hälfte wurde eine Immunreaktion ausgelöst.

Bei Tieren, die der höchsten Feldstärke (2 mT) ausgesetzt waren, wurde ein kleinerer Thymus festgestellt. Weiter wurde eine Reduktion von Zytokinen (Interleukin-17; «transforming growth factor-β», TGF-β) in 1/100 µT-exponierten Tieren vor der Immunisierung gemessen (Mahdavinejad et al., 2018). In dieser und einer Folgestudie (Mahaki, Jabarivasal, et al., 2019) wurde zudem die Expression von Transkriptionsfaktoren analysiert, die wichtig für das Funktionieren der T-Helferzellen des Immunsystems sind. Wiederum für die tieferen Expositionsgruppen wurde in der Milz aber nicht im Thymus eine Reduktion festgestellt, was laut Autoren zu einer Beeinträchtigung der Funktion von T-Helferzellen der Klasse Th2 und Th17 führen könnte. Weitere an der Immunreaktion-beteiligte Zytokine wurden auch analysiert, und Veränderung vor oder nach der Immunisierung wiederum bei 100 µT NF-MF gefunden (Mahaki et al., 2020; Molaei et al., 2019; Sobhanifard et al., 2019).

In einem Vergleich zwischen akuter (24 Stunden) und wiederholender (1 Stunde/Tag für 7 Tage) 50 Hz NF-MF-Exposition bei 7 mT wurde ebenfalls in männlichen Ratten erhoben (Wyszkowska et al., 2018). Die Autoren berichten von einem starken Anstieg der Interleukine -1β, -2, und -6 nach akuter aber nicht nach wiederholender Exposition. In der umfangreichen Tierstudie mit Mäusen von Li *et al.* (Li et al., 2018) wurden Chemokine, Zytokine die die Bewegung von Immunzellen steuern, im Blutplasma analysiert, um Anzeichen von Entzündungen zu identifizieren. Die Tiere wurden entweder mit 0, 0.1, 0.5 oder 2.5 mT eines 50 Hz NF-MF für täglich 8 Stunden exponiert und Daten zu Chemokinen bevor und nach 1, 10, 30 und 90 Tagen Exposition erhoben. Eine signifikante Zunahme von zwei Chemokinen, MCP-1 und EOTAXIN-1, wurde gefunden. Dabei war MCP-1 im zeitlichen Verlauf nur bei 0.5 mT permanent erhöht, wogegen Exposition bei allen Feldstärken eine akute Zunahme von EOTAXIN-1 nach dem ersten Tag auslöste aber nur bei 0.5 mT über den ganzen Beobachtungszeitraum erhalten blieb. Die Autoren werten ihre Befunde als Anzeichen für einen endzündungsfördernden Effekt der NF-MF-Exposition. Ein möglicher Einfluss auf das Immunsystem wurde auch von den Autoren einer Studie postuliert, in der Mäuse einem kontinuierlichen 50 Hz elektrischen Feld von 35 kV/m ausgesetzt waren (Di et al., 2018).

Eine Erhöhung von Zytokinen und Chemokinen durch *ex vivo* 60 Hz NF-MF-Exposition bei 0.9 mT für 24 Stunden wurde auch in isolierten CD4-positiven T-Zellen der Maus nach Immunstimulation (Th9 Polarisation) beobachtet (Jang et al., 2019). Die Autoren zeigten, dass die Exposition über Signalwege die Ausreifung zur T-Helferzellfunktion förderte und dadurch die Immunreaktion beeinflusste. Ebenfalls eine Verstärkung der Entzündungsreaktion und Ausschütten von Zytokinen durch eine kontinuierliche 50 Hz NF-MF-Exposition bei 1 mT wurde in einem zellbasierten Wundheilungsmodell gefunden (Patruno et al., 2018). Die gleiche Arbeitsgruppe untersuchte auch den Einfluss der Exposition für 1, 6 und 24 Stunden mit 1 mT 50 Hz NF-MF in einem Zellmodell für Makrophagen (THP-1-Zellen) (Patruno et al., 2020). Die Autoren folgerten aus ihren mechanistischen Untersuchungen, dass die Exposition sich protektiv auf die Makrophagen auswirkt, indem entsprechende Schutzmechanismen moduliert wurden, die die aktivierten Zellen vor der Entzündungsreaktion und ROS-Produktion schützen. Zudem wurde gezeigt, dass dabei die Hemoxigenase-1 und die Akt- und ERK-Signalwege eine Rolle spielten.

Schlaf

In mehreren Studien sind die Auswirkungen von NF-MF auf den Schlaf studiert worden. Eine Untersuchungsmethode ist dabei die Aufzeichnung des Schlaf-EEG. Der WHO-Bericht (WHO, 2007) referiert zwei Studien, die beide Auswirkungen auf mehrere standardmässig erhobene Schlafparameter protokollierten. Eine Arbeit konnte nur bei intermittierender Exposition einen Effekt finden. Studien zu Mobilfunkexpositionen zeigten zudem, dass die niederfrequente Modulation, wie sie insbesondere bei der GSM-Technologie im “uplink” (Mobiltelefon) zu finden ist (2 Hz, 8 Hz, 217 Hz), Veränderungen im Schlaf-EEG bewirkt. Diese sind über die Expositionszeit hinaus detektierbar; z.B. (Regel et al., 2006), (Hung et al., 2007). Eine zweite Untersuchungsmethode ist der Fragebogen zu (subjektiv empfundenen) Schlafeigenschaften. (Liu et al., 2014) untersuchten anhand von über 500 Beschäftigten in der

Elektrizitätsindustrie ob die EMF-Exposition (erhoben über Berufs- und Tätigkeitsbeschreibungen sowie Kontrollmessungen) die Schlafqualität und Schlafdauer beeinflusst oder nicht. Sie kamen zu einem positiven Befund: exponierte Beschäftigte weisen eine schlechtere Schlafqualität auf. Hinsichtlich Schlafdauer fanden die Autoren keine Unterschiede. Allerdings wurden Störgrössen nur rudimentär erfasst. So bleibt insbesondere unklar, ob es zwischen den Gruppen Unterschiede gab hinsichtlich Arbeitszeiten (Dauer, Einsatzzeiten) oder hinsichtlich Arbeitstyp (Anteil manuelle vs. administrative Arbeit). Die Resultate dürfen deshalb nicht zum Nennwert genommen werden. (Monazzam et al., 2014) haben in einer ähnlich gelagerten Studie festgestellt, dass nicht die Exposition, sondern die Arbeitsbedingungen für die auch von ihnen gefundenen Unterschiede in der Schlafqualität zwischen Beschäftigten verantwortlich sind (auf die Notwendigkeit bei Studien zu beruflicher Exposition Störgrössen und Ko-Expositionen zu berücksichtigen, haben jüngst (Kostoff & Lau, 2013) hingewiesen). Wie schon im Zusammenhang mit der Elektrosensibilität (siehe 4.3.5) erwähnt haben (Mueller & Schierz, 2004) in einer kontrollierten, experimentellen Schlafstudie festgestellt, dass unter Magnetfeldeinfluss elektrosensible Personen ein Ausweichverhalten (weg von der Expositionsquelle) zeigen, dass aber die subjektiv empfundene Schlafqualität bei eingeschaltetem Feld grösser war als ohne Feld.

Studien seit 2017

Ayoobi et al. (2017) (Ayoobi et al., 2017) untersuchten bei 65 StudentInnen den Einfluss von ELF-MF (10, 14, 18 Hz; 200 µT) auf die Schläfrigkeit. Es wurden Hinweise für eine erhöhte Reaktionszeit unter MF-Beeinflussung gefunden. Da aber nicht alle durchgeführten Standardtests wie zum Beispiel “Stanford Sleepiness Scale” (SSS) bei exponierten und nicht-exponierten Probanden unterschiedlich ausfielen, sind die Resultate mit Vorbehalt zu interpretieren.

Fettleibigkeit

Es wurden auch Resultate zu „ungewöhnlichen“ Endpunkten veröffentlicht, insbesondere zu Fettleibigkeit. In einer prospektiven Kohortenstudien mit einer “follow-up”-Periode von 13 Jahren (Li et al., 2012) wurde der Einfluss der Exposition während der Schwangerschaft auf das spätere Risiko der Kinder, an Fettleibigkeit zu erkranken, studiert. Die Autoren fanden ein statistisch signifikant erhöhtes Risiko (OR = 1.69; 95% CI = 1.01–2.84) bei Müttern, die über 0.15 µT (24 Std. Durchschnitt) exponiert waren. (Milham, 2014) hat den Bezug zwischen Fettleibigkeit und NF-MF mit dem Phänomen „dirty electricity“ erklärt, und mit Ländervergleichen begründet. Wie (de Vocht & Lee, 2014) richtigerweise betonen, stehen Daten und Argumentation in dieser Arbeit von Milham jedoch auf tönernen Füssen (siehe auch: (de Vocht & Olsen, 2016)). Dasselbe gilt für die Studie von (Li et al., 2012), die einen datengetriebenen Eindruck hinterlässt (siehe 4.3.4.2). Bis weitere Studien greifbar sind bleibt unklar, welcher Stellenwert der Arbeit von (Li et al., 2012) wissenschaftlich zugemessen werden kann.

Asthma bei Kindern

Eine neuere Studie von Sudan et al. (Sudan et al., 2017) ging früheren Berichten über einen Zusammenhang zwischen MF-Exposition von Müttern und dem Auftreten von Asthma bei Kindern nach. Ihre neue Analyse der Danish National Birth Cohort ergab keinen Zusammenhang. Die Autoren fassen das Ergebnis folgendermassen zusammen:

“We did not find evidence that residential exposure to MF during pregnancy or early childhood increased the risk of childhood asthma. This interpretation is in line with the lack of an established biological mechanism directly linking MF exposure to asthma, but high exposure was very rare in this cohort.”

Gleichgewichtssystem

Im Zusammenhang mit der Festlegung von Grenzwerten für EMF wurde die Körperkontrolle als Biomarker für mögliche schädliche Wirkungen beim Menschen vorgeschlagen. Der Einfluss von NF-MF

auf das Gleichgewichtssystem ist dabei von besonderem Interesse, in Anbetracht seiner entscheidenden Rolle bei der Körperkontrolle und seiner besonderen neurophysiologischen Eigenschaften. Bisherige Untersuchungen haben keine schlüssigen Resultate geliefert. Es sei auf drei neuere Studien derselben Forschungsgruppe verwiesen (Bouisset et al., 2020a, 2020b; Villard et al., 2019). Insgesamt zeigten sich in diesen drei Studien unter den gewählten Bedingungen keine Anzeichen auf Auswirkungen auf die Körperkontrolle.

4.3.6.7 Die Radikalpaar-Theorie als möglicher Interaktionsmechanismus

Neben den hier vorgestellten Studien gibt es noch eine Vielzahl weiterer vor allem zellexperimentellen, Untersuchungen auf die hier nicht eingegangen wurde. Es handelt sich dabei um Experimente, die zwar mechanistisch von Interesse sind, sich aber nicht leicht in einen gesundheitlichen Themenbereich einordnen lassen. In diesem Zusammenhang sind Studien besonders erwähnenswert, die sich auf das quantenphysikalische Modell der magnetsensitiven Radikalpaare beziehen. Viele für die Zellphysiologie wichtige biochemischen Prozesse, laufen über transiente Reaktionszwischenstufen ab, in der Moleküle mit ungepaarten Elektronen (Radikale) existieren, die schliesslich in neuen chemischen Verbindungen enden. Bedingt durch die zwei möglichen gegenläufigen Drehrichtungen («Spin») der Elektronen können diese Radikalpaare zwei Konfigurationszustände annehmen («singlet» und «triplet state»), die das Produkt beziehungsweise die Kinetik und das Gleichgewicht der Reaktion bestimmen. Gemäss diesem Modell sind diese Zustände durch externe Magnetfelder beeinflussbar, was als Schnittstelle zwischen dem physikalischen Magnetfeld und biochemischen Prozessen verstanden werden kann und somit eine konzeptionelle Erklärung für eine Wahrnehmung von Magnetfeldern beziehungsweise möglicher Störung zellulärer Gleichgewichte liefert (Barnes & Greenebaum, 2018; Hore & Mouritsen, 2016; Juutilainen et al., 2018; Zadeh-Haghighi & Simon, 2022). Im Fokus des Interesses standen dabei die Beeinträchtigungen von oxidativen Prozessen, die zu Veränderungen von ROS-Bildung führen könnten, und der Magnetsinn von Zugvögeln, Insekten und Pflanzen.

Bezüglich der Hypothese des Magnetsinns basierend auf den Radikalpaar-Mechanismus gibt es eine Reihe neuerer Studien, in der Kryptochrom-Proteine eine zentrale Rolle spielen. Kryptochrome und verwandte Proteine, die sich in vielen Organismen finden lassen, gehören zu den Blaulichtrezeptoren und sind in der Lage mit Hilfe von Flavin-Kofaktoren (FAD) Elektronen zu transportieren, wobei transiente Radikalpaare gebildet werden. Im Menschen gibt es auch Kryptochrome, die an der Regulierung des zirkadianen Rhythmus beteiligt sind. Eine neuere Publikation liefert eine gute Evidenz für eine Rolle von Kryptochrom für den Erdmagnetfeldsinn von Zugvögeln mittels des Radikalpaar-Mechanismus (Xu et al., 2021). Im Weiteren haben Fedele und Kollegen in Fruchtfliegen gezeigt, dass ein statisches 500 µT Magnetfeld ein erdmagnetfeldabhängiges Verhalten veränderte, dies in Abhängigkeit von Blaulicht und einem Kryptochrom, wobei letzteres durch menschliche Kryptochrome ersetzt werden konnte (Fedele et al., 2014). Tatsächlich konnte eine schwache Beeinträchtigung des Elektronentransports durch ein starkes Magnetfeld (22 mT) mittels isoliertem Kryptochrom der Fruchtfliege nachgewiesen werden (Sheppard et al., 2017). Statische Magnetfelder veränderten auch die lichtabhängigen Aktivitäten der mit den tierischen Kryptochromen verwandten Blaulichtrezeptoren von Pflanzen und Photolyasen, die ein Reparaturenzym für lichtinduzierten DNS-Schäden sind (Pooam et al., 2019; Zwang et al., 2018). Eine Reaktion auf externe 10 Hz gepulstes Magnetfeld (2 mT) wurde in der Studie von Sherrard (Sherrard et al., 2018) gefunden. In Abhängigkeit von Kryptochrom vermieden die Fruchtfliegenlarven diese Felder, wobei wiederum das menschliches Kryptochrom dessen Funktion einnehmen konnte. Zudem wurde berichtet, dass die gleiche Exposition in menschlichen und Mauszellen zu einer Kryptochrom-abhängigen Bildung von ROS führte. Interessanterweise führte eine Reduktion des Erdmagnetfeldes zu einer ähnlichen Zellreaktion, was die Autoren als Hinweis für eine Wirkung von externen Feldern über transienten Veränderungen von Erdmagnetfeld-gesteuerten Prozessen deuten (Pooam et al., 2020). In diesem Zusammenhang wäre es also durchaus vorstellbar, dass externe Magnetfelder sich auf Zelldifferenzierungs- und Entwicklungsprozesse auswirken, die

von ROS-Bildung und dem Erdmagnetfeld abhängen und unter hypomagnetischen Bedingungen beeinträchtig wurden (Baek et al., 2019; Van Huizen et al., 2019; Zhang et al., 2021). Zusammenfassend kann man sagen, dass es mittlerweile einige Hinweise auf eine Beteiligung des Radikalpaar-Mechanismus in biologischen Prozessen gibt. Ob, welche und wie starke externe Magnet- und elektromagnetische Felder hier einen Einfluss nehmen können und inwieweit dies zu einer gesundheitlichen Beeinträchtigung führen kann, bleibt aber weitgehendst ungeklärt.

4.3.6.8 Bewertung

Die Wahrnehmungsschwellen für hybride Felder (AC- und DC-EF) liegen tiefer als wenn nur AC- oder DC-Felder vorliegen und können durchaus im Bereich der Grössenordnung der Grenzwerte liegen. Dies ist für Hybridleitungen von Belang.

Niederfrequente Magnetfelder scheinen die Elektrophysiologie des Hirns beeinflussen zu können. Das wurde in mehreren Laborstudien mit EEG-Messungen gezeigt. Allerdings sind die Studienresultate nicht einheitlich und es liegen auch Nullergebnisse vor. Beeinflusst werden besonders die Alpha-Wellen (Frequenzbereich 8–13 Hz), und es scheint besonders dann, wenn das Magnetfeld in demselben Frequenzbereich liegt. Solche Veränderungen könnten gesundheitliche Auswirkungen haben. Die Befunde und Schlussfolgerungen sind dabei recht heterogen, wobei man beachten muss, dass viele Untersuchungen mit stärkeren magnetischen Feldern durchgeführt wurden, als sie im Alltag angetroffen werden.

Hinsichtlich möglicher Effekte auf Lernen und Gedächtnis liegen, nicht unerwartet, ebenfalls uneinheitliche Ergebnisse vor. Es lassen sich keine klaren Schlüsse ziehen, ob niederfrequente Magnetfelder, wenn überhaupt, kognitive Leistungen negativ oder auch positiv beeinflussen.

Betreffend Wirkungen auf das Herzkreislaufsystem (Blutdruck, Puls, Herzratenvariabilität) sind die Befunde bei Alltagsexpositionen relativ eindeutig: niederfrequente Magnetfelder, auch bei Langzeitexposition, dürften das Herzkreislaufsystem nicht negativ beeinflussen.

Was hormonale Effekte von niederfrequenten Magnetfeldexpositionen anbelangt, zeigen Laborstudien unter kontrollierten Bedingungen und mit eher kurzfristigen Expositionen fast durchwegs negative Befunde. Epidemiologische Arbeiten weisen hingegen widersprüchliche Resultate auf und können nicht zu einem klaren Fazit gebündelt werden. Im Zentrum des Interesses steht das Melatonin, das bei der Schlafregulation eine wichtige Rolle spielt und dem eine präventive Wirkung bei Brustkrebs (und anderen Erkrankungen) zugesprochen wird. Mögliche Langzeitfolgen bleiben unter Beobachtung.

Die Datenlage zu Wirkungen auf das Immunsystem ist ebenfalls uneinheitlich und lückenhaft. Neuere Humanstudien weisen eher darauf hin, dass keine Effekte vorliegen. Im Gegensatz dazu zeigen viele neuere Tierstudien Effekte. Die Beurteilung von allfälligen bösartigen oder gutartigen Wirkungen bleibt aber schwierig.

Dagegen scheint es, dass NF-MF den Schlaf beeinflussen kann. Der Einfluss zeigt sich primär elektrophysiologisch im Schlaf-EEG. Es ist unklar, ob die Beobachtungen eine (und wenn ja welche) gesundheitliche Bedeutung haben. Hinsichtlich der subjektiven Schlafqualität sind die Resultate uneinheitlich. Das könnte daran liegen, dass manche epidemiologische Arbeiten teilweise deutliche methodische Mängel zeigen. Ein Gesamturteil ist gegenwärtig kaum möglich.

4.4 Forschungsbedarf

4.4.1 Kinderleukämie

Bei der Vielzahl bisher durchgeführter Fall-Kontrollstudien zu Kinderleukämie ist offensichtlich, dass von weiteren Studien vom selben Typ kein wesentlicher Erkenntnisgewinn zu erwarten ist. Gefragt sind neue Ansätze, z.B. Kohortenstudien mit vulnerablen Populationen (z.B. Kinder mit Down-Syndrom) oder mit hohem Anteil an hochexponierten Kindern (z.B. Kinder in Gebäuden mit Transformatoren). Ebenfalls interessant sind Gen-Umwelt-Interaktionsstudien, da diese Hinweise auf mögliche biologische Wirkungsmechanismen geben könnten. Nötig wären auch Studien mit verbesserter Expositionsbestimmung, z.B. mit prospektiv gesammelten Informationen. Es ist jedoch zu betonen, dass solche Studien genügend gross sein müssen und entsprechend aufwändig sind. Interessant sind auch neue Ansätze, wie die in Kapitel 4.3.2.3 erwähnte Studie von Khan et al. (Khan et al., 2022), welche möglichst viele Confounder ausschliessen.

Nötig wäre auch eine systematische Evaluation, ob die beobachteten Zusammenhänge zwischen Magnetfeldbelastungen und Kinderleukämien durch andere Faktoren ausgelöst sind, die im Zusammenhang mit Magnetfeldern stehen könnten. Diskutiert wurden in diesem Zusammenhang insbesondere in der Umgebung von Hochspannungsleitung auftretende Kontaktströme oder koronare Entladungen, die über eine veränderte Chemie der Umgebungsluft auf die Kinder wirken könnten. Solche Faktoren sind möglicherweise dafür verantwortlich, dass auch in Distanzen von 200–600 m von Hochspannungsleitungen noch erhöhte Erkrankungsraten beobachtete wurde, obwohl dort die Magnetfeldbelastung bereits Hintergrundwerte erreicht.

Um die beobachteten epidemiologischen Zusammenhänge erklären zu können, sind zusätzliche experimentelle Untersuchungen notwendig, welche sich insbesondere auch den möglichen Wirkungsmechanismen widmen. Hier sind in den letzten Jahren neue Tiermodelle und Mechanismen mit Involvierung von ROS in den Vordergrund getreten. Die Datenlage lässt aber weiterhin keine abschliessende Beurteilung des Risikos für kindliche Leukämie zu.

4.4.2 Neurodegenerative Erkrankungen

Um die Unklarheiten in Bezug auf ein erhöhtes Alzheimer oder ALS Risiko zu klären sind weitere epidemiologische Studien nötig, insbesondere zu Alltagsbelastungen. Zentral für solche Studien ist, dass die Exposition prospektiv abgeschätzt oder modelliert werden kann. Studien zu Berufsexpositionen bieten sich an, um die Auswirkungen von Magnetfeldexposition und von elektrischen Schlägen unterscheiden zu können. In Bezug auf letzteres ist insbesondere auch unklar, welche Art von Stromschlägen besonders problematisch sein könnte (wenn überhaupt). Sind es eher die starken seltenen Ereignisse oder die häufigen schwachen Ereignisse?

Weitere experimentelle Laborstudien (in-vivo und in-vitro) sind notwendig. Zu klären sind insbesondere Wirkungsmechanismen und Effekte möglicher Ko-Expositionen.

4.4.3 Elektromagnetische Hypersensibilität

Offene Fragen betreffen hier unter anderem die Wahrnehmbarkeit von Feldern. Neuer Arbeiten (siehe Kapitel 4.3.6.1) haben hier durchaus unerwartete Ergebnisse geliefert und entsprechende Untersuchungen sollten weitergeführt werden. Clevere Studiendesigns sind gefragt, um die Frage zu klären, ob es - wie teilweise postuliert - eine Gruppe mit erhöhter Wahrnehmungsfähigkeit gibt. Wichtig scheint aber in diesem Zusammenhang konzeptionell zwischen erhöhter Wahrnehmungsfähigkeit und

Hypersensibilität zu unterscheiden. Grundsätzlich empfiehlt sich bei Provokationsstudien in diesem Bereich neben den subjektiven Angaben der Probanden auch objektive Daten zu physiologischen Markern zu sammeln, welche potentiell sensitiv auf Umweltreize reagieren wie Herzrhythmusvariabilität, Hautleitungswiderstand oder Genexpression inkl. Proteomics. Nach wie vor fehlen nämlich experimentelle Nachweise auf physiologischer bzw. molekularer Ebene, welche eine Verbindung zwischen NF-MF und dem Auftreten von EHS herstellen können.

Weitere zu untersuchende Fragen betreffen synergistische Wirkungen von Ko-Expositionen oder das Zusammenspiel von Persönlichkeitszügen mit dem Auftreten von EHS.

4.4.4 Andere Themen

Grundsätzlich wird der Forschungsbedarf im Bereich Schwangerschaft, Entwicklung und Geburt als mittelhoch erachtet. Da jedoch in Geburtsregistern Daten leicht zugänglich sind, könnte die Durchführung von weiteren epidemiologischen Studien zu ELF-MF-Expositionen empfohlen werden.

Um die Kausalität von beobachteten statistischen Beziehungen zwischen Magnetfeldexposition und Gesundheitsauswirkungen beurteilen zu können, braucht es Studien zu Wirkungsmechanismen. Es gibt eine Reihe von Zellstudien bei denen oxidative Prozesse durch Magnetfeldexposition beeinflusst waren. Oxidative Prozesse spielen bei vielen Krankheiten eine Rolle, insbesondere auch bei Krebs und bei neurodegenerativen Erkrankungen. Daher wäre es wünschenswert Klarheit zu erhalten, ab welcher Expositionsstärke, Expositionsdauer und bei welchen Zelltypen solche Auswirkungen zu erwarten sind und inwiefern die Prozesse reversibel sind und ob Adaption eine Rolle spielt. Neben oxidativen Prozessen gibt es andere Wirkungsmechanismen, die ungenügend erforscht sind, und möglicherweise bedeutsam für Gesundheitsauswirkungen (speziell erwähnt seien elektrophysiologische Wirkungen) sein könnten. Dabei handelt es sich um epigenetische Effekte, Signalübertragungen in der Zelle und Kryptochrom-abhängige Prozesse. Mit Untersuchungen von spannungsabhängigen Kalziumkanälen und der Radikalpaar-Theorie sind diesbezüglich auch neue Ansätze vorhanden, die gegenwärtig im Forschungsfokus sind.

Nicht vergessen werden sollte im Zusammenhang mit dem Stromnetz auch der Forschungsbedarf im Hochfrequenzbereich, welcher sich aus neuen Anwendungen in Folge der Konvergenz von Strom- und Kommunikationsnetzen ergeben könnte.

5. Sozialwissenschaftliche Studien zu NF-EMF

Eine moderne, funktionierende Netzinfrastruktur ist eine wichtige Voraussetzung für die Sicherstellung der Energieversorgung. Zudem stellt die Förderung der erneuerbaren Energien im Rahmen der Energiewende neue Anforderungen an die Netzinfrastruktur. Die Bereitstellung der erforderlichen Anlagen und die Entwicklung neuer technologischer Möglichkeiten garantiert jedoch noch lange keine erfolgreiche Umsetzung der Massnahmen zur Anpassung der Netze. Die mangelnde Akzeptanz von Projekten in Zusammenhang mit dem Stromleitungsbau in der Bevölkerung ist eine der Hauptursachen für die Verzögerung oder gar das Scheitern von Netzausbauprojekten (Cain & Nelson, 2013), (Furby et al., 1988), (Vajjhala & Fischbeck, 2007). Auch in der Strategie Stromnetze im Rahmen der Energiestrategie 2050 wurde die Erhöhung der Akzeptanz des erforderlichen Um- und Ausbaus der Stromnetze als ein wichtiges Element zur Erreichung des Ziels einer bedarfs- und zeitgerechten Netzentwicklung aufgegriffen (Bundesrat, 2013). Die sozialwissenschaftliche Forschung im Energiebereich kann entscheidend zum Verständnis der Akzeptanz des Stromleitungsbaus und ihrer Determinanten und Mechanismen beitragen sowie allfällige Herausforderungen und Möglichkeiten im Hinblick auf die Erhöhung der Akzeptanz aufzeigen (Ryan et al., 2014), (Sovacool, 2014).

5.1 Akzeptanz von Energieinfrastrukturen

Nach dem nuklearen Unfall in Fukushima im März 2011 kam es in verschiedenen Ländern zu einer Änderung in der Wahrnehmung der Energietechnologien. Im Zusammenhang mit der Kernenergie wurden nach diesem Vorfall mehr Risiken und weniger Nutzen wahrgenommen und die Einstellung gegenüber Kernenergie fiel negativer aus (Y. Kim et al., 2013), so auch in der Schweiz (Siegrist & Visschers, 2013). Gegenüber erneuerbaren Energien ist die Schweizer Bevölkerung jedoch sehr positiv eingestellt (Visschers & Siegrist, 2014), (Sütterlin & Siegrist, 2017). Die Förderung von erneuerbaren Energien findet in Bevölkerungsbefragungen generell sehr grossen Zuspruch. Mit der konkreten Implementierung von erneuerbaren Energien werden aber auch negative Aspekte wie etwa die Beeinträchtigung der Landschaft, der Natur und der Ästhetik ersichtlich. Dies kann zu einer verminderten Akzeptanz und auf lokaler Ebene zu Widerstand gegen Energieinfrastrukturprojekte führen; für eine Übersicht siehe: (Perlaviciute & Steg, 2014).

Was die physikalischen Charakteristiken (z.B. die Auswirkungen auf die Landschaft und die Ästhetik) und die Charakteristiken des Planungsprozesses von erneuerbaren Energieinfrastrukturen anbelangt, so finden sich viele dieser Eigenschaften auch bei Projekten im Zusammenhang mit Stromleitungen und haben ähnliche Auswirkungen auf deren Akzeptanz (Bertsch et al., 2017), (Cain & Nelson, 2013), (Cotton & Devine-Wright, 2013), (Elliott & Wadley, 2012). In einigen wesentlichen Aspekten unterscheidet sich die Wahrnehmung der Infrastruktur zur Stromübertragung und -verteilung jedoch entscheidend von derjenigen von erneuerbaren Energien. Im Gegensatz zu Infrastrukturen zur Förderung von Erneuerbaren werden Stromleitungen und -masten nicht automatisch als „grüne“ Infrastruktur betrachtet (Cohen et al., 2014) und daher wird ihr Nutzen im Hinblick auf die Förderung von erneuerbarer Energie nicht wahrgenommen. Zudem werden Stromleitungen aufgrund der von ihnen ausgehenden elektromagnetischen Felder als Gesundheitsrisiko betrachtet. Die Gesundheitsbedenken im Zusammenhang mit EMF sind der Hauptantriebsfaktor für den Widerstand gegen Stromleitungen (Cotton & Devine-Wright, 2013), (Elliott & Wadley, 2012) (Elliott et al., 2016). Wie diverse Studien aufzeigen, besteht in der Öffentlichkeit im Allgemeinen eine grosse Unsicherheit über die negativen Auswirkungen auf die Gesundheit (Claassen et al., 2016), (Jarry T. Porsius et al., 2016). Diese Unsicherheit wird unter anderem durch Inkonsistenzen in den Mitteilungen der Medien, Behörden oder anderweitigen Kommunikationsquellen herbeigeführt und kann eine verstärkende Wirkung auf die Gesundheitsbedenken haben (Jarry T. Porsius et al., 2016). Eine angemessene Informationsvermittlung zur EMF-

Exposition kann die Bedenken bezüglich des Krebsrisikos im Zusammenhang mit Hochspannungsleitungen reduzieren (Claassen et al., 2015). Eine höhere Akzeptanz von Hochspannungsleitungen in der Nähe des Wohnsitzes wird dadurch jedoch nicht erzielt.

Gemäss einer Literaturübersicht aus dem Jahr 2020 lässt sich die Forschung zur Akzeptanz von Technologie und Infrastruktur hinsichtlich erneuerbarer Energien in drei Wellen einteilen. Während die 90er Jahre von normativen Forschungsansätzen (normative approaches) geprägt sind, welche Befürworter:innen und Gegner:innen analysieren und charakterisieren, um Ablehnung von Technologie und Infrastruktur zu überwinden, folgt ab Beginn der 2000er eine Phase der kritisierenden Forschungsansätze (criticism approaches). Diese erforschen primär sozialpsychologisch und gesellschaftlich bedingte Faktoren der Ablehnung, mit dem Ziel, Widerstand zu verstehen und den Übergang zu erneuerbaren Technologien zu erleichtern. Ab 2010 rücken kritische Ansätze (critical approaches) auf ideologischer, theoretischer und methodologischer Ebene in den Mittelpunkt der Forschung, welche der Frage nachgehen, ob Widerstand überhaupt reduziert oder beseitigt werden sollte (Batel, 2020).

5.2 Einflussfaktoren

5.2.1 Physikalische Charakteristiken

5.2.1.1 Räumliche Faktoren

Verschiedene Studien zeigten, dass die allgemeine Einstellung gegenüber Infrastrukturen im Zusammengang mit der Förderung erneuerbarer Energie, wie sie in Bevölkerungsbefragungen erfasst wird, keine geeignete Grundlage für Schlussfolgerungen im Hinblick auf die lokale Akzeptanz darstellt (Pidgeon & Demski, 2012). Die allgemeine Einstellung und Akzeptanz bezüglich dieser Projekte fällt generell höher aus als die der lokalen Bevölkerung, die sich mit den konkreten Auswirkungen konfrontiert sieht. Insbesondere Gesundheitsbedenken sowie ein potentieller Wertverlust von Eigentum stellen zentrale Bedenken der lokalen Wohnbevölkerung gegenüber Hochspannungsleitungen dar. Die damit einhergehende geringe Akzeptanz scheint durch finanzielle Anreize sowohl auf Gemeinde- als auch Individualebene nicht positiv beeinflussbar zu sein (Simora et al., 2020). Auch die Bereitstellung von Informationen zu Vorsichtsmassnahmen kann die empfundene Sicherheit und Akzeptanz negativ beeinflussen und dadurch den Wunsch nach einer grösseren räumlichen Distanz zu Stromleitungen befördern (Wiedemann et al., 2018). Mit zunehmender räumlicher Distanz zu den Übertragungsleitungen nimmt die Akzeptanz zu (Bertsch et al., 2016; Sharpton et al., 2020) und Bedenken, wie etwa Gesundheitsbedenken im Hinblick auf EMF (Cotton & Devine-Wright, 2013), nehmen ab. Akzeptanz scheint insbesondere gering bei Personen, die starke «NIMBY-Überzeugungen» (not in my backyard) aufweisen (Liebe & Dobers, 2019).

Visuelle Beeinträchtigungen und Veränderungen der Landschaft sind wie bei anderen Energieinfrastrukturen (z.B. Windkraftanlagen) eine der Hauptursachen für die negative Beurteilung des Baus von Stromleitungen (Devine-Wright & Devine-Wright, 2009; Koecklin et al., 2021; Linzenich et al., 2020; Simora et al., 2020). Eine präferierte Option scheint demnach der Bau unterirdischer Leitungen zu sein. Dies aber nur, sofern die negativen Auswirkungen auf Natur und Gesundheit nicht bekannt sind. Die Bereitstellung von Informationen senkt die Akzeptanz unterirdischer Leitungen, vermag gleichzeitig aber nicht jene überirdischer Leitungen zu erhöhen (Lienert et al., 2018). Die Standortwahl ist daher ein wichtiger Faktor im Zusammenhang mit dem Bau von Strommasten.

5.2.1.2 Technologische Faktoren

Die Akzeptanz von Energieinfrastrukturen hängt von den technischen Eigenheiten ab (Devine-Wright, 2008). Infrastrukturprojekte variieren in ihrer Grösse und unterscheiden sich entsprechend auch im

Ausmass ihrer Auswirkungen auf die Landschaft und in ihrer Sichtbarkeit. Zudem hängt die Akzeptanz von Übertragungsleitungen auch davon ab, ob es sich um bestehende oder neu errichtete Stromleitungen handelt (Soini et al., 2011). Die Akzeptanz von Stromleitungen fällt somit je nach Art der Änderung am Stromnetz verschieden aus, da diese Änderungen mit unterschiedlichen Auswirkungen auf die Sichtbarkeit und das Landschaftsbild einhergehen können. In einer Schweizer Studie wurde gezeigt, dass Anpassungen am Stromnetz wie die Erneuerung bestehender Stromleitungen und technische Innovationen, die ohne visuelle Änderungen erfolgen, eher akzeptiert werden als sichtbare Veränderungen wie die Vergrösserung der Masten oder der Neubau von Hochspannungsleitungen (Lienert et al., 2015). Die Art der Übertragungstechnologie (bspw. AC DC) sowie etwaige Veränderungen daran scheinen gemäss einer Studie in Deutschland die Akzeptanz von überirdischen Leitungen nicht zu beeinflussen (Zaunbrecher et al., 2016).

5.2.2 Psychologische Faktoren und Prozesse

5.2.2.1 Risikowahrnehmung

Es wurden bisher nur wenige Studien mit einem spezifischen Fokus auf die Risikowahrnehmung von EMF im Zusammenhang mit Stromleitungen durchgeführt (Furby et al., 1988), (Gregory & von Winterfeldt, 1996), (MacGregor et al., 1994), (Morgan et al., 1990), (Morgan et al., 1985), (Slovic, 1987). Studien, die mittels des psychometrischen Paradigmas die Determinanten der Risikowahrnehmung im Hinblick auf verschiedene Gefahren identifizierten, zeigten, dass Hochspannungsleitungen als ein moderates Risiko betrachtet werden (Slovic, 1987): Sie werden von der Öffentlichkeit als ein wenig bekanntes Risiko mit einem moderaten Gefahrenpotential eingestuft (Morgan et al., 1985). Eine aktuelle Studie aus Deutschland zeigt, dass die Risikowahrnehmung je nach Technologie zu variieren scheint. So werden Unkontrollierbarkeit von Risiken sowie die Existenz unbekannter Risiken bei Mobilfunkmasten höher als bei Strommasten eingeschätzt (Linzenich et al., 2020).

Seitens der Bevölkerung gibt es verschiedene Missverständnisse bezüglich EMF-Quellen und deren Risiko, die einen verzerrenden Einfluss auf Einstellungen und Entscheidungen haben können. So wird zum Beispiel der Zusammenhang zwischen der Distanz zu einer EMF-Quelle und der Exposition falsch beurteilt: Die meisten sind sich nicht bewusst, dass EMF von Quelle, die nahe am eigenen Körper sind (z.B. EMF ausgehend von einem Staubsauger), tatsächlich viel stärker sein können als diejenigen von starken Quellen, die weiter entfernt aber doch in relativer Nähe sind wie etwa Stromleitungen (Claassen et al., 2016). Dies kann sich entsprechend negativ auf die Akzeptanz von Strategien im Zusammenhang mit der Standortwahl von Stromleitungen auswirken, da die vorgeschlagenen nicht allzu weit entfernten Standorte von der Bevölkerung als unwirksam für die Minimierung der Exposition empfunden werden.

Nebst der Risiko- ist auch die Nutzenwahrnehmung ein wichtiger Faktor für die Akzeptanz von Technologien. Viele Studien lassen vermuten, dass die Nutzenwahrnehmung sogar entscheidender für die Technologieakzeptanz ist als die wahrgenommenen Risiken. Es wurde zum Beispiel gezeigt, dass die Akzeptanz der Kernenergie von Befürwortern von Kernkraftwerken hauptsächlich durch den wahrgenommenen ökonomischen Nutzen beeinflusst wird (Visschers et al., 2011), während Gegner diesen Nutzen weniger hoch gewichten und daher nicht gewillt sind, die mit dieser Technologie verbundenen Risiken zu akzeptieren (Eiser & van der Pligt, 1979). Die Veränderung in der Nutzenwahrnehmung war auch einer der Hauptgründe für die Einstellungsänderung gegenüber der Kernenergie in der Schweizer Bevölkerung nach dem nuklearen Unfall in Fukushima (Siegrist et al., 2014). Obwohl die Bevölkerung nach Fukushima mehr Risiken mit Kernenergie verband, war diese Änderung in der Risikowahrnehmung nicht der ausschlaggebende Faktor für die Einstellungsänderung. Auch im Hinblick auf die allgemeine und lokale Akzeptanz von Stromleitungen stellt sich die Nutzenwahrnehmung als wichtigerer Prädiktor heraus als die Risikowahrnehmung (Lienert et al., 2015).

Kognitive Modelle haben lange Zeit die Forschung zur Risikowahrnehmung und zur Entscheidungsfindung unter Unsicherheit dominiert, bis vor Kurzem die Wichtigkeit des Zusammenspiels zwischen Affekt (Gefühlen) und Risikowahrnehmung anerkannt und zum Untersuchungsgegenstand neuerer Forschung wurde (Finucane & Holup, 2006), (Loewenstein et al., 2001), (Slovic et al., 2004). So postulieren Slovic und Kollegen (2004) im Rahmen der von ihnen beschriebenen Affektheuristik zum Beispiel, dass Personen die Beurteilung von Nutzen und Risiken einer Technologie anhand der durch die Technologie ausgelösten Gefühle vornehmen. Im Falle von positiven Gefühlen wird der Nutzen als hoch und die Risiken als tief eingeschätzt und im Falle von negativen Gefühlen verhält es sich umgekehrt. Die Wichtigkeit des Affekts im Hinblick auf die Wahrnehmung und Akzeptanz von Energieinfrastrukturen wurde im Zusammenhang mit Kernenergie (Peters & Slovic, 1996), erneuerbaren Energien (Visschers & Siegrist, 2014) und auch Stromleitungen (Lienert et al., 2015) (Lienert et al., 2017a) nachgewiesen.

5.2.2.2 Emotionale Bindung an den Heimatort und ortsgebundene Identität

Emotionen spielen auch eine Rolle, wenn es um die Standortwahl für Stromleitungen und -masten geht. Projekte im Zusammenhang mit dem Bau von Energieinfrastruktur stossen bei der lokalen Bevölkerung oft auf erbitterten Widerstand. Dabei steht die tiefe Akzeptanz der lokalen Bevölkerung im Gegensatz zur hohen Akzeptanz der Allgemeinbevölkerung. Ein früher vielfach herangezogener Erklärungsansatz für die lokale Opposition gegen Infrastrukturprojekte ist der NIMBY-Ansatz (Not In My Backyard). Dieser geht von einer egoistischen Grundhaltung der lokalen Bevölkerung aus, die Infrastrukturprojekte nur so lange befürwortet, wie sie nicht persönlich durch negative Auswirkungen beeinträchtigt wird. Es besteht jedoch ein breiter wissenschaftlicher Konsens darüber, dass der NIMBY-Ansatz keine adäquate Erklärung für den lokalen Widerstand gegen Energieinfrastrukturprojekte darstellt (Devine-Wright & Devine-Wright, 2009). Hierzu merken Liebe & Dobers (Liebe & Dobers, 2019) allerdings an, dass die geringe wissenschaftliche Evidenz für den NIMBY-Ansatz möglicherweise methodisch begründet ist. Während frühere Studien als Mass für NIMBY die Distanz zwischen der jeweiligen Energieinfrastruktur und dem Wohnhaus eines Individuums heranziehen, definieren Liebe & Dobers NIMBY als Überzeugung, welche optimalerweise über verschiedene Befragungsitems erhoben werden sollte.

Die Konzepte der emotionalen Bindung an den Wohnort (place attachment) und der ortsgebundenen Identität (place identity) bieten eine naheliegendere Erklärung für die lokale Opposition gegen Infrastrukturprojekte. Gemäss Devine-Wright und Devine-Wright (2009) (Devine-Wright & Devine-Wright, 2009) reagiert die lokale Bevölkerung dann mit Widerstand, wenn sie durch ein Projekt die existierende emotionale Bindung an den Wohnort sowie ortsgebundene Identitätsprozesse (d.h. das Mass, in dem physikalische und symbolische Aspekte des Ortes zur Identität beitragen) gefährdet sehen. Die Beurteilung und die Reaktion im Hinblick auf ein Infrastrukturprojekt sind dabei abhängig von den örtlichen und landschaftlichen Charakteristika. Je nach Gegebenheiten kann ein Infrastrukturprojekt die emotionale Bindung und die ortsbezogene Identität auch verstärken. Bei einer Ortschaft, die als Industriestandort wahrgenommen wird, ist weniger Opposition zu erwarten, da ein Infrastrukturprojekt eher im Einklang mit der emotionalen Bindung an den Ort und der ortsbezogenen Identität steht und auch als Chance wahrgenommen werden kann. Dies ist bei einer Ortschaft, die sich durch die Schönheit der landschaftlichen Umgebung und als Erholungsort auszeichnet, weniger der Fall (van der Horst, 2007). Eine landschaftliche Umgebung und ein Strommast zum Beispiel sind aus der Sicht der Leute von ganz unterschiedlichem Wesen und daher unvereinbar (Batel et al., 2015). So stösst etwa die Errichtung von Strommasten in Naturräumen wie dem Wald oder dem offenen Feld auf weniger Akzeptanz als die Positionierung neben einer bereits bestehenden Infrastruktur (Zaunbrecher et al., 2017). Der Einfluss der Bindung an den Wohnort und der ortsgebundenen Identität auf die Akzeptanz von Projekten wurde in Studien zur Förderung erneuerbarer Energien (Devine-Wright & Howes, 2010), (Strazzera et al., 2012) wie auch in Studien zur Errichtung von Stromleitungen (Devine-Wright,

2012) nachgewiesen.

Während die wissenschaftliche Literatur primär die lokale Bindung von Individuen untersucht, erfährt die gefühlte Bindung auf nationaler sowie globaler Ebene eher wenig Berücksichtigung (Batel, 2018; Devine-Wright & Batel, 2017), wenngleich erste Ergebnisse nahelegen, dass ein solcher Fokus noch differenziertere Erkenntnisse liefern könnte. So scheinen jüngere, politisch Mitte bis Links ausgerichtete Menschen tendenziell globale Zugehörigkeit zu verspüren. Sie weisen eine hohe Sensibilität für den Klimawandel auf und haben eine positivere Einstellung gegenüber erneuerbaren Energien, der Dezentralisierung des Versorgungsnetzes sowie der Etablierung eines europäischen Netzes. Auch Menschen, die sowohl auf lokaler, nationaler und globaler Ebene eine starke Verbundenheit verspüren, weisen eine hohe Sensibilität für Klimafragen auf und sind einem europäischen Stromnetz gegenüber positiv eingestellt. Sie sind tendenziell älter und äussern eine hohe Handlungsbereitschaft, sowohl hinsichtlich der Reduktion ihres Energiebedarfs als auch bei der Unterstützung oder Verhinderung neuer Stromtrassen (Devine-Wright & Batel, 2017).

5.2.2.3 Vertrauen in die Akteure

Das wahrgenommene Vertrauen in die Akteure (z.B. Energieunternehmen, Regierung, Stromnetzbetreiber, Wissenseinrichtungen) im Zusammenhang mit einem Infrastrukturprojekt stellt einen wichtigen Faktor für die Akzeptanz dar. Personen stützen sich vor allem dann auf das in die Akteure gesetzte Vertrauen ab, wenn es ihnen selbst an Kontrolle über die Risiken und an Wissen fehlt (Siegrist & Cvetkovich, 2000), (Slovic, 1993). Vertrauen beeinflusst die Nutzen- und Risikowahrnehmung, wie auch eine aktuelle Studie aus der Schweiz hinsichtlich 5G zeigt. So führt neben dem objektiven Wissen auch das Vertrauen in die 5G-regulierenden Institutionen zu einer geminderten Risikowahrnehmung (Frey, 2021), die dann wiederum die Akzeptanz von Technologien formen. Das ist vor allem bei öffentlichen Risiken, wie denjenigen, die im Zusammenhang mit Stromleitungen wahrgenommen werden, der Fall. Mit zunehmendem Vertrauen in die Akteure steigt die Akzeptanz von Energieinfrastrukturprojekten sowohl in Bezug auf erneuerbare Energien wie auch in Bezug auf Stromleitungen und -masten (Devine-Wright, 2012). Die Wichtigkeit von Vertrauen und Kontrolle im Hinblick auf die wahrgenommenen Gesundheitsrisiken von den von Stromleitungen ausgehenden EMF wurde in einer von (van Dongen et al., 2013) durchgeführten Studie verdeutlicht. Die Studie zeigte, dass die wahrgenommene Kontrolle den Zusammenhang zwischen Vertrauen und wahrgenommenem Risiko von Stromleitungen und GSM-Basisstationen abschwächt. Das Vertrauen stellt somit einen wichtigen Faktor im Zusammenhang mit der Risikowahrnehmung und der Akzeptanz von Stromleitungen dar, vor allem dann, wenn die wahrgenommene Kontrolle und das Wissen über die Energieinfrastruktur tief sind. Vertrauensvolle Akteur:innen können mitunter auch als Meinungsführer:innen fungieren. So zeigt eine europäische Studie, dass in der Schweiz die Akzeptanz erneuerbarer Energien und ihrer Infrastruktur gesteigert werden kann, wenn Lokalpolitiker:innen diese befürworten. In Italien zeigt sich ein ähnlich positiver Effekt auf die Akzeptanz, allerdings ist hier die positive Aussprache für erneuerbare Energie und die dazugehörige Infrastruktur von Seiten der EU und der eigenen Regierung massgeblich (Azarova et al., 2019).

5.2.3 Prozedurale Faktoren

Das Vertrauen in Akteure und Betreiber ist auch entscheidend, wenn es um die von der lokalen Bevölkerung wahrgenommene Verteilungs- und Prozessgerechtigkeit geht. Je nachdem, wie die Beurteilung im Hinblick auf diese Gerechtigkeiten ausfällt, mündet ein Infrastrukturprojekt in Akzeptanz oder Opposition (Renn et al., 1996). Die Verteilungsgerechtigkeit beschreibt die wahrgenommene Gerechtigkeit in Bezug auf die Verteilung bestimmter Ressourcen, während die Prozessgerechtigkeit in erster Linie die Einbindung der betroffenen lokalen Bevölkerung in Form von Informations- und Partizipati-

onsangeboten sowie den Einbezug von Gemeindevertretern in den Planungs- und Entscheidungsprozess thematisiert. Verschiedene Studien im Rahmen von Infrastrukturprojekten zur Förderung erneuerbarer Energien verdeutlichten, dass ein als fair wahrgenommener Prozess in einer höheren Akzeptanz des Projektes resultiert (Gölz & Wedderhoff, 2018; Gross, 2007; Linzenich & Ziefle, 2018; Walker & Devine-Wright, 2008). Auch die Inklusion von Individuen durch politische und wirtschaftliche Partizipationsmöglichkeiten kann positive Effekte haben (Stadelmann-Steffen & Dermont, 2021). Hingegen kann die Überzeugung, dass Planungs- und Konsultationsverfahren unfair waren, zu Opposition gegen die Errichtung von Stromleitungen führen (Devine-Wright, 2012).

Oft wird die Kommunikation von der lokalen Bevölkerung jedoch als mangelhaft empfunden und die Anwohner haben das Gefühl, dass sie im Planungsprozess nicht richtig ernst genommen werden und auf ihre Bedenken nicht eingegangen wird (Knudsen et al., 2015), (Komendantova & Battaglini, 2016), (Jarry T. Porsius et al., 2016). Zudem entspricht die bereitgestellte Information meist nicht den Bedürfnissen der lokalen Bevölkerung und ist aus ihrer Sicht zu wenig personalisiert und zu wenig konkret in Bezug auf den Einfluss von Stromleitungen auf ihre Lebenssituation (Jarry T. Porsius et al., 2016). Diese Unzulänglichkeiten wirken sich negativ auf die wahrgenommene Prozessgerechtigkeit aus und führen zu einer tieferen Akzeptanz von Infrastrukturprojekten. Der differenzierten Informationsvermittlung sollte insbesondere Wichtigkeit beigemessen werden, denn sie beeinflusst, inwiefern die Anwohner sich als angemessen vertreten wahrnehmen, eine faire Chance haben, ihrem Anliegen eine Stimme zu verleihen und dadurch den Prozess und das Ergebnis beeinflussen können (Knudsen et al., 2015). Hierbei ist besonders auf Art und Umfang der Informationen zu achten, da diese durchaus auch einen gegenteiligen Effekt auf die Akzeptanz haben können (Stadelmann-Steffen, 2019; Wiedemann et al., 2018).

5.3 Forschungsbedarf

5.3.1 Einfluss von Emotionen auf die Akzeptanz

Die wenigen Studien zur Risikowahrnehmung im Zusammenhang mit Stromleitungen liegen meist viele Jahre zurück und wurden fast ausschliesslich in den USA durchgeführt. Aus diesem Grund fehlt es weitgehend an Studien, die auf den neuesten Forschungserkenntnissen zu den Determinanten der Akzeptanz von Technologien basieren und neue methodologische Ansätze und Forschungsinstrumente verwendeten.

Risikokommunikationsstrategien fokussieren gewöhnlich auf die Informationsvermittlung. Emotionsbezogene Aspekte, die einen grossen Einfluss auf die Akzeptanz von Technologien ausüben, werden dabei oft vernachlässigt. Zukünftige Forschung sollte daher vermehrt den Fokus auf die Erforschung des Einflusses affektiver Elemente auf die Nutzen- und Risikowahrnehmung und die Akzeptanz von Stromleitungen legen sowie die Untersuchung der Faktoren, welche die Valenz und die Intensität der affektiven Reaktionen bestimmen, vorantreiben. Die Beurteilung der Nutzen und Risiken einer Technologie geht nicht auf einer rein kognitiven Ebene vonstatten, sondern hat auch eine affektive Komponente (Slovic et al., 2004). Kommunikationsmassnahmen, in welche diese affektive Ebene keinen Eingang findet, sind somit nicht von Erfolg gekrönt und wenig wirksam.

Die Berücksichtigung emotionaler Aspekte ist auch bei der Standortwahl entscheidend. Im Rahmen eines partizipatorischen Ansatzes ist der blosse Einbezug der lokalen Bevölkerung in den Planungs- und Entscheidungsprozess und die Darbietung von Informationsangeboten nicht ausreichend. Es bedarf auch einer genaueren Analyse der örtlichen und landschaftlichen Begebenheiten, um ein Verständnis darüber zu entwickeln, inwiefern diese zur emotionalen Verbundenheit mit dem Wohnort und zur ortsbezogenen Identität der lokalen Bevölkerung beitragen (Devine-Wright, 2009). Eine neuere

Studie zeigte, dass Umgebungen mit Hochspannungsleitungen negativere Gefühle auslösen als Umgebungen ohne Hochspannungsleitungen und dass dies vor allem dann der Fall ist, wenn es sich um stark positiv behaftete Umgebungen wie Naturlandschaften oder ländliche Umgebungen (z.B. Naherholungsgebiete) handelt (Lienert et al., 2017a). Bei urbanen Umgebungen (z.B. Industriegebiete) und semi-urbanen Umgebungen (z.B. semi-urbane Wohngebiete) hat die Präsenz von Hochspannungsleitungen eine deutlich weniger grosse negative emotionale Wirkung. Im Rahmen eines partizipatorischen Ansatzes kann entsprechend bei der Standortwahl und der Gestaltung der Netzinfrastruktur nach Möglichkeiten gesucht werden, die in Einklang mit der emotionalen Bindung an den Wohnort stehen – oder diese gar verstärken. Um diesen Prozess noch weiter zu optimieren und der emotionalen Bindung der lokalen Bevölkerung an den Wohnort Rechnung tragen zu können, bedarf es noch weiterer Forschung dazu, welche Aspekte die emotionale Bindung an den Ort umfasst und durch welche Faktoren sie beeinflusst wird.

Neben der lokalen Bindung sollte zudem ein erweiterter Fokus auf nationale und globale Empfindungen der Verbundenheit gelegt werden, da dieser in der bisherigen Forschung fast vollständig ausgeklammert wird (Batel, 2018; Devine-Wright & Batel, 2017). Die Studie von Devine-Wright & Batel 2017 (Devine-Wright & Batel, 2017) legt nahe, dass die Stärke einer lokalen, nationalen oder globalen Bindung zwischen Individuen variiert und je nach Zugehörigkeit die Akzeptanz von Energieinfrastrukturen und damit zusammenhängender Faktoren variieren kann. Eine vertiefende Analyse der Gemeinsamkeiten und Unterschiede hinsichtlich Wahrnehmung, Einstellung und Verhalten würde ein noch differenzierteres Verständnis von Akzeptanz und Ablehnung auf Individualebene ermöglichen.

5.3.2 Analyse der Bedenken bezüglich Gesundheitsrisiken

Obwohl es keinen wissenschaftlichen Nachweis dafür gibt, dass EMF von Stromleitungen gesundheitsschädigend sind, werden Stromleitungen von der Bevölkerung als Gesundheitsrisiko wahrgenommen. Dies ist auch in der Schweiz der Fall (Schreier et al., 2006a). Wie eine frühere Studie zu wahrgenommenen Gesundheitsrisiken von EMF zeigte, werden diese vor allem mit Krebs und Geburtsfehlern in Verbindung gebracht und korrektive Massnahmen (z.B. in Form weiterer Forschung, Abschirmungen, Warnhinweise, etc.) finden breite Unterstützung (MacGregor et al., 1994). Auch Elektrohypersensitivität, also die Wahrnehmung von Symptomen, die vermeintlich durch elektromagnetische Felder ausgelöst werden, stellt ein interessantes Phänomen in Zusammenhang mit Gesundheitsrisiken dar (Bellayer, 2021; Dieudonne, 2016, 2019; Marell et al., 2016).

(Szemerszky et al., 2016) haben eine Studie durchgeführt, in welcher nur Scheinexpositionen zum Einsatz kamen. Sie interpretierten die Resultate so, dass die Attribution von Symptomen keine (rein) emotionale, sondern eine rationale Begleiterscheinung von Technikwahrnehmung sein kann. In der neuesten Publikation zum Thema (Porsius et al., 2017) wurde untersucht, zu welchen Zeitpunkten im Prozess eines HSL-Projektes Anwohner Gesundheitsrisiken wie wahrnehmen. Die Autoren unterschieden 5 Gruppen. Die grösste waren mit 49% Personen, deren Risikowahrnehmung kaum oder nur schwach auf den Bau „reagierte“. Bei 9% fiel die Reaktion stark aus.

Ausgehend von der Tatsache, dass wahrgenommene Risiken für die Akzeptanz von Technologien entscheidender sind als tatsächliche Risiken und dass Gesundheitsbedenken der Hauptantriebsfaktor für den Widerstand gegen Stromleitungen sind, erscheint es sinnvoll, der Untersuchung der wahrgenommenen Gesundheitsrisiken in zukünftiger Forschung mehr Beachtung zu schenken. Einsichten darüber, mit welchen gesundheitlichen Einschränkungen die Bevölkerung Stromleitungen verbindet, ob diesbezüglich die Prävalenz in gewissen Gruppen als besonders hoch wahrgenommen wird und welche Prozesse zugrunde liegen, liefern wichtige Hinweise für die Optimierung der Informationsvermittlung und Kommunikation. Diese optimierte Kommunikation kann wiederum zur Minimierung der Gesundheitsbedenken und entsprechend zur Erhöhung der Akzeptanz von Stromleitungen beitragen.

5.3.3 Chancen und Risiken der Diskussion im Rahmen der Energiewende

Ein Grossteil der bisherigen Forschung im Zusammenhang mit der Akzeptanz von Energieinfrastrukturen war der Identifikation und dem Verständnis des Zusammenspiels verschiedener Einflussfaktoren gewidmet. In einem nächsten Schritt sollte nun vermehrt auch Gewicht auf die Entwicklung von Strategien zur Erhöhung der Akzeptanz und auf die Untersuchung von deren Wirksamkeit gelegt werden (Cohen et al., 2014). In Bezug auf Kommunikationsmassnahmen wäre die genauere Untersuchung der Chancen und Risiken der Diskussion um den Um- und Ausbau der Netzinfrastruktur im Rahmen der Energiewende von Interesse. Die Energiewende und die Förderung von erneuerbaren Energien findet in der Bevölkerung breite Unterstützung. Was den Um- und Ausbau des Stromnetzes anbelangt, wird von ihnen jedoch nicht automatisch eine Verbindung zur Energiewende hergestellt und entsprechend werden Stromleitungen und -masten nicht mit ihrem Nutzen im Hinblick auf die Förderungen von erneuerbaren Energien in Zusammenhang gebracht (Parkhill et al., 2013). Wie eine in der Schweiz durchgeführte Studie zeigte, ist die Nutzenwahrnehmung und die Akzeptanz des Um- und Ausbaus von Stromleitungen bei Personen, welche die Förderung von erneuerbaren Energien mit dem notwendigen Stromnetzumbau und -ausbau verbinden, höher als bei Personen, die keinerlei Zusammenhang sehen oder gar der Überzeugung sind, dass erneuerbare Energien weniger Stromleitungen und -masten erfordern (Lienert et al., 2015). Eine umfassende Informationsvermittlung und Diskussion im Rahmen der Energiewende birgt somit grosses Potenzial zur Erhöhung der Nutzenwahrnehmung und der Akzeptanz des Um- und Ausbaus der Netzinfrastruktur. Wie aus der Studie von (Lienert et al., 2015) hervorgeht, sind mit der Diskussion im Rahmen der Energiewende jedoch auch gewisse Herausforderungen und Risiken verbunden. Allfällige Missverständnisse bezüglich des Zusammenhangs zwischen der Förderung erneuerbarer Energien und dem Stromleitungsausbau und -umbau sind relativ stark verankert und bedürfen einer tiefergehenden und umfassenderen Informationsvermittlung und Erläuterung. Zudem deuten die Daten daraufhin, dass das Bewusstsein des Zusammenhangs zwischen der Förderung erneuerbarer Energien und dem erforderlichen Um- und Ausbau der Netzinfrastruktur mit einer tieferen Akzeptanz der Energiewende einhergehen kann.

Diese Fragestellungen bedürfen weiterer eingehenderer Analysen, denn aus ihnen gehen wichtige Implikationen für die Gestaltung einer adäquaten und wirksamen Informationsvermittlung und Kommunikation hervor.

5.3.4 Akzeptanz verschiedener Um- und Ausbauarten der Netzinfrastruktur

5.3.4.1 Neue Technologien

Im Hinblick auf den Umbau des Stromnetzes wird auch an neuen Technologien geforscht, welche die Kapazität der Stromleitungen erhöhen und somit die Effizienz der Übertragung steigern sollen. Diese Technologien sind nicht mit einer Vergrösserung der Strommasten verbunden und gehen somit auch mit keinen zusätzlichen visuellen Auswirkungen einher. Derartige innovative technologische Lösungen, die keine Vergrösserung der Strommasten erfordern, können durchaus zu einer höheren Akzeptanz in der Bevölkerung beitragen (Lienert et al., 2015). Inwiefern die Bevölkerung neue technologische Lösungen auch noch als eine valide Alternative betrachtet und akzeptiert, wenn alle allfälligen negativen Aspekte, die mit ihnen einhergehen könnten, bekannt und kommuniziert sind, bleibt jedoch abzuwarten und sollte Gegenstand zukünftiger sozialwissenschaftlicher Forschung sein. Ein weiteres wichtiges Thema in diesem Zusammenhang, bei dem die Sozialwissenschaften einen entscheidenden Beitrag leisten können, ist die adäquate Informationsvermittlung und die Gestaltung von angemessenen Kommunikationsstrategien zur Förderung des Verständnisses und der Akzeptanz neuer Technologien.

5.3.4.2 Unterirdische versus oberirdische Stromleitungen

Es gibt nur wenig sozialwissenschaftliche Forschung zur Akzeptanz der Netzinfrastruktur im Hinblick auf Elektrosmog und die existierenden Studien fokussieren fast ausschliesslich auf die überirdische Übertragung (Cotton & Devine-Wright, 2013), (Elliott & Wadley, 2012), (Poortinga et al., 2008). Das Verlegen der Stromleitungen in den Boden stösst in der Bevölkerung generell auf mehr Akzeptanz als überirdische Leitungen (Bertsch et al., 2017), (Devine-Wright et al., 2010), (Navrud et al., 2008). Dies liegt unter anderem darin begründet, dass mit unterirdischen Leitungen im Vergleich zu oberirdischen weniger negative Auswirkungen auf die Landschaft und die Umwelt verbunden werden (Bertsch et al., 2017), (Schweizer-Ries, 2010). Das Verlegen in den Boden kann jedoch auch substantielle Auswirkungen auf die Landschaft und die Natur sowie eine Änderung des Landschaftsbildes zur Folge haben (z.B. durch das Schaffen von sichtbaren waldfreien Korridoren in Waldgebieten), deren sich die Leute oft nicht bewusst sind (Schweiz, 2012). Bei der Akzeptanz von unterirdischen Stromleitungen spielen Gesundheitsüberlegungen eine zentrale Rolle (Bertsch et al., 2016). Im Falle von Erdkabeln werden die Gesundheitsrisiken ausgehend von EMF als signifikant kleiner wahrgenommen als bei überirdischen Leitungen (Schweizer-Ries, 2010). Eine wichtige Frage, die es in diesem Zusammenhang zu untersuchen gilt, ist zum Beispiel, ob diese Reduktion des wahrgenommenen Gesundheitsrisikos gegenüber den negativen Auswirkungen einer Erdverkabelung auf das Landschaftsbild und die Natur überwiegt. Wie eine Studie zeigt, führt die Darbietung von Informationen zu den Umwelt- und Gesundheitseinflüssen von unterirdischen Stromleitungen zu einer tieferen Akzeptanz von unterirdischen Leitungen (Lienert et al., 2017b). Im Vergleich zu oberirdischen Stromleitungen werden sie jedoch immer noch leicht positiver eingeschätzt.

6. Anhang Regulierung

6.1 Die schweizerische Verordnung NISV

Der Schutz gegenüber elektromagnetischen Feldern wird in der Schweiz in der "Verordnung über den Schutz vor nichtionisierender Strahlung" (NISV) geregelt. Die Verordnung legt die maximal zulässigen Feldstärken im Spektrum zwischen 0 Hz und 300 GHz fest. Der Bund setzte die Verordnung im Jahr 2000 in Kraft. Der Vollzug obliegt den kommunalen (Baubewilligungen innerhalb von Bauzonen) und den kantonalen Behörden (Baubewilligungen ausserhalb von Bauzonen). Seit Inkrafttreten bis zum Erscheinen des vorliegenden Berichtes sind keine grundsätzlichen Anpassungen der zulässigen Feldstärken im betrachten Frequenzraum 0 Hz bis 10 MHz vorgenommen worden. Wesentliche Anpassungen gab es 2019 und 2021 im Hochfrequenzbereich bei den Bestimmungen für Mobilfunksendeanlagen bezüglich des Einsatzes von adaptiven Antennen.

6.1.1 Geltungsbereich

Von der NISV werden alle sog. ortsfesten Anlagen die EMF abstrahlen erfasst. Dazu zählen niederfrequente Quellen (Eisenbahn, Hochspannungsleitungen, Trafostationen) und hochfrequente Sender bis 300 GHz (Radio, TV, und alle Funkdienste wie Betriebs- Amateur-, Militär-, Flug- oder Mobilfunk). Von der Verordnung nicht betroffen sind elektrische Haushaltsgeräte, Konsumgüter mit Funktechnologien, medizinische Verwendung von Medizinprodukten sowie Anlagen innerhalb von Betrieben und des Militärs soweit die Strahlung auf das Betriebspersonal bzw. auf Angehörige der Armee einwirkt. In der Mobiltelefonie werden Anlagen unter 6 W (ERP) Leistung, sog. Mikro- Pico- oder Femtozellen, sowie die Mobiltelefone bzw. Smartphones nicht erfasst. Bei Endgeräten gelten internationale technische Normen, die auch Vorschriften zur Begrenzung der Strahlenbelastung enthalten. Die Grenzwerte gelten für die allgemeine Bevölkerung und nicht für berufliche Expositionen, genauer: für Arbeitsplätze an denen starke elektromagnetische Felder zum Einsatz kommen oder vorhanden sind und wofür die Berufstätigen entsprechend geschult sind.

6.1.2 Schutz und Vorsorge

Die schweizerische Regelung in der NISV gehört zu den strengsten Vorschriften weltweit. Die sog. Immissionsgrenzwerte entsprechen den Empfehlungen der internationalen Strahlenschutzkommission (ICNIRP), die sog. Anlagegrenzwerte liegen deutlich unter diesen Limiten (sind also strenger). Die schweizerischen Anlagengrenzwerte wurden auf der Basis des schweizerischen Umweltschutzgesetzes verordnet. Dieses Gesetz verpflichtet zur vorsorglichen Emissionsbegrenzung u.a. dann, wenn ein Verdacht auf eine gesundheitliche Gefährdung besteht, selbst wenn diese Gefährdung wissenschaftlich nicht erwiesen ist. Die dabei verordneten Vorsorgemassnahmen müssen allerdings verhältnismässig sein, in der Formulierung des Umweltschutzgesetzes (USG Art. 11 Abs. 2): „Unabhängig von der bestehenden Umweltbelastung sind Emissionen im Rahmen der Vorsorge soweit zu begrenzen, als dies technisch und betrieblich möglich und wirtschaftlich tragbar ist“.

6.1.3 Immissionsgrenzwerte und Anlagegrenzwerte

6.1.3.1 Immissionsgrenzwerte

Das Gesetz will die Bevölkerung dauerhaft und wirksam vor gesundheitlichen Schäden schützen.

Massgebend für die Festlegung von Grenzwerten, welche diese Schutzfunktion (Gefahrenabwehr) erfüllen, sind die wissenschaftlich anerkannten gesundheitlichen Gefährdungen. Menschen sollen sich nie Strahlungsintensitäten aussetzen können, die zu solchen Gefährdungen führen können. Um das sicherzustellen, hat der Gesetzgeber die Grenzwerte – sie werden in der NISV „Immissionsgrenzwerte“ genannt – so festgelegt, dass sie deutlich unterhalb der bekannten Gefährdungszone(n) liegen. Die Immissionsgrenzwerte schützen wirksam und dauerhaft vor den wissenschaftlich bekannten Gesundheitsgefahren von EMF. Bei nicht-gepulsten Immissionen gilt im Bereich von 0 kHz bis 100 kHz der höchste Effektivwert als massgebend, im Bereich von 100 kHz bis 10 GHz der über 6 Minuten gemittelte Wert. Liegen Immissionen mit gleichzeitig mehreren Frequenzen vor, so gelten frequenzabhängige Summierungsvorschriften zur Addierung der Immissionen der einzelnen Frequenzen.

6.1.3.2 Anlagengrenzwerte

Das schweizerische Umweltschutzgesetz sieht nicht nur die Gefahrenabwehr vor, sondern auch die Vorsorge. Deshalb will der Gesetzgeber mit der NISV die Menschen auch vor Einwirkungen bewahren, die schädlich sein könnten. Es gibt vereinzelte wissenschaftliche Hinweise (die in Fachkreisen durchaus kontrovers diskutiert werden), dass auch schwache elektromagnetische Felder gesundheitlich negative Auswirkungen haben könnten. Sodann kann nach Meinung des Gesetzgebers die Wissenschaft gegenwärtig eine mögliche Langzeitgefährdung durch schwache EMF nicht zweifelsfrei ausschliessen. Aufgrund dieser Sachlage und Einschätzung verfügte der Bund eine vorsorgliche Emissionsbegrenzung. Dazu verordnete er „Anlagegrenzwerte“, die gezielt tiefer liegen, als es aufgrund der wissenschaftlich anerkannten Kenntnisse über Gesundheitsrisiken starker Strahlung notwendig wäre. Kriterium für Festsetzung der Anlagegrenzwerte ist also nicht das gesundheitliche Risiko sondern, ob die Werte technisch und betrieblich möglich sowie wirtschaftlich tragbar sind (Art 4, Abs 2, NISV).

6.1.3.3 Gültigkeit und Festlegung der Anlagegrenzwerte

Die Anlagegrenzwerte gelten für Orte, an denen sich Menschen regelmässig über längere Zeit aufhalten. Dazu gehören Wohnräume, Büros, Schulzimmer, Kinderspielplätze, Schulen oder Spitäler. Dort muss die Strahlenbelastung um Faktoren unterhalb der Immissionsgrenzwerte liegen (bei 50 Hz für die magnetische Flussdichte beispielsweise um einen Faktor 100). Die Anlagegrenzwerte sind damit wesentlich tiefer als die Immissionsgrenzwerte. Der Anlagegrenzwert für niederfrequente EMF gilt nur für Magnetfelder, nicht für elektrische Felder. Die Reduktionsfaktoren der Anlagengrenzwerte gegenüber den Immissionsgrenzwerten sind über politische Verfahren festgelegt worden (technische, betriebliche und wirtschaftliche Überlegungen). Aus Sicht einiger Umweltverbände sind diese Anlagegrenzwerte noch immer zu hoch, aus Sicht vieler Anlagenbetreiber sind sie unbegründet tief. Das zeigt, dass Grenzwerte – insbesondere vorsorgliche Grenzwerte, die wissenschaftlich weder "bewiesen" noch „entkräftet“ werden können – meist umstrittene Setzungen sind.

Sodann unterscheidet die NISV auch zwischen alten und neu erstellten bzw. zu erstellenden Anlagen. Neue Anlagen müssen alle Grenzwerte einhalten, für alte Anlagen bestehen Ausnahmeregelungen, jedenfalls solange diese Anlagen betrieblich unverändert genutzt werden. 2016 wurden die Bestimmungen in diesem Bereich aktualisiert. Demnach gelten zusätzlich Anlagen mit mehreren Leitungen als alt, wenn mindestens eine Leitung rechtskräftig bewilligt war. Zudem wurden die Vorrausetzungen angepasst und präzisiert, wann eine Änderung einer Anlage vorliegt. Geänderte alte Anlagen müssen grundsätzlich an Orten mit empfindlicher Nutzung den Anlagegrenzwert einhalten. Ausnahmen sind unter bestimmten Bedingungen möglich.

6.2 Internationale und nationale Grenzwerte

6.2.1 Die ICNIRP

Die internationale Strahlenschutzkommission ICNIRP (International Commission on Non-Ionizing Radiation Protection) ist ein unabhängiges Gremium, das wissenschaftlich fundierte Ratschläge zum Schutz von Mensch und der Umwelt vor schädlichen Auswirkungen nicht-ionisierender Strahlung (NIS) gibt (ICNIRP, 2022). Der Zuständigkeitsbereich der ICNIRP umfasst elektromagnetische Strahlung und Felder von weniger als drei Petahertz (PHz) bestehend aus statischen, extrem niederfrequenten und hochfrequenten Felder sowie Infrarot-, sichtbare und ultraviolette Strahlung, aber auch mechanische Wellen in Form von Infraschall (Frequenzen unter 20 Hz) und Ultraschall (Frequenzen über 20 kHz).

Die ICNIRP ist formell anerkannt als kooperatives und beratendes Gremium zum NIS-Schutz von der Weltgesundheitsorganisation (WHO), der Internationalen Arbeitsorganisation (ILO) und der Europäischen Union (EU). Das Hauptziel der ICNIRP ist die Förderung des NIS-Schutzes durch:

- Entwicklung von NIS-Schutzprinzipien auf wissenschaftlicher Grundlage;
- Bereitstellung unabhängiger wissenschaftlicher Leitlinien und Empfehlungen zum NIS-Schutz;
- Veröffentlichung von wissenschaftlichen Berichten über NIS und Gesundheit;
- Durchführung von wissenschaftlichen Seminaren und pädagogischen Workshops und Konferenzen;
- Information der wissenschaftlichen Gemeinschaft und der allgemeinen Öffentlichkeit über den Schutz vor NIS.

Eine Mehrheit der Länder weltweit orientiert sich an den ICNIRP Richtlinien für die Schutzvorgaben für NIS. Bei der Rechtsform von ICNIRP handelt es sich um ein in München eingetragener non-profit Verein mit gemäss Satzung wissenschaftlichem Auftrag. Die Mittel der ICNIRP stammen aus Zuwendungen von gemeinnützigen staatlichen und wissenschaftlichen Organisationen und Institutionen. Die Mitglieder der ICNIRP werden nicht für die Zeit bezahlt, die sie für die Aktivitäten der ICNIRP aufwenden.

6.2.2 Übersicht ICNIRP Richtlinien

Aktuell gelten folgende für diesen Bericht relevanten ICNIRP Richtlinien:

0 Hz statische Magnetfelder	Guidelines on Limits of Exposure to Static Magnetic Fields *(ICNIRP, 2009)*	2009
0 Hz statische elektrische Felder	Keine Vorgaben (Insgesamt hat die begrenzte Anzahl von Tier- und Humanstudien, die die Auswirkungen der Exposition gegenüber statischen elektrischen Feldern untersucht haben, keine Hinweise auf gesundheitsschädliche Auswirkungen ergeben.)	
1 Hz – 100 kHz Niederfrequente elektrische und magnetische Felder	Guidelines for Limiting Exposure to Time-Varying Electric and Magnetic Fields (1 Hz to 100 kHz) *(ICNIRP, 2010)*	2010
100 kHz – 300 GHz Hochfrequente elektromagnetische Felder	Guidelines for Limiting Exposure to Electromagnetic Fields (100 kHz to 300 GHz) *(ICNIRP, 2020)*	2020

6.2.3 Relevante Unterschiede zwischen der ICNIRP Richtlinie 2020 (100 kHz bis 300 GHz) und früheren Richtlinien

Die ICNIRP Richtlinie 2020 ist eine Aktualisierung der ICNIRP Richtlinie 1998 für hochfrequente elektromagnetische Felder sowie der ICNIRP Richtlinie 2010 für den Teil 100 kHz bis zu 10 MHz. Eine Änderung betrifft den Schutz des ungeborenen Kindes. Föten werden der Allgemeinbevölkerung zugerechnet. Entsprechend gelten für Schwangere bei beruflicher Exposition die Grenzwerte für die Allgemeinbevölkerung. Im Vergleich ist die aktualisierte Richtlinie komplexer, insbesondere weil bei den Referenzwerten Antennenregionen (Fernfeld, Übergangsregion, reaktives Nahfeld) berücksichtigt werden. Die im Zusammenhang mit diesem Bericht relevanteste Anpassung betrifft die Referenzwerte zwischen 100 kHz und 30 MHz. Aufgrund von neuen wissenschaftlichen Erkenntnissen wurden die Referenzwerte erhöht, welche zur Erreichung der unveränderten Basisgrenzwerte notwendig sind. Die Referenzwerte sind deshalb im besagten Bereich bei sinkender Frequenz erhöht worden, siehe Abbildung 26.

Zudem werden für Kontaktströme im Frequenzbereich 100 kHz – 110 MHz keine fixen Limiten mehr vorgesehen, sondern es wird sogenannte «Guidance» angeboten, also Hinweise, wie die in der Regel komplexen Situationen eingeschätzt werden sollen, um kritische Körperableitströme zu vermeiden. Ab ca. 50 mA können Erwachsene Ableitströme im oben erwähnten Frequenzbereich als schmerzhaft empfinden. Der Referenzwert für die allgemeine Bevölkerung wird bei 45 mA angesetzt. ICNIRP empfiehlt für Erwachsene (allgemeine Bevölkerung) maximale Ströme von 20 mA, für Kinder solche von 10 mA.

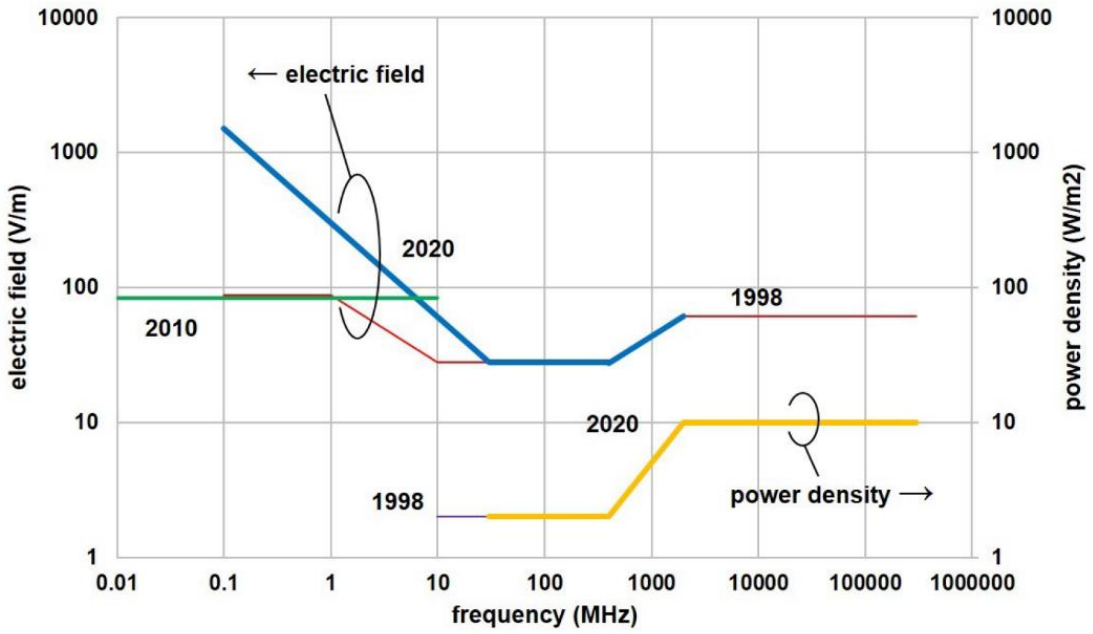


Abbildung 26: Vergleich der ICNIRP 1998, 2010 und 2020 Ganzkörper-Referenzwerte für die Allgemeinbevölkerung.

6.2.4 Grenzwerte für die Allgemeinbevölkerung

Die Grenzwerte für nicht-ionisierende Strahlung werden international und national in elektrischer (Volt pro Meter, V/m) und magnetischer (Ampère pro Meter, A/m) Feldstärke angegeben. Statt der magnetischen Feldstärke wird häufig die magnetische Flussdichte (Tesla, T) verwendet. Die zwei Grössen A/m und T lassen sich ineinander umrechnen. Da die biologische Wirkung eines Feldes gegebener Stärke frequenzabhängig ist, wird nicht ein einziger Grenzwert festgelegt, sondern je nach Frequenzbereich sind andere Limiten definiert. Sodann wird auch unterschieden zwischen Grenzwerten für Beschäftigte an besonders exponierten Arbeitsplätzen und Grenzwerten für die allgemeine Bevölkerung. Die NISV regelt die Grenzwerte für die allgemeine Bevölkerung.

6.2.5 Grenzwerte für berufliche Expositionen

Die Regelung für Berufstätige an besonders exponierten Arbeitsplätzen ist weniger streng als die Regelung für die allgemeine Bevölkerung. Berufstätige müssen entsprechende Schutzvorkehrungen einhalten und sind für einen umsichtigen Umgang mit EMF geschult worden. In der Regel sind die beruflichen Grenzwerte um einen Faktor 2–5 (je nach Frequenz) weniger restriktiv. Basierend auf der Verordnung über die Unfallverhütung hat die Schweizerische Unfallversicherung (SUVA) Richtlinien über maximale Arbeitsplatz-Konzentrationen (so genannte „MAK-Werte“) für EMF erlassen. Die Werte entsprechen den Empfehlungen der ICNIRP zum Schutz von beruflich strahlenexponierten Personen vor akuten schädlichen Einwirkungen.

6.3 Herleitung der niederfrequenten Grenzwerte

6.3.1 Induzierte elektrische Wirbelfelder

Zur Festlegung der Grenzwerte dienten bekannte biologische Wirkungen und gesundheitliche Schäden. Bei den niederen Frequenzen bis einige MHz sind v. a. die durch Magnetfelder verursachten elektrischen Wirbelfelder (Ringspannungen bzw. Stromdichten der Wirbelströme im Körperinnern) beachtet worden. Diese können die Nervensignale beeinflussen und (bei sehr starken Feldern) Muskeln zum Verkrampfen bringen. Im Falle eines Verkrampfens des Herzmuskels kann das zum Tod führen. Früher wurde die maximal zulässige Stromdichte, die durch niederfrequente Felder im Körperinnern induziert wird, beschränkt (auf 2 mA/m^2 für die allgemeine Bevölkerung). Seit 2010 wird von der ICNIRP nicht mehr die Stromdichte, sondern die im Körperinnern induzierte Spannung als Basis für die Grenzwertfestlegung genommen.

6.3.2 Basisgrenzwerte

Für die Stimulation von peripheren Nerven sind körperinterne elektrische Feldstärken von 4 V/m nötig, für die Stimulation des zentralen Nervensystems genügen im Falle des Sehnervs bereits 0.05 V/m. Beide Effekte sind gesundheitlich nicht bedrohlich, aber lästig. Damit diese Schwellen nicht überschritten werden, sind Sicherheitsfaktoren eingeführt worden. Für die Stimulation peripherer Nerven beträgt der Faktor für berufliche Expositionen 5, für die allgemeine Bevölkerung 10. Die Stimulation des Sehnervs wird für Berufstätige als zumutbar betrachtet (kein Sicherheitsfaktor), für die allgemeine Bevölkerung wird ein Faktor 5 empfohlen. Somit belaufen sich die maximal zulässigen internen elektrischen Feldstärken (sie werden „Basisgrenzwerte“ genannt) für die allgemeine Bevölkerung auf 0.4 V/m für periphere Nervenstimulation, auf 0.01 V/m für die Stimulation des zentralen Nervensystems.

6.3.3 Ableitung von Referenzwerten

Mit Modellrechnungen wurde bestimmt, wie gross die Feldstärke eines extern einstrahlenden Feldes bestimmter Frequenz sein darf, bis der zulässige Basisgrenzwert erreicht ist. Für Netzstrom von 50 Hz ergaben sich 5‘000 V/m (elektrische Feldstärke) bzw. 200 µT (magnetische Flussdichte) und für Bahnstrom von 16.7 Hz wurden 5‘000 V/m bzw. 300 µT errechnet und empfohlen. Diese Werte sind die „offiziellen Grenzwerte“ (die ICNIRP nennt sie „Referenzwerte“) welche in vielen Ländern gültig sind. In der Schweiz spricht man von Immissionsgrenzwerten. Die schweizerischen Immissionsgrenzwerte weichen allerdings geringfügig von diesen Empfehlungen ab, weil sie sich auf die Stromdichten und damit die früheren ICNIRP-Werte stützen (ICNIRP, 1998). Die Grenzwerte hierzulande betragen für 50 Hz-Felder 5‘000 V/m bzw. 100 µT, für 16.7 Hz-Felder (Bahnstrom) 10'000 V/m bzw. 300 µT. Zu erwähnen ist, dass die ICNIRP 2010 den Grenzwert für die magnetische Flussdichte bei 50 Hz auf 200 µT erhöht hat (ICNIRP, 2010). Die schärferen Anlagegrenzwerte wurden nur für Magnetfelder festgelegt und betragen für Netz- und Bahnstrom 1 µT.

Verantwortlichkeiten / Beiträge

Reinhold Bräunlich: Kapitel 2
Caroline Dalmus, Kapitel 5
Stefan Dongus, Kapitel 4, Literatur-Datenbank
Jürg Eberhard, Gesamtbericht, Kapitel 1 und 6
Giorgio Friedrich, Kapitel 2
Jürg Fröhlich, Kapitel 2, 3
Martin Röösli, Kapitel 3, 4
David Schürmann, Kapitel 4

Abbildungsverzeichnis

Abbildung 1: Typische Reichweite von magnetischen Feldern (adaptiert aus OTA, 1989 (OTA, 1989)) 15
Abbildung 2: Abklingverhalten der magnetischen Flussdichten bei unterschiedlichen Leiteranordnungen bzw. Starkstromeinrichtungen (Quelle: Autoren). 16
Abbildung 3: Definitionen der Netzebenen 1-7 (Quelle: Website VSE) 17
Abbildung 4: Räumliche Darstellung des Magnetfelds einer typischen 380kV-Leitung (Quelle: Website BAFU) 18
Abbildung 5: Beispiel eines Korridors für eine 220-kV-Hochspannungsleitungen im Mittelland, 220-kV-Korridor der BKW und Swissgrid. (Quelle: (Bürgi, 2011)). 18
Abbildung 6: Querprofile von B-Feldern von Freileitungen / Einleiterkabelsystem. Links: typische Leiteranordnungen bei verschiedenen Starkstromleitungen, Rechts: Querprofile des B-Feldeffektivwertes der linken Anordnung. 20
Abbildung 7: Frequenzen und maximale Feldstärken von EMF-Emissionen von Energieversorgungssystemen als transparent eingefärbte Säulen und Flächen: blau: elektrische Felder, rot: magnetische Felder, violett: elektromagnetische Emissionen. Eingezeichnet sind ausserdem die Grenzwerte der NISV und der EMV Norm, CISPR 18. (Quelle: Autoren) 24
Abbildung 8: harmonische Oberwellen: Spannungsharmonische der Phase L1 bis Ordnung 50 im Verhältnis zur Grundschwingung: blaue Balken; 95%-Quantil, rote Balken; 100%-Quantil, hellrote Balken; Planungspegel aus IEC/TR 61000-3-6, aus Bericht A16/101-2, FKH 2016 (Brügger & Bräunlich, 2016). 26
Abbildung 9: Störspektrum in unmittelbarer Nähe eines Bahnumformerwerkes, bei ausgeschaltetem-, und im Betrieb des Umrichters bei 40 MW, in Rot die Grenzwerte gemäss EN50121-2, aus Bericht A20/007, FKH 2020 (Friedli & Bräunlich, 2020). 27
Abbildung 10: Höchstwert der TF-Spannung (L-N) im Netz, aus D-A-CH-CZ, technische Regeln zur Beurteilung von Netzrückwirkungen, 2007 (3. Ausgabe von 2021: (VSE, 2021)) 28
Abbildung 11: Grundsätzliche Aufteilung der PLC-Frequenzbänder, gemäss CENELEC Norm EN 50065-1. 29
Abbildung 12: Im reflexionsfreien EMV-Labor gemessene Abstrahlung in 3 m Distanz von einem PLC-Modem (im standby mode), horiz. Polarisation, aus (Schneider et al., 2004). 31
Abbildung 13: E-Feld in Abhängigkeit der Distanz (Quelle: FSM, www.emf.ethz.ch) 33
Abbildung 14: Die Maximalwerte für die elektrische Feldstärke E und die magnetische Feldstärke H sind nach ICNIRP begrenzt. Zur drahtlosen Übertragung von Leistung kann pro Quadratmeter höchstens die Leistung E x H übertragen werden. Die Grafik zeigt den entsprechenden Verlauf der minimal nötigen Fläche zur Übertragung von 300 W in Funktion der Frequenz. 38
Abbildung 15: Immissionen von Haushaltsgeräten in drei Abstandskategorien; in µT (Quelle: (BUWAL, 2005); Seiten 31-33). 48
Abbildung 16.: Meta-Analyse für die Studien mit Entfernungskategorien (0-50, 50-100 und 100-200 m. Für jede Studie ist die Risikoschätzung, das 95%-Konfidenzintervall und die Gewichtung der Studie in der Analyse angegeben. Die "Zwischensumme" ist der Risikoschätzer mit Konfidenzintervall für alle Studien in dieser Kategorie. Der Faktor 'I-Quadrat' gibt einen Hinweis auf die Heterogenität der Daten: je höher der Prozentsatz, desto größer die Variation zwischen den Studien (Quelle: Figure 1 in Health Council of the Netherlands (2018a)). 70
Abbildung 17: Meta-Analyse der Studien zu magnetischer Feldstärke. Für jede Studie wurden die Risikoschätzung, das 95%ige Konfidenzintervall und das Gewicht der Studie in der Analyse angegeben. Die "Zwischensumme" ist der Risikoschätzer mit Konfidenzintervall für alle Studien in dieser Kategorie. Der Faktor 'I-Quadrat' gibt einen Hinweis auf die Heterogenität der der Daten: je

höher der Prozentsatz, desto größer die Variation zwischen den Studien (Quelle: Figure 4 in Health Council of the Netherlands (2018a)). 71
Abbildung 18: Sensitivitätsanalyse zur Meta-Analyse der Studien zu magnetischer Feldstärke. Eingeschlossen wurden nur Studien mit Expositionsabschätzung an allen Adressen zwischen (oder vor) Geburt und Diagnose. Für jede Studie wurden die Risikoschätzung, das 95%ige Konfidenzintervall und das Gewicht der Studie in der Analyse angegeben. Die "Zwischensumme" ist der Risikoschätzer mit Konfidenzintervall für alle Studien in dieser Kategorie. Der Faktor 'I-Quadrat' gibt einen Hinweis auf die Heterogenität der der Daten: je höher der Prozentsatz, desto größer die Variation zwischen den Studien (Quelle: Figure 5 in Health Council of the Netherlands (2018a)). 72
Abbildung 19: Risikoschätzer (korrigiert nach Geschlecht, Alter und sozioökonomischem Status) zu kindlicher Leukämie aus der gepoolten Analyse von (Kheifets, Ahlbom, Crespi, Draper, et al., 2010). Referenzniveau: < 0.1 µT. 76
Abbildung 20: Meta-Analyse kindliches Leukämierisiko mit festen Effekten aller Studien der gepoolten Analysen von Greenland et al. (2000) und Kheifets, Ahlbom, Crespi, Draper, et al. (2010) – zwei Studien ohne Kontrollen und zwei Studien ohne Fälle nicht gezeigt – sowie wichtiger neuerer Untersuchungen. 85
Abbildung 21: Meta-Analyse kindliches Leukämierisiko mit festen Effekten aller Studien der gepoolten Analysen von Greenland et al. (2000) und Kheifets, Ahlbom, Crespi, Draper, et al. (2010) ohne Bunch, Auger, Amoon. 86
Abbildung 22: Überblick über Studien zu Alzheimererkrankungen und beruflicher niederfrequenter Magnetfeldexposition, sortiert nach der Höhe der Exposition am Arbeitsplatz (Quelle: (Huss & Vermeulen, 2014), p. 193). 101
Abbildung 23: Vergleich der Schweizer, Dänischen und Italienischen Studienresultate zu Alzheimer Erkrankungen und Wohnort innerhalb von 50 Meter von einer Höchstspannungsleitung (>200 kV). 103
Abbildung 24: Überblick über Studien zu ALS und beruflichen Magnetfeldexpositionen (Quelle: Vergara et al. 2013, p. 140) (Vergara et al., 2013). 104
Abbildung 25: Meta-Analyse aller Studien zu häuslicher NF-MF Exposition und ALS (Quelle: (Filippini et al., 2021)) 106
Abbildung 26: Vergleich der ICNIRP 1998, 2010 und 2020 Ganzkörper-Referenzwerte für die Allgemeinbevölkerung. 151

Referenzen

Abhinav, K., Al-Chalabi, A., Hortobagyi, T., & Leigh, P. N. (2007). Electrical injury and amyotrophic lateral sclerosis: a systematic review of the literature. *J Neurol Neurosurg Psychiatry*, *78*(5), 450-453. https://doi.org/10.1136/jnnp.2006.104414

Adam, M., Rebholz, C. E., Egger, M., Zwahlen, M., & Kuehni, C. E. (2008). Childhood leukaemia and socioeconomic status: what is the evidence? *Radiat Prot Dosimetry*, *132*(2), 246-254. https://doi.org/10.1093/rpd/ncn261

Aderibole, A. O., Saathoff, E. K., Kircher, K. J., Leeb, S. B., & Norford, L. K. (2022). Power Line Communication for Low-Bandwidth Control and Sensing. *IEEE Transactions on Power Delivery*, *37*(3), 2172-2181. https://doi.org/10.1109/Tpwrd.2021.3106585

Adochiei, N. I., Dorffner, G., & David, V. (2012, 25-27 Oct. 2012). Heart rate variability monitoring due to 50 Hz electromagnetic field exposure and statistical processing. 2012 International Conference and Exposition on Electrical and Power Engineering (EPE,

Aerts, S., Calderon, C., Valic, B., Maslanyj, M., Addison, D., Mee, T., Goiceanu, C., Verloock, L., Van den Bossche, M., Gajsek, P., Vermeulen, R., Roosli, M., Cardis, E., Martens, L., & Joseph, W. (2017). Measurements of intermediate-frequency electric and magnetic fields in households. *Environ Res*, *154*, 160-170. https://doi.org/10.1016/j.envres.2017.01.001

Ahlbom, A., Day, N., Feychting, M., Roman, E., Skinner, J., Dockerty, J., Linet, M., McBride, M., Michaelis, J., Olsen, J. H., Tynes, T., & Verkasalo, P. K. (2000). A pooled analysis of magnetic fields and childhood leukaemia. *Br J Cancer*, *83*(5), 692-698. https://doi.org/10.1054/bjoc.2000.1376

Ahn, J., Hong, S. E., Kim, H., Chun, Y., Choi, H. D., Kim, K., Andres, B., Choi, J., & Ahn, S. (2020). Compliance Testing for Human Body Model Exposure to Electromagnetic Fields from a High-Power Wireless Charging System for Drones. *Radiation Protection Dosimetry*, *189*(1), 13-27. https://doi.org/10.1093/rpd/ncaa008

Akbarnejad, Z., Esmaeilpour, K., Shabani, M., Asadi-Shekaari, M., Saeedi Goraghani, M., & Ahmadi-Zeidabadi, M. (2018). Spatial memory recovery in Alzheimer's rat model by electromagnetic field exposure. *International Journal of Neuroscience*, *128*(8), 691-696. https://doi.org/10.1080/00207454.2017.1411353

Akdag, M. Z., Dasdag, S., Uzunlar, A. K., Ulukaya, E., Oral, A. Y., Celik, N., & Aksen, F. (2013). Can safe and long-term exposure to extremely low frequency (50 Hz) magnetic fields affect apoptosis, reproduction, and oxidative stress? *Int J Radiat Biol*, *89*(12), 1053-1060. https://doi.org/10.3109/09553002.2013.817705

Akhtar, M., Bhat, T., Tantray, M., Lafferty, C., Faisal, S., Teli, S., Bhat, H., Raza, M., Khalid, M., & Biekht, S. (2014). Electromagnetic interference with implantable cardioverter defibrillators causing inadvertent shock: case report and review of current literature. *Clin Med Insights Cardiol*, *8*, 63-66. https://doi.org/10.4137/cmc.s10990

Al-Akhras, M. A., Darmani, H., & Elbetieha, A. (2006). Influence of 50 Hz magnetic field on sex hormones and other fertility parameters of adult male rats. *Bioelectromagnetics*, *27*(2), 127-131. https://doi.org/10.1002/bem.20186

Alekperov, S. I., Suetov, A. A., Efremov, V. I., Kimstach, A. N., & Lavrenenok, L. V. (2019). The Effect of Electromagnetic Fields of Extremely Low Frequency 30 Hz on Rat Ovaries. *Bulletin of Experimental Biology and Medicine*, *166*(5), 704-707. https://doi.org/10.1007/s10517-019-04422-2

Alexander, D. D., Bailey, W. H., Perez, V., Mitchell, M. E., & Su, S. (2013). Air ions and respiratory function outcomes: a comprehensive review. *J Negat Results Biomed*, *12*, 14. https://doi.org/10.1186/1477-5751-12-14

Amendola, S., Palombi, A., & Marrocco, G. (2018). Inkjet Printing of Epidermal RFID Antennas by Self-Sintering Conductive Ink. *IEEE Transactions on Microwave Theory and Techniques*, *66*(3), 1561-1569. https://doi.org/10.1109/Tmtt.2017.2767594

Amoon, A. T., Arah, O. A., & Kheifets, L. (2019). The sensitivity of reported effects of EMF on childhood leukemia to uncontrolled confounding by residential mobility: a hybrid simulation study and an empirical analysis using CAPS data. *Cancer Causes Control*, *30*(8), 901-908.

https://doi.org/10.1007/s10552-019-01189-9
Amoon, A. T., Crespi, C. M., Ahlbom, A., Bhatnagar, M., Bray, I., Bunch, K. J., Clavel, J., Feychting, M., Hemon, D., Johansen, C., Kreis, C., Malagoli, C., Marquant, F., Pedersen, C., Raaschou-Nielsen, O., Roosli, M., Spycher, B. D., Sudan, M., Swanson, J., Tittarelli, A., Tuck, D. M., Tynes, T., Vergara, X., Vinceti, M., Wunsch-Filho, V., & Kheifets, L. (2018). Proximity to overhead power lines and childhood leukaemia: an international pooled analysis. *Br J Cancer*, *119*(3), 364-373. https://doi.org/10.1038/s41416-018-0097-7
Amoon, A. T., Crespi, C. M., Nguyen, A., Zhao, X., Vergara, X., Arah, O. A., & Kheifets, L. (2020). The role of dwelling type when estimating the effect of magnetic fields on childhood leukemia in the California Power Line Study (CAPS). *Cancer Causes Control*, *31*(6), 559-567. https://doi.org/10.1007/s10552-020-01299-9
Amoon, A. T., Oksuzyan, S., Crespi, C. M., Arah, O. A., Cockburn, M., Vergara, X., & Kheifets, L. (2018). Residential mobility and childhood leukemia. *Environ Res*, *164*, 459-466. https://doi.org/10.1016/j.envres.2018.03.016
Amoon, A. T., Swanson, J., Magnani, C., Johansen, C., & Kheifets, L. (2022). Pooled analysis of recent studies of magnetic fields and childhood leukemia. *Environ Res*, *204*(Pt A), 111993. https://doi.org/10.1016/j.envres.2021.111993
Amoon, A. T., Swanson, J., Vergara, X., & Kheifets, L. (2020). Relationship between distance to overhead power lines and calculated fields in two studies. *J Radiol Prot*, *40*(2), 431-443. https://doi.org/10.1088/1361-6498/ab7730
Andel, R., Crowe, M., Feychting, M., Pedersen, N. L., Fratiglioni, L., Johansson, B., & Gatz, M. (2010). Work-related exposure to extremely low-frequency magnetic fields and dementia: results from the population-based study of dementia in Swedish twins. *J Gerontol A Biol Sci Med Sci*, *65*(11), 1220-1227. https://doi.org/10.1093/gerona/glq112
Andrianome, S., De Seze, R., Braun, A., & Selmaoui, B. (2018). Descriptive self-reporting survey of people with idiopathic environmental intolerance attributed to electromagnetic fields (IEI-EMF): similarities and comparisons with previous studies. *Journal of Public Health-Heidelberg*, *26*(4), 461-473. https://doi.org/10.1007/s10389-017-0886-0
ANSES. (2018). *Hypersensibilité électromagnétique ou intolérance environnementale idiopathique attribuée aux champs électromagnétiques. Agence nationale de sécurité sanitaire de l'alimentation, de l'environnement et du travail (ANSES). Avis de l'Anses Rapport d'expertise collective. Mars 2018*. https://www.anses.fr/fr/content/hypersensibilit%C3%A9-aux-ondes-%C3%A9lectromagn%C3%A9tiques-amplifier-l%E2%80%99effort-de-recherche-et-adapter-la
Arduino, A., Bottauscio, O., Chiampi, M., Giaccone, L., Liorni, I., Kuster, N., Zilberti, L., & Zucca, M. (2020). Accuracy Assessment of Numerical Dosimetry for the Evaluation of Human Exposure to Electric Vehicle Inductive Charging Systems. *IEEE Transactions on Electromagnetic Compatibility*, *62*(5), 1939-1950. https://doi.org/10.1109/Temc.2019.2954111
ARIMMORA. (2015). *Advanced Research on Interaction Mechanisms of electroMagnetic exposures with Organisms for Risk Assessment* [Final Report: 4.1 Publishable summary].
Asadian, N., Jadidi, M., Safari, M., Jadidi, T., & Gholami, M. (2021). EMF frequency dependent differentiation of rat bone marrow mesenchymal stem cells to astrocyte cells. *Neuroscience Letters*, *744*, 135587. https://doi.org/10.1016/j.neulet.2020.135587
Auger, N., Arbour, L., Luo, W., Lee, G. E., Bilodeau-Bertrand, M., & Kosatsky, T. (2019). Maternal proximity to extremely low frequency electromagnetic fields and risk of birth defects. *Eur J Epidemiol*, *34*(7), 689-697. https://doi.org/10.1007/s10654-019-00518-1
Auger, N., Bilodeau-Bertrand, M., Marcoux, S., & Kosatsky, T. (2019). Residential exposure to electromagnetic fields during pregnancy and risk of child cancer: A longitudinal cohort study. *Environ Res*, *176*, 108524. https://doi.org/10.1016/j.envres.2019.108524
Auger, N., Park, A. L., Yacouba, S., Goneau, M., & Zayed, J. (2012). Stillbirth and residential proximity to extremely low frequency power transmission lines: a retrospective cohort study. *Occup Environ Med*, *69*(2), 147-149. https://doi.org/10.1136/oemed-2011-100031
Ayoobi, F., Shamsizadeh, A., & Shafiei, S. A. (2017). The effect of local extremely low frequency magnetic field on student sleepiness. *Neurol Res*, *39*(12), 1080-1085. https://doi.org/10.1080/01616412.2017.1380931

Azarova, V., Cohen, J., Friedl, C., & Reichl, J. (2019). Designing local renewable energy communities to increase social acceptance: Evidence from a choice experiment in Austria, Germany, Italy, and Switzerland. *Energy Policy*, *132*, 1176-1183. https://doi.org/10.1016/j.enpol.2019.06.067

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*(2), 63-73. https://doi.org/10.1007/s10877-008-9157-5

Baek, S., Choi, H., Park, H., Cho, B., Kim, S., & Kim, J. (2019). Effects of a hypomagnetic field on DNA methylation during the differentiation of embryonic stem cells. *Sci Rep*, *9*(1), 1333. https://doi.org/10.1038/s41598-018-37372-2

BAKOM. (2020). *Technische und administrative Vorschriften betreffend die leitungsgebundenen Fernmeldeanlagen mit PLC-Technologie (Powerline-Communication-Technologie). Anhang 5.1 zur Verordnung des Bundesamtes für Kommunikation vom 26. Mai 2016 über Fernmeldeanlagen (SR 784.101.21 / 5.1)*.

Baldi, I., Coureau, G., Jaffre, A., Gruber, A., Ducamp, S., Provost, D., Lebailly, P., Vital, A., Loiseau, H., & Salamon, R. (2011). Occupational and residential exposure to electromagnetic fields and risk of brain tumors in adults: a case-control study in Gironde, France. *Int J Cancer*, *129*(6), 1477-1484. https://doi.org/10.1002/ijc.25765

Baliatsas, C., Bolte, J., Yzermans, J., Kelfkens, G., Hooiveld, M., Lebret, E., & van Kamp, I. (2015). Actual and perceived exposure to electromagnetic fields and non-specific physical symptoms: an epidemiological study based on self-reported data and electronic medical records. *Int J Hyg Environ Health*, *218*(3), 331-344. https://doi.org/10.1016/j.ijheh.2015.02.001

Baliatsas, C., & Rubin, G. J. (2014). Electromagnetic Fields, Symptoms and Idiopathic Environmental Intolerance. In M. Roosli (Ed.), *Epidemiology of Electromagnetic Fields* (pp. 261-274). CRC Press.

Baliatsas, C., Van Kamp, I., Bolte, J., Schipper, M., Yzermans, J., & Lebret, E. (2012). Non-specific physical symptoms and electromagnetic field exposure in the general population: can we get more specific? A systematic review. *Environ Int*, *41*, 15-28. https://doi.org/10.1016/j.envint.2011.12.002

Baliatsas, C., van Kamp, I., Kelfkens, G., Schipper, M., Bolte, J., Yzermans, J., & Lebret, E. (2011). Non-specific physical symptoms in relation to actual and perceived proximity to mobile phone base stations and powerlines. *BMC Public Health*, *11*, 421. https://doi.org/10.1186/1471-2458-11-421

Baliatsas, C., Van Kamp, I., Lebret, E., & Rubin, G. J. (2012). Idiopathic environmental intolerance attributed to electromagnetic fields (IEI-EMF): a systematic review of identifying criteria. *BMC Public Health*, *12*, 643. https://doi.org/10.1186/1471-2458-12-643

Barnes, F., & Greenebaum, B. (2018). Role of radical pairs and feedback in weak radio frequency field effects on biological systems. *Environ Res*, *163*, 165-170. https://doi.org/10.1016/j.envres.2018.01.038

Barth, A., Ponocny, I., Ponocny-Seliger, E., Vana, N., & Winker, R. (2010). Effects of extremely low-frequency magnetic field exposure on cognitive functions: results of a meta-analysis. *Bioelectromagnetics*, *31*(3), 173-179. https://doi.org/10.1002/bem.20543

Bartley, H., Faasse, K., Horne, R., & Petrie, K. J. (2016). You Can't Always Get What You Want: The Influence of Choice on Nocebo and Placebo Responding. *Ann Behav Med*, *50*(3), 445-451. https://doi.org/10.1007/s12160-016-9772-1

Batel, S. (2018). A critical discussion of research on the social acceptance of renewable energy generation and associated infrastructures and an agenda for the future. *Journal of Environmental Policy & Planning*, *20*(3), 356-369. https://doi.org/10.1080/1523908x.2017.1417120

Batel, S. (2020). Research on the social acceptance of renewable energy technologies: Past, present and future. *Energy Research & Social Science*, *68*. https://doi.org/10.1016/j.erss.2020.101544

Batel, S., Devine-Wright, P., Wold, L., Egeland, H., Jacobsen, G., & Aas, O. (2015). The role of (de-)essentialisation within siting conflicts: An interdisciplinary approach. *Journal of Environmental Psychology*, *44*, 149-159. https://doi.org/http://dx.doi.org/10.1016/j.jenvp.2015.10.004

Bayat, P. D., Darabi, M. R., Ghanbari, A., Amiri, S., & Sohouli, P. (2012). Effects of prenatal exposure

to extremely low electro-magnetic field on in vivo derived blastocysts of mice. *Iran J Reprod Med*, *10*(6), 555-560. https://www.ncbi.nlm.nih.gov/pmc/articles/PMC4169849/pdf/ijrm-10-555.pdf

Behrens, T., Lynge, E., Cree, I., Sabroe, S., Lutz, J. M., Afonso, N., Eriksson, M., Guenel, P., Merletti, F., Morales-Suarez-Varela, M., Stengrevics, A., Fevotte, J., Llopis-Gonzalez, A., Gorini, G., Sharkova, G., Hardell, L., & Ahrens, W. (2010). Occupational exposure to electromagnetic fields and sex-differential risk of uveal melanoma. *Occup Environ Med*, *67*(11), 751-759. https://doi.org/10.1136/oem.2009.052225

Behrens, T., Terschuren, 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*(2), 144-153. https://doi.org/10.1038/sj.jea.7500305

Bellan, D., Spadacini, G., Fedeli, E., & Pignari, S. A. (2013). Space-Frequency Analysis and Experimental Measurement of Magnetic Field Emissions Radiated by High-Speed Railway Systems. *IEEE Transactions on Electromagnetic Compatibility*, *55*(6), 1031-1042. https://doi.org/10.1109/Temc.2013.2258150

Bellayer, J. (2021). The contagiousness of electro-hypersensitivity. *Annales Medico-Psychologiques*, *179*(9), 835-838. https://doi.org/10.1016/j.amp.2021.09.006

Bellieni, C. V., Tei, M., Iacoponi, F., Tataranno, M. L., Negro, S., Proietti, F., Longini, M., Perrone, S., & Buonocore, G. (2012). Is newborn melatonin production influenced by magnetic fields produced by incubators? *Early Hum Dev*, *88*(8), 707-710. https://doi.org/10.1016/j.earlhumdev.2012.02.015

Belyaev, I., Dean, A., Eger, H., Hubmann, G., Jandrisovits, R., Kern, M., Kundi, M., Moshammer, H., Lercher, P., Muller, K., Oberfeld, G., Ohnsorge, P., Pelzmann, P., Scheingraber, C., & Thill, R. (2016). EUROPAEM EMF Guideline 2016 for the prevention, diagnosis and treatment of EMF-related health problems and illnesses. *Rev Environ Health*, *31*(3), 363-397. https://doi.org/10.1515/reveh-2016-0011

Belyaev, I. Y., Hillert, L., Protopopova, M., Tamm, C., Malmgren, L. O., Persson, B. R., Selivanova, G., & Harms-Ringdahl, M. (2005). 915 MHz microwaves and 50 Hz magnetic field affect chromatin conformation and 53BP1 foci in human lymphocytes from hypersensitive and healthy persons. *Bioelectromagnetics*, *26*(3), 173-184. https://doi.org/10.1002/bem.20103

Benassi, B., Filomeni, G., Montagna, C., Merla, C., Lopresto, V., Pinto, R., Marino, C., & Consales, C. (2016a). Extremely Low Frequency Magnetic Field (ELF-MF) Exposure Sensitizes SH-SY5Y Cells to the Pro-Parkinson's Disease Toxin MPP(.). *Mol Neurobiol*, *53*(6), 4247-4260. https://doi.org/10.1007/s12035-015-9354-4

Benassi, B., Filomeni, G., Montagna, C., Merla, C., Lopresto, V., Pinto, R., Marino, C., & Consales, C. (2016b). Extremely low frequency magnetic field (ELF-MF) exposure sensitizes SH-SY5Y cells to the pro-Parkinson's disease toxin MPP+. *Mol Neurobiol*, *53*(6), 4247-4260. https://doi.org/10.1007/s12035-015-9354-4

Benassi, B., Santangeli, S., Merla, C., Tarantini, L., Bollati, V., Butera, A., Marino, C., & Consales, C. (2019). 50-Hz MF does not affect global DNA methylation of SH-SY5Y cells treated with the neurotoxin MPP. *Bioelectromagnetics*, *40*(1), 33-41. https://doi.org/10.1002/bem.22158

Beranger, R., Le Cornet, C., Schuz, J., & Fervers, B. (2013). Occupational and environmental exposures associated with testicular germ cell tumours: systematic review of prenatal and life-long exposures. *PLoS One*, *8*(10), e77130. https://doi.org/10.1371/journal.pone.0077130

Berlov, D. N., Baranova, T. I., Bisegna, F., Pavlova, L. P., Aladov, A. V., Zakgeim, A. L., Mizerov, M. N., & Chiligina, Y. A. (2015, 10-13 June 2015). Research perspectives of the influence of lighting modes on changes of human functional state by means of “smart lighting&#x201D. 2015 IEEE 15th International Conference on Environment and Electrical Engineering (EEEIC),

Bernabo, N., Tettamanti, E., Russo, V., Martelli, A., Turriani, M., Mattoli, M., & Barboni, B. (2010). Extremely low frequency electromagnetic field exposure affects fertilization outcome in swine animal model. *Theriogenology*, *73*(9), 1293-1305. https://doi.org/10.1016/j.theriogenology.2009.12.010

Bertagna, F., Lewis, R., Silva, S. R. P., McFadden, J., & Jeevaratnam, K. (2021). Effects of electromagnetic fields on neuronal ion channels: a systematic review [Review]. *Annals of the New York Academy of Sciences*, *1499*(1), 82-103. https://doi.org/10.1111/nyas.14597

Bertsch, V., Hall, M., Weinhardt, C., & Fichtner, W. (2016). Public acceptance and preferences related to renewable energy and grid expansion policy: Empirical insights for Germany. *Energy*, *114*, 465-477. https://doi.org/http://doi.org/10.1016/j.energy.2016.08.022

Bertsch, V., Hyland, M., & Mahony, M. (2017). What drives people's opinions of electricity infrastructure? Empirical evidence from Ireland. *Energy Policy*, *106*, 472-497. https://doi.org/http://doi.org/10.1016/j.enpol.2017.04.008

Bessou, J., Deschamps, F., Figueroa, L., & Cougnaud, D. (2013). Methods used to estimate residential exposure to 50 Hz magnetic fields from overhead power lines in an epidemiological study in France. *J Radiol Prot*, *33*(2), 349-365. https://doi.org/10.1088/0952-4746/33/2/349

Bianchi, N., Crosignani, P., Rovelli, A., Tittarelli, A., Carnelli, C. A., Rossitto, F., Vanelli, U., Porro, E., & Berrino, F. (2000). Overhead electricity power lines and childhood leukemia: a registry-based, case-control study. *Tumori*, *86*(3), 195-198.

Biesenack, H., George, G., Hofmann, G., & Schmieder, A. (Eds.). (2006). *Energieversorgung elektrischer Bahnen*. Vieweg+Teubner. https://link.springer.com/book/9783519062493.

Binboga, E., Tok, S., & Munzuroglu, M. (2021). The Short-Term Effect of Occupational Levels of 50 Hz Electromagnetic Field on Human Heart Rate Variability. *Bioelectromagnetics*, *42*(1), 60-75. https://doi.org/10.1002/bem.22308

Bioelectromagnetics. (2003). Reviews of Effects of RF Fields on Various Aspects of Human Health. *Bioelectromagnetics*(Supplement 6), S1-S214.

Bodewein, L., Schmiedchen, K., Dechent, D., Stunder, D., Graefrath, D., Winter, L., Kraus, T., & Driessen, S. (2019). Systematic review on the biological effects of electric, magnetic and electromagnetic fields in the intermediate frequency range (300 Hz to 1 MHz) [Review]. *Environ Res*, *171*, 247-259. https://doi.org/10.1016/j.envres.2019.01.015

Bolte, J. F., Baliatsas, C., Eikelboom, T., & van Kamp, I. (2015). Everyday exposure to power frequency magnetic fields and associations with non-specific physical symptoms. *Environ Pollut*, *196*, 224-229. https://doi.org/10.1016/j.envpol.2014.10.011

Boorman, G. A., McCormick, D. L., Findlay, J. C., Hailey, J. R., Gauger, J. R., Johnson, T. R., Kovatch, R. M., Sills, R. C., & Haseman, J. K. (1999). Chronic toxicity/oncogenicity evaluation of 60 Hz (power frequency) magnetic fields in F344/N rats. *Toxicologic pathology*, *27*(3), 267-278. https://doi.org/10.1177/019262339902700301

Boorman, G. A., Rafferty, C. N., Ward, J. M., & Sills, R. C. (2000). Leukemia and lymphoma incidence in rodents exposed to low-frequency magnetic fields. *Radiat Res*, *153*(5 Pt 2), 627-636. https://doi.org/10.1667/0033-7587(2000)153[0627:laliir]2.0.co;2

Borhani, N., Rajaei, F., Salehi, Z., & Javadi, A. (2011). Analysis of DNA fragmentation in mouse embryos exposed to an extremely low-frequency electromagnetic field. *Electromagn Biol Med*, *30*(4), 246-252. https://doi.org/10.3109/15368378.2011.589556

Bottauscio, O., Arduino, A., Bavastro, D., Capra, D., Guarneri, A., Parizia, A. A., & Zilberti, L. (2020). Exposure of Live-Line Workers to Magnetic Fields: A Dosimetric Analysis. *Int J Environ Res Public Health*, *17*(7). https://doi.org/10.3390/ijerph17072429

Bouisset, N., Villard, S., & Legros, A. (2020a). Human Postural Control Under High Levels of Extremely Low Frequency Magnetic Fields. *IEEE Access*, *8*, 101377-101385. https://doi.org/10.1109/Access.2020.2997643

Bouisset, N., Villard, S., & Legros, A. (2020b). Human Postural Responses to High Vestibular Specific Extremely Low-Frequency Magnetic Stimulations. *IEEE Access*, *8*, 165387-165395. https://doi.org/10.1109/Access.2020.3022554

Bowman, J. (2014). Exposures to ELF-EMF. In M. Roosli (Ed.), *Epidemiology of Electromagnetic Fields* (pp. 93-124). CRC Press.

Bowman, J. D., Touchstone, J. A., & Yost, M. G. (2007). A population-based job exposure matrix for power-frequency magnetic fields. *J Occup Environ Hyg*, *4*(9), 715-728. https://doi.org/10.1080/15459620701528001

Boyuan, Z., Leskarac, D., Junwei, L., & Wishart, M. (2016, 17-21 May 2016). Electromagnetic

interference investigation of solar PV system for microgrid structure. 2016 Asia-Pacific International Symposium on Electromagnetic Compatibility (APEMC),

Bräunlich, G., & Bräunlich, R. (2009). Worst Case Evaluation of Magnetic Field in the vicinity of Electric Power Substations. *2009 20th International Zurich Symposium on Electromagnetic Compatibility*, 349-+. <Go to ISI>://WOS:000266630300088

Bräunlich, R. (2014). Streuströme in landwirtschaftlichen Teirhaltungsbetrieben. *VSE Bulletin*(3), 3.

Bräunlich, R., & Biasiutti, G. (1992). *ETG - Kabelseminar für Spannungen ≥ 20 kV - Elektromagnetische Felder von Kabelanlagen*.

Brech, A., Kubinyi, G., Németh, Z., Bakos, J., Fiocchi, S., & Thuróczy, G. (2019). Genotoxic effects of intermediate frequency magnetic fields on blood leukocytes in vitro. *Mutation Research - Genetic Toxicology and Environmental Mutagenesis*, *845*, 403060. https://doi.org/10.1016/j.mrgentox.2019.05.016

Brouwer, M., Koeman, T., van den Brandt, P. A., Kromhout, H., Schouten, L. J., Peters, S., Huss, A., & Vermeulen, R. (2015). Occupational exposures and Parkinson's disease mortality in a prospective Dutch cohort. *Occup Environ Med*, *72*(6), 448-455. https://doi.org/10.1136/oemed-2014-102209

Brügger, T., & Bräunlich, R. (2016). *Spannungsqualitäts-Messung im 380kV Netz, FKH-Bericht, A16/101-2.* FKH.

Bua, L., Tibaldi, E., Falcioni, L., Lauriola, M., De Angelis, L., Gnudi, F., Manservigi, M., Manservisi, F., Manzoli, I., Menghetti, I., Montella, R., Panzacchi, S., Sgargi, D., Strollo, V., Vornoli, A., Mandrioli, D., & Belpoggi, F. (2018). Results of lifespan exposure to continuous and intermittent extremely low frequency electromagnetic fields (ELFEMF) administered alone to Sprague Dawley rats. *Environ Res*, *164*, 271-279. https://doi.org/10.1016/j.envres.2018.02.036

Buccella, C., & Feliziani, M. (2003). Three dimensional magnetic field computation inside a high speed train with A.C. electrification. IEEE International Symposium on Electromagnetic Compatibility EMC '03, Istanbul, Turkey.

Budziosz, J., Stanek, A., Sieroń, A., Witkoś, J., Cholewka, A., & Sieroń, K. (2018). Effects of Low-Frequency Electromagnetic Field on Oxidative Stress in Selected Structures of the Central Nervous System. *Oxidative Medicine and Cellular Longevity*, *2018*, 1427412. https://doi.org/10.1155/2018/1427412

Bunch, K. J., Keegan, T. J., Swanson, J., Vincent, T. J., & Murphy, M. F. (2014). Residential distance at birth from overhead high-voltage powerlines: childhood cancer risk in Britain 1962-2008. *Br J Cancer*, *110*(5), 1402-1408. https://doi.org/10.1038/bjc.2014.15

Bunch, K. J., Swanson, J., Vincent, T. J., & Murphy, M. F. (2015). Magnetic fields and childhood cancer: an epidemiological investigation of the effects of high-voltage underground cables. *J Radiol Prot*, *35*(3), 695-705. https://doi.org/10.1088/0952-4746/35/3/695

Bunch, K. J., Swanson, J., Vincent, T. J., & Murphy, M. F. (2016). Epidemiological study of power lines and childhood cancer in the UK: further analyses. *J Radiol Prot*, *36*(3), 437-455. https://doi.org/10.1088/0952-4746/36/3/437

Bundesrat. (2013). *Strategie Stromnetze; Detailkonzept im Rahmen der Energiestrategie 2050*.

Burcu, A., Nevin, E., Ilkay, A., Amac, K., Alper, B. H., & Muge, K. (2020). The effects of prenatal and postnatal exposure to electromagnetic field on rat ovarian tissue. *Toxicol Ind Health*, *36*(12), 1010-1018. https://doi.org/10.1177/0748233720973136

Bürgi, A. (2011). *Immissionskataster für Niederfrequente Magnetfelder von Hochspannungsleitungen - Machbarkeits- und Pilotstudie*.

BUWAL. (2005). *Elektrosmog in der Umwelt*.

Cain, N. L., & Nelson, H. T. (2013). What drives opposition to high-voltage transmission lines? *Land Use Policy*, *33*, 204-213. https://doi.org/10.1016/j.landusepol.2013.01.003

Calderon, C., Castano-Vinyals, G., Maslanyj, M., Wiart, J., Lee, A. K., Taki, M., Wake, K., Abert, A., Badia, F., Hadjem, A., Kromhout, H., de Llobet, P., Varsier, N., Conil, E., Choi, H. D., Sim, M. R., & Cardis, E. (2022). Estimation of RF and ELF dose by anatomical location in the brain from wireless phones in the MOBI-Kids study. *Environ Int*, *163*, 107189. https://doi.org/10.1016/j.envint.2022.107189

Calvente, I., Davila-Arias, C., Ocon-Hernandez, O., Perez-Lobato, R., Ramos, R., Artacho-Cordon, F., Olea, N., Nunez, M. I., & Fernandez, M. F. (2014). Characterization of indoor extremely low frequency and low frequency electromagnetic fields in the INMA-Granada cohort. *PLoS One*, *9*(9), e106666. https://doi.org/10.1371/journal.pone.0106666

Campi, T., Cruciani, S., Maradei, F., & Feliziani, M. (2019). Magnetic Field during Wireless Charging in an Electric Vehicle According to Standard SAE J2954. *Energies*, *12*(9). https://doi.org/10.3390/en12091795

Campi, T., Cruciani, S., Palandrani, F., Santis, V. D., Hirata, A., & Feliziani, M. (2016a). Wireless Power Transfer Charging System for AIMDs and Pacemakers. *IEEE Transactions on Microwave Theory and Techniques*, *64*(2), 633-642. https://doi.org/10.1109/TMTT.2015.2511011

Campi, T., Cruciani, S., Santis, V. D., & Feliziani, M. (2016b, 5-9 Sept. 2016). Immunity of a pacemaker with a Wireless Power Transfer coil. 2016 International Symposium on Electromagnetic Compatibility - EMC EUROPE,

Campi, T., Cruciani, S., Santis, V. D., & Feliziani, M. (2016c). EMF Safety and Thermal Aspects in a Pacemaker Equipped With a Wireless Power Transfer System Working at Low Frequency. *IEEE Transactions on Microwave Theory and Techniques*, *64*(2), 375-382. https://doi.org/10.1109/TMTT.2015.2514087

Campos-Sanchez, E., Vicente-Dueñas, C., Rodríguez-Hernández, G., Capstick, M., Kuster, N., Dasenbrock, C., Sánchez-García, I., & Cobaleda, C. (2019). Novel ETV6-RUNX1 Mouse Model to Study the Role of ELF-MF in Childhood B-Acute Lymphoblastic Leukemia: a Pilot Study. *Bioelectromagnetics*, *40*(5), 343-353. https://doi.org/10.1002/bem.22193

Cangemi, G., Cataliotti, A., Cipriani, G., Cosentino, V., Di Dio, V., Nuccio, S., Di Cara, D., Tinè, G., & Melodia, M. (2015). Experimental EMF characterization of a secondary substation AEIT International Annual Conference (AEIT), Naples, Italy.

Carlberg, M., Koppel, T., Ahonen, M., & Hardell, L. (2017). Case-control study on occupational exposure to extremely low-frequency electromagnetic fields and glioma risk. *Am J Ind Med*, *60*(5), 494-503. https://doi.org/10.1002/ajim.22707

Carlberg, M., Koppel, T., Ahonen, M., & Hardell, L. (2018). Case-Control Study on Occupational Exposure to Extremely Low-Frequency Electromagnetic Fields and the Association with Meningioma. *Biomed Res Int*, *2018*, 5912394. https://doi.org/10.1155/2018/5912394

Carlberg, M., Koppel, T., Ahonen, M., & Hardell, L. (2020). Case-control study on occupational exposure to extremely low-frequency electromagnetic fields and the association with acoustic neuroma. *Environ Res*, *187*, 109621. https://doi.org/10.1016/j.envres.2020.109621

Carles, C., Esquirol, Y., Turuban, M., Piel, C., Migault, L., Pouchieu, C., Bouvier, G., Fabbro-Peray, P., Lebailly, P., & Baldi, I. (2020). Residential proximity to power lines and risk of brain tumor in the general population. *Environ Res*, *185*, 109473. https://doi.org/10.1016/j.envres.2020.109473

Carpenter, D. O. (2019). Extremely low frequency electromagnetic fields and cancer: How source of funding affects results. *Environ Res*, *178*. https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.envres.2019.108688

Castano-Vinyals, G., Sadetzki, S., Vermeulen, R., Momoli, F., Kundi, M., Merletti, F., Maslanyj, M., Calderon, C., Wiart, J., Lee, A. K., Taki, M., Sim, M., Armstrong, B., Benke, G., Schattner, R., Hutter, H. P., Krewski, D., Mohipp, C., Ritvo, P., Spinelli, J., Lacour, B., Remen, T., Radon, K., Weinmann, T., Petridou, E. T., Moschovi, M., Pourtsidis, A., Oikonomou, K., Kanavidis, P., Bouka, E., Dikshit, R., Nagrani, R., Chetrit, A., Bruchim, R., Maule, M., Migliore, E., Filippini, G., Miligi, L., Mattioli, S., Kojimahara, N., Yamaguchi, N., Ha, M., Choi, K., Kromhout, H., Goedhart, G., t Mannetje, A., Eng, A., Langer, C. E., Alguacil, J., Aragones, N., Morales-Suarez-Varela, M., Badia, F., Albert, A., Carretero, G., & Cardis, E. (2022). Wireless phone use in childhood and adolescence and neuroepithelial brain tumours: Results from the international MOBI-Kids study. *Environ Int*, *160*, 107069. https://doi.org/10.1016/j.envint.2021.107069

Chan, K. H., Hattori, J., Laakso, I., Hirata, A., & Taki, M. (2013). Computational dosimetry for grounded and ungrounded human models due to contact current. *Phys Med Biol*, *58*(15),

5153-5172. https://doi.org/10.1088/0031-9155/58/15/5153
Chan, K. H., Ohta, S., Laakso, I., Hirata, A., Suzuki, Y., & Kavet, R. (2015). Computational dosimetry for child and adult human models due to contact current from 10 Hz to 110 MHz. *Radiat Prot Dosimetry*, *167*(4), 642-652. https://doi.org/10.1093/rpd/ncu322
Chen, C., Ma, X., Zhong, M., & Yu, Z. (2010). Extremely low-frequency electromagnetic fields exposure and female breast cancer risk: a meta-analysis based on 24,338 cases and 60,628 controls. *Breast Cancer Res Treat*, *123*(2), 569-576. https://doi.org/10.1007/s10549-010-0782-6
Chen, G. X., t Mannetje, A. M., Douwes, J., van den Berg, L., Pearce, N., Kromhout, H., D'Souza, W., McConnell, M., Glass, B., Brewer, N., & McLean, D. J. (2019). Occupation and motor neuron disease: a New Zealand case-control study. *Occup Environ Med*, *76*(5), 309-316. https://doi.org/10.1136/oemed-2018-105605
Chen, J. S., Tsai, L. K., Yeh, T. Y., Li, T. S., Li, C. H., Wei, Z. H., Lo, N. W., & Ju, J. C. (2021). Effects of electromagnetic waves on oocyte maturation and embryonic development in pigs. *The Journal of Reproduction and Development*, *67*(6), 392-401. https://doi.org/10.1262/jrd.2021-074
Chiaramello, E., Plets, D., Fiocchi, S., Bonato, M., Tognola, G., Parazzini, M., Le Brusquet, L., Martens, L., Joseph, W., & Ravazzani, P. (2021). Innovative Stochastic Modeling of Residential Exposure to Radio Frequency Electromagnetic Field Sources. *Ieee Journal of Electromagnetics Rf and Microwaves in Medicine and Biology*, *5*(1), 62-69. https://doi.org/10.1109/Jerm.2020.2994560
Chiu, R. S., & Stuchly, M. A. (2005). Electric fields in bone marrow substructures at power-line frequencies. *IEEE Trans Biomed Eng*, *52*(6), 1103-1109. https://doi.org/10.1109/tbme.2005.846712
Choi, S., Cha, W., Park, J., Kim, S., Kim, W., Yoon, C., Park, J. H., Ha, K., & Park, D. (2018). Extremely Low Frequency-Magnetic Field (ELF-MF) Exposure Characteristics among Semiconductor Workers. *Int J Environ Res Public Health*, *15*(4). https://doi.org/10.3390/ijerph15040642
Choi, S., Kim, S., Bae, S., Kim, W., Park, J. H., Chung, E., Park, J., & Park, D. U. (2019). Characterization of Levels of Extremely Low Frequency Magnetic Fields Emitted From Portable Hand-Held Fans. *Bioelectromagnetics*, *40*(8), 569-577. https://doi.org/10.1002/bem.22210
Christopoulou, M., & Karabetsos, E. (2019). Evaluation of Radiofrequency and Extremely Low-Frequency Field Levels at Children's Playground Sites in Greece From 2013 to 2018. *Bioelectromagnetics*, *40*(8), 602-605. https://doi.org/10.1002/bem.22220
Cimala, C., Clemens, M., Streckert, J., & Schmuelling, B. (2016, 13-16 Nov. 2016). Simulation of inductive power transfer systems exposing a human body with a coupled scaled-frequency approach. 2016 IEEE Conference on Electromagnetic Field Computation (CEFC),
Cimala, C., Zang, M., Clemens, M., Feng, J., Schm, B., x00Fc, lling, & Streckert, J. (2015, 7-11 Sept. 2015). Numerical schemes for high-resolution dosimetry simulations of automotive low frequency Inductive Power Transfer systems. Electromagnetics in Advanced Applications (ICEAA), 2015 International Conference on,
Cirimele, V., Diana, M., Freschi, F., & Mitolo, M. (2018). Inductive Power Transfer for Automotive Applications: State-of-the-Art and Future Trends. *Ieee Transactions on Industry Applications*, *54*(5), 4069-4079. https://doi.org/10.1109/Tia.2018.2836098
Claassen, L., Bostrom, A., & Timmermans, D. R. M. (2016). Focal points for improving communications about electromagnetic fields and health: A mental models approach. *Journal of Risk Research*, *19*(2), 246-269.
Claassen, L., van Dongen, D., & Timmermans, D. R. M. (2015). Improving lay understanding of exposure to electromagnetic fields; the effect of information on perception of and responses to risk. *Journal of Risk Research*, 1-17. https://doi.org/10.1080/13669877.2015.1031268
Coble, J. B., Dosemeci, M., Stewart, P. A., Blair, A., Bowman, J., Fine, H. A., Shapiro, W. R., Selker, R. G., Loeffler, J. S., Black, P. M., Linet, M. S., & Inskip, P. D. (2009). Occupational exposure to magnetic fields and the risk of brain tumors. *Neuro Oncol*, *11*(3), 242-249.

https://doi.org/10.1215/15228517-2009-002
Cocco, P., Figgs, L., Dosemeci, M., Hayes, R., Linet, M. S., & Hsing, A. W. (1998). Case-control study of occupational exposures and male breast cancer. *Occup Environ Med*, *55*(9), 599-604. https://oem.bmj.com/content/oemed/55/9/599.full.pdf
Cohen, J. J., Reichl, J., & Schmidthaler, M. (2014). Re-focussing research efforts on the public acceptance of energy infrastructure: A critical review. *Energy*, *76*(0), 4-9. - http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0360544213011262
Concha, P. M.-T., Velez, P., Lafoz, M., & Arribas, J. R. (2016). Passenger Exposure to Magnetic Fields due to the Batteries of an Electric Vehicle. *IEEE Transactions on Vehicular Technology*, *65*(6), 4564-4571. https://doi.org/10.1109/TVT.2015.2490105
Consales, C., Cirotti, C., Filomeni, G., Panatta, M., Butera, A., Merla, C., Lopresto, V., Pinto, R., Marino, C., & Benassi, B. (2018). Fifty-Hertz Magnetic Field Affects the Epigenetic Modulation of the miR-34b/c in Neuronal Cells. *Mol Neurobiol*, *55*(7), 5698-5714. https://doi.org/10.1007/s12035-017-0791-0
Consales, C., Merla, C., Marino, C., & Benassi, B. (2012a). Electromagnetic fields, oxidative stress, and neurodegeneration. *Int J Cell Biol*, *2012*, 683897. https://doi.org/10.1155/2012/683897
Consales, C., Merla, C., Marino, C., & Benassi, B. (2012b). Electromagnetic fields, oxidative stress, and neurodegeneration [Review]. *Int J Cell Biol*, 683897. https://doi.org/10.1155/2012/683897
Consales, C., Merla, C., Marino, C., & Benassi, B. (2018). The epigenetic component of the brain response to electromagnetic stimulation in Parkinson's Disease patients: A literature overview [Review]. *Bioelectromagnetics*, *39*(1), 3-14. https://doi.org/10.1002/bem.22083
Consales, C., Panatta, M., Butera, A., Filomeni, G., Merla, C., Carrì, M. T., Marino, C., & Benassi, B. (2019). 50-Hz magnetic field impairs the expression of iron-related genes in the in vitro SOD1G93A model of amyotrophic lateral sclerosis. *Int J Radiat Biol*, *95*(3), 368-377. https://doi.org/10.1080/09553002.2019.1552378
Cook, C. M., Saucier, D. M., Thomas, A. W., & Prato, F. S. (2006). Exposure to ELF magnetic and ELF-modulated radiofrequency fields: the time course of physiological and cognitive effects observed in recent studies (2001-2005). *Bioelectromagnetics*, *27*(8), 613-627. https://doi.org/10.1002/bem.20247
Cook, C. M., Saucier, D. M., Thomas, A. W., & Prato, F. S. (2009). Changes in human EEG alpha activity following exposure to two different pulsed magnetic field sequences. *Bioelectromagnetics*, *30*(1), 9-20. https://doi.org/10.1002/bem.20434
Cook, C. M., Thomas, A. W., Keenliside, L., & Prato, F. S. (2005). Resting EEG effects during exposure to a pulsed ELF magnetic field. *Bioelectromagnetics*, *26*(5), 367-376. https://doi.org/10.1002/bem.20113
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*(2), 144-157. https://onlinelibrary.wiley.com/doi/pdfdirect/10.1002/bem.107?download=true
Cook, C. M., Thomas, A. W., & Prato, F. S. (2004). Resting EEG is affected by exposure to a pulsed ELF magnetic field. *Bioelectromagnetics*, *25*(3), 196-203. https://doi.org/10.1002/bem.10188
Corbacio, M., Brown, S., Dubois, S., Goulet, D., Prato, F. S., Thomas, A. W., & Legros, A. (2011). Human cognitive performance in a 3 mT power-line frequency magnetic field. *Bioelectromagnetics*, *32*(8), 620-633. https://doi.org/10.1002/bem.20676
Cotton, M., & Devine-Wright, P. (2013). Putting pylons into place: A UK case study of public perspectives on the impacts of high voltage overhead transmission lines. *Journal of Environmental Planning and Management*, *56*(8), 1225-1245.
Crasson, M. (2003). 50-60 Hz electric and magnetic field effects on cognitive function in humans: a review. *Radiat Prot Dosimetry*, *106*(4), 333-340.
Crespi, C. M., Swanson, J., Vergara, X. P., & Kheifets, L. (2019). Childhood leukemia risk in the California Power Line Study: Magnetic fields versus distance from power lines. *Environ Res*, *171*, 530-535. https://doi.org/10.1016/j.envres.2019.01.022
Crespi, C. M., Vergara, X. P., Hooper, C., Oksuzyan, S., Wu, S., Cockburn, M., & Kheifets, L. (2016). Childhood leukaemia and distance from power lines in California: a population-based case-

control study. *Br J Cancer*, *115*(1), 122-128. https://doi.org/10.1038/bjc.2016.142
Curcio, G., Piccardi, L., Ferlazzo, F., Giannini, A. M., Burattini, C., & Bisegna, F. (2016, 7-10 June 2016). LED lighting effect on sleep, sleepiness, mood and vigor. 2016 IEEE 16th International Conference on Environment and Electrical Engineering (EEEIC),
Cvetkovic, D., & Cosic, I. (2009). Alterations of human electroencephalographic activity caused by multiple extremely low frequency magnetic field exposures. *Med Biol Eng Comput*, *47*(10), 1063-1073. https://doi.org/10.1007/s11517-009-0525-1
Cvetkovic, D., Jovanov, E., & Cosic, I. (2006). *Alterations in human EEG activity caused by extremely low frequency electromagnetic fields* IEEE Eng Med Biol Soc, https://ieeexplore.ieee.org/stampPDF/getPDF.jsp?tp=&arnumber=4462479&ref=
D'Angelo, C., Costantini, E., Kamal, M. A., & Reale, M. (2015). Experimental model for ELF-EMF exposure: Concern for human health. *Saudi J Biol Sci*, *22*(1), 75-84. https://doi.org/10.1016/j.sjbs.2014.07.006
Davanipour, Z., Tseng, C. C., Lee, P. J., Markides, K. S., & Sobel, E. (2014). Severe Cognitive Dysfunction and Occupational Extremely Low Frequency Magnetic Field Exposure among Elderly Mexican Americans. *Br J Med Med Res*, *4*(8), 1641-1662. https://doi.org/10.9734/bjmmr/2014/7317
Davanipour, Z., Tseng, C. C., Lee, P. J., & Sobel, E. (2007). A case-control study of occupational magnetic field exposure and Alzheimer's disease: results from the California Alzheimer's Disease Diagnosis and Treatment Centers. *BMC Neurol*, *7*, 13. https://doi.org/10.1186/1471-2377-7-13
Davarpanah Jazi, S., Modolo, J., Baker, C., Villard, S., & Legros, A. (2017). Effects of A 60 Hz Magnetic Field of Up to 50 milliTesla on Human Tremor and EEG: A Pilot Study. *Int J Environ Res Public Health*, *14*(12). https://doi.org/10.3390/ijerph14121446
Dawson, T. W., Caputa, K., & Stuchly, M. A. (2002). Magnetic field exposures for UK live-line workers. *Phys Med Biol*, *47*(7), 995-1012. https://doi.org/10.1088/0031-9155/47/7/301
Dawson, T. W., Caputa, K., Stuchly, M. A., & Kavet, R. (2001). Electric fields in the human body resulting from 60-Hz contact currents. *IEEE Trans Biomed Eng*, *48*(9), 1020-1026. https://ieeexplore.ieee.org/stampPDF/getPDF.jsp?tp=&arnumber=942592&ref=
de Bruyn, L., & de Jager, L. (2010). Effect of long-term exposure to a randomly varied 50 Hz power frequency magnetic field on the fertility of the mouse. *Electromagn Biol Med*, *29*(1-2), 52-61. https://doi.org/10.3109/15368371003776659
de Groot, M. W., van Kleef, R. G., de Groot, A., & Westerink, R. H. (2016). In Vitro Developmental Neurotoxicity Following Chronic Exposure to 50 Hz Extremely Low-Frequency Electromagnetic Fields in Primary Rat Cortical Cultures. *Toxicological Sciences*, *149*(2), 433-440. https://doi.org/10.1093/toxsci/kfv242
de Vocht, F., Hannam, K., Baker, P., & Agius, R. (2014). Maternal residential proximity to sources of extremely low frequency electromagnetic fields and adverse birth outcomes in a UK cohort. *Bioelectromagnetics*, *35*(3), 201-209. https://doi.org/10.1002/bem.21840
de Vocht, F., & Lee, B. (2014). Residential proximity to electromagnetic field sources and birth weight: Minimizing residual confounding using multiple imputation and propensity score matching. *Environ Int*, *69*, 51-57. https://doi.org/10.1016/j.envint.2014.04.012
de Vocht, F., & Olsen, R. G. (2016). Systematic Review of the Exposure Assessment and Epidemiology of High-Frequency Voltage Transients. *Front Public Health*, *4*, 52. https://doi.org/10.3389/fpubh.2016.00052
Dechent, D., & Driessen, S. (2016). Re: Role of Electromagnetic Field Exposure in Childhood Acute Lymphoblastic Leukemia and No Impact of Urinary Alpha- Amylase - a Case Control Study in Tehran, Iran. *Asian Pac J Cancer Prev*, *17*(2), 877-878.
Demers, P. A., Thomas, D. B., Rosenblatt, K. A., Jimenez, L. M., McTiernan, A., Stalsberg, H., Stemhagen, A., Thompson, W. D., Curnen, M. G., Satariano, W., & et al. (1991). Occupational exposure to electromagnetic fields and breast cancer in men. *Am J Epidemiol*, *134*(4), 340-347.
Deschamps, F., Devaux, L., Rigalma, K., Roussel, S., & Duvaux-Ponter, C. (2010). *Innovative approach of the potential impact of HV lines on their environment: the experimental farm*

(Cigré Session Paris 2010, Paper C3_113_2010, Issue.
Devine-Wright, H., & Devine-Wright, P. (2009). Social representations of electricity network technologies: Exploring processes of anchoring and objectification through the use of visual research methods. *British Journal of Social Psychology*, *48*(2), 357-373. https://doi.org/10.1348/014466608x349504
Devine-Wright, P. (2008). Reconsidering public acceptance of renewable energy technologies: a critical review. In M. Grubb, J. T., & M. G. Pollitt (Eds.), *Delivering a Low Carbon Electricity System: Technologies, Economics and Policy* (pp. 443-461). Cambridge University Press.
Devine-Wright, P. (2009). Rethinking NIMBYism: The role of place attachment and place identity in explaining place-protective action. *19*(6), 426-441. - http://dx.doi.org/10.1002/casp.1004
Devine-Wright, P. (2012). Explaining "NIMBY" objections to a power line: The role of personal, place attachment and project-related factors. *Environment and Behavior*, *45*(6), 761-781.
Devine-Wright, P., & Batel, S. (2017). My neighbourhood, my country or my planet? The influence of multiple place attachments and climate change concern on social acceptance of energy infrastructure. *Global Environmental Change-Human and Policy Dimensions*, *47*, 110-120. https://doi.org/10.1016/j.gloenvcha.2017.08.003
Devine-Wright, P., Devine-Wright, H., & Sherry-Brennan, F. (2010). Visible technologies, invisible organisations: An empirical study of public beliefs about electricity supply networks. *Energy Policy*, *38*(8), 4127 - 4134. - http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0301421510002028
Devine-Wright, P., & Howes, Y. (2010). Disruption to place attachment and the protection of restorative environments: A wind energy case study. *Journal of Environmental Psychology*, *30*(3), 271-280. - http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0272494410000174
Di, G., Gu, X., Lin, Q., Wu, S., & Kim, H. B. (2018). A comparative study on effects of static electric field and power frequency electric field on hematology in mice. *Ecotoxicology and Environmental Safety*, *166*, 109-115. https://doi.org/10.1016/j.ecoenv.2018.09.071
Di, G., Kim, H., Xu, Y., Kim, J., & Gu, X. (2019). A comparative study on influences of static electric field and power frequency electric field on cognition in mice. *Environmental Toxicology and Pharmacology*, *66*, 91-95. https://doi.org/10.1016/j.etap.2019.01.001
Di Lazzaro, V., Capone, F., Apollonio, F., Borea, P. A., Cadossi, R., Fassina, L., Grassi, C., Liberti, M., Paffi, A., Parazzini, M., Varani, K., & Ravazzani, P. (2013). A consensus panel review of central nervous system effects of the exposure to low-intensity extremely low-frequency magnetic fields. *Brain Stimul*, *6*(4), 469-476. https://doi.org/10.1016/j.brs.2013.01.004
Dieudonne, M. (2016). Does electromagnetic hypersensitivity originate from nocebo responses? Indications from a qualitative study. *Bioelectromagnetics*, *37*(1), 14-24. https://doi.org/10.1002/bem.21937
Dieudonne, M. (2019). Becoming electro-hypersensitive: A replication study. *Bioelectromagnetics*, *40*(3), 188-200. https://doi.org/10.1002/bem.22180
Dimitrova, S., Stoilova, I., Yanev, T., & Cholakov, I. (2004). Effect of local and global geomagnetic activity on human cardiovascular homeostasis. *Arch Environ Health*, *59*(2), 84-90. https://doi.org/10.3200/aeoh.59.2.84-90
Djuric, N., Bjelica, J., Kljajic, D., Milutinov, M., Kasas-Lazetic, K., & Antic, D. (2016, 3-6 Aug. 2016). The SEMONT continuous monitoring and exposure assessment for the low-frequency EMF. 2016 Ieee International Conference on Emerging Technologies and Innovative Business Practices for the Transformation of Societies (Emergitech),
Does, M., Scelo, G., Metayer, C., Selvin, S., Kavet, R., & Buffler, P. (2011). Exposure to electrical contact currents and the risk of childhood leukemia. *Radiat Res*, *175*(3), 390-396. https://doi.org/10.1667/rr2357.1
Dolder, T., Fehlbaum, J., & Mouchangou, C. (2018). So kompakt wie möglich bei maximaler Leistung. *bulletin.ch 6 / 2018*.
Domotor, Z., Doering, B. K., & Koteles, F. (2016). Dispositional aspects of body focus and idiopathic environmental intolerance attributed to electromagnetic fields (IEI-EMF). *Scand J Psychol*, *57*(2), 136-143. https://doi.org/10.1111/sjop.12271
Dong, L., Li, G., Gao, Y., Lin, L., Zheng, Y., & Cao, X. B. (2020). Exploring the form- and time-

dependent effect of low frequency electromagnetic fields on maintenance of hippocampal long-term potentiation. *European Journal of Neuroscience*, *52*(4), 3166-3180. https://doi.org/10.1111/ejn.14705

Dong, L., Zheng, Y., Li, Z. Y., Li, G., & Lin, L. (2018). Modulating effects of on-line low frequency electromagnetic fields on hippocampal long-term potentiation in young male Sprague-Dawley rat. *Journal of Neuroscience Research*, *96*(11), 1775-1785. https://doi.org/10.1002/jnr.24276

Draper, G., Vincent, T., Kroll, M. E., & Swanson, J. (2005). Childhood cancer in relation to distance from high voltage power lines in England and Wales: a case-control study. *Bmj*, *330*(7503), 1290. https://doi.org/10.1136/bmj.330.7503.1290

Driessen, S., Napp, A., Schmiedchen, K., Kraus, T., & Stunder, D. (2019). Electromagnetic interference in cardiac electronic implants caused by novel electrical appliances emitting electromagnetic fields in the intermediate frequency range: a systematic review. *Europace*, *21*(2), 219-229. https://doi.org/10.1093/europace/euy155

Duan, Y., Wang, Z., Zhang, H., He, Y., Fan, R., Cheng, Y., Sun, G., & Sun, X. (2014). Extremely low frequency electromagnetic field exposure causes cognitive impairment associated with alteration of the glutamate level, MAPK pathway activation and decreased CREB phosphorylation in mice hippocampus: reversal by procyanidins extracted from the lotus seedpod. *Food Funct*, *5*(9), 2289-2297. https://doi.org/10.1039/c4fo00250d

Dürrenberger, G. (2016). *Kriechströme - Stand des Wissens*. FSM.

Durrenberger, G., Bürgi, A., Frei, P., Fröhlich, J., Kühn, S., Kuster, N., Lauer, O., & Röösli, M. (2012). *NIS-Monitoring Schweiz: Eine Konzept- und Machbarkeitsstudie*. BAFU.

Dürrenberger, G., Fröhlich, J., & Leuchtmann, P. (2014). *Wireless Power-Transfer für Elektrofahrzeuge: eine Literaturstudie*. BAFU.

Dürrenberger, G., Fröhlich, J., & Röösli, M. (2020). *Gesundheitliche Wirkungen von Hybridleitungen. Literaturanalyse zum Stand der Forschung*. FSM.

Durrenberger, G., Frohlich, J., Roosli, M., & Mattsson, M. O. (2014). EMF monitoring-concepts, activities, gaps and options. *Int J Environ Res Public Health*, *11*(9), 9460-9479. https://doi.org/10.3390/ijerph110909460

Dürrenberger, G., & Klaus, G. (2009). *Netzrückwirkungen von Energiesparlampen*. BFE.

Eiser, J. R., & van der Pligt, J. (1979). Belief and values in the nuclear debate. *Journal of Applied Social Psychology*, *9*(6), 524-536.

El-Zein, M., Deadman, J. E., & Infante-Rivard, C. (2016). Assessment of occupational risks to extremely low frequency magnetic fields: Validation of an empirical non-expert approach. *Prev Med Rep*, *4*, 148-154. https://doi.org/10.1016/j.pmedr.2016.05.017

Elliott, P., & Toledano, M. B. (2013). Adult cancers near high-voltage power lines. *Epidemiology*, *24*(5), 783-784. https://doi.org/10.1097/EDE.0b013e31829f99a0

Elliott, P., & Wadley, D. (2012). Coming to terms with power lines. *International Planning Studies*, *17*(2), 179 - 201.

Elliott, P., Wadley, D., & Han, J. H. (2016). Determinants of homeowners' attitudes to the installation of high-voltage overhead transmission lines. *Journal of Environmental Planning and Management*, *59*(4), 666-686. https://doi.org/10.1080/09640568.2015.1035776

Elmas, O. (2016). Effects of electromagnetic field exposure on the heart: a systematic review. *Toxicol Ind Health*, *32*(1), 76-82. https://doi.org/10.1177/0748233713498444

Eltiti, S., Wallace, D., Zougkou, K., Russo, R., Joseph, S., Rasor, P., & Fox, E. (2007). Development and evaluation of the electromagnetic hypersensitivity questionnaire. *Bioelectromagnetics*, *28*(2), 137-151. https://doi.org/10.1002/bem.20279

Erren, T. C. (2001). A meta-analysis of epidemiologic studies of electric and magnetic fields and breast cancer in women and men. *Bioelectromagnetics*, *Suppl 5*, S105-119.

Eskelinen, T., Roivainen, P., Makela, P., Keinanen, J., Kauhanen, O., Saarikoski, S., & Juutilainen, J. (2016). Maternal exposure to extremely low frequency magnetic fields: Association with time to pregnancy and foetal growth. *Environ Int*, *94*, 620-625. https://doi.org/10.1016/j.envint.2016.06.027

Faasse, K., Grey, A., Jordan, R., Garland, S., & Petrie, K. J. (2015). Seeing is believing: Impact of social modeling on placebo and nocebo responding. *Health Psychol*, *34*(8), 880-885.

https://doi.org/10.1037/hea0000199
Fang, F., Quinlan, P., Ye, W., Barber, M. K., Umbach, D. M., Sandler, D. P., & Kamel, F. (2009). Workplace exposures and the risk of amyotrophic lateral sclerosis. *Environ Health Perspect*, *117*(9), 1387-1392. https://doi.org/10.1289/ehp.0900580
Fang, Q., Mahmoud, S. S., Yan, J., & Li, H. (2016). An Investigation on the Effect of Extremely Low Frequency Pulsed Electromagnetic Fields on Human Electrocardiograms (ECGs). *Int J Environ Res Public Health*, *13*(11). https://doi.org/10.3390/ijerph13111171
Fazzo, L., Tancioni, V., Polichetti, A., Iavarone, I., Vanacore, N., Papini, P., Farchi, S., Bruno, C., Pasetto, R., Borgia, P., & Comba, P. (2009). Morbidity experience in populations residentially exposed to 50 hz magnetic fields: methodology and preliminary findings of a cohort study. *Int J Occup Environ Health*, *15*(2), 133-142. https://doi.org/10.1179/oeh.2009.15.2.133
Fear, N. T., Roman, E., Carpenter, L. M., Newton, R., & Bull, D. (1996). Cancer in electrical workers: an analysis of cancer registrations in England, 1981-87. *Br J Cancer*, *73*(7), 935-939. https://www.ncbi.nlm.nih.gov/pmc/articles/PMC2074257/pdf/brjcancer00035-0091.pdf
Fedele, G., Green, E. W., Rosato, E., & Kyriacou, C. P. (2014). An electromagnetic field disrupts negative geotaxis in Drosophila via a CRY-dependent pathway. *Nat Commun*, *5*, 4391. https://doi.org/10.1038/ncomms5391
Fews, A. P., Henshaw, D. L., Wilding, R. J., & Keitch, P. A. (1999). Corona ions from powerlines and increased exposure to pollutant aerosols. *Int J Radiat Biol*, *75*(12), 1523-1531. https://www.tandfonline.com/doi/abs/10.1080/095530099139124
Fews, A. P., Wilding, R. J., Keitch, P. A., Holden, N. K., & Henshaw, D. L. (2002). Modification of atmospheric DC fields by space charge from high-voltage power lines. *Atmospheric Research*, *63*(3–4), 271-289. https://doi.org/http://dx.doi.org/10.1016/S0169-8095(02)00041-8
Feychting, M., & Ahlbom, A. (1993). Magnetic fields and cancer in children residing near Swedish high-voltage power lines. *Am J Epidemiol*, *138*(7), 467-481.
Feychting, M., Ahlbom, A., & Kheifets, L. (2005). EMF and health. *Annu Rev Public Health*, *26*, 165-189. https://doi.org/10.1146/annurev.publhealth.26.021304.144445
Feychting, M., Forssen, U., Rutqvist, L. E., & Ahlbom, A. (1998). Magnetic fields and breast cancer in Swedish adults residing near high-voltage power lines. *Epidemiology*, *9*(4), 392-397.
Filippini, T., Fiore, M., Tesauro, M., Malagoli, C., Consonni, M., Violi, F., Arcolin, E., Iacuzio, L., Oliveri Conti, G., Cristaldi, A., Zuccarello, P., Zucchi, E., Mazzini, L., Pisano, F., Gagliardi, I., Patti, F., Mandrioli, J., Ferrante, M., & Vinceti, M. (2020). Clinical and Lifestyle Factors and Risk of Amyotrophic Lateral Sclerosis: A Population-Based Case-Control Study. *Int J Environ Res Public Health*, *17*(3). https://doi.org/10.3390/ijerph17030857
Filippini, T., Hatch, E. E., & Vinceti, M. (2021). Residential exposure to electromagnetic fields and risk of amyotrophic lateral sclerosis: a dose-response meta-analysis. *Sci Rep*, *11*(1), 11939. https://doi.org/10.1038/s41598-021-91349-2
Findlay, R. P. (2017). The effects of human height and mass on the calculated induced electric fields at 50 Hz for comparison with the EMF Directive 2013/35/EU. *J Radiol Prot*, *37*(1), 201-213. https://doi.org/10.1088/1361-6498/37/1/201
Finucane, M. L., & Holup, J. L. (2006). Risk as value: Combining affect and analysis in risk judgments. *Journal of Risk Research*, *9*(2), 141-164. https://doi.org/10.1080/13669870500166930
Fiocchi, S., Liorni, I., Parazzini, M., & Ravazzani, P. (2015). Assessment of foetal exposure to the homogeneous magnetic field harmonic spectrum generated by electricity transmission and distribution networks. *Int J Environ Res Public Health*, *12*(4), 3667-3690. https://doi.org/10.3390/ijerph120403667
Fischer, H., Kheifets, L., Huss, A., Peters, T. L., Vermeulen, R., Ye, W., Fang, F., Wiebert, P., Vergara, X. P., & Feychting, M. (2015). Occupational Exposure to Electric Shocks and Magnetic Fields and Amyotrophic Lateral Sclerosis in Sweden. *Epidemiology*, *26*(6), 824-830. https://doi.org/10.1097/ede.0000000000000365
Fischer, H. J., Vergara, X. P., Yost, M., Silva, M., Lombardi, D. A., & Kheifets, L. (2015). Developing a job-exposure matrix with exposure uncertainty from expert elicitation and data modeling. *J Expo Sci Environ Epidemiol*. https://doi.org/10.1038/jes.2015.37
Floderus, B., Stenlund, C., & Persson, T. (1999). Occupational magnetic field exposure and site-

specific cancer incidence: a Swedish cohort study. *Cancer Causes Control*, *10*(5), 323-332.
Floderus, B., Tornqvist, S., & Stenlund, C. (1994). Incidence of selected cancers in Swedish railway workers, 1961-79. *Cancer Causes Control*, *5*(2), 189-194.
Forssen, U. M., Rutqvist, L. E., Ahlbom, A., & Feychting, M. (2005). Occupational magnetic fields and female breast cancer: a case-control study using Swedish population registers and new exposure data. *Am J Epidemiol*, *161*(3), 250-259. https://doi.org/10.1093/aje/kwi041
Frei, P., Poulsen, A. H., Mezei, G., Pedersen, C., Cronberg Salem, L., Johansen, C., Roosli, M., & Schuz, J. (2013). Residential distance to high-voltage power lines and risk of neurodegenerative diseases: a Danish population-based case-control study. *Am J Epidemiol*, *177*(9), 970-978. https://doi.org/10.1093/aje/kws334
Frey, R. (2021). Psychological Drivers of Individual Differences in Risk Perception: A Systematic Case Study Focusing on 5G. *Psychol Sci*, *32*(10), 1592-1604. https://doi.org/10.1177/0956797621998312
Frick, U., Kharraz, A., Hauser, S., Wiegand, R., Rehm, J., Kovatsits, U., & Eichhammer, P. (2005). Comparison perception of singular transcranial magnetic stimuli by subjectively electrosensitive subjects and general population controls. *Bioelectromagnetics*, *26*(4), 287-298. https://doi.org/10.1002/bem.20085
Friedli, R., & Bräunlich, R. (2020). *Messung von elektromagnetischen Störaussendungen von betriebsfrequenten Magnetfeldern in der Umgebung von Frequenzumrichtern, FKH-Bericht, A20/007.* FKH.
Fujdiak, R., Orgon, M., Hallon, J., Potisk, L., Slacik, J., Mlynek, P., & Misurec, J. (2018). Radiation of an Electromagnetic Field from the Power Line Communication Adapters. *2018 41st International Conference on Telecommunications and Signal Processing (Tsp)*, 754-757. <Go to ISI>://WOS:000454845100169
Furby, L., Slovic, P., Fischhoff, B., & Gregory, R. (1988). Public perceptions of electric power transmission lines. *Journal of Environmental Psychology*, *8*(1), 19-43. https://doi.org/10.1016/S0272-4944(88)80021-5
Gajsek, P., Ravazzani, P., Grellier, J., Samaras, T., Bakos, J., & Thuroczy, G. (2016). Review of Studies Concerning Electromagnetic Field (EMF) Exposure Assessment in Europe: Low Frequency Fields (50 Hz-100 kHz). *Int J Environ Res Public Health*, *13*(9). https://doi.org/10.3390/ijerph13090875
Gallastegi, M., Guxens, M., Jimenez-Zabala, A., Calvente, I., Fernandez, M., Birks, L., Struchen, B., Vrijheid, M., Estarlich, M., Fernandez, M. F., Torrent, M., Ballester, F., Aurrekoetxea, J. J., Ibarluzea, J., Guerra, D., Gonzalez, J., Roosli, M., & Santa-Marina, L. (2016). Characterisation of exposure to non-ionising electromagnetic fields in the Spanish INMA birth cohort: study protocol. *BMC Public Health*, *16*(1), 167. https://doi.org/10.1186/s12889-016-2825-3
Gao, Q., Leung, A., Yang, Y. H., Lau, B. W., Wang, Q., Liao, L. Y., Xie, Y. J., & He, C. Q. (2021). Extremely low frequency electromagnetic fields promote cognitive function and hippocampal neurogenesis of rats with cerebral ischemia. *Neural Regen Res*, *16*(7), 1252-1257. https://doi.org/10.4103/1673-5374.301020
Garcia, A. M., Sisternas, A., & Hoyos, S. P. (2008). Occupational exposure to extremely low frequency electric and magnetic fields and Alzheimer disease: a meta-analysis. *Int J Epidemiol*, *37*(2), 329-340. https://doi.org/10.1093/ije/dym295
Gautam, R., Priyadarshini, E., Nirala, J. P., & Rajamani, P. (2021). Impact of Non-Ionizing Electromagnetic Radiation on Male Infertility: An assessment of the mechanism and consequences [Review]. *Int J Radiat Biol*, 1-22. https://doi.org/10.1080/09553002.2020.1859154
George, V., Bagaria, A., Singh, P., Pampattiwar, S. R., & Periwal, S. (2011, 28-30 Sept. 2011). Comparison of CFL and LED lamp - harmonic disturbances, economics (cost and power quality) and maximum possible loading in a power system. 2011 International Conference and Utility Exhibition on Power and Energy Systems: Issues & Prospects for Asia (ICUE),
Gervasi, F., Murtas, R., Decarli, A., & Russo, A. G. (2019). Residential distance from high-voltage overhead power lines and risk of Alzheimer's dementia and Parkinson's disease: a population-based case-control study in a metropolitan area of Northern Italy. *Int J Epidemiol*, *48*(6), 1949-

1957. https://doi.org/10.1093/ije/dyz139
Girotto, M., & Tonello, A. M. (2017). EMC Regulations and Spectral Constraints for Multicarrier Modulation in PLC. *IEEE Access*, *5*, 4954-4966. https://doi.org/10.1109/Access.2017.2676352
Gölz, S., & Wedderhoff, O. (2018). Explaining regional acceptance of the German energy transition by including trust in stakeholders and perception of fairness as socio-institutional factors. *Energy Research & Social Science*, *43*, 96-108. https://doi.org/10.1016/j.erss.2018.05.026
Gordon, J. S., Maynes, E. J., O'Malley, T. J., Pavri, B. B., & Tchantchaleishvili, V. (2021). Electromagnetic interference between implantable cardiac devices and continuous-flow left ventricular assist devices: a review. *Journal of Interventional Cardiac Electrophysiology*, *61*(1), 1-10. https://doi.org/10.1007/s10840-020-00930-8
Graham, C., Sastre, A., Cook, M. R., Kavet, R., Gerkovich, M. M., & Riffle, D. W. (2000). Exposure to strong ELF magnetic fields does not alter cardiac autonomic control mechanisms. *Bioelectromagnetics*, *21*(6), 413-421. https://onlinelibrary.wiley.com/doi/pdfdirect/10.1002/1521-186X%28200009%2921%3A6%3C413%3A%3AAID-BEM1%3E3.0.CO%3B2-1?download=true
Graham, M. (2000). *A ubiquitous pollutant*.
Greaves, M. (2006). Infection, immune responses and the aetiology of childhood leukaemia. *Nat Rev Cancer*, *6*(3), 193-203. https://doi.org/10.1038/nrc1816
Greenland, S., Fischer, H. J., & Kheifets, L. (2016). Methods to Explore Uncertainty and Bias Introduced by Job Exposure Matrices. *Risk Anal*, *36*(1), 74-82. https://doi.org/10.1111/risa.12438
Greenland, S., Sheppard, A. R., Kaune, W. T., Poole, C., & Kelsh, M. A. (2000). A pooled analysis of magnetic fields, wire codes, and childhood leukemia. Childhood Leukemia-EMF Study Group. *Epidemiology*, *11*(6), 624-634.
Gregory, R., & von Winterfeldt, D. (1996). The effects of electromagnetic fields from transmission lines on public fears and property values. *Journal of Environmental Management*, *48*(3), 201-214. https://doi.org/10.1006/jema.1996.0073
Grellier, J., Ravazzani, P., & Cardis, E. (2014). Potential health impacts of residential exposures to extremely low frequency magnetic fields in Europe. *Environ Int*, *62*, 55-63. https://doi.org/10.1016/j.envint.2013.09.017
Gross, C. (2007). Community perspectives of wind energy in Australia: The application of a justice and community fairness framework to increase social acceptance. *Energy Policy*, *35*(5), 2727-2736. - http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0301421506004861
Grundy, A., Harris, S. A., Demers, P. A., Johnson, K. C., Agnew, D. A., & Villeneuve, P. J. (2016). Occupational exposure to magnetic fields and breast cancer among Canadian men. *Cancer Med*, *5*(3), 586-596. https://doi.org/10.1002/cam4.581
Guenel, P., Raskmark, P., Andersen, J. B., & Lynge, E. (1993). Incidence of cancer in persons with occupational exposure to electromagnetic fields in Denmark. *Br J Ind Med*, *50*(8), 758-764. https://oem.bmj.com/content/oemed/50/8/758.full.pdf
Guerriero, F., & Ricevuti, G. (2016). Extremely low frequency electromagnetic fields stimulation modulates autoimmunity and immune responses: a possible immuno-modulatory therapeutic effect in neurodegenerative diseases. *Neural Regen Res*, *11*(12), 1888-1895. https://doi.org/10.4103/1673-5374.195277
Gunnarsson, L. G., & Bodin, L. (2018). Amyotrophic Lateral Sclerosis and Occupational Exposures: A Systematic Literature Review and Meta-Analyses. *Int J Environ Res Public Health*, *15*(11). https://doi.org/10.3390/ijerph15112371
Gunnarsson, L. G., & Bodin, L. (2019). Occupational Exposures and Neurodegenerative Diseases-A Systematic Literature Review and Meta-Analyses. *Int J Environ Res Public Health*, *16*(3). https://doi.org/10.3390/ijerph16030337
Guo, C., Zhang, H., Ma, Z., Zhang, J., Lin, J., & Zhang, R. (2015, 3-6 Nov. 2015). An inductive wireless telemetry circuit with OOK modulation for implantable cardiac pacemakers. 2015 IEEE 11th International Conference on ASIC (ASICON),
Guo, Y., Wang, L., Liao, C., Zhang, J., Zhang, Y., & Zhang, Y. (2016, 17-20 Oct. 2016). Conducted

EMI Analysis for Switch-On Transient of Dynamic Wireless EV Charging System. 2016 IEEE Vehicle Power and Propulsion Conference (VPPC),

Guseinoviene, E., Dikun, J., Jankunas, V., Senulis, A., & Akinci, T. C. (2014, 25-27 March 2014). A study on the electromagnetic fields in wind mills farm area. 2014 Ninth International Conference on Ecological Vehicles and Renewable Energies (EVER),

Guxens, M., Slottje, P., Kromhout, H., Huss, A., Ivar Martinsen, J., Kauppinen, T., Uuksulainen, S., Weiderspass, E., Sparen, P., Tryggvadottir, L., Kjaerheim, K., Vermeulen, R., & Pukkala, E. (2014). Occupational exposure to extremely low frequency magnetic fields or electric shocks and cancer incidence in four Nordic countries. *Occup Environ Med*, *71 Suppl 1*, A50. https://doi.org/10.1136/oemed-2014-102362.156

Hakansson, N., Floderus, B., Gustavsson, P., Johansen, C., & Olsen, J. H. (2002). Cancer incidence and magnetic field exposure in industries using resistance welding in Sweden. *Occup Environ Med*, *59*(7), 481-486. https://www.ncbi.nlm.nih.gov/pmc/articles/PMC1740327/pdf/v059p00481.pdf

Halgamuge, M. N. (2013). Pineal melatonin level disruption in humans due to electromagnetic fields and ICNIRP limits. *Radiat Prot Dosimetry*, *154*(4), 405-416. https://doi.org/10.1093/rpd/ncs255

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*(3), 255-268. https://doi.org/10.1093/rpd/ncq168

Harakawa, S., Hori, T., Inoue, N., & Suzuki, H. (2017). Time-dependent changes in the suppressive effect of electric field exposure on immobilization-induced plasma glucocorticoid increase in mice. *Bioelectromagnetics*, *38*(4), 272-279. https://doi.org/10.1002/bem.22037

Harakawa, S., Hori, T., Nedachi, T., & Suzuki, H. (2020). Gender and Age Differences in the Suppressive Effect of a 50 Hz Electric Field on the Immobilization-Induced Increase of Plasma Glucocorticoid in Mice. *Bioelectromagnetics*, *41*(2), 156-163. https://doi.org/10.1002/bem.22238

Hareuveny, R., Sudan, M., Halgamuge, M. N., Yaffe, Y., Tzabari, Y., Namir, D., & Kheifets, L. (2015). Characterization of extremely low frequency magnetic fields from diesel, gasoline and hybrid cars under controlled conditions. *Int J Environ Res Public Health*, *12*(2), 1651-1666. https://doi.org/10.3390/ijerph120201651

Haussmann, N., Zang, M., Mease, R., Clemens, M., Schmuelling, B., & Bolten, M. (2022). Towards real-time magnetic dosimetry simulations for inductive charging systems. *Compel-the International Journal for Computation and Mathematics in Electrical and Electronic Engineering*, *41*(3), 878-888. https://doi.org/10.1108/Compel-03-2021-0084

Health Council of the Netherlands. (2018a). *Evaluation of the literature on high-voltage power lines and health part I (background document)* (Cancer in children. No. 2018/08Ae, The Hague, April 18, 2018. Background document to: Power lines and health part I: cancer in children Nr. 2018/08e, The Hague 18 April 2018, Issue. https://www.healthcouncil.nl/documents/advisory-reports/2018/04/18/power-lines-and-health-part-i-childhood-cancer

Health Council of the Netherlands. (2018b). *Power lines and health part I: childhood cancer* (Advisory report to the State Secretary of Infrastructure and Water Management No. 2018/08e, The Hague, April 18, 2018, Issue. https://www.healthcouncil.nl/documents/advisory-reports/2018/04/18/power-lines-and-health-part-i-childhood-cancer

Health Council of the Netherlands. (2018c). *Power lines and health part I: childhood cancer (executive summary)* (No. 2018/08, Issue. https://www.healthcouncil.nl/documents/advisory-reports/2018/04/18/power-lines-and-health-part-i-childhood-cancer

Health Council of the Netherlands. (2022a). *Power lines and health: cancer in adults (executive summary)* (No. 2022/14e, The Hague, 29 June 2022, Issue. https://www.healthcouncil.nl/documents/advisory-reports/2022/06/29/power-lines-and-health-cancer-in-adults

Health Council of the Netherlands. (2022b). *Power lines and health: neurodegenerative diseases (executive summary)* (No. 2022/13e, The Hague, 29 June 2022, Issue. https://www.healthcouncil.nl/documents/advisory-reports/2022/06/29/power-lines-and-health-neurodegenerative-diseases

Herrala, M., Kumari, K., Koivisto, H., Luukkonen, J., Tanila, H., Naarala, J., & Juutilainen, J. (2018). Genotoxicity of intermediate frequency magnetic fields in vitro and in vivo. *Environ Res*, *167*, 759-769. https://doi.org/10.1016/j.envres.2018.09.009

Herrala, M., Naarala, J., & Juutilainen, J. (2019). Assessment of induced genomic instability in rat primary astrocytes exposed to intermediate frequency magnetic fields. *Environ Res*, *173*, 112-116. https://doi.org/10.1016/j.envres.2019.03.033

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*(12), 4522-4536. https://doi.org/10.1088/0031-9155/61/12/4522

Hillert, L., Berglind, N., Arnetz, B. B., & Bellander, T. (2002). Prevalence of self-reported hypersensitivity to electric or magnetic fields in a population-based questionnaire survey. *Scand J Work Environ Health*, *28*(1), 33-41.

Hirata, A., Diao, Y. L., Onishi, T., Sasaki, K., Ahn, S., Colombi, D., De Santis, V., Laakso, I., Giaccone, L., Joseph, W., Rashed, E. A., Kainz, W., & Chen, J. (2021). Assessment of Human Exposure to Electromagnetic Fields: Review and Future Directions. *IEEE Transactions on Electromagnetic Compatibility*, *63*(5), 1619-1630. https://doi.org/10.1109/Temc.2021.3109249

Hocking, B. (2015). Comments on "Dosimetric study of fetal exposure to uniform magnetic fields at 50 Hz" by Liorni et al. *Bioelectromagnetics*, *36*(3), 244. https://doi.org/10.1002/bem.21905

Hore, P. J., & Mouritsen, H. (2016). The Radical-Pair Mechanism of Magnetoreception. *Annu Rev Biophys*, *45*, 299-344. https://doi.org/10.1146/annurev-biophys-032116-094545

Hori, T., Inoue, N., Suzuki, H., & Harakawa, S. (2017). Configuration-dependent variability of the effect of an electric field on the plasma glucocorticoid level in immobilized mice. *Bioelectromagnetics*, *38*(4), 265-271. https://doi.org/10.1002/bem.22042

Hori, T., Nedachi, T., Suzuki, H., & Harakawa, S. (2018). Characterization of the suppressive effects of extremely-low-frequency electric fields on a stress-induced increase in the plasma glucocorticoid level in mice. *Bioelectromagnetics*, *39*(7), 516-528. https://doi.org/10.1002/bem.22138

Hosseinabadi, M. B., Khanjani, N., Atashi, A., Norouzi, P., Mirbadie, S. R., & Mirzaii, M. (2020). The effect of vitamin E and C on comet assay indices and apoptosis in power plant workers: A double blind randomized controlled clinical trial. *Mutation Research - Genetic Toxicology and Environmental Mutagenesis*, *850–851*, 503150. https://doi.org/10.1016/j.mrgentox.2020.503150

Hosseinabadi, M. B., Khanjani, N., Mirzaii, M., Norouzi, P., & Atashi, A. (2019). DNA damage from long-term occupational exposure to extremely low frequency electromagnetic fields among power plant workers. *Mutation Research - Genetic Toxicology and Environmental Mutagenesis*, *846*, 403079. https://doi.org/10.1016/j.mrgentox.2019.07.007

Höytö, A., Herrala, M., Luukkonen, J., Juutilainen, J., & Naarala, J. (2017). Cellular detection of 50 Hz magnetic fields and weak blue light: effects on superoxide levels and genotoxicity. *Int J Radiat Biol*, *93*(6), 646-652. https://doi.org/10.1080/09553002.2017.1294275

Hu, Y., Lai, J., Wan, B., Liu, X., Zhang, Y., Zhang, J., Sun, D., Ruan, G., Liu, E., Liu, G. P., Chen, C., & Wang, D. W. (2016). Long-term exposure to ELF-MF ameliorates cognitive deficits and attenuates tau hyperphosphorylation in 3xTg AD mice. *Neurotoxicology*, *53*, 290-300. https://doi.org/10.1016/j.neuro.2016.02.012

Huang, J., Tang, T., Hu, G., Zheng, J., Wang, Y., Wang, Q., Su, J., Zou, Y., & Peng, X. (2013). Association between exposure to electromagnetic fields from high voltage transmission lines and neurobehavioral function in children. *PLoS One*, *8*(7), e67284. https://doi.org/10.1371/journal.pone.0067284

Hug, K., Grize, L., Seidler, A., Kaatsch, P., & Schuz, J. (2010). Parental occupational exposure to extremely low frequency magnetic fields and childhood cancer: a German case-control study. *Am J Epidemiol*, *171*(1), 27-35. https://doi.org/10.1093/aje/kwp339

Hug, K., Rapp, R., & Taschner, N. (2009). *Niederfrequente Magnetfelder und Krebs* (Umwelt-Wissen, Issue.

Hug, K., Roosli, M., & Rapp, R. (2006). Magnetic field exposure and neurodegenerative diseases--recent epidemiological studies. *Soz Praventivmed*, *51*(4), 210-220.

Hung, C. S., Anderson, C., Horne, J. A., & McEvoy, P. (2007). Mobile phone 'talk-mode' signal delays EEG-determined sleep onset. *Neurosci Lett*, *421*(1), 82-86. https://doi.org/10.1016/j.neulet.2007.05.027

Huss, A., Koeman, T., Kromhout, H., & Vermeulen, R. (2015). Extremely Low Frequency Magnetic Field Exposure and Parkinson's Disease--A Systematic Review and Meta-Analysis of the Data. *Int J Environ Res Public Health*, *12*(7), 7348-7356. https://doi.org/10.3390/ijerph120707348

Huss, A., Murbach, M., van Moorselaar, I., Kuster, N., van Strien, R., Kromhout, H., Vermeulen, R., & Slottje, P. (2016). Novel exposure units for at-home personalized testing of electromagnetic sensibility. *Bioelectromagnetics*, *37*(1), 62-68. https://doi.org/10.1002/bem.21943

Huss, A., Peters, S., & Vermeulen, R. (2018). Occupational exposure to extremely low-frequency magnetic fields and the risk of ALS: A systematic review and meta-analysis. *Bioelectromagnetics*, *39*(2), 156-163. https://doi.org/10.1002/bem.22104

Huss, A., Spoerri, A., Egger, M., Kromhout, H., & Vermeulen, R. (2014). Occupational exposure to magnetic fields and electric shocks and risk of ALS: The Swiss National Cohort. *Amyotroph Lateral Scler Frontotemporal Degener*, 1-6. https://doi.org/10.3109/21678421.2014.954588

Huss, A., Spoerri, A., Egger, M., Kromhout, H., & Vermeulen, R. (2015). Occupational exposure to magnetic fields and electric shocks and risk of ALS: the Swiss National Cohort. *Amyotroph Lateral Scler Frontotemporal Degener*, *16*(1-2), 80-85. https://doi.org/10.3109/21678421.2014.954588

Huss, A., Spoerri, A., Egger, M., Kromhout, H., Vermeulen, R., & Swiss National, C. (2018). Occupational extremely low frequency magnetic fields (ELF-MF) exposure and hematolymphopoietic cancers - Swiss National Cohort analysis and updated meta-analysis. *Environ Res*, *164*, 467-474. https://doi.org/10.1016/j.envres.2018.03.022

Huss, A., Spoerri, A., Egger, M., & Roosli, M. (2009). Residence near power lines and mortality from neurodegenerative diseases: longitudinal study of the Swiss population. *Am J Epidemiol*, *169*(2), 167-175. https://doi.org/10.1093/aje/kwn297

Huss, A., & Vermeulen, R. (2014). Neurodegenerative Diseases and ELF-EMF. In M. Röösli (Ed.), *Epidemiology of Electromagnetic Fields – an Application of Environmental Epidemiological Methods* (pp. 185-201). CRC Press.

Hwang, J. H., Kwak, S. I., Kwon, J. H., & Choi, H. D. (2016, 21-25 Aug. 2016). Development of multi-band personal dosimeter for RF and ELF exposure monitoring. 2016 URSI Asia-Pacific Radio Science Conference (URSI AP-RASC),

IARC. (2002). Non-Ionizing Radiation, Part 1: Static and extremely low-frequency (ELF) electric and magnetic fields. In. Lyon: IARC.

ICNIRP. (1998). Guidelines for limiting exposure to time-varying electric, magnetic, and electromagnetic fields (up to 300 GHz). International Commission on Non-Ionizing Radiation Protection. *Health Phys*, *74*(4), 494-522. https://www.ncbi.nlm.nih.gov/pubmed/9525427

ICNIRP. (2009). Guidelines on limits of exposure to static magnetic fields. *Health Phys*, *96*(4), 504-514. https://doi.org/10.1097/01.HP.0000343164.27920.4a

ICNIRP. (2010). Guidelines for limiting exposure to time-varying electric and magnetic fields (1 Hz to 100 kHz). *Health Phys*, *99*(6), 818-836. https://doi.org/10.1097/HP.0b013e3181f06c86

ICNIRP. (2020). Guidelines for Limiting Exposure to Electromagnetic Fields (100 kHz to 300 GHz). *Health Phys*, *118*(5), 483-524. https://doi.org/10.1097/HP.0000000000001210

ICNIRP. (2022). A Description of ICNIRP'S Independent, Best Practice System of Guidance on the Protection of People and the Environment from Exposure to Non-Ionizing Radiation. *Health Phys*, *122*(5), 625-628. https://doi.org/10.1097/HP.0000000000001561

IEEE. (2019). IEEE Standard for Safety Levels with Respect to Human Exposure to Electric, Magnetic, and Electromagnetic Fields, 0 Hz to 300 GHz. *IEEE Std C95.1-2019 (Revision of IEEE Std C95.1-2005/ Incorporates IEEE Std C95.1-2019/Cor 1-2019)*, 1-312. https://doi.org/doi: 10.1109/IEEESTD.2019.8859679

Ilonen, K., Markkanen, A., Mezei, G., & Juutilainen, J. (2008). Indoor transformer stations as predictors of residential ELF magnetic field exposure. *Bioelectromagnetics*, *29*(3), 213-218. https://doi.org/10.1002/bem.20385

Ingle, M. E., Minguez-Alarcon, L., Lewis, R. C., Williams, P. L., Ford, J. B., Dadd, R., Hauser, R., Meeker, J. D., & Team, E. S. (2020). Association of personal exposure to power-frequency magnetic fields with pregnancy outcomes among women seeking fertility treatment in a longitudinal cohort study. *Fertil Steril*, *114*(5), 1058-1066. https://doi.org/10.1016/j.fertnstert.2020.05.044

Irnich, W., & Steen-Mueller, M. K. (2011). Pacemaker sensitivity to 50 Hz noise voltages. *Europace*, *13*(9), 1319-1326. https://doi.org/10.1093/europace/eur121

Ishida, K., Hirose, M., & Hanada, E. (2016). Investigation of Interference with Medical Devices by Power Line Communication to Promote Its Safe Introduction to the Clinical Setting. *Proceedings of the 2016 International Symposium on Electromagnetic Compatibility - Emc Europe*, 818-822. <Go to ISI>://WOS:000392194100142

Jadidi, M., Biat, S. M., Sameni, H. R., Safari, M., Vafaei, A. A., & Ghahari, L. (2016). Mesenchymal stem cells that located in the electromagnetic fields improves rat model of Parkinson's disease. *Iranian Journal of Basic Medical Sciences*, *19*(7), 741-748. https://www.ncbi.nlm.nih.gov/pmc/articles/PMC5010846/pdf/IJBMS-19-741.pdf

Jalilian, H., Najafi, K., Khosravi, Y., & Roosli, M. (2021). Amyotrophic lateral sclerosis, occupational exposure to extremely low frequency magnetic fields and electric shocks: a systematic review and meta-analysis. *Rev Environ Health*, *36*(1), 129-142. https://doi.org/10.1515/reveh-2020-0041

Jalilian, H., Teshnizi, S. H., Roosli, M., & Neghab, M. (2018). Occupational exposure to extremely low frequency magnetic fields and risk of Alzheimer disease: A systematic review and meta-analysis. *Neurotoxicology*, *69*, 242-252. https://doi.org/10.1016/j.neuro.2017.12.005

Jang, Y. W., Gil, K. C., Lee, J. S., Kang, W., Park, S. Y., & Hwang, K. W. (2019). T-Cell Differentiation to T Helper 9 Phenotype is Elevated by Extremely Low-Frequency Electromagnetic Fields Via Induction of IL-2 Signaling. *Bioelectromagnetics*, *40*(8), 588-601. https://doi.org/10.1002/bem.22219

Jankowiak, K., Driessen, S., Kaifie, A., Kimpeler, S., Krampert, T., Kraus, T., Stunder, D., & Kursawe, M. (2021). Identification of Environmental and Experimental Factors Influencing Human Perception of DC and AC Electric Fields. *Bioelectromagnetics*, *42*(5), 341-356. https://doi.org/10.1002/bem.22347

Jankowiak, K., Kaifie, A., Krampert, T., Kraus, T., & Kursawe, M. (2022). The role of the AC component in human perception of AC-DC hybrid electric fields. *Sci Rep*, *12*(1), 3391. https://doi.org/10.1038/s41598-022-07388-w

Jayaratne, E. R., J-Fatokun, F. O., & Morawska, L. (2008). Air ion concentrations under overhead high-voltage transmission lines. *Atmospheric Environment*, *42*(8), 1846-1856. https://doi.org/http://dx.doi.org/10.1016/j.atmosenv.2007.11.017

Jayaratne, E. R., Ling, X., & Morawska, L. (2015). Comparison of charged nanoparticle concentrations near busy roads and overhead high-voltage power lines. *Sci Total Environ*, *526*, 14-18. https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2015.04.074

Jeffers, D. (2015). Comment on: Childhood cancer and exposure to corona ions from power lines: an epidemiological study. *J Radiol Prot*, *35*(2), 481-483. https://doi.org/10.1088/0952-4746/35/2/481

Jiraprasertwong, J., & Jettanasen, C. (2016, 22-25 Nov. 2016). Electromagnetic interference in photovoltaic system and mitigation of conducted noise at DC side. 2016 IEEE Region 10 Conference (TENCON),

Jirik, V., Pekarek, L., Janout, V., & Tomaskova, H. (2012). Association between childhood leukaemia and exposure to power-frequency magnetic fields in Middle Europe. *Biomed Environ Sci*, *25*(5), 597-601. https://doi.org/10.3967/0895-3988.2012.05.015

Johansen, C., & Olsen, J. H. (1998). Risk of cancer among Danish utility workers--a nationwide cohort study. *Am J Epidemiol*, *147*(6), 548-555.

Johansen, C., Raaschou Nielsen, O., Olsen, J. H., & Schuz, J. (2007). Risk for leukaemia and brain and breast cancer among Danish utility workers: a second follow-up. *Occup Environ Med*, *64*(11), 782-784. https://doi.org/10.1136/oem.2006.029116

Johansson, A., Nordin, S., Heiden, M., & Sandstrom, M. (2010). Symptoms, personality traits, and

stress in people with mobile phone-related symptoms and electromagnetic hypersensitivity. *J Psychosom Res*, *68*(1), 37-45. https://doi.org/10.1016/j.jpsychores.2009.06.009
Juutilainen, J. (2005). Developmental effects of electromagnetic fields. *Bioelectromagnetics*, *Suppl 7*, S107-115. https://doi.org/10.1002/bem.20125
Juutilainen, J., Herrala, M., Luukkonen, J., Naarala, J., & Hore, P. J. (2018). Magnetocarcinogenesis: is there a mechanism for carcinogenic effects of weak magnetic fields? *Proceedings. Biological sciences*, *285*(1879). https://doi.org/10.1098/rspb.2018.0590
Kabuto, M., Nitta, H., Yamamoto, S., Yamaguchi, N., Akiba, S., Honda, Y., Hagihara, J., Isaka, K., Saito, T., Ojima, T., Nakamura, Y., Mizoue, T., Ito, S., Eboshida, A., Yamazaki, S., Sokejima, S., Kurokawa, Y., & Kubo, O. (2006). Childhood leukemia and magnetic fields in Japan: a case-control study of childhood leukemia and residential power-frequency magnetic fields in Japan. *Int J Cancer*, *119*(3), 643-650. https://doi.org/10.1002/ijc.21374
Kapri-Pardes, E., Hanoch, T., Maik-Rachline, G., Murbach, M., Bounds, P. L., Kuster, N., & Seger, R. (2017). Activation of Signaling Cascades by Weak Extremely Low Frequency Electromagnetic Fields. *Cellular Physiology and Biochemistry*, *43*(4), 1533-1546. https://doi.org/10.1159/000481977
Karimi, A., Ghadiri Moghaddam, F., & Valipour, M. (2020). Insights in the biology of extremely low-frequency magnetic fields exposure on human health. *Molecular biology reports*, *47*(7), 5621-5633. https://doi.org/10.1007/s11033-020-05563-8
Karimi, S. A., Salehi, I., Shykhi, T., Zare, S., & Komaki, A. (2019). Effects of exposure to extremely low-frequency electromagnetic fields on spatial and passive avoidance learning and memory, anxiety-like behavior and oxidative stress in male rats. *Behavioural Brain Research*, *359*, 630-638. https://doi.org/10.1016/j.bbr.2018.10.002
Karipidis, K. K. (2015). Survey of residential power-frequency magnetic fields in Melbourne, Australia. *Radiat Prot Dosimetry*, *163*(1), 81-91. https://doi.org/10.1093/rpd/ncu137
Karipidis, K. K., Benke, G., Sim, M. R., Kauppinen, T., & Giles, G. (2007). Occupational exposure to ionizing and non-ionizing radiation and risk of glioma. *Occup Med (Lond)*, *57*(7), 518-524. https://doi.org/10.1093/occmed/kqm078
Kato, I., Young, A., Liu, J., Abrams, J., Bock, C., & Simon, M. (2015). Electric Blanket Use and Risk of Thyroid Cancer in the Women's Health Initiative Observational Cohort. *Women Health*, *55*(7), 829-841. https://doi.org/10.1080/03630242.2015.1050545
Katrib, J., Nadi, M., Kourtiche, D., Magne, I., Schmitt, P., Souques, M., & Roth, P. (2013). In vitro assessment of the immunity of implantable cardioverter-defibrillators to magnetic fields of 50/60 Hz. *Physiol Meas*, *34*(10), 1281-1292. https://doi.org/10.1088/0967-3334/34/10/1281
Kaul, G. (2009). *Was verursacht "elektromagnetische Hypersensibilität"?*
Kavet, R. (2005). Contact current hypothesis: summary of results to date. *Bioelectromagnetics*, *Suppl 7*, S75-85. https://doi.org/10.1002/bem.20126
Kavet, R. (2015). Dosimetric Uncertainties: Magnetic Field Coupling to Peripheral Nerve. *Health Phys*, *109*(6), 556-565. https://doi.org/10.1097/hp.0000000000000351
Kavet, R., Bailey, W. H., Bracken, T. D., & Patterson, R. M. (2008). Recent advances in research relevant to electric and magnetic field exposure guidelines. *Bioelectromagnetics*, *29*(7), 499-526. https://doi.org/10.1002/bem.20423
Kavet, R., Hooper, C., Buffler, P., & Does, M. (2011). The relationship between residential magnetic fields and contact voltage: a pooled analysis. *Radiat Res*, *176*(6), 807-815. https://bioone.org/journals/radiation-research/volume-176/issue-6/RR2719.1/The-Relationship-between-Residential-Magnetic-Fields-and-Contact-Voltage/10.1667/RR2719.1.pdf
Kavet, R., & Zaffanella, L. E. (2002). Contact voltage measured in residences: implications to the association between magnetic fields and childhood leukemia. *Bioelectromagnetics*, *23*(6), 464-474. https://onlinelibrary.wiley.com/doi/pdfdirect/10.1002/bem.10038?download=true
Kavet, R., Zaffanella, L. E., Daigle, J. P., & Ebi, K. L. (2000). The possible role of contact current in cancer risk associated with residential magnetic fields. *Bioelectromagnetics*, *21*(7), 538-553. https://onlinelibrary.wiley.com/doi/pdfdirect/10.1002/1521-186X%28200010%2921%3A7%3C538%3A%3AAID-BEM7%3E3.0.CO%3B2-

3?download=true
Kavet, R., Zaffanella, L. E., Pearson, R. L., & Dallapiazza, J. (2004). Association of residential magnetic fields with contact voltage. *Bioelectromagnetics*, *25*(7), 530-536. https://doi.org/10.1002/bem.20033
Keegan, T. J., Bunch, K. J., Vincent, T. J., King, J. C., O'Neill, K. A., Kendall, G. M., MacCarthy, A., Fear, N. T., & Murphy, M. F. (2012). Case-control study of paternal occupation and childhood leukaemia in Great Britain, 1962-2006. *Br J Cancer*, *107*(9), 1652-1659. https://doi.org/10.1038/bjc.2012.359
Kelsh, M. A., & Sahl, J. D. (1997). Mortality among a cohort of electric utility workers, 1960-1991. *Am J Ind Med*, *31*(5), 534-544. https://onlinelibrary.wiley.com/doi/pdfdirect/10.1002/%28SICI%291097-0274%28199705%2931%3A5%3C534%3A%3AAID-AJIM6%3E3.0.CO%3B2-T?download=true
Kenborg, L., Lassen, C. F., Hansen, J., & Olsen, J. H. (2012). Parkinson's disease and other neurodegenerative disorders among welders: a Danish cohort study. *Mov Disord*, *27*(10), 1283-1289. https://doi.org/10.1002/mds.25125
Kendall, G. M., Bunch, K. J., Stiller, C. A., Vincent, T. J., & Murphy, M. F. G. (2020). Case-control study of paternal occupational exposures and childhood bone tumours and soft-tissue sarcomas in Great Britain, 1962-2010. *Br J Cancer*, *122*(8), 1250-1259. https://doi.org/10.1038/s41416-020-0760-7
Khan, M. W., Juutilainen, J., Auvinen, A., Naarala, J., Pukkala, E., & Roivainen, P. (2021). A cohort study on adult hematological malignancies and brain tumors in relation to magnetic fields from indoor transformer stations. *Int J Hyg Environ Health*, *233*, 113712. https://doi.org/10.1016/j.ijheh.2021.113712
Khan, M. W., Juutilainen, J., Naarala, J., & Roivainen, P. (2022). Residential extremely low frequency magnetic fields and skin cancer. *Occup Environ Med*, *79*(1), 49-54. https://doi.org/10.1136/oemed-2021-107776
Kheifets, L., Afifi, A. A., & Shimkhada, R. (2006). Public health impact of extremely low-frequency electromagnetic fields. *Environ Health Perspect*, *114*(10), 1532-1537. https://escholarship.org/content/qt83x9754k/qt83x9754k.pdf?t=qaf2f9
Kheifets, L., Ahlbom, A., Crespi, C. M., Draper, G., Hagihara, J., Lowenthal, R. M., Mezei, G., Oksuzyan, S., Schuz, J., Swanson, J., Tittarelli, A., Vinceti, M., & Wunsch Filho, V. (2010). Pooled analysis of recent studies on magnetic fields and childhood leukaemia. *Br J Cancer*, *103*(7), 1128-1135. https://doi.org/10.1038/sj.bjc.6605838
Kheifets, L., Ahlbom, A., Crespi, C. M., Feychting, M., Johansen, C., Monroe, J., Murphy, M. F., Oksuzyan, S., Preston-Martin, S., Roman, E., Saito, T., Savitz, D., Schuz, J., Simpson, J., Swanson, J., Tynes, T., Verkasalo, P., & Mezei, G. (2010). A pooled analysis of extremely low-frequency magnetic fields and childhood brain tumors. *Am J Epidemiol*, *172*(7), 752-761. https://doi.org/10.1093/aje/kwq181
Kheifets, L., Ahlbom, A., Johansen, C., Feychting, M., Sahl, J., & Savitz, D. (2007). Extremely low-frequency magnetic fields and heart disease. *Scand J Work Environ Health*, *33*(1), 5-12.
Kheifets, L., Crespi, C. M., Hooper, C., Cockburn, M., Amoon, A. T., & Vergara, X. P. (2017). Residential magnetic fields exposure and childhood leukemia: a population-based case-control study in California. *Cancer Causes Control*, *28*(10), 1117-1123. https://doi.org/10.1007/s10552-017-0951-6
Kheifets, L., Crespi, C. M., Hooper, C., Oksuzyan, S., Cockburn, M., Ly, T., & Mezei, G. (2015). Epidemiologic study of residential proximity to transmission lines and childhood cancer in California: description of design, epidemiologic methods and study population. *J Expo Sci Environ Epidemiol*, *25*(1), 45-52. https://doi.org/10.1038/jes.2013.48
Kheifets, L., Feychting, M., & Schuz, J. (2005). Childhood cancer and power lines: results depend on chosen control group. *Bmj*, *331*(7517), 635; discussion 636; author reply 636-637. https://doi.org/10.1136/bmj.331.7517.635
Kheifets, L., Monroe, J., Vergara, X., Mezei, G., & Afifi, A. A. (2008). Occupational electromagnetic fields and leukemia and brain cancer: an update to two meta-analyses. *J Occup Environ Med*,

50(6), 677-688. https://doi.org/10.1097/JOM.0b013e3181757a27
Kheifets, L., Renew, D., Sias, G., & Swanson, J. (2010). Extremely low frequency electric fields and cancer: assessing the evidence. *Bioelectromagnetics*, *31*(2), 89-101. https://doi.org/10.1002/bem.20527
Kheifets, L., Swanson, J., Yuan, Y., Kusters, C., & Vergara, X. (2017). Comparative analyses of studies of childhood leukemia and magnetic fields, radon and gamma radiation. *J Radiol Prot*, *37*(2), 459-491. https://doi.org/10.1088/1361-6498/aa5fc7
Kibum, Y., Chiuk, S., Hongseok, K., Yeonje, C., Seungtaek, J., & Joungho, K. (2016, 5-6 May 2016). Reduction method of electromagnetic interference in tightly-coupled resonant magnetic field automotive charger with input impedance design. 2016 IEEE Wireless Power Transfer Conference (WPTC),
Kim, D. W., Choi, J. L., Nam, K. C., Yang, D. I., & Kwon, M. K. (2012). Origins of electromagnetic hypersensitivity to 60 Hz magnetic fields: A provocation study. *Bioelectromagnetics*, *33*(4), 326-333. https://doi.org/10.1002/bem.20711
Kim, H. S., Park, B. J., Jang, H. J., Ipper, N. S., Kim, S. H., Kim, Y. J., Jeon, S. H., Lee, K. S., Lee, S. K., Kim, N., Ju, Y. J., Gimm, Y. M., & Kim, Y. W. (2014). Continuous exposure to 60 Hz magnetic fields induces duration- and dose-dependent apoptosis of testicular germ cells. *Bioelectromagnetics*, *35*(2), 100-107. https://doi.org/10.1002/bem.21819
Kim, S. K., Choi, J. L., Kwon, M. K., Choi, J. Y., & Kim, D. W. (2013). Effects of 60 Hz magnetic fields on teenagers and adults. *Environ Health*, *12*, 42. https://doi.org/10.1186/1476-069x-12-42
Kim, Y., Kim, M., & Kim, W. (2013). Effect of the Fukushima nuclear disaster on global public acceptance of nuclear energy. *Energy Policy*, *61*, 822-828. - http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0301421513006149
Kinlen, L. J. (1997). High-contact paternal occupations, infection and childhood leukaemia: five studies of unusual population-mixing of adults. *Br J Cancer*, *76*(12), 1539-1545. https://www.ncbi.nlm.nih.gov/pmc/articles/PMC2228196/pdf/brjcancer00176-0005.pdf
Kjellqvist, A., Palmquist, E., & Nordin, S. (2016). Psychological symptoms and health-related quality of life in idiopathic environmental intolerance attributed to electromagnetic fields. *J Psychosom Res*, *84*, 8-12. https://doi.org/10.1016/j.jpsychores.2016.03.006
Klaus, G. (2013). *Literaturrecherche zu den Emissionen von nichtionisierender Strahlung von Photovoltaikanlagen*.
Knudsen, J. K., Wold, L. C., Aas, Ø., Kielland Haug, J. J., Batel, S., Devine-Wright, P., Qvenild, M., & Jacobsen, G. B. (2015). Local perceptions of opportunities for engagement and procedural justice in electricity transmission grid projects in Norway and the UK. *Land Use Policy*, *48*, 299-308. https://doi.org/http://dx.doi.org/10.1016/j.landusepol.2015.04.031
Kocaman, A., Altun, G., Kaplan, A. A., Deniz Ö, G., Yurt, K. K., & Kaplan, S. (2018). Genotoxic and carcinogenic effects of non-ionizing electromagnetic fields [Review]. *Environ Res*, *163*, 71-79. https://doi.org/10.1016/j.envres.2018.01.034
Koecklin, M. T., Longoria, G., Fitiwi, D. Z., DeCarolis, J. F., & Curtis, J. (2021). Public acceptance of renewable electricity generation and transmission network developments: Insights from Ireland. *Energy Policy*, *151*. https://doi.org/10.1016/j.enpol.2021.112185
Koeman, T., Schouten, L. J., van den Brandt, P. A., Slottje, P., Huss, A., Peters, S., Kromhout, H., & Vermeulen, R. (2015). Occupational exposures and risk of dementia-related mortality in the prospective Netherlands Cohort Study. *Am J Ind Med*, *58*(6), 625-635. https://doi.org/10.1002/ajim.22462
Koeman, T., Slottje, P., Kromhout, H., Schouten, L. J., Goldbohm, R. A., van den Brandt, P. A., & Vermeulen, R. (2013). Occupational exposure to extremely low-frequency magnetic fields and cardiovascular disease mortality in a prospective cohort study. *Occup Environ Med*, *70*(6), 402-407. https://doi.org/10.1136/oemed-2012-100889
Koeman, T., Slottje, P., Schouten, L. J., Peters, S., Huss, A., Veldink, J. H., Kromhout, H., van den Brandt, P. A., & Vermeulen, R. (2017). Occupational exposure and amyotrophic lateral sclerosis in a prospective cohort. *Occup Environ Med*. https://doi.org/10.1136/oemed-2016-103780
Koeman, T., van den Brandt, P. A., Slottje, P., Schouten, L. J., Goldbohm, R. A., Kromhout, H., &

Vermeulen, R. (2014). Occupational extremely low-frequency magnetic field exposure and selected cancer outcomes in a prospective Dutch cohort. *Cancer Causes Control*, *25*(2), 203-214. https://doi.org/10.1007/s10552-013-0322-x

Kokate, P., Mishra, A., Lokhande, S., & Bodhe, G. (2016). Extremely Low Frequency Electromagnetic Field (ELF-EMF) and childhood leukemia near transmission lines: a review. *Advanced Electromagnetics*, *5*(1), 30-40.

Komendantova, N., & Battaglini, A. (2016). Beyond Decide-Announce-Defend (DAD) and Not-in-My-Backyard (NIMBY) models? Addressing the social and public acceptance of electric transmission lines in Germany. *Energy Research & Social Science*, *22*, 224-231. https://doi.org/http://doi.org/10.1016/j.erss.2016.10.001

Koohestani, M., Zhadobov, M., & Ettorre, M. (2017). Design Methodology of a Printed WPT System for HF-Band Mid-Range Applications Considering Human Safety Regulations. *IEEE Transactions on Microwave Theory and Techniques*, *65*(1), 270-279. https://doi.org/10.1109/TMTT.2016.2609931

Korpinen, L., Kuisti, H., Tarao, H., Virtanen, V., Paakkonen, R., Dovan, T., & Kavet, R. (2016). Possible Influences of Spark Discharges on Cardiac Pacemakers. *Health Phys*, *110*(1), 1-10. https://doi.org/10.1097/hp.0000000000000373

Korpinen, L., Pääkkönen, R., Gobba, F., & Virtanen, V. (2015). Possible Exposure of Persons with Cardiac Pacemakers to Extremely Low Frequency (ELF) Electric and Magnetic Fields. *World Academy of Science, Engineering and Technology, International Journal of Medical, Health, Biomedical, Bioengineering and Pharmaceutical Engineering*, *9*(5), 373-376.

Kostoff, R. N., & Lau, C. G. Y. (2013). Combined biological and health effects of electromagnetic fields and other agents in the published literature. *Technological Forecasting and Social Change*, *80*(7), 1331-1349. https://doi.org/http://dx.doi.org/10.1016/j.techfore.2012.12.006

Koteles, F., Szemerszky, R., Gubanyi, M., Kormendi, J., Szekrenyesi, C., Lloyd, R., Molnar, L., Drozdovszky, O., & Bardos, G. (2013). Idiopathic environmental intolerance attributed to electromagnetic fields (IEI-EMF) and electrosensibility (ES) - are they connected? *Int J Hyg Environ Health*, *216*(3), 362-370. https://doi.org/10.1016/j.ijheh.2012.05.007

Kotsampopoulos, P., Rigas, A., Kirchhof, J., Messinis, G., Dimeas, A., Hatziargyriou, N., Rogakos, V., & Andreadis, K. (2017). EMC Issues in the Interaction Between Smart Meters and Power-Electronic Interfaces. *IEEE Transactions on Power Delivery*, *32*(2), 822-831. https://doi.org/10.1109/Tpwrd.2016.2561238

Kottou, S., Nikolopoulos, D., Yannakopoulos, P. H., Vogiannis, E., Petraki, E., Panagiotaras, D., & Koulougliotis, D. (2015). Preliminary background indoor EMF measurements in Greece. *Phys Med*, *31*(7), 808-816. https://doi.org/10.1016/j.ejmp.2015.05.002

Kroll, M. E., Stiller, C. A., Murphy, M. F., & Carpenter, L. M. (2011). Childhood leukaemia and socioeconomic status in England and Wales 1976-2005: evidence of higher incidence in relatively affluent communities persists over time. *Br J Cancer*, *105*(11), 1783-1787. https://doi.org/10.1038/bjc.2011.415

Kroll, M. E., Swanson, J., Vincent, T. J., & Draper, G. J. (2010). Childhood cancer and magnetic fields from high-voltage power lines in England and Wales: a case-control study. *Br J Cancer*, *103*(7), 1122-1127. https://doi.org/10.1038/sj.bjc.6605795

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. *Environ Res*, *157*, 64-70. https://doi.org/10.1016/j.envres.2017.05.014

Kumari, K., Koivisto, H., Capstick, M., Naarala, J., Viluksela, M., Tanila, H., & Juutilainen, J. (2018). Behavioural phenotypes in mice after prenatal and early postnatal exposure to intermediate frequency magnetic fields. *Environ Res*, *162*, 27-34. https://doi.org/10.1016/j.envres.2017.12.013

Kumari, K., Koivisto, H., Viluksela, M., Paldanius, K. M. A., Marttinen, M., Hiltunen, M., Naarala, J., Tanila, H., & Juutilainen, J. (2017). Behavioral testing of mice exposed to intermediate frequency magnetic fields indicates mild memory impairment. *PLoS One*, *12*(12), e0188880. https://doi.org/10.1371/journal.pone.0188880

Kursawe, M., Stunder, D., Krampert, T., Kaifie, A., Driessen, S., Kraus, T., & Jankowiak, K. (2021).

Human detection thresholds of DC, AC, and hybrid electric fields: a double-blind study. *Environ Health*, *20*(1), 92. https://doi.org/10.1186/s12940-021-00781-4

Kuzay, D., Ozer, C., Sirav, B., Canseven, A. G., & Seyhan, N. (2017). Oxidative effects of extremely low frequency magnetic field and radio frequency radiation on testes tissues of diabetic and healthy rats. *Bratislavské Lekárske Listy*, *118*(5), 278-282. https://doi.org/10.4149/BLL_2017_055

Kuznetsov, K., & Zakirova, A. (2019). Systems and Devices for Protection of Personnel Against Electromagnetic Fields. International Russian Automation Conference (RusAutoCon), Sochi, Russia.

Kwan, C. H., Yates, D. C., & Mitcheson, P. D. (2016, 5-6 May 2016). Design objectives and power limitations of human implantable wireless power transfer systems. 2016 IEEE Wireless Power Transfer Conference (WPTC),

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*(21), 7583-7593. https://doi.org/10.1088/0031-9155/58/21/7583

Lagouanelle, P., Bottauscio, O., Pichon, L., & Zucca, M. (2021). Impact of Parameters Variability on the Level of Human Exposure Due to Inductive Power Transfer. *IEEE Transactions on Magnetics*, *57*(6). https://doi.org/10.1109/Tmag.2021.3062702

Lahijani, M. S., Bigdeli, M. R., & Kalantary, S. (2011). Effects of sinusoidal electromagnetic fields on histopathology and structures of brains of preincubated white Leghorn chicken embryos. *Electromagn Biol Med*, *30*(3), 146-157. https://doi.org/10.3109/15368378.2011.596250

Lahijani, M. S., Tehrani, D. M., & Varzideh, F. (2013). Effects of the ELF-MFs on the development of spleens of preincubated chicken embryos. *Electromagn Biol Med*, *32*(3), 301-314. https://doi.org/10.3109/15368378.2012.712588

Lai, H. (2019). Exposure to Static and Extremely-Low Frequency Electromagnetic Fields and Cellular Free Radicals [Review]. *Electromagn Biol Med*, *38*(4), 231-248. https://doi.org/10.1080/15368378.2019.1656645

Lai, H. (2021). Genetic effects of non-ionizing electromagnetic fields [Review]. *Electromagn Biol Med*, *40*(2), 264-273. https://doi.org/10.1080/15368378.2021.1881866

Lai, H. (2022). Neurological effects of static and extremely-low frequency electromagnetic fields. *Electromagn Biol Med*, *41*(2), 201-221. https://doi.org/10.1080/15368378.2022.2064489

Landgrebe, M., Barta, W., Rosengarth, K., Frick, U., Hauser, S., Langguth, B., Rutschmann, R., Greenlee, M. W., Hajak, G., & Eichhammer, P. (2008). Neuronal correlates of symptom formation in functional somatic syndromes: a fMRI study. *Neuroimage*, *41*(4), 1336-1344. https://doi.org/10.1016/j.neuroimage.2008.04.171

Landgrebe, M., Frick, U., Hauser, S., Langguth, B., Rosner, R., Hajak, G., & Eichhammer, P. (2008). Cognitive and neurobiological alterations in electromagnetic hypersensitive patients: results of a case-control study. *Psychol Med*, *38*(12), 1781-1791. https://doi.org/10.1017/s0033291708003097

Lee, G. M., Neutra, R. R., Hristova, L., Yost, M., & Hiatt, R. A. (2002). A nested case-control study of residential and personal magnetic field measures and miscarriages. *Epidemiology*, *13*(1), 21-31.

Lee, S. K., Park, S., Gimm, Y. M., & Kim, Y. W. (2014). Extremely low frequency magnetic fields induce spermatogenic germ cell apoptosis: possible mechanism. *Biomed Res Int*, *2014*, 567183. https://doi.org/10.1155/2014/567183

Legros, A., Corbacio, M., Beuter, A., Modolo, J., Goulet, D., Prato, F. S., & Thomas, A. W. (2012). Neurophysiological and behavioral effects of a 60 Hz, 1,800 muT magnetic field in humans. *Eur J Appl Physiol*, *112*(5), 1751-1762. https://doi.org/10.1007/s00421-011-2130-x

Legros, A., Modolo, J., Brown, S., Roberston, J., & Thomas, A. W. (2015). Effects of a 60 Hz Magnetic Field Exposure Up to 3000 muT on Human Brain Activation as Measured by Functional Magnetic Resonance Imaging. *PLoS One*, *10*(7), e0132024. https://doi.org/10.1371/journal.pone.0132024

Leitgeb, N. (2015a). Reply to comment of Sage et al. on SCENIHR's opinion on potential health effects of exposure to electromagnetic fields. *Bioelectromagnetics*.

https://doi.org/10.1002/bem.21948
Leitgeb, N. (2015b). Synoptic Analysis Clarifies Childhood Leukemia Risk from EKF MAgnetic Field Exposure. *Journal of Electromagnetic Analysis and Applications*, *7*, 14.
Leitgeb, N., Cech, R., & Schrottner, J. (2008b). Assessment of inhomogeneous ELF magnetic field exposures. *Radiat Prot Dosimetry*, *131*(2), 251-258. https://doi.org/10.1093/rpd/ncn132
Leitgeb, N., Cech, R., Schrottner, J., Lehofer, P., Schmidpeter, U., & Rampetsreiter, M. (2008a). Magnetic emissions of electric appliances. *Int J Hyg Environ Health*, *211*(1-2), 69-73. https://doi.org/10.1016/j.ijheh.2007.03.005
Leitgeb, N., Niedermayr, F., & Fuchs, C. (2012). Impact of a Radio Frequency Electronic Article Surveillance (EAS) System on Active Implants.
Leitgeb, N., Niedermayr, F., & Loos, G. (2013). Impact of EAS Systems on Implanted Cardiac Pacemakers and Defibrillators. *Journal of Electromagnetic Analysis and Applications*, *5*(2), 67. https://doi.org/10.4236/jemaa.2013.52011
Leitgeb, N., & Schrottner, J. (2003). Electrosensibility and electromagnetic hypersensitivity. *Bioelectromagnetics*, *24*(6), 387-394. https://doi.org/10.1002/bem.10138
Leitgeb, N., Schrottner, J., & Cech, R. (2007). Perception of ELF electromagnetic fields: excitation thresholds and inter-individual variability. *Health Phys*, *92*(6), 591-595. https://doi.org/10.1097/01.HP.0000243128.29337.aa
Lerchl, A., Drees Née Grote, K., Gronau, I., Fischer, D., Bauch, J., & Hoppe, A. (2021). Effects of Long-Term Exposure of Intermediate Frequency Magnetic Fields (20 kHz, 360 µT) on the Development, Pathological Findings, and Behavior of Female Mice. *Bioelectromagnetics*, *42*(4), 309-316. https://doi.org/10.1002/bem.22337
Levallois, P., Neutra, R., Lee, G., & Hristova, L. (2002). Study of self-reported hypersensitivity to electromagnetic fields in California. *Environ Health Perspect*, *110 Suppl 4*, 619-623. https://www.ncbi.nlm.nih.gov/pmc/articles/PMC1241215/pdf/ehp110s-000619.pdf
Lewis, R. C., Evenson, K. R., Savitz, D. A., & Meeker, J. D. (2015). Temporal variability of daily personal magnetic field exposure metrics in pregnant women. *J Expo Sci Environ Epidemiol*, *25*(1), 58-64. https://doi.org/10.1038/jes.2014.18
Lewis, R. C., Hauser, R., Maynard, A. D., Neitzel, R. L., Wang, L., Kavet, R., & Meeker, J. D. (2016c). Exposure to Power-Frequency Magnetic Fields and the Risk of Infertility and Adverse Pregnancy Outcomes: Update on the Human Evidence and Recommendations for Future Study Designs. *J Toxicol Environ Health B Crit Rev*, *19*(1), 29-45. https://doi.org/10.1080/10937404.2015.1134370
Lewis, R. C., Hauser, R., Maynard, A. D., Neitzel, R. L., Wang, L., Kavet, R., Morey, P., Ford, J. B., & Meeker, J. D. (2016b). Personal measures of power-frequency magnetic field exposure among men from an infertility clinic: Distribution, temporal variability and correlation with their female partners' exposure. *Radiat Prot Dosimetry*, *172*(4), 401-408. https://doi.org/10.1093/rpd/ncv515
Lewis, R. C., Hauser, R., Wang, L., Kavet, R., & Meeker, J. D. (2016a). Personal power-frequency magnetic field exposure in women recruited at an infertility clinic: association with physical activity and temporal variability. *Radiat Prot Dosimetry*, *168*(4), 478-488. https://doi.org/10.1093/rpd/ncv365
Li, D. K., Chen, H., & Odouli, R. (2011). Maternal exposure to magnetic fields during pregnancy in relation to the risk of asthma in offspring. *Arch Pediatr Adolesc Med*, *165*(10), 945-950. https://doi.org/10.1001/archpediatrics.2011.135
Li, D. K., Ferber, J. R., Odouli, R., & Quesenberry, C. P., Jr. (2012). A prospective study of in-utero exposure to magnetic fields and the risk of childhood obesity. *Sci Rep*, *2*, 540. https://doi.org/10.1038/srep00540
Li, D. K., Odouli, R., Wi, S., Janevic, T., Golditch, I., Bracken, T. D., Senior, R., Rankin, R., & Iriye, R. (2002). A population-based prospective cohort study of personal exposure to magnetic fields during pregnancy and the risk of miscarriage. *Epidemiology*, *13*(1), 9-20.
Li, D. K., Yan, B., Li, Z., Gao, E., Miao, M., Gong, D., Weng, X., Ferber, J. R., & Yuan, W. (2010). Exposure to magnetic fields and the risk of poor sperm quality. *Reprod Toxicol*, *29*(1), 86-92. https://doi.org/10.1016/j.reprotox.2009.09.004

Li, H., Lin, L., Li, L., Zhou, L., Hao, S., Zhang, Y., & Ding, Z. (2018). Eotaxin-1 and MCP-1 serve as circulating indicators in response to power frequency electromagnetic field exposure in mice. *Molecular Medicine Reports*, *18*(3), 2832-2840. https://doi.org/10.3892/mmr.2018.9237

Li, L., Xiong, D. F., Liu, J. W., Li, Z. X., Zeng, G. C., & Li, H. L. (2015). A cross-sectional study on oxidative stress in workers exposed to extremely low frequency electromagnetic fields. *Int J Radiat Biol*, *91*(5), 420-425. https://doi.org/10.3109/09553002.2015.1012304

Li, P., McLaughlin, J., & Infante-Rivard, C. (2009). Maternal occupational exposure to extremely low frequency magnetic fields and the risk of brain cancer in the offspring. *Cancer Causes Control*, *20*(6), 945-955. https://doi.org/10.1007/s10552-009-9311-5

Li, W., Ray, R. M., Thomas, D. B., Yost, M., Davis, S., Breslow, N., Gao, D. L., Fitzgibbons, E. D., Camp, J. E., Wong, E., Wernli, K. J., & Checkoway, H. (2013). Occupational exposure to magnetic fields and breast cancer among women textile workers in Shanghai, China. *Am J Epidemiol*, *178*(7), 1038-1045. https://doi.org/10.1093/aje/kwt161

Liebe, U., & Dobers, G. M. (2019). Decomposing public support for energy policy: What drives acceptance of and intentions to protest against renewable energy expansion in Germany? *Energy Research & Social Science*, *47*, 247-260. https://doi.org/10.1016/j.erss.2018.09.004

Lienert, P., Suetterlin, B., & Siegrist, M. (2015). The acceptance of the modification and expansion of high-voltage power lines in the context of the energy transition. In. Manuscript submitted for publication.

Lienert, P., Sütterlin, B., & Siegrist, M. (2017a). The influence of high-voltage power lines on the feelings evoked by different Swiss surroundings. *Energy Research & Social Science*, *23*, 46-59. https://doi.org/http://doi.org/10.1016/j.erss.2016.11.010

Lienert, P., Sütterlin, B., & Siegrist, M. (2017b). Public acceptance of high-voltage power lines: The influence of information provision on undergrounding. *Manuscript submitted for publication*.

Lienert, P., Sütterlin, B., & Siegrist, M. (2018). Public acceptance of high-voltage power lines: The influence of information provision on undergrounding. *Energy Policy*, *112*, 305-315. https://doi.org/10.1016/j.enpol.2017.10.025

Lilien, J. L., Dular, P., Sabariego, R. V., Beauvois, I., Barbier, P. P., & Lorphèvre, R. (2009). *Effects of Extremely Low Frequency Electromagnetic Fields on Human Beings* International Colloquium Power Frequency Electromagnetic Fields, Sarajevo.

Linzenich, A., Zaunbrecher, B. S., & Ziefle, M. (2020). "Risky transitions?" Risk perceptions, public concerns, and energy infrastructure in Germany. *Energy Research & Social Science*, *68*. https://doi.org/10.1016/j.erss.2020.101554

Linzenich, A., & Ziefle, M. (2018). Uncovering the Impact of Trust and Perceived Fairness on the Acceptance of Wind Power Plants and Electricity Pylons. *Proceedings of the 7th International Conference on Smart Cities and Green Ict Systems (Smartgreens)*, 190-198. https://doi.org/10.5220/0006696001900198

Liorni, I., Bottauscio, O., Guilizzoni, R., Ankarson, P., Bruna, J., Fallahi, A., Harmon, S., & Zucca, M. (2020). Assessment of Exposure to Electric Vehicle Inductive Power Transfer Systems: Experimental Measurements and Numerical Dosimetry. *Sustainability*, *12*(11). https://doi.org/10.3390/su12114573

Liorni, I., Parazzini, M., Fiocchi, S., Douglas, M., Capstick, M., Kuster, N., & Ravazzani, P. (2016). Computational assessment of pregnant woman models exposed to uniform ELF-magnetic fields: compliance with the European current exposure regulations the general public and occupational exposures at 50 Hz. *Radiat Prot Dosimetry*, *172*(4), 382-392. https://doi.org/10.1093/rpd/ncv488

Liorni, I., Parazzini, M., Struchen, B., Fiocchi, S., Roosli, M., & Ravazzani, P. (2016). Children's Personal Exposure Measurements to Extremely Low Frequency Magnetic Fields in Italy. *Int J Environ Res Public Health*, *13*(6). https://doi.org/10.3390/ijerph13060549

Liu, F., Zhao, Z., Chen, K., Nie, J., Zhang, Y., & Yuan, L. (2016, 5-8 Dec. 2016). Comparative study of current control methods for a 5kW wireless EV charging system. 2016 IEEE 2nd Annual Southern Power Electronics Conference (SPEC),

Liu, H., Chen, G., Pan, Y., Chen, Z., Jin, W., Sun, C., Chen, C., Dong, X., Chen, K., Xu, Z., Zhang, S., & Yu, Y. (2014). Occupational electromagnetic field exposures associated with sleep quality: a

cross-sectional study. *PLoS One*, *9*(10), e110825. https://doi.org/10.1371/journal.pone.0110825

Liu, T. X., Lang, H. D., & Sarris, C. D. (2015, 19-24 July 2015). Comparison of magnetic field exposure for SISO and MISO wireless power transfer systems. 2015 IEEE International Symposium on Antennas and Propagation & USNC/URSI National Radio Science Meeting,

Liu, X., Zhao, L., Yu, D., Ma, S., & Liu, X. (2013). Effects of extremely low frequency electromagnetic field on the health of workers in automotive industry. *Electromagn Biol Med*, *32*(4), 551-559. https://doi.org/10.3109/15368378.2013.773909

Loewenstein, G. F., Weber, E. U., Hsee, C. K., & Welch, N. (2001). Risk as feelings. *Psychological Bulletin*, *127*(2), 267-286. https://doi.org/10.1037//0033-2909.127.2.267

Lonne-Rahm, S., Andersson, B., Melin, L., Schultzberg, M., Arnetz, B., & Berg, M. (2000). Provocation with stress and electricity of patients with "sensitivity to electricity". *J Occup Environ Med*, *42*(5), 512-516.

Loomis, D. P. (1992). Cancer of breast among men in electrical occupations. *Lancet*, *339*(8807), 1482-1483. https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/014067369292078T?via%3Dihub

Lowenthal, R. M., Tuck, D. M., & Bray, I. C. (2007). Residential exposure to electric power transmission lines and risk of lymphoproliferative and myeloproliferative disorders: a case-control study. *Intern Med J*, *37*(9), 614-619. https://doi.org/10.1111/j.1445-5994.2007.01389.x

Luo, X., Ma, L., Gao, P., & Zhang, Y. (2017). Effects of subchronic extremely low-frequency electromagnetic field exposure on biochemical parameters in rats. *Toxicol Ind Health*, *33*(4), 365-372. https://doi.org/10.1177/0748233716645479

MacGregor, D. G., Slovic, P., & Morgan, M. G. (1994). Perception of risks from electromagnetic fields: a psychometric evaluation of a risk-communication approach. *Risk Anal*, *14*(5), 815-828. https://doi.org/10.1111/j.1539-6924.1994.tb00293.x

Maes, A., & Verschaeve, L. (2016a). Genetic damage in humans exposed to extremely low-frequency electromagnetic fields [Review]. *Arch Toxicol*, *90*(10), 2337-2348. https://doi.org/10.1007/s00204-016-1769-9

Maes, A., & Verschaeve, L. (2016b). Genetic damage in humans exposed to extremely low-frequency electromagnetic fields. *Arch Toxicol*, *90*(10), 2337-2348. https://doi.org/10.1007/s00204-016-1769-9

Maestu, C., Blanco, M., Nevado, A., Romero, J., Rodriguez-Rubio, P., Galindo, J., Bautista Lorite, J., de las Morenas, F., & Fernandez-Arguelles, P. (2013). Reduction of pain thresholds in fibromyalgia after very low-intensity magnetic stimulation: a double-blinded, randomized placebo-controlled clinical trial. *Pain Res Manag*, *18*(6), e101-106. https://www.ncbi.nlm.nih.gov/pmc/articles/PMC3917800/pdf/prm18e101.pdf

Magne, I., Korpinen, L., & Souques, M. (2014, 1-4 Sept. 2014). Cardiac pacemakers and electromagnetic fields : Comparison of experimental results in France and Finland. Electromagnetic Compatibility (EMC Europe), 2014 International Symposium on,

Magne, I., Souques, M., Bureau, I., Duburcq, A., Remy, E., & Lambrozo, J. (2016). Exposure of children to extremely low frequency magnetic fields in France: Results of the EXPERS study. *J Expo Sci Environ Epidemiol*. https://doi.org/10.1038/jes.2016.59

Magne, J., Souques, M., & Bedja, M. (2011). *Exposure of the French population to 50 Hz magnetic field: general results and impact of electric networks* 21st international conference on electricity distribution (CIRED), Frankfurt.

Mahaki, H., Jabarivasal, N., Sardanian, K., & Zamani, A. (2020). Effects of Various Densities of 50 Hz Electromagnetic Field on Serum IL-9, IL-10, and TNF-alpha Levels. *The international journal of occupational and environmental medicine*, *11*(1), 24-32. https://doi.org/10.15171/ijoem.2020.1572

Mahaki, H., Jabarivasal, N., Sardarian, K., & Zamani, A. (2019). The effects of extremely low-frequency electromagnetic fields on c-Maf, STAT6, and RORα expressions in spleen and thymus of rat. *Electromagn Biol Med*, *38*(2), 177-183. https://doi.org/10.1080/15368378.2019.1608832

Mahaki, H., Tanzadehpanah, H., Jabarivasal, N., Sardanian, K., & Zamani, A. (2019). A review on the

effects of extremely low frequency electromagnetic field (ELF-EMF) on cytokines of innate and adaptive immunity [Review]. *Electromagn Biol Med*, *38*(1), 84-95. https://doi.org/10.1080/15368378.2018.1545668

Mahdavinejad, L., Alahgholi-Hajibehzad, M., Eftekharian, M. M., Zaerieghane, Z., Salehi, I., Hajilooi, M., Mahaki, H., & Zamani, A. (2018). Extremely Low Frequency Electromagnetic Fields Decrease Serum Levels of Interleukin-17, Transforming Growth Factor-β and Downregulate Foxp3 Expression in the Spleen. *Journal of Interferon & Cytokine Research: The Official Journal of the International Society for Interferon and Cytokine Research*, *38*(10), 457-462. https://doi.org/10.1089/jir.2018.0048

Mahram, M., & Ghazavi, M. (2013). The effect of extremely low frequency electromagnetic fields on pregnancy and fetal growth, and development. *Arch Iran Med*, *16*(4), 221-224. https://doi.org/013164/aim.006

Malagoli, C., Crespi, C. M., Rodolfi, R., Signorelli, C., Poli, M., Zanichelli, P., Fabbi, S., Teggi, S., Garavelli, L., Astolfi, G., Calzolari, E., Lucenti, C., & Vinceti, M. (2012). Maternal exposure to magnetic fields from high-voltage power lines and the risk of birth defects. *Bioelectromagnetics*, *33*(5), 405-409. https://onlinelibrary.wiley.com/doi/pdfdirect/10.1002/bem.21700?download=true

Malagoli, C., Fabbi, S., Teggi, S., Calzari, M., Poli, M., Ballotti, E., Notari, B., Bruni, M., Palazzi, G., Paolucci, P., & Vinceti, M. (2010). Risk of hematological malignancies associated with magnetic fields exposure from power lines: a case-control study in two municipalities of northern Italy. *Environ Health*, *9*, 16. https://doi.org/10.1186/1476-069x-9-16

Manser, M., Sater, M. R., Schmid, C. D., Noreen, F., Murbach, M., Kuster, N., Schuermann, D., & Schär, P. (2017). ELF-MF exposure affects the robustness of epigenetic programming during granulopoiesis. *Sci Rep*, *7*, 43345. https://doi.org/10.1038/srep43345

Mansourian, M., Marateb, H. R., & Vaseghi, G. (2016). The effect of extremely low-frequency magnetic field (50-60 Hz) exposure on spontaneous apoptosis: The results of a meta-analysis. *Adv Biomed Res*, *5*, 141. https://doi.org/10.4103/2277-9175.187375

Marcilio, I., Gouveia, N., Pereira Filho, M. L., & Kheifets, L. (2011). Adult mortality from leukemia, brain cancer, amyotrophic lateral sclerosis and magnetic fields from power lines: a case-control study in Brazil. *Rev Bras Epidemiol*, *14*(4), 580-588. https://www.scielo.br/j/rbepid/a/zL5XQbbzqLqW8dZFyQJzx3x/?lang=en&format=pdf

Marell, L., Lindgren, M., Nyhlin, K. T., Ahlgren, C., & Berglund, A. (2016). "Struggle to obtain redress": Women's experiences of living with symptoms attributed to dental restorative materials and/or electromagnetic fields. *Int J Qual Stud Health Well-being*, *11*, 32820. https://doi.org/10.3402/qhw.v11.32820

Martínez-Sámano, J., Flores-Poblano, A., Verdugo-Díaz, L., Juárez-Oropeza, M. A., & Torres-Durán, P. V. (2018). Extremely low frequency electromagnetic field exposure and restraint stress induce changes on the brain lipid profile of Wistar rats. *BMC Neuroscience*, *19*(1), 31. https://doi.org/10.1186/s12868-018-0432-1

Maslanyj, M., Lightfoot, T., Schuz, J., Sienkiewicz, Z., & McKinlay, A. (2010). A precautionary public health protection strategy for the possible risk of childhood leukaemia from exposure to power frequency magnetic fields. *BMC Public Health*, *10*, 673. https://doi.org/10.1186/1471-2458-10-673

Maslanyj, M. P., Mee, T. J., Renew, D. C., Simpson, J., Ansell, P., Allen, S. G., & Roman, E. (2007). Investigation of the sources of residential power frequency magnetic field exposure in the UK Childhood Cancer Study. *J Radiol Prot*, *27*(1), 41-58. https://doi.org/10.1088/0952-4746/27/1/002

Mastrodonato, A., Barbati, S. A., Leone, L., Colussi, C., Gironi, K., Rinaudo, M., Piacentini, R., Denny, C. A., & Grassi, C. (2018). Olfactory memory is enhanced in mice exposed to extremely low-frequency electromagnetic fields via Wnt/β-catenin dependent modulation of subventricular zone neurogenesis [Article]. *Sci Rep*, *8*. https://doi.org/10.1038/s41598-017-18676-1

Matanoski, G. M., Breysse, P. N., & Elliott, E. A. (1991). Electromagnetic field exposure and male breast cancer. *Lancet*, *337*(8743), 737. https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/0140673691903251?via%3Dihub

Mathys, P. (2005). Hausanschluss: Wechsel von TN-C auf TN-S. *VSE Bulletin*(17), 4.
Mathys, R. (2012). Am TN-S-Netzanschluss führt keine Weg vorbei. *VSE Bulletin*(12), 7.
Mattsson, M.-O., Simkó, M., & Foster, K. R. (2021). 5G New Radio Requires the Best Possible Risk Assessment Studies: Perspective and Recommended Guidelines [Perspective]. *Frontiers in Communications and Networks*, *2*. https://www.frontiersin.org/articles/10.3389/frcmn.2021.724772
Mattsson, M. O., & Simko, M. (2014). Grouping of Experimental Conditions as an Approach to Evaluate Effects of Extremely Low-Frequency Magnetic Fields on Oxidative Response in in vitro Studies. *Front Public Health*, *2*, 132. https://doi.org/10.3389/fpubh.2014.00132
McCallum, L. C., Whitfield Aslund, M. L., Knopper, L. D., Ferguson, G. M., & Ollson, C. A. (2014). Measuring electromagnetic fields (EMF) around wind turbines in Canada: is there a human health concern? *Environ Health*, *13*(1), 9. https://doi.org/10.1186/1476-069x-13-9
McCarty, D. E., Carrubba, S., Chesson, A. L., Frilot, C., Gonzalez-Toledo, E., & Marino, A. A. (2011). Electromagnetic hypersensitivity: evidence for a novel neurological syndrome. *Int J Neurosci*, *121*(12), 670-676. https://doi.org/10.3109/00207454.2011.608139
McCormick, D. L., Boorman, G. A., Findlay, J. C., Hailey, J. R., Johnson, T. R., Gauger, J. R., Pletcher, J. M., Sills, R. C., & Haseman, J. K. (1999). Chronic toxicity/oncogenicity evaluation of 60 Hz (power frequency) magnetic fields in B6C3F1 mice. *Toxicologic pathology*, *27*(3), 279-285. https://doi.org/10.1177/019262339902700302
McLeod, K. J. (1992). Microelectrode measurements of low frequency electric field effects in cells and tissues. *Bioelectromagnetics*, *Suppl 1*, 161-178. https://onlinelibrary.wiley.com/doi/abs/10.1002/bem.2250010206?sid=nlm%3Apubmed
McNamee, D. A., Corbacio, M., Weller, J. K., Brown, S., Prato, F. S., Thomas, A. W., & Legros, A. G. (2010). The cardiovascular response to an acute 1800-microT, 60-Hz magnetic field exposure in humans. *Int Arch Occup Environ Health*, *83*(4), 441-454. https://doi.org/10.1007/s00420-009-0484-8
McNamee, D. A., Corbacio, M., Weller, J. K., Brown, S., Stodilka, R. Z., Prato, F. S., Bureau, Y., Thomas, A. W., & Legros, A. G. (2011). The response of the human circulatory system to an acute 200-muT, 60-Hz magnetic field exposure. *Int Arch Occup Environ Health*, *84*(3), 267-277. https://doi.org/10.1007/s00420-010-0543-1
McNamee, D. A., Legros, A. G., Krewski, D. R., Wisenberg, G., Prato, F. S., & Thomas, A. W. (2009). A literature review: the cardiovascular effects of exposure to extremely low frequency electromagnetic fields. *Int Arch Occup Environ Health*, *82*(8), 919-933. https://doi.org/10.1007/s00420-009-0404-y
Mezei, G., Gadallah, M., & Kheifets, L. (2008). Residential magnetic field exposure and childhood brain cancer: a meta-analysis. *Epidemiology*, *19*(3), 424-430. https://doi.org/10.1097/EDE.0b013e3181690715
Mezei, G., Sudan, M., Izraeli, S., & Kheifets, L. (2014). Epidemiology of childhood leukemia in the presence and absence of Down syndrome. *Cancer Epidemiol*, *38*(5), 479-489. https://doi.org/10.1016/j.canep.2014.07.006
Migault, L., Garlantezec, R., Piel, C., Marchand-Martin, L., Orazio, S., Cheminat, M., Zaros, C., Carles, C., Cardis, E., Ancel, P. Y., Charles, M. A., de Seze, R., Baldi, I., & Bouvier, G. (2020). Maternal cumulative exposure to extremely low frequency electromagnetic fields, prematurity and small for gestational age: a pooled analysis of two birth cohorts. *Occup Environ Med*, *77*(1), 22-31. https://doi.org/10.1136/oemed-2019-105785
Migault, L., Piel, C., Carles, C., Delva, F., Lacourt, A., Cardis, E., Zaros, C., de Seze, R., Baldi, I., & Bouvier, G. (2018). Maternal cumulative exposure to extremely low frequency electromagnetic fields and pregnancy outcomes in the Elfe cohort. *Environ Int*, *112*, 165-173. https://doi.org/10.1016/j.envint.2017.12.025
Milham, S. (2014). Response to "Refutation of dirty electricity hypothesis in obesity: epistemological arguments and trans-disciplinary study using an instrumental variable" by Frank de Vocht and Igor Burstyn. *Electromagn Biol Med*, *33*(1), 2. https://doi.org/10.3109/15368378.2013.855587
Milham, S., & Stetzer, D. (2013). Dirty electricity, chronic stress, neurotransmitters and disease. *Electromagn Biol Med*, *32*(4), 500-507. https://doi.org/10.3109/15368378.2012.743909

Minder, C. E., & Pfluger, D. H. (2001). Leukemia, brain tumors, and exposure to extremely low frequency electromagnetic fields in Swiss railway employees. *Am J Epidemiol*, *153*(9), 825-835. https://core.ac.uk/download/212372933.pdf

Miwa, K., Takenaka, T., & Hirata, A. (2019). Electromagnetic Dosimetry and Compliance for Wireless Power Transfer Systems in Vehicles. *IEEE Transactions on Electromagnetic Compatibility*, *61*(6), 2024-2030. https://doi.org/10.1109/Temc.2019.2949983

Modolo, J., Thomas, A. W., & Legros, A. (2017). Human exposure to power frequency magnetic fields up to 7.6 mT: An integrated EEG/fMRI study. *Bioelectromagnetics*, *38*(6), 425-435. https://doi.org/10.1002/bem.22064

Mohler, E., Frei, P., Braun-Fahrlander, C., Frohlich, J., Neubauer, G., & Roosli, M. (2010). Effects of everyday radiofrequency electromagnetic-field exposure on sleep quality: a cross-sectional study. *Radiat Res*, *174*(3), 347-356. https://doi.org/10.1667/rr2153.1

Molaei, S., Alahgholi-Hajibehzad, M., Gholamian-Hamadan, M., Zaerieghane, Z., & Zamani, A. (2019). Effect of 50-Hz Magnetic Fields on Serum IL-1β and IL-23 and Expression of BLIMP-1, XBP-1, and IRF-4. *Inflammation*, *42*(5), 1800-1807. https://doi.org/10.1007/s10753-019-01042-w

Monazzam, M. R., Hosseini, M., Matin, L. F., Aghaei, H. A., Khosroabadi, H., & Hesami, A. (2014). Sleep quality and general health status of employees exposed to extremely low frequency magnetic fields in a petrochemical complex. *J Environ Health Sci Eng*, *12*, 78. https://doi.org/10.1186/2052-336x-12-78

Morgan, M. G., Florig, H. K., Nair, I., Cortés, C., Marsh, K., & Pavlosky, K. (1990). Lay understanding of low-frequency electric and magnetic fields. *Bioelectromagnetics*, *11*(4), 313-335. https://doi.org/10.1002/bem.2250110407

Morgan, M. G., Slovic, P., Nair, I., Geisler, D., MacGregor, D. G., Fischhoff, B., Lincoln, D., & Florig, K. (1985). Powerline frequency electric and magnetic fields: A pilot study of risk perception. *Risk Analysis*, *5*(2), 139-149. https://doi.org/10.1111/j.1539-6924.1985.tb00161.x

Mortazavi, S. M., Vazife-Doost, S., Yaghooti, M., Mehdizadeh, S., & Rajaie-Far, A. (2012). Occupational exposure of dentists to electromagnetic fields produced by magnetostrictive cavitrons alters the serum cortisol level. *J Nat Sci Biol Med*, *3*(1), 60-64. https://doi.org/10.4103/0976-9668.95958

Moser, A. (2014, 5.11.2014). *Probleme mit Ausgleichsströmen - ZEP* Weiterbildungskurs für Baufachleute,

Mueller, C. H., Krueger, H., & Schierz, C. (2002). Project NEMESIS: perception of a 50 Hz electric and magnetic field at low intensities (laboratory experiment). *Bioelectromagnetics*, *23*(1), 26-36. https://onlinelibrary.wiley.com/doi/pdfdirect/10.1002/bem.95?download=true

Mueller, C. H., & Schierz, C. (2004). Project NEMESIS: double-blind study on effects of 50Hz EMF on sleep quality, physiological parameters and field perception in people suffering from electrical hypersensitivity. In K. H. e. a. Mild (Ed.), *Electromagnetic Hypersensitivity, WHO, Geneva.*

Muller, S., Meyer, J., & Schegner, P. (2014, 25-28 May 2014). Characterization of small photovoltaic inverters for harmonic modeling. 2014 IEEE 16th International Conference on Harmonics and Quality of Power (ICHQP),

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*(11), 6264-6273. https://doi.org/10.1109/TPEL.2015.2400455

Nakatani-Enomoto, S., Yamazaki, M., Kamimura, Y., Abe, M., Asano, K., Enomoto, H., Wake, K., Watanabe, S., & Ugawa, Y. (2019). Frequency-dependent current perception threshold in healthy Japanese adults. *Bioelectromagnetics*, *40*(3), 150-159. https://doi.org/10.1002/bem.22175

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*(4), 441-450. https://doi.org/10.1161/circulationaha.113.003081

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*(28), 1798-1804. https://doi.org/10.1093/eurheartj/ehv135

National Toxicology Program. (1999). *NTP Toxicology and Carcinogenesis Studies of 60-HZ Magnetic Fields IN F344/N Rats and B6C3F1 Mice (Whole-body Exposure Studies)* (0888-8051 (Print) 0888-8051 (Linking)). (National Toxicology Program technical report series, Issue. https://www.ncbi.nlm.nih.gov/pubmed/12563343

Navas-Acien, A., Pollan, M., Gustavsson, P., Floderus, B., Plato, N., & Dosemeci, M. (2002). Interactive effect of chemical substances and occupational electromagnetic field exposure on the risk of gliomas and meningiomas in Swedish men. *Cancer Epidemiol Biomarkers Prev*, *11*(12), 1678-1683.

Navrud, S., Ready, R. C., Magnussen, K., & Bergland, O. (2008). Valuing the social benefits of avoiding landscape degradation from overhead power transmission lines: Do underground cables pass the benefit-cost test? . *Landscape Research*, *33*(3), 281-296. https://doi.org/10.1080/01426390802045921

Nguyen, D. T., Lee, E. S., Choi, B. G., & Rim, C. T. (2016, 20-24 March 2016). Optimal shaped dipole-coil design and experimental verification of inductive power transfer system for home applications. 2016 IEEE Applied Power Electronics Conference and Exposition (APEC),

Nichols, L., & Sorahan, T. (2005). Mortality of UK electricity generation and transmission workers, 1973-2002. *Occup Med (Lond)*, *55*(7), 541-548. https://doi.org/10.1093/occmed/kqi157

Nicolaou, C. P., Papadakis, A., Razis, P. A., Kyriacou, G. A., & Sahalos, J. N. (2011). Measurements and Predictions of electric and magnetic fields from power lines. *Electric Power Systems Research*, *81*, 1107-1116.

NIEHS. (1999). *Report on Health Effects from Exposure to Power-Line Frequency Electric and Magnetic Fields*. (99-4493). Research Triangle Park, NC: NIEHS

Nikolopoulos, D., Koulougliotis, D., Vogiannis, E., Petraki, E., Panagiotaras, D., Yannakopoulos, P. H., & Kottou, S. (2015). Pilot Electromagnetic Field Measurements in Certain Areas in Greece. *Journal of Physical Chemistry & Biophysics*, *5*(2), 1.

Nishimura, I., Doi, Y., Imai, N., Kawabe, M., Mera, Y., & Shiina, T. (2019). Carcinogenicity of intermediate frequency magnetic field in Tg.rasH2 mice. *Bioelectromagnetics*, *40*(3), 160-169. https://doi.org/10.1002/bem.22177

NRPB. (2004). *Review of the Scientific Evidence for Limiting Exposure to Electromagnetic Fields (0-300 GHz)*.

Oancea, C. D., Calin, F., & Golea, V. (2019). On the Electromagnetic Field in the Surrounding Area of Railway Equipment and Installations. International Conference on Electromechanical and Energy Systems (SIELMEN), Craiova, Romania.

Ohtani, S., Ushiyama, A., Maeda, M., Wada, K., Suzuki, Y., Hattori, K., Kunugita, N., & Ishii, K. (2019). Global Analysis of Transcriptional Expression in Mice Exposed to Intermediate Frequency Magnetic Fields Utilized for Wireless Power Transfer Systems. *International Journal of Environmental Research and Public Health*, *16*(10), e1851. https://doi.org/10.3390/ijerph16101851

Ohtani, S., Ushiyama, A., Wada, K., Suzuki, Y., Ishii, K., & Hattori, K. (2021). No evidence for genotoxicity in mice due to exposure to intermediate-frequency magnetic fields used for wireless power-transfer systems. *Mutation Research - Fundamental and Molecular Mechanism of Mutagenesis*, *863-864*, 503310. https://doi.org/10.1016/j.mrgentox.2021.503310

Okano, H., Fujimura, A., Kondo, T., Laakso, I., Ishiwatari, H., & Watanuki, K. (2021). A 50 Hz magnetic field affects hemodynamics, ECG and vascular endothelial function in healthy adults: A pilot randomized controlled trial. *PLoS One*, *16*(8), e0255242. https://doi.org/10.1371/journal.pone.0255242

Olsen, J. H., Nielsen, A., & Schulgen, G. (1993). Residence near high voltage facilities and risk of cancer in children. *Bmj*, *307*(6909), 891-895. https://www.ncbi.nlm.nih.gov/pmc/articles/PMC1679052/pdf/bmj00042-0015.pdf

Oraby, T., Sivaganesan, S., Bowman, J. D., Kincl, L., Richardson, L., McBride, M., Siemiatycki, J., Cardis, E., & Krewski, D. (2017). Berkson error adjustment and other exposure surrogates in occupational case-control studies, with application to the Canadian INTEROCC study. *J Expo Sci Environ Epidemiol*. https://doi.org/10.1038/jes.2017.2

Osterberg, K., Persson, R., Karlson, B., Carlsson Eek, F., & Orbaek, P. (2007). Personality, mental distress, and subjective health complaints among persons with environmental annoyance. *Hum Exp Toxicol*, *26*(3), 231-241. https://doi.org/10.1177/0960327107070575

OTA. (1989). *Biological Effects of Power Frequency Electric & Magnetic Fields - Background Paper, U.S. Congress, Office of Technology Assessment, OTA-BP-E-53*.

Ozen, S., Helhel, S., & Carlak, H. (2015). Occupational Exposure Assessment of Power Frequency Magnetic Field in 154/31.5 kV Electric Power Substation in Turkey. PIERS Proceedings,

Özgün, A., Marote, A., Behie, L. A., Salgado, A., & Garipcan, B. (2019). Extremely low frequency magnetic field induces human neuronal differentiation through NMDA receptor activation. *Journal of Neural Transmission (Vienna)*, *126*(10), 1281-1290. https://doi.org/10.1007/s00702-019-02045-5

Pakonen, P., Pikkarainen, M., Siddiqui, B., & Verho, P. (2013, 10-13 June 213). Electromagnetic compatibility between electronic loads and automated meter reading systems using PLC. 22nd International Conference and Exhibition on Electricity Distribution (CIRED),

Paniagua, J. M., Rufo, M., Jimenez, A., Antolin, A., & Barbera, J. (2017). Spectral analysis to assess exposure to extremely low frequency magnetic fields in cars. *Sci Total Environ*, *584-585*, 875-881. https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2017.01.134

Paonessa, S., Picariello, W., Bocciolini, L., Zappacosta, C., Di Pascoli, S., Tellini, B., & Macucci, M. (2020). Analysis of the electromagnetic emission of a railway vehicle according to the EN 50121-3-1 standard: a case study. *Proceedings of the 2020 International Symposium on Electromagnetic Compatibility (Emc Europe)*. <Go to ISI>://WOS:000861792600005

Park, S., & Kim, M. (2016). Numerical Exposure Assessment Method for Low Frequency Range and Application to Wireless Power Transfer. *PLoS One*, *11*(11), e0166720. https://doi.org/10.1371/journal.pone.0166720

Park, S., Kim, Y. J., Kim, M. S., Kim, H. S., Kim, M. W., Kang, Y. M., Lee, S. K., Choi, K. C., Kim, N., Gimm, Y. M., & Kim, Y. W. (2018). The effect of 20-week continuous 60 Hz magnetic field exposure on testicular function in sprague-dawley rats. *Bioelectromagnetics*, *39*(7), 539-546. https://doi.org/10.1002/bem.22146

Park, S. K., Ha, M., & Im, H. J. (2004). Ecological study on residences in the vicinity of AM radio broadcasting towers and cancer death: preliminary observations in Korea. *Int Arch Occup Environ Health*, *77*(6), 387-394. https://doi.org/10.1007/s00420-004-0512-7

Parkhill, K., Demski, C., Butler, C., Spence, A., & Pidgeon, N. (2013). *Transforming the UK energy system: Public values, attitudes and acceptability - Synthesis Report*.

Parlett, L. E., Bowman, J. D., & van Wijngaarden, E. (2011). Evaluation of occupational exposure to magnetic fields and motor neuron disease mortality in a population-based cohort. *J Occup Environ Med*, *53*(12), 1447-1451. https://doi.org/10.1097/JOM.0b013e318237a1d0

Parodi, S., Merlo, D. F., Ranucci, A., Miligi, L., Benvenuti, A., Rondelli, R., Magnani, C., & Haupt, R. (2014). Risk of neuroblastoma, maternal characteristics and perinatal exposures: the SETIL study. *Cancer Epidemiol*, *38*(6), 686-694. https://doi.org/10.1016/j.canep.2014.09.007

Patruno, A., Costantini, E., Ferrone, A., Pesce, M., Diomede, F., Trubiani, O., & Reale, M. (2020). Short ELF-EMF Exposure Targets SIRT1/Nrf2/HO-1 Signaling in THP-1 Cells. *International Journal of Molecular Sciences*, *21*(19). https://doi.org/10.3390/ijms21197284

Patruno, A., Ferrone, A., Costantini, E., Franceschelli, S., Pesce, M., Speranza, L., Amerio, P., D'Angelo, C., Felaco, M., Grilli, A., & Reale, M. (2018). Extremely low-frequency electromagnetic fields accelerates wound healing modulating MMP-9 and inflammatory cytokines. *Cell Proliferation*, *51*(2), e12432. https://doi.org/10.1111/cpr.12432

Pedersen, C., Brauner, E. V., Rod, N. H., Albieri, V., Andersen, C. E., Ulbak, K., Hertel, O., Johansen, C., Schuz, J., & Raaschou-Nielsen, O. (2014). Distance to high-voltage power lines and risk of childhood leukemia--an analysis of confounding by and interaction with other potential risk factors. *PLoS One*, *9*(9), e107096. https://doi.org/10.1371/journal.pone.0107096

Pedersen, C., Johansen, C., Schuz, J., Olsen, J. H., & Raaschou-Nielsen, O. (2015). Residential exposure to extremely low-frequency magnetic fields and risk of childhood leukaemia, CNS tumour and lymphoma in Denmark. *Br J Cancer*, *113*(9), 1370-1374. https://doi.org/10.1038/bjc.2015.365

Pedersen, C., Poulsen, A. H., Rod, N. H., Frei, P., Hansen, J., Grell, K., Raaschou-Nielsen, O., Schuz, J., & Johansen, C. (2017). Occupational exposure to extremely low-frequency magnetic fields and risk for central nervous system disease: an update of a Danish cohort study among utility workers. *Int Arch Occup Environ Health*, *90*(7), 619-628. https://doi.org/10.1007/s00420-017-1224-0

Pedersen, C., Raaschou-Nielsen, O., Rod, N. H., Frei, P., Poulsen, A. H., Johansen, C., & Schuz, J. (2014). Distance from residence to power line and risk of childhood leukemia: a population-based case-control study in Denmark. *Cancer Causes Control*, *25*(2), 171-177. https://doi.org/10.1007/s10552-013-0319-5

Perlaviciute, G., & Steg, L. (2014). Contextual and psychological factors shaping evaluations and acceptability of energy alternatives: Integrated review and research agenda. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, *35*, 361-381. - http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S1364032114002305

Peters, E., & Slovic, P. (1996). The Role of Affect and Worldviews as Orienting Dispositions in the Perception and Acceptance of Nuclear Power. *Journal of Applied Social Psychology*, *26*(16), 1427-1453. https://doi.org/10.1111/1559-1816.1996.tb00079.x

Peters, S., Visser, A. E., D'Ovidio, F., Beghi, E., Chio, A., Logroscino, G., Hardiman, O., Kromhout, H., Huss, A., Veldink, J., Vermeulen, R., van den Berg, L. H., & Euro, M. C. (2019). Associations of Electric Shock and Extremely Low-Frequency Magnetic Field Exposure With the Risk of Amyotrophic Lateral Sclerosis. *Am J Epidemiol*, *188*(4), 796-805. https://doi.org/10.1093/aje/kwy287

Pidgeon, N., & Demski, C. C. (2012). From nuclear to renewable: Energy system transformation and public attitudes [Article]. *Bulletin of the Atomic Scientists*, *68*(4), 41-51. https://doi.org/10.1177/0096340212451592

Pinto, R., Bertoluzzo, M., Lopresto, V., Mancini, S., Merla, C., Pede, G., Genovese, A., & Buja, G. (2015, 13-17 May 2015). Exposure assessment of stray electromagnetic fields generated by a wireless power transfer system. 2015 9th European Conference on Antennas and Propagation (EuCAP),

Piras, C., Conte, S., Pibiri, M., Rao, G., Muntoni, S., Leoni, V. P., Finco, G., & Atzori, L. (2020). Metabolomics and psychological features in fibromyalgia and electromagnetic sensitivity. *Sci Rep*, *10*(1), 20418. https://doi.org/10.1038/s41598-020-76876-8

Piszczek, P., Wójcik-Piotrowicz, K., Gil, K., & Kaszuba-Zwoińska, J. (2021). Immunity and electromagnetic fields [Review]. *Environ Res*, *200*, 111505. https://doi.org/10.1016/j.envres.2021.111505

Pollan, M., Gustavsson, P., & Floderus, B. (2001). Breast cancer, occupation, and exposure to electromagnetic fields among Swedish men. *Am J Ind Med*, *39*(3), 276-285. https://onlinelibrary.wiley.com/doi/pdfdirect/10.1002/1097-0274%28200103%2939%3A3%3C276%3A%3AAID-AJIM1015%3E3.0.CO%3B2-B?download=true

Pooam, M., Arthaut, L. D., Burdick, D., Link, J., Martino, C. F., & Ahmad, M. (2019). Magnetic sensitivity mediated by the Arabidopsis blue-light receptor cryptochrome occurs during flavin reoxidation in the dark. *Planta*, *249*(2), 319-332. https://doi.org/10.1007/s00425-018-3002-y

Pooam, M., Jourdan, N., El Esawi, M., Sherrard, R. M., & Ahmad, M. (2020). HEK293 cell response to static magnetic fields via the radical pair mechanism may explain therapeutic effects of pulsed electromagnetic fields. *PLoS One*, *15*(12), e0243038. https://doi.org/10.1371/journal.pone.0243038

Poortinga, W., Cox, P., & Pidgeon, N. F. (2008). The perceived health risks of indoor radon gas and overhead powerlines: A comparative multilevel approach. *Risk Analysis*, *28*(1), 235-248. https://doi.org/10.1111/j.1539-6924.2008.01015.x

Porsius, J. T., Claassen, L., Smid, T., Woudenberg, F., Petrie, K. J., & Timmermans, D. R. (2015). Symptom reporting after the introduction of a new high-voltage power line: a prospective field study. *Environ Res*, *138*, 112-117. https://doi.org/10.1016/j.envres.2015.02.009

Porsius, J. T., Claassen, L., Smid, T., Woudenberg, F., & Timmermans, D. R. (2014). Health responses to a new high-voltage power line route: design of a quasi-experimental prospective

field study in the Netherlands. *BMC Public Health*, *14*, 237. https://doi.org/10.1186/1471-2458-14-237

Porsius, J. T., Claassen, L., Weijland, P. E., & Timmermans, D. R. M. (2016). “They give you lots of information, but ignore what it's really about”: Residents' experiences with the planned introduction of a new high-voltage power line. *Journal of Environmental Planning and Management*, *59*(8), 1495-1512. https://doi.org/10.1080/09640568.2015.1080672

Porsius, J. T., Claassen, L., Woudenberg, F., Smid, T., & Timmermans, D. R. (2016). Nocebo responses to high-voltage power lines: Evidence from a prospective field study. *Sci Total Environ*, *543*(Pt A), 432-438. https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2015.11.038

Porsius, J. T., Claassen, L., Woudenberg, F., Smid, T., & Timmermans, D. R. M. (2017). “These Power Lines Make Me Ill”: A Typology of Residents’ Health Responses to a New High-Voltage Power Line. *Risk Analysis*, n/a-n/a. https://doi.org/10.1111/risa.12786

Preston-Martin, S., Navidi, W., Thomas, D., Lee, P. J., Bowman, J., & Pogoda, J. (1996). Los Angeles study of residential magnetic fields and childhood brain tumors. *Am J Epidemiol*, *143*(2), 105-119.

Provenzano, A. E., Amatori, S., Nasoni, M. G., Persico, G., Russo, S., Mastrogiacomo, A. R., Gambarara, A., & Fanelli, M. (2018). Effects of Fifty-Hertz Electromagnetic Fields on Granulocytic Differentiation of ATRA-Treated Acute Promyelocytic Leukemia NB4 Cells. *Cellular Physiology and Biochemistry*, *46*(1), 389-400. https://doi.org/10.1159/000488473

Rahimpour, S., Kiyani, M., Hodges, S. E., & Turner, D. A. (2021). Deep brain stimulation and electromagnetic interference. *Clin Neurol Neurosurg*, *203*, 106577. https://doi.org/10.1016/j.clineuro.2021.106577

Raj, A., Lee, C., & Sidek, M. (2020). Protection against EMF at Transmission Line and Tower. 2020 IEEE International Conference on Power and Energy (PECon),

Ramadan, L. A., Abd-Allah, A. R., Aly, H. A., & Saad-el-Din, A. A. (2002). Testicular toxicity effects of magnetic field exposure and prophylactic role of coenzyme Q10 and L-carnitine in mice. *Pharmacol Res*, *46*(4), 363-370. https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S1043661802001718?via%3Dihub

Rathebe, P. C., & Mbonane, T. P. (2018). Emission levels of ELF magnetic fields from 132 kV distribution substations. IEEE 4th Global Electromagnetic Compatibility Conference (GEMCCON), Stellenbosch, South Africa.

Rauš Balind, S., Manojlović-Stojanoski, M., Šošić-Jurjević, B., Selaković, V., Milošević, V., & Petković, B. (2020). An Extremely Low Frequency Magnetic Field and Global Cerebral Ischemia Affect Pituitary ACTH and TSH Cells in Gerbils. *Bioelectromagnetics*, *41*(2), 91-103. https://doi.org/10.1002/bem.22237

Regel, S. J., Negovetic, S., Roosli, M., Berdinas, V., Schuderer, J., Huss, A., Lott, U., Kuster, N., & Achermann, P. (2006). UMTS base station-like exposure, well-being, and cognitive performance. *Environ Health Perspect*, *114*(8), 1270-1275. https://www.ncbi.nlm.nih.gov/pmc/articles/PMC1552030/pdf/ehp0114-001270.pdf

Reid, A., Glass, D. C., Bailey, H. D., Milne, E., de Klerk, N. H., Downie, P., & Fritschi, L. (2011). Risk of childhood acute lymphoblastic leukaemia following parental occupational exposure to extremely low frequency electromagnetic fields. *Br J Cancer*, *105*(9), 1409-1413. https://doi.org/10.1038/bjc.2011.365

Reilly, J. P., & Hirata, A. (2016). Low-frequency electrical dosimetry: research agenda of the IEEE International Committee on Electromagnetic Safety. *Phys Med Biol*, *61*(12), R138-r149. https://doi.org/10.1088/0031-9155/61/12/r138

Reinemann, D. J. (2008). *Literature Review and Synthesis of Research Findings on the Impact of Stray Voltage on Farm Operations*.

Ren, Y., Chen, J., Miao, M., Li, D. K., Liang, H., Wang, Z., Yang, F., Sun, X., & Yuan, W. (2019). Prenatal exposure to extremely low frequency magnetic field and its impact on fetal growth. *Environ Health*, *18*(1), 6. https://doi.org/10.1186/s12940-019-0447-9

Renn, O., Webler, T., & Kastenholz, H. (1996). Procedural and substantive fairness in landfill siting: A Swiss case study. *Risk: Health, Safety & Environment*, *7*(2), 145-168.

Riancho, J., Sanchez de la Torre, J. R., Paz-Fajardo, L., Limia, C., Santurtun, A., Cifra, M., Kourtidis,

K., & Fdez-Arroyabe, P. (2021). The role of magnetic fields in neurodegenerative diseases. *International Journal of Biometeorology*, *65*(1), 107-117. https://doi.org/10.1007/s00484-020-01896-y

Richman, R., Munroe, A. J., & Siddiqui, Y. (2014). A pilot neighborhood study towards establishing a benchmark for reducing electromagnetic field levels within single family residential dwellings. *Sci Total Environ*, *466-467*, 625-634. https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2013.07.010

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*(4), 245-250. https://doi.org/10.1002/bem.21850

Ronkainen, T., Vuohtoniemi, R., & Makela, J. P. (2014). Radiated Interference of High Frequency Broadband Power Line Communications. *2014 International Symposium on Electromagnetic Compatibility (Emc Europe)*, 555-559. <Go to ISI>://WOS:000364988600102

Roosli, M., Egger, M., Pfluger, D., & Minder, C. (2008). Cardiovascular mortality and exposure to extremely low frequency magnetic fields: a cohort study of Swiss railway workers. *Environ Health*, *7*, 35. https://doi.org/10.1186/1476-069x-7-35

Roosli, M., Foerster, M., Roser, K., Schöni, A., Urbinello, D., & Struchen, B. (2015). *Stichprobenkonzept für Messungen der nicht-ionisierenden Strahlung mit Exposimetern*.

Roosli, M., & Jalilian, H. (2018). A meta-analysis on residential exposure to magnetic fields and the risk of amyotrophic lateral sclerosis. *Rev Environ Health*, *33*(3), 309-313. https://doi.org/10.1515/reveh-2018-0019

Roosli, M., Jenni, D., Kheifets, L., & Mezei, G. (2011). Extremely low frequency magnetic field measurements in buildings with transformer stations in Switzerland. *Sci Total Environ*, *409*(18), 3364-3369. https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2011.05.041

Roosli, M., Lortscher, M., Egger, M., Pfluger, D., Schreier, N., Lortscher, E., Locher, P., Spoerri, A., & Minder, C. (2007a). Leukaemia, brain tumours and exposure to extremely low frequency magnetic fields: cohort study of Swiss railway employees. *Occup Environ Med*, *64*(8), 553-559. https://doi.org/10.1136/oem.2006.030270

Roosli, M., Lortscher, M., Egger, M., Pfluger, D., Schreier, N., Lortscher, E., Locher, P., Spoerri, A., & Minder, C. (2007b). Mortality from neurodegenerative disease and exposure to extremely low-frequency magnetic fields: 31 years of observations on Swiss railway employees. *Neuroepidemiology*, *28*(4), 197-206. https://doi.org/10.1159/000108111

Roosli, M., Moser, M., Baldinini, Y., Meier, M., & Braun-Fahrlander, C. (2004). Symptoms of ill health ascribed to electromagnetic field exposure--a questionnaire survey. *Int J Hyg Environ Health*, *207*(2), 141-150. https://doi.org/10.1078/1438-4639-00269

Roosli, M., Struchen, B., & Urbinello, D. (2014). Unsichtbare Wellen: wie die Emissionen der mobilen Kommunikation und des Stroms unsere Gesundheit beeinflussen. *Mitteilungen der Naturforschenden Gesellschaft beider Basel*, *15*, 11-22.

Röösli, M. e. (2014). Epidemiology of Electromagnetic Fields. *CRC Press, Taylor and Francis*.

Rosenbaum, P. F., Vena, J. E., Zielezny, M. A., & Michalek, A. M. (1994). Occupational exposures associated with male breast cancer. *Am J Epidemiol*, *139*(1), 30-36.

Ruan, G., Liu, X., Zhang, Y., Wan, B., Zhang, J., Lai, J., He, M., & Chen, C. (2019). Power-frequency magnetic fields at 50 Hz do not affect fertility and development in rats and mice. *Electromagn Biol Med*, *38*(1), 111-122. https://doi.org/10.1080/15368378.2018.1545664

Rubin, G. J., Das Munshi, J., & Wessely, S. (2005). Electromagnetic hypersensitivity: a systematic review of provocation studies. *Psychosom Med*, *67*(2), 224-232. https://doi.org/10.1097/01.psy.0000155664.13300.64

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*(8), 593-609. https://doi.org/10.1002/bem.20690

Ryan, S. E., Hebdon, C., & Dafoe, J. (2014). Energy research and the contributions of the social sciences: A contemporary examination. *Energy Research & Social Science*, *3*(0), 186-197. - http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S2214629614000905

Sadeghi, T., Ahmadi, A., Javadian, M., Gholamian, S. A., Delavar, M. A., Esmailzadeh, S., Ahmadi, B., & Hadighi, M. S. H. (2017). Preterm birth among women living within 600 meters of high voltage overhead Power Lines: a case-control study. *Rom J Intern Med*, *55*(3), 145-150. https://doi.org/10.1515/rjim-2017-0017

Sage, C., Carpenter, D., & Hardell, L. (2015). Comments on SCENIHR: Opinion on potential health effects of exposure to electromagnetic fields, bioelectromagnetics 36:480-484 (2015). *Bioelectromagnetics*. https://doi.org/10.1002/bem.21949

Said, I., Hussain, H. B., & Dave, V. (2010). Characterization of magnetic field at distribution substations. 9th International Conference on Environment and Electrical Engineering, Prague, Czech Republic.

Saito, T., Nitta, H., Kubo, O., Yamamoto, S., Yamaguchi, N., Akiba, S., Honda, Y., Hagihara, J., Isaka, K., Ojima, T., Nakamura, Y., Mizoue, T., Ito, S., Eboshida, A., Yamazaki, S., Sokejima, S., Kurokawa, Y., & Kabuto, M. (2010). Power-frequency magnetic fields and childhood brain tumors: a case-control study in Japan. *J Epidemiol*, *20*(1), 54-61. https://www.ncbi.nlm.nih.gov/pmc/articles/PMC3900780/pdf/je-20-054.pdf

Salvan, A., Ranucci, A., Lagorio, S., & Magnani, C. (2015). Childhood leukemia and 50 Hz magnetic fields: findings from the Italian SETIL case-control study. *Int J Environ Res Public Health*, *12*(2), 2184-2204. https://doi.org/10.3390/ijerph120202184

Santibanez, M., Bolumar, F., & Garcia, A. M. (2007). Occupational risk factors in Alzheimer's disease: a review assessing the quality of published epidemiological studies. *Occup Environ Med*, *64*(11), 723-732. https://doi.org/10.1136/oem.2006.028209

Santini, S. J., Cordone, V., Falone, S., Mijit, M., Tatone, C., Amicarelli, F., & Di Emidio, G. (2018). Role of Mitochondria in the Oxidative Stress Induced by Electromagnetic Fields: Focus on Reproductive Systems [Review]. *Oxidative Medicine and Cellular Longevity*, *2018*, 5076271. https://doi.org/10.1155/2018/5076271

Sastre, A., Cook, M. R., & Graham, C. (1998). Nocturnal exposure to intermittent 60 Hz magnetic fields alters human cardiac rhythm. *Bioelectromagnetics*, *19*(2), 98-106. https://onlinelibrary.wiley.com/doi/pdfdirect/10.1002/%28SICI%291521-186X%281998%2919%3A2%3C98%3A%3AAID-BEM7%3E3.0.CO%3B2-Z?download=true

Savitz, D. A., & Loomis, D. P. (1995). Magnetic field exposure in relation to leukemia and brain cancer mortality among electric utility workers. *Am J Epidemiol*, *141*(2), 123-134.

Savitz, D. A., Wachtel, H., Barnes, F. A., John, E. M., & Tvrdik, J. G. (1988). Case-control study of childhood cancer and exposure to 60-Hz magnetic fields. *Am J Epidemiol*, *128*(1), 21-38.

SCENIHR. (2015). *Potential Health Effects of Exposure to Electromagnetic Fields (EMF)*.

Schmautzer, E., Propst, G., & Graz, K. F. (2010). The effect of reduction conductors on the magnetic field of electrified railway systems near hospitals. Electrical Systems for Aircraft, Railway and Ship Propulsion, Bologna, Italy.

Schmid, G., & Hirtl, R. (2016). On the importance of body posture and skin modelling with respect to in situ electric field strengths in magnetic field exposure scenarios. *Phys Med Biol*, *61*(12), 4412-4437. https://doi.org/10.1088/0031-9155/61/12/4412

Schmiedchen, K., Driessen, S., & Oftedal, G. (2019). Methodological limitations in experimental studies on symptom development in individuals with idiopathic environmental intolerance attributed to electromagnetic fields (IEI-EMF) - a systematic review. *Environ Health*, *18*(1), 88. https://doi.org/10.1186/s12940-019-0519-x

Schneider, M., Favre, P., & Rubinstein, M. (2004). *EMC analysis of powerline systems. Final report.*

Schrafel, P. C., Long, B. R., Miller, J. M., & Daga, A. (2016, 4-6 Oct. 2016). The reality of safety concerns relative to WPT systems for automotive applications. 2016 IEEE PELS Workshop on Emerging Technologies: Wireless Power Transfer (WoW),

Schreier, N., Huss, A., & Roosli, M. (2006a). The prevalence of symptoms attributed to electromagnetic field exposure: a cross-sectional representative survey in Switzerland. *Sozial- und Präventivmedizin*, *51*(4), 202-209. https://doi.org/10.1007/s00038-006-5061-2

Schreier, N., Huss, A., & Roosli, M. (2006b). The prevalence of symptoms attributed to electromagnetic field exposure: a cross-sectional representative survey in Switzerland. *Soz Praventivmed*, *51*(4), 202-209. https://doi.org/10.1007/s00038-006-5061-2

Schrottner, J., & Leitgeb, N. (2008). Sensitivity to electricity--temporal changes in Austria. *BMC Public Health*, *8*, 310. https://doi.org/10.1186/1471-2458-8-310

Schuermann, D., & Mevissen, M. (2021). Manmade Electromagnetic Fields and Oxidative Stress - Biological Effects and Consequences for Health [Review]. *International Journal of Molecular Sciences*, *22*(7), 3772. https://doi.org/10.3390/ijms22073772

Schuz, J. (2011). Exposure to extremely low-frequency magnetic fields and the risk of childhood cancer: update of the epidemiological evidence. *Prog Biophys Mol Biol*, *107*(3), 339-342. https://doi.org/10.1016/j.pbiomolbio.2011.09.008

Schuz, J. (2013). Commentary: power lines and cancer in adults: settling a long-standing debate? *Epidemiology*, *24*(2), 191-192. https://doi.org/10.1097/EDE.0b013e31828216cd

Schuz, J., Dasenbrock, C., Ravazzani, P., Roosli, M., Schar, P., Bounds, P. L., Erdmann, F., Borkhardt, A., Cobaleda, C., Fedrowitz, M., Hamnerius, Y., Sanchez-Garcia, I., Seger, R., Schmiegelow, K., Ziegelberger, G., Capstick, M., Manser, M., Muller, M., Schmid, C. D., Schurmann, D., Struchen, B., & Kuster, N. (2016). Extremely low-frequency magnetic fields and risk of childhood leukemia: A risk assessment by the ARIMMORA consortium. *Bioelectromagnetics*. https://doi.org/10.1002/bem.21963

Schuz, J., Grell, K., Kinsey, S., Linet, M. S., Link, M. P., Mezei, G., Pollock, B. H., Roman, E., Zhang, Y., McBride, M. L., Johansen, C., Spix, C., Hagihara, J., Saito, A. M., Simpson, J., Robison, L. L., Dockerty, J. D., Feychting, M., Kheifets, L., & Frederiksen, K. (2012). Extremely low-frequency magnetic fields and survival from childhood acute lymphoblastic leukemia: an international follow-up study. *Blood Cancer J*, *2*, e98. https://doi.org/10.1038/bcj.2012.43

Schuz, J., Grigat, J. P., Brinkmann, K., & Michaelis, J. (2001). Residential magnetic fields as a risk factor for childhood acute leukaemia: results from a German population-based case-control study. *Int J Cancer*, *91*(5), 728-735. https://onlinelibrary.wiley.com/doi/pdfdirect/10.1002/1097-0215%28200002%299999%3A9999%3C%3A%3AAID-IJC1097%3E3.0.CO%3B2-D?download=true

Schuz, J., Kaletsch, U., Kaatsch, P., Meinert, R., & Michaelis, J. (2001). Risk factors for pediatric tumors of the central nervous system: results from a German population-based case-control study. *Med Pediatr Oncol*, *36*(2), 274-282. https://doi.org/10.1002/1096-911x(20010201)36:2<274::aid-mpo1065>3.0.co;2-d

Schuz, J., Petters, C., Egle, U. T., Jansen, B., Kimbel, R., Letzel, S., Nix, W., Schmidt, L. G., & Vollrath, L. (2006). The "Mainzer EMF-Wachhund": results from a watchdog project on self-reported health complaints attributed to exposure to electromagnetic fields. *Bioelectromagnetics*, *27*(4), 280-287. https://doi.org/10.1002/bem.20212

Schweiz, A. d. W. (2012). *Zukunft Stromversorgung Schweiz*. A. d. W. Schweiz.

Schweizer-Ries, P. (2010). *Abschlussbericht: Umweltpsychologische Untersuchung der Akzeptanz von Massnahmen zur Netzintegration Erneuerbarer Energien in der Region Wahle-Mecklar (Niedersachsen und Hessen)*.

Seckler, T., Stunder, D., Schikowsky, C., Joosten, S., Zink, M. D., Kraus, T., Marx, N., & Napp, A. (2016). Effect of lead position and orientation on electromagnetic interference in patients with bipolar cardiovascular implantable electronic devices. *Europace*. https://doi.org/10.1093/europace/euv458

Seelen, M., Vermeulen, R. C., van Dillen, L. S., van der Kooi, A. J., Huss, A., de Visser, M., van den Berg, L. H., & Veldink, J. H. (2014). Residential exposure to extremely low frequency electromagnetic fields and the risk of ALS. *Neurology*, *83*(19), 1767-1769. https://doi.org/10.1212/wnl.0000000000000952

Seidler, A., Geller, P., Nienhaus, A., Bernhardt, T., Ruppe, I., Eggert, S., Hietanen, M., Kauppinen, T., & Frolich, L. (2007). Occupational exposure to low frequency magnetic fields and dementia: a case-control study. *Occup Environ Med*, *64*(2), 108-114. https://doi.org/10.1136/oem.2005.024190

Selmaoui, B., Lambrozo, J., Sackett-Lundeen, L., Haus, E., & Touitou, Y. (2011). Acute exposure to 50-Hz magnetic fields increases interleukin-6 in young healthy men. *J Clin Immunol*, *31*(6), 1105-1111. https://doi.org/10.1007/s10875-011-9558-y

Seomun, G., Lee, J., & Park, J. (2021). Exposure to extremely low-frequency magnetic fields and

childhood cancer: A systematic review and meta-analysis. *PLoS One*, *16*(5), e0251628. https://doi.org/10.1371/journal.pone.0251628

Sermage-Faure, C., Demoury, C., Rudant, J., Goujon-Bellec, S., Guyot-Goubin, A., Deschamps, F., Hemon, D., & Clavel, J. (2013). Childhood leukaemia close to high-voltage power lines--the Geocap study, 2002-2007. *Br J Cancer*, *108*(9), 1899-1906. https://doi.org/10.1038/bjc.2013.128

Seymenliyski, K., Zaerov, E., Simionov, R., & Letskovska, S. (2018). Reducing the Environmental Impact of Electrical Installations. International Conference on High Technology for Sustainable Development (HiTech), Sofia, Bulgaria.

Shah, S. C., Boffetta, P., Johnson, K. C., Hu, J., Palli, D., Ferraroni, M., Tsugane, S., Hamada, G. S., Hidaka, A., Zaridze, D., Maximovich, D., Vioque, J., Navarrete-Munoz, E. M., Zhang, Z. F., Mu, L., Boccia, S., Pastorino, R., Kurtz, R. C., Rota, M., Bonzi, R., Negri, E., La Vecchia, C., Pelucchi, C., & Hashim, D. (2020). Occupational exposures and odds of gastric cancer: a StoP project consortium pooled analysis. *Int J Epidemiol*, *49*(2), 422-434. https://doi.org/10.1093/ije/dyz263

Shalamanova, T., Israel, M., Ivanova, M., & Zaryabova, V. (2015). Exposure assessment of magnetic field in dwellings with built-in transformers in Bulgaria. *Science*, *3*(1), 101-106.

Shamsi Mahmoudabadi, F., Ziaei, S., Firoozabadi, M., & Kazemnejad, A. (2013). Exposure to extremely low frequency electromagnetic fields during pregnancy and the risk of spontaneous abortion: a case-control study. *J Res Health Sci*, *13*(2), 131-134. http://jrhs.umsha.ac.ir/index.php/JRHS/article/view/848/

Sharpton, T., Lawrence, T., & Hall, M. (2020). Drivers and barriers to public acceptance of future energy sources and grid expansion in the United States. *Renewable & Sustainable Energy Reviews*, *126*. https://doi.org/10.1016/j.rser.2020.109826

Sheppard, D. M., Li, J., Henbest, K. B., Neil, S. R., Maeda, K., Storey, J., Schleicher, E., Biskup, T., Rodriguez, R., Weber, S., Hore, P. J., Timmel, C. R., & Mackenzie, S. R. (2017). Millitesla magnetic field effects on the photocycle of an animal cryptochrome. *Sci Rep*, *7*, 42228. https://doi.org/10.1038/srep42228

Sherrard, R. M., Morellini, N., Jourdan, N., El-Esawi, M., Arthaut, L. D., Niessner, C., Rouyer, F., Klarsfeld, A., Doulazmi, M., Witczak, J., d'Harlingue, A., Mariani, J., McLure, I., Martino, C. F., & Ahmad, M. (2018). Low-intensity electromagnetic fields induce human cryptochrome to modulate intracellular reactive oxygen species. *PLoS Biol*, *16*(10), e2006229. https://doi.org/10.1371/journal.pbio.2006229

Shijo, T., Ogawa, K., Suzuki, M., Kanekiyo, Y., Ishida, M., & Obayashi, S. (2016, 18-22 Sept. 2016). EMI reduction technology in 85 kHz band 44 kW wireless power transfer system for rapid contactless charging of electric bus. 2016 IEEE Energy Conversion Congress and Exposition (ECCE),

Siegrist, M., & Cvetkovich, G. (2000). Perception of hazards: The role of social trust and knowledge. *Risk Analysis*, *20*, 713-719. https://onlinelibrary.wiley.com/doi/pdfdirect/10.1111/0272-4332.205064?download=true

Siegrist, M., Sütterlin, B., & Keller, C. (2014). Why have some people changed their attitudes toward nuclear power after the accident in Fukushima? . *Energy Policy*, *69*(0), 356-363. - http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0301421514001153

Siegrist, M., & Visschers, V. H. M. (2013). Acceptance of nuclear power: The Fukushima effect. *Energy Policy*, *59*(0), 112-119. - http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0301421512006453

Simko, M., Remondini, D., Zeni, O., & Scarfi, M. R. (2016). Quality Matters: Systematic Analysis of Endpoints Related to "Cellular Life" in Vitro Data of Radiofrequency Electromagnetic Field Exposure. *International Journal of Environmental Research and Public Health*, *13*(7). https://doi.org/10.3390/ijerph13070701

Simora, M., Frondel, M., & Vance, C. (2020). Do financial incentives increase the acceptance of power lines? Evidence from Germany. *Regional Science and Urban Economics,*, *85*(103575). https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.regsciurbeco.2020.103575

Slovic, P. (1987). Perception of risk. *Science*, *236*(4799), 280-285.

https://doi.org/10.1126/science.3563507
Slovic, P. (1993). Perceived risk, trust and democracy. *Risk Analysis*, *13*(6), 675-682.
Slovic, P., Finucane, M. L., Peters, E., & MacGregor, D. G. (2004). Risk as analysis and risk as feelings: Some thoughts about affect, reason, risk, and rationality. *Risk Analysis*, *24*, 311-322. https://onlinelibrary.wiley.com/doi/pdfdirect/10.1111/j.0272-4332.2004.00433.x?download=true
Sobhanifard, M., Eftekharian, M. M., Solgi, G., Nikzad, S., Salehi, I., Ghazikhanlou Sani, K., Ganji, M., & Zamani, A. (2019). Effect of Extremely Low Frequency Electromagnetic Fields on Expression of T-bet and GATA-3 Genes and Serum Interferon-γ and Interleukin-4. *Journal of Interferon & Cytokine Research: The Official Journal of the International Society for Interferon and Cytokine Research*, *39*(2), 125-131. https://doi.org/10.1089/jir.2018.0105
Soffritti, M., & Giuliani, L. (2019). The carcinogenic potential of non-ionizing radiations: The cases of S-50 Hz MF and 1.8 GHz GSM radiofrequency radiation [Review]. *Basic & Clinical Pharmacology & Toxicology*, *125*, 58-69. https://doi.org/10.1111/bcpt.13215
Soffritti, M., Tibaldi, E., Padovani, M., Hoel, D. G., Giuliani, L., Bua, L., Lauriola, M., Falcioni, L., Manservigi, M., Manservisi, F., & Belpoggi, F. (2016). Synergism between sinusoidal-50 Hz magnetic field and formaldehyde in triggering carcinogenic effects in male Sprague-Dawley rats. *American Journal of Industrial Medicine*, *59*(7), 509-521. https://doi.org/10.1002/ajim.22598
Soffritti, M., Tibaldi, E., Padovani, M., Hoel, D. G., Giuliani, L., Bua, L., Lauriola, M., Falcioni, L., Manservigi, M., Manservisi, F., Panzacchi, S., & Belpoggi, F. (2016). Life-span exposure to sinusoidal-50 Hz magnetic field and acute low-dose gamma radiation induce carcinogenic effects in Sprague-Dawley rats. *Int J Radiat Biol*, *92*(4), 202-214. https://doi.org/10.3109/09553002.2016.1144942
Sohrabi, M. R., Tarjoman, T., Abadi, A., & Yavari, P. (2010). Living near overhead high voltage transmission power lines as a risk factor for childhood acute lymphoblastic leukemia: a case-control study. *Asian Pac J Cancer Prev*, *11*(2), 423-427.
Soini, K., Pouta, E., Salmiovirta, M., Uusitalo, M., & Kivinen, T. (2011). Local residents' perceptions of energy landscape: The case of transmission lines. *Land Use Policy*, *28*(1), 294-305. - http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0264837710000712
Sorahan, T. (2012). Cancer incidence in UK electricity generation and transmission workers, 1973-2008. *Occup Med (Lond)*, *62*(7), 496-505. https://doi.org/10.1093/occmed/kqs152
Sorahan, T. (2014). Magnetic fields and brain tumour risks in UK electricity supply workers. *Occup Med (Lond)*, *64*(3), 157-165. https://doi.org/10.1093/occmed/kqu003
Sorahan, T., & Kheifets, L. (2007). Mortality from Alzheimer's, motor neuron and Parkinson's disease in relation to magnetic field exposure: findings from the study of UK electricity generation and transmission workers, 1973-2004. *Occup Environ Med*, *64*(12), 820-826. https://doi.org/10.1136/oem.2006.031559
Sorahan, T., & Mohammed, N. (2014). Neurodegenerative disease and magnetic field exposure in UK electricity supply workers. *Occup Med (Lond)*, *64*(6), 454-460. https://doi.org/10.1093/occmed/kqu105
Sorahan, T., & Nichols, L. (2022). Motor neuron disease risk and magnetic field exposures. *Occup Med (Lond)*, *72*(3), 184-190. https://doi.org/10.1093/occmed/kqab180
Sorahan, T., Nichols, L., van Tongeren, M., & Harrington, J. M. (2001). Occupational exposure to magnetic fields relative to mortality from brain tumours: updated and revised findings from a study of United Kingdom electricity generation and transmission workers, 1973-97. *Occup Environ Med*, *58*(10), 626-630. https://www.ncbi.nlm.nih.gov/pmc/articles/PMC1740052/pdf/v058p00626.pdf
Sorahan, T. M. (2019). Cancer incidence in UK electricity generation and transmission workers, 1973-2015. *Occup Med (Lond)*, *69*(5), 342-351. https://doi.org/10.1093/occmed/kqz082
Souques, M., Magne, I., & Lambrozo, J. (2011). Implantable cardioverter defibrillator and 50-Hz electric and magnetic fields exposure in the workplace. *Int Arch Occup Environ Health*, *84*(1), 1-6. https://doi.org/10.1007/s00420-010-0599-y
Sovacool, B. K. (2014). What are we doing here? Analyzing fifteen years of energy scholarship and proposing a social science research agenda. *Energy Research & Social Science*, *1*(0), 1-29.

https://doi.org/10.1016/j.erss.2014.02.003
SSK. (2011). *Vergleichende Bewertung der Evidenz von Krebsrisiken durch elektromagnetische Felder und Strahlungen*.
SSK. (2013). *Elektromagnetische Felder neuer Technologien*.
SSM. (2013). *8th report from SSM's scientific council on electromagnetic fields*.
SSM. (2016). *Recent Research on EMF and Health Risk - Eleventh report from SSM's Scientific Council on Electromagnetic Fields, 2016* (SSM2016-2080).
SSM. (2022). *Recent Research on EMF and Health Risk - Sixteenth report from SSM's Scientific Council on Electromagnetic Fields, 2021*. https://www.stralsakerhetsmyndigheten.se/publikationer/rapporter/stralskydd/2022/202216/
Stadelmann-Steffen, I. (2019). Bad news is bad news: Information effects and citizens' socio-political acceptance of new technologies of electricity transmission. *Land Use Policy*, *81*, 531-545. https://doi.org/10.1016/j.landusepol.2018.11.022
Stadelmann-Steffen, I., & Dermont, C. (2021). Acceptance through inclusion? Political and economic participation and the acceptance of local renewable energy projects in Switzerland. *Energy Research & Social Science*, *71*. https://doi.org/10.1016/j.erss.2020.101818
Stam, R. (2014). The revised electromagnetic fields directive and worker exposure in environments with high magnetic flux densities. *Ann Occup Hyg*, *58*(5), 529-541. https://doi.org/10.1093/annhyg/meu010
Stampfer, M. J. (2009). Welding occupations and mortality from Parkinson's disease and other neurodegenerative diseases among United States men, 1985-1999. *J Occup Environ Hyg*, *6*(5), 267-272. https://doi.org/10.1080/15459620902754703
Stang, A., Anastassiou, G., Ahrens, W., Bromen, K., Bornfeld, N., & Jockel, K. H. (2001). The possible role of radiofrequency radiation in the development of uveal melanoma. *Epidemiology*, *12*(1), 7-12.
Stang, A., Schmidt-Pokrzywniak, A., Lash, T. L., Lommatzsch, P. K., Taubert, G., Bornfeld, N., & Jockel, K. H. (2009). Mobile phone use and risk of uveal melanoma: results of the risk factors for uveal melanoma case-control study. *J Natl Cancer Inst*, *101*(2), 120-123. https://doi.org/10.1093/jnci/djn441
Stankowski, S., Kessi, A., Becheiraz, O., Meier-Engel, K., & Meier, M. (2006). Low frequency magnetic fields induced by car tire magnetization. *Health Phys*, *90*(2), 148-153.
Stenlund, C., & Floderus, B. (1997). Occupational exposure to magnetic fields in relation to male breast cancer and testicular cancer: a Swedish case-control study. *Cancer Causes Control*, *8*(2), 184-191.
Stratmann, M., Wernli, C., Kreuter, U., & Joss, S. (1995). *Messung der Belastung der Schweizer Bevölkerung durch 50 Hz Magnetfelder*.
Strazzera, E., Mura, M., & Contu, D. (2012). Combining choice experiments with psychometric scales to assess the social acceptability of wind energy projects: A latent class approach. *Energy Policy*, *48*, 334-347.
Struchen, B., Liorni, I., Parazzini, M., Gangler, S., Ravazzani, P., & Roosli, M. (2015). Analysis of personal and bedroom exposure to ELF-MFs in children in Italy and Switzerland. *J Expo Sci Environ Epidemiol*. https://doi.org/10.1038/jes.2015.80
Struchen, B., Liorni, I., Parazzini, M., Gängler, S., Ravazzani, P., & Röösli, M. (2015). Analysis of personal and bedroom exposure to ELF-MFs in children in Italy and Switzerland. *Journal of Exposure Science and Environmental Epidemiology*.
Su, L., Fei, Y., Wei, X., Guo, J., Jiang, X., Lu, L., & Chen, G. (2016). Associations of parental occupational exposure to extremely low-frequency magnetic fields with childhood leukemia risk. *Leuk Lymphoma*, 1-8. https://doi.org/10.3109/10428194.2016.1165812
Su, L., Yimaer, A., Wei, X., Xu, Z., & Chen, G. (2017). The effects of 50 Hz magnetic field exposure on DNA damage and cellular functions in various neurogenic cells. *Journal of Radiation Research*, *58*(4), 474-486. https://doi.org/10.1093/jrr/rrx012
Su, L., Zhao, C., Jin, Y., Lei, Y., Lu, L., & Chen, G. (2018). Association between parental occupational exposure to extremely low frequency magnetic fields and childhood nervous system tumors risk: A meta-analysis. *Sci Total Environ*, *642*, 1406-1414.

https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2018.06.142
Su, X. J., Yuan, W., Tan, H., Liu, X. Y., Li, D., Li, D. K., Huang, G. Y., Zhang, L. W., & Miao, M. H. (2014). Correlation between exposure to magnetic fields and embryonic development in the first trimester. *PLoS One*, *9*(6), e101050. https://doi.org/10.1371/journal.pone.0101050
Sudan, M., Arah, O. A., Becker, T., Levy, Y., Sigsgaard, T., Olsen, J., Vergara, X., & Kheifets, L. (2017). Re-examining the association between residential exposure to magnetic fields from power lines and childhood asthma in the Danish National Birth Cohort. *PLoS One*, *12*(5), e0177651. https://doi.org/10.1371/journal.pone.0177651
Sun, C., Wei, X., Yimaer, A., Xu, Z., & Chen, G. (2018). Ataxia telangiectasia mutated deficiency does not result in genetic susceptibility to 50 Hz magnetic fields exposure in mouse embryonic fibroblasts. *Bioelectromagnetics*, *39*(6), 476-484. https://doi.org/10.1002/bem.22140
Sun, J., Kwan, R. L., Zheng, Y., & Cheing, G. L. (2016). Effects of pulsed electromagnetic fields on peripheral blood circulation in people with diabetes: A randomized controlled trial. *Bioelectromagnetics*, *37*(5), 290-297. https://doi.org/10.1002/bem.21983
Sun, J. W., Li, X. R., Gao, H. Y., Yin, J. Y., Qin, Q., Nie, S. F., & Wei, S. (2013). Electromagnetic field exposure and male breast cancer risk: a meta-analysis of 18 studies. *Asian Pac J Cancer Prev*, *14*(1), 523-528.
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*(14), 3721-3735. https://doi.org/10.1088/0031-9155/59/14/3721
Suri, S., Dehghan, S. F., Sahlabadi, A. S., Ardakani, S. K., Moradi, N., Rahmati, M., & Tehrani, F. R. (2020). Relationship between exposure to Extremely Low-Frequency (ELF) magnetic field and the level of some reproductive hormones among power plant workers. *J Occup Health*, *62*(1), e12173. https://doi.org/10.1002/1348-9585.12173
Sütterlin, B., & Siegrist, M. (2017). Public acceptance of renewable energy technologies from an abstract versus concrete perspective and the positive imagery of solar power. *Energy Policy*, *106*, 356-366. https://doi.org/http://doi.org/10.1016/j.enpol.2017.03.061
Swanson, J., & Bunch, K. J. (2018). Reanalysis of risks of childhood leukaemia with distance from overhead power lines in the UK. *J Radiol Prot*, *38*(3), N30-N35. https://doi.org/10.1088/1361-6498/aac89a
Swanson, J., Bunch, K. J., Vincent, T. J., & Murphy, M. F. (2014). Childhood cancer and exposure to corona ions from power lines: an epidemiological test. *J Radiol Prot*, *34*(4), 873-889. https://doi.org/10.1088/0952-4746/34/4/873
Swanson, J., Kheifets, L., & Vergara, X. (2019). Changes over time in the reported risk for childhood leukaemia and magnetic fields. *J Radiol Prot*, *39*(2), 470-488. https://doi.org/10.1088/1361-6498/ab0586
Swissgrid. (2015). *Bericht zum strategischen Netz 2025*.
SwissNIS. (2022). *Expositionsmessungen nichtionisierende Strahlung: Jahresbericht 2021 - Projektkonsortium SwissNIS*. https://www.newsd.admin.ch/newsd/message/attachments/71990.pdf
Szemerszky, R., Domotor, Z., Berkes, T., & Koteles, F. (2016). Attribution-Based Nocebo Effects. Perceived Effects of a Placebo Pill and a Sham Magnetic Field on Cognitive Performance and Somatic Symptoms. *Int J Behav Med*, *23*(2), 204-213. https://doi.org/10.1007/s12529-015-9511-1
Szemerszky, R., Gubanyi, M., Arvai, D., Domotor, Z., & Koteles, F. (2015). Is There a Connection Between Electrosensitivity and Electrosensibility? A Replication Study. *Int J Behav Med*, *22*(6), 755-763. https://doi.org/10.1007/s12529-015-9477-z
Szemerszky, R., Zelena, D., Barna, I., & Bardos, G. (2010). Stress-related endocrinological and psychopathological effects of short- and long-term 50Hz electromagnetic field exposure in rats. *Brain Res Bull*, *81*(1), 92-99. https://doi.org/10.1016/j.brainresbull.2009.10.015
Tabrizi, M. M., & Bidgoli, S. A. (2015). Increased risk of childhood acute lymphoblastic leukemia (ALL) by prenatal and postnatal exposure to high voltage power lines: a case control study in Isfahan, Iran. *Asian Pac J Cancer Prev*, *16*(6), 2347-2350.
Tabrizi, M. M., & Hosseini, S. A. (2015). Role of Electromagnetic Field Exposure in Childhood Acute

Lymphoblastic Leukemia and No Impact of Urinary Alpha- Amylase--a Case Control Study in Tehran, Iran. *Asian Pac J Cancer Prev*, *16*(17), 7613-7618.

Talibov, M., Guxens, M., Pukkala, E., Huss, A., Kromhout, H., Slottje, P., Martinsen, J. I., Kjaerheim, K., Sparen, P., Weiderpass, E., Tryggvadottir, L., Uuksulainen, S., & Vermeulen, R. (2015). Occupational exposure to extremely low-frequency magnetic fields and electrical shocks and acute myeloid leukemia in four Nordic countries. *Cancer Causes Control*, *26*(8), 1079-1085. https://doi.org/10.1007/s10552-015-0600-x

Talibov, M., Olsson, A., Bailey, H., Erdmann, F., Metayer, C., Magnani, C., Petridou, E., Auvinen, A., Spector, L., Clavel, J., Roman, E., Dockerty, J., Nikkila, A., Lohi, O., Kang, A., Psaltopoulou, T., Miligi, L., Vila, J., Cardis, E., & Schuz, J. (2019). Parental occupational exposure to low-frequency magnetic fields and risk of leukaemia in the offspring: findings from the Childhood Leukaemia International Consortium (CLIC). *Occup Environ Med*, *76*(10), 746-753. https://doi.org/10.1136/oemed-2019-105706

Tarao, H., Korpinen, L. H., Kuisti, H. A., Hayashi, N., Elovaara, J. A., & Isaka, K. (2013). Numerical evaluation of currents induced in a worker by ELF non-uniform electric fields in high voltage substations and comparison with experimental results. *Bioelectromagnetics*, *34*(1), 61-73. https://doi.org/10.1002/bem.21738

Teixeira, E. A., & dos Santos, M. V. (2016). PLC-to-LAN Interference Analysis and Electromagnetic Shielding. *2016 Ieee International Conference on Emerging Technologies and Innovative Business Practices for the Transformation of Societies (Emergitech)*, 194-198. <Go to ISI>://WOS:000391537900038

Tenorio, B. M., Ferreira Filho, M. B., Jimenez, G. C., de Morais, R. N., Peixoto, C. A., Nogueira Rde, A., & da Silva Junior, V. A. (2014). Extremely low-frequency magnetic fields can impair spermatogenesis recovery after reversible testicular damage induced by heat. *Electromagn Biol Med*, *33*(2), 139-146. https://doi.org/10.3109/15368378.2013.795156

Terzi, M., Ozberk, B., Deniz, O. G., & Kaplan, S. (2016). The role of electromagnetic fields in neurological disorders. *J Chem Neuroanat*, *75*(Pt B), 77-84. https://doi.org/10.1016/j.jchemneu.2016.04.003

Theriault, G., Goldberg, M., Miller, A. B., Armstrong, B., Guenel, P., Deadman, J., Imbernon, E., To, T., Chevalier, A., Cyr, D., & et al. (1994). Cancer risks associated with occupational exposure to magnetic fields among electric utility workers in Ontario and Quebec, Canada, and France: 1970-1989. *Am J Epidemiol*, *139*(6), 550-572.

Thulstrup, A. M., & Bonde, J. P. (2006). Maternal occupational exposure and risk of specific birth defects. *Occup Med (Lond)*, *56*(8), 532-543. https://doi.org/10.1093/occmed/kql115

Tiikkaja, M., Alanko, T., Lindholm, H., Hietanen, M., Hartikainen, J., & Toivonen, L. (2012). Experimental study on malfunction of pacemakers due to exposure to different external magnetic fields. *J Interv Card Electrophysiol*, *34*(1), 19-27. https://doi.org/10.1007/s10840-011-9651-4

Tiikkaja, M., Aro, A. L., Alanko, T., Lindholm, H., Sistonen, H., Hartikainen, J. E., Toivonen, L., Juutilainen, J., & Hietanen, M. (2013a). Electromagnetic interference with cardiac pacemakers and implantable cardioverter-defibrillators from low-frequency electromagnetic fields in vivo. *Europace*, *15*(3), 388-394. https://doi.org/10.1093/europace/eus345

Tiikkaja, M., Aro, A. L., Alanko, T., Lindholm, H., Sistonen, H., Hartikainen, J. E., Toivonen, L., Juutilainen, J., & Hietanen, M. (2013b). Testing of common electromagnetic environments for risk of interference with cardiac pacemaker function. *Saf Health Work*, *4*(3), 156-159. https://doi.org/10.1016/j.shaw.2013.06.002

Tognola, G., Bonato, M., Benini, M., Aerts, S., Gallucci, S., Chiaramello, E., Fiocchi, S., Parazzini, M., Masini, B. M., Joseph, W., Wiart, J., & Ravazzani, P. (2022). Survey of Exposure to RF Electromagnetic Fields in the Connected Car. *IEEE Access*, *10*, 47764-47781. https://doi.org/10.1109/Access.2022.3170035

Tomitsch, J., & Dechant, E. (2015). Exposure to electromagnetic fields in households--trends from 2006 to 2012. *Bioelectromagnetics*, *36*(1), 77-85. https://doi.org/10.1002/bem.21887

Tomitsch, J., Dechant, E., & Frank, W. (2010). Survey of electromagnetic field exposure in bedrooms of residences in lower Austria. *Bioelectromagnetics*, *31*(3), 200-208.

https://doi.org/10.1002/bem.20548
Touitou, Y., Djeridane, Y., Lambrozo, J., Camus, F., & Selmaoui, B. (2013). Long-term (up to 20 years) effects of 50-Hz magnetic field exposure on immune system and hematological parameters in healthy men. *Clin Biochem*, *46*(1-2), 59-63. https://doi.org/10.1016/j.clinbiochem.2012.09.003
Touitou, Y., Lambrozo, J., Camus, F., & Charbuy, H. (2003). Magnetic fields and the melatonin hypothesis: a study of workers chronically exposed to 50-Hz magnetic fields. *Am J Physiol Regul Integr Comp Physiol*, *284*(6), R1529-1535. https://doi.org/10.1152/ajpregu.00280.2002
Touitou, Y., & Selmaoui, B. (2012). The effects of extremely low-frequency magnetic fields on melatonin and cortisol, two marker rhythms of the circadian system. *Dialogues Clin Neurosci*, *14*(4), 381-399. https://www.ncbi.nlm.nih.gov/pmc/articles/PMC3553569/pdf/DialoguesClinNeurosci-14-381.pdf
Turner, M. C., Benke, G., Bowman, J. D., Figuerola, J., Fleming, S., Hours, M., Kincl, L., Krewski, D., McLean, D., Parent, M. E., Richardson, L., Sadetzki, S., Schlaefer, K., Schlehofer, B., Schuz, J., Siemiatycki, J., Tongeren, M. V., & Cardis, E. (2017). Interactions between occupational exposure to extremely low frequency magnetic fields and chemicals for brain tumour risk in the INTEROCC study. *Occup Environ Med*, *74*(11), 802-809. https://doi.org/10.1136/oemed-2016-104080
Turner, M. C., Benke, G., Bowman, J. D., Figuerola, J., Fleming, S., Hours, M., Kincl, L., Krewski, D., McLean, D., Parent, M. E., Richardson, L., Sadetzki, S., Schlaefer, K., Schlehofer, B., Schuz, J., Siemiatycki, J., van Tongeren, M., & Cardis, E. (2014). Occupational exposure to extremely low-frequency magnetic fields and brain tumor risks in the INTEROCC study. *Cancer Epidemiol Biomarkers Prev*, *23*(9), 1863-1872. https://doi.org/10.1158/1055-9965.epi-14-0102
Tynes, T., Andersen, A., & Langmark, F. (1992). Incidence of cancer in Norwegian workers potentially exposed to electromagnetic fields. *Am J Epidemiol*, *136*(1), 81-88.
Tynes, T., & Haldorsen, T. (1997). Electromagnetic fields and cancer in children residing near Norwegian high-voltage power lines. *Am J Epidemiol*, *145*(3), 219-226.
Uddin, S., Shareef, H., Mohamed, A., & Hannan, M. (2012). An analysis of harmonics from dimmable LED lamps. 2012 IEEE International Conference on Power Engineering and Optimization (PEDCO) Melaka, Malaysia.
UKCCS. (1999). Exposure to power-frequency magnetic fields and the risk of childhood cancer. UK Childhood Cancer Study Investigators. *Lancet*, *354*(9194), 1925-1931.
Uribe Perez, N., Arechalde, I., Castro, M., Sendin, A., Urrutia, I., & Gomez, J. S. (2020). Methodology and Power Spectral Density Limits Proposal for Non Intentional Emissions in frequencies below 150 kHz. *2020 Ieee International Symposium on Power Line Communications and Its Applications (Ieee Isplc)*. <Go to ISI>://WOS:000783398900010
Ursache, S., Salceanu, A., & Neacsu, O. (2016, 20-22 Oct. 2016). Indoor and outdoor measurements of the low frequency magnetic fields in an urban area. 2016 International Conference and Exposition on Electrical and Power Engineering (EPE),
Vajjhala, S. P., & Fischbeck, P. S. (2007). Quantifying siting difficulty: A case study of US transmission line siting. *Energy Policy*, *35*(1), 650-671. https://doi.org/10.1016/j.enpol.2005.12.026
Vallejo, D., Hidalgo, M. A., & Hernández, J. M. (2019). Effects of long-term exposure to an extremely low frequency magnetic field (15 µT) on selected blood coagulation variables in OF1 mice. *Electromagn Biol Med*, *38*(4), 279-286. https://doi.org/10.1080/15368378.2019.1641719
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*(3), 252-264. https://doi.org/10.1093/rpd/ncu257
van der Horst, D. (2007). NIMBY or not? Exploring the relevance of location and the politics of voiced opinions in renewable energy siting controversies. *Energy Policy*, *35*(5), 2705-2714. - http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0301421506004848
van der Mark, M., Vermeulen, R., Nijssen, P. C., Mulleners, W. M., Sas, A. M., van Laar, T., Kromhout, H., & Huss, A. (2015). Extremely low-frequency magnetic field exposure, electrical shocks and risk of Parkinson's disease. *Int Arch Occup Environ Health*, *88*(2), 227-234.

https://doi.org/10.1007/s00420-014-0949-2
van Dongen, D., Claassen, L., Smid, T., & Timmermans, D. R. M. (2013). People's responses to risks of electromagnetic fields and trust in government policy: the role of perceived risk, benefits and control. *Journal of Risk Research*, *16*(8), 945-957. https://doi.org/10.1080/13669877.2012.761270
Van Huizen, A. V., Morton, J. M., Kinsey, L. J., Von Kannon, D. G., Saad, M. A., Birkholz, T. R., Czajka, J. M., Cyrus, J., Barnes, F. S., & Beane, W. S. (2019). Weak magnetic fields alter stem cell-mediated growth. *Sci Adv*, *5*(1), eaau7201. https://doi.org/10.1126/sciadv.aau7201
van Moorselaar, I., Slottje, P., Heller, P., van Strien, R., Kromhout, H., Murbach, M., Kuster, N., Vermeulen, R., & Huss, A. (2017). Effects of personalised exposure on self-rated electromagnetic hypersensitivity and sensibility - A double-blind randomised controlled trial. *Environ Int*, *99*, 255-262. https://doi.org/10.1016/j.envint.2016.11.031
Vanderstraeten, J., Verschaeve, L., Burda, H., Bouland, C., & de Brouwer, C. (2012). Health effects of extremely low-frequency magnetic fields: reconsidering the melatonin hypothesis in the light of current data on magnetoreception. *J Appl Toxicol*, *32*(12), 952-958. https://doi.org/10.1002/jat.2761
Varghese, B. J., & Bobba, P. B. (2016, 4-6 July 2016). Design and analysis of a robust system for wirelessly powering implantable devices. 2016 IEEE 1st International Conference on Power Electronics, Intelligent Control and Energy Systems (ICPEICES),
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*(1), 35-43. https://doi.org/10.1109/TEMC.2014.2359687
Vedholm, K. (1996). *Personal exposure resulting form low level low frequency electromagnetic fields in automobiles* Chalmers University of Technology]. Gothenburg.
Vergara, X., Kheifets, L., Greenland, S., Oksuzyan, S., Cho, Y. S., & Mezei, G. (2013). Occupational exposure to extremely low-frequency magnetic fields and neurodegenerative disease: a meta-analysis. *J Occup Environ Med*, *55*(2), 135-146. https://doi.org/10.1097/JOM.0b013e31827f37f8
Verkasalo, P. K., Pukkala, E., Hongisto, M. Y., Valjus, J. E., Jarvinen, P. J., Heikkila, K. V., & Koskenvuo, M. (1993). Risk of cancer in Finnish children living close to power lines. *Bmj*, *307*(6909), 895-899. https://www.ncbi.nlm.nih.gov/pmc/articles/PMC1679080/pdf/bmj00042-0019.pdf
Vijayalaxmi, & Foster, K. R. (2021). Improving the Quality of Radiofrequency Bioeffects Research: The Need for a Carrot and a Stick. *Radiat Res*, *196*(4), 417-422. https://doi.org/10.1667/RADE-21-00079.1
Vijayalaxmi, & Prihoda, T. J. (2019). Comprehensive Review of Quality of Publications and Meta-analysis of Genetic Damage in Mammalian Cells Exposed to Non-Ionizing Radiofrequency Fields. *Radiat Res*, *191*(1), 20-30. https://doi.org/10.1667/RR15117.1
Vila, J., Bowman, J. D., Richardson, L., Kincl, L., Conover, D. L., McLean, D., Mann, S., Vecchia, P., van Tongeren, M., & Cardis, E. (2016). A Source-based Measurement Database for Occupational Exposure Assessment of Electromagnetic Fields in the INTEROCC Study: A Literature Review Approach. *Ann Occup Hyg*, *60*(2), 184-204. https://doi.org/10.1093/annhyg/mev076
Villard, S., Allen, A., Bouisset, N., Corbacio, M., Thomas, A., Guerraz, M., & Legros, A. (2019). Impact of extremely low-frequency magnetic fields on human postural control. *Exp Brain Res*, *237*(3), 611-623. https://doi.org/10.1007/s00221-018-5442-9
Villarini, M., Dominici, L., Fatigoni, C., Levorato, S., Vannini, S., Monarca, S., & Moretti, M. (2015). Primary DNA damage in welders occupationally exposed to extremely-low-frequency magnetic fields (ELF-MF). *Ann Ig*, *27*(3), 511-519. https://doi.org/10.7416/ai.2015.2041
Villarini, M., Gambelunghe, A., Giustarini, D., Ambrosini, M. V., Fatigoni, C., Rossi, R., Dominici, L., Levorato, S., Muzi, G., Piobbico, D., & Mariucci, G. (2017). No evidence of DNA damage by co-exposure to extremely low frequency magnetic fields and aluminum on neuroblastoma cell lines. *Mutation Research - Genetic Toxicology and Environmental Mutagenesis*, *823*, 11-21. https://doi.org/10.1016/j.mrgentox.2017.09.001

Villeneuve, P. J., Agnew, D. A., Johnson, K. C., & Mao, Y. (2002). Brain cancer and occupational exposure to magnetic fields among men: results from a Canadian population-based case-control study. *Int J Epidemiol*, *31*(1), 210-217.

Vinceti, M., Malagoli, C., Fabbi, S., Kheifets, L., Violi, F., Poli, M., Caldara, S., Sesti, D., Violanti, S., Zanichelli, P., Notari, B., Fava, R., Arena, A., Calzolari, R., Filippini, T., Iacuzio, L., Arcolin, E., Mandrioli, J., Fini, N., Odone, A., Signorelli, C., Patti, F., Zappia, M., Pietrini, V., Oleari, P., Teggi, S., Ghermandi, G., Dimartino, A., Ledda, C., Mauceri, C., Sciacca, S., Fiore, M., & Ferrante, M. (2017). Magnetic fields exposure from high-voltage power lines and risk of amyotrophic lateral sclerosis in two Italian populations. *Amyotroph Lateral Scler Frontotemporal Degener*, *18*(7-8), 583-589. https://doi.org/10.1080/21678421.2017.1332078

Virnich, M. (2012). Strom auf'm Rohr kommt häufig vor. *IKZ-Haustechnik*(7), 7.

Visschers, V. H. M., Keller, C., & Siegrist, M. (2011). Climate change benefits and energy benefit supply benefits as determinants of acceptance of nuclear power stations: Investigating an explanatory model. *Energy Policy*, *39*, 3621-3629.

Visschers, V. H. M., & Siegrist, M. (2014). Find the differences and the similarities: Relating perceived benefits, perceived costs and protected values to acceptance of five energy technologies. *Journal of Environmental Psychology*, *40*, 117-130. - http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0272494414000498

VSE. (2021). *Technische Regeln für die Beurteilung von Netzrückwirkungen*. www.strom.ch

Vulevic, B., & Osmokrovic, P. (2011). Survey of ELF magnetic field levels in households near overhead power lines in Serbia. *Radiat Prot Dosimetry*, *145*(4), 385-388. https://doi.org/10.1093/rpd/ncq439

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*(2), 677-685. https://doi.org/10.1109/TEMC.2016.2636328

Wake, K., Sasaki, K., & Watanabe, S. (2016). Conductivities of epidermis, dermis, and subcutaneous tissue at intermediate frequencies. *Phys Med Biol*, *61*(12), 4376-4389. https://doi.org/10.1088/0031-9155/61/12/4376

Walker, G., & Devine-Wright, P. (2008). Community renewable energy: What should it mean? *Energy Policy*, *36*(2), 497-500. - http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0301421507004739

Wan, F., Cao, H., An, S., Feng, C., Hu, G., & Ge, J. (2016). Characterisation of electromagnetic interference from LED. *Electronics Letters*, *52*(2), 143-144. https://doi.org/10.1049/el.2015.3358

Wang, H., & Zhang, X. (2017). Magnetic Fields and Reactive Oxygen Species [Review]. *International Journal of Molecular Sciences*, *18*(10). https://doi.org/10.3390/ijms18102175

Wang, L., Liu, W., Wang, J., & Guo, J. (2014, 22-25 Oct. 2014). A review of electromagnetic fields concerns on HEVs/EVs. 2014 17th International Conference on Electrical Machines and Systems (ICEMS),

Wang, Q. D., Li, W. L., Kang, J. W., & Wang, Y. C. (2019). Electromagnetic Safety Evaluation and Protection Methods for a Wireless Charging System in an Electric Vehicle. *IEEE Transactions on Electromagnetic Compatibility*, *61*(6), 1913-1925. https://doi.org/10.1109/Temc.2018.2875903

Wang, Y., Liu, X., Zhang, Y., Wan, B., Zhang, J., He, W., Hu, D., Yang, Y., Lai, J., He, M., & Chen, C. (2019). Exposure to a 50 Hz magnetic field at 100 µT exerts no DNA damage in cardiomyocytes. *Biology Open*, *8*(8), bio041293. https://doi.org/10.1242/bio.041293

Wang, Z., Fei, Y., Liu, H., Zheng, S., Ding, Z., Jin, W., Pan, Y., Chen, Z., Wang, L., Chen, G., Xu, Z., Zhu, Y., & Yu, Y. (2016). Effects of electromagnetic fields exposure on plasma hormonal and inflammatory pathway biomarkers in male workers of a power plant. *Int Arch Occup Environ Health*, *89*(1), 33-42. https://doi.org/10.1007/s00420-015-1049-7

Wang, Z., Wang, L., Zheng, S., Ding, Z., Liu, H., Jin, W., Pan, Y., Chen, Z., Fei, Y., Chen, G., Xu, Z., & Yu, Y. (2016). Effects of electromagnetic fields on serum lipids in workers of a power plant. *Environ Sci Pollut Res Int*, *23*(3), 2495-2504. https://doi.org/10.1007/s11356-015-5500-9

Warille, A. A., Onger, M. E., Turkmen, A. P., Deniz, O. G., Altun, G., Yurt, K. K., Altunkaynak, B. Z., &

Kaplan, S. (2016). Controversies on electromagnetic field exposure and the nervous systems of children. *Histol Histopathol*, *31*(5), 461-468. https://doi.org/10.14670/hh-11-707

Wenzel, F., Reissenweber, J., & David, E. (2005). Cutaneous microcirculation is not altered by a weak 50 Hz magnetic field. *Biomed Tech (Berl)*, *50*(1-2), 14-18. https://doi.org/10.1515/bmt.2005.003

WHO. (1993). Electromagnetic Fields (300 Hz - 300 GHz). In. Geneva: WHO.

WHO. (2006). Static Fields. In. Geneva: WHO.

WHO. (2007). Extremely low frequency fields. In. Geneva: WHO

Wiedemann, P. M., Boerner, F., & Claus, F. (2018). How far is how far enough? Safety perception and acceptance of extra-high-voltage power lines in Germany. *J Risk Res*, *21*(4), 463-479. https://doi.org/10.1080/13669877.2016.1220415

Wu, T., Xiao, B., Liu, K., Liu, T., Peng, Y., Su, Z., Tang, P., & Lei, X. (2016, 19-22 Sept. 2016). Study on overhead transmission line magnetic field harmonics of VSC-HVDC. 2016 IEEE International Conference on High Voltage Engineering and Application (ICHVE),

Wunsch-Filho, V., Pelissari, D. M., Barbieri, F. E., Sant'Anna, L., de Oliveira, C. T., de Mata, J. F., Tone, L. G., Lee, M. L., de Andrea, M. L., Bruniera, P., Epelman, S., Filho, V. O., & Kheifets, L. (2011). Exposure to magnetic fields and childhood acute lymphocytic leukemia in Sao Paulo, Brazil. *Cancer Epidemiol*, *35*(6), 534-539. https://doi.org/10.1016/j.canep.2011.05.008

Wyszkowska, J., Jędrzejewski, T., Piotrowski, J., Wojciechowska, A., Stankiewicz, M., & Kozak, W. (2018). Evaluation of the influence of in vivo exposure to extremely low-frequency magnetic fields on the plasma levels of pro-inflammatory cytokines in rats. *Int J Radiat Biol*, *94*(10), 909-917. https://doi.org/10.1080/09553002.2018.1503428

Xia, P., Zheng, Y., Dong, L., & Tian, C. (2021). Short-Term Extremely Low-Frequency Electromagnetic Field Inhibits Synaptic Plasticity of Schaffer Collateral-CA1 Synapses in Rat Hippocampus via the Ca2+/Calcineurin Pathway. *ACS Chemical Neuroscience*, *12*(19), 3550-3557. https://doi.org/10.1021/acschemneuro.1c00500

Xiao, C., Wei, K., Cheng, D., & Liu, Y. (2016). Wireless Charging System Considering Eddy Current in Cardiac Pacemaker Shell: Theoretical Modeling, Experiments and Safety Simulations. *IEEE Transactions on Industrial Electronics*, *PP*(99), 1-1. https://doi.org/10.1109/TIE.2016.2645142

Xu, J., Jarocha, L. E., Zollitsch, T., Konowalczyk, M., Henbest, K. B., Richert, S., Golesworthy, M. J., Schmidt, J., Dejean, V., Sowood, D. J. C., Bassetto, M., Luo, J., Walton, J. R., Fleming, J., Wei, Y., Pitcher, T. L., Moise, G., Herrmann, M., Yin, H., Wu, H., Bartolke, R., Kasehagen, S. J., Horst, S., Dautaj, G., Murton, P. D. F., Gehrckens, A. S., Chelliah, Y., Takahashi, J. S., Koch, K. W., Weber, S., Solov'yov, I. A., Xie, C., Mackenzie, S. R., Timmel, C. R., Mouritsen, H., & Hore, P. J. (2021). Magnetic sensitivity of cryptochrome 4 from a migratory songbird. *Nature*, *594*(7864), 535-540. https://doi.org/10.1038/s41586-021-03618-9

Yalcin, Y. C., Kooij, C., Theuns, D., Constantinescu, A. A., Brugts, J. J., Manintveld, O. C., Yap, S. C., Szili-Torok, T., Bogers, A., & Caliskan, K. (2020). Emerging electromagnetic interferences between implantable cardioverter-defibrillators and left ventricular assist devices. *Europace*, *22*(4), 584-587. https://doi.org/10.1093/europace/euaa006

Yao, C., Zhao, L., & Peng, R. (2021). The biological effects of electromagnetic exposure on immune cells and potential mechanisms. *Electromagn Biol Med*, *41*(1), 108-117. https://doi.org/10.1080/15368378.2021.2001651

Yashima, Y., Omori, H., Morizane, T., Kimura, N., & Nakaoka, M. (2015, 21-23 Sept. 2015). Leakage magnetic field reduction from Wireless Power Transfer system embedding new eddy current-based shielding method. International Conference on Electrical Drives and Power Electronics (EDPE), 2015

Yavolovskaya, E., Chiqovani, G., Gabriadze, G., Iosava, S., Svanidze, L., Willmann, B., & Jobava, R. (2016, 5-9 Sept. 2016). Simulation of human exposure to electromagnetic fields of inductive wireless power transfer systems in the frequency range from 1 Hz to 30 MHz. 2016 International Symposium on Electromagnetic Compatibility - EMC EUROPE,

Ye, M., Zheng, S. Q., & Luo, M. R. (2016, 15-17 Nov. 2016). The impact of dynamic light with different CCT ranges and frequencies on human alertness. 2016 13th China International Forum on Solid State Lighting (SSLChina),

Yi, K. H. (2016, 7-11 Jan. 2016). Electric field wireless power transfer with impedance transformation. 2016 IEEE International Conference on Consumer Electronics (ICCE),

Yusop, Y., Saat, S., Ghani, Z., Husin, H., & Nguang, S. K. (2016, 4-6 March 2016). Capacitive power transfer with impedance matching network. 2016 IEEE 12th International Colloquium on Signal Processing & Its Applications (CSPA),

Zadeh-Haghighi, H., & Simon, C. (2022). Magnetic field effects in biology from the perspective of the radical pair mechanism. *J R Soc Interface*, *19*(193), 20220325. https://doi.org/10.1098/rsif.2022.0325

Zahner, M., Fröhlich, J., & Dürrenberger, G. (2017). *Energieeffizienz und EMF-Immissionen von intergrierten Induktionsladestationen*.

Zahner, M., Fröhlich, J., & Leuthold, J. (2016, 5-10 June 2016). *ExpoM: Exposure Measurement Platform Enabling ELF Magnetic Field and RF Electromagnetic Field Strength Measurements* BioEM 2016 The Joint Annual Meeting of The Bioelectromagnetics Society and the European BioElectromagnetics Association, Ghent, Belgium.

Zamanian, Z., Gharepoor, S., & Dehghani, M. (2010). Effects of electromagnetic fields on mental health of the staff employed in gas power plants, Shiraz, 2009. *Pak J Biol Sci*, *13*(19), 956-960.

Zang, M., Clemens, M., Cimala, C., Streckert, J., & Schmuelling, B. (2017). Simulation of Inductive Power Transfer Systems Exposing a Human Body with Two-Step Scaled-Frequency FDTD Methods. *IEEE Transactions on Magnetics*, *PP*(99), 1-1. https://doi.org/10.1109/TMAG.2017.2654798

Zaryabova, V., Shalamanova, T., & Israel, M. (2013). Pilot study of extremely low frequency magnetic fields emitted by transformers in dwellings. Social aspects. *Electromagn Biol Med*, *32*(2), 209-217. https://doi.org/10.3109/15368378.2013.776431

Zaunbrecher, B. S., Linzenich, A., & Ziefle, M. (2017). A mast is a mast is a mast…? Comparison of preferences for location-scenarios of electricity pylons and wind power plants using conjoint analysis. *Energy Policy*, *105*(429), 429-439. https://doi.org/http://doi.org/10.1016/j.enpol.2017.02.043

Zaunbrecher, B. S., Stieneker, M., De Doncker, R. W., & Ziefle, M. (2016). Does Transmission Technology Influence Acceptance of Overhead Power Lines? An Empirical Study. *Proceedings of the 2016 5th International Conference on Smart Cities and Green Ict Systems (Smartgreens 2016)*, 189-200. <Go to ISI>://WOS:000615693100025

Zendehdel, R., Yu, I. J., Hajipour-Verdom, B., & Panjali, Z. (2019). DNA effects of low level occupational exposure to extremely low frequency electromagnetic fields (50/60 Hz). *Toxicol Ind Health*, *35*(6), 424-430. https://doi.org/10.1177/0748233719851697

Zeng, Y., Shen, Y., Hong, L., Chen, Y., Shi, X., Zeng, Q., & Yu, P. (2017). Effects of Single and Repeated Exposure to a 50-Hz 2-mT Electromagnetic Field on Primary Cultured Hippocampal Neurons. *Neuroscience Bulletin*, *33*(3), 299-306. https://doi.org/10.1007/s12264-017-0113-6

Zhang, B., Wang, L., Zhan, A., Wang, M., Tian, L., Guo, W., & Pan, Y. (2021). Long-term exposure to a hypomagnetic field attenuates adult hippocampal neurogenesis and cognition. *Nat Commun*, *12*(1), 1174. https://doi.org/10.1038/s41467-021-21468-x

Zhang, H., Dai, Y., Cheng, Y., He, Y., Manyakara, Z., Duan, Y., Sun, G., & Sun, X. (2017). Influence of extremely low frequency magnetic fields on Ca^{2+} signaling and double messenger system in mice hippocampus and reversal function of procyanidins extracted from lotus seedpod. *Bioelectromagnetics*, *38*(6), 436-446. https://doi.org/10.1002/bem.22058

Zhang, H. L., Liu, X., Li, R., & Zhang, K. (2019). Test Methods for EM Emission for Broadband Carrier Communication Systems over Low -voltage Power Lines. *2019 Ieee International Conference on Communications, Control, and Computing Technologies for Smart Grids (Smartgridcomm)*. <Go to ISI>://WOS:000522245400092

Zhang, Y., Lai, J., Ruan, G., Chen, C., & Wang, D. W. (2016). Meta-analysis of extremely low frequency electromagnetic fields and cancer risk: a pooled analysis of epidemiologic studies. *Environ Int*, *88*, 36-43. https://doi.org/10.1016/j.envint.2015.12.012

Zhang, Y., Li, L., Liu, X., Ding, L., Wu, X., Wang, J., He, M., Hou, H., Ruan, G., Lai, J., & Chen, C. (2020). Examination of the Effect of a 50-Hz Electromagnetic Field at 500 µT on Parameters

Related With the Cardiovascular System in Rats. *Front Public Health*, *8*, 87. https://doi.org/10.3389/fpubh.2020.00087

Zhang, Y., Wang, J., Liu, X., Ding, L., Wu, X., He, M., Hou, H., Ruan, G., Lai, J., & Chen, C. (2020). An Investigation Into the Effects of Long-Term 50-Hz Power-Frequency Electromagnetic Field Exposure on Hematogram, Blood Chemistry, Fibrosis, and Oxidant Stress Status in the Liver and the Kidney From Sprague-Dawley Rats. *Bioelectromagnetics*, *41*(7), 511-525. https://doi.org/10.1002/bem.22291

Zhang, Y., Zhang, Y., Yu, H., Yang, Y., Li, W., & Qian, Z. (2017). Theta-gamma coupling in hippocampus during working memory deficits induced by low frequency electromagnetic field exposure. *Physiology & Behavior*, *179*, 135-142. https://doi.org/10.1016/j.physbeh.2017.05.033

Zhao, L., Liu, X., Wang, C., Yan, K., Lin, X., Li, S., Bao, H., & Liu, X. (2014). Magnetic fields exposure and childhood leukemia risk: a meta-analysis based on 11,699 cases and 13,194 controls. *Leuk Res*, *38*(3), 269-274. https://doi.org/10.1016/j.leukres.2013.12.008

Zheng, Y., Cheng, J., Dong, L., Ma, X., & Kong, Q. (2019). Effects of exposure to extremely low frequency electromagnetic fields on hippocampal long-term potentiation in hippocampal CA1 region. *Biochemical and Biophysical Research Communications*, *517*(3), 513-519. https://doi.org/10.1016/j.bbrc.2019.07.085

Zheng, Z., Song, R. Y., Huang, X. H., Xu, J. X., & Gao, C. (2019). Simulation of the magnetic coupling phenomena in electric vehicle wireless charging. *Journal of Engineering-Joe*(16), 2174-2179. https://doi.org/10.1049/joe.2018.8667

Zhou, H., Chen, G., Chen, C., Yu, Y., & Xu, Z. (2012). Association between extremely low-frequency electromagnetic fields occupations and amyotrophic lateral sclerosis: a meta-analysis. *PLoS One*, *7*(11), e48354. https://doi.org/10.1371/journal.pone.0048354

Ztoupis, I. N., Gonos, I. F., & Stathopulos, I. A. (2013). Uncertainty evaluation in the measurement of power frequency electric and magnetic fields from AC overhead power lines. *Radiat Prot Dosimetry*, *157*(1), 11-21. https://doi.org/10.1093/rpd/nct122

Zucca, M., Cirimele, V., Bruna, J., Signorino, D., Laporta, E., Colussi, J., Tejedor, M. A. A., Fissore, F., & Pogliano, U. (2021). Assessment of the Overall Efficiency in WPT Stations for Electric Vehicles. *Sustainability*, *13*(5). https://doi.org/10.3390/su13052436

Zuo, H., Liu, X., Wang, D., Li, Y., Xu, X., Peng, R., & Song, T. (2018). RKIP-Mediated NF-κB Signaling is involved in ELF-MF-mediated improvement in AD rat. *International Journal of Medical Sciences*, *15*(14), 1658-1666. https://doi.org/10.7150/ijms.28411

Zwang, T. J., Tse, E. C. M., Zhong, D., & Barton, J. K. (2018). A Compass at Weak Magnetic Fields Using Thymine Dimer Repair. *ACS Cent Sci*, *4*(3), 405-412. https://doi.org/10.1021/acscentsci.8b00008