



Schweizerische Eidgenossenschaft
Confédération suisse
Confederazione Svizzera
Confederaziun svizra

Eidgenössisches Departement für Umwelt, Verkehr, Energie und Kommunikation UVEK

Bundesamt für Energie BFE
Energieforschung

Statusbericht 2016

EMF von Stromtechnologien

Fachliteratur-Monitoring



Datum: 30.Juni 2016

Ort: Bern

Auftraggeberin:

Bundesamt für Energie BFE

Forschungsprogramm Elektrizitätstechnologien & -anwendungen

CH-3003 Bern

www.bfe.admin.ch

Auftragnehmer/in:

FSM – Forschungsstiftung Strom und Mobilkommunikation

c/o ETH Zürich

Gloriastr. 35

CH-8092 Zürich

www.emf.ethz.ch

Autoren:

Dr. Gregor Dürrenberger, FSM, gregor@emf.ethz.ch

Dr. Pascal Leuchtmann, ETH, IEF, leuchtmann@ief.ethz.ch

Prof. Dr. Martin Rösli, Swiss TPH, martin.roosli@unibas.ch

Prof. Dr. Michael Siegrist, ETH, IED, msiegrist@ethz.ch

Dr. Bernadette Sütterlin, ETH, IED, bsuetterlin@ethz.ch

BFE-Bereichsleitung: Dr. Michael Moser, michael.moser@bfe.admin.ch

BFE-Programmleitung: Roland Brüniger, roland.brueiniger@r-brueniger-ag.ch

BFE-Vertragsnummer: SI/501128-01

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

Der Bericht stellt die wissenschaftliche Literatur zu niederfrequenten elektromagnetischen Feldern (NF-EMF; insbesondere 50/60 Hz und 16.7 Hz) zusammen. Im Zentrum stehen biologische und gesundheitliche Wirkungen. Daneben kommen auch der sozialwissenschaftliche Forschungsstand und ausgewählte Fragen im Bereich der elektromagnetischen Verträglichkeit (EMV) zur Sprache. Bezüglich Gesundheit werden in erster Linie begutachtete Publikationen der letzten 5 Jahre bis Anfang 2016 kommentiert. Es handelt sich dabei schwerpunktmässig um epidemiologische und experimentelle Humanstudien zu: kindliche Leukämie, andere Krebsarten, neurodegenerative Erkrankungen, Fruchtbarkeit, Schwangerschaft und Geburt, elektromagnetische Sensibilität, sowie einige andere ausgewählte Effekte. Fast alle Studien beziehen sich auf Magnetfeldexpositionen. Elektrische Felder, wie man sie im Alltag antrifft, sind gesundheitlich gesehen vergleichsweise unproblematisch. Laboruntersuchungen mit Zellen oder Tiermodellen werden punktuell aber nicht systematisch berücksichtigt. Weiter widmet sich der Bericht Fragen der Expositionserfassung und der im Alltag und am Arbeitsplatz anzutreffenden niederfrequenten Expositionen, sowie der sozialwissenschaftlichen Literatur zu Wahrnehmungs-, Kommunikations- und Akzeptanzfragen. Ebenfalls dargestellt werden ausgewählte Aspekte zur elektromagnetischen Verträglichkeit neuerer niederfrequenter Technologien. Hinsichtlich biologisch-gesundheitlicher und sozialwissenschaftlicher Forschung wird in einem eigenen Abschnitt der sich aus dem aktuellen Wissensstand ergebende Forschungsbedarf dargestellt. Insgesamt zeigt die Literaturanalyse, dass die Wissenschaft in den letzten Jahren keine grossen gesundheitlichen Risiken identifiziert hat, dass aber in mehreren Bereichen Forschungsbedarf besteht, um mit besseren Daten heute noch nicht klar beurteilbare Risiken robuster einschätzen zu können. Dies gilt insbesondere auch für die Abschätzung der Exposition der Bevölkerung im Zusammenhang mit neuen Technologien und für die sozialwissenschaftliche Forschung, etwa im Zusammenhang mit Akzeptanzfragen.

Résumé

Ce rapport examine la littérature scientifique traitant des effets secondaires des extrêmement basses fréquences (en anglais : extremely low frequency, ELF), c'est-à-dire 50/60 Hz (réseau électrique) et 16.7 Hz (système d'électrification ferroviaire). L'effort principal se concentre sur les études biologique et sanitaire, cependant la recherche en sciences sociales et d'ingénieur, incluant la compatibilité électromagnétique, est également couverte. Concernant les études sanitaires, la majorité de la littérature évaluée se rapporte à la période 2010–2016 et se concentre sur l'épidémiologie et sur des études de provocation. Ce rapport couvre, en plus d'autres effets: la leucémie infantile, l'oncologie, les maladies dégénératives, la sensibilité électromagnétique ainsi que les effets sur la fertilité, les grossesses et les naissances. Étant donné que l'effet des champs électriques est négligeable en comparaison avec celui des champs magnétiques, seuls ces derniers sont étudiés. Des études in vitro et in vivo sont également discutées dans ce rapport mais ne sont pas introduites de manière systématique. Trois chapitres distincts présentent de plus: (i) Les moyens de mesure et d'analyse de l'exposition aux champs électromagnétiques dans les lieux privés et publics. (ii) La littérature de sciences sociale traitant de la perception du risques, de la communication ainsi que de l'approbation des lignes hautes tension et des diverses infrastructures. (iii) Diverses études concernant la compatibilité électromagnétique d'une partie des technologies ELF liés aux applications pour les consommateurs. Cette étude est complétée par des recommandations pour la recherche future en biologie, en sciences sanitaires ainsi qu'en sciences social. En résumé, ce rapport démontre que la recherche scientifique de ces cinq dernières années n'a pas identifié de risque sanitaire important. Cependant des études approfondies dans plusieurs domaines sont encore nécessaires. Ceci est particulièrement vrai pour les études traitant des nouvelles technologies ainsi que pour les études sociales relié à de l'acceptation des technologies ELF.



Summary

This report comments on the scientific literature about extremely low frequency (ELF) electric and magnetic fields, i.e. 50/60 Hz (power grid) and 16.7 Hz (railway grid). The main focus lies on biological and health studies. Research about social science and engineering / electromagnetic compatibility (EMC) issues is also covered, however, in a less comprehensive manner. Concerning health, the majority of the discussed peer reviewed literature pertains to epidemiology and human provocation experiments, published since 2010 approximately. In terms of endpoints, the studies cover: childhood leukaemia, other forms of neoplastic diseases, neurodegenerative diseases, reproductive and developmental effects, electromagnetic hypersensitivity, and selected other endpoints. Almost all publications deal with magnetic fields, as exposure to everyday electric fields isn't associated with detrimental health effects. In vitro and in vivo studies are only selectively discussed. In three dedicated chapters, the report presents (i) literature about exposure assessment and exposure measurements at homes and in public and workplace environments, (ii) social science literature about risk perception, risk communication and risk acceptance of power frequency fields and infrastructures, and, last but not least, (iii) literature about EMC issues of selected ELF technologies and consumer applications. Recommendations for further research, covering biological, health and social science research, complete the document. Overall, scientific research has not identified alarming deleterious health effects from ELF magnetic fields at intensities found in everyday and workplace environments. However, uncertainties remain, and for selected endpoints the data is still insufficient to draw firm conclusions. Further research is needed. This applies also to the assessment of personal exposure from new technologies and to social science research pertaining to, for instance, infrastructure acceptance.



Inhaltsverzeichnis

Zusammenfassung	3
Résumé.....	3
Summary.....	4
Inhaltsverzeichnis	5
1. Ziel und Methodik	8
1.1 Ziel	8
1.2 Vorgehen und Abgrenzung	8
1.3 Struktur des Berichts	8
2. NF-EMF Expositionen	9
2.1 Konzepte	9
2.1.1 Emission und Immission.....	9
2.1.2 Persönliche Exposition und Dosis	9
2.1.3 Messung und Modellierung	10
2.1.4 Vorbemerkung zu den nachfolgenden Abschnitten	12
2.2 Daten zu Expositionen	12
2.2.1 Haushalte	12
2.2.2 Öffentliche Orte	15
2.2.3 Arbeitsplätze	16
2.2.4 Alltagsexpositionen.....	18
2.3 Forschungsbedarf	20
3. NF-EMF und Gesundheit.....	21
3.1 Vorbemerkung	21
3.2 Wichtige Review-Berichte	22
3.2.1 WHO.....	22
3.2.2 IARC	23
3.2.3 SCENIHR	24
3.2.4 ICNIRP.....	26
3.2.5 IEEE / ICES	26
3.2.6 BiInitiative	27
3.2.7 ARIMMORA.....	28
3.2.8 Ausgewählte nationale Reports.....	28
3.2.9 Bewertung	31



3.3	Studien zu ausgewählten Themen.....	31
3.3.1	Kindliche Leukämie	31
3.3.2	Andere Krebsarten	38
3.3.3	Neurodegenerative Erkrankungen	43
3.3.4	Fruchtbarkeit, Schwangerschaft, Geburt.....	50
3.3.5	Elektromagnetische Sensibilität	53
3.3.6	Andere Wirkungen.....	58
3.4	Forschungsbedarf	65
3.4.1	Kinderleukämie.....	65
3.4.2	Neurodegenerative Erkrankungen	66
3.4.3	Elektromagnetische Sensibilität	66
3.4.4	Andere Themen.....	67
4.	Sozialwissenschaftliche Studien zu NF-EMF	68
4.1	Akzeptanz von Energieinfrastrukturen	68
4.2	Einflussfaktoren	69
4.2.1	Physikalische Charakteristiken.....	69
4.2.2	Psychologische Faktoren und Prozesse	69
4.2.3	Prozedurale Faktoren	71
4.3	Forschungsbedarf	72
4.3.1	Einfluss von Emotionen auf die Akzeptanz	72
4.3.2	Analyse der Bedenken bezüglich Gesundheitsrisiken	72
4.3.3	Chancen und Risiken der Diskussion im Rahmen der Energiewende.....	73
4.3.4	Akzeptanz verschiedener Um- und Ausbauarten der Netzinfrastruktur.....	73
5.	NF-EMF und EMV.....	75
5.1	Elektromagnetische Verträglichkeit EMV	75
5.1.1	Allgemein	75
5.1.2	EMV-Herausforderungen der Energiewende	75
5.2	Systemorientierte EMV	77
5.2.1	Power Quality	77
5.2.2	Smart Grid	78
5.2.3	Power Line Communication	79
5.2.4	Kriechströme	80
5.3	Komponentenorientierte EMV	81
5.3.1	Allgemein	81
5.3.2	LED-Leuchtmittel	82
5.3.3	Elektrische Fahrzeuge.....	82
5.3.4	Drahtlose Energieübertragung	83



5.3.5	Stromerzeuger für Regenerierbare	83
5.3.6	Implantate	84
6.	Anhang Regulierung.....	85
6.1	Die schweizerische Verordnung NISV.....	85
6.1.1	Geltungsbereich	85
6.1.2	Schutz und Vorsorge	85
6.1.3	Immissionsgrenzwerte und Anlagegrenzwerte	85
6.2	Internationale und nationale Grenzwerte.....	86
6.2.1	Grenzwerte für die Allgemeinbevölkerung	86
6.2.2	Grenzwerte für berufliche Expositionen	87
6.3	Herleitung der niederfrequenten Grenzwerte.....	87
6.3.1	Induzierte elektrische Wirbelfelder	87
6.3.2	Basisgrenzwerte	88
6.3.3	Ableitung von Referenzwerten	88
	Verantwortlichkeiten / Beiträge	89
	Figurenverzeichnis	90
	Referenzen	91



1. Ziel und Methodik

1.1 Ziel

Es werden jährliche Syntheseberichte erstellt, welche Forschungserkenntnisse und Forschungstrends zu elektromagnetischen Feldern im niederfrequenten Bereich (50/60 Hz und 16,7 Hz) zusammenfassend darstellen und kommentieren. Bei ausgewählten Anwendungen (z.B.: smart metering, plc-Kommunikation) sollen auch Publikationen, die die höherfrequenten Emissionen und Störstrahlungen thematisieren, berücksichtigt werden. Die Literatursauswahl fokussiert auf EMV- und gesundheitsrelevante Publikationen mit peer review. Das Hauptgewicht liegt bei Gesundheitsstudien. Der vorliegende Bericht stellt den Forschungsstand bis Anfang 2016 dar.

1.2 Vorgehen und Abgrenzung

Die relevante Literatur wurde aus folgenden drei Datenbanken zusammengestellt: EMF-Portal der RWTH in Aachen, Xplore von IEEE, PubMed von NCBI. Basisstichworte, in verschiedenen "und" Kombinationen verwendet, waren: ELF, 50Hz, powerline, magnetic fields, health, epidemiology, leukaemia, neurodegenerative, EMC, powerline, WPT, exposure. 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 mandantierten Expertengremien oder eigens formierten Fachpanels herausgegebenen Review-Berichte. Die nicht EMV-relevante Literatursauswahl beschränkt sich auf Humanstudien. Artikel zu Zellexperimenten und Tierstudien wurden nicht selektiert. In Ausnahmefällen wird, wo sinnvoll, ergänzend darauf hingewiesen.

Beim vorliegenden Literaturreadar 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 im Gesundheitsbereich.

1.3 Struktur des Berichts

Kapitel 2 widmet sich Fragen zur Expositionserfassung und der im Alltag und am Arbeitsplatz anzutreffenden niederfrequenten Expositionen. Der Hauptteil des Berichts (Kapitel 3) fokussiert auf gesundheitlichen Studien. Einleitend werden die Einschätzungen wichtiger internationaler Gremien zitiert, anschliessend die Studienlage zu den wichtigsten gesundheitlichen Effekten: kindliche Leukämie, andere Krebsarten, neurodegenerative Erkrankungen, Fruchtbarkeit, Schwangerschaft und Geburt, elektromagnetischer Sensibilität, und einigen anderen ausgewählte Themen. Im Anschluss daran wird der Forschungsbedarf in diesen Bereichen umrissen. In Kapitel 4 wird die sozialwissenschaftliche Studienlage dargestellt. Zunächst deskriptive Arbeiten zu Akzeptanzfragen, anschliessend analytische zu Einflussfaktoren. Im letzten Abschnitt wird wiederum der Forschungsbedarf erörtert. Im fünften Kapitel kommt das Thema EMV zur Sprache. Dazu werden ausgewählte niederfrequente Technologien diskutiert. In Kapitel 6 wird – der Vollständigkeit halber – noch die rechtliche Situation, wie sie durch die NISV geregelt ist, dargestellt. Abgeschlossen wird der Bericht mit dem Literaturverzeichnis.



2. NF-EMF Expositionen

2.1 Konzepte

Die nachfolgend erörterten Expositionskonzepte und Expositionsansätze sind im Detail beschrieben in (Durrenberger, Bürgi et al. 2012), (Durrenberger, Frohlich et al. 2014) oder (Röösli 2014). Die Darstellungen an dieser Stelle sind deshalb kurz gehalten und dienen (1) der Begriffsklärung sowie (2) der Vermittlung der in der Forschung für Expositionsabschätzungen hauptsächlich eingesetzten Methoden und Metriken. Für einen Überblick über den Stand des Expositionsmonitorings in Europa verweisen wir auf die oben zitierten zwei Publikationen.

An dieser Stelle sei bereits vermerkt: Der Begriff Exposition kann in einem allgemeinen und einem engen Sinn verstanden werden. Allgemein bezeichnet er Messgrößen der Strahlung, wie sie von Geräten und Anlagen abgegeben wird (Emission), wie sie sich im Raum verteilt (Immission), wie sie Menschen befällt (Exposition im engeren Sinn) oder wie sie sich innerhalb des Körpers manifestiert / verteilt (Dosis). Als Exposition im engeren Sinn versteht man die persönliche Ausgesetzttheit gegenüber einem Stoff, etwa EMF.

2.1.1 Emission und Immission

Als Emission wird die von einer Anlage oder einem Gerät abgegebene elektromagnetische Leistung, peak oder zeitlich gemittelt, verstanden. Im niederfrequenten Bereich wird unterschieden zwischen magnetischem Feld (H-Feld Emissionen) und elektrischem Feld (E-Feld Emissionen). Emissionen dienen Regulatoren dazu, um 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 Immissionslage ableiten (Immissionen setzen sich meist aus vielen Quellen zusammen). Ebensov wenig können aus Emissionsdaten konkrete persönliche Expositionen berechnet werden, denn diese hängen vom konkreten Gebrauch/Verhalten (Expositionsdauer, Nähe) gegenüber Quellen (Infrastrukturen, Konsumgüter) ab.

Als Immission bezeichnet man die an einem Ort im Raum gemessene elektrische oder magnetische Feldstärke bzw. Flussdichte, peak oder zeitlich gemittelt. 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.

2.1.2 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). Aus streng wissenschaftlicher Sicht ist dieses Referenzvolumen nicht in jedem Fall bestimmt. Wenn es um schwache Strahlung unterhalb der Grenzwerte geht sind die allenfalls relevanten biologisch/gesundheitlichen Wirkprozesse unbekannt. Es kann deshalb



kein entsprechendes Referenzvolumen festgelegt werden. Für ein einmal definiertes Referenzvolumen kann grundsätzlich die maximale Exposition (peak) oder eine zeitlich gemittelte Exposition bestimmt werden. Die zeitliche Mittelung ist immer auch eine (geografisch gesehen) „räumliche“, weil sich Menschen bewegen (deshalb kann die Exposition zwischen Menschen in einem gegebenen geografischen Perimeter differieren, abhängig von den Aufenthaltsmustern dieser Menschen).

Dosis: Die im Körper (oder einem interessierenden Teil des Körpers) wirksamen elektrischen Felder bzw. davon abgeleiteten Grössen (etwa: Stromdichte oder spezifische Absorptionsrate SAR), aufgrund der Exposition des Körpers; peak oder zeitlich und räumlich gemittelt. Die Dosis wird in aller Regel messtechnisch an Phantomen oder mit Computersimulationen bestimmt.

2.1.3 Messung und Modellierung

Die Qualität von Expositionsdaten wird 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. Für gesundheitliche Fragestellungen sind die persönliche Exposition und die Dosis die relevanten Konzepte. Emissionen und Immissionen sind bestenfalls Näherungsgrössen, die zur Abschätzung der persönlichen Exposition hilfreich sind.

2.1.3.1 Messungen

Expositionsmessungen: Als Exposimetrie bezeichnen wir die messtechnische Erfassung der persönlichen Exposition. Erhoben werden kann die NF-Exposition von Installationen mit portablen Messgeräten. Da der Körper das elektrische Feld beeinflusst, ist dessen Messung mit einem grösseren Aufwand verbunden (Stativ). Typischerweise wird deshalb meistens das Magnetfeld gemessen, insbesondere auch bei persönlichen Messungen. Die Genauigkeit von Magnetfeldmessungen an ausgewählten Standorten bei Hochspannungsleitungen wird von (Ztoupis, Gonos et al. 2013) mit 10% angegeben. Ungenauer sind Messungen (der persönlichen Exposition) von am Körper getragenen Messgeräten, und da sind insbesondere Daten von Expositionen gegenüber Haushaltsgeräten die nahe am Körper benutzt werden wegen der ausgeprägten Distanzabhängigkeit der Feldstärken nur schwer interpretierbar. Speziell gelten für Exposimetermessungen: (1) für statistisch zuverlässige Daten sind grosse Stichproben von mehreren hundert Personen notwendig, welche mindestens einen Tag lang (24 h) ein Exposimeter korrekt anwenden, oder aber kleinere Stichproben, wenn die Geräte über mehrere Tage im Einsatz sind. Das expositionsrelevante Verhalten muss zudem mittels repräsentativer Befragungen erhoben werden. Der Ansatz ist dementsprechend aufwändig. (2) Je nach dem Ort wo sich das Exposimeter am Körper befindet, wird das Gerät bei ein und demselben Feld andere Messwerte generieren. Um aus diesen die „wahre“ Exposition abzuschätzen, muss man einerseits die Trageposition(en) kennen und andererseits die Ablesewerte numerisch umrechnen, z.B. auf die Feldstärke am Ort des Dosimeters, wenn der Körper nicht dort wäre, oder auf eine (über ein Referenzvolumen) gemittelte Exposition (wenn der Körper nicht dort wäre). (3) Bei Exposimetermessungen ist die Geräteempfindlichkeit entscheidend. (4) Die zeitliche Variabilität von Messdaten ist eine weitere Herausforderung in der Bestimmung der „wahren“ Exposition. Jede Messung ist eine Momentaufnahme und bildet selten eine durchschnittliche (über längere Zeit gemittelte) Immissionssituation ab. Deshalb ist es notwendig, eine breite Datenbasis zu erzeugen, um so zeitliche Schwankungen „auszumitteln“. Bei mehreren hundert Messreihen kann die Datenvariabilität 10 bis 30% betragen. (5) Für nahe am Körper genutzte Geräte sind Feldmessungen wenig geeignet, denn die Feldstärken sind stark distanzabhängig. Das gilt einerseits für die „wahre“ Exposition: die Art der Nutzung / Gerätehaltung entscheidet wesentlich über das „Einkoppelungsverhalten“ des Feldes; sie kann wichtiger sein als die modellbedingte Variabilität der Emissionen innerhalb einer Gütergruppe. Andererseits ist das Ergebnis



einer Exposimetermessung sehr stark von der Distanz zwischen Exposimeter und emittierendem Gerät abhängig. Je nach Nutzungsart und Position des Exposimeters am Körper werden stark unterschiedliche Feldwerte registriert.

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 von Dosen Phantome verwendet, welche die elektrischen Eigenschaften des Körpers möglichst gut repräsentieren. Weil dazu Elektrolyten verwendet werden, vermisst man homogene Körpermodelle, die nicht zwischen Geweben unterscheiden. Die Aussagekraft bleibt damit eingeschränkt.

2.1.3.2 Modellierungen

Expositionsmodellierungen: Man kann die Exposition auch durch Berechnung zu erfassen 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 (Burgi 2011). Häufig werden die Immissionen für eine bestimmte 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 %-Bereich. Mit sehr grossen Unsicherheiten behaftet ist auch die Modellierung von niederfrequenten Magnetfeldexpositionen gegenüber nahe am Körper verwendeten Gütern (Haushaltsgeräte, Maschinen). In diesem Bereich besteht 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. 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 and Hirata 2016).

2.1.3.3 Fazit

Im Zentrum des Interesses stehen Immissionen und persönliche Expositionen. Die Messtechnik für NF-EMF Immissionen ist etabliert. Ebenfalls 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 ver-

11/113



füßbar, 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.

2.1.4 Vorbemerkung zu den nachfolgenden Abschnitten

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

Fast ausnahmslos alle Arbeiten beziehen sich dabei auf 50/60 Hz Expositionen. Oberschwingungen, auch als „dirty electricity“ (siehe 5.2.1) und potenziell gesundheitsgefährdendes Agens bezeichnet (dazu: (Graham 2000), (Milham and Stetzer 2013)), werden kaum explizit berücksichtigt. Ein kürzlich erschienener Review von (de Vocht and Olsen 2016) legt nahe, dass entsprechende Hinweise wissenschaftlich nicht begründet sind. (Fiocchi, Liorni 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%.

2.2 Daten zu Expositionen

2.2.1 Haushalte

2.2.1.1 Quellen

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). 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.

2.2.1.2 Immissionen und Emissionen

Insgesamt sind die Immissionen von Hausinstallationen klein. Der 24h 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, Afifi 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, Dechant et al. 2010) oder (Tomitsch and Dechant 2015) für Österreich, mit einer über die letzten Jahre leicht fallenden Tendenz. Messungen in Spanien (Calvente, Davila-Arias et al. 2014), sowie in Griechenland (Kottou, Nikolopoulos et al. 2015), (Nikolopoulos, Koulouglotis et al. 2015) und Kanada (Richman, Munroe et al. 2014) ergaben durchschnittliche Magnetfeldimmissionen in der Grössenordnung von 0.1-0.2 μT . Gemäss (Grellier, Ravazzani 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 .



Nur Wohnungen im Umfeld von grösseren Strominfrastrukturen weisen höher Pegel auf. (Vulevic and Osmokrovic 2011) geben als Grössenordnung der Immissionen hochexponierter Wohnungen im direkten Umfeld von Hochspannungsleitungen Werte von 2-4 μT an (siehe auch: (Nicolaou, Papadakis et al. 2011), (Nikolopoulos, Koulougliotis et al. 2015)). Allerdings liegen nur wenige Häuser sehr nahe bei Hochspannungsleitungen. Nach (Huss, Spoerri 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, Demoury et al. 2013), für England 0.1% (de Vocht and Lee 2014). Nach (Bessou, Deschamps et al. 2013) liegen die Feldstärken ausserhalb dieses 50 m Korridors fast durchwegs unter 1 μT (Ausnahme: 400 kV Leitungen). (Maslanyj, Mee et al. 2007) haben den Beitrag von Hochspannungsleitungen an den in-house 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, Markkanen et al. 2008), (Roosli, Jenni et al. 2011), (Zaryabova, Shalamanova et al. 2013), (Shalamanova, Israel et al. 2015).

Die Immissionen von Haushaltsgeräten sind stark betriebs- und produkt- bzw. modellabhängig. Einzelangaben sind immer mit einer gesunden Portion Pragmatik und Grosszügigkeit zu interpretieren. Figur 1 zeigt Angaben des BAFU.

	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

Figur 1: Immissionen von Haushaltsgeräten in drei Abstandskategorien; in μT (Quelle: (BUWAL 2005); Seiten 31-33).

In einer Emissions-Messkampagne von über 1000 Geräten kommen (Leitgeb, Cech 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, Cech et al. 2008b) ist es unklar, ob bei ihren Werten, die sie als worst-case Immissionswerte interpretieren, die Basisgrenzwerte eingehalten sind.

(SCENIHR 2015) bemerkt, dass bei vielen Geräten die zeitliche Mittelung (auch über kurze Perioden von 1s) problematisch sei, weil Spitzenbelastungen im Millisekundenbereich auftreten können und Nerven stimulieren. Die Einhaltung von Produktnormen 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: 5.2.4). 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 (siehe: 5.2.1) können gemäss (Mathys 2012) jedoch deutlich höhere Kriechströme auftreten.

(Does, Scelo 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.

In den letzten Jahren wurden auch mehrere Studien 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, Ohta et al. 2015), (Fiocchi, Liorni et al. 2015), (Kavet 2015), (Liorni, Parazzini et al. 2015), (Hocking 2015). Insgesamt kommen die Studien zum Schluss, dass die Referenzwerte den Fötus schützen. Einige Unsicherheiten bleiben allerdings bestehen, 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



2.2.2 Öffentliche Orte

2.2.2.1 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 und durch nicht entmagnetisierte Reifen, berücksichtigt werden.

2.2.2.2 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 Vollast (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 erwähnten Maximalwerten: Reduktion). Gemäss den Angaben von (Nicolaou, Papadakis et al. 2011) sind die Schwankungen noch grösser (bis Faktor 10), wenn man worst-case Phasenbelegungen berücksichtigt. Erdkabel weisen direkt oberhalb der Kabelkanäle grössere 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 .

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 während der gleichmässigen Fahrt. Beim Bremsen kann Strom gewonnen und ins Netz zurückgespielt 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 $1 \mu\text{T}$ betragen. Zu beachten gilt: Die Eisenbahn fährt mit 16.7 Hz. Der Immissionsgrenzwert beträgt hier $300 \mu\text{T}$ (bei 50 Hz: $100 \mu\text{T}$). In den Passagierwagen innerhalb des Zuges misst man ebenfalls niederfrequente Magnetfelder, einerseits von den (Rückströme), 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, Egger et al. 2008) betragen die Magnetfeldbelastungen bei Zugbegleitern im Durchschnitt $4 \mu\text{T}$. Maximale Werte unter $1 \mu\text{T}$ (rms-Breitbandmessungen 40–800 Hz) geben dagegen (Halgamuge, Abeyrathne 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 Transients auftreten können, die von Wechselfeldmessgeräten erfasst werden. Innerhalb von Trams wurden niederfrequente Magnetfelder (Breitbandmessung 40–800 Hz) mit Flussdichten um $2 \mu\text{T}$ (Spitzen bis $7 \mu\text{T}$) gemessen (Halgamuge, Abeyrathne 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 $1 \mu\text{T}$ lagen, mit Spitzenwerten von einigen wenigen Mikrottesla. Eine neue Messreihe (Hareuveny, Sudan et al. 2015) bei 10 verschiedenen Modellen ergab Werte unter $0.2 \mu\text{T}$. Eine gemäss Leitgeb (siehe 2.2.1.2) durchgeführte Summierung der Peak-Werte würde allerdings in beiden Fällen höhere Immissionen zeigen. Simulationen kommen frequenzabhängig teilweise auch zu höheren Werten (Concha, Velez et al. 2015). Von Fahrzeugen mit elektrischem Antrieb (Hybridfahrzeuge) gehen zusätzliche Feldbelastungen aus. 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 Geschwindigkeit grösser – über $0.5 \mu\text{T}$ (Hareuveny, Sudan 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, Kessi et al. 2006) im Fussbereich Flussdichten über $2 \mu\text{T}$ gemessen, mit Spitzenwerten bis $10 \mu\text{T}$. Allerdings wird mit diesen vergleichsweise hohen Zahlen der ICNIRP Grenzwert erst zu etwa 10% ausgeschöpft. Diese Grössenordnungen sind vergleichbar mit den Werten von (Halgamuge, Abeyrathne et al. 2010), (Vassilev, Ferber et al. 2015).

2.2.3 Arbeitsplätze

2.2.3.1 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, Lokomotivmotoren 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 2.2.3.3). Die maximalen Immissionen liegen meist unterhalb der Grenzwerte für Arbeitsplätze, insbesondere unterhalb der Grenzwerte für die Stimulation des zentralen Nervensystems. Ausnahmen sind Induktionsöfen und MRI. An diesen Arbeitsplätzen können die Maximalwerte auch die Limiten für die Stimulation von peripheren Nerven (zum Teil deutlich) übersteigen.

2.2.3.2 Immissionen

In der Elektrizitätswirtschaft betragen die durchschnittlichen Immissionen im Bereich der Sammelschienen von Generatoren gemäss einer Literaturübersicht von (Bowman 2014) um $10 \mu\text{T}$, mit Maximalwerten bis $40 \mu\text{T}$. Eine neuere Arbeit hat die Grössenordnung bestätigt (Ozen, Helhel 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 2.2.2.2). In Umspannwerken liegen die durchschnittlichen Immissionen in der Grössenordnung einiger μT , an exponierten Orten können jedoch Maximalwerte von über $100 \mu\text{T}$ gemessen werden. Sehr hohe Maximalwerte können in Kabelkanälen von Höchstspannungsleitungen herrschen ($5\text{--}10 \text{ mT}$), die durchschnittlichen Immissionen werden mit $10 \mu\text{T}$ angegeben. (Stam 2014) referiert für maximale Expositionen Literaturwerte im Bereich zwischen $100 \mu\text{T}$ und 1 mT . (McCallum, Whitfield Aslund et al. 2014) massen die Immissionen von Windturbinen. Die Flussdichten am Fuss der Turbinen lagen um $0.01 \mu\text{T}$ 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, Lortscher et al. 2007) ergaben in Führerständen von Lokomotiven durchschnittliche Immissionen im Bereich von $20 \mu\text{T}$, für Werkstätte um $5 \mu\text{T}$.

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 $500 \mu\text{T}$ 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 peaks bis über 10 kHz). Andere elektrische Schweißarten erzeugen deutlich tiefere, aber immer noch vergleichsweise grosse Immissionen im Bereich von 10 bis einige $100 \mu\text{T}$ (Stam 2014).

Andere Branchen. Gemäss Messungen von (Roivainen, Eskelinen et al. 2014) gibt es sehr grosse Unterschiede im Verkaufsbereich bzw. an Kassenarbeitsplätzen. Meist liegen die Messwerte unterhalb $0.5 \mu\text{T}$. Spitzenwerte können aber in Ausnahmefällen mehrere μT betragen. In Büros liegen die Immissionen im Bereich von $0.1\text{--}0.2 \mu\text{T}$. Im Gesundheitswesen wurden v.a. Immissionen in Spitälern gemessen. Für 50 Hz werden Maximalwerte von einigen $100 \mu\text{T}$ für Arbeitsplätze im Bereich Phototherapie und Intensivpflege angegeben, einige $10 \mu\text{T}$ 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).



2.2.3.3 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. Meist werden dafür bereits publizierte Daten aus entsprechenden Messkampagnen verwendet. Eine häufig genutzte Zusammenstellung haben (Bowman, Touchstone et al. 2007) vorgelegt. Updates dieser Arbeit finden sich bei (Koeman, Slottje et al. 2013) und bei (Turner, Benke et al. 2014). Ein jüngerer Vorschlag verwendet Expertenschätzungen (Fischer, Vergara et al. 2015), ein anderer stärker individualisierte Daten aus verschiedenen zugänglichen Quellen, die auf Aussagekraft und Plausibilität geprüft und in einer „Occupational Exposure Measurement Database“ zusammengefasst sind (Vila, Bowman 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/Transfostationen: 1.8 μT (bei (Li, Xiong 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 .

2.2.4 Alltagsexpositionen

2.2.4.1 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.

Zur Erfassung der Exposition von im Alltag nahe am Körper genutzten Geräten (Elektrogeräte, Funkanwendungen) 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 2.2.4.3).

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 h) 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.



2.2.4.2 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 2.2.1.2. diskutierten Installationen und Geräten.

2.2.4.3 Expositionen

Persönliche Expositionen an ausgewählten Orten: Gemäss (Bowman 2014) betragen die durchschnittlichen persönlichen Expositionen in Haushalten in Europa um $0.04 \mu\text{T}$, in Nordamerika werden sie als doppelt so hoch angegeben. Der Anteil der Haushaltsgeräte wird dabei auf etwa einen Drittel veranschlagt (Behrens, Terschuren 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, Struchen et al. 2014). Auf die Bedenken seitens SCENIHR wurde bereits hingewiesen (2.2.1.2).

Für Schulen und Büros gibt (Bowman 2014) persönliche Durchschnittsexpositionen um $0.1 \mu\text{T}$ an. Aussenmessungen von (Roosli, Foerster et al. 2015) in der Schweiz zeigen mittlere Magnetfeldexpositionen (40–800 Hz) von: $0.3 \mu\text{T}$ für Stadtzentren, um $0.2 \mu\text{T}$ in öffentlichen Verkehrsmitteln, und unterhalb $0.2 \mu\text{T}$ 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, Affi et al. 2006) in einer Literaturarbeit zusammengestellt. Dabei referieren sie Daten zu Belgien, Kanada, Deutschland, Korea und den USA. Die Anteile der Personen in der niedrigsten Expositions-kategorie ($\leq 0.1 \mu\text{T}$; geometrisches Mittel) betragen in diesen Ländern 92%, 64%, 74% (arithmetisches Mittel, AM), 64% (AM) und 73%. In der höchsten Expositions-kategorie ($> 0.4 \mu\text{T}$): 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, Wernli et al. 1995). Insgesamt wurden 552 Personen mit Exposimetern ausgerüstet, welche während 24 h die relevanten Felder massen. Die täglichen Mittelwerte lagen für 75 % der Teilnehmer unterhalb von $0.2 \mu\text{T}$. 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. (Struchen, Liorni 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, Baliatsas et al. 2015) – um $0.04 \mu\text{T}$ (geometrisches Mittel; GM), der höchste 48-Stunden-Wert $0.26 \mu\text{T}$ (GM); 2% der Messwerte lagen über $0.4 \mu\text{T}$. Dabei zeigte sich, dass der geometrische Mittelwert der Schlafzimmerimmissionen gut als Näherung der mittleren persönlichen Exposition genommen werden kann (Struchen, Liorni et al. 2015). (Lewis, Evenson et al. 2015) und (Lewis, Hauser et al. 2015) kommen in ihren Studie in North Carolina 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 wurde, betrug um $0.1 \mu\text{T}$ (man beachte dass in den USA tiefere Netzspannungen verwendet werden, was zu einer Erhöhung der Mag-



netfelder führt). In einer französischen Studie (Magne, Souques et al. 2011) mit 977 Kindern und 1052 Erwachsenen, die alle mit persönlichen Messgeräten (24 Stunden) ausgestattet waren wurden mittlere Expositionen von $0.09 \mu\text{T}$ (arithmetisches Mittel, AM) bzw. $0.02 \mu\text{T}$ (GM) für Kinder und $0.14 \mu\text{T}$ (AM) bzw. $0.03 \mu\text{T}$ (GM) gemessen. Einen Ansatz, der verschiedene Mess- und Simulationsmethodiken integriert, haben (Gallastegi, Guxens et al. 2016) vorgeschlagen, um die Exposition von Kindern und Jugendlichen zu erfassen. Resultate aus dieser Studie wurden noch nicht publiziert.

2.3 Forschungsbedarf

Grosser Forschungsbedarf besteht zu Expositionen gegenüber neuen Anwendungen (siehe Kapitel 4). Potentiell besonders kritisch sind Anwendungen zur drahtlosen Energieübertragung, beispielsweise für das Aufladen von Batterien. 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.

Weiter 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.

Wenige NF-EMF Messungen wurden in den letzten Jahren im beruflichen Umfeld gemacht. 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, Transformatoren). Es ist auch noch 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. Neue Messungen zeigen, dass insbesondere im urbanen Gebiet niederfrequente Magnetfelder in den Strassen sehr hoch sein können, aufgrund der unterirdischen Verkabelung. Es wäre wichtig, diesen Expositionsbeitrag besser erfassen zu können. Auch die Auswirkungen von Verkabelung von Höchstspannungsleitungen auf die Expositionssituation der Bevölkerung wurden bisher nicht 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..

Umfassende Expositionsabschätzungen für die Schweizer Bevölkerung sind bisher nicht gemacht worden. Solche Daten sind hilfreich für die Risikokommunikation und das Risikomanagement. Für solche Arbeiten wird empfohlen, sowohl Infrastrukturanlagen (Hochspannungsleitungen, Transformatoren) wie auch andere Quellen (elektrische Geräte, Hausverkabelungen) zu berücksichtigen und deren Anteil an der Gesamtexposition abzuschätzen.

Nötig sind auch Expositionsabschätzungen für zukünftig neuartige Infrastrukturen, die im Zusammenhang mit der Energiewende in Europa zum Einsatz kommen dürften, z.B. unter dem Stichwort Supergrid: Transportleitungen für Hochspannungs-Gleichstrom sowie kombinierte Transportleitungen für Gleichstrom und Wechselstrom. Dieser Bedarf (er wird in Europa als dringend eingestuft; siehe: http://ec.europa.eu/health/scientific_committees/emerging/docs/scenihr_s_002.pdf), dürfte auch und insbesondere im Hinblick auf das politische Risikomanagement sehr wertvoll sein.



3. NF-EMF und Gesundheit

3.1 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). Generell kann gesagt werden, dass in den letzten 15 Jahren die Anzahl Studien im Bereich EMF und Gesundheit deutlich zugenommen hat. Das gestiegene Interesse bezog sich dabei vor allem auf mögliche Effekte von Hochfrequenzstrahlung, insbesondere im Zusammenhang mit der rasant gewachsenen Mobilkommunikationstechnologie. 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. Inzwischen scheint sich das Interesse wieder etwas zurückzulagern.

Einerseits ist das politisch-gesellschaftliche 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, vielleicht nicht im noch vor einigen Jahren vermuteten Ausmass, aber 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. 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.

Andererseits haben die jüngeren Forschungsergebnisse 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.

Im Hinblick auf die kommende Abschnitte muss noch der folgende, wichtige inhaltliche Punkt erwähnt werden: 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 Körperinneren 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 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 diese 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. Da-



bei wird hauptsächlich auf epidemiologische Arbeiten und Humanstudien verwiesen. Vereinzelt werden auch Tier- oder Zellstudien angesprochen. Tierstudien arbeiten häufig mit starken Feldern, die viele Grössenordnungen oberhalb der durchschnittlichen Alltagsexposition des Menschen liegen. Schlussfolgerungen aus solchen Versuchen für die Gesundheit des Menschen sind deshalb doppelt heikel: einerseits ist grosse Vorsicht geboten, wenn man aus Tiermodellen auf den Menschen schliessen will, andererseits können Befunde, die unter hohen Expositionen erzielt wurden, nicht einfach auf Alltagsexpositionen verallgemeinert werden. Noch heikler sind entsprechende Schlussfolgerungen aus Zellstudien. Letztere dienen deshalb hauptsächlich dazu, mögliche Wirkmechanismen auf molekularer und zellbiologischer Ebene zu finden.

Die in Kapitel 3.2 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 „Grosswetterlage“, wie sie von den zitierten Expertengremien gesehen wird, darstellen. Die für die konkreten „Wetterverhältnisse“ relevanten und aktuellen Einzelstudien zu den wichtigsten Gesundheitsthemen finden sich demgegenüber im umfangreicheren Kapitel 3.3 Auf dieses beziehen sich auch die Bewertungen zum Forschungsbedarf (Kapitel 3.4).

3.2 Wichtige Review-Berichte

3.2.1 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). Eine neue Publikation zu HF-EMF wird voraussichtlich 2016 erscheinen. HF-EMF wurde bereits 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.

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 (<http://www.who.int/peh-emf/about/WhatisEMF/en/index1.html>). Es gibt auch ein generelles Fact Sheet zu gesundheitlichen Risiken, das auf Deutsch vorliegt (link zum Fact Sheet: <http://www.who.int/peh-emf/about/en/whatareemfgerman.pdf?ua=1>). 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 neuro-behavioural 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 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 μ T 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”.

3.2.2 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 einberufenen internationalen 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 über 100 Stoffe).

Gruppe 2a: Der Stoff ist wahrscheinlich krebserregend. Eine kanzerogene Wirkung ist im Tierversuch nachgewiesen worden und begrenzte Hinweise auf erhöhte Tumorfrequenzen sind in epidemiologischen Studien vorhanden. Beispiele: Acrylamid, Feinstaub von Cheminées, UV-Strahlung, Dieselabgase, Solarien (Total ca. 60 Stoffe).

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 gegen 300 Stoffe).

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 über 500 Stoffe).

Gruppe 4: Der Stoff ist wahrscheinlich nicht krebserregend (Total 1 Stoff).

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, welche langfristig gegenüber 50/60Hz Magnetfeldern von Hochspannungsleitungen exponiert waren (Flussdichte > 0.4 μ T). Die berechnete Risikoerhöhung lag im Bereich von Faktor 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 krebserregende Wirkung von ELF Magnetfeldern vorlagen (inadequate evidence) und dass aus Tiermodellen keine relevanten Daten zu kanzerogenen Wirkungen von NF-EMF vorlagen.

3.2.3 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 μ T. 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 and Simko 2014) und von grosser gesundheitlicher Bedeutung sind.

Die Studie wurde auch, wie das bei gewichtigen Arbeiten der Fall ist, kritisiert, insbesondere von Vertretern der BioInitiative (siehe 3.2.6) (Sage, Carpenter et al. 2015) – Antwort darauf seitens SCENIHR: (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)



3.2.4 ICNIRP

Die Internationale Kommission zum Schutz vor nicht-ionisierender Strahlung (ICNIRP – International Commission 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). 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 (<http://www.icnirp.org/en/frequencies/low-frequency/index.html>) kommt die ICNIRP zum generellen Schluss:

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

3.2.5 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 sind die Spezifikationen unterschiedlich, die Empfehlungen für maximale Expositionen (Grenzwerte) sind häufig gleich bzw. ähnlich. Was die Einschätzung der gesundheitlichen Wirkungen schwacher Strahlung anbetrifft, unterscheiden sich ICNIRP und ICES kaum, so dass an dieser Stelle auf eine Darstellung der Meinung von ICES verzichtet werden kann; das nicht zuletzt auch deshalb, weil die letzte systematische Literatur-Review durch ICES 2003 publiziert wurde (Bioelectromagnetics 2003). Gegenwärtig ist eine Neubeurteilung in Vorbereitung bzw. in Gang.



3.2.6 BioInitiative

Es handelt sich um eine Gruppe von Wissenschaftlern, welche der „Mainstream“-Meinung, wie sie insbesondere durch ICNIRP oder ICES vertreten wird, kritisch gegenüber stehen und die in der jüngeren Forschung erzielten Ergebnisse als hinreichend erachten, um eine gesundheitliche Gefährdung von EMF auch unterhalb der geltenden Grenzwerte zu proklamieren. Die Gruppe plädiert folglich für eine Revision (deutliche Senkung) der heute üblichen Grenzwerte. Viele Wissenschaftler dieser Gruppierung haben kürzlich unter dem Namen EMF Scientist einen entsprechenden politischen Appell an UNO und WHO lanciert (www.emfscientist.org). Ein erster Report mit der wissenschaftlichen Evidenz für ihre Einschätzung erschien 2007, ein Update 2012. Beide Berichte sind innerhalb der wissenschaftlichen Gemeinschaft heftig diskutiert und kommentiert worden.

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 (...)

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“.

In den späteren Kapiteln dieses [unseres] Berichts wird auf Differenzen zwischen Bewertungen des BioInitiative Reports und weniger alarmistischen Einschätzung eingegangen.



3.2.7 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 (siehe 3.2.2) durchgeführt (Schuz, Dasenbrock 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.”

3.2.8 Ausgewählte nationale Reports

3.2.8.1 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 leukaemia; 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. Bezüglich Exposition gegenüber 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“.

(Anmerkung: die schweizerische NISV kennt keine Grenzwerte für elektrische Gleichfelder). Als weiteres Gesundheitsrisiko diskutiert die SSK die Störfestigkeit von Implantaten und schlägt vor, dass die Exposition gegenüber 50Hz Magnetfeldern 10 μ T pro Quelle im üblichen Gebrauchsabstand (15 μ T bei singulärer Quelle) nicht überschreiten sollte.



3.2.8.2 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 (zehnte) Bericht datiert aus dem Jahr 2015 (SSM 2015). Die wichtigsten Einschätzungen hinsichtlich niederfrequenter Felder (p. 6):

„(...) the question whether extremely low-frequency magnetic fields have any influence on the development of childhood leukaemia is still unresolved. There have been some indications of an increased risk for Alzheimer's disease and the Motor Neuron Disease Amyotrophic Lateral Sclerosis (ALS), mostly based on occupational studies. It has been hypothesized that electric shocks rather than magnetic fields could be involved in the development of ALS. However, two new studies on ALS support an association with ELF-MF exposure rather than with electric shocks. A new study on Parkinson's disease and occupational ELF-MF field exposure and electrical shock does not indicate an association. In conclusion, similar to previous research, recent studies suggest that an association between ELF-MF exposure and ALS and Alzheimer's diseases may exist, which warrants further investigation“.

Im neuesten (elften) Bericht, der soeben publiziert wurde (SSM 2016), steht in Bezug auf ALS (p. 57):

„For ALS, a large population-based Swedish study suggested that electric shocks, but not ELF magnetic field exposure, may be a risk factor for the working population less than 65 years of age. This is in contrast to studies that appeared last year that suggested it may be the other way around. This question therefore remains as yet unresolved.“

Im selben Bericht wurde auch ein Rückblick auf die EMF Forschung für die letzten 13 Jahre seit dem Erscheinen des ersten SSM Berichtes veröffentlicht. Dabei wird auf die bestehende Unsicherheit in Bezug auf Kinderleukämie und neurodegenerative Erkrankungen hingewiesen. Viele Zellstudien fanden einen erhöhten oxidativen Stress bei Exposition gegenüber niederfrequenten Magnetfeldern aber bisher konnte nicht gezeigt werden, dass dies die Erklärung für die beobachteten Assoziationen von Magnetfeldern mit Kinderleukämie oder neurodegenerativen Erkrankungen sein könnte. In dieser Übersicht wurden aber auch Erkrankungen identifiziert, wo die Forschung mittlerweile ein Risiko mit hoher Wahrscheinlichkeit ausschliessen kann: „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.“...“ Progress has been made on the previously open question of a relation between exposure to ELF magnetic fields and Parkinson's disease. In this case the new available data suggest the absence of an effect. The same can be concluded concerning cardiovascular diseases.“...“ In the last 13 years little epidemiologic research on symptoms and ELF magnetic field exposure has been conducted. However, in the few experimental studies investigating acute symptoms such as headache or dizziness in human volunteers no association was seen. In general, the strength of the evidence for an association has somewhat decreased over time.“

3.2.8.3 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 folgert daraus (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 29/113



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.

3.2.8.4 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. Kürzlich wurde auch die Gruppe BERE-NIS (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. Die Gruppe ist zunächst für 3 Jahre mandatiert.

Ein Literaturbericht des BAFU von 2009 ist dem Zusammenhang zwischen Krebs und NF-EMF Expositionen gewidmet (Hug, Rapp 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 genotoxischen 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.“

Auf der Website des BAFU (<http://www.bafu.admin.ch/elektrosmog/01095/01097/index.html?lang=de>) wird dieser Befund quantifiziert und qualifiziert:

„In der Schweiz erkranken pro Jahr rund 60 Kinder neu an Leukämie. Erhebungen in der Schweiz und in Deutschland ergaben, dass nur rund zwei Prozent der Bevölkerung einer mittleren Belastung durch niederfrequente Magnetfelder von mehr als 0.4 Mikrottesla ausgesetzt sind. Eine Verdoppelung des Risikos für Kinderleukämie bei solchen Magnetfeldbelastungen würde für die gesamte Schweizer Bevölkerung daher ungefähr eine Neuerkrankung pro Jahr erklären. Die übrigen 59 Fälle wären anderen Ursachen zuzuschreiben. Selbst wenn Magnetfelder das Kinderleukämie-Risiko also tatsächlich erhöhten, was noch nicht bewiesen ist, würde dies kein Gesundheitsproblem grösseren Ausmasses darstellen.“

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“.

3.2.9 Bewertung

Die internationalen und nationalen Expertengremien kommen zum Schluss, dass es offene Fragen gibt zu den gesundheitlichen Wirkungen von NF-EMF. 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 DNA nachgewiesen, und bei schwachen Magnetfeldexpositionen ein Anstieg der Konzentration von freien Radikalen beobachtet. Diese Befunde könnten auf einen möglichen Wirkmechanismus hinweisen und sollten gezielt 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. Für fast alle anderen untersuchten gesundheitlichen Endpunkte finden sich laut den zitierten Experteneinschätzungen in der wissenschaftlichen Literatur wenige Belege für eine Beeinträchtigung. Dies gilt insbesondere auch für Symptome der Elektrosensibilität.

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.

3.3 Studien zu ausgewählten Themen

3.3.1 Kindliche Leukämie

3.3.1.1 Ausgangslage

In den im ersten Kapitel 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, Sudan 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, Sheppard et al. 2000) und (Ahlbom, Day 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: $> 0.1 \mu\text{T}$) ergibt sich eine ungefähre Verdoppelung des Risikos von Kindern, an Leukämie zu erkranken.

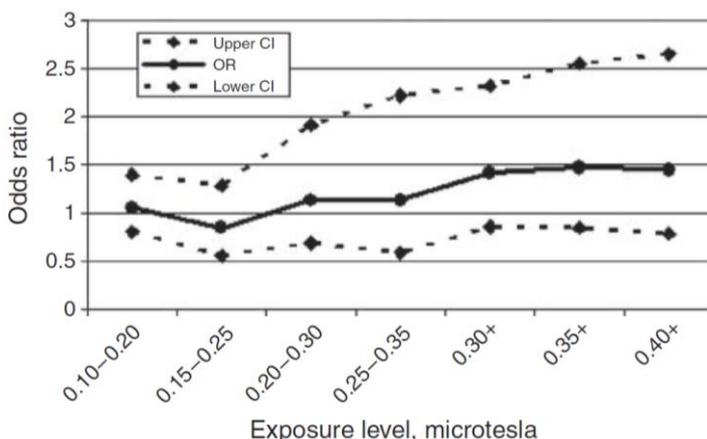
Die Umschreibung „möglicherweise kanzerogen“ begründet einen Verdacht, bedeutet aber keinen Nachweis einer kanzerogenen Wirkung. Sodann: Nur ein kleiner Prozentsatz der Bevölkerung ist auf Dauer erhöhten Magnetfeldbelastungen ausgesetzt (Schätzungen variieren meist um 1–3% der Kinder).

3.3.1.2 Ausgewählte neuere Studien

Die jüngsten Studienresultate und Diskussionen befeuern die uneinheitliche Datenlage weiter, weshalb nach wie vor Interpretationsspielraum vorliegt.

Wichtig ist die gepoolte Analyse von (Kheifets, Ahlbom et al. 2010), in der 7 neuere Arbeiten berücksichtigt wurden (Bianchi, Crosignani et al. 2000), (Schuz, Grigat et al. 2001), (Kabuto, Nitta et al. 2006), (Lowenthal, Tuck et al. 2007), (Kroll, Swanson et al. 2010), (Malagoli, Fabbi et al. 2010), (Wunsch-Filho, Pelissari et al. 2011). Der Gesamtbefund (siehe auch Figur 2; 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“.



Figur 2: Risikoschätzer (korrigiert nach Geschlecht, Alter und sozioökonomischem Status) zu kindlicher Leukämie aus der gepoolten Analyse von (Kheifets, Ahlbom et al. 2010). Referenzniveau: $< 0.1 \mu\text{T}$.

Die dannzumal grösste Untersuchung zu Kinderleukämie und Hochspannungsleitungen erschien 2005 (Draper, Vincent 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 Nachfolgestudie der Gruppe (Kroll, Swanson et al. 2010), die Eingang in die Meta-Analyse von (Kheifets, Ahlbom et al. 2010) fand, bestätigte die Originalbefunde. Die Autoren warnen aber wiederum aufgrund der vergleichsweise wenigen Fälle vor Überinterpretationen.

Keine Assoziationen mit häuslichen niederfrequenten Magnetfeldexpositionen stellten eine tschechische Untersuchung (Jirik, Pekarek et al. 2012) und eine italienische (Salvan, Ranucci et al. 2015) fest. In der gepoolten Analyse zu den Überlebenschancen und zum Rückfallrisiko von mit Leukämie diagnostizierten Kindern (Schuz, Grell 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. Die Arbeiten von (Hug, Grize et al. 2010) und von (Reid, Glass 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, Fei et al. 2016), 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”.

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.

(Bunch, Swanson 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.

Das Update einer früheren dänischen Studie, die neu die Zeit von 1968-2003 umfasst (Pedersen, Johansen et al. 2015), ergab einen Risikoschätzer von 1.63, was in etwa den Risikowerten aus gepoolten Analysen entspricht. Eine Risikoerhöhung von über 2 ergab dagegen eine, allerdings nicht begutachtete, iranische Studie (Sohrabi, Tarjoman et al. 2010). Eine zweite iranische Studie, die allem Anschein nach doppelt publiziert wurde (Dechent and Driessen 2016), bezifferte den Risikofaktor auf über 3.5 (Tabrizi and Hosseini 2015), (Tabrizi and Bidgoli 2015). Die Expositionsangaben sind aber so mangelhaft, dass der Studie kaum Aussagekraft zukommt. Eine französische Arbeit (Sermage-Faure, Demoury et al. 2013) errechnete ein erhöhtes Leukämierisiko von 1.7 für Kinder die näher als 50 m von Höchstspannungsleitungen (> 225 kV) entfernt wohnen. Eine neue Meta-Analyse mit 9 Studien



(die grösstenteils schon früher in den erwähnten gepoolten Analysen berücksichtigt worden sind) publizierten (Zhao, Liu 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 $< 0.1 \mu\text{T}$, statistical association between magnetic field intensity $\geq 0.4 \mu\text{T}$ 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”.

Eine indische Review (Kokate, Mishra et al. 2016) kam zum qualitativ gleichen Schluss, allerdings überzeugt die Arbeit methodisch nicht. 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. Er stellt fest, 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 kommt bei der Diskussion dieser Studie zum Schluss (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 $0.3/0.4 \mu\text{T}$. 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.”

3.3.1.3 Hypothesen zu Störgrössen

Zu möglichen intervenierenden Variablen wurden in den letzten Jahren neue Studien veröffentlicht. Eine Variable ist der sozioökonomische Status (SES), eine andere Kontaktströme, eine dritte 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 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, Bunch et al. 2012), (Kroll, Stiller 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, Keegan 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 stark 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, Feychting et al. 2005). Die Gesamtsachlage bleibt deshalb weiterhin unklar; siehe dazu auch: (Adam, Rebholz et al. 2008).

Hinsichtlich Kontaktströme: Anfang der 2000er Jahre wurde von Kavet und Kollegen die Hypothese vorgebracht, dass Kontaktströme (Kriechströme auf leitfähigen Wasserrohren; siehe: 5.2.4) 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. Es wurde stets vermutet, dass der Risikofaktor dafür die (direkte Einwirkung der) Magnetfelder der HSL sind. Kontaktströme könnten ev. eine andere (indirekte) Erklärung liefern, 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 Magnetfeldstärken und Kontaktströmen (Spannungen) in Häusern festgestellt (Kavet, Zaffanella et al. (2000), (Kavet and Zaffanella (2002), (Kavet, Zaffanella et al. (2004), (Kavet (2005), (Kavet, Hooper et al. 2011). Dieser Zusammenhang ist allerdings wenig robust. Bei (Does, Scelo et al. 2011) ist er schwach ausgeprägt, (Lilien, Dular et al. (2009) fanden gar keinen Bezug und (Kavet, Hooper 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 Studien sind aber klein und haben nur beschränkte Aussagekraft. Daher sind weitere Arbeiten zu diesem Thema nötig, damit die Frage abschliessend beurteilt werden kann.

(Chan, Hattori et al. (2013) und (Chan, Ohta 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, 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, Korpinen 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 μ T 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; siehe: (Kavet, Bailey et al. 2008), (Dawson, Caputa 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 wesentlich auf Modellannahmen beruhenden Argumente und Grössenordnungen sollten mit Vorsicht genossen werden; nicht zuletzt, weil die Gültigkeit der Kontaktstrom-Hypothese wissenschaftlich nicht bewiesen ist und epidemiologische Daten zum postulierten Zusammenhang kaum vorhanden sind.

Ähnlich liegt 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-neutralen Luftschadstoffe besser vom Organismus absorbiert werden, sollte demnach das Risiko für Leukämie in der Nähe von Hochspannungsleitungen grösser sein als im weiteren Umfeld. Eine Studie von (Swanson, Bunch 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.

3.3.1.4 Bewertung

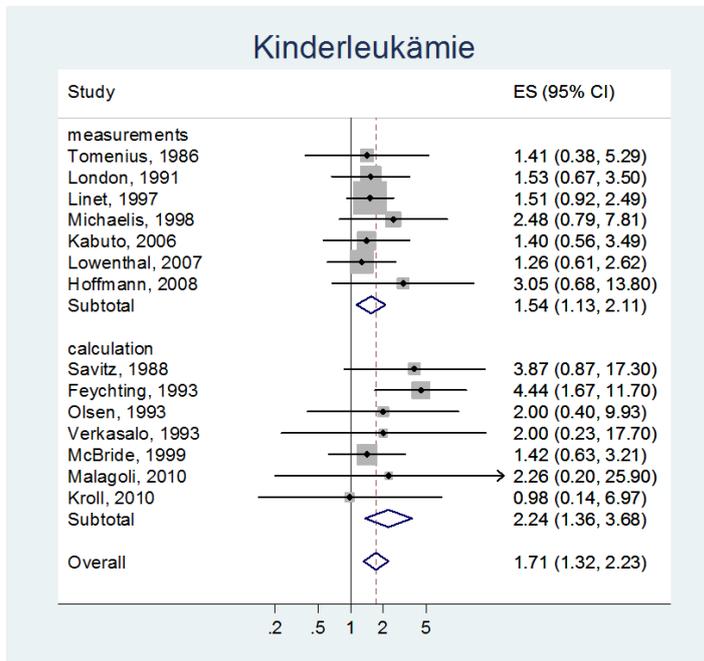
Insgesamt bleibt die Einschätzung der IARC, dass niederfrequente Magnetfelder „möglicherweise kanzerogen“ sind, aktuell. Das bestätigen auch die Resultate des ARIMMORA Projekts der EU (Schuz, Dasenbrock et al. 2016). Einzelne Wissenschaftler vertreten allerdings pointiertere Meinungen, wie etwa das folgende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

Die in der Biolnitiative vertretenen Experten äussern sich kritisch gegenüber der IARC. Kundi schreibt im neuesten Report (keine Seitenzahlen):

“The balance of evidence suggests that childhood leukaemia is associated with exposure to power frequency EMFs either during early life or pregnancy”.

Dabei stützt er sich u.a. auf eine Analyse von grundsätzlichen methodischen Unsicherheiten (selection bias, exposure misclassification, confounding, exposure metric), die insgesamt zu einer Unterschätzung des Risikos führen würden.

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. Figur 3 zeigt die studienspezifischen sowie den gepoolten Risikoschätzer einer Meta-Analyse mit festen Effekten aller Studien der gepoolten Analysen von (Greenland, Sheppard et al. 2000) und von (Kheifets, Ahlbom et al. 2010). Dargestellt ist jeweils der Effektschätzer für Kinder, die höher als 0.3 µT exponiert sind im Vergleich zu wenig exponierten Kindern (< 0.1 µT). Bei den meisten Studien schneidet das Konfidenzintervall (waagrechte Linie) die Null-Risikolinie (vertikaler Strich bei 1). Insgesamt sind aber die Ergebnisse sehr konsistent und deuten auf ein 71% (95% Konfidenzintervall 32–123%) erhöhtes Risiko hin (Heterogenitätstest: $I^2 = 0.0\%$, $p = 0.86$).



Figur 3: Meta-Analyse kindliches Leukämierisiko mit festen Effekten aller Studien der gepoolten Analysen von (Greenland, Sheppard et al. 2000) und (Kheifets, Ahlbom et al. 2010); zwei Studien ohne Kontrollen und zwei Studien ohne Fälle nicht gezeigt.

Eine weitere zentrale Schwierigkeit bei diesen epidemiologischen Arbeiten ist die korrekte Erfassung der Exposition. Meistens ist nicht-differenzielle Fehlklassifikation zu erwarten (ein ähnlich grosser Prozentsatz der Fälle und der Kontrollen wird in eine falsche Expositions Klasse eingeteilt), welche in eine Unterschätzung des Risikos, wenn es dieses gibt, mündet.

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. 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 wenig an dieser Einschätzung geändert, so dass sie insgesamt ihre Gültigkeit behält. Die neuen Studien haben jedoch die Waagschale eher Richtung „Entwarnung“ senken lassen.

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 1 bis 10 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, Lightfoot et al. 2010).



3.3.2 Andere Krebsarten

3.3.2.1 Hirntumore bei Kindern

(Mezei, Gadallah 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 et al. 2010) eine gepoolte Analyse, in der 10 Studien – teilweise dieselben wie (Mezei, Gadallah et al. 2008) – berücksichtigt wurden. Dies waren: (Savitz, Wachtel et al. 1988), (Feychting and Ahlbom 1993), (Olsen, Nielsen et al. 1993), (Verkasalo, Pukkala et al. 1993), (Tynes and Haldorsen 1997), (Preston-Martin, Navidi et al. 1996), (UKCCS 1999), (Schuz, Kaletsch et al. 2001), (Kroll, Swanson et al. 2010), (Saito, Nitta 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 $\leq 0.4 \mu\text{T}$ ”.

(Bunch, Keegan 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, Swanson et al. 2015) untersuchten an derselben Population auch den Zusammenhang mit Magnetfeldexpositionen von unterirdisch verlegten Hochspannungskabeln (siehe auch: 3.3.1.2). Die Anzahl der stark exponierten Fälle (0-50 m Entfernung vom Trasse) 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, Merlo et al. 2014) untersuchte, welche 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, Grize 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, McLaughlin 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.



3.3.2.2 Tumore bei Erwachsenen (häusliche Exposition)

Studien zu Leukämien und Lymphomen bei Erwachsenen unter häuslicher Magnetfeldbelastung liegen erst wenige vor. (Lowenthal, Tuck 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, Gouveia et al. 2011) wurde für 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 der kürzlich publizierten grossen Fall-Kontroll-Studie (genauer: Fall-Fall-Studie) aus dem Vereinigten Königreich (Elliott and 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, Gouveia et al. 2011) und (Elliott and 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, Ma 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 and 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 expo-



tures to extremely low-frequency magnetic fields from highvoltage 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, Young et al. 2015) untersuchten 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.

3.3.2.3 Krebsrisiko bei beruflicher Exposition

In einer Schweizer Nachfolgestudie zu (Minder and Pfluger 2001) über die Mortalität beim Eisenbahnpersonal, résumierten (Roosli, Lortscher et al. 2007) 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, Monroe et al. 2008) wurde u.a. das Leukämierisiko bei beruflicher Exposition¹ 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 Metaanalyse 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, van den Brandt 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”.

¹ 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.



(Guxens, Slottje et al. 2014) sowie (Talibov, Guxens 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, Lortscher et al. 2007) mit Eisenbahnangestellten, (Koeman, van den Brandt et al. 2014) mit einer niederländischen Kohorte, (Koeman, van den Brandt 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, Benke et al. 2007) über Gliome (Tumor des Stützgewebes) bei Berufstätigen in Melbourne und die Arbeit von (Johansen, Raaschou Nielsen et al. 2007) über dänische Angestellte von EVUs wiesen keine Auffälligkeit aus.

Ein (statistisch nicht-signifikantes) leicht erhöhtes Risiko für Hirntumore stellten (Villeneuve, Agnew 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, Pollan et al. 2002) stellten in ihrer schwedischen Studie keine erhöhten Risiken fest, ausser im Zusammenspiel mit ausgewählten chemischen Substanzgruppen (Lösungsmittel, Blei, Pestizide/Herbizide). (Hakansson, Floderus et al. 2002) dagegen eruierten erhöhte Risiken für Astrozytome bei schwedischen berufstätigen Frauen mit niederfrequenten Magnetfeldbelastungen. Die bereits erwähnte Metaanalyse von (Kheifets, Monroe et al. 2008) mit allen relevanten Publikationen von 1993-2007 stellte ein leicht erhöhtes Risiko fest (10%). Die Autoren interpretieren es gleich wie den Leukämiefund (siehe oben). (Coble, Dosemeci et al. 2009) fanden in einer spitalbasierten Fall-Kontroll-Studie in den USA keine erhöhten Risiken für drei Tumorarten (Gliome, Glioblastome, Meningiome). (Baldi, Coureau et al. 2011) untersuchten in Frankreich den Zusammenhang. Bei den Hirnhauttumoren (Meningiome, 13 Fälle) zeigte sich eine statistisch signifikante Risikoerhöhung.

Die neueste Studie zum Thema (Turner, Benke 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. Eine Ausnahme: die Daten zur längsten Expositionszeit (über 25 Jahre) zeigten 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 (promotional) Effekt niederfrequenter elektromagnetischer Felder.

Positive Assoziationen mit beruflicher niederfrequenter Magnetfeldexposition zeigten Studien aus den 90er Jahren zum Brustkrebsrisiko. Die 2005 publizierte schwedische Untersuchung zu beruflich exponierten Frauen (Forssen, Rutqvist et al. 2005), konnte dagegen keine erhöhten Risiken feststellen. Dasselbe gilt für die chinesische Arbeit über Brustkrebs und Magnetfeldexposition bei Textilarbeiterinnen in Shanghai (Li, Ray et al. 2013). Auch die bereits zitierten Studien von (Johansen, Raaschou Nielsen et al. 2007), (Sorahan 2012), (Koeman, van den Brandt et al. 2014) und (Guxens, Slottje et al. 2014) stellten keine erhöhten Risiken fest.

(Sun, Li et al. 2013) hingegen legte eine Meta-Analyse von 18 Studien von beruflich exponierten Männern (darunter 2 Studien mit häuslicher Exposition) vor; (Demers, Thomas et al. 1991), (Matanoski, Breyse et al. 1991), (Loomis 1992), (Tynes, Andersen et al. 1992), (Guenel, Raskmark et al. 1993),



(Floderus, Tornqvist et al. 1994), (Theriault, Goldberg et al. 1994), (Rosenbaum, Vena et al. 1994), (Savitz and Loomis 1995), (Fear, Roman et al. 1996), (Stenlund and Floderus 1997), (Cocco, Figgs et al. 1998), (Feychting, Forssen et al. 1998), (Johansen and Olsen 1998), (Floderus, Stenlund et al. 1999), (Pollan, Gustavsson et al. 2001), (Park, Ha et al. 2004), (Nichols and Sorahan 2005). Die Autoren errechneten ein statistisch signifikant erhöhtes Risiko (OR = 1.32; 95% CI = 1.14–1.52). Wesentliche Beiträge zum Befund lieferten dabei zwei ältere Studien (Demers, Thomas et al. 1991), (Tynes, Andersen 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, Harris 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.

Erwähnenswert sind noch zwei Studien zu anderen Tumorarten. (Behrens, Lyngne et al. 2010) studierten den Einfluss beruflicher niederfrequenter Magnetfeldexposition auf das Augentumorrisiko (Aderhautmelanom). In früheren Arbeiten, insbesondere im Zusammenhang mit hochfrequenter Exposition (Stang, Anastassiou et al. 2001), (Stang, Schmidt-Pokrzywniak 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, Le Cornet et al. 2013) publizierte eine umfassende 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 and Loomis 1995), (Kelsh and Sahl 1997), (Johansen and 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, Raaschou Nielsen et al. 2007) zu dänischen Angestellten zeigte keine Risikoerhöhungen für die untersuchten Endpunkte (Leukämien, Hirntumore, Brustkrebs). Die neue 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, Nichols 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. Eine kleine Fall-Kontroll Pilotstudie von (Villarini, Dominici et al. 2015) mit Elektroschweissern, deren DNA auf Schäden untersucht wurde, ergab keine Hinweise auf einen Einfluss der Magnetfelder. Dem Pilot darf wegen der geringen Fallzahl ($n = 21$) nicht viel Gewicht beigemessen werden.

3.3.2.4 Bewertung

Die meisten 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 kürzlich veröffentlichte Metastudie (Zhang, Lai 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.

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.

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. Es ist zu hoffen, dass das laufende INTEROCC-Projekt zum Hirntumorrisiko von beruflichen Expositionen gegenüber potenziellen Karzinogenen Klarheit bringen wird.

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.

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.

3.3.3 Neurodegenerative Erkrankungen

3.3.3.1 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. 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 ersten Kapitel 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.

3.3.3.2 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, Bolumar et al. 2007) in ihrer kritischen Literaturanalyse (7 Studien), wohingegen (Hug, Roosli 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”.

Inzwischen liegen mehrere neue Studien vor. Zunächst einige Arbeiten zu beruflichen Expositionen. (Sorahan and Kheifets 2007) kamen in einer Mortalitätsstudie bei Beschäftigten in der Elektrizitätsindustrie zu einem Nullergebnis, ebenso wie (Seidler, Geller et al. 2007) in einer Deutschen Kohortenstudie. (Sorahan and Mohammed 2014) fanden in der Fortführung ihrer ersten Studie (Sorahan and 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.

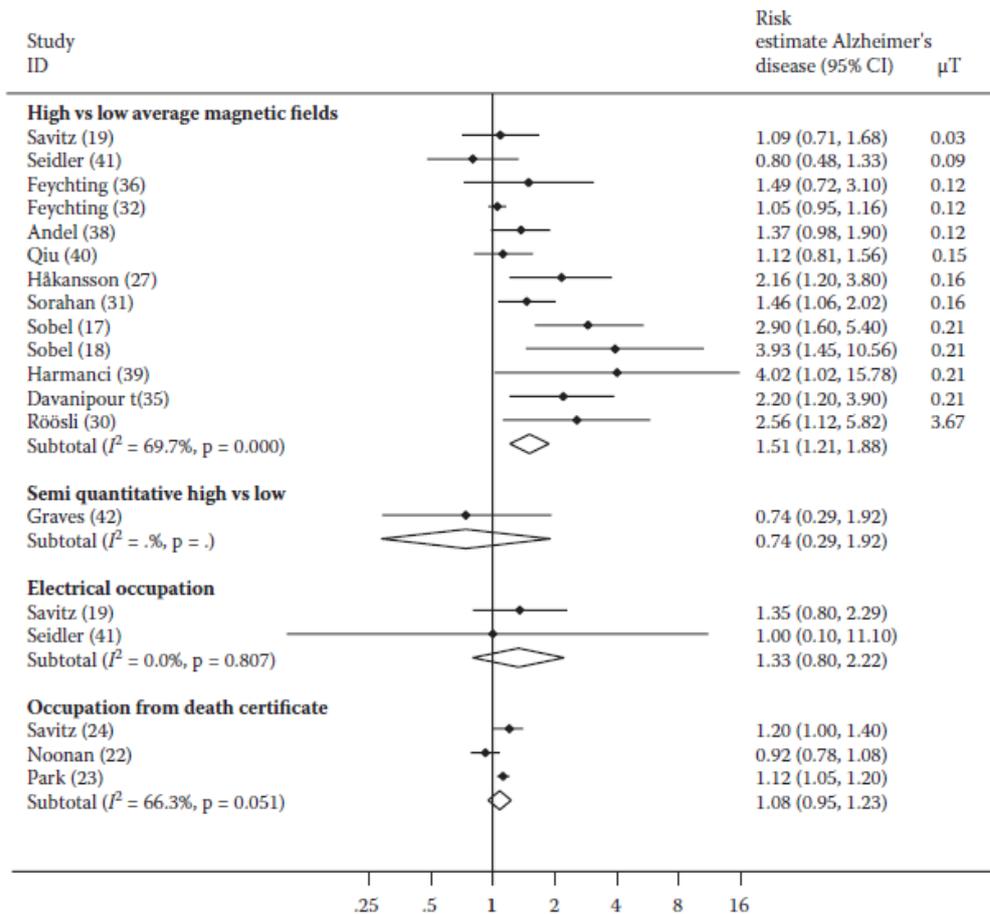
(Roosli, Lortscher et al. 2007) dagegen fanden in ihrer Untersuchung zu neurodegenerativen Erkrankungen bei Eisenbahnangestellten in der Schweiz, dass für exponierte Lokführer das Risiko an Alzheimer zu erkranken höher ist als für weniger exponierte Angestellte wie Stationsvorsteher (HR = 3.15; 95% CI: 0.9–11.04). Die Resultate basieren auf nur wenigen Fällen, obwohl das Gesamtkollektiv gross war (20'000 Beschäftigte). (Davanipour, Tseng et al. 2007) errechneten in einem multivariaten Modell mit ca. 1'500 Fällen aus Alzheimer-Kliniken Risiken (OR) von ca. 2 bei mittlerer/hocher 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, Crowe 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, Sisternas et al. 2008) kam zum qualitativ gleichen Ergebnis wie Hug et al. zwei Jahre zuvor. Die gepoolten Risikoschätzer betragen 2 für Fall-Kontroll-Studien und 1.5 für Kohortenstudien (gerundete Werte, statistisch signifikant). Die neueste Metaanalyse legten (Vergara, Kheifets et al. 2013) vor. Sie beurteilten 42 Studien, worunter auch solche, die sich nicht explizit mit EMF beschäftigt hatten, deren Angaben aber als ausreichend erach-



tet 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 27% erhöhte 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”.



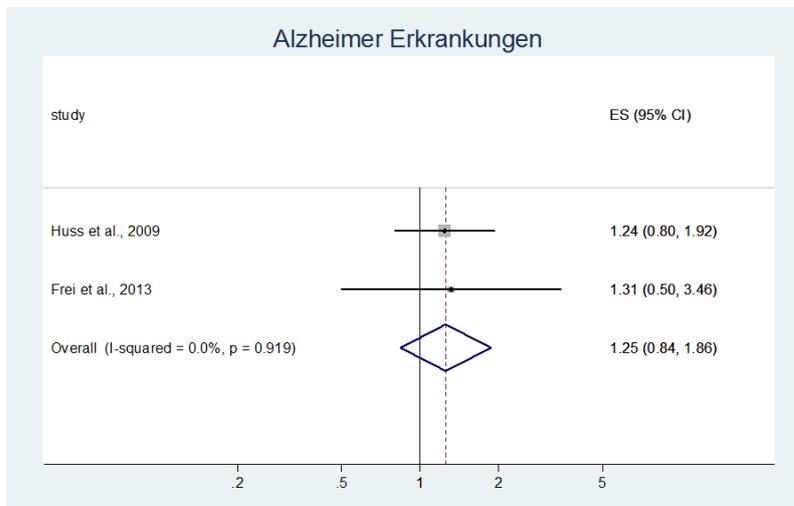
Figur 4: Überblick über Studien zu Alzheimererkrankungen und beruflicher niederfrequenter Magnetfeldexposition, sortiert nach der Höhe der Exposition am Arbeitsplatz (Quelle: (Huss and Vermeulen 2014), p. 193).

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 Figur 4).

Es liegen auch erste Bevölkerungsstudien vor. 2009 publizierten (Huss, Spoerri et al. 2009) eine Analyse zur 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 $\geq 132\text{kV}$ berücksichtigt wurden (Frei, Poulsen 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 ($> 200\text{ kV}$) aufgetreten. Das entsprechende Risiko war, wie in der Schweizer Studie, leicht aber nicht signifikant erhöht (Figur 5)



Figur 5: Vergleich der Schweizer und Dänischen Studienresultate zu Alzheimer Erkrankungen und Wohnort innerhalb von 50 Meter von einer Höchstspannungsleitung ($>200\text{ kV}$).

Einige Studien haben sich mit Demnzerkrankungen allgemein befasst. Meist wurde dabei Alzheimer als häufigste Form von Altersdemenz (gesondert) mit untersucht. Hinweise auf einen Zusammenhang mit niederfrequenter Magnetfeldexposition am Arbeitsplatz zeigten dabei 2 Studien: (Roosli, Lortscher et al. 2007) 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). (Anzel, Crowe et al. 2010) errechneten für Demenz im Allgemeinen (216 Personen, inklusive die bereits erwähnten 141 Alzheimer Fälle) für mittlere und hohe Expositionen (Referenz: $< 0.12\ \mu\text{T}$ durchschnittliche Tagesexposition am Arbeitsplatz) Risiken um den Faktor 2; für die höchste Expositions-kategorie und bei Krankheitsbeginn unter 75 Jahren statistisch signifikant. Die erhöhten Risiken betrafen in erster Linie Personen mit manueller Arbeit. Dagegen fanden (Seidler, Geller et al. 2007) keinen Zusammenhang, und die Hinweise auf möglicherweise erhöhte Risiken in der höchsten Expositions-kategorie sowie bei „blue collar workers“ sind laut den Autoren statistisch unsicher, weil die Aussagekraft 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, Tseng et al. 2014) kam bei einem Kollektiv von 3050 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 gros-



ser Vorsicht interpretierten 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, Schouten et al. 2015) untersuchten niederländische Beschäftigte im Hinblick auf einen Zusammenhang zwischen Demenz (Mortalität) und der 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, Spoerri 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.

3.3.3.3 ALS

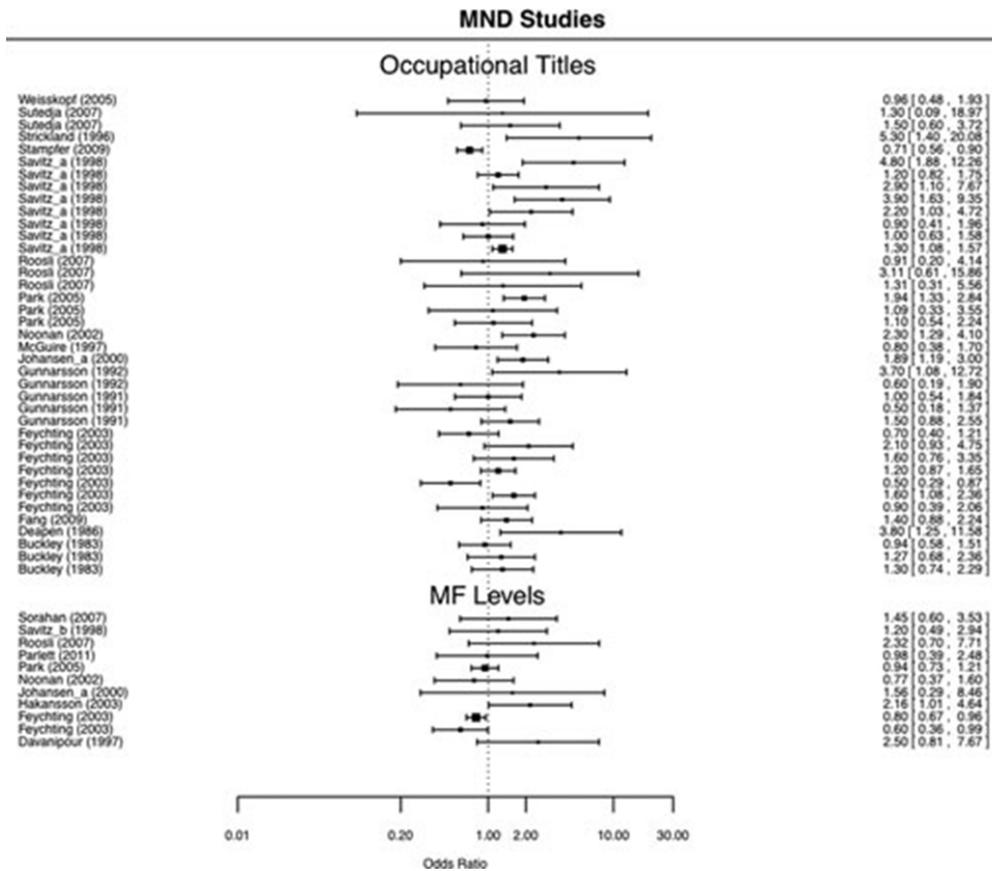
In der Beurteilung der (WHO 2007) ist die Evidenz für einen Zusammenhang zwischen niederfrequenten Magnetfeldern und ALS (amyotrophe Lateralsklerose, ein durch das Absterben motorischer Nervenzellen bedingter Verlust an muskulärer Koordination, verknüpft mit Muskelschwund; ein bekanntes Beispiel ist 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 and Kheifets 2007) zu Angestellten in Elektrizitätsunternehmen in U.K. Die follow-up Studie (Sorahan and Mohammed 2014) fand erneut keinen Zusammenhang zwischen ALS und Magnetfeldexposition. Die Arbeit von (Roosli, Lortscher et al. 2007) 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, Bowman et al. 2011) haben in ihrer Untersuchung alle Berufsgruppen, die überdurchschnittlich hohen Magnetfeldern ausgesetzt sind – Expositionsermittlung nach (Bowman, Touchstone et al. 2007) – berücksichtigt und ebenfalls keine erhöhte ALS-Mortalität festgestellt.

(Zhou, Chen 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 waren 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”.



Figur 6: Überblick über Studien zu ALS und beruflichen Magnetfeldexpositionen (Quelle: Vergara et al. 2013, p. 140).

(Vergara, Kheifets et al. 2013) kamen in ihrer Meta-Analyse zum Schluss, dass das Risiko für ALS in Berufen mit Magnetfelder 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 Figur 6).

In ihrer neuesten Arbeit (Fischer, Kheifets et al. 2015), in die über 4'500 schwedische ALS Patienten und mehr als 20'000 Kontrollen einfließen, 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, Quinlan 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, Spoerri 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 Literaturlanalyse von (Abhinav, Al-Chalabi 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”.

Studien zur Exposition der Allgemeinbevölkerung liegen vier vor: Alle fanden keinen Zusammenhang zwischen der Exposition gegenüber Hochspannungsleitungen und ALS. Drei dieser Studien wurden bereits erwähnt: (Huss, Spoerri et al. 2009), (Marcilio, Gouveia et al. 2011) und (Frei, Poulsen et al. 2013). Die neueste Arbeit ist von (Seelen, Vermeulen 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: 50m, 200m, 600m) Auffälligkeiten. Die Anzahl Fälle war aber in all diesen Studien gering.

3.3.3.4 Andere neurodegenerative Erkrankungen

Bezüglich Parkinson liegen mehrere Studien zu beruflicher Exposition vor. In den zwei Arbeiten zu neurodegenerativen Erkrankungen bei UK Elektrizitätsangestellten fanden (Sorahan and Kheifets 2007) sowie (Sorahan and 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, Lortscher et al. 2007) gab es unter den besonders exponierten Lokführern keine Auffälligkeit, und dasselbe gilt für die ebenfalls besonders exponierten Schweißer in den Studie von (Stampfer 2009) und (Kenborg, Lassen et al. 2012). Eine neue spitalbasierte Fall-Kontroll-Studie mit über 400 Fällen, die sowohl berufliche als auch häusliche Exposition (Gebrauch von Elektrogeräten und -Maschinen) sowie die Rolle von elektrischen Schlägen untersuchte (van der Mark, Vermeulen et al. 2015), fand keine positiven Zusammenhänge. . Im Gegensatz dazu haben (Brouwer, Koeman et al. 2015) in einer Detailuntersuchung der prospektiven dänischen Kohorte eine 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, Spoerri et al. 2009) und (Frei, Poulsen et al. 2013) zeigten sich ebenfalls keine erhöhten Risiken. Dasselbe gilt für (van der Mark, Vermeulen 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 drei Arbeiten gibt es zu Multipler Sklerose im Zusammenhang mit niederfrequenten Magnetfeldexpositionen: zwei bevölkerungsbasierte Studien (Huss, Spoerri et al. 2009), (Frei, Poulsen et al. 2013) und eine zu beruflicher Exposition (Roosli, Lortscher et al. 2007). Alle drei Studien konnten keine erhöhten Risiken feststellen.

3.3.3.5 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 vier 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, so dass man nicht beurteilen kann in welche Richtung die berechneten Risikoschätzer beeinflusst sein könnten. Sodann ist auch anzunehmen, dass in Studien, die mit Todes-



scheinen gearbeitet haben, Demenzerkrankungen untervertreten sind, so dass ein allfälliges Risiko tendenziell unterschätzt würde. ALS hingegen dürfte in diesen Registern 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.

3.3.4 Fruchtbarkeit, Schwangerschaft, Geburt

3.3.4.1 Männliche Fruchtbarkeit

Den Grossteil der Untersuchungen zu dieser Fragestellung machen Tierstudien aus. Sie sollen hier nicht im Detail referiert sondern nur pauschal gewürdigt werden. (de Bruyn and de Jager 2010) fassen den Wissensstand 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, Abd-Allah et al. 2002) reported a decreased sperm count, sperm motility, and daily sperm production. (Al-Akhras, Darmani et al. 2006) also reported reduced testicular sperm count”.

(Lee, Park 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”.

Unter den neuesten Studien fanden (Akdag, Dasdag et al. 2013) mit Langzeitexposition (2 h/d, 7 d/w über 10 Monate; 100 μ T und 500 μ T) 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, Park et al. 2014) und (Tenorio, Ferreira Filho et al. 2014) erklären. Erstere stellten eine erhöhte Apoptoserate (und eine tiefere Spermienzahl) in ihren Versuchen mit exponierten Mäusen fest (Expositionen 2–200 μ T; 24 h/d, 8w), letztere eine verminderte Erholung bei geschädigter Spermatogenese (Exposition: 3x30 min/d, 15 d; 1 mT). (Duan, Wang et al. 2014) hingegen kommen nach Exposition von Ratten mit 500 μ T starken 50 Hz Magnetfeldern, (4h/d, 7d/w, 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”.

Humanstudien neueren Datums mit Spermiendonatoren gibt es erst eine. Die Studie von (Li, Yan 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 h 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) be-



kannt sein, um einen möglichen direkten Einfluss von EMF feststellen zu können.

Die neueste Publikation (Lewis, Hauser et al. 2016) 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, Yan et al. 2010). Sie bewerten die Arbeit nicht.

3.3.4.2 Schwangerschaft/Entwicklung und Geburt

(Juutilainen 2005) fasste in seiner Übersichtsarbeit 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, Park 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, Tettamanti et al. 2010) am Schweinmodell, (Borhani, Rajaei et al. 2011) und (Bayat, Darabi et al. 2012) am Mausmodell oder (Lahijani, Bigdeli et al. 2011) und (Lahijani, Tehrani et al. 2013) am Hühnermodell gezeigt. Die Beobachtungen haben kein Wissen über mögliche Wirkmechanismen geliefert.

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, Ahlbom 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 and Bonde 2006) über den Zusammenhang zwischen Geburtsschäden und Umwelteinflüssen am Arbeitsplatz, wobei auch niederfrequente EMF berücksichtigt wurde, kamen die Autoren zum Schluss (p. 541):

“The position is that 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, Odouli et al. 2002)



und (Lee, Neutra et al. 2002). Die erste Arbeit untersuchte mit einer prospektiven Kohortenstudie von gegen 1000 Schwangere in San Francisco auf 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 $\sim 1.6 \mu\text{T}$ lag (RR = 1.8; 95% CI: 1.2–2.7). Auch (Lee, Neutra 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, Crespi 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 1 exponierter Fall in die Analyse Eingang fand.

(Auger, Park 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 Leitungstrasse (eine Unteranalyse ergab für die höchste Expositions-kategorie – unter 25 m Distanz – eine signifikante Risikozunahme; OR = 2.25). In einer iranischen Fall-Kontroll Studie (Shamsi Mahmoudabadi, Ziaei 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 and Lee 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 Expositions-kategorie (< 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.

(Mahram and 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 $0.31 \mu\text{T}$). Die nicht-exponierte Gruppe umfasste 158 Fälle.

Mögliche Einflüsse von Magnetfeldexpositionen auf die Embryonalentwicklung untersuchten (Su, Yuan 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 ($> 0.16 \mu\text{T}$ 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 neuen prospektiven Kohortenstudien mit einer follow-up Periode von 13 Jahren (Li, Chen et al. 2011) und (Li, Ferber 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, Odouli 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 $0.1 \mu\text{T}$: 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 $0.15 \mu\text{T}$ (24 h 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 Expositions-kategorien 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, Hauser et al. 2016) beschreibt 7 Arbeiten zu Schwangerschaft und Geburt, sowie 5 Arbeiten zu neonatalen Effekten, ohne diese Arbeiten zu qualifizieren.

3.3.4.3 Bewertung

Tierstudien zu Einflüssen von niederfrequenten Magnetfeldern auf die Fruchtbarkeit zeigen häufig Effekte. Ihre Interpretation ist aber schwierig (siehe 3.1). So gesehen sind diese Arbeiten, solange sie nicht über Wirkmechanismen Auskunft geben, für die gesundheitliche Risikoeinschätzung nur sehr begrenzt hilfreich. Aus der einzigen vorliegenden Humanstudie kann keine wissenschaftliche Schlussfolgerung gezogen werden. Insgesamt ist somit die Sachlage hinsichtlich menschlicher Fruchtbarkeit mit den verfügbaren Studien nicht seriös beurteilbar.

Hinsichtlich Effekten auf Schwangerschaft und Geburt haben Tierversuche in der Mehrheit keine Resultate gezeigt. Neuere Arbeiten (meist mit Langzeitexpositionen von vergleichsweise starken Magnetfeldern) beobachteten jedoch verschiedene potenziell schädliche Wirkungen. Das Gesamtbild hat sich durch diese Studien aber nicht grundlegend verändert. Für die Risikobeurteilung wichtiger ist die Gesamtheit der epidemiologischen Studien. Hier würden in den letzten Jahren neue 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.

3.3.5 Elektromagnetische Sensibilität

3.3.5.1 Allgemein

Das Thema „Elektromagnetische Sensibilität“ (die WHO spricht von idiopathischer Umweltintoleranz durch EMF, abgekürzt IEI-EMF; häufig wird auch der Begriff elektromagnetische Hypersensibilität, abgekürzt EHS, verwendet) ist seit den 80er Jahren in der Wissenschaft präsent. Der Auslöser waren die im Zusammenhang mit der aufkommenden Bildschirmarbeit zunehmend häufig geäußerten Beschwerden von Beschäftigten. Viele Studien dazu wurden damals in Schweden durchgeführt. Gegenwärtig steht eher die Mobilkommunikation im Fokus des Interesses.

Mit elektromagnetischer Sensibilität sind unspezifische Gesundheitssymptome gemeint, deren Ursache Betroffene in elektromagnetischen Feldern ihrer Alltagsumgebung sehen (Baliatsas and Rubin 2014). Fast ausschliesslich handelt es sich dabei um technisch erzeugte Felder von Infrastrukturen und/oder Geräten. Häufig genannte Symptome sind Schlafstörungen und Kopfweg. Ebenfalls verbreitet sind Konzentrationsschwächen, Nervosität, Rheuma, Atemprobleme, Müdigkeit, Schwindel, Haut-



ausschläge sowie Jucken, Brennen oder Rötung der Haut. Eine Symptomskala haben (Eltiti, Wallace et al. 2007) entwickelt. Elektrosensibilität oder EHS ist kein objektiv diagnostizierbares Krankheitsbild mit nachweislicher Ursache in elektromagnetischen Feldern. Die Heterogenität des Symptombildes hat sich auch in einer neueren Literaturanalyse von (Baliatsas, Van Kamp 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 elektromagnetischer Sensibilität 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 die Detektierbarkeit niederfrequenter Magnetfelder. In zwei neueren Studien (Maestu, Blanco et al. 2013), (Koteles, Szemerszky et al. 2013) allerdings wurden bei sehr tiefen Feldstärken bei Einzelpersonen Sensitivitäten festgestellt.

Wie viele Menschen sind von EHS betroffen? In einer Studie, die in der Region Basel durchgeführt wurde (Schreier, Huss et al. 2006) wird die Anzahl mit 5% angegeben. Diese Grössenordnung deckt sich mit Zahlen aus anderen Ländern: Österreich 3.5% (Schrottner and Leitgeb 2008), Schweden 1.5% (Hillert, Berglind et al. 2002), Kalifornien 3.2% (Levallois, Neutra et al. 2002), U.K. 4% (Eltiti, Wallace et al. 2007) erhoben; (Mohler, Frei et al. 2010) vermerken in ihrer Studie, dass 20.9% der Befragten ihre Gesundheit durch EMF beeinträchtigt sähen oder dass sie sensibel auf EMF reagieren würden. Der Begriff wird in dieser Arbeit also recht breit verstanden.

Die erwähnte Studie von (Schreier, Huss et al. 2006) erhob u.a. die Häufigkeit von Quellen, die von Betroffenen für ihre Beschwerden 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, Moser et al. 2004). Insgesamt scheint das Krankheitsbild jedoch nicht quellenspezifisch zu sein (Schuz, Petters et al. 2006), (Rubin, Das Munshi et al. 2005). So schreiben (Roosli, Moser 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, Nordin 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, Baliatsas et al. 2015).

Im Folgenden fokussieren wir speziell, aber nicht ausschliesslich, auf Arbeiten zur Elektrosensibilität, die explizit (auch) NF-EMF thematisieren.



3.3.5.2 Epidemiologische Studien

Es liegen nur wenige epidemiologische Arbeiten zu EHS gegenüber 50/60 Hz Magnetfeldern vor; für eine Übersicht: (Baliatsas, Van Kamp 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, Moser et al. 2004) und von (Schreier, Huss et al. 2006) behandelt. (Bolte, Baliatsas 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, Gharepoor 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, van Kamp et al. 2011) untersuchten bei über 3500 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, Hosseini 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 (siehe 0).

Die einzige epidemiologische Arbeit, die auch ätiologische Ansprüche stellt, ist diejenige von (Baliatsas, Bolte et al. 2015). Sie untersucht in den Niederlanden bei 6000 Personen die Beziehungen zwischen realer Exposition, wahrgenommener Exposition, subjektiven Symptomen und von Ärzten erhobenen Gesundheitsangaben. Für die Expositionen im NF-Bereich wurden sowohl die berechnete Nähe von Hochspannungsleitungen als auch der abgefragte Gebrauch verschiedener elektrischer Geräte und Maschinen berücksichtigt. Zudem wurde die subjektive Exposition auf einer Skala von 0 bis 10 abgefragt. Es wurden verschiedene Zusammenhänge zwischen Symptomaufreten und Exposition gegenüber elektrischen Geräten beobachtet. 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 Nozebo-Effekt hin. Das Fazit der Autoren (p. 1):

“We argue that perceived exposure is an independent determinant of NSPS” [NSPS = non-specific physical symptoms].

Die einzige bislang vorliegende prospektive Studie zu Elektrosensibilität und Stromleitungen wurde in den Niederlanden durchgeführt (Porsius, Claassen et al. 2014, Porsius, Claassen et al. 2015, Porsius, Claassen et al. 2016). Die Forschergruppe kommt zum Schluss, dass der Nozebo-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.



3.3.5.3 Experimentelle Studien

Um zu prüfen, ob die von Elektrosensiblen 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, Murbach et al. 2016) eine Methodik und Testapparatur entwickelt, die in Wohnungen auf die persönliche Empfindlichkeit zugeschnittene verblindete Experimente ermöglicht. Resultate dieser neuen Herangehensweise an das Phänomen EHS sind noch keine publiziert worden.

Review-Studien: (Rubin, Das Munshi 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 die Elektrosensibilität allgemein untersuchten: 8 dieser 10 Arbeiten fanden keine Hinweise auf eine ursächliche Wirkung. Die Schlussfolgerung von (Rubin, Das Munshi 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, Hillert 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, Krueger et al. 2002) in ihrer Provokations-Studie mit 49 Elektrosensiblen und 14 Kontrollen, die sie unter kontrollierten, verblindeten Bedingungen 50 Hz Feldern (100 V/m, 7 μ T) 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 Elektrosensibilität eingehen, und umgekehrt (McCarty, Carrubba et al. 2011), (Szemerszky, Gubanyi et al. 2015). (Leitgeb and Schrottner 2003) und (Leitgeb, Schrottner et al. 2007) schliessen aus ihren Experimenten ebenfalls, dass es eine Gruppe von sensiblen 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, Szemerszky et al. 2013). EHS-Personen können Expositionen eher korrekt erkennen als nicht-EHS Personen (eine elektrosensible Person war sogar fast perfekt fähig, Expositi-



onen 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, Corbacio et al. 2010), (McNamee, Corbacio et al. 2011), (Corbacio, Brown et al. 2011) und (Legros, Corbacio et al. 2012) fest (alle Arbeiten stammen von derselben Forschungsgruppe um Frank Prato).

Verschiedene Arbeiten konzentrierten sich auf physiologische Parameter. (Kaul 2009) haben in einem Provokationsexperiment Expositionen gegenüber einem 50 Hz Magnetfeld von 10 μ T 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, Kharraz et al. 2005), (Kim, Choi 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, Andersson et al. 2000) oder (Wenzel, Reissenweber et al. 2005). Letztere haben in ihren Experimenten ebenfalls keine Veränderungen von physiologischen Hautparametern durch Exposition gegenüber 50 Hz Magnetfeldern gefunden. (McNamee, Corbacio et al. 2011) sowie (Kim, Choi et al. 2012) testeten hinsichtlich Puls, Blutdruck und Atmung und kamen zu einem Nullergebnis. Sein Namensvetter Kim (Kim, Choi et al. 2013) fand in Laboruntersuchungen mit 30 Erwachsenen und 30 Teenagern ebenfalls keinen Zusammenhang mit der Exposition.

Dagegen beobachteten (Belyaev, Hillert 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, Choi et al. 2012), (Kim, Choi et al. 2012) Nullbefunde. In einem Sham-Sham Experiment mit unterschiedlichen (supponierten, nicht realen) 50 Hz Magnetfeldbedingungen demonstrierten (Szemerszky, Zelena 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 Nozebo-Effekt. Vor allem in Provokations-Studien mit HF-EMF, insbesondere Mobilfunkstrahlung, wurde dieser Effekt mehrfach nachgewiesen. Für ein psychosomatisches Wirkmodell mit EMF-Bezug siehe: (Osterberg, Persson et al. 2007); für eine Studie zu neuronalen Korrelaten dazu: (Landgrebe, Barta et al. 2008). In (Mueller and 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, Carrubba et al. 2011) bei ausführlichen Test mit einer elektrosensib-



len Einzelperson. (Landgrebe, Frick et al. 2008) fand erhöhte Symptomausprägungen unter TMS (transkranieller Magnetfeldstimulation) Exposition. Auch (Maestu, Blanco 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, Szemerszky et al. 2013) untersuchten 29 EHS und 41 nicht-EHS Personen. Sie fanden einzelne Hinweise auf möglicherweise durch die Exposition (50 Hz Magnetfeld, 500 μ T, 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 der neuesten Studie (Domotor, Doering et al. 2016) bestätigte sich diese Beurteilung.

3.3.5.4 Bewertung

Einige wenige Prozent der der Bevölkerung bezeichnen sich als Elektrosensibel. Dabei handelt es sich um Symptome wie Kopfweg, 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. 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 Bezug gibt zwischen Wohlbefinden und der An- oder Abwesenheit von EMF. Hingegen ist das Symptommiveau fast immer mit der Überzeugung verknüpft, ob man gegenüber einem Feld exponiert ist oder nicht, ein deutlicher Hinweis auf die Wirksamkeit von Nozebo-Effekten. Es ist somit wahrscheinlich, dass Elektrosensibilität eine mentale und nicht eine physikalische Ursache hat.

3.3.6 Andere Wirkungen

3.3.6.1 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 Hirnreaktionen. 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, Thomas 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, Saucier 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“.

Den jüngsten Review-Bericht hat eine italienische Expertengruppe (Di Lazzaro, Capone 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, Onger 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, Jovanov et al. 2006) und (Cvetkovic and Cosic 2009) bestätigten in ihrer Studie auch frühere Befunde, dass die Frequenz des Magnetfelds v.a. auf dieselbe Frequenz der Gehirnaktivität wirkt. (Cook, Thomas et al. 2004), (Cook, Thomas et al. 2005) und (Cook, Saucier et al. 2009) stellten zusätzlich fest, dass die Alpha-Aktivitäten hirnrregionspezifisch zu- oder abnehmen, wobei die Veränderungen sowohl personen- als auch expositionsabhängig sind. Vor diesem Hintergrund könnte der Befund von (Legros, Corbacio et al. 2012) verständlich sein: Sie fanden in ihren Experimenten mit 60 Hz Magnetfeldexposition (1 Stunde) keine Veränderungen im EEG der 73 Versuchspersonen. (Legros, Modolo 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.



3.3.6.2 Kognition

Nebst den drei oben erwähnten Review-Studien von (Cook, Thomas et al. 2002), (Cook, Saucier et al. 2006) und (Di Lazzaro, Capone et al. 2013), in denen auch kognitive Effekten beurteilt werden, existiert nur ein Review-Artikel zum Thema kognitive Funktionen (Crasson 2003) und eine Meta-Studie (Barth, Ponocny et al. 2010). (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, Ponocny 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, Capone 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, Brown 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, Tang 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 unterscheiden, so dass die Befunde schwierig zu interpretieren sind.

3.3.6.3 Herzkreislaufsystem

Einen Ausgangspunkt bildeten Untersuchungen zur Herzratenvariabilität (HRV). Herzrhythmusstörungen können direkt Hinweise geben auf ein möglicherweise erhöhtes Risiko für koronare Herzkrankheiten, im Volksmund auch Arterienverkalkung genannt. In epidemiologischen Arbeiten konnte ein Zusammenhang zwischen reduzierter HRV und erhöhtem (kardiovaskulärem) Morbiditäts- bzw. Mortalitätsrisiko (Erkrankungs- bzw. Sterberisiko) gezeigt werden. (Sastre, Cook 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, Sastre et al. 2000).



Ein umfassender Review-Artikel zum Thema niederfrequente Magnetfelder und kardiovaskuläre Erkrankungen erschien 2007 (Kheifets, Ahlbom 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 Risikoschätzungen zeigten keine Auffälligkeiten. (Kheifets, Ahlbom 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, Legros 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, Stoilova et al. 2004)). Die Autoren fordern v.a. robuste Laborexperimente. Die neueste Übersichtsarbeit (Elmas 2016) ist insgesamt wenig ergiebig und nur beschränkt informativ.

Von den neueren epidemiologischen Arbeiten seien erwähnt: (Roosli, Egger 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 Zusammenhang. Koeman et al. (2014) führten eine prospektive Kohortenstudie bei niederländischen Beschäftigten durch (n = 120'852). Sie analysierten 8200 Fälle von Herzkrauslauf-Sterbefällen und fanden keine Anzeichen, dass berufliche Magnetfeldexposition das Sterberisiko erhöhen könnte. (Fazzo, Tancioni 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 Herzkrankgefässerkrankungen besitzt. (Liu, Zhao 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.



Von den neueren experimentellen Arbeiten seien erwähnt: (McNamee, Corbacio et al. 2010) und (McNamee, Corbacio et al. 2011) testeten mit 58 (Studie 2010) bzw. 10 (2011) Probanden in doppelt bzw. einfach verblindeten Versuchen, ob die Exposition gegenüber einem 1800 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, Choi et al. 2012) und (Kim, Choi et al. 2013) konnten in ihren Provokationsstudien ebenfalls keine Wirkungen finden. (Touitou, Djeridane 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, Dorffner 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.

3.3.6.4 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-EMF 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.



Die jüngsten Review-Berichte stammen von (Touitou and Selmaoui 2012) und (Halgamuge 2013). Bezüglich des Stresshormons Cortisol listet die erste Arbeit 6 Studien auf, die alle keine Effekte zeigten. Bezüglich 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 and 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, Lambrozo 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 neueren Einzelstudien. (Vanderstraeten, Verschaeve 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-EMF auf Brustkrebs wird ja inzwischen als unwahrscheinlich angenommen, siehe 3.3.2.3). Dabei berufen sie sich auf entsprechende Befunde aus Studien mit magnetosensitiven Tieren. (Bellieni, Tei 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 and Selmaoui 2012) 6 Studien auf, die alle keine Effekte zeigten. In einer neueren Studie (Mortazavi et al., 2012) wurden jedoch tiefere Cortisolspiegel bei exponierten Personen festgestellt. Untersucht wurden Zahnärzten. Dazu verglichen die Autoren eine exponierte mit einer nicht-exponierten Gruppe. Die exponierten Personen benutzte 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 neuen 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. Die weiter oben aufgeführte Kritik an der Expositionserfassung gilt auch für diese Arbeit, die Teil der Gesamtstudie ist.

3.3.6.5 Weitere Endpunkte

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, Lambrozo 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 jüngst publizierte epidemiologische



Arbeit dieser Gruppe (Touitou, Djeridane et al. 2013) bestätigte diesen Schluss: Auch in dieser Studie wurden keine Veränderungen immunologischer Parameter, auch nicht bei bis zu 20 Jahren langzeit-exponierten Personen, gefunden. Neuere Humanstudien zu diesem Endpunkt liegen unseres Wissens keine vor. 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 (siehe 3.3.5.1). Die Meinung von BioInitiative ist hier wissenschaftlich wenig überzeugend und nicht weiterführend.

In mehreren, auch neueren Studien sind die Auswirkungen von NF-EMF auf den Schlaf studiert worden. Eine Untersuchungsmethode ist dabei die Aufzeichnung des Schlaf-EEG (siehe auch 3.3.6.1). 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, Negovetic et al. 2006), (Hung, Anderson et al. 2007). Eine zweite Untersuchungsmethode ist der Fragebogen zu (subjektiv empfundenen) Schlafeigenschaften. (Liu, Chen 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, Hosseini 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 and Lau 2013) hingewiesen). Wie schon im Zusammenhang mit der Elektrosensibilität (siehe 3.3.5) erwähnt haben (Mueller and 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.

In jüngster Zeit wurden auch Resultate zu „ungewöhnlichen“ Endpunkten veröffentlicht, insbesondere zu Fettleibigkeit. In einer prospektiven Kohortenstudien mit einer follow-up Periode von 13 Jahren (Li, Ferber 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 μ T (24 h Durchschnitt) exponiert waren. (Milham 2014) hat den Bezug zwischen Fettleibigkeit und NF-EMF mit dem Phänomen „dirty electricity“ erklärt, und mit Ländervergleichen begründet. Wie (de Vocht and Lee 2014) richtigerweise betonen, stehen Daten und Argumentation in dieser Arbeit von Milham jedoch auf tönernen Füüssen (siehe auch: (de Vocht and Olsen 2016)). Dasselbe gilt für die Studie von (Li, Ferber et al. 2012), die einen datengetriebenen Eindruck hinterlässt (siehe 3.3.4.2). Bis weitere Studien greifbar sind bleibt unklar, welcher Stellenwert der Arbeit von (Li, Ferber et al. 2012) wissenschaftlich zuge-messen werden kann.



3.3.6.6 Bewertung

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. Über eine allfällige gesundheitliche Bedeutung dieser elektrophysiologischen Beobachtungen ist nichts bekannt.

Hinsichtlich möglicher Effekt auf Lernen und Gedächtnis liegen, nicht unerwartet, ebenfalls uneinheitliche Ergebnisse vor. Allerdings weist eine klare Mehrheit der Studien nicht darauf hin, dass niederfrequente Magnetfelder kognitive Leistungen negativ (oder positiv) beeinflussen.

Betreffend Wirkungen auf das Herzkreislaufsystem (Blutdruck, Puls, Herzratenvariabilität) sind die Befunde aus denjenigen Arbeiten, die ausreichen detaillierte Protokolle veröffentlicht haben um die Resultate wissenschaftlich würdigen zu können, relativ eindeutig: niederfrequente Magnetfelder, auch bei Langzeitexposition, dürften das Herzkreislaufsystem nicht negativ beeinflussen.

Eine Bewertung möglicher hormonaler Effekte von niederfrequenten Magnetfeldexpositionen, insbesondere von chronischen Expositionen, ist zum gegenwärtigen Zeitpunkt nicht möglich. Laborstudien unter kontrollierten Bedingungen und mit eher kurzfristigen Expositionen zeigen fast durchwegs negative Befunde. Epidemiologische Arbeiten weisen hingegen heterogene Resultate auf und können nicht zu einem klaren Fazit gebündelt werden. Im Zentrum des Interesses steht vor allem das Melatonin, das bei der Schlafregulation eine wichtige Rolle spielt und dem eine präventive Wirkung bei Brustkrebs (und anderen Erkrankungen) zugesprochen wird.

Die Datenlage zu Wirkungen auf das Immunsystem ist ebenfalls uneinheitlich und noch lückenhaft. Neuere Humanstudien weisen eher darauf hin, dass keine Effekte vorliegen.

Dagegen scheint es, dass NF-EMF 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 auch neuere epidemiologische Arbeiten teilweise deutliche methodische Mängel zeigen. Ein Gesamturteil ist gegenwärtig kaum möglich.

3.4 Forschungsbedarf

3.4.1 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 hoch exponierten Kindern (z.B. Kinder in Gebäuden mit Transformer). Ebenfalls interessant sind Gen-Umwelt Interaktionsstudien, da diese Hinweise auf mögliche biologische Wirkungsmechanismen geben könnten. Nötig wären auch Studien mit verbesserter Expositionsabschätzung, z.B. mit prospektiv gesammelten Informationen. Es ist jedoch zu betonen, dass solche Studien genügend gross sein müssen und entsprechend aufwändig sind.

Nötige 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 Entla-



dungen, 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 beobachtet wurde, obwohl dort die Magnetfeldbelastung bereits Hintergrundwerte erreicht.

(SCENIHR 2015) taxiert Studien zu Leukämie als Forschung von hoher Priorität. Als Hauptfokus empfehlen sie v.a. Arbeiten mit neuen Tiermodellen zur akuten lymphatischen Leukämie (ALL).

3.4.2 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. Die zurzeit vorhandenen Job-Expositions-Matrizen, die für solche Untersuchungen benötigt werden, sind wenig aussagekräftig und es wäre wünschenswert auch in diese Richtung bessere Daten zu sammeln.

Tiermodelle zu neurodegenerativen Erkrankungen sind erst seit kurzem vorhanden und entsprechend wenige Daten gibt es zurzeit. Die Durchführung von weiteren Tierstudien kann deshalb empfohlen werden, allenfalls auch in Kombination mit anderen Expositionen (Ko-Expositionen).

(SCENIHR 2015) stuft epidemiologische Arbeiten und Laborstudien zu Alzheimer als Forschungsfelder hoher Priorität ein. Bei den Laborstudien sollten Arbeiten mit den neue Tiermodellen sowie in-vitro Anordnungen zur Untersuchung möglicher Wirkmechanismen im Vordergrund stehen.

3.4.3 Elektromagnetische Sensibilität

Offene Fragen betreffen hier unter anderem die Wahrnehmbarkeit von Feldern. Mittels randomisierter Doppelblindstudien sollte systematische erhoben werden, wo die Wahrnehmungsschwelle für niederfrequenten Magnetfelder und auch elektrische Felder ist. Da die Wahrnehmung von Feldern, die Risikowahrnehmung beeinflusst ist solches Wissen wichtig. Dabei sollte auch systematisch evaluiert werden, ob es Personen gibt, die eine gute Wahrnehmungsfähigkeit besitzen, wie das in zwei neuen Studien festgestellt wurde.

Wichtig wäre auch transnationale Forschung mit dem Ziel für Personen, die sich als EHS bezeichnen, die wirksamste Behandlung anbieten zu können. Zum Beispiel könnte man Provokationsstudien durchführen, um festzustellen, ob solche Personen Felder unter doppelblinden Bedingungen tatsächlich wahrnehmen können, wie sie das häufig angeben. Möglicherweise hilft die systematische Testung der Wahrnehmbarkeit begleitet mit Informationen im Umgang mit den Beschwerden, um einen anderen Umgang mit EHS in Gang zu setzen. Damit solche Provokationsstudien erfolgreich sind, ist es unabdingbar mit den Betroffenen vorgängig zu klären, was sie als problematisch erachten und genau diese Expositionssituation anzugehen.

(SCENIHR 2015) beurteilt Replikationsstudien mit Personen, die sehr empfindlich auf NF-Felder reagieren, als prioritäres Forschungsfeld.



3.4.4 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-EMF 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. Neben oxidativen Prozessen gibt es andere Wirkungsmechanismen, die ungenügend erforscht sind, und möglicherweise bedeutsam für Gesundheitsauswirkungen sein könnten. Dabei handelt es sich um epigenetische Effekte, Signalübertragungen in der Zelle und Kryptochromreaktionen. Diese und weitere neuere Arbeiten (Fedele, Green et al. 2014), (Golbach, Scheer et al. 2015), (Duan, Liu et al. 2015) die auf zelluläre Effekte von ELF-EMF hinweisen erfordern dringend Replikations- und Konfirmationsstudien. Daraus könnten in naher Zukunft Wirkungsmechanismen identifiziert und damit zuverlässige Risikoabschätzungen gewonnen werden.

(SCENIHR 2015) bewertet Studien zur Sensitivität unterschiedlicher Zelltypen als Forschungsthemen mittlerer Priorität. Dasselbe gilt für Replikationsstudien zum möglichen Zusammenhang zwischen NF-EMF und Asthma (und Fettleibigkeit).

Nicht vergessen werden sollte im Zusammenhang mit dem Stromnetz auch der Forschungsbedarf im Hochfrequenzbereich. Anwendungen zum Betrieb von sog. Smart Grids (siehe 5.2.2) nutzen zunehmend Radiofrequenzen zur Informationsübertragung, und die Konvergenz von Strom- und Kommunikationsnetzen fördert solche Anwendungen. Eine aktuelle Zusammenstellung von dringlichen Forschungsthemen im Hochfrequenzbereich findet sich bei (SCENIHR 2015).



4. 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 and Nelson 2013), (Furby, Slovic et al. 1988), (Vajjhala and 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, Hebdon et al. 2014), (Sovacool 2014).

4.1 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 (Kim, Kim et al. 2013), so auch in der Schweiz (Siegrist and Visschers 2013). Gegenüber erneuerbaren Energien ist die Schweizer Bevölkerung jedoch sehr positiv eingestellt (Visschers and Siegrist 2014). 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 and Steg 2014).

Was die physikalischen Charakteristiken (z.B. die Auswirkungen auf die Landschaft und die Ästhetik etc.) und die Charakteristiken des Planungsprozesses von erneuerbaren Energieinfrastrukturen angeht, so finden sich viele dieser Eigenschaften auch bei Projekten im Zusammenhang mit Stromleitungen und haben ähnliche Auswirkungen auf deren Akzeptanz (Cain and Nelson 2013), (Cotton and Devine-Wright 2013), (Elliott and 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, Reichl 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 and Devine-Wright 2013), (Elliott and Wadley 2012) (Elliott, Wadley et al. 2016). Wie neuere Studien aufzeigen, besteht in der Öffentlichkeit im Allgemeinen eine grosse Unsicherheit über die negativen Auswirkungen auf die Gesundheit (Claassen, Bostrom et al. 2016), (Porsius, Claassen 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 (Porsius, Claassen et al. 2016).



4.2 Einflussfaktoren

4.2.1 Physikalische Charakteristiken

4.2.1.1 Räumliche Faktoren

Verschiedene Studien zeigten, dass die allgemeine Einstellung gegenüber Infrastrukturen im Zusammenhang mit der Förderung erneuerbarer Energie, wie sie in Bevölkerungsbefragungen erfasst wird, keine geeignete Grundlage für Schlussfolgerungen im Hinblick auf die lokale Akzeptanz bildet (Pidgeon and 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. Mit zunehmender räumlicher Distanz zu den Übertragungsleitungen nimmt die Akzeptanz zu und Bedenken, wie etwa Gesundheitsbedenken im Hinblick auf EMF (Cotton and Devine-Wright 2013), nehmen ab.

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 and Devine-Wright 2009). Die Standortwahl ist daher ein wichtiger Faktor im Zusammenhang mit dem Bau von Strommasten.

4.2.1.2 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, Pouta 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 kürzlich in der Schweiz durchgeführten 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, Suetterlin et al. 2015).

4.2.2 Psychologische Faktoren und Prozesse

4.2.2.1 Risikowahrnehmung

Es wurden bisher nur wenige Studien mit einem spezifischen Fokus auf die Risikowahrnehmung von EMF im Zusammenhang mit Stromleitungen durchgeführt (Furby, Slovic et al. 1988), (Gregory and von Winterfeldt 1996), (MacGregor, Slovic et al. 1994), (Morgan, Florig et al. 1990), (Morgan, Slovic 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, Slovic et al. 1985). 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, Bostrom 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, Keller et al. 2011), während Gegner diesen Nutzen weniger hoch gewichten und daher nicht gewillt sind, die mit dieser Technologie verbundenen Risiken zu akzeptieren (Eiser and 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, Sütterlin 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, Suetterlin 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 and Holup 2006), (Loewenstein, Weber et al. 2001), (Slovic, Finucane et al. 2004). So postulieren Slovic und Kollegen (2007) 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 and Slovic 1996), erneuerbaren Energien (Visschers and Siegrist 2014) und auch Stromleitungen (Lienert, Suetterlin et al. 2015) nachgewiesen.

4.2.2.2 Emotionale Bindung an den Heimatsort 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 and Devine-Wright 2009).

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) 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 Charakteristi-



ka. 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, Devine-Wright et al. 2015). 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 and Howes 2010), (Strazzer, Mura et al. 2012) wie auch in Studien zur Errichtung von Stromleitungen (Devine-Wright 2012) nachgewiesen.

4.2.2.3 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 and Cvetkovich 2000), (Slovic 1993). Das Vertrauen beeinflusst die Nutzen- und Risikowahrnehmung, 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 kürzlich durchgeführten Studie verdeutlicht. Die Studie zeigte, dass die wahrgenommene Kontrolle den Zusammenhang zwischen Vertrauen und wahrgenommenem Risiko von Stromleitungen und GSM-Basisstationen abschwächt (van Dongen, Claassen et al. 2013). 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.

4.2.3 Prozedurale Faktoren

Das Vertrauen in die Akteure und die 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, Webler 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 Partizipationsangeboten 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 (Gross 2007), (Walker and Devine-Wright 2008). Gleichermaßen 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, Wold et al. 2015) (Porsius, Claassen et al. 2016). Zudem entspricht die bereitgestellte Information meist nicht den Bedürfnissen der lokalen Bevölkerung und ist aus ihrer Sicht zu wenig personalisiert und konkret in Bezug auf den Einfluss von



Stromleitungen auf ihre Lebenssituation (Porsius, Claassen 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, Wold et al. 2015).

4.3 Forschungsbedarf

4.3.1 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, Finucane 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). 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.

4.3.2 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, Huss et al. 2006). 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, Slovic et al. 1994).



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.

4.3.3 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, Reichl 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, Demski et al. 2013). Wie eine kürzlich 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 Stromnetzbau 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, Suetterlin 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, Suetterlin 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.

4.3.4 Akzeptanz verschiedener Um- und Ausbauarten der Netzinfrastruktur

4.3.4.1 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 Lösun-



gen, die keine Vergrößerung der Strommasten erfordern, können durchaus zu einer höheren Akzeptanz in der Bevölkerung beitragen (Lienert, Suetterlin 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.

4.3.4.2 Unterirdische versus oberirdische Stromleitungen

Es gibt nur wenig sozialwissenschaftliche Forschung zur Akzeptanz der Netzinfrastruktur im Hinblick auf Elektromog und die existierenden Studien fokussieren fast ausschliesslich auf die überirdische Übertragung (Cotton and Devine-Wright 2013), (Elliott and Wadley 2012), (Poortinga, Cox et al. 2008). Das Verlegen der Stromleitungen in den Boden stösst in der Bevölkerung generell auf mehr Akzeptanz als überirdische Leitungen (Devine-Wright, Devine-Wright et al. 2010), (Navrud, Ready et al. 2008). Diese Vorgehensweise 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). Eine wichtige Frage, die es in diesem Zusammenhang zu untersuchen gilt, ist zum Beispiel, ob bei Erdkabeln die Gesundheitsrisiken ausgehend von EMF als signifikant kleiner wahrgenommen werden als bei überirdischen Leitungen und ob diese Reduktion des wahrgenommenen Gesundheitsrisikos gegenüber den Auswirkungen einer Erdverkabelung auf das Landschaftsbild und die Natur überwiegt.



5. NF-EMF und EMV

5.1 Elektromagnetische Verträglichkeit EMV

5.1.1 Allgemein

Jedes elektrische System basiert auf elektrischen, magnetischen und/oder elektromagnetischen Feldern. Teile dieser Felder sind zwingend für die Funktion des Systems erforderlich, andere ebenfalls vorhandene Anteile sind nicht funktionsnotwendig, ergeben sich aber als räumliche Fortsetzungen der für das System nötigen Felder, weil sich Felder räumlich kontinuierlich und nicht abrupt verhalten. Das Fachgebiet EMV befasst sich mit der Wirkung der nicht-funktionalen („unnötigen“) Feldanteile und unterscheidet grundsätzlich zwischen Emission – welche Felder verursacht ein bestimmtes System in seiner Umgebung? – und Immission – wie wirken extern verursachte Felder auf ein gegebenes System? Im zweiten Fall kann das beeinflusste System auch ein nicht-technisches System sein, z.B. der Mensch, und die interessierenden Wirkungen sind dann häufig gesundheitlicher Natur wie sie ausführlich in Kapitel 2 behandelt worden sind. Es ist zu bemerken, dass in der Praxis bei technischen Systemen die klare Unterscheidung von Verursacher und Opfer nicht immer möglich ist, weil Teile eines grösseren Systems sich auch gegenseitig beeinflussen können. Insbesondere gehören im Niederfrequenzbereich auch Abweichungen etwa der Netzfrequenz oder der Netzspannung vom Sollwert und die damit verknüpfte Immunität von Teilsystemen mit zum EMV-Fach.

Allgemein befasst sich die EMV mit der Definition von Grenzwerten, den zugehörigen Messverfahren sowie Schirm- und Schutz-Massnahmen in einer Vielzahl von Systemen und System-Kombinationen. Da die Wirkung von Feldern nicht nur von deren Stärke, sondern speziell auch vom zeitlichen Verlauf (Frequenz) der Felder abhängt, sind EMV Massnahmen stark frequenzabhängig.

5.1.2 EMV-Herausforderungen der Energiewende

Rund um das System der elektrischen Energieversorgung (Netzstrom: 50 Hz, Bahnstrom: 16,7 Hz) standen in der Vergangenheit EMV Massnahmen nur für diese Frequenzen im Fokus. Ausserdem wurden die bei nichtlinearen Lasten zusätzlich entstehenden Oberwellen (ganzzahlige Vielfache der Grundfrequenz bis 2 kHz) reguliert. Dies war ausreichend für das System der konventionellen elektrischen Energieversorgung (und die angeschlossenen Verbraucher), wo wenige starke Erzeuger die Energie an viele kleine Verbraucher lieferten.

Die Innovationen im Zuge der Energiewende haben auch die EMV des elektrischen Energieversorgungsnetzes grundlegend verändert, wobei dieser Prozess noch im Gange ist. Treibend sind folgende Umstände:

Die elektronischen Schaltnetzteile, die bei immer grösseren Verbrauchern eingesetzt werden, aber auch der Ersatz der Glühbirnen durch kompakte Sparlampen und LED-Leuchtmittel belasten das Netz zunehmend mit höherfrequenten Feldanteilen (2 ... 150 kHz). Diese Frequenzen waren früher völlig unbedeutend und daher kaum reguliert.

Die teilweise vom Wetter abhängigen neuen Erzeuger wie dezentrale Wind- und Solaranlagen, aber auch alle dezentralen Kleinkraftwerke erfordern zusätzliche Stromrichter und müssen intelligent gesteuert werden, damit sie ins Netz integriert werden können.

„Power Line Communication“ zur Steuerung und Regelung von Verbrauchern und kleineren Erzeugern, aber auch als Datenkanal zwischen Computern innerhalb von Gebäuden nutzt das Energienetz



zusätzlich als Datennetz: die beiden Systeme erfordern gegenseitige EMV Regeln.

Das Knowhow für das Verhalten höherfrequenter Feldanteile sowie die zugehörige Messtechnik und die adäquate Beschreibung der Phänomene muss im Energiebereich noch etabliert werden. Wissenschaftliche Publikationen zu entsprechenden Messverfahren sind aktuell im Trend, denn viele konventionelle Testverfahren sind „blind“ für höhere Frequenzen.

Elektromobile öffnet einen zusätzlichen EMV-Bereich im Auto selbst aber auch im Rahmen der Ladestationen.

5.1.2.1 Systemorientierte EMV

In der EMV Community haben sich daher neue Forschungsrichtungen herausgebildet. Eine erste Gruppe bilden die folgenden das gesamte Netz betreffenden EMV-Bereiche:

Power Quality: Die Beschreibung des Qualitätszustands des Energienetzes erfordert komplexere Modelle wegen den höherfrequenten Anteilen und den transienten Regelvorgängen. Versteht man das Netz als Gesamtsystem, ergeben sich einerseits klassische EMV-Massnahmen zwischen Teilsystemen. Die Abgrenzung zum nächsten Punkt ist nicht scharf.

Smart Grid: Die im Vergleich zu früher viel komplexeren Funktionalitäten des gesamten Netzes müssen auf ihre Robustheit im realen Betrieb untersucht und geschützt werden.

Power Line Communication: Die Energie- und Kommunikationsfunktionen können sich gegenseitig beeinflussen, aber auch die mit der Kommunikationsfunktion zusammenhängenden Feldanteile können unerwünschte Nebenwirkungen in externen Telekom-Systemen haben.

Kriechströme: Aufgrund des steigenden Anteils von nicht-linearen Verbrauchern und dezentralen Einspeisern verzeichnet man eine Zunahme von Kriechströmen und damit verbundenen EMV Problemen (auf biologische und gesundheitliche Aspekte von Kriechströmen ist in den vorstehenden Kapiteln bereits eingegangen worden).

5.1.2.2 Komponentenorientierte EMV

Eine zweite Gruppe neuer EMV-Forschungsbereiche besteht aus spezifischen Problemen bei allen neuen Teilen und Komponenten des gesamten Netzes. Dazu zählen u.a. elektronische Stromrichter in Erzeugern (Photovoltaikanlagen, Windanlagen) oder in den Endgeräten (etwa Spar- und LED Lampen), der drahtlose Energietransfer über kurze Strecken (WPT, Wireless Power Transfer), oder elektrische Fahrzeuge.

Im Bereich solcher Teilsysteme ist die bereits erwähnte Unterscheidung von Emission und Immission besonders hervorzuheben. Grundsätzlich kann jede unerwünschte Interaktion zwischen (Teil-) Systemen immer von beiden (Teil-) Systemen her angegangen werden. Hohe Immunität des einen Systems erlaubt höhere Emissionen des anderen Systems. Somit können der Aufwand zur Einschränkung der Interaktionen und damit auch mögliche Kosten ohne weiteres von der einen auf die andere Seite verschoben werden. Die „gerechte“ Verteilung dieser Kosten ist nicht nur eine technische, sondern vor allem eine politische Frage, die im Rahmen dieses Berichts nicht behandelt wird.

In den folgenden Abschnitten soll zuerst auf die oben genannten drei systemorientierten EMV-Bereiche Power Quality, Smart Grid und Power Line Communication eingegangen werden. Danach folgen separate Abschnitte zu einzelnen Komponenten. Es ist zu beachten, dass in den meisten Fällen die klare Trennung zwischen EMV-Emittent und EMV-Opfer schwierig ist.



5.2 Systemorientierte EMV

5.2.1 Power Quality

Die konventionellen Parameter (stabile Spannung/Phase, konstante Netzfrequenz sowie die Oberwellen niedriger Ordnung) treten in der Forschung in den Hintergrund zugunsten der höherfrequenten Phänomene durch nicht-lineare Verbraucher (siehe auch: 5.3) und der Netz-Stabilität infolge der dezentralen Speisung insbesondere durch erneuerbare Quellen.

Nicht-lineare Verbraucher: sie erzeugen Spannungsverläufe, die in der Regel nicht sinusförmig, aber periodisch sind. Solche Signalformen lassen sich aus einzelnen, unterschiedlichen Sinusschwingungen erzeugen. Die Grundschiwingung entspricht der Periode des Signals (50 Hz), die „Detailform“ wird aus sog. Oberschwingungen (ganzzahlige Vielfachen der Grundschiwingung, also 100 Hz, 150 Hz, 200 Hz, etc.) konstruiert. Dabei treten drei Probleme auf:

(1) Neutralleiterströme. Oberschwingungen (Oberwellen, Harmonische) belasten den Neutralleiter. Üblicherweise führt der Neutralleiter in einem Dreiphasensystem keinen oder nur wenig Strom, denn die zeitlich versetzten Schwingungen der einzelnen Phasen „löschen“ sich bei 50 Hz im Rückstrom gegenseitig aus. Bei 150 Hz, 450 Hz, 750 Hz, etc. (Harmonische 3. Ordnung), addieren sich die Rückströme der einzelnen Phasen. In der Praxis wird bis etwa die doppelte Stärke des Phasenstroms (bis zum 2.5-fachen) gemessen (Mathys 2012); siehe auch: Dürrenberger and Klaus (2009). Der Einsatz von Geräten mit aktiver Leistungsfaktorkorrektur kann die Oberwellenanteile und damit die Belastung des Neutralleiters massiv senken.

(2) Gleichstromanteile. Häufig ist der von nicht-linearen Verbrauchern erzeugte Strom nicht exakt symmetrisch zur Nullachse (er enthält eine Harmonische Nullter Ordnung): es liegt ein kleiner Gleichstrom (DC) vor. Breitet sich Gleichstrom über die Erdung als Kriechstrom auf metallene Installationen des Hauses aus, bewirkt er Korrosion auf den stromdurchflossenen Röhren.

(3) Störungen. Oberwellenströme verursachen elektromagnetische Störungen auf anderen Leitungen. Je grösser der Oberwellenstrom, desto grösser das Störpotenzial. Bereits bei wenigen 10 mA können Datenleitungen gestört sein (Mathys 2012). Sie sind ein ernsthaftes EMV-Problem. Nur in einem konsequent umgesetzten TN-S System treten solche Störprobleme nicht auf. In der neuen Niederspannungs-Verordnung (NIN) von 2015 werden dazu Normen festgelegt, welche den störungsfreien Betrieb von Geräten und Anlagen über einen Funktions-Potenzialausgleich gewährleisten.

Dezentrale Einspeiser: Die Stabilität der Netzfrequenz und die möglichen Abweichungen vom 50-Hz-Sollwert sowie die damit verknüpften Toleranz-Anforderungen an Verbraucher und insbesondere auch an Einspeiser (ab 800 W) sind in Europa in Diskussion und noch nicht abschliessend geregelt (Olofsson 2013).

Infolge der wetterabhängigen neuen Erneuerbaren Quellen werden im Vergleich zu früher grössere Variationen der Netzspannung erwartet. Im Gegenzug wird von allen mit dem Netz verbundenen Systemen erwartet, dass sie solchen Schwankungen gegenüber immun sind.

Die Verursacher von höheren Frequenzen (gemeint sind solche von 2 bis 150 kHz, sogenannte „Supraharmonics“, teilweise auch Frequenzanteile bis 30 MHz) sind neben der Telekommunikation elektronische Stromrichter sowohl in den Erzeugern als auch in den Verteilern und Verbrauchern bis hin zu den Sparlampen. Aus EMV-Sicht sind zwei Aspekte im Fokus: die fehlende Regulierung im Bereich der Supraharmonics (Bollen and Olofsson 2015) sowie die Hochfrequenz-Messverfahren an sich.

Die hochfrequenten Signale der Powerline communication sind ausreichend geregelt, eine Lücke besteht nur bei den „nicht funktionalen“ Anteilen, die etwa wegen nicht idealer Filterung bei Stromrichtern sowohl auf der Erzeuger- wie auf der Verbraucherseite leitungsgebunden ins Netz gelangen können.



Je höher die Frequenz ist, desto leichter können die zugehörigen Energien auch in den freien Raum abgestrahlt werden. Die Anregung des sogenannten Common mode (dabei fliesst der Strom in allen Leitern in die gleiche Richtung) auf einem Kabel verursacht bei höheren Frequenzen besonders starke Abstrahlung. In diesem Fall wird die EMV Emission verschärft (Luszcz 2011). Andererseits verursachen höhere Frequenzen grössere Verluste, was die leitungsgebundene Ausbreitung vermindert.

Die Diskussion bei der Regulierung beinhaltet verschiedene Fragen. Welche physikalischen Grössen sollen überhaupt herangezogen werden: Strom und/oder Spannung und/oder Leistung und/oder Felder? Sollen nur spektrale Anteile oder auf spezifische nichtharmonische Zeitverläufe in die Regulierung einbezogen werden? Wie gross sollen allfällige Grenzwerte denn sein? Zu beachten ist dabei auch eine möglichst nahtlose Einbettung in die bestehenden und angrenzenden Normen. Die Diskussion ist noch im Gang, aber es liegen bereits Vorschläge auf dem Tisch (Bollen and Olofsson 2015), (Larsson, Bollen et al. 2010), und es scheint nur eine Frage der Zeit zu sein, bis man sich einigen wird. Das gleiche gilt für die Messverfahren.

Verschiedene neuere Publikationen zum Thema Hochfrequenz-Messverfahren bei Powerlines behandeln Dinge, die für den Nachrichtentechniker zu den Grundlagen gehören (Fourieranalyse, Abtasten und Filtern von Messgrössen etc.) (Klatt, Meyer et al. 2014). Weil diese zur Hochfrequenztechnik zählenden Verfahren in der Power-Community früher kaum präsent waren, muss dieses Wissen noch vermittelt werden. Aber auch wenn Teile der Testverfahren neu sein mögen, die Technik und die Geräte dazu sind vorhanden. Einen guten Überblick über den Stand der Dinge liefern die „Executive Summaries“ der alle zwei Jahre stattfindenden CIRED Konferenz (<http://www.cired2013.org/executive-summaries.htm>).

5.2.2 Smart Grid

Das Smart Grid zeichnet sich durch die Steuerbarkeit einer Vielzahl von Einheiten. Neben Erzeugern und Verbrauchern gehören dazu auch die aus schnell schaltenden Halbleiterelementen aufgebauten Kompensatoren, Controller, Phasenschieber, Spannungsregler usw. Alle diese steuerbaren Elemente werden auch FACTS-Komponenten genannt, wobei FACTS für „Flexible Alternating Current Transmission System“ steht. Abhängig von der Leistung kommen Halbleiter mit unterschiedlich hohen Schaltfrequenzen f_{schalt} zum Einsatz. Grundsätzlich gilt: je kleiner die Leistung P , desto höher ist im allgemeinen die Schaltfrequenz. Der Trend geht in Richtung höherer Schaltfrequenzen bei immer grösseren Leistungen. Thyristoren: $f_{\text{schalt}} < 100$ Hz, GTOs: $f_{\text{schalt}} < 1$ kHz, IGBTs: $P < 100$ MW, $f_{\text{schalt}} < 200$ kHz, oder MOSFETs $P < 1$ kW, $f_{\text{schalt}} < 1$ MHz. Diese Schaltfrequenz und deren Oberwellen sind Gegenstand der EMV-Massnahmen.

Mit Hilfe der FACTS-Komponenten können die Energieflüsse im Netz optimiert werden. Dies mit dem Ziel, die Spitzen bei Erzeugern oder Verbrauchern abzufedern, das Verteilnetz optimal auszulasten und die Übertragungsverluste gering zu halten. Schliesslich soll sich das gesamte System im Idealfall nach dem Ausfallen einzelner Einheiten selbst heilen können. Aus EMV-Sicht gibt es dabei drei Ebenen zu beleuchten:

Die Kommunikation zur Steuerung einer FACTS-Komponente kann gestört werden, etwa indem Steuersignale verfälscht beim Empfänger ankommen. Dies kann einen oder mehrere einzelne Sender, den Übertragungskanal oder den Empfänger betreffen und die Steuerbarkeit der jeweiligen Einheit beeinträchtigen. Die nötigen Gegenmassnahmen sind aus technischer Sicht im Prinzip bekannt, kosten aber Geld. Die quantitative Erfassung der im realen Netz vorhandenen Störsignale sind Gegenstand von Untersuchungen (Yu 2014). Weitere EMV Massnahmen werden weiter unten im Abschnitt über PLC behandelt.

Die Einheiten können in ihrer Funktion direkt gestört werden. Bei unzureichender Immunität von Erzeugern, Verbrauchern oder den FACTS-Komponenten in Bezug auf äussere Störfelder oder lei-
78/113



tungsgebundene Störungen, Spannungsschwankungen etc. kann die Funktion der Einheit blockiert oder fehlgeleitet sein. Im Zuge der immer höheren Schaltfrequenzen in den FACTS-Komponenten müssen die entsprechenden Testmethoden angepasst oder ergänzt werden.

Die Stabilität des gesamten Smart Grid ist infolge der Steuer-/Schaltbarkeit vieler Einheiten und der möglicherweise hoch dezentralen Einspeisung nicht trivial. Ein Fehler oder Teilausfall in der Logik der diversen Steuerungen könnte etwa einen Dominoeffekt auslösen und das gesamte Netz lahmlegen, die Spannung aufschaukeln usw. Das Research & Innovation Forum der CIRED-Conference 2013 in Stockholm war sich jedoch einig, dass diesbezügliche Probleme technisch in den Griff zu bekommen seien. Untersucht wurden auch die Auswirkungen von kriminellen/terroristischen Ereignissen (HPEM, HEMP, IEMI) auf die Funktion des Smart Grids (Radasky and Hoad 2012). Sowohl CIGRE (WG C4.206) als auch die IEEE EMC Society (TC-5) <http://standards.ieee.org/findstds/standard/1642-2015.html> geben entsprechende Richtlinien dazu heraus.

Ein von 2012–2016 laufendes NIST-Projekt (<http://www.nist.gov/el/smartgrid/elcom.cfm>) unter Leitung von Galen Koepke im PML hat das Ziel, den technischen Input für neue smart grid EMC Standards zu liefern. Die gesamten Entwicklungen in USA aus der Sicht des NIST und die ev. nötigen Regulierungen sind in (Ramie 2013) gut zusammengefasst.

5.2.3 Power Line Communication

Die Grundidee der Power Line Communication ist es, das vorhandene und eigentlich zur Leistungsübertragung (bei 50 Hz bzw. 16.7 Hz) gebaute elektrische Netz gleichzeitig auch zur Datenübertragung als Telecom-Leitung zu nutzen. Dies kann grundsätzlich auf allen Spannungsebenen passieren. Die Datensignale sind dabei in einem Frequenzbereich bis 500 kHz, für kurze Distanzen evt. noch höher (bis über 1 MHz).

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 mit einbezogen werden.

Im Zusammenhang mit dem Smart Grid kann PLC 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. Allerdings sind die aktuell eingesetzten Modulationsverfahren nicht beliebig robust (Pakonen, Pikkarainen et al. 2013). Will man höhere Störpegel zulassen, müssen unter Umständen die PLC-Verfahren angepasst werden.

In der EMV-Community wurden in letzter Zeit Arbeiten zu allen relevanten Punkten publiziert. Weil die Hochfrequenz-Problematik für viele traditionell im Powerbereich arbeitenden Leute neu ist, sind einzelne Publikation klar der Kategorie „knowledge diffusion“ zuzurechnen, etwa das Problem stark variabler Impedanzen von Haushaltgeräten mit unterschiedlich langen Kabeln. Lange Kabel haben mehr Resonanzen im Arbeitsbereich von 1–30 MHz (Antoniali and Tonello 2014). 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.

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 der klassischen EMV Limiten oft als 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. Die aus der Nachrichtentechnik bereits geläufigen EMV-Richtlinien müssen teilweise noch für den Powerbereich adaptiert werden.

Schliesslich wurde auch die durch PLC verursachte Emission untersucht (Ronkainen, Vuotoniemi et al. 2014). Diese Problematik unterscheidet sich in der Sache nur unwesentlich von jener in der allgemeinen Nachrichtentechnik und ist bereits geregelt. Die Mess- und Testverfahren müssen möglicherweise teilweise angepasst werden.

5.2.4 Kriechströme

Als Kriechstrom bezeichnen wir einen Strom, der nicht über das elektrische Leitungsnetz fliesst, sondern über andere leitfähige Medien wie Sanitärinstallationen, im Boden verlegte Metallrohre oder das Erdreich (Dürrenberger 2016). Die Ursache eines Kriechstroms kann ein technischer Fehler sein, eine systembedingte Eigenschaft der Elektroinstallation, oder ein externes magnetisches Wechselfeld, welches in einem leitfähigen Medium eine Spannung induziert und damit einen Strom erzeugt.

Grundsätzlich verursachen Verteilnetze Kriechströme zwischen den Erdungsstellen. Über den Netz-PEN-Leiter (PEN-Leiter: kombinierter Neutral- und Schutzleiter), der üblicherweise bis an den Hausanschlusskasten geführt wird, können Rückströme in die Schutzleiter der Gebäude-Elektroinstallation fliessen, die sich als Kriechströme auf die in die Schutzerdungen einbezogenen Metallstrukturen (Versorgungsrohre, Armierungen) verteilen (Mathys 2005). Je nach Ausführung der Elektroinstallation kommen diese Rückströme mehr oder weniger „gut“ zum Tragen. Sie sind auch bei fachgerechter Installation nicht vollständig zu vermeiden. Sodann können Kriechströme auch von aussen über vorbelastete Metallinfrastrukturen (Wasser- oder Gasversorgung, Kanalisation) in Gebäude eingeschleppt werden (Virnich 2012).

Immer bedeutsamer werden für die Kriechstromproblematik sog. nicht-lineare Verbraucher. Das sind Geräte, die mittels elektronischer Bauteile die sinusförmige Netzspannung in andere, anwendungsbedingte Spannungs- (und Strom-)verläufe umwandeln. Zu solchen Geräten zählen Netzteile, elektronische Vorschaltgeräte, Frequenzumrichter zur Steuerung von Elektromotoren oder Induktionsherde. Heute sind beinahe alle am Stromnetz angeschlossenen Geräte nicht-lineare Verbraucher. Sie produzieren sog. Oberwellenströme, welche die Neutralleiter belasten und sich bei ungünstiger Elektroinstallation über die Schutzleiter als Kriechströme im Gebäude ausbreiten können (Mathys 2012).

Kriechströme können auch „drahtlos“ verursacht werden, nämlich über kapazitive Einkopplung des elektrischen bzw. induktive Einkopplung des magnetischen Feldes von Stromleitungen, insbesondere Hochspannungsleitungen. Im Vergleich zur drahtgebundenen (konduktiven) Verursachung spielen induktiv und kapazitiv bewirkte Kriechströme eine untergeordnete Rolle. Die kapazitive Kopplung ist wenig bedeutsam, weil elektrische Felder meist auf geerdete Oberflächen treffen.

Die induktive Verursachung ist insofern zu beachten, als Magnetfelder fast alle Materialien problemlos durchdringen. Das Magnetfeld einer Hochspannungsleitung kann deshalb auch Kriechströme im Erdreich oder in Gebäuden generieren. Entscheidend ist dabei der sog. magnetische Fluss, das ist das



durch eine bestimmte Fläche „fliessende“ Magnetfeld. Je grösser der Fluss, desto grösser ist die in einem Leiter (der diese Fläche abdeckt oder umschliesst) induzierte Spannung – und desto grösser der damit verknüpfte Stromfluss. Dabei ist es egal, ob es sich um einen idealen Leiter (Metall) oder um einen widerstandsbehafteten Leiter (Erdreich, Tier, Mensch) handelt. Der Schutz vor Strömen, die durch induktive Einkopplung entstehen, ist bei speziellen Anwendungen angezeigt: dazu zählen in erster Linie Grosssysteme (Rohrleitungen/Pipelines, lange Zäune) die parallel zu und nahe bei Hochspannungsleitungs-Trassen verlegt sind. Bei fachgerechten Installationen sind die induktiv verursachten Berührungsspannungen nicht gefährlich (Czumbil, Micu et al. 2013). Für Gebäude und Wohnungen sind induzierte Spannungen nur in Ausnahmefällen, wenn das Gebäude sehr nahe bei einem Starkstromtrasse liegt und gleichzeitig Hausinstallationen grosse Induktionsschleifen bilden, überhaupt von Bedeutung.

In Gebäuden sind deshalb primär systembedingte Ursachen für Kriechströme verantwortlich. Mit dem heute üblichen Netzanschluss (TN-C) und bei nicht fachgerecht ausgeführter Elektroinstallation treten „eigenverursachte“ Kriechströme auf, das sind Neutralleiter-Rückströme, die über die hausinternen Schutzleiter auf die Erdungsstrukturen eines Gebäudes (Wasserleitungen, Gasleitungen, Heizungsrohre) fliessen.

Zur Vermeidung von Kriechströmen ist eine TN-S Installation (ab Verteilkasten) unabdingbar. Durch die strikte Trennung von Schutzleiter und Neutralleiter werden alle Ströme über die elektrischen Kabel aus dem Haus geführt und auch über den Schutz-Potenzialausgleich werden keine Brücken zum Betriebsstrom hergestellt. Das verhindert EMV- und Korrosionsprobleme (5.2.1) sowie mögliche gesundheitliche Risiken, die im Zusammenhang mit Berührungsströmen diskutiert werden (3.3.1.3).

5.3 Komponentenorientierte EMV

5.3.1 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 ... 150 kHz. CISPR 11 enthält einen Grenzwert nur für Induktionsherde. Da viele Stromrichter auch in diesem Frequenzbereich arbeiten, sind entsprechende Vorschläge 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.



5.3.2 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 Power quality. 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 Power Quality. Eine ähnliche Problematik zeigen auch die CFL (Compact Fluorescent Lamps); siehe (Dürrenberger and Klaus 2009), (George, Bagaria et al. 2011). Die verschiedenen Hersteller setzen offenbar Elektronik mit unterschiedlicher Neigung zu Oberwellen ein, und auch die Dimmbarkeit hat einen Einfluss auf das Auftreten von Harmonischen im Stromverlauf (Uddin, Shareef 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, 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 andererseits 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, wieder verstummt.

5.3.3 Elektrische Fahrzeuge

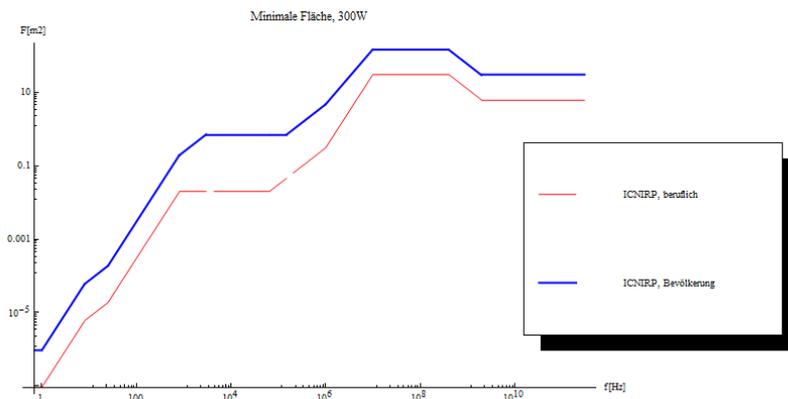
Elektrische Fahrzeuge sind relativ grosse Energieverbraucher. Die elektrische Spitzenleistung eines Tesla beträgt auf der Strasse rund 500 kW, sein Lader verlangt 22 kW, eine normale Haushaltsteckdose liefert 2.3 kW. Andererseits sind E-Fahrzeuge auch als Zwischenspeicher vorgeschlagen. Damit würden die Akkus der Fahrzeuge zeitweilig die Rolle von Energie-Einspeisern übernehmen. 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 einzu beziehen. 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, Meyer 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. Die Regulierung (CISPR 25, ISO 11451, UNECE 10, ISO 11542, IEC 61851) ist teilweise auf Fahrzeuge mit Verbrennungsmotoren ausgerichtet und hat Lücken für EVs (http://www.hemis-eu.org/HEMIS_314609_D5-1_v2.pdf) (Armstrong, Dawson et al. 2015). In den Gremien IEC TC 69, IEC CISPR/B sind die Arbeiten im Gang.

Eine spezielle EMV-Problematik ergibt sich bei den Ladestationen und darunter ausgeprägt bei den drahtlosen (WPT) Stationen (Dürrenberger, Fröhlich et al. 2014). Die Norm IEC 61980-X ist in Bearbeitung.

5.3.4 Drahtlose Energieübertragung

Unter dem Stichwort WPT findet man nicht nur Leistungsübertragung mit grösseren Leistungen, sondern auch solche unter einem Watt, etwa zum Aufladen von Smartphones. Sollen grössere Leistungen übertragen werden, erreichen die dafür nötigen Feldstärken sehr bald die Grenzen der NISV übersteigende Werte. Dies bedeutet, dass der Raum zwischen Sender und Empfänger nicht mehr frei zugänglich sein dürfte. Figur 7 zeigt den Verlauf der zur Übertragung von 300 W Leistung minimal



Figur 7: 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 $E \times H$ übertragen werden. Die Grafik zeigt den entsprechenden Verlauf der minimal nötigen Fläche zur Übertragung von 300 W in Funktion der Frequenz.

nötigen Fläche als Funktion der Frequenz unter der Annahme, dass die ICNIRP Grenzwerte in jedem Punkt gerade erreicht werden. Es wird rasch klar, dass WPT etwa zur Ladung von EV (Leistung 10 kW) nur möglich ist, wenn der Raum zwischen Sender und Empfänger nicht zugänglich ist.

Im Gegensatz zu den NISV bzw. ICNIRP Grenzwerten, die für alle Frequenzen definiert sind, gibt es bei den EMV Normen Lücken. Die für WPT zuständige EMV-Norm IEC 61980-X ist zur Zeit in Bearbeitung (Dürrenberger, Fröhlich et al. 2014). In jüngster Zeit hat die Publikationstätigkeit in diesem Bereich deutlich zugenommen (Cimala, Zang et al. 2015), (Liu, Lang et al. 2015), (Nadakuduti, Douglas et al. 2015), (Pinto, Bertoluzzo et al. 2015), (Yashima, Omori et al. 2015), (Hikage, Nojima et al. 2016).

5.3.5 Stromerzeuger für Regenerierbare

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. Anlagenteile ab dem Stromrichter bis zum Netz unterscheiden sich nicht wesentlich von jenen, die Akuanlagen oder elektrische Fahrzeuge ans Netz ankoppeln. Daher sind die EMV-Aspekte ebenfalls sehr ähnlich. 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, Meyer et al. 2014), zum anderen die Regulierungslücke im Bereich 2 ... 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, Dikun et al.



2014). Die Meinungen zur Relevanz sind kontrovers. So will etwa in Deutschland das Projekt WERAN (Wechselwirkung Windenergieanlagen und Radar/Navigation) die möglichen Einflüsse erfassen.

5.3.6 Implantate

In der Medizin werden zunehmend elektronische Geräte 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, sowohl 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 medizinisch-technische Literatur auf diesem Gebiet.

Betreffend Herzschrittmachern: (Babouri, Hedjeidj et al. 2009), (Irnich and Steen-Mueller 2011), (Magne, Korpinen et al. 2014), (Tiikkaja, Alanko et al. 2012), (Tiikkaja, Aro et al. 2013), (Korpinen, Pääkkönen et al. 2015), (Korpinen, Kuisti et al. 2016), (Napp, Stunder et al. 2015), (Seckler, Stunder et al. 2016). Betreffend Defibrillatoren: (Akhtar, Bhat et al. 2014), (Katrib, Nadi et al. 2013), (Napp, Joosten et al. 2014), (Souques, Magne et al. 2011), (Tiikkaja, Aro et al. 2013). Anderes: (Leitgeb, Niedermayr et al. 2012), (Leitgeb, Niedermayr et al. 2013), (Hikage, Nojima et al. 2016).



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).

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). Elektrische Haushaltsgeräte, Konsumgüter mit Funktechnologien sowie Anlagen innerhalb von Betrieben sind von der Verordnung nicht betroffen. 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 beträchtlich strenger). Sie 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 die deutlich unterhalb der bekannten Gefährdungszone(n) liegen. Die Immissionsgrenzwerte schützen wirksam und dauerhaft vor den wissenschaftlich bekannten Gesundheitsgefahren von EMF.



6.1.3.2 Anlagegrenzwerte

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 (also „schärfer“ sind) als es aufgrund der wissenschaftlich anerkannten Kenntnisse über Gesundheitsrisiken starker Strahlung notwendig wäre.

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 einen Faktor 10 (Hochfrequenz) bzw. einen Faktor 100 (16.7 Hz und 50 Hz) unterhalb der Immissionsgrenzwerte liegen. Die Anlagegrenzwerte sind damit wesentlich schärfer als die Immissionsgrenzwerte. Der Anlagegrenzwert für niederfrequente EMF gilt nur für Magnetfelder, nicht für elektrische Felder. Die Reduktionsfaktoren (10 und 100 gegenüber den Immissionsgrenzwerten) sind politisch 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 und willkürlich 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. Gegenwärtig werden die Bestimmungen in diesem Bereich aktualisiert.

6.2 Internationale und nationale Grenzwerte

6.2.1 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 "Frequenzfenster" 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. Diese Werte sind, zusammen mit den davon teilweise etwas abweichenden Empfehlungen der Internationalen Kommission zum Schutz vor Nicht-Ionisierender Strahlung (ICNIRP) in der Figur 8 eingezeichnet. Nicht vermerkt sind die Empfehlungen der ICNIRP zu maximalen Leistungsdichten bei sehr hohen Frequenzen.

6.2.2 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 strahlenexponierte Personen vor akuten schädlichen Einwirkungen.



Figur 8: Grenzwerte für die Bevölkerung. Die fetten Linien stellen die schweizerischen Grenzwerte der NISV dar, die dünnen Linien die Empfehlungen der ICNIRP; in rot: elektrische Feldstärken, in blau: magnetische Flussdichten; Skalen: logarithmisch. IGW: Immissionsgrenzwert, AGW: Anlagegrenzwert.

6.3 Herleitung der niederfrequenten Grenzwerte

6.3.1 Induzierte elektrische Wirbelfelder

Zur Festlegung der Grenzwerte dienen bekannte biologische Wirkungen und gesundheitliche Schäden. Bei den niederen Frequenzen bis einige Megahertz 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/m² für die allgemeine Bevölkerung). Seit 2010 wird von der ICNIRP (Internationale Kommission zum Schutz vor Nicht-Ionisierender Strahlung) 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 Nervensystem 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 μ T (magnetische Flussdichte) und für Bahnstrom von 16.7 Hz wurden 5'000 V/m bzw. 300 μ T 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. Die Grenzwerte hierzulande betragen für 50 Hz-Felder 5'000 V/m bzw. 100 μ T, für 16.7 Hz-Felder (Bahnstrom) 10'000 V/m bzw. 300 μ T. Die schärferen Anlagegrenzwerte wurden nur für Magnetfelder festgelegt und betragen für Netz- und Bahnstrom 1 μ T.



Verantwortlichkeiten / Beiträge

Gregor Dürrenberger: Gesamtbericht, Kapitel 1, 2, 3, 5, 6

Pascal Leuchtmann: Kapitel 5

Martin Rööslı: Kapitel 2, 3

Michael Siegrist: Kapitel 4

Bernadette Sütterlin: Kapitel 4



Figurenverzeichnis

Figur 1: Immissionen von Haushaltsgeräten in drei Abstandskategorien.	13
Figur 2: Risikoschätzer zu kindlicher Leukämie.	32
Figur 3: Meta-Analyse zu kindlicher Leukämie.	37
Figur 4: Überblick über Studien zu Alzheimererkrankungen.	45
Figur 5: Vergleich der Schweizer und Dänischen Studienresultate zu Alzheimer Erkrankungen.	46
Figur 6: Überblick über Studien zu ALS.	48
Figur 7: Verlauf der minimal nötigen Fläche zur Übertragung von 300 W in Funktion der Frequenz. ...	83
Figur 8: Grenzwerte für die Bevölkerung.	87



Referenzen

- Abhinav, K., A. Al-Chalabi, T. Hortobagyi and P. N. Leigh (2007). "Electrical injury and amyotrophic lateral sclerosis: a systematic review of the literature." J Neurol Neurosurg Psychiatry **78**(5): 450-453.
- Adam, M., C. E. Rebholz, M. Egger, M. Zwahlen and C. E. Kuehni (2008). "Childhood leukaemia and socioeconomic status: what is the evidence?" Radiat Prot Dosimetry **132**(2): 246-254.
- Adochiei, N. I., G. Dorffner and V. David (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).
- Ahlbom, A., N. Day, M. Feychting, E. Roman, J. Skinner, J. Dockerty, M. Linet, M. McBride, J. Michaelis, J. H. Olsen, T. Tynes and P. K. Verkasalo (2000). "A pooled analysis of magnetic fields and childhood leukaemia." Br J Cancer **83**(5): 692-698.
- Akdag, M. Z., S. Dasdag, A. K. Uzunlar, E. Ulukaya, A. Y. Oral, N. Celik and F. Aksen (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.
- Akhtar, M., T. Bhat, M. Tantray, C. Lafferty, S. Faisal, S. Teli, H. Bhat, M. Raza, M. Khalid and S. Biekht (2014). "Electromagnetic interference with implantable cardioverter defibrillators causing inadvertent shock: case report and review of current literature." Clin Med Insights Cardiol **8**: 63-66.
- Al-Akhras, M. A., H. Darmani and A. Elbetieha (2006). "Influence of 50 Hz magnetic field on sex hormones and other fertility parameters of adult male rats." Bioelectromagnetics **27**(2): 127-131.
- Andel, R., M. Crowe, M. Feychting, N. L. Pedersen, L. Fratiglioni, B. Johansson and M. Gatz (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.
- Antoniali, M. and A. M. Tonello (2014). "Measurement and Characterization of Load Impedances in Home Power Line Grids." Instrumentation and Measurement, IEEE Transactions on Instrumentation and Measurement **63**(3): 548-556.
- ARIMMORA (2015). Advanced Research on Interaction Mechanisms of electroMagnetic exposures with Organisms for Risk Assessment Brussels, FP7-ENV-2011.
- Armstrong, R., L. Dawson, A. J. Rowell, C. A. Marshman and A. R. Ruddle (2015). The effect of fully electric vehicles on the low frequency electromagnetic environment. 2015 IEEE International Symposium on Electromagnetic Compatibility (EMC).
- Auger, N., A. L. Park, S. Yacouba, M. Goneau and J. Zayed (2012). "Stillbirth and residential proximity to extremely low frequency power transmission lines: a retrospective cohort study." Occup Environ Med **69**(2): 147-149.
- Babouri, A., A. Hedjeidj and L. Guendouz (2009). "Experimental and theoretical investigation of implantable cardiac pacemaker exposed to low frequency magnetic field." J Clin Monit Comput **23**(2): 63-73.
- Baldi, I., G. Coureau, A. Jaffre, A. Gruber, S. Ducamp, D. Provost, P. Lebailly, A. Vital, H. Loiseau and R. Salamon (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.
- Baliatsas, C., J. Bolte, J. Yzermans, G. Kelfkens, M. Hooiveld, E. Lebret and I. van Kamp (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.
- Baliatsas, C. and G. J. Rubin (2014). Electromagnetic Fields, Symptoms and Idiopathic Environmental Intolerance. Epidemiology of Electromagnetic Fields. M. Roosli. Boca Raton, CRC Press: 261-274.
- Baliatsas, C., I. Van Kamp, J. Bolte, M. Schipper, J. Yzermans and E. Lebret (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.



- Baliatsas, C., I. van Kamp, G. Kelfkens, M. Schipper, J. Bolte, J. Yzermans and E. Lebet (2011). "Non-specific physical symptoms in relation to actual and perceived proximity to mobile phone base stations and powerlines." BMC Public Health **11**: 421.
- Baliatsas, C., I. Van Kamp, E. Lebet and G. J. Rubin (2012). "Idiopathic environmental intolerance attributed to electromagnetic fields (IEI-EMF): a systematic review of identifying criteria." BMC Public Health **12**: 643.
- Barth, A., I. Ponocny, E. Ponocny-Seliger, N. Vana and R. Winker (2010). "Effects of extremely low-frequency magnetic field exposure on cognitive functions: results of a meta-analysis." Bioelectromagnetics **31**(3): 173-179.
- Batel, S., P. Devine-Wright, L. Wold, H. Egeland, G. Jacobsen and O. Aas (2015). "The role of (de-) essentialisation within siting conflicts: An interdisciplinary approach." Journal of Environmental Psychology **44**: 149-159.
- Bayat, P. D., M. R. Darabi, A. Ghanbari, S. Amiri and P. Sohoul (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.
- Behrens, T., E. Lynge, I. Cree, S. Sabroe, J. M. Lutz, N. Afonso, M. Eriksson, P. Guenel, F. Merletti, M. Morales-Suarez-Varela, A. Stengrevics, J. Fevotte, A. Llopis-Gonzalez, G. Gorini, G. Sharkova, L. Hardell and W. Ahrens (2010). "Occupational exposure to electromagnetic fields and sex-differential risk of uveal melanoma." Occup Environ Med **67**(11): 751-759.
- Behrens, T., C. Terschuren, W. T. Kaune and W. Hoffmann (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.
- Belli, C. V., M. Tei, F. Iacoponi, M. L. Tataranno, S. Negro, F. Proietti, M. Longini, S. Perrone and G. Buonocore (2012). "Is newborn melatonin production influenced by magnetic fields produced by incubators?" Early Hum Dev **88**(8): 707-710.
- Belyaev, I. Y., L. Hillert, M. Protopopova, C. Tamm, L. O. Malmgren, B. R. Persson, G. Selivanova and M. Harms-Ringdahl (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.
- Beranger, R., C. Le Cornet, J. Schuz and B. Fervers (2013). "Occupational and environmental exposures associated with testicular germ cell tumours: systematic review of prenatal and life-long exposures." PLoS One **8**(10): e77130.
- Bernabo, N., E. Tettamanti, V. Russo, A. Martelli, M. Turriani, M. Mattoli and B. Barboni (2010). "Extremely low frequency electromagnetic field exposure affects fertilization outcome in swine animal model." Theriogenology **73**(9): 1293-1305.
- Bessou, J., F. Deschamps, L. Figueroa and D. Cougnaud (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.
- Bianchi, N., P. Crosignani, A. Rovelli, A. Tittarelli, C. A. Carnelli, F. Rossitto, U. Vanelli, E. Porro and F. Berrino (2000). "Overhead electricity power lines and childhood leukemia: a registry-based, case-control study." Tumori **86**(3): 195-198.
- Bioelectromagnetics (2003). "Reviews of Effects of RF Fields on Various Aspects of Human Health." Bioelectromagnetics(Supplement 6): S1-S214.
- Bollen, M. and M. Olofsson (2015). "Consumer Electronics and the Power Grid: What are they doing to each other?" Consumer Electronics Magazine, IEEE **4**(1): 50-57.
- Bolte, J. F., C. Baliatsas, T. Eikelboom and I. van Kamp (2015). "Everyday exposure to power frequency magnetic fields and associations with non-specific physical symptoms." Environ Pollut **196**: 224-229.
- Borhani, N., F. Rajaei, Z. Salehi and A. Javadi (2011). "Analysis of DNA fragmentation in mouse embryos exposed to an extremely low-frequency electromagnetic field." Electromagn Biol Med **30**(4): 246-252.
- Bowman, J. (2014). Exposures to ELF-EMF. Epidemiology of Electromagnetic Fields. M. Roosli. Boca Raton, CRC Press: 93-124.



- Bowman, J. D., J. A. Touchstone and M. G. Yost (2007). "A population-based job exposure matrix for power-frequency magnetic fields." *J Occup Environ Hyg* **4**(9): 715-728.
- Bräunlich, R. (2014). "Streuströme in landwirtschaftlichen Teirhaltungsbetrieben." *VSE Bulletin*(3): 3.
- Brouwer, M., T. Koeman, P. A. van den Brandt, H. Kromhout, L. J. Schouten, S. Peters, A. Huss and R. Vermeulen (2015). "Occupational exposures and Parkinson's disease mortality in a prospective Dutch cohort." *Occup Environ Med* **72**(6): 448-455.
- Bunch, K. J., T. J. Keegan, J. Swanson, T. J. Vincent and M. F. Murphy (2014). "Residential distance at birth from overhead high-voltage powerlines: childhood cancer risk in Britain 1962-2008." *Br J Cancer* **110**(5): 1402-1408.
- Bunch, K. J., J. Swanson, T. J. Vincent and M. F. Murphy (2015). "Magnetic fields and childhood cancer: an epidemiological investigation of the effects of high-voltage underground cables." *J Radiol Prot* **35**(3): 695-705.
- Bundesrat (2013). Strategie Stromnetze; Detailkonzept im Rahmen der Energiestrategie 2050. Bern, Schweizerischer Bundesrat.
- Burgi, A. (2011). Immissionskataster für Niederfrequente Magnetfelder von Hochspannungsleitungen - Machbarkeits und Pilotstudie. Bern, BAFU.
- BUWAL (2005). Elektrosmog in der Umwelt. Bern, BAFU.
- Cain, N. L. and H. T. Nelson (2013). "What drives opposition to high-voltage transmission lines?" *Land Use Policy* **33**: 204-213.
- Calvente, I., C. Davila-Arias, O. Ocon-Hernandez, R. Perez-Lobato, R. Ramos, F. Artacho-Cordon, N. Olea, M. I. Nunez and M. F. Fernandez (2014). "Characterization of indoor extremely low frequency and low frequency electromagnetic fields in the INMA-Granada cohort." *PLoS One* **9**(9): e106666.
- Chan, K. H., J. Hattori, I. Laakso, A. Hirata and M. Taki (2013). "Computational dosimetry for grounded and ungrounded human models due to contact current." *Phys Med Biol* **58**(15): 5153-5172.
- Chan, K. H., S. Ohta, I. Laakso, A. Hirata, Y. Suzuki and R. Kavet (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.
- Chen, C., X. Ma, M. Zhong and Z. Yu (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.
- Chiu, R. S. and M. A. Stuchly (2005). "Electric fields in bone marrow substructures at power-line frequencies." *IEEE Trans Biomed Eng* **52**(6): 1103-1109.
- Cimala, C., M. Zang, M. Clemens, J. Feng, B. Schm, x00Fc, lling and J. Streckert (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.
- Claassen, L., A. Bostrom and D. R. M. Timmermans (2016). "Focal points for improving communications about electromagnetic fields and health: A mental models approach." *Journal of Risk Research* **19**(2): 246-269.
- Coble, J. B., M. Dosemeci, P. A. Stewart, A. Blair, J. Bowman, H. A. Fine, W. R. Shapiro, R. G. Selker, J. S. Loeffler, P. M. Black, M. S. Linet and P. D. Inskip (2009). "Occupational exposure to magnetic fields and the risk of brain tumors." *Neuro Oncol* **11**(3): 242-249.
- Cocco, P., L. Figgs, M. Dosemeci, R. Hayes, M. S. Linet and A. W. Hsing (1998). "Case-control study of occupational exposures and male breast cancer." *Occup Environ Med* **55**(9): 599-604.
- Cohen, J. J., J. Reichl and M. Schmidthaler (2014). "Re-focussing research efforts on the public acceptance of energy infrastructure: A critical review." *Energy* **76**(0): 4-9.
- Concha, P. M.-T., P. Velez, M. Lafoz and J. Arribas (2015). "Passenger Exposure to Magnetic Fields due to the Batteries of an Electric Vehicle." *IEEE Transactions on Vehicular Technology* **PP**(99): 1-1.
- Cook, C. M., D. M. Saucier, A. W. Thomas and F. S. Prato (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.



- Cook, C. M., D. M. Saucier, A. W. Thomas and F. S. Prato (2009). "Changes in human EEG alpha activity following exposure to two different pulsed magnetic field sequences." Bioelectromagnetics **30**(1): 9-20.
- Cook, C. M., A. W. Thomas, L. Keenlside and F. S. Prato (2005). "Resting EEG effects during exposure to a pulsed ELF magnetic field." Bioelectromagnetics **26**(5): 367-376.
- Cook, C. M., A. W. Thomas and F. S. Prato (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.
- Cook, C. M., A. W. Thomas and F. S. Prato (2004). "Resting EEG is affected by exposure to a pulsed ELF magnetic field." Bioelectromagnetics **25**(3): 196-203.
- Corbacio, M., S. Brown, S. Dubois, D. Goulet, F. S. Prato, A. W. Thomas and A. Legros (2011). "Human cognitive performance in a 3 mT power-line frequency magnetic field." Bioelectromagnetics **32**(8): 620-633.
- Cotton, M. and P. Devine-Wright (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.
- Cvetkovic, D. and I. Cosic (2009). "Alterations of human electroencephalographic activity caused by multiple extremely low frequency magnetic field exposures." Med Biol Eng Comput **47**(10): 1063-1073.
- Cvetkovic, D., E. Jovanov and I. Cosic (2006). Alterations in human EEG activity caused by extremely low frequency electromagnetic fields. IEEE Eng Med Biol Soc. **1**: 3206-3209.
- Czumbil, L., D. D. Micu, D. Stet, G. C. Christoforidis and L. Ancas (2013). HVPL conductor sag influence on induced voltage evaluation in nearby metallic structures. Power Engineering Conference (UPEC), 2013 48th International Universities'.
- Davanipour, Z., C. C. Tseng, P. J. Lee, K. S. Markides and E. Sobel (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.
- Davanipour, Z., C. C. Tseng, P. J. Lee and E. Sobel (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.
- Dawson, T. W., K. Caputa, M. A. Stuchly and R. Kavet (2001). "Electric fields in the human body resulting from 60-Hz contact currents." IEEE Trans Biomed Eng **48**(9): 1020-1026.
- de Bruyn, L. and L. de Jager (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.
- de Vocht, F. and B. Lee (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.
- de Vocht, F. and R. G. Olsen (2016). "Systematic Review of the Exposure Assessment and Epidemiology of High-Frequency Voltage Transients." Front Public Health **4**: 52.
- Dechent, D. and S. Driessen (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., D. B. Thomas, K. A. Rosenblatt, L. M. Jimenez, A. McTiernan, H. Stalsberg, A. Stemhagen, W. D. Thompson, M. G. Curnen, W. Satariano and et al. (1991). "Occupational exposure to electromagnetic fields and breast cancer in men." Am J Epidemiol **134**(4): 340-347.
- Devine-Wright, H. and P. Devine-Wright (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.
- Devine-Wright, P. (2008). Reconsidering public acceptance of renewable energy technologies: a critical review. Delivering a Low Carbon Electricity System: Technologies, Economics and Policy. M. Grubb, J. T. and M. G. Pollitt. Cambridge, Cambridge University Press: 443-461.



- Devine-Wright, P. (2009). "Rethinking NIMBYism: The role of place attachment and place identity in explaining place-protective action." *19*(6): 426-441.
- 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., H. Devine-Wright and F. Sherry-Brennan (2010). "Visible technologies, invisible organisations: An empirical study of public beliefs about electricity supply networks." *Energy Policy* **38**(8): 4127 - 4134.
- Devine-Wright, P. and Y. Howes (2010). "Disruption to place attachment and the protection of restorative environments: A wind energy case study." *Journal of Environmental Psychology* **30**(3): 271-280.
- Di Lazzaro, V., F. Capone, F. Apollonio, P. A. Borea, R. Cadossi, L. Fassina, C. Grassi, M. Liberti, A. Paffi, M. Parazzini, K. Varani and P. Ravazzani (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.
- Dimitrova, S., I. Stoilova, T. Yanev and I. Cholakov (2004). "Effect of local and global geomagnetic activity on human cardiovascular homeostasis." *Arch Environ Health* **59**(2): 84-90.
- Does, M., G. Scelo, C. Metayer, S. Selvin, R. Kavet and P. Buffler (2011). "Exposure to electrical contact currents and the risk of childhood leukemia." *Radiat Res* **175**(3): 390-396.
- Domotor, Z., B. K. Doering and F. Koteles (2016). "Dispositional aspects of body focus and idiopathic environmental intolerance attributed to electromagnetic fields (IEI-EMF)." *Scand J Psychol* **57**(2): 136-143.
- Draper, G., T. Vincent, M. E. Kroll and J. Swanson (2005). "Childhood cancer in relation to distance from high voltage power lines in England and Wales: a case-control study." *Bmj* **330**(7503): 1290.
- Duan, W., C. Liu, L. Zhang, M. He, S. Xu, C. Chen, H. Pi, P. Gao, Y. Zhang, M. Zhong, Z. Yu and Z. Zhou (2015). "Comparison of the genotoxic effects induced by 50 Hz extremely low-frequency electromagnetic fields and 1800 MHz radiofrequency electromagnetic fields in GC-2 cells." *Radiat Res* **183**(3): 305-314.
- Duan, Y., Z. Wang, H. Zhang, Y. He, R. Fan, Y. Cheng, G. Sun and X. Sun (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.
- Dürrenberger, G. (2016). *Kriechströme - Stand des Wissens*. Zürich, FSM - Forschungsstiftung Strom und Mobilkommunikation: 46.
- Dürrenberger, G., A. Bürgi, J. Fröhlich, N. Kuster and M. Rösli (2012). *NIS-Monitoring Schweiz*. Bern, BAFU.
- Dürrenberger, G., J. Fröhlich and P. Leuchtmann (2014). *Wireless Power-Transfer für Elektrofahrzeuge: eine Literaturstudie*. Bern, BAFU.
- Dürrenberger, G., J. Fröhlich, M. Roosli and M. O. Mattsson (2014). "EMF monitoring-concepts, activities, gaps and options." *Int J Environ Res Public Health* **11**(9): 9460-9479.
- Dürrenberger, G. and G. Klaus (2009). *Netzrückwirkungen von Energiesparlampen*. Bern, BFE.
- Eiser, J. R. and J. van der Pligt (1979). "Belief and values in the nuclear debate." *Journal of Applied Social Psychology* **9**(6): 524-536.
- Elliott, P. and M. B. Toledano (2013). "Adult cancers near high-voltage power lines." *Epidemiology* **24**(5): 783-784.
- Elliott, P. and D. Wadley (2012). "Coming to terms with power lines." *International Planning Studies* **17**(2): 179 - 201.
- Elliott, P., D. Wadley and J. H. Han (2016). "Determinants of homeowners' attitudes to the installation of high-voltage overhead transmission lines." *Journal of Environmental Planning and Management* **59**(4): 666-686.
- Elmas, O. (2016). "Effects of electromagnetic field exposure on the heart: a systematic review." *Toxicol Ind Health* **32**(1): 76-82.



- Eltiti, S., D. Wallace, K. Zougkou, R. Russo, S. Joseph, P. Rasor and E. Fox (2007). "Development and evaluation of the electromagnetic hypersensitivity questionnaire." *Bioelectromagnetics* **28**(2): 137-151.
- 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.
- Fang, F., P. Quinlan, W. Ye, M. K. Barber, D. M. Umbach, D. P. Sandler and F. Kamel (2009). "Workplace exposures and the risk of amyotrophic lateral sclerosis." *Environ Health Perspect* **117**(9): 1387-1392.
- Fazzo, L., V. Tancioni, A. Polichetti, I. Iavarone, N. Vanacore, P. Papini, S. Farchi, C. Bruno, R. Pasetto, P. Borgia and P. Comba (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.
- Fear, N. T., E. Roman, L. M. Carpenter, R. Newton and D. Bull (1996). "Cancer in electrical workers: an analysis of cancer registrations in England, 1981-87." *Br J Cancer* **73**(7): 935-939.
- Fedele, G., E. W. Green, E. Rosato and C. P. Kyriacou (2014). "An electromagnetic field disrupts negative geotaxis in *Drosophila* via a CRY-dependent pathway." *Nat Commun* **5**: 4391.
- Feychting, M. and A. Ahlbom (1993). "Magnetic fields and cancer in children residing near Swedish high-voltage power lines." *Am J Epidemiol* **138**(7): 467-481.
- Feychting, M., A. Ahlbom and L. Kheifets (2005). "EMF and health." *Annu Rev Public Health* **26**: 165-189.
- Feychting, M., U. Forssen, L. E. Rutqvist and A. Ahlbom (1998). "Magnetic fields and breast cancer in Swedish adults residing near high-voltage power lines." *Epidemiology* **9**(4): 392-397.
- Finucane, M. L. and J. L. Holup (2006). "Risk as value: Combining affect and analysis in risk judgments." *Journal of Risk Research* **9**(2): 141-164.
- Fiocchi, S., I. Liorni, M. Parazzini and P. Ravazzani (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.
- Fischer, H., L. Kheifets, A. Huss, T. L. Peters, R. Vermeulen, W. Ye, F. Fang, P. Wiebert, X. P. Vergara and M. Feychting (2015). "Occupational Exposure to Electric Shocks and Magnetic Fields and Amyotrophic Lateral Sclerosis in Sweden." *Epidemiology* **26**(6): 824-830.
- Fischer, H. J., X. P. Vergara, M. Yost, M. Silva, D. A. Lombardi and L. Kheifets (2015). "Developing a job-exposure matrix with exposure uncertainty from expert elicitation and data modeling." *J Expo Sci Environ Epidemiol*.
- Floderus, B., C. Stenlund and T. Persson (1999). "Occupational magnetic field exposure and site-specific cancer incidence: a Swedish cohort study." *Cancer Causes Control* **10**(5): 323-332.
- Floderus, B., S. Tornqvist and C. Stenlund (1994). "Incidence of selected cancers in Swedish railway workers, 1961-79." *Cancer Causes Control* **5**(2): 189-194.
- Forssen, U. M., L. E. Rutqvist, A. Ahlbom and M. Feychting (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.
- Frei, P., A. H. Poulsen, G. Mezei, C. Pedersen, L. Cronberg Salem, C. Johansen, M. Roosli and J. Schuz (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.
- Frick, U., A. Kharraz, S. Hauser, R. Wiegand, J. Rehm, U. Kovatsits and P. Eichhammer (2005). "Comparison perception of singular transcranial magnetic stimuli by subjectively electrosensitive subjects and general population controls." *Bioelectromagnetics* **26**(4): 287-298.
- Furby, L., P. Slovic, B. Fischhoff and R. Gregory (1988). "Public perceptions of electric power transmission lines." *Journal of Environmental Psychology* **8**(1): 19-43.
- Gallastegi, M., M. Guxens, A. Jimenez-Zabala, I. Calvente, M. Fernandez, L. Birks, B. Struchen, M. Vrijheid, M. Estarlich, M. F. Fernandez, M. Torrent, F. Ballester, J. J. Aurekoetxea, J. Ibarluzea, D. Guerra, J. Gonzalez, M. Roosli and L. Santa-Marina (2016). "Characterisation of exposure to non-ionising electromagnetic fields in the Spanish INMA birth cohort: study protocol." *BMC Public Health* **16**(1): 167.



- Garcia, A. M., A. Sisternas and S. P. Hoyos (2008). "Occupational exposure to extremely low frequency electric and magnetic fields and Alzheimer disease: a meta-analysis." Int J Epidemiol **37**(2): 329-340.
- George, V., A. Bagaria, P. Singh, S. R. Pampattiwar and S. Periwal (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).
- Golbach, L. A., M. H. Scheer, J. J. Cuppen, H. Savelkoul and B. M. Verburg-van Kemenade (2015). "Low-Frequency Electromagnetic Field Exposure Enhances Extracellular Trap Formation by Human Neutrophils through the NADPH Pathway." J Innate Immun.
- Graham, C., A. Sastre, M. R. Cook, R. Kavet, M. M. Gerkovich and D. W. Riffle (2000). "Exposure to strong ELF magnetic fields does not alter cardiac autonomic control mechanisms." Bioelectromagnetics **21**(6): 413-421.
- Graham, M. (2000). A ubiquitous pollutant. Berkeley, University of California.
- Greaves, M. (2006). "Infection, immune responses and the aetiology of childhood leukaemia." Nat Rev Cancer **6**(3): 193-203.
- Greenland, S., A. R. Sheppard, W. T. Kaune, C. Poole and M. A. Kelsh (2000). "A pooled analysis of magnetic fields, wire codes, and childhood leukemia. Childhood Leukemia-EMF Study Group." Epidemiology **11**(6): 624-634.
- Gregory, R. and D. von Winterfeldt (1996). "The effects of electromagnetic fields from transmission lines on public fears and property values." Journal of Environmental Management **48**(3): 201-214.
- Grellier, J., P. Ravazzani and E. Cardis (2014). "Potential health impacts of residential exposures to extremely low frequency magnetic fields in Europe." Environ Int **62**: 55-63.
- 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.
- Grundy, A., S. A. Harris, P. A. Demers, K. C. Johnson, D. A. Agnew and P. J. Villeneuve (2016). "Occupational exposure to magnetic fields and breast cancer among Canadian men." Cancer Med **5**(3): 586-596.
- Guenel, P., P. Raskmark, J. B. Andersen and E. Lynge (1993). "Incidence of cancer in persons with occupational exposure to electromagnetic fields in Denmark." Br J Ind Med **50**(8): 758-764.
- Guseinoviene, E., J. Dikun, V. Jankunas, A. Senulis and T. C. Akinci (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., P. Slottje, H. Kromhout, A. Huss, J. Ivar Martinsen, T. Kauppinen, S. Uuksulainen, E. Weiderspass, P. Sparen, L. Tryggvadottir, K. Kjaerheim, R. Vermeulen and E. Pukkala (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.
- Hakansson, N., B. Floderus, P. Gustavsson, C. Johansen and J. H. Olsen (2002). "Cancer incidence and magnetic field exposure in industries using resistance welding in Sweden." Occup Environ Med **59**(7): 481-486.
- Halgamuge, M. N. (2013). "Pineal melatonin level disruption in humans due to electromagnetic fields and ICNIRP limits." Radiat Prot Dosimetry **154**(4): 405-416.
- Halgamuge, M. N., C. D. Abeyrathne and P. Mendis (2010). "Measurement and analysis of electromagnetic fields from trams, trains and hybrid cars." Radiat Prot Dosimetry **141**(3): 255-268.
- Hareuveny, R., M. Sudan, M. N. Halgamuge, Y. Yaffe, Y. Tzabari, D. Namir and L. Kheifets (2015). "Characterization of extremely low frequency magnetic fields from diesel, gasoline and hybrid cars under controlled conditions." Int J Environ Res Public Health **12**(2): 1651-1666.
- Hikage, T., T. Nojima and H. Fujimoto (2016). "Active implantable medical device EMI assessment for wireless power transfer operating in LF and HF bands." Phys Med Biol **61**(12): 4522-4536.
- Hillert, L., N. Berglind, B. B. Arnetz and T. Bellander (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.



- 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.
- Huang, J., T. Tang, G. Hu, J. Zheng, Y. Wang, Q. Wang, J. Su, Y. Zou and X. Peng (2013). "Association between exposure to electromagnetic fields from high voltage transmission lines and neurobehavioral function in children." PLoS One **8**(7): e67284.
- Hug, K., L. Grize, A. Seidler, P. Kaatsch and J. Schuz (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.
- Hug, K., R. Rapp and N. Taschner (2009). Niederfrequente Magnetfelder und Krebs. Umwelt-Wissen. Bern, BAFU.
- Hug, K., M. Roosli and R. Rapp (2006). "Magnetic field exposure and neurodegenerative diseases-- recent epidemiological studies." Soz Präventivmed **51**(4): 210-220.
- Hung, C. S., C. Anderson, J. A. Horne and P. McEvoy (2007). "Mobile phone 'talk-mode' signal delays EEG-determined sleep onset." Neurosci Lett **421**(1): 82-86.
- Huss, A., T. Koeman, H. Kromhout and R. Vermeulen (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.
- Huss, A., M. Murbach, I. van Moorselaar, N. Kuster, R. van Strien, H. Kromhout, R. Vermeulen and P. Slottje (2016). "Novel exposure units for at-home personalized testing of electromagnetic sensibility." Bioelectromagnetics **37**(1): 62-68.
- Huss, A., A. Spoerri, M. Egger, H. Kromhout and R. Vermeulen (2014). "Occupational exposure to magnetic fields and electric shocks and risk of ALS: The Swiss National Cohort." Amyotroph Lateral Scler Frontotemporal Degener: 1-6.
- Huss, A., A. Spoerri, M. Egger, H. Kromhout and R. Vermeulen (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.
- Huss, A., A. Spoerri, M. Egger and M. Roosli (2009). "Residence near power lines and mortality from neurodegenerative diseases: longitudinal study of the Swiss population." Am J Epidemiol **169**(2): 167-175.
- Huss, A. and R. Vermeulen (2014). Neurodegenerative Diseases and ELF-EMF. Epidemiology of Electromagnetic Fields – an Application of Environmental Epidemiological Methods. M. Rössli. Boca Raton, CRC Press: 185-201.
- IARC (2002). Non-Ionizing Radiation, Part 1: Static and extremely low-frequency (ELF) electric and magnetic fields. Lyon, IARC.
- ICNIRP (2010). "Guidelines for limiting exposure to time-varying electric and magnetic fields (1 Hz to 100 kHz)." Health Phys **99**(6): 818-836.
- Ilonen, K., A. Markkanen, G. Mezei and J. Juutilainen (2008). "Indoor transformer stations as predictors of residential ELF magnetic field exposure." Bioelectromagnetics **29**(3): 213-218.
- Irnich, W. and M. K. Steen-Mueller (2011). "Pacemaker sensitivity to 50 Hz noise voltages." Europace **13**(9): 1319-1326.
- 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.
- Jirik, V., L. Pekarek, V. Janout and H. Tomaskova (2012). "Association between childhood leukaemia and exposure to power-frequency magnetic fields in Middle Europe." Biomed Environ Sci **25**(5): 597-601.
- Johansen, C. and J. H. Olsen (1998). "Risk of cancer among Danish utility workers--a nationwide cohort study." Am J Epidemiol **147**(6): 548-555.
- Johansen, C., O. Raaschou Nielsen, J. H. Olsen and J. Schuz (2007). "Risk for leukaemia and brain and breast cancer among Danish utility workers: a second follow-up." Occup Environ Med **64**(11): 782-784.
- Johansson, A., S. Nordin, M. Heiden and M. Sandstrom (2010). "Symptoms, personality traits, and stress in people with mobile phone-related symptoms and electromagnetic hypersensitivity." J Psychosom Res **68**(1): 37-45.



- Juutilainen, J. (2005). "Developmental effects of electromagnetic fields." Bioelectromagnetics Suppl 7: S107-115.
- Kabuto, M., H. Nitta, S. Yamamoto, N. Yamaguchi, S. Akiba, Y. Honda, J. Hagihara, K. Isaka, T. Saito, T. Ojima, Y. Nakamura, T. Mizoue, S. Ito, A. Eboshida, S. Yamazaki, S. Sokejima, Y. Kurokawa and O. Kubo (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.
- Karipidis, K. K. (2015). "Survey of residential power-frequency magnetic fields in Melbourne, Australia." Radiat Prot Dosimetry **163**(1): 81-91.
- Karipidis, K. K., G. Benke, M. R. Sim, T. Kauppinen and G. Giles (2007). "Occupational exposure to ionizing and non-ionizing radiation and risk of glioma." Occup Med (Lond) **57**(7): 518-524.
- Kato, I., A. Young, J. Liu, J. Abrams, C. Bock and M. Simon (2015). "Electric Blanket Use and Risk of Thyroid Cancer in the Women's Health Initiative Observational Cohort." Women Health **55**(7): 829-841.
- Katrib, J., M. Nadi, D. Kourtiche, I. Magne, P. Schmitt, M. Souques and P. Roth (2013). "In vitro assessment of the immunity of implantable cardioverter-defibrillators to magnetic fields of 50/60 Hz." Physiol Meas **34**(10): 1281-1292.
- Kaul, G. (2009). Was verursacht "elektromagnetische Hypersensibilität"? Dortmund, Bundesanstalt für Arbeitsschutz und Arbeitsmedizin.
- Kavet, R. (2005). "Contact current hypothesis: summary of results to date." Bioelectromagnetics Suppl 7: S75-85.
- Kavet, R. (2015). "Dosimetric Uncertainties: Magnetic Field Coupling to Peripheral Nerve." Health Phys **109**(6): 556-565.
- Kavet, R., W. H. Bailey, T. D. Bracken and R. M. Patterson (2008). "Recent advances in research relevant to electric and magnetic field exposure guidelines." Bioelectromagnetics **29**(7): 499-526.
- Kavet, R., C. Hooper, P. Buffler and M. Does (2011). "The relationship between residential magnetic fields and contact voltage: a pooled analysis." Radiat Res **176**(6): 807-815.
- Kavet, R. and L. E. Zaffanella (2002). "Contact voltage measured in residences: implications to the association between magnetic fields and childhood leukemia." Bioelectromagnetics **23**(6): 464-474.
- Kavet, R., L. E. Zaffanella, J. P. Daigle and K. L. Ebi (2000). "The possible role of contact current in cancer risk associated with residential magnetic fields." Bioelectromagnetics **21**(7): 538-553.
- Kavet, R., L. E. Zaffanella, R. L. Pearson and J. Dallapiazza (2004). "Association of residential magnetic fields with contact voltage." Bioelectromagnetics **25**(7): 530-536.
- Keegan, T. J., K. J. Bunch, T. J. Vincent, J. C. King, K. A. O'Neill, G. M. Kendall, A. MacCarthy, N. T. Fear and M. F. Murphy (2012). "Case-control study of paternal occupation and childhood leukaemia in Great Britain, 1962-2006." Br J Cancer **107**(9): 1652-1659.
- Kelsh, M. A. and J. D. Sahl (1997). "Mortality among a cohort of electric utility workers, 1960-1991." Am J Ind Med **31**(5): 534-544.
- Kenborg, L., C. F. Lassen, J. Hansen and J. H. Olsen (2012). "Parkinson's disease and other neurodegenerative disorders among welders: a Danish cohort study." Mov Disord **27**(10): 1283-1289.
- Kheifets, L., A. A. Afifi and R. Shimkhada (2006). "Public health impact of extremely low-frequency electromagnetic fields." Environ Health Perspect **114**(10): 1532-1537.
- Kheifets, L., A. Ahlbom, C. M. Crespi, G. Draper, J. Hagihara, R. M. Lowenthal, G. Mezei, S. Oksuzyan, J. Schuz, J. Swanson, A. Tittarelli, M. Vinceti and V. Wunsch Filho (2010). "Pooled analysis of recent studies on magnetic fields and childhood leukaemia." Br J Cancer **103**(7): 1128-1135.
- Kheifets, L., A. Ahlbom, C. M. Crespi, M. Feychting, C. Johansen, J. Monroe, M. F. Murphy, S. Oksuzyan, S. Preston-Martin, E. Roman, T. Saito, D. Savitz, J. Schuz, J. Simpson, J. Swanson, T. Tynes, P. Verkasalo and G. Mezei (2010). "A pooled analysis of extremely low-frequency magnetic fields and childhood brain tumors." Am J Epidemiol **172**(7): 752-761.
- Kheifets, L., A. Ahlbom, C. Johansen, M. Feychting, J. Sahl and D. Savitz (2007). "Extremely low-frequency magnetic fields and heart disease." Scand J Work Environ Health **33**(1): 5-12.



- Kheifets, L., M. Feychting and J. Schuz (2005). "Childhood cancer and power lines: results depend on chosen control group." *Bmj* **331**(7517): 635; discussion 636; author reply 636-637.
- Kheifets, L., J. Monroe, X. Vergara, G. Mezei and A. A. Afifi (2008). "Occupational electromagnetic fields and leukemia and brain cancer: an update to two meta-analyses." *J Occup Environ Med* **50**(6): 677-688.
- Kheifets, L., D. Renew, G. Sias and J. Swanson (2010). "Extremely low frequency electric fields and cancer: assessing the evidence." *Bioelectromagnetics* **31**(2): 89-101.
- Kim, D. W., J. L. Choi, K. C. Nam, D. I. Yang and M. K. Kwon (2012). "Origins of electromagnetic hypersensitivity to 60 Hz magnetic fields: A provocation study." *Bioelectromagnetics* **33**(4): 326-333.
- Kim, H. S., B. J. Park, H. J. Jang, N. S. Ipper, S. H. Kim, Y. J. Kim, S. H. Jeon, K. S. Lee, S. K. Lee, N. Kim, Y. J. Ju, Y. M. Gimm and Y. W. Kim (2014). "Continuous exposure to 60 Hz magnetic fields induces duration- and dose-dependent apoptosis of testicular germ cells." *Bioelectromagnetics* **35**(2): 100-107.
- Kim, S. K., J. L. Choi, M. K. Kwon, J. Y. Choi and D. W. Kim (2013). "Effects of 60 Hz magnetic fields on teenagers and adults." *Environ Health* **12**: 42.
- Kim, Y., M. Kim and W. Kim (2013). "Effect of the Fukushima nuclear disaster on global public acceptance of nuclear energy." *Energy Policy* **61**: 822-828.
- 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.
- Klatt, M., J. Meyer and P. Schegner (2014). Comparison of measurement methods for the frequency range of 2 kHz to 150 kHz. 2014 IEEE 16th International Conference on Harmonics and Quality of Power (ICHQP).
- Klaus, G. (2013). Literaturrecherche zu den Emissionen von nichtionisierender Strahlung von Photovoltaikanlagen. Bern, BAFU.
- Knudsen, J. K., L. C. Wold, Ø. Aas, J. J. Kielland Haug, S. Batel, P. Devine-Wright, M. Qvenild and G. B. Jacobsen (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.
- Koeman, T., L. J. Schouten, P. A. van den Brandt, P. Slottje, A. Huss, S. Peters, H. Kromhout and R. Vermeulen (2015). "Occupational exposures and risk of dementia-related mortality in the prospective Netherlands Cohort Study." *Am J Ind Med* **58**(6): 625-635.
- Koeman, T., P. Slottje, H. Kromhout, L. J. Schouten, R. A. Goldbohm, P. A. van den Brandt and R. Vermeulen (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.
- Koeman, T., P. A. van den Brandt, P. Slottje, L. J. Schouten, R. A. Goldbohm, H. Kromhout and R. Vermeulen (2014). "Occupational extremely low-frequency magnetic field exposure and selected cancer outcomes in a prospective Dutch cohort." *Cancer Causes Control* **25**(2): 203-214.
- Kokate, P., A. Mishra, S. Lokhande and G. Bodhe (2016). "Extremely Low Frequency Electromagnetic Field (ELF-EMF) and childhood leukemia near transmission lines: a review." *Advanced Electromagnetics* **5**(1): 30-40.
- Korpinen, L., H. Kuisti, H. Tarao, V. Virtanen, R. Paakkonen, T. Dovan and R. Kavet (2016). "Possible Influences of Spark Discharges on Cardiac Pacemakers." *Health Phys* **110**(1): 1-10.
- Korpinen, L., R. Pääkkönen, F. Gobba and V. Virtanen (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. and C. G. Y. Lau (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.
- Koteles, F., R. Szemerszky, M. Gubanyi, J. Kormendi, C. Szekrenyesi, R. Lloyd, L. Molnar, O. Drozdovszky and G. Bardos (2013). "Idiopathic environmental intolerance attributed to electromagnetic fields (IEI-EMF) and electrosensitivity (ES) - are they connected?" *Int J Hyg Environ Health* **216**(3): 362-370.



- Kottou, S., D. Nikolopoulos, P. H. Yannakopoulos, E. Vogliannis, E. Petraki, D. Panagiotaras and D. Koulougliotis (2015). "Preliminary background indoor EMF measurements in Greece." Phys Med **31**(7): 808-816.
- Kroll, M. E., C. A. Stiller, M. F. Murphy and L. M. Carpenter (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.
- Kroll, M. E., J. Swanson, T. J. Vincent and G. J. Draper (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.
- Lahijani, M. S., M. R. Bigdeli and S. Kalantary (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.
- Lahijani, M. S., D. M. Tehrani and F. Varzideh (2013). "Effects of the ELF-MFs on the development of spleens of preincubated chicken embryos." Electromagn Biol Med **32**(3): 301-314.
- Landgrebe, M., W. Barta, K. Rosengarth, U. Frick, S. Hauser, B. Langguth, R. Rutschmann, M. W. Greenlee, G. Hajak and P. Eichhammer (2008). "Neuronal correlates of symptom formation in functional somatic syndromes: a fMRI study." Neuroimage **41**(4): 1336-1344.
- Landgrebe, M., U. Frick, S. Hauser, B. Langguth, R. Rosner, G. Hajak and P. Eichhammer (2008). "Cognitive and neurobiological alterations in electromagnetic hypersensitive patients: results of a case-control study." Psychol Med **38**(12): 1781-1791.
- Larsson, E. O. A., M. H. J. Bollen, M. G. Wahlberg, C. M. Lundmark and S. K. Ronnberg (2010). "Measurements of High-Frequency (2-150 kHz) Distortion in Low-Voltage Networks." IEEE Transactions on Power Delivery **25**(3): 1749-1757.
- Lee, G. M., R. R. Neutra, L. Hristova, M. Yost and R. A. Hiatt (2002). "A nested case-control study of residential and personal magnetic field measures and miscarriages." Epidemiology **13**(1): 21-31.
- Lee, S. K., S. Park, Y. M. Gimm and Y. W. Kim (2014). "Extremely low frequency magnetic fields induce spermatogenic germ cell apoptosis: possible mechanism." Biomed Res Int **2014**: 567183.
- Legros, A., M. Corbacio, A. Beuter, J. Modolo, D. Goulet, F. S. Prato and A. W. Thomas (2012). "Neurophysiological and behavioral effects of a 60 Hz, 1,800 μ T magnetic field in humans." Eur J Appl Physiol **112**(5): 1751-1762.
- Legros, A., J. Modolo, S. Brown, J. Roberston and A. W. Thomas (2015). "Effects of a 60 Hz Magnetic Field Exposure Up to 3000 μ T on Human Brain Activation as Measured by Functional Magnetic Resonance Imaging." PLoS One **10**(7): e0132024.
- Leitgeb, N. (2015a). "Reply to comment of Sage et al. on SCENIHR's opinion on potential health effects of exposure to electromagnetic fields." Bioelectromagnetics.
- Leitgeb, N. (2015b). "Synoptic Analysis Clarifies Childhood Leukemia Risk from EKF Magnetic Field Exposure." Journal of Electromagnetic Analysis and Applications **7**: 14.
- Leitgeb, N., R. Cech and J. Schrottner (2008b). "Assessment of inhomogeneous ELF magnetic field exposures." Radiat Prot Dosimetry **131**(2): 251-258.
- Leitgeb, N., R. Cech, J. Schrottner, P. Lehofer, U. Schmidpeter and M. Rampetsreiter (2008a). "Magnetic emissions of electric appliances." Int J Hyg Environ Health **211**(1-2): 69-73.
- Leitgeb, N., F. Niedermayr and C. Fuchs (2012). "Impact of a Radio Frequency Electronic Article Surveillance (EAS) System on Active Implants."
- Leitgeb, N., F. Niedermayr and G. Loos (2013). "Impact of EAS Systems on Implanted Cardiac Pacemakers and Defibrillators." Journal of Electromagnetic Analysis and Applications **5**(2): 67.
- Leitgeb, N. and J. Schrottner (2003). "Electrosensibility and electromagnetic hypersensitivity." Bioelectromagnetics **24**(6): 387-394.
- Leitgeb, N., J. Schrottner and R. Cech (2007). "Perception of ELF electromagnetic fields: excitation thresholds and inter-individual variability." Health Phys **92**(6): 591-595.
- Levallois, P., R. Neutra, G. Lee and L. Hristova (2002). "Study of self-reported hypersensitivity to electromagnetic fields in California." Environ Health Perspect **110 Suppl 4**: 619-623.
- Lewis, R. C., K. R. Evenson, D. A. Savitz and J. D. Meeker (2015). "Temporal variability of daily personal magnetic field exposure metrics in pregnant women." J Expo Sci Environ Epidemiol **25**(1): 58-64.



- Lewis, R. C., R. Hauser, A. D. Maynard, R. L. Neitzel, L. Wang, R. Kavet and J. D. Meeker (2016). "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.
- Lewis, R. C., R. Hauser, A. D. Maynard, R. L. Neitzel, L. Wang, R. Kavet, P. Morey, J. B. Ford and J. D. Meeker (2015). "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.
- Li, D. K., H. Chen and R. Odouli (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.
- Li, D. K., J. R. Ferber, R. Odouli and C. P. Quesenberry, Jr. (2012). "A prospective study of in-utero exposure to magnetic fields and the risk of childhood obesity." Sci Rep **2**: 540.
- Li, D. K., R. Odouli, S. Wi, T. Janevic, I. Golditch, T. D. Bracken, R. Senior, R. Rankin and R. Iriye (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., B. Yan, Z. Li, E. Gao, M. Miao, D. Gong, X. Weng, J. R. Ferber and W. Yuan (2010). "Exposure to magnetic fields and the risk of poor sperm quality." Reprod Toxicol **29**(1): 86-92.
- Li, L., D. F. Xiong, J. W. Liu, Z. X. Li, G. C. Zeng and H. L. Li (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.
- Li, P., J. McLaughlin and C. Infante-Rivard (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.
- Li, W., R. M. Ray, D. B. Thomas, M. Yost, S. Davis, N. Breslow, D. L. Gao, E. D. Fitzgibbons, J. E. Camp, E. Wong, K. J. Wernli and H. Checkoway (2013). "Occupational exposure to magnetic fields and breast cancer among women textile workers in Shanghai, China." Am J Epidemiol **178**(7): 1038-1045.
- Lienert, P., B. Suetterlin and M. Siegrist (2015). The acceptance of the modification and expansion of high-voltage power lines in the context of the energy transition. Manuscript submitted for publication.
- Lilien, J. L., P. Dular, R. V. Sabariego, I. Beauvois, P. P. Barbier and R. Lorphèvre (2009). Effects of Extremely Low Frequency Electromagnetic Fields on Human Beings. International Colloquium Power Frequency Electromagnetic Fields. Sarajevo.
- Liorini, I., M. Parazzini, S. Fiocchi, M. Douglas, M. Capstick, N. Kuster and P. Ravazzani (2015). "COMPUTATIONAL ASSESSMENT OF PREGNANT WOMAN MODELS EXPOSED TO UNIFORM ELF-MAGNETIC FIELDS: COMPLIANCE WITH THE EUROPEAN CURRENT EXPOSURE REGULATIONS FOR THE GENERAL PUBLIC AND OCCUPATIONAL EXPOSURES AT 50 Hz." Radiat Prot Dosimetry.
- Liu, H., G. Chen, Y. Pan, Z. Chen, W. Jin, C. Sun, C. Chen, X. Dong, K. Chen, Z. Xu, S. Zhang and Y. Yu (2014). "Occupational electromagnetic field exposures associated with sleep quality: a cross-sectional study." PLoS One **9**(10): e110825.
- Liu, T. X., H. D. Lang and C. D. Sarris (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., L. Zhao, D. Yu, S. Ma and X. Liu (2013). "Effects of extremely low frequency electromagnetic field on the health of workers in automotive industry." Electromagn Biol Med **32**(4): 551-559.
- Loewenstein, G. F., E. U. Weber, C. K. Hsee and N. Welch (2001). "Risk as feelings." Psychological Bulletin **127**(2): 267-286.
- Lonne-Rahm, S., B. Andersson, L. Melin, M. Schultzberg, B. Arnetz and M. Berg (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.



- Lowenthal, R. M., D. M. Tuck and I. C. Bray (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.
- Luszcz, J. (2011). Modeling of common mode currents induced by motor cable in converter fed AC motor drives. 2011 IEEE International Symposium on Electromagnetic Compatibility (EMC).
- MacGregor, D. G., P. Slovic and M. G. Morgan (1994). "Perception of risks from electromagnetic fields: a psychometric evaluation of a risk-communication approach." *Risk Anal* **14**(5): 815-828.
- Maestu, C., M. Blanco, A. Nevado, J. Romero, P. Rodriguez-Rubio, J. Galindo, J. Bautista Lorite, F. de las Morenas and P. Fernandez-Arguelles (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.
- Magne, I., L. Korpinen and M. Souques (2014). Cardiac pacemakers and electromagnetic fields : Comparison of experimental results in France and Finland. Electromagnetic Compatibility (EMC Europe), 2014 International Symposium on.
- Magne, J., M. Souques and M. Bedja (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.
- Mahram, M. and M. Ghazavi (2013). "The effect of extremely low frequency electromagnetic fields on pregnancy and fetal growth, and development." *Arch Iran Med* **16**(4): 221-224.
- Malagoli, C., C. M. Crespi, R. Rodolfi, C. Signorelli, M. Poli, P. Zanichelli, S. Fabbi, S. Teggi, L. Garavelli, G. Astolfi, E. Calzolari, C. Lucenti and M. Vinceti (2012). "Maternal exposure to magnetic fields from high-voltage power lines and the risk of birth defects." *Bioelectromagnetics* **33**(5): 405-409.
- Malagoli, C., S. Fabbi, S. Teggi, M. Calzari, M. Poli, E. Ballotti, B. Notari, M. Bruni, G. Palazzi, P. Paolucci and M. Vinceti (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.
- Marcilio, I., N. Gouveia, M. L. Pereira Filho and L. Kheifets (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.
- Maslanyj, M., T. Lightfoot, J. Schuz, Z. Sienkiewicz and A. McKinlay (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.
- Maslanyj, M. P., T. J. Mee, D. C. Renew, J. Simpson, P. Ansell, S. G. Allen and E. Roman (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.
- Matanoski, G. M., P. N. Breyse and E. A. Elliott (1991). "Electromagnetic field exposure and male breast cancer." *Lancet* **337**(8743): 737.
- 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. and M. Simko (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.
- McCallum, L. C., M. L. Whitfield Aslund, L. D. Knopper, G. M. Ferguson and C. A. Ollson (2014). "Measuring electromagnetic fields (EMF) around wind turbines in Canada: is there a human health concern?" *Environ Health* **13**(1): 9.
- McCarty, D. E., S. Carrubba, A. L. Chesson, C. Frilot, E. Gonzalez-Toledo and A. A. Marino (2011). "Electromagnetic hypersensitivity: evidence for a novel neurological syndrome." *Int J Neurosci* **121**(12): 670-676.
- McLeod, K. J. (1992). "Microelectrode measurements of low frequency electric field effects in cells and tissues." *Bioelectromagnetics Suppl* **1**: 161-178.
- McNamee, D. A., M. Corbacio, J. K. Weller, S. Brown, F. S. Prato, A. W. Thomas and A. G. Legros (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.



- McNamee, D. A., M. Corbacio, J. K. Weller, S. Brown, R. Z. Stodilka, F. S. Prato, Y. Bureau, A. W. Thomas and A. G. Legros (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.
- McNamee, D. A., A. G. Legros, D. R. Krewski, G. Wisenberg, F. S. Prato and A. W. Thomas (2009). "A literature review: the cardiovascular effects of exposure to extremely low frequency electromagnetic fields." Int Arch Occup Environ Health **82**(8): 919-933.
- Mezei, G., M. Gadallah and L. Kheifets (2008). "Residential magnetic field exposure and childhood brain cancer: a meta-analysis." Epidemiology **19**(3): 424-430.
- Mezei, G., M. Sudan, S. Izraeli and L. Kheifets (2014). "Epidemiology of childhood leukemia in the presence and absence of Down syndrome." Cancer Epidemiol **38**(5): 479-489.
- 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.
- Milham, S. and D. Stetzer (2013). "Dirty electricity, chronic stress, neurotransmitters and disease." Electromagn Biol Med **32**(4): 500-507.
- Minder, C. E. and D. H. Pfluger (2001). "Leukemia, brain tumors, and exposure to extremely low frequency electromagnetic fields in Swiss railway employees." Am J Epidemiol **153**(9): 825-835.
- Mohler, E., P. Frei, C. Braun-Fahrlander, J. Frohlich, G. Neubauer and M. Roosli (2010). "Effects of everyday radiofrequency electromagnetic-field exposure on sleep quality: a cross-sectional study." Radiat Res **174**(3): 347-356.
- Monazzam, M. R., M. Hosseini, L. F. Matin, H. A. Aghaei, H. Khosroabadi and A. Hesami (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.
- Morgan, M. G., H. K. Florig, I. Nair, C. Cortés, K. Marsh and K. Pavlosky (1990). "Lay understanding of low-frequency electric and magnetic fields." Bioelectromagnetics **11**(4): 313-335.
- Morgan, M. G., P. Slovic, I. Nair, D. Geisler, D. G. MacGregor, B. Fischhoff, D. Lincoln and K. Florig (1985). "Powerline frequency electric and magnetic fields: A pilot study of risk perception." Risk Analysis **5**(2): 139-149.
- Moser, A. (2014). Probleme mit Ausgleichsströmen - ZEP. Weiterbildungskurs für Baufachleute.
- Mueller, C. H., H. Krueger and C. Schierz (2002). "Project NEMESIS: perception of a 50 Hz electric and magnetic field at low intensities (laboratory experiment)." Bioelectromagnetics **23**(1): 26-36.
- Mueller, C. H. and C. Schierz (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. Electromagnetic Hypersensitivity, WHO, Geneva. K. H. e. a. Mild.
- Muller, S., J. Meyer and P. Schegner (2014). Characterization of small photovoltaic inverters for harmonic modeling. 2014 IEEE 16th International Conference on Harmonics and Quality of Power (ICHQP).
- Nadakuduti, J., M. Douglas, L. Lu, A. Christ, P. Guckian and N. Kuster (2015). "Compliance Testing Methodology for Wireless Power Transfer Systems." IEEE Transactions on Power Electronics **30**(11): 6264-6273.
- Napp, A., S. Joosten, D. Stunder, C. Knackstedt, M. Zink, B. Bellmann, N. Marx, P. Schauerte and J. Silny (2014). "Electromagnetic interference with implantable cardioverter-defibrillators at power frequency: an in vivo study." Circulation **129**(4): 441-450.
- Napp, A., D. Stunder, M. Maytin, T. Kraus, N. Marx and S. Driessen (2015). "Are patients with cardiac implants protected against electromagnetic interference in daily life and occupational environment?" Eur Heart J **36**(28): 1798-1804.
- Navas-Acien, A., M. Pollan, P. Gustavsson, B. Floderus, N. Plato and M. Dosemeci (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., R. C. Ready, K. Magnussen and O. Bergland (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.



- Nichols, L. and T. Sorahan (2005). "Mortality of UK electricity generation and transmission workers, 1973-2002." Occup Med (Lond) **55**(7): 541-548.
- Nicolaou, C. P., A. Papadakis, P. A. Razis, G. A. Kyriacou and J. N. Sahalos (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. H. a. H. Sercices. Research Triangle Park, NC, NIEHS.
- Nikolopoulos, D., D. Koulougliotis, E. Vogianis, E. Petraki, D. Panagiotaras, P. H. Yannakopoulos and S. Kottou (2015). "Pilot Electromagnetic Field Measurements in Certain Areas in Greece." Journal of Physical Chemistry & Biophysics **5**(2): 1.
- NRPB (2004). Review of the Scientific Evidence for Limiting Exposure to Electromagnetic Fields (0-300 GHz). Chilton, NRPB.
- Olofsson, M. (2013). "EMC requirements in European network codes." Electromagnetic Compatibility Magazine, IEEE **2**(2): 98-100.
- Olsen, J. H., A. Nielsen and G. Schulgen (1993). "Residence near high voltage facilities and risk of cancer in children." Bmj **307**(6909): 891-895.
- Osterberg, K., R. Persson, B. Karlson, F. Carlsson Eek and P. Orbaek (2007). "Personality, mental distress, and subjective health complaints among persons with environmental annoyance." Hum Exp Toxicol **26**(3): 231-241.
- Ozen, S., S. Helhel and H. Carlak (2015). Occupational Exposure Assessment of Power Frequency Magnetic Field in 154/31.5 kV Electric Power Substation in Turkey. PIERS Proceedings.
- Pakonen, P., M. Pikkarainen, B. Siddiqui and P. Verho (2013). Electromagnetic compatibility between electronic loads and automated meter reading systems using PLC. 22nd International Conference and Exhibition on Electricity Distribution (CIRED).
- Park, S. K., M. Ha and H. J. Im (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.
- Parkhill, K., C. Demski, C. Butler, A. Spence and N. Pidgeon (2013). Transforming the UK energy system: Public values, attitudes and acceptability - Synthesis Report. London, UKERC.
- Parlett, L. E., J. D. Bowman and E. van Wijngaarden (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.
- Parodi, S., D. F. Merlo, A. Ranucci, L. Miligi, A. Benvenuti, R. Rondelli, C. Magnani and R. Haupt (2014). "Risk of neuroblastoma, maternal characteristics and perinatal exposures: the SETIL study." Cancer Epidemiol **38**(6): 686-694.
- Pedersen, C., C. Johansen, J. Schuz, J. H. Olsen and O. Raaschou-Nielsen (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.
- Pedersen, C., O. Raaschou-Nielsen, N. H. Rod, P. Frei, A. H. Poulsen, C. Johansen and J. Schuz (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.
- Perlaviciute, G. and L. Steg (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.
- Peters, E. and P. Slovic (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.
- Pidgeon, N. and C. C. Demski (2012). "From nuclear to renewable: Energy system transformation and public attitudes." Bulletin of the Atomic Scientists **68**(4): 41-51.
- Pinto, R., M. Bertoluzzo, V. Lopresto, S. Mancini, C. Merla, G. Pede, A. Genovese and G. Buja (2015). Exposure assessment of stray electromagnetic fields generated by a wireless power transfer system. 2015 9th European Conference on Antennas and Propagation (EuCAP).
- Pollan, M., P. Gustavsson and B. Floderus (2001). "Breast cancer, occupation, and exposure to electromagnetic fields among Swedish men." Am J Ind Med **39**(3): 276-285.



- Poortinga, W., P. Cox and N. F. Pidgeon (2008). "The perceived health risks of indoor radon gas and overhead powerlines: A comparative multilevel approach." *Risk Analysis* **28**(1): 235-248.
- Porsius, J. T., L. Claassen, T. Smid, F. Woudenberg, K. J. Petrie and D. R. Timmermans (2015). "Symptom reporting after the introduction of a new high-voltage power line: a prospective field study." *Environ Res* **138**: 112-117.
- Porsius, J. T., L. Claassen, T. Smid, F. Woudenberg and D. R. Timmermans (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.
- Porsius, J. T., L. Claassen, P. E. Weijland and D. R. M. Timmermans (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.
- Porsius, J. T., L. Claassen, F. Woudenberg, T. Smid and D. R. Timmermans (2016). "Nocebo responses to high-voltage power lines: Evidence from a prospective field study." *Sci Total Environ* **543**(Pt A): 432-438.
- Preston-Martin, S., W. Navidi, D. Thomas, P. J. Lee, J. Bowman and J. Pogoda (1996). "Los Angeles study of residential magnetic fields and childhood brain tumors." *Am J Epidemiol* **143**(2): 105-119.
- Radasky, W. A. and R. Hoad (2012). *An overview of the impacts of three high power electromagnetic (HPEM) threats on Smart Grids*. 2012 International Symposium on Electromagnetic Compatibility (EMC EUROPE).
- Ramadan, L. A., A. R. Abd-Allah, H. A. Aly and A. A. Saad-el-Din (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.
- Ramie, J. (2013). "Smart grid EMC standards harmonization." *Electromagnetic Compatibility Magazine, IEEE* **2**(4): 79-82.
- Regel, S. J., S. Negovetic, M. Roosli, V. Berdinas, J. Schuderer, A. Huss, U. Lott, N. Kuster and P. Achermann (2006). "UMTS base station-like exposure, well-being, and cognitive performance." *Environ Health Perspect* **114**(8): 1270-1275.
- Reid, A., D. C. Glass, H. D. Bailey, E. Milne, N. H. de Klerk, P. Downie and L. Fritschi (2011). "Risk of childhood acute lymphoblastic leukaemia following parental occupational exposure to extremely low frequency electromagnetic fields." *Br J Cancer* **105**(9): 1409-1413.
- Reilly, J. P. and A. Hirata (2016). "Low-frequency electrical dosimetry: research agenda of the IEEE International Committee on Electromagnetic Safety." *Phys Med Biol* **61**(12): R138-r149.
- Renn, O., T. Webler and H. Kastenholz (1996). "Procedural and substantive fairness in landfill siting: A Swiss case study." *Risk: Health, Safety & Environment* **7**(2): 145-168.
- Richman, R., A. J. Munroe and Y. Siddiqui (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.
- Roivainen, P., T. Eskelinen, K. Jokela and J. Juutilainen (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.
- Ronkainen, T., R. Vuotoniemi and J. P. Makela (2014). *Radiated interference of high frequency broadband power line communications*. 2014 International Symposium on Electromagnetic Compatibility (EMC Europe).
- Roosli, M., M. Egger, D. Pfluger and C. Minder (2008). "Cardiovascular mortality and exposure to extremely low frequency magnetic fields: a cohort study of Swiss railway workers." *Environ Health* **7**: 35.
- Roosli, M., M. Foerster, K. Roser, A. Schöni, D. Urbinello and B. Struchen (2015). *Stichprobenkonzept für Messungen der nicht-ionisierenden Strahlung mit Exposimetern*. Bern, BAFU.
- Roosli, M., D. Jenni, L. Kheifets and G. Mezei (2011). "Extremely low frequency magnetic field measurements in buildings with transformer stations in Switzerland." *Sci Total Environ* **409**(18): 3364-3369.



- Roosli, M., M. Lortscher, M. Egger, D. Pfluger, N. Schreier, E. Lortscher, P. Locher, A. Spoerri and C. Minder (2007). "Leukaemia, brain tumours and exposure to extremely low frequency magnetic fields: cohort study of Swiss railway employees." Occup Environ Med **64**(8): 553-559.
- Roosli, M., M. Lortscher, M. Egger, D. Pfluger, N. Schreier, E. Lortscher, P. Locher, A. Spoerri and C. Minder (2007). "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.
- Roosli, M., M. Moser, Y. Baldinini, M. Meier and C. Braun-Fahrlander (2004). "Symptoms of ill health ascribed to electromagnetic field exposure--a questionnaire survey." Int J Hyg Environ Health **207**(2): 141-150.
- Roosli, M., B. Struchen and D. Urbinello (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., J. E. Vena, M. A. Zielezny and A. M. Michalek (1994). "Occupational exposures associated with male breast cancer." Am J Epidemiol **139**(1): 30-36.
- Rubin, G. J., J. Das Munshi and S. Wessely (2005). "Electromagnetic hypersensitivity: a systematic review of provocation studies." Psychosom Med **67**(2): 224-232.
- Rubin, G. J., L. Hillert, R. Nieto-Hernandez, E. van Rongen and G. Oftedal (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.
- Ryan, S. E., C. Hebdon and J. Dafoe (2014). "Energy research and the contributions of the social sciences: A contemporary examination." Energy Research & Social Science **3**(0): 186-197.
- Sage, C., D. Carpenter and L. Hardell (2015). "Comments on SCENIHR: Opinion on potential health effects of exposure to electromagnetic fields, bioelectromagnetics 36:480-484 (2015)." Bioelectromagnetics.
- Saito, T., H. Nitta, O. Kubo, S. Yamamoto, N. Yamaguchi, S. Akiba, Y. Honda, J. Hagihara, K. Isaka, T. Ojima, Y. Nakamura, T. Mizoue, S. Ito, A. Eboshida, S. Yamazaki, S. Sokejima, Y. Kurokawa and M. Kabuto (2010). "Power-frequency magnetic fields and childhood brain tumors: a case-control study in Japan." J Epidemiol **20**(1): 54-61.
- Salvan, A., A. Ranucci, S. Lagorio and C. Magnani (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.
- Santibanez, M., F. Bolumar and A. M. Garcia (2007). "Occupational risk factors in Alzheimer's disease: a review assessing the quality of published epidemiological studies." Occup Environ Med **64**(11): 723-732.
- Sastre, A., M. R. Cook and C. Graham (1998). "Nocturnal exposure to intermittent 60 Hz magnetic fields alters human cardiac rhythm." Bioelectromagnetics **19**(2): 98-106.
- Savitz, D. A. and D. P. Loomis (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., H. Wachtel, F. A. Barnes, E. M. John and J. G. Tvrdik (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). Brussels, European Commission, DG Health and Food Safety, Unit C2.
- Schreier, N., A. Huss and M. Roosli (2006). "The prevalence of symptoms attributed to electromagnetic field exposure: a cross-sectional representative survey in Switzerland." Sozial- und Präventivmedizin **51**(4): 202-209.
- Schreier, N., A. Huss and M. Roosli (2006). "The prevalence of symptoms attributed to electromagnetic field exposure: a cross-sectional representative survey in Switzerland." Soz Praventivmed **51**(4): 202-209.
- Schrottner, J. and N. Leitgeb (2008). "Sensitivity to electricity--temporal changes in Austria." BMC Public Health **8**: 310.



- 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.
- Schuz, J. (2013). "Commentary: power lines and cancer in adults: settling a long-standing debate?" *Epidemiology* **24**(2): 191-192.
- Schuz, J., C. Dasenbrock, P. Ravazzani, M. Roosli, P. Schar, P. L. Bounds, F. Erdmann, A. Borkhardt, C. Cobaleda, M. Fedrowitz, Y. Hamnerius, I. Sanchez-Garcia, R. Seger, K. Schmiegelow, G. Ziegelberger, M. Capstick, M. Manser, M. Muller, C. D. Schmid, D. Schurmann, B. Struchen and N. Kuster (2016). "Extremely low-frequency magnetic fields and risk of childhood leukemia: A risk assessment by the ARIMMORA consortium." *Bioelectromagnetics*.
- Schuz, J., K. Grell, S. Kinsey, M. S. Linet, M. P. Link, G. Mezei, B. H. Pollock, E. Roman, Y. Zhang, M. L. McBride, C. Johansen, C. Spix, J. Hagihara, A. M. Saito, J. Simpson, L. L. Robison, J. D. Dockerty, M. Feychting, L. Kheifets and K. Frederiksen (2012). "Extremely low-frequency magnetic fields and survival from childhood acute lymphoblastic leukemia: an international follow-up study." *Blood Cancer J* **2**: e98.
- Schuz, J., J. P. Grigat, K. Brinkmann and J. Michaelis (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.
- Schuz, J., U. Kaletsch, P. Kaatsch, R. Meinert and J. Michaelis (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.
- Schuz, J., C. Petters, U. T. Egle, B. Jansen, R. Kimbel, S. Letzel, W. Nix, L. G. Schmidt and L. Vollrath (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.
- Schweiz, A. d. W. (2012). *Zukunft Stromversorgung Schweiz*. Bern, Akademien der Wissenschaften Schweiz.
- Seckler, T., D. Stunder, C. Schikowsky, S. Joosten, M. D. Zink, T. Kraus, N. Marx and A. Napp (2016). "Effect of lead position and orientation on electromagnetic interference in patients with bipolar cardiovascular implantable electronic devices." *Europace*.
- Seelen, M., R. C. Vermeulen, L. S. van Dillen, A. J. van der Kooi, A. Huss, M. de Visser, L. H. van den Berg and J. H. Veldink (2014). "Residential exposure to extremely low frequency electromagnetic fields and the risk of ALS." *Neurology* **83**(19): 1767-1769.
- Seidler, A., P. Geller, A. Nienhaus, T. Bernhardt, I. Ruppe, S. Eggert, M. Hietanen, T. Kauppinen and L. Frolich (2007). "Occupational exposure to low frequency magnetic fields and dementia: a case-control study." *Occup Environ Med* **64**(2): 108-114.
- Selmaoui, B., J. Lambrozo, L. Sackett-Lundeen, E. Haus and Y. Touitou (2011). "Acute exposure to 50-Hz magnetic fields increases interleukin-6 in young healthy men." *J Clin Immunol* **31**(6): 1105-1111.
- Sermage-Faure, C., C. Demoury, J. Rudant, S. Goujon-Bellec, A. Guyot-Goubin, F. Deschamps, D. Hemon and J. Clavel (2013). "Childhood leukaemia close to high-voltage power lines--the Geocap study, 2002-2007." *Br J Cancer* **108**(9): 1899-1906.
- Shalamanova, T., M. Israel, M. Ivanova and V. Zaryabova (2015). "Exposure assessment of magnetic field in dwellings with built-in transformers in Bulgaria." *Science* **3**(1): 101-106.
- Shamsi Mahmoudabadi, F., S. Ziaei, M. Firoozabadi and A. Kazemnejad (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.
- Siegrist, M. and G. Cvetkovich (2000). "Perception of hazards: The role of social trust and knowledge." *Risk Analysis* **20**: 713-719.
- Siegrist, M., B. Sütterlin and C. Keller (2014). "Why have some people changed their attitudes toward nuclear power after the accident in Fukushima? ." *Energy Policy* **69**(0): 356-363.
- Siegrist, M. and V. H. M. Visschers (2013). "Acceptance of nuclear power: The Fukushima effect." *Energy Policy* **59**(0): 112-119.
- Slovic, P. (1987). "Perception of risk." *Science* **236**(4799): 280-285.
- Slovic, P. (1993). "Perceived risk, trust and democracy." *Risk Analysis* **13**(6): 675-682.



- Slovic, P., M. L. Finucane, E. Peters and D. G. MacGregor (2004). "Risk as analysis and risk as feelings: Some thoughts about affect, reason, risk, and rationality." *Risk Analysis* **24**: 311-322.
- Sohrabi, M. R., T. Tarjoman, A. Abadi and P. Yavari (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., E. Pouta, M. Salmiovirta, M. Uusitalo and T. Kivinen (2011). "Local residents' perceptions of energy landscape: The case of transmission lines." *Land Use Policy* **28**(1): 294-305.
- Sorahan, T. (2012). "Cancer incidence in UK electricity generation and transmission workers, 1973-2008." *Occup Med (Lond)* **62**(7): 496-505.
- Sorahan, T. (2014). "Magnetic fields and brain tumour risks in UK electricity supply workers." *Occup Med (Lond)* **64**(3): 157-165.
- Sorahan, T. and L. Kheifets (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.
- Sorahan, T. and N. Mohammed (2014). "Neurodegenerative disease and magnetic field exposure in UK electricity supply workers." *Occup Med (Lond)* **64**(6): 454-460.
- Sorahan, T., L. Nichols, M. van Tongeren and J. M. Harrington (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.
- Souques, M., I. Magne and J. Lambrozo (2011). "Implantable cardioverter defibrillator and 50-Hz electric and magnetic fields exposure in the workplace." *Int Arch Occup Environ Health* **84**(1): 1-6.
- 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.
- SSK (2011). Vergleichende Bewertung der Evidenz von Krebsrisiken durch elektromagnetische Felder und Strahlungen. Bonn, SSK.
- SSK (2013). Elektromagnetische Felder neuer Technologien. Bonn, SSK.
- SSM (2013). 8th report from SSM's scientific council on electromagnetic fields. Stockholm, SSM.
- SSM (2015). Recent Research on EMF and Health Risk - Tenth report from SSM's Scientific Council on Electromagnetic Fields, 2015. Stockholm, Swedish Radiation Safety Authority: 95.
- SSM (2016). Recent Research on EMF and Health Risk - Eleventh report from SSM's Scientific Council on Electromagnetic Fields, 2016. Stockholm, Swedish Radiation Safety Authority: 112.
- 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.
- 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.
- Stang, A., G. Anastassiou, W. Ahrens, K. Broman, N. Bornfeld and K. H. Jockel (2001). "The possible role of radiofrequency radiation in the development of uveal melanoma." *Epidemiology* **12**(1): 7-12.
- Stang, A., A. Schmidt-Pokrzywniak, T. L. Lash, P. K. Lommatzsch, G. Taubert, N. Bornfeld and K. H. Jockel (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.
- Stankowski, S., A. Kessi, O. Becheiraz, K. Meier-Engel and M. Meier (2006). "Low frequency magnetic fields induced by car tire magnetization." *Health Phys* **90**(2): 148-153.
- Stenlund, C. and B. Floderus (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., C. Wernli, U. Kreuter and S. Joss (1995). Messung der Belastung der Schweizer Bevölkerung durch 50 Hz Magnetfelder. Villigen, PSI.
- Strazzer, E., M. Mura and D. Contu (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., I. Liorni, M. Parazzini, S. Gängler, P. Ravazzani and M. Roosli (2015). "Analysis of personal and bedroom exposure to ELF-MFs in children in Italy and Switzerland." J Expo Sci Environ Epidemiol.
- Struchen, B., I. Liorni, M. Parazzini, S. Gängler, P. Ravazzani and M. Rössli (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., Y. Fei, X. Wei, J. Guo, X. Jiang, L. Lu and G. Chen (2016). "Associations of parental occupational exposure to extremely low-frequency magnetic fields with childhood leukemia risk." Leuk Lymphoma: 1-8.
- Su, X. J., W. Yuan, H. Tan, X. Y. Liu, D. Li, D. K. Li, G. Y. Huang, L. W. Zhang and M. H. Miao (2014). "Correlation between exposure to magnetic fields and embryonic development in the first trimester." PLoS One **9**(6): e101050.
- Sun, J. W., X. R. Li, H. Y. Gao, J. Y. Yin, Q. Qin, S. F. Nie and S. Wei (2013). "Electromagnetic field exposure and male breast cancer risk: a meta-analysis of 18 studies." Asian Pac J Cancer Prev **14**(1): 523-528.
- Swanson, J., K. J. Bunch, T. J. Vincent and M. F. Murphy (2014). "Childhood cancer and exposure to corona ions from power lines: an epidemiological test." J Radiol Prot **34**(4): 873-889.
- Swissgrid (2015). Bericht zum strategischen Netz 2025. Laufenburg, Swissgrid.
- Szemerszky, R., M. Gubanyi, D. Arvai, Z. Domotor and F. Koteles (2015). "Is There a Connection Between Electrosensitivity and Electrosensibility? A Replication Study." Int J Behav Med **22**(6): 755-763.
- Szemerszky, R., D. Zelena, I. Barna and G. Bardos (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.
- Tabrizi, M. M. and S. A. Bidgoli (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. and S. A. Hosseini (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., M. Guxens, E. Pukkala, A. Huss, H. Kromhout, P. Slottje, J. I. Martinsen, K. Kjaerheim, P. Sparen, E. Weiderpass, L. Tryggvadottir, S. Uuskulainen and R. Vermeulen (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.
- Tarao, H., L. H. Korpinen, H. A. Kuisti, N. Hayashi, J. A. Elovaara and K. Isaka (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.
- Tenorio, B. M., M. B. Ferreira Filho, G. C. Jimenez, R. N. de Moraes, C. A. Peixoto, A. Nogueira Rde and V. A. da Silva Junior (2014). "Extremely low-frequency magnetic fields can impair spermatogenesis recovery after reversible testicular damage induced by heat." Electromagn Biol Med **33**(2): 139-146.
- Therault, G., M. Goldberg, A. B. Miller, B. Armstrong, P. Guenel, J. Deadman, E. Imbernon, T. To, A. Chevalier, D. Cyr and 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. and J. P. Bonde (2006). "Maternal occupational exposure and risk of specific birth defects." Occup Med (Lond) **56**(8): 532-543.
- Tiikkaja, M., T. Alanko, H. Lindholm, M. Hietanen, J. Hartikainen and L. Toivonen (2012). "Experimental study on malfunction of pacemakers due to exposure to different external magnetic fields." J Interv Card Electrophysiol **34**(1): 19-27.
- Tiikkaja, M., A. L. Aro, T. Alanko, H. Lindholm, H. Sistonen, J. E. Hartikainen, L. Toivonen, J. Juutilainen and M. Hietanen (2013). "Electromagnetic interference with cardiac pacemakers and implantable cardioverter-defibrillators from low-frequency electromagnetic fields in vivo." Europace **15**(3): 388-394.



- Tiikkaja, M., A. L. Aro, T. Alanko, H. Lindholm, H. Sistonen, J. E. Hartikainen, L. Toivonen, J. Juutilainen and M. Hietanen (2013). "Testing of common electromagnetic environments for risk of interference with cardiac pacemaker function." *Saf Health Work* **4**(3): 156-159.
- Tomitsch, J. and E. Dechant (2015). "Exposure to electromagnetic fields in households--trends from 2006 to 2012." *Bioelectromagnetics* **36**(1): 77-85.
- Tomitsch, J., E. Dechant and W. Frank (2010). "Survey of electromagnetic field exposure in bedrooms of residences in lower Austria." *Bioelectromagnetics* **31**(3): 200-208.
- Toutou, Y., Y. Djeridane, J. Lambrozo, F. Camus and B. Selmaoui (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.
- Toutou, Y., J. Lambrozo, F. Camus and H. Charbuy (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.
- Toutou, Y. and B. Selmaoui (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.
- Turner, M. C., G. Benke, J. D. Bowman, J. Figuerola, S. Fleming, M. Hours, L. Kincl, D. Krewski, D. McLean, M. E. Parent, L. Richardson, S. Sadetzki, K. Schlaefer, B. Schlehofer, J. Schuz, J. Siemiatycki, M. van Tongeren and E. Cardis (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.
- Tynes, T., A. Andersen and F. Langmark (1992). "Incidence of cancer in Norwegian workers potentially exposed to electromagnetic fields." *Am J Epidemiol* **136**(1): 81-88.
- Tynes, T. and T. Haldorsen (1997). "Electromagnetic fields and cancer in children residing near Norwegian high-voltage power lines." *Am J Epidemiol* **145**(3): 219-226.
- Uddin, S., H. Shareef, A. Mohamed and M. Hannan (2012). *An analysis of harmonics from dimmable LED lamps*. 2012 IEEE International Conference on Power Engineering and Optimization (PEDCO) Melaka, Malaysia, IEEE.
- UKCCS (1999). "Exposure to power-frequency magnetic fields and the risk of childhood cancer. UK Childhood Cancer Study Investigators." *Lancet* **354**(9194): 1925-1931.
- Vajjhala, S. P. and P. S. Fischbeck (2007). "Quantifying siting difficulty: A case study of US transmission line siting." *Energy Policy* **35**(1): 650-671.
- 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.
- van der Mark, M., R. Vermeulen, P. C. Nijssen, W. M. Mulleners, A. M. Sas, T. van Laar, H. Kromhout and A. Huss (2015). "Extremely low-frequency magnetic field exposure, electrical shocks and risk of Parkinson's disease." *Int Arch Occup Environ Health* **88**(2): 227-234.
- van Dongen, D., L. Claassen, T. Smid and D. Timmermans (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.
- Vanderstraeten, J., L. Verschaeve, H. Burda, C. Bouland and C. de Brouwer (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.
- Vassilev, A., A. Ferber, C. Wehrmann, O. Pinaud, M. Schilling and A. R. Ruddle (2015). "Magnetic Field Exposure Assessment in Electric Vehicles." *IEEE Transactions on Electromagnetic Compatibility* **57**(1): 35-43.
- Vedholm, K. (1996). *Personal exposure resulting from low level low frequency electromagnetic fields in automobiles*. PhD, Chalmers University of Technology.
- Vergara, X., L. Kheifets, S. Greenland, S. Oksuzyan, Y. S. Cho and G. Mezei (2013). "Occupational exposure to extremely low-frequency magnetic fields and neurodegenerative disease: a meta-analysis." *J Occup Environ Med* **55**(2): 135-146.
- Verkasalo, P. K., E. Pukkala, M. Y. Hongisto, J. E. Valjus, P. J. Jarvinen, K. V. Heikkilä and M. Koskenvuo (1993). "Risk of cancer in Finnish children living close to power lines." *BMJ* **307**(6909): 895-899.



- Vila, J., J. D. Bowman, L. Richardson, L. Kincl, D. L. Conover, D. McLean, S. Mann, P. Vecchia, M. van Tongeren and E. Cardis (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.
- Villarini, M., L. Dominici, C. Fatigoni, S. Levorato, S. Vannini, S. Monarca and M. Moretti (2015). "Primary DNA damage in welders occupationally exposed to extremely-low-frequency magnetic fields (ELF-MF)." Ann Ig **27**(3): 511-519.
- Villeneuve, P. J., D. A. Agnew, K. C. Johnson and Y. Mao (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.
- Virnich, M. (2012). "Strom auf'm Rohr kommt häufig vor." IKZ-Haustechnik(7): 7.
- Visschers, V. H. M., C. Keller and M. Siegrist (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. and M. Siegrist (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.
- Vulevic, B. and P. Osmokrovic (2011). "Survey of ELF magnetic field levels in households near overhead power lines in Serbia." Radiat Prot Dosimetry **145**(4): 385-388.
- Walker, G. and P. Devine-Wright (2008). "Community renewable energy: What should it mean?" Energy Policy **36**(2): 497-500.
- Wang, Z., Y. Fei, H. Liu, S. Zheng, Z. Ding, W. Jin, Y. Pan, Z. Chen, L. Wang, G. Chen, Z. Xu, Y. Zhu and Y. Yu (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.
- Wang, Z., L. Wang, S. Zheng, Z. Ding, H. Liu, W. Jin, Y. Pan, Z. Chen, Y. Fei, G. Chen, Z. Xu and Y. Yu (2016). "Effects of electromagnetic fields on serum lipids in workers of a power plant." Environ Sci Pollut Res Int **23**(3): 2495-2504.
- Warille, A. A., M. E. Onger, A. P. Turkmen, O. G. Deniz, G. Altun, K. K. Yurt, B. Z. Altunkaynak and S. Kaplan (2016). "Controversies on electromagnetic field exposure and the nervous systems of children." Histol Histopathol **31**(5): 461-468.
- Wenzel, F., J. Reissenweber and E. David (2005). "Cutaneous microcirculation is not altered by a weak 50 Hz magnetic field." Biomed Tech (Berl) **50**(1-2): 14-18.
- WHO (1993). Electromagnetic Fields (300 Hz - 300 GHz). Geneva, WHO.
- WHO (2006). Static Fields. Geneva, WHO.
- WHO (2007). Extremely low frequency fields. Geneva, WHO.
- Wunsch-Filho, V., D. M. Pelissari, F. E. Barbieri, L. Sant'Anna, C. T. de Oliveira, J. F. de Mata, L. G. Tone, M. L. Lee, M. L. de Andrea, P. Bruniera, S. Epelman, V. O. Filho and L. Kheifets (2011). "Exposure to magnetic fields and childhood acute lymphocytic leukemia in Sao Paulo, Brazil." Cancer Epidemiol **35**(6): 534-539.
- Yashima, Y., H. Omori, T. Morizane, N. Kimura and M. Nakaoka (2015). Leakage magnetic field reduction from Wireless Power Transfer system embedding new eddy current-based shielding method. Electrical Drives and Power Electronics (EDPE), 2015 International Conference on.
- Yu, Q. (2014). Applications of flexible AC transmissions system (FACTS) technology in SmartGrid and its EMC impact. 2014 IEEE International Symposium on Electromagnetic Compatibility (EMC).
- Zamanian, Z., S. Gharepoor and M. Dehghani (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.
- Zaryabova, V., T. Shalamanova and M. Israel (2013). "Pilot study of extremely low frequency magnetic fields emitted by transformers in dwellings. Social aspects." Electromagn Biol Med **32**(2): 209-217.
- Zhang, Y., J. Lai, G. Ruan, C. Chen and D. W. Wang (2016). "Meta-analysis of extremely low frequency electromagnetic fields and cancer risk: a pooled analysis of epidemiologic studies." Environ Int **88**: 36-43.



- Zhao, L., X. Liu, C. Wang, K. Yan, X. Lin, S. Li, H. Bao and X. Liu (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.
- Zhou, H., G. Chen, C. Chen, Y. Yu and Z. Xu (2012). "Association between extremely low-frequency electromagnetic fields occupations and amyotrophic lateral sclerosis: a meta-analysis." PLoS One **7**(11): e48354.
- Ztoupis, I. N., I. F. Gonos and I. A. Stathopoulos (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.