



Gesundheitliche Wirkungen von Hybritleitungen

Literaturanalyse zum Stand der Forschung

Datum: 24. 07. 2020

Ort: Zürich

Auftraggeberin:

Ministerium für Umwelt,
Energie, Ernährung und Forsten
Rheinland-Pfalz
Kaiser-Friedrich-Strasse 1
55116 Mainz

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. Jürg Fröhlich, Fields at Work, juerg.froehlich@fieldsatwork.ch
Prof. Dr. Martin Rösli, Swiss TPH, martin.roosli@swisstph.ch

Dank:

Für die kritische Durchsicht von Kapitel 2 sind wir Christian Sören Hedtke und Pascal Bleuler, ETH Zürich, High Voltage Laboratory, dankbar.

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

Zusammenfassung

Der vorliegende Bericht stellt den Stand des Wissens zu gesundheitlichen Effekten von Hochspannungsleitungen (HSL) zusammen, wobei Hybridleitungen speziell beachtet werden. Es werden alle von HSL verursachten Expositionen behandelt, also magnetische Felder, elektrische Felder, Lärm, Ionenströme, Aerosole und Luftschadstoffe. Die mit Abstand am meisten untersuchte Exposition ist die gegenüber niederfrequenten Magnetfeldern, wie sie HDÜ-Leitungen (HDÜ – Hochspannungsdrehstromübertragung) verursachen. Vergleichsweise wenig Studien liegen zu Expositionen von HGÜ-Leitungen vor (HGÜ – Hochspannungsgleichstromübertragung) und generell zu elektrischen Feldern von HSL. Auch gibt es kaum epidemiologische Daten zu den Lärmemissionen und zu den Expositionen gegenüber Ionenströmen, Aerosolen und Luftschadstoffen. Hybridlösungen kombinieren alle bekannten Expositionen von HSL, insbesondere die elektromagnetischen Felder und die Lärmemissionen von Wechselstrom- (AC-) und Gleichstrom- (DC-) Leitungen.

Vor dem Hintergrund von zukünftig neu auftretenden AC/DC-Ko-Expositionen lassen sich aus der Literatur folgende Schlussfolgerungen ziehen:

- Hybridleitungen generieren keine grundsätzlich neuen Magnetfeldexpositionen. Das durch das DC-System verursachte statische Magnetfeld beträgt selbst unterhalb der Seile kaum mehr als das Erdmagnetfeld und ist nach aktuellem Stand des Wissens gesundheitlich unproblematisch.
- Die AC-Magnetfelder einer Hybridleitung können am Boden höhere Feldstärken aufweisen als übliche Drehstrom-Doppelsysteme, die ein grösseres Optimierungspotenzial besitzen. Durch geschickte Leiteranordnung und kompakte Mastgeometrie kann aber die AC-Feldstärke so weit reduziert werden, dass eine aus einer Konversion entstandene Hybridleitung bei insgesamt mehr Kapazität keine höhere 50 Hz-Magnetfeldexposition verursacht als die (ursprüngliche) HDÜ-Leitung.
- Chronische Expositionen gegenüber elektrischen Feldern auf tiefem Niveau sind nach aktuellem Stand des Wissens gesundheitlich unproblematisch.
- Chronische Expositionen gegenüber magnetischen Feldern auf tiefem Niveau sind nach aktuellem Stand des Wissens bei DC unproblematisch. Bei AC gibt es Verdachtsmomente hinsichtlich einzelner gesundheitlicher Endpunkte:
 - Ungelöst ist die Frage, ob es einen kausalen Zusammenhang zwischen HDÜ-Magnetfeldexposition und kindlicher Leukämie gibt. Aus Tier- und Zellstudien konnte kein Wirkungsmechanismus konsistent nachgewiesen werden.
 - Auch die Frage, ob AC-Magnetfelder das Risiko für Alzheimer und ALS (Amyotrophe Lateralsklerose) erhöhen oder nicht, kennt gegenwärtig keine endgültige Antwort. Falls es ein Risiko gibt, ist es bei Alltagsexpositionen mit einiger Sicherheit klein.
- Die Ionenströme von DC-Leitungen sind beachtlich. Sie erhöhen die elektrische Feldstärke am Boden und damit die Wahrnehmbarkeit der Felder. Die Datenlage über individuelle Sensitivitäten ist jedoch zu dünn, um Schlussfolgerungen für die Dimensionierung von HGÜ- oder Hybridleitungen ziehen zu können.
- Dasselbe gilt für die Wahrnehmbarkeit von elektrischen Feldern bei Ko-Exposition AC/DC. Es sind nur wenige Daten verfügbar. Diese weisen darauf hin, dass die Sensitivität bezüglich der Wahrnehmung von elektrischen Feldern zunimmt.
- Es ist unwahrscheinlich, dass Koronaionen einen Einfluss auf die Gesundheit von Anwohnern von HSL haben. Die Aufladung von (problematischen) Aerosolteilchen ist biologisch unbedeutend. Von ihnen gehen gemäss dem momentanen Stand des Wissens keine Risiken für Atemwegserkrankungen aus.
- Dasselbe gilt für die durch die Koronaaktivität produzierten Luftschadstoffe. Sie erhöhen die Hintergrundkonzentrationen dieser Stoffe am Boden um einige wenige Prozent.
- Die Lärmemissionen sind aus Belästigungs- und gesundheitlicher Sicht wahrscheinlich am problematischsten und bei Hybridleitungen besonders zu beachten. Weil die Belastungen von DC-Lärm bei gutem Wetter höher sind als bei schlechtem und es bei AC genau umgekehrt ist, kann ein AC/DC-

Korridor mehr Lärm (in Jahresstunden) verursachen als ein HDÜ-Korridor. Findet eine Leitungskonversion HDÜ zu Hybrid statt, so haben Anwohner mit mehr Lärm zu rechnen, was die Akzeptanz eines solchen Projekts verschlechtern dürfte. Anekdotische Berichte und Daten zu Verkehrslärm lassen vermuten, dass das Störpotenzial relativ gross ist. Ob damit auch Schlafprobleme oder gesundheitliche Wirkungen verbunden sind, wurde bisher nicht untersucht. Hier wären experimentelle Studien zur Stresswirkung des HSL-Lärms sinnvoll, sowie epidemiologische Studien die für Lärm relevante Gesundheitseffekte auf das Herz-Kreislaufsystem, den Stoffwechsel und die Psyche untersuchen. Solche Daten liegen noch nicht vor.

Inhaltsverzeichnis

Zusammenfassung	3
Inhaltsverzeichnis	5
1. Ziel, Vorgehen, Berichtsaufbau	8
1.1 Ziel.....	8
1.2 Literatursauswahl und Abgrenzung.....	8
1.3 Aufbau des Berichts	8
1.4 Einführung in gesundheitliche Effekte von HSL	9
2. Expositionen	10
2.1 Expositionskonzepte	10
2.1.1 Emission und Immission.....	10
2.1.2 Persönliche Exposition und Dosis	10
2.1.3 Messung und Modellierung.....	10
2.2 Expositionen gegenüber EMF.....	11
2.2.1 Allgemein und Grenzwerte.....	12
2.2.2 Magnetfeldexpositionen.....	13
2.2.3 Wahrnehmung von Magnetfeldern.....	15
2.2.4 Expositionen gegenüber elektrischen Feldern	15
2.2.5 Wahrnehmung von elektrischen Feldern.....	15
2.2.6 Expositionen gegenüber EMF von Hybridleitungen.....	16
2.2.7 Feldwahrnehmung bei Hybridleitungen	17
2.3 Koronaverursachte Expositionen	17
2.3.1 Physikalischer Hintergrund	17
2.3.2 Ionenströme.....	19
2.3.3 Lärm	20
2.3.4 Aerosole und Luftschadstoffe.....	22
3. Elektromagnetische Felder und Gesundheit	25
3.1 Vorbemerkungen	25
3.1.1 Gesundheitliche Bedeutung von magnetischen Feldern	25
3.1.2 Gesundheitliche Bedeutung von elektrischen Feldern.....	27
3.1.3 Struktur des Kapitels	28
3.2 Krebs.....	30
3.2.1 Kindliche Leukämie.....	30
3.2.2 Andere Krebsarten	35
3.2.3 Hinweise von elektrischen AC-Feldern und DC-Expositionen	37
3.2.4 Fazit.....	39
3.3 Neurodegenerative Erkrankungen	42
3.3.1 Ausgangslage	42

3.3.2	Alzheimer	42
3.3.3	ALS	43
3.3.4	Andere neurodegenerative Erkrankungen	43
3.3.5	Hinweise von elektrischen AC-Feldern und DC-Expositionen	44
3.3.6	Fazit	44
3.4	Fruchtbarkeit, Schwangerschaft, Geburt	46
3.4.1	Männliche Fruchtbarkeit	46
3.4.2	Schwangerschaft/Entwicklung und Geburt	47
3.4.3	Hinweise von elektrischen AC-Feldern und DC-Expositionen	49
3.4.4	Fazit	50
3.5	Elektromagnetische Sensibilität	51
3.5.1	Allgemein	51
3.5.2	Epidemiologische Studien	52
3.5.3	Experimentelle Studien	53
3.5.4	Hinweise von elektrischen AC-Feldern und DC-Expositionen	56
3.5.5	Fazit	57
3.6	Andere Wirkungen	58
3.6.1	Elektrophysiologie	58
3.6.2	Kognition	60
3.6.3	Herz-Kreislaufsystem	61
3.6.4	Hormonsystem	62
3.6.5	Weitere Endpunkte	64
3.6.6	Hinweise von elektrischen AC-Feldern und DC-Expositionen	66
3.6.7	Fazit	67
4.	Koronaeffekte und Gesundheit	70
4.1	Lärmbedingte Erkrankungen	70
4.2	Atemwegserkrankungen	71
4.3	Fazit	73
5.	Schlussfolgerungen	74
6.	Anhang berufliche EMF-Exposition	77
6.1	Krebs	77
6.1.1	Leukämien und Lymphome	77
6.1.2	Hirntumore	78
6.1.3	Brustkrebs	79
6.1.4	Andere Tumore	79
6.1.5	Hinweise von AC elektrischen Feldern und DC-Expositionen	80
6.1.6	Fazit	81
6.2	Neurodegenerative Erkrankungen	81
6.2.1	Alzheimer	81
6.2.2	ALS	83

6.2.3	Andere neurodegenerative Erkrankungen	85
6.2.4	Hinweise von elektrischen AC-Feldern und DC-Expositionen	85
6.2.5	Fazit.....	85
7.	Anhang Forschungsbedarf	87
7.1	Kinderleukämie.....	87
7.2	Neurodegenerative Erkrankungen	87
7.3	Elektromagnetische Sensibilität	88
7.4	Andere Themen	88
	Referenzen	90

1. Ziel, Vorgehen, Berichtsaufbau

1.1 Ziel

In Rheinland-Pfalz ist eine Hochspannungsgleichstromübertragungsanlage auf bestehenden Masten mit Niederfrequenzkabeln geplant. Die Landesregierung Rheinland-Pfalz beauftragte bei der FSM ein unabhängiges Gutachten, in dem der derzeitige Erkenntnisstand bzgl. der gesundheitlichen Wirkungen von Hybridleitungen zusammengefasst ist und, so vorhanden, noch ungeklärte Gefährdungs- bzw. Belästigungsmöglichkeiten aufgezeigt werden.

1.2 Literatursauswahl und Abgrenzung

Die relevante Literatur wurde aus den folgenden Datenbanken zusammengestellt: EMF-Portal der RWTH in Aachen, Xplore von IEEE, PubMed von NCBI. Basisstichworte, in verschiedenen "und" Kombinationen verwendet, waren: ELF, 50 Hz, 60 Hz, DC, HVDC, AC-DC, powerline, hybrid powerline, magnetic fields, electric fields, biological, health, epidemiology, leukaemia, neurodegenerative, ion current, corona, noise, aerosol, exposure. Über Linklisten in den Datenbanken und Literaturverweise in den (elektronisch erfassten) Artikeln wurden weitere, thematisch relevante Veröffentlichungen identifiziert. Die meisten, aber nicht alle Veröffentlichungen sind fachlich begutachtet worden (peer reviewed). Zu den nicht-begutachteten gehören insbesondere die von mandatierten Expertengremien oder eigens formierten Fachpanels herausgegebenen Review-Berichte.

Der Grossteil der in diesen Bericht aufgenommenen Publikationen sind in den letzten 10 Jahren erschienen. 2019 ist das letzte Jahr, das in die Selektion eingeflossen ist. Wichtige ältere Arbeiten wurden mitberücksichtigt und ausgewählte bisher erschienene Arbeiten aus dem Jahr 2020 wurden ebenfalls miteingeschlossen. Der Grundstock der Literatur bis 2017 wurde im Rahmen eines Monitoring-Auftrags des Schweizerischen Bundesamtes für Energie (BFE) erstellt.

Die Literatursauswahl beschränkt sich auf Humanstudien (Epidemiologie, Laborstudien). Artikel zu Zell-experimenten und Tierstudien (in-vitro und in-vivo Arbeiten) wurden nicht ausgewertet. Wo sinnvoll und informativ, wird aber ergänzend auf entsprechende Befunde hingewiesen.

Beim vorliegenden Bericht handelt es sich nicht um eine streng systematisch durchgeführte und vollständige Literaturanalyse. Vielmehr war es das Ziel, einen Überblick über die wichtigsten publizierten Erkenntnisse zu gesundheitlichen Effekten von niederfrequenter EMF, elektromagnetischen Feldern von Gleichstrom, Lärm, Ionenströmen, Aerosolen und Luftschadstoffen im Zusammenhang mit HSL zusammenzustellen. Das Hauptgewicht liegt auf den jüngeren Arbeiten.

1.3 Aufbau des Berichts

Kapitel 2 widmet sich den Expositionen von HSL (Hochspannungsleitungen), sowohl Wechselstromleitungen (HDÜ – Höchstspannungsdrehstromübertragung), als auch Gleichstromleitungen (HGÜ – Höchstspannungsgleichstromübertragung) und Hybridleitungen – eine Kombination von Wechselstrom (AC) und Gleichstrom (DC) auf demselben Trasse bzw. Mast. Zuerst kommen die elektromagnetischen Emissionen zur Sprache, dann die koronabedingten (Lärm, Ionenströme, Aerosole, Luftschadstoffe). Kapitel 3 behandelt die Literatur zu gesundheitlichen Effekten der EMF-Expositionen, Kapitel 4 der koronabedingten Expositionen. In Kapitel 5 werden die Schlussfolgerungen aus der Literaturreview präsentiert. Im einem Anhang finden sich Befunde zu beruflichen Expositionen (Kapitel 6) und eine kurze Zusammenstellung des Forschungsbedarfs (Kapitel 7).

1.4 Einführung in gesundheitliche Effekte von HSL

Von Hochspannungsleitungen gehen unterschiedliche Emissionen aus, die biologische und gesundheitliche Wirkungen haben können. In diesem einführenden Abschnitt skizzieren wir überblicksartig, welche Expositionen von HSL gesundheitlich wie relevant sind.

Elektromagnetische Felder. Sie werden durch die Leiterspannungen und die Stromflüsse verursacht. Bei HDÜ generiert die AC- bzw. die Wechselspannung elektrische Wechselfelder, der AC- bzw. der Wechselstrom magnetische Wechselfelder. Bei HGÜ lassen die DC- bzw. die Gleichspannung elektrostatische Felder, der DC- bzw. der Gleichstrom statische Magnetfelder entstehen. Bei Hybridleitungen, welche ein AC- und ein DC-System kombinieren, sind alle 4 „Feldarten“ vorhanden. Während Magnetfelder Gegenstände leicht durchdringen, werden elektrische Felder durch leitfähige Materialien abgeschirmt (Faraday Effekt). In der gesundheitsorientierten Forschung gilt die grösste Aufmerksamkeit den Magnetfeldern, weil diese den ganzen Körper, auch die inneren Organe, exponieren, egal ob sich eine Person im Freien oder in einem Gebäude befindet. Dabei werden fast ausschliesslich AC-Magnetfelder studiert. Es gibt Verdachtsmomente, dass diese Felder einzelne Gesundheitsrisiken erhöhen könnten, insbesondere Leukämie bei Kindern und Alzheimererkrankungen. Wissenschaftlich nachgewiesen ist das allerdings nicht. Die DC-Magnetfelder von HGÜs sind kaum stärker als das Erdmagnetfeld und werden deshalb nicht als problematisch angesehen. Alltagsexpositionen gegenüber elektrischen Feldern sind so niedrig, dass sie kaum elektrische Kräfte im Körperinnern induzieren, die biologisch relevant sind. Allerdings können starke elektrische Felder, wie sie etwa unterhalb der Seile oder sehr nahe am Trasse einer HSL auftreten, sinnlich wahrgenommen werden. Die Wahrnehmung beruht auf elektrostatischer Aufladung der Körperhaare, bei geerdetem Körper auch Mikroströme oder Mikroentladungen. Weil Felder von HSL grössere Metallteile, die am oder auf dem Leitungskorridor stehen, aufladen können, entstehen bei Berührung dieser Teile, wenn man geerdet ist, Ableitströme die unangenehm sein können. Aber auch schwache Berührungsströme, die nicht wahrgenommen werden, können u.U. biologisch wirksam sein. Deshalb gilt in der Risikoforschung auch den Ableitströmen – und nicht nur den AC-Magnetfeldern – eine gewisse Aufmerksamkeit (siehe dazu 3.2.1.3).

Bei sehr hohen Oberflächenspannungen an den Seilen entstehen Koronaeffekte. Von Korona spricht man, wenn die Spannung die umgebende Luft ionisiert. Die Häufigkeit und Stärke von Koronaentladungen sind von mehreren Faktoren abhängig: neben der Leiterspannung zählen dazu die Dimensionierung und das Alter der Seile, sowie die äusseren Wetterbedingungen. Durch die Entladung entstehen Ionen, Luftschadstoffe und Lärm (Details in Abschnitt 2.3). Die Ionen können sich an vorhandene Aerosole binden und diese elektrisch aufladen. Verschiedentlich wurde vermutet, dass elektrisch geladene Aerosole leichter vom Körper aufgenommen werden. Vom Wind verfrachtete Aerosole könnten deshalb auch noch vergleichsweise weit von der HSL entfernt (wo beispielsweise die elektromagnetischen Felder kaum mehr messbar sind) gesundheitlich bedeutsam sein. Diese Hypothese hat sich allerdings nicht bestätigt. Die von der Korona gebildeten Luftschadstoffe weisen am Boden eine sehr geringe Konzentration auf und sind gesundheitlich unproblematisch. Relevant sind dagegen die mit den Koronaentladungen verknüpften Lärmemissionen. Der Lärmpegel variiert mit den Wetterverhältnissen. Wichtig ist auch die Tatsache, dass sich die Art des Lärms zwischen AC- und DC-Koronas unterscheidet (siehe 2.3.3). Das ist für Hybridleitungen insofern wichtig, als dort die zwei unterschiedlichen Lärmuster kombiniert auftreten und solche Leitungen mehr Lärm verursachen als HDÜ-Leitungen.

2. Expositionen

2.1 Expositionskonzepte

Die nachfolgend erörterten Expositionskonzepte und Expositionsansätze sind im Detail beschrieben in (Dürrenberger, Fröhlich et al. 2014) oder (Dürrenberger, Leuchtmann et al. 2017).

Der Begriff Exposition kann in einem breiten und in einem engen Sinn verstanden werden. Allgemein bezeichnet er die Menge von Stoffen (auch Strahlung), die von Geräten und Anlagen abgegeben wird (Emission), wie sie sich im Raum verteilt (Immission), denen Menschen konkret ausgesetzt sind (Exposition) oder wie sie sich innerhalb des Körpers manifestiert (Dosis). Exposition im engeren Sinn bezieht sich auf die persönliche Ausgesetztzeit gegenüber gesundheitsrelevanten Stoffen, im Fall von Hochspannungsleitungen: elektromagnetische Felder (EMF - siehe 2.2), Ionenströme, Lärm, Aerosole und Luftschadstoffe (siehe 2.3). Die folgenden konzeptionellen Ausführungen illustrieren wir am Beispiel EMF. Die Begrifflichkeit kann aber auch auf die anderen Belastungen angewendet werden.

2.1.1 Emission und Immission

Als Emission wird die von einer Anlage oder einem Gerät abgegebene elektromagnetische Leistung, peak (Spitzenwert) oder zeitlich gemittelt, verstanden. Bei Hochspannungsleitungen wird unterschieden zwischen magnetischem Feld (H-Feld Emissionen) und elektrischem Feld (E-Feld Emissionen). Weil Emissionen immer quellenbezogen sind, lassen sich daraus meist keine Aussagen zur Immissionslage ableiten (Immissionen setzen sich meist aus vielen Quellen zusammen).

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 mit Immissionskarten visualisiert werden. Meist setzen sich Immissionen aus mehreren Quellen zusammen. Bei EMF dominiert in der Regel die stärkste Quelle das Immissionsniveau.

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). Für ein 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 (Teil des Körpers) wirksamen elektrischen Felder bzw. davon abgeleitete Größen (etwa: Stromdichte) aufgrund der Exposition; 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 beeinflusst. Diese Unsicherheiten sind im EMF-Bereich beträchtlich und die Erfassung (Messung) oder Abschätzung (Modellierung) der „wahren“ Exposition eines Menschen (eines Kollektivs) oder der „wahren“ Immissionen im Raum ist nicht immer leicht. Für gesundheitliche Fragestellungen sind die persönliche Exposition und die Dosis die relevanten Konzepte. Emissionen und Immissionen sind bestenfalls Näherungsgrößen.

2.1.3.1 Messungen

Expositionsmessungen: Als Exposimetrie bezeichnen wir die messtechnische Erfassung der persönlichen Exposition – siehe (Gallastegi, Guxens et al. 2016). Erhoben werden kann die niederfrequente (NF, im Falle von 50/60 Hz auch: ELF – extremely low frequency) Exposition gegenüber Installationen mit portablen Messgeräten. Da der Körper das elektrische Feld beeinflusst, ist die Messung mit einem vergleichsweise grossen Aufwand verbunden. Typischerweise wird deshalb meistens das Magnetfeld gemessen. 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) mit am Körper getragenen Messgeräten – vgl. etwa mit (Hwang, Kwak et al. 2016), (Dürrenberger, Fröhlich et al. 2014).

Dosismessungen: Grundsätzlich können neben den Emissionen, Immissionen, und persönlichen Expositionen auch Dosen messtechnisch erfasst werden. Weil man im Körperinnern die elektrischen Feldstärken (Dosismass im niederfrequenten Bereich siehe Abschnitt 3.1) nicht messen kann, werden für die messtechnische Erfassung von Dosen Phantome verwendet, welche die elektrischen Eigenschaften des Körpers möglichst gut repräsentieren. Verwendet werden dazu Elektrolyten, die nicht zwischen Geweben unterscheiden. Die Aussagekraft bleibt damit eingeschränkt, denn ein homogenes Körpermodell ist nur eine sehr grobe Annäherung an die Anatomie und kann auch keine physiologischen Eigenschaften simulieren.

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 niederfrequenten EMF-Bereich kennt man grossräumige Simulationsrechnungen der zeitlich gemittelten Magnetfeld-Immissionen von Hochspannungsleitungen und von Fahr- und Transportleitungen der Eisenbahn (Bürgi 2011). Häufig werden die Immissionen für eine bestimmte Höhe über Grund gerechnet und in Form von Katasterplänen grafisch dargestellt. Die Variabilität von berechneten Immissionen gegenüber Messwerten liegt im einstelligen %-Bereich.

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 zu persönlichen Expositionen gegenüber Anlagen generiert werden, allerdings sind die Unsicherheiten beträchtlich.

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. Eine neuere Übersicht über den Stand der Wissenschaft gibt eine Ausgabe der Zeitschrift *Physics in Medicine & Biology* (2016, 61, 12) mit über einem Dutzend Artikeln zu Dosismodellierungen im niederfrequenten Bereich.

Speziell erwähnenswert hier ist die Bedeutung der Haut-Modellierung. Werden realitätsnähere Mehrschicht Modelle (statt einem Modell mit einer homogenen Hautschicht) verwendet, so sinken die induzierten elektrischen Feldstärken (Dosismass) um einen Faktor 5 – 10 (Schmid and Hirtl 2016).

2.2 Expositionen gegenüber EMF

Hochspannungsleitungen (HSL) verursachen Immissionen, die zwar gesetzlich geregelt sind, aber trotzdem immer wieder im Zusammenhang mit neuen Trassen oder mit Auf- und Umrüstungen bestehender HSL politisch diskutiert werden. Ein wichtiger Grund dafür ist die Tatsache, dass noch nicht durchwegs

glasklare wissenschaftliche Befunde über denkbare oder befürchtete gesundheitlich Nebeneffekte dieser Immissionen vorliegen. In diesem Abschnitt des Berichts wird auf die elektromagnetischen Immissionen – ihre Quellen und die Grössenordnung von Alltagsbelastungen – eingegangen. Koronaverursachte Immissionen von HSL werden in Abschnitt 2.3 diskutiert.

2.2.1 Allgemein und Grenzwerte

Spannungen verursachen elektrische Felder, Ströme generieren magnetische Felder. Bei Gleichstrom und Gleichspannung (DC – direct current) sind es statische magnetische und statische elektrische Felder, bei Wechselstrom und Wechselspannung (AC – alternating current) sind es magnetische und elektrische Felder von 50 Hz (Europa).

Im englischen Sprachraum liest man oft die Abkürzung ELF (extremely low frequency), die Frequenzen von 1 – 300 Hz einschliesst. Praktisch ist damit meist die Netzfrequenz angesprochen. Wenn in diesem Bericht die Abkürzung ELF verwendet wird, sind die 50 Hz-Felder der HDÜ-Netze gemeint (HDÜ – Höchstspannungs-Drehstrom-Übertragung). Für die Gleichstromübertragung im Höchstspannungsnetz verwendet man die Abkürzung HGÜ (Höchstspannungs-Gleichstrom-Übertragung).

Für alle Arten dieser Felder gilt: je grösser die Spannung und je stärker der Strom, desto höher die entsprechenden Feldstärken. Bei Magnetfeldern wird die Feldstärke in Ampère pro Meter (A/m) angegeben. Fast immer aber quantifiziert man Magnetfeldexpositionen in Tesla (T). Tesla bezeichnet die magnetische Flussdichte und ist mit einem Umrechnungsfaktor aus der Feldstärke ableitbar. 1 T repräsentiert ein sehr starkes Magnetfeld. Im Zusammenhang mit Alltagsexpositionen von HSL geht es um Millionstel eines Tesla, ein sog. Mikrottesla (μT). Tausend Mikrottesla entsprechen einem Millitesla (mT). Elektrische Feldstärken werden in Volt pro Meter (V/m) ausgedrückt. Im Zusammenhang mit HSL misst man nahe beim Trasse Feldstärken in der Region von einem oder mehreren 1000 V/m. 1000 V/m entsprechen einem Kilovolt pro Meter (1 kV/m).

Der Gesetzgeber hat die maximal zulässigen Feldstärken geregelt. Je nach Frequenz gelten andere Limiten, denn die biologischen Wirkungen sind sowohl leistungs- als auch frequenzabhängig (siehe 3.1). Massgebend sind in Europa die Empfehlungen der ICNIRP (Internationale Kommission zum Schutz vor Nicht-Ionisierender Strahlung). Die EU-Ratsempfehlung 1999/5/EG und auch die 26. Verordnung zur Durchführung des Bundes-Immissionsschutzgesetzes (26. BImSchV) in Deutschland basiert auf der ICNIRP-Publikation von 1998 (ICNIRP 1998). Inzwischen liegt eine leicht veränderte Version vor (ICNIRP 2010), die noch nicht systematisch in die nationalen bzw. internationalen Gesetzgebungen und Empfehlungen aufgenommen worden ist. In Deutschland und der EU-Ratsempfehlung sind die Werte der 98er Publikation rechtsverbindlich. Für 50 Hz-Magnetfelder liegt der Grenzwert für die Bevölkerung bei 100 μT (0.1 mT), für 50 Hz elektrische Felder beträgt die maximal zulässige Feldstärke 5 kV/m. In der Publikation von 2010 empfiehlt ICNIRP für 50 Hz-Magnetfelder einen Grenzwert von 200 μT (ICNIRP 2010). Bei den Limiten handelt es sich um den Summenwert aller Phasen am Messpunkt. Je nach Phasenbelegung kann die Immission (Messwert) bei gegebenem Gesamtstromfluss einer HSL variieren. Wenn man von einer worst-case Phasenbelegung und der Ausschöpfung der Limiten ausgeht, sowie die Variabilität des Lastflusses in einem realen Netz berücksichtigt, kann ein Magnetfeld im best-case bis zu einem Faktor 10 unterhalb des Grenzwertes liegen (Nicolaou, Papadakis et al. 2011).

Kombinierte elektrische und magnetische Expositionen werden in der Gesetzgebung nicht berücksichtigt. Deshalb kann man sich die Frage stellen, ob der (Teile des) Körper(s) nicht überexponiert wird (werden), wenn sowohl das elektrische als auch das magnetische Feld den jeweiligen Grenzwert erreicht und die Felder so zusammenwirken, dass die Feldmaxima gleichzeitig (in Phase) und am gleichen Ort auftreten. (Friedl and Schmid 2019) haben das mit realistischen Modellen des Menschen simuliert und konnten Entwarnung geben: die kombinierte Wirkung induziert körperintern elektrische Feldstärken, die auch bei Ausschöpfung der jeweiligen Grenzwerte und unter worst-case Annahmen noch immer unterhalb der kritischen Körperlimiten (sog. Basisgrenzwerte, siehe 3.1) liegen. Das gilt auch, wenn man die Netzverschmutzung (harmonische Frequenzen) mitberücksichtigt.

Für statische Felder ist nur ein Grenzwert für Magnetfeldexposition definiert. Für die Bevölkerung beträgt dieser in Deutschland 500 mT – die ICNIRP empfiehlt 400 mT (ICNIRP 2009), die Empfehlung des Europäischen Rates 1999/5/EG ist 40 mT. In der Guideline von 2014 schreibt die ICNIRP hinsichtlich statischer Magnetfelder und AC-Wechselfeldern bis 1 Hz (ICNIRP 2014), p. 418:

„The guidelines are not expected to be relevant for the general public because all exposures to intense magnetic fields below 1 Hz are currently found at workplaces“.

Einen Grenzwert für elektrische Gleichfelder hat die ICNIRP nicht definiert. Bei Alltagsexpositionen sind keine gesundheitlich problematischen Wirkungen bekannt.

Ausgehend von den Empfehlungen der (ICNIRP 2010) bzw. der (EU 1999), welche die Feldstärke bei 1 Hz auf 5 bzw. 10 kV/m beschränken, errechnet (Leitgeb 2014) einen möglichen Grenzwert für elektrostatische Felder, der vor unangenehmen Mikroentladungen schützt, von 7 bzw. 15 kV/m. In China sind in einer technischen Richtlinie 30 kV/m als Maximalwert festgelegt (Liu 2014), in besiedelten Gebieten sollen 15 kV/m während 80 % der Zeit nicht überschritten werden, und die maximale Feldstärke im Siedlungsgebiet soll 25 kV/m nicht übersteigen. Gemäss (CEPRI 2017) ist bei Feldstärken unter 15 kV/m kein Entladungsstrom spürbar.

Speziell beachtet werden müssen indirekte Feldwirkungen über aufgeladene Gegenstände. Gemäss (SSK 2013b) sind im Falle der Berührung grosser Teile (etwa Fahrzeuge) wahrnehmbare und lästige Entladungsströme schon bei Feldstärken um 1 kV/m möglich. Anlagenbetreiber können durch Erdung das Risiko für solche Ableitströme minimieren.

2.2.2 Magnetfeldexpositionen

AC-Magnetfelder: 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 (BUWAL 2005). Ausserhalb eines Korridors von 50 m betragen die Feldstärken, insbesondere bei kleineren Transport- und bei Verteilleitungen praktisch immer weniger als 1 μT . Aufgrund des schwankenden Strombedarfs der Nutzer (Wirtschaft, Haushalte) variieren die Stromstärken und damit die Magnetfelder dauernd, wobei die Immissionen bis zu einem Faktor 4 – 5 tiefer sein können gegenüber den oben erwähnten Maximalwerten. Erdkabel weisen direkt oberhalb der Kabelkanäle grösser Magnetfelder auf als vergleichbare Freileitungen, weil die Schächte meist nur 1 – 2 m unter der Oberfläche liegen. Da die stromführenden Kabel näher beieinander sind als im Fall von Freileitungen, nehmen die Felder mit zunehmender Distanz zum Trassee sehr schnell ab: schon nach wenigen Metern liegen die Flussdichten unterhalb von 1 μT (die Stromkabel des erdverlegten Verteilnetzes können an der Oberfläche 1 μT erreichen, betragen im Durchschnitt aber um 0.2 μT).

(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, Koulouglotis et al. 2015). Allerdings liegen nur wenige Häuser sehr nahe bei Hochspannungsleitungen. Nach (Huss, Spoerri et al. 2009) befinden sich in der Schweiz unter 0.5 % aller Haushalte in einem Korridor von 50 m um 220 und 380 kV Höchstspannungsleitungen. 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 “.

Gemäss (Bowman 2014) betragen die durchschnittlichen persönlichen Expositionen in Haushalten in Europa um 0.04 μT – für eine Messkampagne in Deutschland siehe: (Schüz, Grigat et al. 2000) –, 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 (Röösli, Struchen et al. 2014).

Eine Übersichtsarbeit zu ELF-Magnetfelder in Europa (Gajsek, Ravazzani et al. 2016) kommt zum Schluss, dass die durchschnittliche persönliche Exposition zwischen 0.05 und 0.2 μT liegt. Höhere Werte von einigen μT sind unterhalb von Hochspannungsleitungen, an den Wänden von Transformatorgebäuden und an den Schutzzäunen von Unterstationen der elektrischen Netzversorgung möglich. Innerhalb der Gebäude findet man die höchsten Feldwerte bis zum Bereich mT in der Nähe von Hausinstallationen und Haushaltsgeräten, die zum Teil auch unmittelbar am Körper betrieben werden, wie Haartrockner und elektrische Rasierer. Für die zukünftige Risikoabschätzung erachten die Autoren drei Kategorien für die Expositionscharakterisierung als zwingenden Bestandteil zukünftiger Risikobeurteilungen. Diese drei Kategorien unterscheiden sporadische Exposition an verschiedenen Regionen des Körpers, kontinuierliche Exposition des gesamten Körpers gegenüber erhöhten Feldstärken, und kontinuierliche Exposition gegenüber tiefen Hintergrundfeldstärken im Alltag.

Inzwischen gibt es auch Messungen zur Alltagsexposition der Bevölkerung. Messtechnisch stehen ausreichend genaue und vom Handling her ausreichend einfache Messgeräte zur Erfassung der relevanten Expositionen zur Verfügung – das neueste Gerät: (Zahner, Fröhlich et al. 2016).

Exposimeterdaten haben (Kheifets, Afifi et al. 2006) in einer Literaturarbeit zusammengestellt. Dabei handelt es sich um Daten aus Belgien, Kanada, Deutschland, USA und Korea. Die Anteile der Personen in der niedrigsten Expositions-kategorie ($\leq 0.1 \mu\text{T}$; geometrisches Mittel) betragen in diesen Ländern 92 %, 64 %, 74 %, 73 % und (Korea: arithmetisches Mittel, AM) 64 %. In der höchsten Expositions-kategorie ($> 0.4 \mu\text{T}$): 1 %, 5 %, 4 % (AM), 2 % und 8 % (AM). 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 Felder massen. Die täglichen Mittelwerte lagen für 75 % der Teilnehmer unterhalb von 0.2 μT . Die höchsten Werte waren an Arbeitsplätzen vorhanden. (Struchen, Liorni et al. 2016) 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 μT (geometrisches Mittel; GM), der höchste 48-Stunden-Wert 0.26 μT ; 2 % der Messwerte lagen über 0.4 μT . 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 μT (arithmetisches Mittel, AM) bzw. 0.02 μT (GM) für Kinder und 0.14 μT (AM) bzw. 0.03 μT (GM) gemessen. Knapp 1 % der Kinder waren Magnetfeldern $> 0.4 \mu\text{T}$ ausgesetzt (Magne, Souques et al. 2016).

Es zeigte sich, dass der geometrische Mittelwert der Schlafzimmerimmissionen gut als Näherung der mittleren persönlichen Exposition genommen werden kann (Struchen, Liorni et al. 2016), (Liorni, Parazzini et al. 2016). (Lewis, Evenson et al. 2015) und (Lewis, Hauser et al. 2016b) kommen in ihren Studie in North Carolina bzw. Massachusetts zum Schluss, dass das geometrische Tagesmittel der persönlichen Exposition gut den Wochendurchschnitt repräsentiert, nicht aber die Maximalbelastungen (für zuverlässige Aussagen zu diesen sind Messungen über mehrere Tage notwendig). Die durchschnittliche Exposition in diesen Studien betrug um 0.1 μT (man beachte dass in den USA tiefere Netzspannungen verwendet werden, was zu einer Erhöhung der Magnetfelder führt).

DC-Magnetfelder: Unter HGÜ-Leitungen misst man Feldstärken deutlich unterhalb 0.1 mT, was in etwa dem natürlichen Erdmagnetfeld in Mitteleuropa (40 – 50 μT) entspricht. (Fuchs, Novitskiy et al. 2014) geben als magnetische Flussdichten, abhängig von der Leiteranordnung bei bipolaren Systemen wie sie in Europa eingesetzt werden sollen, Werte zwischen 20 und 50 μT am Erdboden an. Bei versetzten Leiteranordnungen und zwei vertikal montierten bipolaren Systemen auf einem Mast betragen die Flussdichten (bei Nennleistungen von 1.5 – 2.5 GW) zwischen 20 und 30 μT , also weniger als das Erdmagnetfeld beträgt.

Bei technischen Pannen können Kurzschlussströme Gradienten generieren, die bis 10 Mal grösser sind

als die Amplitudenänderung einer grossen 50 Hz-HSL (Samborsky 2017). Das gilt für moderne Halbleiterschalter mit Stromänderungen um 3 kA/ms. Bei älteren mechanischen Schaltern, die langsamer reagieren, betragen die Änderungen bis 100 Mal weniger und liegen somit auch deutlich unter der Amplitude von HDÜ. Die Gradienten der Lastflussregelung sind vergleichsweise klein und aus gesundheitlicher Sicht unproblematisch: im Normalbetrieb ändern sich die Flüsse innerhalb von Minuten um einige hundert Ampère.

2.2.3 Wahrnehmung von Magnetfeldern

AC-Magnetfelder von HSL können unter Alltagsbedingungen nicht wahrgenommen werden. Die erste wahrnehmbare physiologische Reaktion auf AC-Magnetfelder ist die Reizung des Sehnervs, was sich in "Lichtblitzen" (Phosphene) äussert. Dazu sind magnetische Flussdichten von 2 mT (2000 μ T) und mehr nötig. Zur Reizung von peripheren Nerven und von Muskelzellen müssen die Felder noch deutlich stärker sein.

Statische Magnetfelder werden erst im T-Bereich wahrgenommen (Heinrich, Szostek et al. 2011). Die ICNIRP schreibt (ICNIRP 2014), p. 419f:

"When the static magnetic field exceeds a threshold of approximately 2 T, the movement-induced electric field in the head may be high enough to evoke vertigo and other sensory perceptions such as nausea, visual sensations (magnetophosphenes) and a metallic taste in the mouth (...). There is also the possibility of acute neurocognitive effects, with subtle changes in attention, concentration and visuospatial orientation (...) For normal movements, the threshold for peripheral nerve stimulation is unlikely to be reached with exposures below 8 T (...)."

2.2.4 Expositionen gegenüber elektrischen Feldern

Elektrische Wechselfelder: Unter 380 kV HDÜ misst man vergleichsweise starke elektrische Wechselfelder im Bereich des von der (ICNIRP 2010) vorgeschlagenen Grenzwertes von 5 kV/m (Das, Gogoi et al. 2015), (Ungureanu, Rusu et al. 2007). Bei Kabeldurchhängen die weniger als 10 Metern betragen, übersteigen die Feldstärken auf dem Trasse unterhalb der Kabel die Grenzwerte (Elhabashi 2007). 220 kV Leitungen generieren maximale elektrische Feldstärken bis gegen 3 kV/m (Tourab and Babouri 2016). Ausserhalb des Leitungskorridors werden die Werte schnell niedriger. Innerhalb von Gebäuden misst man kaum elektrische Felder von HSL, weil die Gebäudehülle abschirmend wirkt.

Elektrostatistische Felder: Bipolare HGÜ-Leitungen (400 – 800 kV) können, wenn zwei Systeme über Kreuz angeordnete sind, am Boden elektrostatistische Feldstärken um 10 kV/m erzeugen (bei Bodenabständen von 12 – 15 m; bei grösseren Abständen sind die Feldstärken deutlich geringer; siehe etwa (Samy 2017). Bei anderer Anordnung oder bei monopolen Systemen liegen die Feldstärken bei 12 – 15 kV/m (Fuchs, Novitskiy et al. 2014). Allerdings gilt es zu berücksichtigen, dass die durch die Korona von DC-Leitungen produzierten Raumladungen die elektrische Feldstärke erhöhen, abhängig von der Leiterspannung, der Leiterkonfiguration, der natürlichen Ionenkonzentration in der Luft und dem Wetter. Die Erhöhung kann Faktor 2 – 3 oder mehr betragen (siehe Abschnitt 2.3.2). Damit sind grundsätzlich elektrische (Gesamt-) Feldstärken unterhalb von HGÜ-Leitungen von 30 – 40 kV/m möglich (Maruvada 2012); (Guillod, Pfeiffer et al. 2014). Das ist mehr als bei einem Gewitter als natürlich auftretende atmosphärische Feldstärke gemessen werden kann (bis 20 kV/m).

2.2.5 Wahrnehmung von elektrischen Feldern

Elektrische Wechselfelder werden bei Ganzkörperexposition von den sensitivsten 10 % der Bevölkerung ab 2 – 5 kV/m (Rest: 10 – 20 kV/m) wahrgenommen (ICNIRP 2010). Das bedeutet, dass elektrische Felder von Höchstspannungs-AC-Freileitungen auf oder nahe am Trasse detektierbar sind. Wichtig für die Feldwahrnehmung ist dabei die Körperhaltung: weil sich elektrische Felder durch die geometrischen

Eigenschaften von Objekten verändern, können je nach Umriss lokal sehr viel höhere Feldstärken auftreten als im ungestörten Feld gemessen wird. Bei stehender Position und erhobener Hand etwa kann ein (ungestörtes) elektrische AC-Feld bereits bei 7 kV/m wahrgenommen werden, weil die Feldstärke an der Hand um ein Vielfaches höher ist (Wood and Karipidis 2017).

Bei nur lokaler bzw. Teilkörper-Exposition können sensitive Menschen Felder ab 20 – 25 kV/m (Rest: 50 – 100 kV/m) wahrnehmen. Die individuelle Variabilität ist allerdings gross (Kato, Ohta et al. 1989), (Chapman, Blondin et al. 2005).

Die Feldwahrnehmung beruht auf der elektrostatischen Aufladung und Ausrichtung (Vibration) der Körperhaare, insbesondere im Nacken, im elektrischen Feld. Auch beeinflussen die Umweltbedingungen (Temperatur, Luftfeuchtigkeit, Ionengehalt) und die Grösse der exponierten Fläche (Ganzkörper oder Teilkörperexposition) sowie der Grad der Behaarung die Sensitivität stark (Odagiri-Shimizu and Shimizu 1999).

Als besonders lästig wahrgenommen werden indirekte Entladungsströme, d.h. wenn man geerdet ist und ein grosses ungeerdetes Metallteil (z.B. ein Fahrzeug) berührt, so dass die Ladung des Metallteils über den Körper abfliessen kann (oder bei nicht-geerdetem Körper bei Berührung von grossen, geerdeten Metallteilen). Solche Berührungs- oder Entladungsströme können auch gesundheitlich gefährlich werden.

Elektrostatische Felder: Relevant für die Wahrnehmung sind Mikroentladungen, wie man sie aus dem Alltag kennt (elektrostatische Entladungen; Simulationen dazu im Zusammenhang mit DC-Leitungen findet man u.a. in (Wang, Lu et al. 2018). Der Schwellenwert für die Wahrnehmbarkeit von elektrostatischen Feldern wird von (Blondin, Nguyen et al. 1996) für sensitive Menschen mit 25 kV/m angegeben (Ganzkörperexposition), (ICNIRP 2010) und (Bundestag 2017) sprechen von 10 – 45 kV/m, (SSK 2013b) von 9 kV/m. Lokale Expositionen (gemeint sind mit diesem Begriff Teilkörperexpositionen im Unterschied zu Ganzkörperexpositionen) können bis 50 kV/m nicht wahrgenommen werden (Chapman, Blondin et al. 2005).

2.2.6 Expositionen gegenüber EMF von Hybridleitungen

Hybridleitungen generieren alle oben beschriebenen elektromagnetischen Felder. Ihr Zusammenwirken ist aus technischer Sicht von grosser Bedeutung. Induktive und kapazitive Kopplungen führen zu Verlusten und unerwünschten Strömen, welche die Netze belasten, sowie zu erhöhter Koronaaktivität. Durch geschickte Leiteranordnungen können Feldexpositionen reduziert werden. Die konkrete geometrische Ausgestaltung einer Hybridleitung ist deshalb nicht nur eine technisch-wirtschaftliche Frage, sondern auch eine der politisch erwünschten Umweltbelastung, insbesondere hinsichtlich EMF und Lärm.

Magnetfelder: Betreffend Magnetfeldern sind Hybridleitungen nicht speziell auffällig. Die maximalen DC-Feldstärken unterhalb der Leiter am Boden sind von der Grössenordnung her im Bereich der Erdmagnetfeldstärke in Europa, meist aber tiefer. In der Summe (Erde und HGÜ) ergibt sich eine DC-Magnetfeldstärke, die etwa dem Erdmagnetfeld an den Polen entspricht oder leicht darüber liegt.

Wegen des Wegfalls der Phasenoptimierung in einem AC/DC-System nehmen die AC-Magnetfeldstärken verglichen mit einem AC-Doppelsystem grundsätzlich zu. Durch geometrische Veränderungen können die Flussdichten bei gegebener Stromstärke jedoch beeinflusst werden. Mit einer Compact-Bauweise ist es realisierbar, dass Hybridleitungen mit HDÜ-Doppelsystemen vergleichbare 50 Hz-Magnetfeldexpositionen generieren (Pfeiffer, Guillod et al. 2013) (Hedtke, Pfeiffer et al. 2018).

Elektrische Felder: Die elektrischen Felder der AC- und DC-Seile koppeln gegenseitig ein – abhängig vom Abstand der Leiterseile und den Wetterbedingungen (siehe etwa: (Sun, Wu et al. 2017), (Ma and Chen 2018) – und können so zu höheren AC- und DC-Koronaaktivitäten (Pfeiffer, Hedtke et al. 2018) und entsprechend höheren Lärmbelastungen (siehe 2.3.3) führen. Die Ionenströme spielen dabei für die am Boden gemessene Stärke des elektrostatischen Feldes eine fast wichtigere Rolle als die nominale Leiterspannung (siehe Abschnitt 2.3.2). Sie können die Feldstärke Verdoppeln bis Verdreifachen.

Allerdings hängen die konkreten Feldwerte ganz entscheidend von der Leiteranordnung ab (Franck, Pfeiffer et al. 2019), (Hedtke, Pfeiffer et al. 2018). AC-Leitungen unterhalb von DC-Seilen haben eine abschirmende Wirkung auf elektrostatische Felder und Ionenströme. (Ma and Chen 2018) errechneten, dass bei einer in China verwendeten Konfiguration von zwei Parallelleitungen (800 kV DC und 500 kV AC) die statischen Felder bei Schönwetterbedingungen bis 4.4 kV/m betragen.

2.2.7 Feldwahrnehmung bei Hybridleitungen

Betreffend Feldwahrnehmung haben Studien gezeigt, dass die Kombination von DC- und AC-Feldern die Sensitivität erhöht. Was als reines DC-Feld (oder AC-Feld) tolerabel ist, kann bei gleichzeitiger Anwesenheit beider Feldtypen als unangenehm empfunden werden. Gezeigt haben das (Clairmont, Johnson et al. 1989): Probanden beurteilten sowohl 15 kV/m AC allein als auch ein 15 kV/m DC allein mehrheitlich als un- oder wenig problematisch, bei Ko-Exposition wurden die Feldstärken jedoch als störend bis unangenehm empfunden. Weil es unseres Wissens keine neueren Studien zur Feldwahrnehmung kombinierter Expositionen von AC und DC elektrischen Feldern gibt – siehe auch den Review von (Petri, Schmiedchen et al. 2017) –, sind diese Daten mit der nötigen Vorsicht zu genießen.

Bald sollten jedoch aktuelle Daten vorliegen. Ein umfangreiches Projekt der RWTH Aachen hat sich dem Thema angenommen. Dafür wurde eigens ein Perzeptionslabor entwickelt, das statische elektrische Felder bis 50 kV/m in Kombination mit Ionenströmen bis 500 nA/m² (siehe dazu 2.3.2) generieren und Wechselfelder bis 30 kV/m erzeugen und mit statischen elektrischen Feldern kombinieren kann.

2.3 Koronaverursachte Expositionen

Neben den durch Strom und Spannung verursachten Feldern (Magnetfelder, elektrische Felder) gilt es bei HSL auch die durch Koronaeffekte bewirkten Umwelteinflüsse auf den Menschen zu berücksichtigen. Gemeint sind damit Expositionen gegenüber Ionenströmen, Lärm, (geladenen) Aerosolen sowie Luftschadstoffen wie Ozon und Stickoxiden. Auf die Ionenströme ist schon mehrfach hingewiesen worden, so dass dieses Thema im Folgenden eher knapp dargestellt wird. Bevor die Expositionen zur Sprache kommen, werden zunächst die Koronaeffekte erklärt.

2.3.1 Physikalischer Hintergrund

2.3.1.1 Korona allgemein

Bei hohen Spannungen kommt es, wenn die elektrische Durchschlagsfestigkeit des zwischen den elektrischen Ladungspolen befindlichen Mediums überschritten wird, zu Entladungen. Bei Hochspannungsleitungen geht es um die Durchschlagsspannung gegenüber Luft an den Leiteroberflächen. Typischerweise betragen die kritischen Gradienten bei AC-Leitungen um 15 kV/cm, bei DC-Leitungen um 20 – 30 kV/cm, abhängig vom Durchmesser des Leiters, der Rauheit der Oberfläche, der Leiterspannung, der Mastgeometrie und den Wetterbedingungen; siehe etwa: (Hedtke, Pfeiffer et al. 2015).

Koronaeffekte treten zuerst an Stellen mit kleinen Krümmungsradien auf. Dort ist die elektrische Feldstärke höher. Solche kleinen Krümmungsradien werden durch Verschmutzungen der Leiteroberflächen, Wassertropfen oder andere Unebenheiten verursacht, oder man findet sie an Aufhängepunkten der Leiterseile. Bei Erreichen der Durchschlagfeldstärke, werden die Atome am betreffenden Ort lokal ionisiert und Ladungen können über diese leitfähige Zone in die Umgebung abfließen. Die Spannung an den Leiteroberflächen geht dann schnell zurück und der Ladungsabfluss kommt zum Stillstand. Weil die Entladung mit der Emission von sichtbarem Licht verbunden ist, das an die Sonnenkorona erinnern mag, spricht man von Koronaentladung.

Die physikalischen Prozesse am positiven Leiter unterscheiden sich von den Vorgängen am negativen Leiter. Deshalb unterscheiden sich die Koronaeffekte von AC- und DC-Leitungen, insbesondere was die Lärmemissionen und die Ionenemissionen anbetrifft. Im Folgenden werden die physikalischen Prozesse an den einzelnen Leitern dargestellt. Die rein technischen Implikationen (Verluste, Sättigungsprobleme an Transformatoren bei Hybridleitungen, Störungen im Bereich der Radiofrequenzen) werden nicht behandelt – siehe dazu etwa: (Pfeiffer, Schultz et al. 2016).

2.3.1.2 Positive Korona

In der Atmosphäre werden durch die UV-Strahlung der Sonne laufend Moleküle ionisiert. Durch die Ionisation entsteht ein freies Elektron und (zurück bleibt) ein positiv geladenes Molekül. Das geschieht auch im Umfeld von Hochspannungsleitungen. Kommt ein freies Elektron in das starke elektrische Feld eines positiven Leiters einer DC-HSL, oder in das starke elektrische Feld der positiven Phase einer AC-HSL, wird es zum Leiter hin beschleunigt. Dabei gewinnt es Energie. Die Energie ist ausreichend um (seinerseits) aus Atomen, mit denen es auf dem Weg zum Leiter hin kollidiert, Elektronen herauszuschlagen, die wiederum auf die gleiche Weise Atome ionisieren. Es kommt zu einer Kettreaktion, die gegen den Leiter hin dichter wird. Um den Leiter herum bildet sich lokal eine leitfähige Zone die aus geladenen Teilchen besteht (sog. Plasma). Die äussere Grenze dieser Zone liegt dort, wo das elektrische Feld die Elektronen nicht genügend stark beschleunigt, um Atome ionisieren zu können (die Ionisierungszone von HSL misst 1 bis einige wenige cm).

Der Prozess hat eine wichtige zeitliche Komponente: Die Elektronen die auf den Leiter treffen, neutralisieren sich an der Oberfläche. Weil auch die positiven Ionen in der Nähe der Leiteroberfläche immer wieder energieärmere Elektronen einfangen, werden viele davon ebenfalls neutralisiert. Das führt insgesamt zu einem Spannungsabbau und die Ionisation bricht lokal zusammen. Der ganze Prozess kann wieder von neuem beginnen. Das ist möglich, weil er sich selber initiieren kann: Das Verschmelzen von freien Elektronen mit positiven Ionen setzt Energie in Form von Photonen (sichtbares Licht und UV-Strahlung) frei. Die Photonen können ihrerseits genügend Atome ausserhalb des Plasmas ionisieren und so die Koronaregion immer wieder mit freien Elektronen speisen. Die zeitliche und räumliche Dynamik führt dazu, dass sich die Korona als auf der Leiteroberfläche wandernde kurze Entladungsimpulse manifestiert (sog. Burst-Corona).

Bei höheren Spannungen bündeln sich die positiven Ionen zu grösseren Häufungen, die vom Leiter wegdriften (sog. Streamer). Die typische gleichmässige Glimmerscheinung kommt bei noch höheren Spannungen zustande (Ladungen sind nicht mehr lokal gehäuft, sondern eher gleichmässig über den Leiter verteilt), ehe es (theoretisch) zum Funkendurchbruch kommt; siehe: (Riba, Morosini et al. 2018).

2.3.1.3 Negative Korona

Die physikalischen Prozesse am negativen DC-Leiter – bzw. während der negativen Phase an einem AC-Leiter – sind insgesamt komplexer. Die freien Elektronen werden vom Leiter abgestossen und driften aus der Plasmaregion heraus, während die positiven Ladungen angezogen werden. Die für Koronas notwendige Kettenreaktion wird deshalb nicht durch Stossionisation der Elektronen verursacht, sondern durch Photonen – genauer durch den photoelektrischen Effekt. In der Plasmaregion kommt es zu Verschmelzungen von freien Elektronen und positiven Ionen. Dabei werden Photonen freigesetzt, die aus dem Leiter Elektronen herausschlagen können. Diese Elektronen werden vom Leiter weggetrieben und können auf ihrem Weg Atome ionisieren. Die Rekombination von positiven Ionen und Elektronen setzt wiederum Photonen frei, die Elektronen aus dem Leiter schlagen und so den Prozess aufrechterhalten. Vom Leiter nicht aufgenommene Photonen werden abgestrahlt und verursachen das optisch wahrnehmbare Koronaleuchten.

Der photoelektrische Effekt benötigt weniger Energie als die Ionisierung von freien Atomen. Aus diesem Grund stellt sich der Koronaeffekt an negativen Leitern bei tieferen Spannungen ein. Die erste Entladungsphase geschieht in sehr kurzen (Frequenz im kHz-Bereich), vergleichsweise energiearmen Impulsen (tiefe Amplituden). Man spricht von Trichel-Pulsen. Die Periodizität kommt wie beim positiven

Leiter durch Spannungsabbau zustande: die weggetriebenen Elektronen sammeln sich um den Leiter herum, die positiven Teilchen an der Leiteroberfläche, was zu einer Gegenspannung führt, welche die ursprüngliche Spannungsspitze reduziert und die Korona zusammenbrechen lässt. Bei hohen Spannungen gehen die Trichel-Pulse in ungeladene Büschelentladungen über, bevor dann (theoretisch) bei ganz hohen Spannungen Funkenentladung stattfindet.

Die negative Korona bildet insgesamt mehr freie Elektronen als die positive Korona. Der Ionenstrom vom Leiter weg ist grösser und die Elektronen werden räumlich weiter verfrachtet, weil sie als leichte Teilchen besser weggetrieben werden als schwere positive Ionen. Die Differenz der Mobilität zwischen schweren und leichten Ionen kann bis zu 4 Grössenordnungen (Faktor 10'000) betragen (Zou, Li et al. 2019). Die Elektronen haben jedoch weniger Energie als bei der positiven Korona. Die sichtbare Erscheinung – siehe: (Riba, Morosini et al. 2018) – ist grösser, glimmt nicht so gleichmässig wie beim positiven Leiter, sondern sieht «ausgefranst» aus (büschelartige Filamente im Glimmmodus).

2.3.2 Ionenströme

2.3.2.1 AC- und DC-Leitungen

Wie unter 2.3.1 beschrieben verursachen Koronaeffekte Ionenströme die wirtschaftlich als Übertragungsverluste zu Buche schlagen. Bei AC-Leitungen können die während der Koronaentladung produzierten Ionen nur schwer vom Leiter wegdriften, weil sie durch die ständig wechselnde Polarität laufend abgebaut werden. Bei HDÜ-Leitungen oszilliert deshalb der Grossteil der Ionenströme im Nahfeld des Leiters und stellt keinen relevanten Umwelteinfluss dar. Nur ein kleiner Teil der Ionen wird vom Wind in die Umgebung getragen.

Bei HGÜ-Leitungen ist die Sachlage anders. Weil sich die Polarität nicht ändert, können die in der Plasmaregion gebildeten Teilchen gleicher Ladung wie der Leiter entlang den elektrischen Feldlinien mehr oder weniger ungestört von der Leitung wegdriften. Diese Ionendrift ist als Strom am Boden messbar. Wie bereits beschrieben, sind die Ionenströme negativer Leiter grösser als die Ströme von positiven Leitern. Der Grund: der Koronaeffekt setzt bei negativen Leitern früher ein und ist damit bei der Spannung, bei der die positive Korona erst beginnt, intensiver (Arruda and Lima 2015). Bei bipolaren Leitungen ist die Koronabildung wegen der gegenseitigen Ionenströme intensiver als bei unipolaren Leitungen (Pfeiffer, Hedtke et al. 2018). Die Grössenordnung der Ionenströme variiert mit der Intensität der Koronaaktivität, ist also abhängig von vielen Faktoren, insbesondere den Wetterbedingungen. Bei Schönwetter ist der Ionenstrom von Gleichstromleitungen grösser als bei Schlechtwetter. Er kann eine Flussdichte von über 100 nA/m² erreichen. Gemäss (Fews, Henshaw et al. 1999) werden die Ionen innerhalb von 3 – 30 Minuten neutralisiert. Wie weit sie in dieser Zeit verfrachtet werden können, ist eine Frage des Windes und der Aerosolkonzentration:

die freien Elektronen und die positiven Ionen lagern sich leicht an elektronegative Moleküle wie Wasserdampf und Sauerstoff bzw. elektropositive Moleküle wie Wasserstoff an. Es bilden sich unterschiedliche, vergleichsweise komplexe Ionen (Manninen, Franchin et al. 2011), die an Aerosolpartikel binden und mit dem Wind verweht werden. In der Literatur wird diskutiert, ob krebserregende Aerosolpartikel, die auf diese Art elektrisch aufgeladen sind, das Krebsrisiko erhöhen, weil sie leichter vom Organismus aufgenommen werden. Das könnte möglicherweise die in Studien berechneten erhöhten Risikoschätzer für Leukämie bei Kindern, die im Umfeld von HSL wohnen, erklären (siehe dazu 2.3.4).

2.3.2.2 Hybridleitungen

Grundsätzlich gelten die oben beschriebenen Aspekte auch für Hybridleitungen. Die elektrischen Verhältnisse sind allerdings komplexer und gegenseitige Kopplungen müssen berücksichtigt werden.

Das betrifft zum einen die aus wirtschaftlicher Sicht relevante Einkopplung der Ionenströme von DC- in AC-Leiter. Ähnlich wie bipolare-Leitungen die Koronabildung im Vergleich zu einem monopolaren System befeuern, verstärken AC- und DC-Felder ihre Koronaaktivitäten gegenseitig. Ein höherer Ionenfluss

seitens AC-Leitungen ist aus technisch-wirtschaftlicher Sicht ebenso von Bedeutung wie das Einkoppeln von Gleichströmen in AC-Systeme (Franck, Pfeiffer et al. 2019), (Pfeiffer, Hedtke et al. 2018). Die Effekte sind stark durch die Leiteranordnungen bestimmt. Das kann aber auch für die Exposition gegenüber Ionenflüssen und die elektrischen Gleichfeldern genutzt werden. Betrachtet man nur die Ionenflüsse, so sind diese am Boden geringer, wenn das DC-System oberhalb des AC-Systems montiert ist – siehe auch: (Zhou, Cui et al. 2013). Berücksichtigt man die HSL-Expositionen insgesamt, so wird mit dieser Lösung der tiefere Ionenfluss allerdings „erkauft“ mit höheren magnetischen AC-Feldstärken am Boden. Mit entsprechenden Mastgeometrien (Kompaktanordnungen) können optimierte Lösungen gefunden werden (Pfeiffer, Guillod et al. 2013).

2.3.2.3 Wahrnehmbarkeit von Ionenströmen

Die Ionenströme haben in zweierlei Hinsicht biologische und gesundheitliche Relevanz. Einerseits sind sie für die menschliche Wahrnehmung bedeutsam. Die Sensitivität bei kombinierten Expositionen scheint höher zu sein (siehe auch 2.2.6): statische elektrische Felder werden je nach Ionendichte bei unterschiedlichen Feldstärken wahrgenommen (Blondin, Nguyen et al. 1996). Wenn die Ionendichte hoch ist, ist ein gegebenes Feld besser wahrnehmbar. Bei grossen Ionenflussdichten (100 nA/m^2) kann ein DC-Feld um 25 kV/m wahrgenommen werden. Ohne Präsenz von Ionen muss das Feld fast doppelt so stark sein damit es detektierbar ist, wobei grosse individuelle Unterschiede in der Sensitivität beobachtet werden: (Odagiri-Shimizu and Shimizu 1999) geben mehrere 100 kV/m an. Bei Teilkörperexposition sind deutlich grössere Feldstärken für die Feldwahrnehmung nötig als im Falle von Gesamtkörperexpositionen (Chapman, Blondin et al. 2005). Neuere Daten sollten bald aus dem bereits erwähnten Projekt der RWTH Aachen vorliegen.

Die bessere Wahrnehmungsfähigkeit elektrischer Felder bei Anwesenheit hoher Ionenkonzentrationen hat damit zu tun, dass Ionenströme das durch die Spannung der Leiter generierte elektrische Feld verstärken. In unmittelbarer Nähe der Trassen kann die elektrische Feldstärke wegen der Ionenströme 2 – 3 Mal höher sein als sie aufgrund der Leiterspannung allein zu erwarten wäre (Maruvada 2012). In der Praxis sind die Verhältnisse aber komplex und von der Geometrie von Mast und Leiteranordnung abhängig, insbesondere bei Hybridleitungen.

2.3.3 Lärm

2.3.3.1 Allgemein und Grenzwerte

Schallemissionen bei Hochspannungsleitungen sind erst ab 220 kV relevant. Sie kommen durch Koronaentladungen zustande und variieren deshalb mit den Wetterbedingungen und den Leitereigenschaften (Durchmesser, Alter, etc.). In der Praxis zeigen durchschnittliche HSL (380 kV) mit dicken Seilen während 95% der Zeit keine oder kaum Leitergeräusche (unterhalb 35 dB).

Die Lärmgrenzwert für Anlagen wie HSL sind in der TA Lärm geregelt. Die Maximalwerte sind je nach Siedlungstyp für Tages- und Nachtlärm unterschiedlich. In reinen Wohnzonen gelten 50 dB (in allgemeinen Wohngebieten 55 dB) während des Tages, 35 dB (40 dB) während der Nacht. In Mischgebieten sind die entsprechenden Werte 60 dB bzw. 45 dB . Die neue WHO-Empfehlung (WHO 2018) nennt als Limite für Nachtimmissionen 45 dB (Strassenverkehr) und 40 dB (Fluglärm). Als einzige energietechnische Lärmquelle nennt die WHO Windturbinen. Sie empfiehlt eine durchschnittliche maximale Lärmbelastung (24 Stunden Mittelwert) von 45 dB . An lärmigen Arbeitsplätzen sind ab 80 dB Gehörschütze nötig, die gemäss EU-Richtlinie (EU 2003) maximale Pegel von 87 dB zulassen dürfen.

2.3.3.2 AC- und DC-Leitungen

Bei HDÜ-Leitungen kann man zwei Lärmkomponenten unterscheiden: Zum ersten ein 100 Hz Brummen, das durch die periodische Bewegung der Ionen in der Nähe der Leitung (in der Ionisierungs- bzw. Driftzone) verursacht wird. Die Energie der Ionen erwärmt die Luft, die sich ausdehnt und wieder zu-

sammenzieht, was zu regelmässigem Brummschall führt. Zum zweiten ein breitbandiges, hochfrequentes Knistern (500 – 12'000 Hz). Es kommt durch Koronaentladungen auf den Leiteroberflächen zu Stande. Hohe Randfeldstärken an unebenen Stellen (Seilschäden, Schmutz, Wassertropfen) führen zur impulsartigen Ionisation der Luft. Energetisch gesehen dominieren die breitbandigen Koronageräusche das Frequenzspektrum. Das 100 Hz Brummen macht je nach Wetter 1 – 6 % (1 % bei Trockenheit, 6 % bei Schlechtwetter) des Schalldrucks aus, kann aber die lauteste Einzelfrequenz sein und gut gehört werden. Dünne Seile (höhere Randfeldstärken) sind grundsätzlich lauter als dicke.

Bei schlechten Wetterbedingungen (Regen, Feuchte, Schnee) liegen die Lärmwerte um 10 – 15 dB höher als bei guten Wetterbedingungen (Heutschi 2010). Bei leichtem Schneefall oder leichtem Regen misst man direkt auf dem Trassee um 40 dB, bei starkem Schneefall und starkem Regen um 50 dB. Bei dünnen Seilen liegen die Werte um 10 dB und mehr darüber (Sames and Goossens 2015). 10 dB entsprechen einer Verdoppelung der empfundenen Lautstärke.

Eine wichtige Rolle spielen die Hintergrundgeräusche. Die Basispegel liegen an ruhigen Orten während der Nacht bei 25 dB und weniger. Bei Regen steigt die Geräuschkulisse, je nach Regenintensität und Umgebung (Natur, bebaute Flächen) auf 35 – 45 dB (Grave 2019). Die bei Regen zusätzlich durch HSL verursachten Geräusche sind oft vergleichsweise gering – um 1 dB; andere Autoren nennen höhere Werte; (Jauch 2010). Bei Nebellagen, für die keine Zunahme des wetterbedingten Hintergrundlärms vorliegt, die Koronaaktivität aber trotzdem intensiver ist als bei trockenen Bedingungen, beträgt die Lärmzunahme um 10 dB.

Wegen der Überdeckung des Leiterlärms durch Regengeräusche wird der Lärm von HSL bei gutem Wetter schneller als störend wahrgenommen. (Gela, LaForest et al. 1993) – siehe auch (Straumann and Franck 2011) – gehen von 10 dB Differenz aus. Solche Empfindlichkeitsdifferenzen gelten auch hinsichtlich Tageszeit: in der Nacht werden Schallimmissionen früher als störend empfunden als während des Tages. Deshalb sind die Grenzwerte für Nachtlärm 10 dB restriktiver (siehe oben), was einer halb so gross empfundenen Beschallung gleichkommt.

Alle genannten Werte sind konkrete Literaturdaten. Sie zeigen, dass in der Praxis die Variabilität gross ist und von der aktuellen Situation abhängt. Die genannten Zahlen sollten deshalb nicht zu eng sondern als Grössenordnungen gesehen werden.

Es gilt auch zwischen den Schallarten des Koronalärms zu unterscheiden. Bei Schlechtwetter (starker Regen) nimmt die Bedeutung des Brummtons zu und kann in der Wahrnehmung sogar dominieren.

Bei trockenen Bedingungen wird das Knistern als lauteste Komponente wahrgenommen (der Brummtone wird dann kaum beachtet).

Ein weiterer Faktor ist das Alter der Seile. Bei älteren Seilen ist der Brummtone weniger ausgeprägt als bei neuen Seilen, weil die Korrosion hydrophilere Oberflächen mit geringerer Tropfenbildung schafft. Die Differenz kann bis zu 10 dB betragen (Schichler 2019).

Zuletzt: Die Emissionen der positiven Halbwelle sind lärmtechnisch relevanter (siehe unten).

Bei HGÜ-Leitungen muss zwischen dem positiven und dem negativen Leiter unterschieden werden. Je nachdem ob es sich um ein monopolares oder bipolares System handelt, sind die Schallemissionen unterschiedlich: nur der positive Leiter ist lärmrelevant, denn der Lärmpegel wird in erster Linie durch die Höhe der Entladungsamplitude bestimmt, weniger durch die Häufigkeit (Frequenz) der Entladungen. Vor diesem Hintergrund ist die Korona am positiven Leiter (positive Streamer) deutlich lauter als die Entladungen am negativen Seil, weil Trichel-Pulse kleine Amplituden (bei hoher Entladungsfrequenz) haben.

Die Intensität der Koronatätigkeit hängt von der Oberflächenspannung ab. Bei Schönwetter und im Sommer können sich an DC-Leitungen durch elektrostatische Anziehungen mehr Schmutzpartikel und Insekten anlagern als unter feuchten und regnerischen Bedingungen und in den kalten Jahreszeiten. Deshalb sind die Lärmemissionen, die von (positiven) DC-Seilen ausgehen, bei trockenem Wetter und in den warmen Jahreszeiten grösser als bei Schlechtwetter und in der Winterjahreshälfte.

Sodann sind die durch die Gleichspannung aufgebauten Ionenwolken bei Gleichstromleitungen vergleichsweise stabil, weil sie nicht durch periodischen Ladungswechsel "vernichtet" werden. Das ist insofern lärmrelevant, als die Ionenwolken den Leiter abschirmen und dadurch die Entladungen und damit den Lärm reduzieren. Bei schlechtem Wetter ist dieser Effekt ausgeprägter, als bei gutem Wetter, denn dann können die Ionen besser wegdriften. Das verstärkt den oben beschriebenen Wetter- und Jahreszeiteffekt zusätzlich. Gemäss (Anzivino, Gela et al. 1993) haben DC-Leitungen bei schönem Wetter um ca. 6 dB höhere Lärmemissionen als bei schlechtem Wetter. Eine einjährige Messstudie von (Shin, Oh et al. 2019) kommt jedoch zu anderen Resultaten: Die an einer 500 kV bipolaren DC-Testleitung gemessenen Immissionen betragen im Jahresschnitt 43 dB (5 % der Werte lagen über 50 dB). Zwischen Schlecht- und Schönwetterverhältnissen betrug die Differenz lediglich 1-2 dB.

2.3.3.3 Hybridleitungen

Für die Lärmemissionen von HSL ist Regen bei AC-Leitungen, schönes Sommerwetter bei DC-Leitungen der "worst case". Bei Hybridleitungen werden die Verhältnisse wegen der gegenseitigen Beeinflussungen der Felder und Ionenströme komplexer (Hedtke, Pfeiffer et al. 2019). Hinsichtlich Feldeffekt schätzen (Hedtke, Pfeiffer et al. 2015), dass der Lärmpegel um etwa 4 dB höher sein kann, hinsichtlich Ionenstromeffekt um etwa 2 dB. Allerdings sind solche Lärmsimulationen mit grossen Unsicherheiten behaftet, so dass Prognosen generell schwierig sind und stark vom verwendeten Modell abhängen (siehe unten).

In der Praxis dürfte bei Schönwetter der AC-Lärm vernachlässigbar sein und die DC-Geräusche dominieren. Bei Schlechtwetter ist es jedoch möglich, dass der dominierende AC-Lärm durch DC-Geräusche verstärkt wird und zu bis 3 dB höheren Emissionen führt. Der Grund ist in erster Linie, dass der Wechselstrom höhere Oberflächenspannungen auf den DC-Seilen induziert und deren Lärmemissionen erhöht – aber auch das umgekehrte ist der Fall, so dass Lärmbelastungen von Hybridleitungen bei Schlechtwetterbedingungen kritisch werden können (Hedtke, Pfeiffer et al. 2015), was bei HGÜ-Leitungen nicht der Fall ist.

(Straumann and Franck 2011) haben die Lärmbelastung einer Hybridleitung, bei der ein AC-System durch ein DC-System ersetzt wurde, für verschiedenen Geometrien und Wetterbedingungen abgeschätzt. Aus lärmtechnischer Sicht stellte sich bei diesen Berechnungen die vertikale Anordnung der zwei System (DC oberhalb AC) als einzig realisierbare Möglichkeit heraus, denn die horizontale Versetzung führt zwar nicht zu höheren Lärmbelastung (eher leicht tieferen) im Vergleich zu einem AC-Doppelsystem, aber es kommen als neues Element wahrnehmbare DC-Lärmpegel bei Schönwetter hinzu, welche die Akzeptanz in der Bevölkerung senken dürften. Bei vertikalen Anordnung sinken die Pegel generell um ca. 10 dB und aufgrund der grösseren Distanz der DC-Seile zum Boden sind die Schönwetter-Geräusche weniger problematisch.

Die konkreten Lärmpegel einer Hybridleitung hängen von deren technischen und geometrischen Parametern ab. Dabei hat sich gezeigt, dass Lärmprognosen stark vom verwendeten Berechnungsmodell abhängen. Je nach Modell können Differenzen für die Schlechtwetterprognose bis 4 dB, für die Gutwetterprognose bis einiges über 10 dB betragen (Hedtke, Pfeiffer et al. 2015).

2.3.4 Aerosole und Luftschadstoffe

2.3.4.1 Allgemein und Grenzwerte

Aerosole bestehen aus unterschiedlich grossen (festen oder flüssigen) Teilchen, die sich in der Luft befinden. Aerosolpartikel haben eine Grösse von etwa 1 nm bis 10 µm. Zum Vergleich: Luftmoleküle (Stickstoff, Sauerstoff, Kohlendioxid) messen Zehntel Nanometer, Viren 10 bis einige 100 nm, Bakterien und Pollen befinden sich im µm-Bereich, ein Haar ist etwa 100 µm dick. Weil Aerosolpartikel unter 10 µm messen, zählen sie zum Feinstaub (PM10). Die kleinste regulatorisch erfasste Feinstaubfraktion sind Partikel kleiner als 2.5 µm (PM2.5).

Aerosolpartikel sind natürlichen und anthropogenen Ursprungs. In Städten gibt es wegen der grösseren Anzahl menschengemachter Quellen generell mehr Partikel als auf dem Land oder in den Bergen. Die Anzahl Partikel pro cm^3 variiert von 100'000 (urban) bis 1'000 (Berge). Ab einigen 10'000 Partikeln pro cm^3 wird die Luft trüb (Smog). Hauptsubstanzen von Aerosolen sind Sulfate, Nitrate, Aldehyde und elementarer Kohlenstoff (Ballmann, Brüggisser et al. 2018).

Wichtigste Ursprünge von primärem Feinstaub sind der Verkehr (Dieselrußpartikel, Brems- und Reifenabrieb), Feuerungen (Cheminées, Holzöfen auch in Innenräumen), industrielle und gewerbliche Quellen sowie der Güterumschlag (Schüttgut). Eine wichtige Quelle ist auch die Landwirtschaft. Ammoniakemissionen sind Vorläuferstoffe für Aerosolbildungen in der Atmosphäre.

Aerosolpartikel bilden Kondensationskeime für den Wasserdampf und andere organische Gase. Auch können sich die durch HSL generierten Ionen an die Partikel anlagern und so über grössere Distanzen verweht werden. Geladene Aerosolteilchen sind chemisch und damit auch biologisch reaktionsfreudiger als neutrale. Je mehr Ladungen ein Aerosol enthält, desto reaktiver ist es.

Beim Atmen lagern sich etwa 10 % der inhalierten Partikel (das ist nur eine Grössenordnung) im Atemtrakt ab (siehe 4.2). Aus medizinischer Sicht sind v.a. diejenigen Aerosolteilchen klinisch relevant, die krebserregend sind bzw. krebserregende Stoffe enthalten, insbesondere ultrafeiner elementarer Kohlenstoff (Russ), PAK (Polyzyklische Aromatische Kohlenwasserstoffe wie Benzopyren) – siehe (Umweltbundesamt 2016) – und Benzol. Da es sich vorwiegend um Verbrennungsprodukte handelt, lagern PAKs meist an Dieselruß und kleinen Feuerungsfraktionen an. Als PM1 und kleiner machen diese Teilchen massenmässig nur wenige Prozent am PM10 aus, stellen aber bis über die Hälfte der gesundheitsgefährdenden Stoffe (Henshaw 2002). Aufgrund ihrer geringen Grösse können diese Partikel auch in die unteren Atmungsorgane, vor allem in die Lungen, gelangen. Es wurde die Hypothese aufgestellt, dass sich elektrisch geladene Aerosole effizienter in der Lunge ablagern und deshalb eine grössere gesundheitliche Wirkung entfalten.

Zum Schutz der menschlichen Gesundheit gelten seit 2005 europaweit Grenzwerte für PM10. Als stark verschmutzte Luft gelten Aerosolkonzentrationen von $200 \mu\text{g}/\text{m}^3$ und mehr. Der Tagesgrenzwert beträgt $50 \mu\text{g}/\text{m}^3$ (darf max. 35 Mal im Jahr überschritten werden). Der Grenzwert für das Jahresmittel beträgt $40 \mu\text{g}/\text{m}^3$. In der Schweiz ist der Grenzwert für das Jahresmittel mit $20 \mu\text{g}/\text{m}^3$ restriktiver. Für PM2.5 ist die europäische Limite $25 \mu\text{g}/\text{m}^3$, die WHO Richtlinie beziehungsweise der schweizerische Immissionsgrenzwert $10 \mu\text{g}/\text{m}^3$. Der PAK-Gehalt im PM10 ist ebenfalls limitiert (Grenzwert $1 \text{ ng}/\text{m}^3$ Benzopyren in der Luft). Für Benzol gelten als Grenzwert für den Jahresdurchschnitt $5 \mu\text{g}/\text{m}^3$.

2.3.4.2 HSL und Aerosole

Der Literaturbestand zur Aerosolexposition verursacht durch HSL ist vergleichsweise klein und eine Differenzierung von Studienbefunden nach unterschiedlichen Leitungstypen (HDÜ, HGÜ, Hybridleitungen) ist nicht möglich. Grundsätzlich kann aber gesagt werden, dass die Aufladung und räumliche Ausbreitung von Aerosolen bei HGÜ wegen der grösseren und beständigen Ionenströme deutlich relevanter ist (Fews, Wilding et al. 2002). Deshalb ist die Aerosolexposition auch bei Hybridleitungen von grösserer Bedeutung als bei AC-Leitungen.

Die Hypothese, dass geladene Aerosolpartikel möglicherweise eine Erklärung für die im Umfeld von Hochspannungsleitungen festgestellten höheren Leukämieraten von Kindern (siehe 3.2.1.3) sind, wurde im Zusammenhang mit HDÜ Ende 90er Jahre von einer englischen Forschungsgruppe formuliert (Fews, Henshaw et al. 1999). Die auslösende Überlegung dahinter war, dass Benzol als Risikofaktor für Leukämie bekannt ist und die Exposition gegenüber diesem Stoff in der Nähe von HSL wegen der geladenen Aerosolteilchen erhöht sein könnte. Die Hypothese wurde verschiedentlich getestet und mit Modellierungen, in denen auch die Windrichtung berücksichtigt wurde, geprüft.

Betreffend Ausbreitung von (geladenen) Aerosolteilchen gehen die Befunde auseinander. Klar ist, dass sich Elektronen und kleine Aerosolteilchen leichter verbreiten als schwerere positive Ionen und grössere

Feinstaubfraktionen. Deshalb misst man in Windrichtung einen Überhang von negativ geladenen Partikel. Bei (Fatokun, Jayaratne et al. 2010) zeigt sich der Überhang ab einigen 100 Metern. In unmittelbarer Nähe dominieren die positiven Ionen. Auf der windzugewandten Seite ist die Verteilung in etwa ausgeglichen. Wie weit die Teilchen verfrachtet werden, darüber herrscht noch keine Klarheit. Während (Bailey, Johnson et al. 2012), (Swanson, Bunch et al. 2014) und (Fatokun, Jayaratne et al. 2010) von einigen 100 Metern ausgehen, spricht (Jeffers 2007) von 500 bis über 1000 Metern.

Quantitativ gesehen ergaben Bailey's Messungen keine starke Häufung von geladenen Aerosolteilchen im Umfeld von HSL-Leitungen im Vergleich zu Standorten ohne HSL. Die Grössenordnung des Anteils geladener Partikel lag in beiden Kontexten um 8 – 10 %. Dagegen ergaben Modellierungen einer 800 kV HGÜ-Leitung von (Zou, Li et al. 2019), dass die Aerosole nicht vernachlässigt werden können. Er untersuchte deren Wirkung auf die am Boden gemessene elektrische Feldstärke. Je mehr und je kleinere Partikel vorhanden sind, desto relevanter wird deren Einfluss. Im Vergleich zu aerosolfreier Luft kann die Feldstärke unter der Leitung gemäss seinen Simulationen bis zu 60 % höher sein.

2.3.4.3 Ozon und Stickoxide

Die Koronaentladungen führen auch zur Bildung von Ozon und Stickoxiden. Sie sind als gesundheitsschädigende Gase bekannt. Beim Ozon sollen die 8-Stunden Mittel in der Aussenluft $120 \mu\text{g}/\text{m}^3$, bei Stickoxiden das Jahresmittel $40 \mu\text{g}/\text{m}^3$ nicht übersteigen. Die durch die Koronaaktivität produzierte Menge an diesen Stoffen ist jedoch gering und auf Bodenhöhe im Vergleich zur Hintergrundbelastung gesundheitlich unbedeutend. Beim Ozon können durch HSL die Konzentrationen um ca. 1 % steigen ($< 1 \mu\text{g}/\text{m}^3$); bei den Stickoxiden ist die Verdünnung vergleichbar ($< 0.04 \mu\text{g}/\text{m}^3$) (SSK 2013b).

3. Elektromagnetische Felder und Gesundheit

3.1 Vorbemerkungen

Die Ausführungen in diesem Kapitel konzentrieren sich auf gesundheitliche Effekte im Zusammenhang mit EMF-Expositionen gegenüber HSL. Der grösste Teil der Studien widmet sich elektromagnetischen Feldern von HDÜ, also Expositionen gegenüber 50 Hz-Feldern, überwiegend Magnetfelder. Studien zu Expositionen gegenüber elektrischen AC-Feldern sind die Ausnahme. Vergleichsweise wenige Arbeiten liegen zu Gleichfeldern vor, fast nichts zu HGÜ und zu Hybridleitungen. Gesundheitliche Aspekte statischer Felder werden vorwiegend im Zusammenhang mit medizinischen Anwendungen (Magnetresonanztomographie, transkranielle Gleichstromstimulation) oder industriellen Verfahren (Elektroschweissen, Hubmagnete, Gleichstrommotoren) diskutiert. Studien über HGÜ sind fast ausschliesslich technischer Natur oder behandeln Expositionsfragen. Insbesondere fehlen (verständlicherweise) epidemiologische Arbeiten, denn im Alltag gibt es noch keine entsprechenden Expositionen: das terrestrische Stromnetz basiert fast ausschliesslich auf Wechselstrom; Gleichstrom wird heute praktisch nur auf Unterwasserkabeln und in der Mobilität (Oberleitungen für Trams, Trolleybusse, Leichtbauzüge) eingesetzt. Erst mit der Energiewende sind terrestrische Gleichstromübertragungen ein Thema, das auch die Öffentlichkeit interessiert. Mit den damit verbundenen Akzeptanzfragen – sei das nun eine reine HGÜ oder eine Hybridlösung, also kombinierter AC/DC-Transport auf demselben Trasse/Mast – sind auch gesundheitliche Effekte von DC-Feldern und von kombinierten Expositionen politisch aktuell geworden. Sodann gilt es noch festzuhalten, dass die Asymmetrien in der Studienlandschaft auch mit der unterschiedlichen biologischen Relevanz der einzelnen Expositionsarten zu tun haben. Das wird in den nächsten Abschnitten kurz angesprochen.

3.1.1 Gesundheitliche Bedeutung von magnetischen Feldern

3.1.1.1 AC-Magnetfelder

Magnetische Wechselfelder induzieren körperintern via Induktion elektrische Feldstärken bzw. Wirbelströme. Frequenz, Stärke und Topologie dieser induzierten Felder und Ströme hängen von der Frequenz und Flussdichte des Magnetfeldes, der Orientierung des Körpers relativ zum Magnetfeld und von den anatomischen und elektrischen Eigenschaften des exponierten Gewebes ab. Die Feldstärken nehmen vom Körperzentrum aus, wo sie Null betragen, zur Peripherie hin zu, sind also generell am stärksten in den elektrisch gut leitenden Geweben nahe der Hautoberfläche.

Sind die Magnetfelder stark genug, können die induzierten Feldstärken Nerven erregen und damit biologisch und gesundheitlich bedeutsam werden. Die gesundheitlich relevanten Grössen sind diese induzierten körperinternen Feldstärken. Die ICNIRP nennt sie Basisgrenzwerte und empfiehlt Limiten, die nicht überschritten werden sollten. Die in Abschnitt 2.2.1 erwähnten Grenzwerte, die in vielen nationalen Verordnungen oder Gesetzen festgeschrieben sind, werden Referenzwerte genannt. Es sind körperexterne Feldstärken, die man im freien Raum misst und die, bei Anwesenheit eines Menschen, die Basisgrenzwerte respektieren. Die ICNIRP hat die Referenzwerte unter worst-case Annahmen festgelegt, damit die Basisgrenzwerte immer eingehalten sind. Der Nachteil dieses Ansatzes: die Dosis wird meist überschätzt, die Empfehlungen sind recht konservativ.

Der empfindlichste Nerv ist der Sehnerv bzw. die Retina. Eine gewebeinterne Feldstärke bei 50 Hz von 50 – 100 mV/m kann den Nerv reizen und zu visuellen „Blitzerscheinungen“ (sog. Magnetophosphene) führen. Der Effekt ist gesundheitlich nicht gefährlich, aber lästig. Um die Anregung zu bewirken muss ein (externes) 50 Hz-Magnetfeld mehr als 1 mT betragen, über 10 Mal mehr als die Grenzwerte erlauben. Gemäss (Dimbylow 2005) wird von einem externen Magnetfeld pro mT eine elektrische Feldstärke von 20 – 30 mV/m im Zentralnervensystem (ZNS) induziert. Andere Simulationen gehen von leicht höheren Werten um 40 mV/m aus (Schmid 2020).

Um periphere Nerven (Muskelnerven) oder Muskelzellen zu stimulieren, müssen die elektrischen Feldstärken im Gewebe einige V/m (periphere Nerven) bzw. um 10 V/m (Muskelzellen) betragen. Entsprechend stärker müssen die Magnetfelder sein, um diese Feldstärken zu induzieren (im Bereich von Zehntel Tesla). So starke Magnetfelder, die massiv über jedem Grenzwert liegen, sind nirgends im Alltag anzutreffen. Gemäss (Dimbylow 2005) wird von einem externen Magnetfeld pro mT eine elektrische Feldstärke von ca. 40 mV/m in peripheren Nerven induziert. Andere Simulationen, die im Gegensatz zu Dimbylow worst-case Annahme zur Orientierung des Körpers im Magnetfeld annehmen, gehen von höheren Werten aus – ca. 90 mV/m pro mT (Schmid 2020).

Das Gehirn als Ganzes ist sensitiver (10 – 100 Mal) als eine einzelne Nervenzelle, weil Nervenzellen schwache Signale, die von verschiedenen Orten stammen, zu einem stärkeren Summsignal addieren können (Mathie, Kennard et al. 2003). Ob diese physiologische Tatsache im Zusammenhang mit induzierten elektrischen Feldern gesundheitlich relevant ist, ist unbekannt. Physikalisch sind noch weitere Mechanismen, wie Magnetfelder biologisch wirken können bekannt: über die Lorentzkraft oder den Radikalpaar-Mechanismus. Ob diesen Wirkmechanismen eine gesundheitliche Bedeutung zukommt, ist jedoch umstritten.

In der Forschung im Zusammenhang mit Hochspannungsleitungen ist deshalb den durch AC-Magnetfeldern induzierten elektrischen Feldstärken mit (grossem) Abstand am meisten Aufmerksamkeit geschenkt worden. Dabei ging und geht es nicht nur um akute Expositionen, sondern vor allem um Langzeitexpositionen gegenüber schwachen Feldern, die deutlich unterhalb des 50 Hz-Grenzwertes von 100 μ T liegen. Neben Zell- und Tierstudien gibt es viele Humanexperimente und epidemiologische Arbeiten. Letztere sind insbesondere für die Risikobewertung zentral.

3.1.1.2 DC-Magnetfelder

Statische Magnetfelder wirken nur auf bewegte elektrische Ladungen. Physikalische Wechselwirkungen entstehen somit nur, wenn sich Personen in statischen Feldern bewegen (z.B. beim Einfahren des Körpers in das – ausserordentlich starke – statische Magnetfeld eines MRI-Gerätes) und wenn sich Ladung körperlern bewegt, etwa geladene Teilchen im Blutkreislauf oder Ladungsbewegungen im Zusammenhang mit der Herzrätigkeit.

Statische Magnetfelder beeinflussen sodann die Energieniveaus von freie beweglichen Elektronen (Radikalpaar-Mechanismus), was chemische Gleichgewichte in Zellen beeinflussen kann (für eine Studienübersicht dazu siehe (Okano 2008). Der Mechanismus wird von Vögeln zur Orientierung im Magnetfeld genutzt. Ob und welche gesundheitliche Bedeutung er hinsichtlich des Metabolismus hat, ist unklar.

Statische Magnetkräfte wirken auch auf lose ferromagnetische Gegenstände, oder auf magnetische Dipole die sich in Implantaten befinden können. Diese indirekten Effekte werden nicht durch die Grenzwerte reguliert. (ICNIRP 2009) betont, dass diese nicht-biologischen Aspekte zu einer tieferen als der empfohlenen Limite für die Bevölkerung (400 mT) führen können (p. 511):

“(...) these considerations can lead to much lower restriction levels, such as 0.5 mT (...)”.

Die meisten Studien – in-vitro, in-vivo und Humanstudien – zu statischen Magnetfeldern arbeiten mit Feldstärken, die man im Alltag nicht, oder nur kurzzeitig und lokal begrenzt antrifft (etwa in der Nähe starker statischer Magnete). Das Forschungsinteresse gilt deshalb primär exponierten Arbeitsplätzen und medizinischen Anwendungen, v.a. der Magnetresonanztomographie. Klare Evidenz auf gesundheitlich negative Wirkungen bei Feldstärken bis 1 oder 2 Tesla gibt es keine (für eine Übersicht siehe: (Zhang, Zhang et al. 2017). Die Datenlage zu gesundheitlichen Wirkungen starker statischer Magnetfelder ist jedoch dünn und inkonsistent und kaum etwas wurde mit Zweitstudien bestätigt (Yamaguchi-Sekino, Sekino et al. 2011), (SCENIHR 2015).

Die Magnetfelder von HGÜ-Leitungen sind sehr schwach, auch auf dem Trasse (siehe 2.2.2). Sie liegen im Bereich des Erdmagnetfeldes. Letzteres wird in der modernen Zivilisation durch verbaute Metalle vielfältig abgeschwächt und verstärkt. (Balid, Tafish et al. 2017) zeigten etwa, dass grosse Fahrzeuge das Erdmagnetfeld lokal bis fast 10fach verstärken können. Die summierte (Vektorsumme) Exposition

von Erdmagnetfeld und HGÜ-Magnetfeld unterscheidet sich so gesehen nicht von im Alltag vorhandenen Expositionen. Über allfällige biologische oder gesundheitliche Wirkungen chronischer statischer Magnetfeldbelastungen auf tiefem Niveau fehlen, wie die (SSK 2013b) feststellt, Daten. Das wird auch mit einiger Sicherheit so bleiben, denn Forschung auf diesem Gebiet ist nicht wirklich erfolgversprechend, attraktiv und aus gesundheitlicher Sicht dringend: einerseits können keine aussagekräftigen Daten erhoben werden, wenn sich die interessierende Exposition methodisch nicht oder kaum von der Hintergrundbelastung unterscheiden lässt. Andererseits ist es auch höchst unwahrscheinlich, dass andere oder zusätzliche gesundheitliche Wirkungen, falls es denn solche gibt, zu erwarten sind.

3.1.1.3 Ko-Expositionen

Es liegen kaum Studien dazu vor. Die einzigen uns bekannten Arbeiten mit AC/DC Ko-Expositionen stammen von einer russischen Forschungsgruppe im Hinblick auf ein mögliches krebstherapeutisches Potenzial. Sie werden in Abschnitt 3.2.3 angesprochen. Betreffend Magnetfeldexpositionen von Hybridleitungen sind aus gesundheitlicher Sicht nach heutigem Stand des Wissens nur die AC-Felder zu beachten. Wie früher erwähnt (Abschnitt 2.2.6) können diese je nach Mastgeometrie und Seilkonfiguration sogar grösser sein als bei einer phasenoptimierten HDÜ-Leitung mit Doppelsystem.

3.1.2 Gesundheitliche Bedeutung von elektrischen Feldern

3.1.2.1 Elektrische AC-Felder

Elektrische Spannungen von AC-Leitungen führen in leitfähigen Materialien zu periodischen (50 Hz) Ladungsumverteilungen, in nicht-leitfähigen Materialien zu Polarisierungen. Der menschliche Körper ist für 50 Hz-Felder ein schlechter Leiter. Hohen Feldstärken Polarisieren die Körperhaare. Das ist als Vibration spürbar. Elektrische Feldstärken von 20 kV/m werden von 5 % der Menschen als störend empfunden. Sehr starke Oberflächenaufladungen führen via Influenz zu körperinternen elektrischen Feldstärken, die biologisch wirksam sein können. Die Schirmwirkung der Körperoberfläche ist allerdings gross (Faktor 10'000 bis über eine Million; (WHO 2007). Nach (Dimbylow 2005) induziert ein externes elektrisches 50 Hz-Feld pro kV/m eine Feldstärke im Hirngewebe von 1.7 – 2.6 mV/m (zur Reizung des Sehnervs sind 50 – 100 mV/m nötig, siehe oben), in der Haut von 12 – 33 mV/m. Die durch die elektrischen Felder körperintern induzierten elektrischen Feldstärken sind die gesundheitsrelevanten Dosen und werden von der ICNIRP in Form von Basisgrenzwerten limitiert.

Ist ein Körper geerdet, fliesst der induzierte Strom ab, wobei er zur Erde hin grösser wird. Umgekehrt verhält es sich mit den induzierten Feldstärken: sie sind am Kopf am höchsten, in den Füßen Null (Erdpotential). Die Grösse von Strom und elektrischem Feld sind primär von der Körpergrösse und Körperposition abhängig (siehe auch 2.2.4). Ist der Körper gegenüber Erde isoliert, fliesst der Strom nur körperintern. Am grössten ist er bei stehender Position und vertikalem elektrischem Feld (der häufigste Fall) in der Körpermitte (dort ist das elektrische Feld Null), gegen Null an Scheitel und Sohle (dort sind die elektrischen Feldstärken am grössten).

Für die Allgemeinbevölkerung sind die stärksten Felder, denen man ausgesetzt sein kann, diejenigen von HSL, wenn man auf dem Trasseee steht. Dort kann der Grenzwert von 5 kV/m erreicht werden. Die durch solche Expositionen induzierten körperinternen elektrischen Feldstärken sind grösser als die durch die Magnetfelder der HSL induzierten elektrischen Feldstärken (Friedl and Schmid 2019), liegen aber noch deutlich unterhalb der biologischen Wirkschwelle für Nervenreizung.

Alltagsexpositionen gegenüber 50 Hz-Feldern (die durchwegs massiv unterhalb des Grenzwertes von 5 kV/m liegen) induzieren keine körperinternen elektrischen Kräfte, die biologisch von Bedeutung sind. Chronische Expositionen durch HSL, wie sie im Falle von Magnetfeldern in Wohnungen die sehr nahe an einem Trasseee liegen möglich sind, gibt es für elektrische Felder wegen der Schirmwirkung der Gebäudehülle nicht. Deshalb ist das wissenschaftliche Interesse an gesundheitlichen Effekten von niederfrequenten elektrischen Expositionen gering. Verstärkt wird das geringe Forschungsinteresse auch durch die Tatsache, dass es sehr schwierig ist, die Felder zuverlässig zu messen oder zu modellieren,

weil leitende Gegenstände (wozu sowohl das Messgerät als auch der Mensch selber zählt) diese Felder stark beeinflussen. Nicht zuletzt sind auch keine Wirkmechanismen bekannt, wie schwache elektrische Felder biologisch wirken könnten (Foster 2003).

Gesundheitlich relevant sind jedoch mögliche Entladungsströme von aufgeladenen Metallstrukturen bei geerdetem Körper (oder bei nicht-geerdetem Körper Entladungsströme bei Berührung von geerdeten Teilen). Das gilt auch für DC-Felder.

3.1.2.2 Elektrische DC-Felder

Der Faraday-Effekt schirmt nicht nur bei AC sondern auch bei DC das Körperinnere wirksam von den äusseren elektrischen Feldern ab. Durch Influenz bewirkte Ladungsverschiebungen können als elektrostatische Entladungen zu spürbaren Effekten (elektrische Mikroschocks) führen. Wie bei elektrischen Wechselfeldern gilt es auch bei Gleichfeldern indirekte Entladungen grosser Metallteile über den Körper zu begrenzen bzw. zu verhindern. Ausserhalb von hochexponierten Arbeitsplätzen sind grosse Berührungsströme im Alltag nur unterhalb von HSL möglich, falls entsprechend grosse Metallelemente vorhanden und nicht ordnungsgemäss geerdet sind. Aufgrund der (von Entladungsströmen abgesehen) fehlenden gesundheitlichen Risiken elektrostatischer Felder gibt es für diese Expositionen keine Grenzwerte (siehe 2.2.1). Das Fazit der (WHO 2006), p.8:

“There are no studies on exposure to static electric fields from which any conclusions on chronic or delayed effects can be made. (...) Few studies of the acute effects of static electric field effects have been carried out. On the whole, the results suggest that the only adverse acute health effects are associated with direct perception of fields and discomfort from microshocks“.

In der aktuellsten Review zum Thema schreiben (Petri, Schmiedchen et al. 2017), p. 1:

“The weight of the evidence from the literature reviewed did not indicate that static EF have adverse biological effects in humans or animals. The evidence strongly supported the role of superficial sensory stimulation of hair and skin as the basis for perception of the field, as well as reported indirect behavioral and physiological responses. Physical considerations also preclude any direct effect of static EF on internal physiology, and reports that some physiological processes are affected in minor ways may be explained by other factors“.

3.1.2.3 Ko-Expositionen

Zu gesundheitlichen Effekten von elektrischen Feldexpositionen gegenüber Hybridleitungen liegen keine spezifischen Publikationen vor. Es scheint, dass die Feldwahrnehmung bei gemischter Exposition steigt und Expositionen gegenüber elektrischen Feldern der Grössenordnung wie sie Hybridleitungen verursachen, von sensiblen Menschen als unangenehm empfunden werden können. Die Datenlage ist jedoch dünn und es fehlen neuere Studien dazu (siehe 2.2.6). Das gilt für (allfällige) gesundheitliche Effekte generell. Mögliche Risiken müssen aus den verfügbaren Erkenntnissen im Bereich ELF sowie statische Felder – unter Berücksichtigung der relevanten Expositionen – abgeleitet werden. Vor dem Hintergrund des oben Gesagten dürften diese Risiken, wenn es sie denn gibt, klein sein.

Beachtet werden müssen im Zusammenhang mit elektrischen Feldern hingegen die indirekten Wirkungen über den Koronaeffekt. Diesen Wirkungen wird in Kapitel 4 nachgegangen.

3.1.3 Struktur des Kapitels

In den nachfolgenden Abschnitten kommt der Forschungsstand zu einzelnen gesundheitlichen Endpunkten zur Sprache. Zuerst werden aus den sehr vielen Publikationen zu 50 Hz-Magnetfeldexpositionen wichtige ausgewählte Arbeiten vorgestellt: zunächst Reviewarbeiten und Metanalysen, anschliessend Einzelstudien, die vornehmlich in den letzten 10 Jahren publiziert wurden. Dabei wird hauptsächlich auf epidemiologische Arbeiten und Humanstudien verwiesen. Vereinzelt werden auch Tier- oder Zellstudien angesprochen. Zell- und Tierstudien arbeiten häufig mit starken Expositionen, die viele

Größenordnungen oberhalb der durchschnittlichen Alltagsexposition des Menschen liegen. Im Anschluss an diese Studien werden die (meist wenigen) Erkenntnisse aus elektrischen (AC- und DC-) Expositionen und von Arbeiten mit statischen Magnetfeldern dargestellt.

Das Gewicht liegt auf Untersuchungen, die Alltagsbelastungen im häuslichen Umfeld thematisieren. Im Anhang (Kapitel 6) findet sich in Ergänzung dazu eine Darstellung des Wissens- und Forschungsstands zu beruflichen Expositionen. Eine Kurzdarstellung des Forschungsbedarfs zu gesundheitlichen Fragen rund um HSL wird im Anhang in Kapitel 7 gegeben.

Am Schluss jedes thematischen Abschnitts wird ein Fazit gezogen. Dieses besteht aus zwei Teilen: zunächst werden die zusammenfassenden Einschätzungen der Datenlage durch wichtige Expertengremien aufgelistet, sodann folgt unsere Bewertung des Wissensstandes. Bei den Expertengremien handelt es sich um folgende vier Organisationen:

die Weltgesundheitsorganisation WHO. Die WHO-Einschätzung zu gesundheitlichen Wirkungen niederfrequenter Felder finden sich im Monograph #238 der Environmental Health Criteria (WHO 2007), die Einschätzung zu statischen Feldern im Monograph #232 der Environmental Health Criteria (WHO 2006).

Die Internationale Kommission zum Schutz vor Nicht-Ionisierender Strahlung (ICNIRP). Die ICNIRP ist ein 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 EMF-Grenzwerten anerkannt. Gesundheitliche Wirkungen von niederfrequenten elektrischen und magnetischen Feldern finden sich in den Guidelines von 2010 (ICNIRP 2010), zu statischen Feldern bzw. Feldern mit Frequenzen < 1 Hz (ICNIRP 2009), (ICNIRP 2014).

Das Komitee SCENIHR (Scientific Committee on Emerging and Newly Identified Health Risks; heute umbenannt in SHEER – Scientific Committee on Health, Environmental and Emerging Risks) befasst sich mit Gesundheitsrisiken. Es hat ein laufendes Mandat der Europäischen Kommission. 2015 erschien der dritte und bislang letzte Bericht zu EMF (SCENIHR 2015).

Die deutsche Strahlenschutzkommission (SSK). Sie veröffentlicht regelmässig Bewertungen der wissenschaftlichen Literatur. Wir verwendeten die Publikationen zu Krebsrisiken (SSK 2011), zu HGÜ (SSK 2013a) und zu nichtmedizinischen Anwendungen (SSK 2019).

Ein letzter Punkt hinsichtlich der zusammenfassenden Einschätzungen: Die meisten Experten gewichten – wenn es um Aussagen zur Gesundheit geht – die Befunde aus epidemiologischen Arbeiten und aus experimentellen Humanstudien am klar stärksten. Hinweise aus Tierstudien werden selten Verallgemeinert, aus Zellstudien noch seltener. Das hat gute Gründe: einerseits besitzen Zell- und Tiermodellen teilweise völlig andere biologische Eigenschaften und Regelungssysteme, andererseits können Befunde, die aus hohen Expositionen – wie sie in Laborstudien häufig (meist) eingesetzt werden – resultierten, nicht einfach auf Alltagsexpositionen übertragen werden. Sodann ist die Heterogenität unter Laborstudien hinsichtlich der verwendeten Expositionen, Tier- oder Zellmodelle, Analysemethoden sowie Endpunkte häufig sehr gross (siehe etwa die graphische Zusammenstellung von 239 Untersuchungen auf p. 17 in (SSK 2008), was nicht nur die teilweise kontroversen Resultate erklärt, sondern auch robuste Schlussfolgerungen heikel macht. Speziell schwierig ist das bei Zellstudien. Diese dienen deshalb dazu, mögliche Wirkmechanismen auf molekularer und zellbiologischer Ebene zu untersuchen oder zu identifizieren und nicht, um einen Risikonachweis zu erbringen.

3.2 Krebs

Im Jahr 2001 hat die International Agency for Research on Cancer (IARC) 50/60 Hz Magnetfelder als möglicherweise kanzerogen bezeichnet (Kategorie 2B), basierend auf epidemiologischen Studien, welche bei chronischer Exposition gegenüber Magnetfeldern von 0.3 – 0.4 μT und darüber für kindliche Leukämie leicht erhöhte Risikoschätzer ausweisen (IARC 2002), 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.

Overall evaluation: *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)”.*

Aufgrund der fehlenden Wirkmechanismen aus Zell- und Tierstudien sowie der limitierten Evidenz von epidemiologischen Studien wird die Kausalität in der 4. Auflage des ”European Code against Cancer: ionising and non-ionising radiation and cancer” (McColl, Auvinen et al. 2015) wie folgt eingeschätzt (p. S92):

“Non-ionising types of radiation (those with insufficient energy to ionise molecules) – including extremely low-frequency electric and magnetic fields as well as radiofrequency electromagnetic fields – are not an established cause of cancer and are therefore not addressed in the recommendations to reduce cancer risk”.

Im Folgenden wird die Faktenlage nach den am häufigsten von Epidemiologen untersuchten Krebsarten bei Alltagsexpositionen dargestellt. Diese Expositionen sind in der Regel tief, so dass keine grösseren Risiken, wenn es denn solche gibt, zu erwarten sind. Aus diesem Grunde widmet sich die Mehrheit der Studien, mit Ausnahme der Arbeiten zu kindlicher Leukämie, den in aller Regel deutlich höheren Expositionen, denen gewisse Berufstätigen – etwa in der Strombranche oder im Eisenbahngewerbe – ausgesetzt sind. Die entsprechenden Befunde sind im Anhang zusammengefasst.

Es wird in diesem Kapitel auch auf Hypothesen eingegangen, die nicht direkt mit den Magnetfeldern von HSL verknüpft sind, sondern indirekt über Kontakt- bzw. Ableitströme, oder mit dem sozioökonomischen Status von Anwohnern. Eine dritte Hypothese, die sich auf Ionenströme bzw. Aerosole bezieht, wird in Kapitel 4.2 erörtert.

3.2.1 Kindliche Leukämie

3.2.1.1 Ausgangslage

Hinsichtlich der Risikofaktoren von kindlicher Leukämie ist wenig bekannt. Umweltexpositionen gegenüber ionisierender Strahlung und Benzol sind anerkannt. Nicht-ionisierende Strahlung wird als mögliches Risiko gesehen (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 Einschätzung der (IARC 2002), dass niederfrequente Magnetfelder „möglicherweise kanzerogen für Menschen“ (Gruppe 2B) sind, wurde von der (WHO 2007) übernommen und vom EU-Projekt ARIM-MORA 2016 bestätigt (Schüz, Dasenbrock et al. 2016). Die Bewertung basierte massgeblich auf den

Metaanalysen (pooled analyses) von (Greenland, Sheppard et al. 2000) und (Ahlbom, Day et al. 2000), sowie den unzureichenden Hinweisen aus Tier- und mechanistischen Studien. Gemäss den meisten Expertenberichten haben die seither publizierten Einzelstudien den statistischen Zusammenhang zwischen ELF-Magnetfeldbelastung und kindlicher Leukämie bestätigt, aber keine materiellen Hinweise auf eine kausale Wirkung geliefert. Quantitativ gesprochen: bei langfristiger erhöhter Magnetfeldbelastung durch Hochspannungsleitungen im Bereich von 0.3 – 0.4 μT und höher (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). Das bedeutet für das absolute Risiko, dass – falls ELF-Magnetfelder tatsächlich / ursächlich bei Kindern das Leukämierisiko erhöhen (Grössenordnung 50 – 100 %) – die Anzahl zusätzlicher Erkrankungen klein ist. Für Deutschland schätzte (SSK 2008), dass es um 10 Fälle pro Jahr wären.

3.2.1.2 Ausgewählte neuere Studien

Wir unterscheiden zwischen Einzelstudien, welche – meist – länderspezifische Daten erhoben haben und analysierten, und Review- bzw. Metastudien. In systematischen Reviews werden die Befunde aus Einzelstudien zusammenfassend gewürdigt, in Metaanalysen werden die (homogenen) Datensätze von Einzelstudien durch ein statistisches Zusammenfassen (poolen) als Gesamtkollektiv mit mehr Beobachtungen ausgewertet. Mit kritischem Verstand durchgeführte Reviews und Metaanalysen haben aufgrund der breiteren Datenbasis in aller Regel eine grössere Aussagekraft als eine Einzelstudie.

Review-Studien: Wichtig ist die gepoolte Analyse von (Kheifets, Ahlbom et al. 2010), in der 7 neuere Arbeiten berücksichtigt wurden (Bianchi, Crosignani et al. 2000), (Schüz, 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 (p. 1128):

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

In der gepoolten Analyse zu den Überlebenschancen und zum Rückfallrisiko von mit Leukämie diagnostizierten Kindern (Schüz, 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.

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”.

In der neuesten gepoolten Analyse haben (Amoon, Crespi et al. 2018) insgesamt 11 Registerstudien mit 30'000 Fällen und gegen 70'000 Kontrollen verwendet. Sie fanden keinen Zusammenhang zwischen dem kindlichen Leukämierisiko und der Distanz Wohnort-HSL sowie der Magnetfeldstärke. Ein tendenziell leicht erhöhtes Risiko (OR = 1.33; 95 % CI = 0.92 – 1.93) ergab sich für Wohnungen, die näher als 50 m von $> 200 \text{ kV}$ -Leitungen lagen. Die Gründe für den Befund sind gemäss Autoren unklar, insbesondere weil der Zusammenhang verschwindet, wenn man statt der Distanz die Magnetfeldstärken berücksichtigt. Das ist insofern relevant, als (Kheifets, Swanson et al. 2017) in einer auf methodische Fragen

ausgelegten Studie, die 13 publizierte Arbeiten zu HSL-Magnetfeldern berücksichtigte, gezeigt haben, dass berechnete Felder robustere Resultate liefern als „blosse“ Distanzangaben. Dennoch wurde in einer kürzlich erschienen Arbeit (Amoon, Swanson et al. 2020) darauf hingewiesen, dass berechnete Feldstärken bei AC-HSL innerhalb von 100 m Entfernung linear abnehmen und stark mit der Distanz korrelieren, so dass gilt: „each can be a proxy for the other.“

Die Review von (Habash, Gogna et al. 2019) findet für Krebs insgesamt keine klaren Hinweise auf einen Zusammenhang mit niederfrequenten Magnetfeldern.

Sodann möchten wir an dieser Stelle noch auf drei eher problematische Übersichtsarbeiten hinweisen: Eine indische Review (Kokate, Mishra et al. 2016) überzeugt methodisch nicht, da es sich in wesentlichen Teilen „nur“ um qualitative Experteneinschätzungen handelt. Interessanter ist die synoptische Analyse von (Leitgeb 2015b). Er interpretiert alle publizierten Studien unabhängig von ihrer wissenschaftlichen Qualität und Aussagekraft, um ein Gesamtbild der Risikoschätzer zu erhalten. Dieser Ansatz ist aus Untersuchungen des sog. „publication bias“ bekannt, wo mit funnel plots mögliche Publikationsverzerrungen studiert werden. Leitgeb zeigt, dass es mit zunehmender Samplegrösse der Studie einen klaren Trend hin zum Nullrisiko gibt. Weil grosse Studien in aller Regel zuverlässiger sind, ist für Leitgeb klar, dass kein Zusammenhang zwischen kindlicher Leukämie und Magnetfeldexposition existiert. Das ist allerdings nicht schlüssig, denn in grossen Studien kann die Exposition aus Gründen des Aufwands in aller Regel weniger gut erfasst werden als in kleinen Samples, was zu nicht-differenzieller Fehlklassifikation und damit zu einer Verschiebung der Risikoschätzer hin zu Eins führt. Die dritte problematische Arbeit stammt von (Carpenter 2019), die sich durch selektive Literaturlauswahl und uneinheitliche Verwendung von Risikoschätzern „auszeichnet“.

Als nächstes sollen wichtige neuere Einzelstudien zur Sprache kommen. Die dannzumal grösste 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 Neuauswertung durch die Gruppe (Kroll, Swanson et al. 2010), die Eingang in die Meta-Analyse von (Kheifets, Ahlbom et al. 2010) fand, bestätigte die Originalbefunde. Für die Konfirmation wurden für die Expositionsschätzung statt Distanzen Simulationen der Netzbelastungen verwendet und so magnetische Flussdichten für die Wohnadressen der Studienteilnehmer berechnet. Die Autoren warnen aber wiederum aufgrund der vergleichsweise wenigen Fälle vor Überinterpretationen.

Erneute Analysen mit erweitertem Datensatz (bis 2008) wurden 2014 (Bunch, Keegan et al. 2014) sowie 2016 (Bunch, Swanson et al. 2016) vorgelegt. Darin zeigte sich eine deutliche Abnahme der Risikoschätzer über die Zeit (1962 – 2008), wenn man die 4 Dezennien miteinander vergleicht. Zum gleichen Resultat kommen in der neusten Analyse dieser Art (Swanson, Kheifets et al. 2019). Auch sie halten einen realen Risikorückgang für unplausibel und sehen in den Resultaten methodische Artefakte.

Möglicherweise liegt der Grund in der Zusammensetzung der Studienkollektive, insbesondere der Kontrollen – siehe auch (Kheifets, Feychting et al. 2005). Während in der Vergangenheit viel weniger Kontrollen als Fälle rekrutiert worden sind, wurden in den letzten Dezennien gleichviele bzw. mehr Kontrollen als Fälle berücksichtigt. So kommen Bunch und Swanson zu denselben Schlussfolgerungen. Bei (Bunch, Keegan et al. 2014), p. 485, und (Bunch, Swanson et al. 2016), p. 454, heisst es:

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

“Our finding could, in principle, be caused by a bias in our control selection”.

Und (Swanson, Kheifets et al. 2019) schreiben (p. 1402):

“(...) while the epidemiological evidence is key, it is also necessary to draw from all evidence including animal studies, other laboratory studies, and consideration of biological mechanisms. Currently, all these evidentiary strands argue against health effects of magnetic fields at these exposure levels”.

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

Eine französische Arbeit (Sermage-Faure, 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 ähnliche Grössenordnung (1.4 – ebenfalls statistisch nicht signifikant) publizierte jüngst die kalifornische Studiengruppe um Leeka Kheifets (Crespi, Vergara et al. 2016). Diese Publikation war die erste einer Reihe von Arbeiten im Rahmen der California Powerline Study (CAPS). Eine zweite Arbeit fokussierte nicht auf Distanzen, sondern auf berechnete Magnetfeldstärken (Kheifets, Crespi et al. 2017). Die Resultate unterschieden sich nicht wesentlich: in der höchsten Expositions-kategorie ($\geq 0.4 \mu\text{T}$) wurde ein Risikoschätzer von 1.5 (statistisch nicht signifikant; 95 % CI = 0.7 – 3.2) berechnet. Die Autoren schlussfolgern (p. 117):

“[our study does not] provide clear evidence of risk associated with greater exposure to magnetic fields from power lines, but could be viewed as consistent with previous findings of increased risk”.

Weitere Arbeiten der Forschungsgruppe analysierten die Daten hinsichtlich der Mobilität der Fälle (Amoon, Oksuzyan et al. 2018), (Amoon, Arah et al. 2019) und in einem kürzlich veröffentlichten Artikel wurden die Bedeutungen von Distanz und berechneten Feldstärken gemeinsam modelliert (Crespi, Swanson et al. 2019). Hinsichtlich Mobilität kommt das Autorenkollektiv zur Schlussfolgerung, dass die Umzugshäufigkeit mit grosser Wahrscheinlichkeit keinen entscheidenden Einfluss auf die Risikoschätzer hat und die in vielen Studien gefundenen leicht erhöhten OR nicht plausibel erklären kann. Aus der zweiten Datenanalyse sind keine grundsätzlich neuen oder anderen Erkenntnisse hervorgegangen. Weder Magnetfelder noch Distanzen erklären für sich genommen ein höheres Risiko. Einzig die Kombination zwischen kürzester Distanz und höchster Exposition ist statistisch signifikant, allerdings basierend auf kleinen Fallzahlen (13) und ungenügender Anzahl Kontrollen (3). Fazit der Forschenden (p. 535):

“(...) within the confines of the limitations, our results argue against magnetic fields as a sole explanation for the observed association between distance to high voltage power lines and childhood leukemia, and in favor of some other explanation linked to such lines”.

Andere / weitere Studien: Keine Assoziationen mit häuslichen niederfrequenten Magnetfeldexpositionen stellten eine tschechische Untersuchung (Jirik, Pekarek et al. 2012) und eine italienische (Salvan, Ranucci et al. 2015) fest. Die Resultate der letzteren Studie sind jedoch, wie die Autoren festhalten, statistisch nicht robust. Eine Risikoerhöhung von über 2 ergab eine, allerdings nicht begutachtete, iranische Arbeit (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. Auch die Untersuchung von (Wunsch-Filho, Pelissari et al. 2011) ist in ihre Aussagekraft unklar, insbesondere weil eine Auswahlverzerrung wahrscheinlich ist, da sich nur 23 % der Fälle bereit erklärten, an der Studie mitzuwirken. Insgesamt sind / wären die publizierten Risikoschätzer sowohl auf der Basis von Distanzen zu HSL als auch von Indoor gemessenen

magnetischen Flussdichten mit einer leichten Risikoerhöhung kompatibel.

Die Arbeiten von (Hug, Grize et al. 2010) und (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. Dasselbe gilt für die Arbeit von (Keegan, Bunch et al. 2012). Auch die neueste Studie zu diesem Zusammenhang, die Metaanalyse von 12 publizierten Arbeiten von (Su, Fei et al. 2016), kam zum gleichen Schluss. Die Autoren fassen zusammen (p. 1):

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

(Bunch, 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.

3.2.1.3 Erklärungen mit indirekten Wirkungen

Zu möglichen intervenierenden Variablen wurden in den letzten Jahren verschiedentlich Studien veröffentlicht. Untersucht wurden dabei als Störgrössen der sozioökonomische Status (SES), Kontaktströme und Koronaionen. Im Folgenden kommen SES und Kontaktströme zur Sprache. Die Bedeutung von Koronaionen für das Leukämierisiko und die Gesundheit allgemein wird in Kapitel 4 erörtert.

SES: Es wurde beobachtet, dass das Leukämierisiko von Kindern in Familien mit höherem sozioökonomischem Status grösser ist. Eine Erklärung für diesen Befund könnten Infektionen sein (Eden 2010). Zwei verschiedene Argumente wurden dazu vorgebracht. Zum einen vermutete (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 auch die Kinder zu Hause ausgesetzt sind. Auch höhere Mobilität von Haushalten führt zu mehr Sozialkontakten. Zum anderen postulierte (Greaves 2006), 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, wie gegenwärtig die Koronapandemie überdeutlich zeigt).

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 (Adam, Rebholz, et al, 2008). Es ist daher nicht plausibel, dass SES einen solch stark konfundierenden Einfluss haben kann, da ein allfälliger Zusammenhang zwischen SES und Kinderleukämie schwach ist. (Swanson 2013) prüfte mit Daten aus U.K., ob die Mobilität im Umfeld von HSL grösser ist, was die These von Kinlen stützen würde, kam aber zu einem falsifizierenden Befund. Auch die Analyse von (Kheifets, Crespi et al. 2017) mit den Daten der CAPS-Studie aus Kalifornien kommt zum Schluss, dass SES keinen grossen Einfluss auf die Risikoschätzer hat, aber in Studien kontrolliert werden sollte. Die jüngsten Publikationen der Gruppe haben das bestätigt (Amoon, Oksuzyan et al. 2018), (Amoon, Arah et al. 2019), (Crespi, Swanson et al. 2019) – siehe 3.2.1.2.

Kontaktströme: Anfang der 2000er Jahre wurde von Kavet und Kollegen die Hypothese vorgebracht, dass Kontaktströme (insbesondere Kriechströme auf leitfähigen Wasserrohren) das Leukämierisiko im Umfeld von Hochspannungsleitungen erklären könnten – siehe etwa: (Kavet, Hooper et al. 2011).

Leukämie entsteht im blutbildenden System (Knochenmark), indem die normale Entwicklung von Blutzellen im noch nicht ausgereiften Stadium entartet. Ein körperlnternes Feld von 0.1 V/m kann in den Zellen des Binde- und Stützgewebes Membranspannungen von 0.1 – 1 mV aufbauen (Kavet, Bailey et al. 2008), (Dawson, Caputa et al. 2001), (Chiu and Stuchly 2005). Nach (NIEHS 1999) reicht 1 mV für eine biologische Wirkung auf die Zellmembran (etwa Beeinflussung der Signalübermittlung), laut (WHO (2007) müssen es dagegen mindestens 10 mV sein.

Ist ein Haus durch Kriechstrom auf Wasserrohren belastet, so ist der elektrische Strom, der über ein badendes Kind fließt, das eine Wasserarmatur berührt, zwar über alles gesehen klein, könnte aber im Knochenmark des Unterarms eine Stärke erreichen, die biologische Prozesse beeinflussen 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 0.5 – 1 V/m für Nervengewebe (zum Vergleich: ein externes 10 µT starkes 50 Hz-Magnetfeld induziert ein 1000 bis mehrere 1000 Mal schwächeres elektrisches Feld im Knochenmark). Die Variabilität unter den dosimetrischen Simulationen ist jedoch recht gross – vgl. etwa mit (Tarao, Kuisti et al. 2012) – und die Daten sind deshalb mit der gebührenden Vorsicht zu betrachten. Die Gültigkeit der Kontaktstrom-Hypothese ist wissenschaftlich nicht bewiesen und relevante epidemiologische Daten zum postulierten Zusammenhang liegen keine vor.

Eine epidemiologische Studien in Kalifornien bei 245 Kindern mit Leukämie und 269 Kontrollen fand keinen diesbezüglichen Zusammenhang (Does, Scelo et al. 2011). Aufgrund der kleinen Fallzahlen, ist die Studie jedoch nicht aussagekräftig für ein allfällig kleines Risiko.

3.2.2 Andere Krebsarten

3.2.2.1 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), (Schüz, Kaletsch et al. 2001), (Kroll, Swanson et al. 2010), (Saito, Nitta et al. 2010). Die Fälle wurden in 5 Expositions-kategorien mit Schritten von jeweils 0.1 µT eingeteilt. Die Autoren kamen 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 kommen (Schüz 2011) und (Bunch, Keegan et al. 2014). Bunch und Kollegen untersuchten an derselben Population auch den Zusammenhang mit Magnetfeldexpositionen von unterirdisch verlegten Hochspannungskabeln (Bunch, Swanson et al. 2015). 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 Expositions-kategorie. Signifikante Assoziationen ergaben sich u.a. zu aromatischen Kohlenwasserstoffen

wie Benzol, jedoch nicht zu ELF-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. Auch (Keegan, Bunch et al. 2013) konnte keinen Zusammenhang zwischen elterlicher ELF-Magnetfeldbelastung und Hirntumoren der Kinder feststellen. 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.

In der britischen Studie von (Kendall, Bunch et al. 2020) mit 5'369 pädiatrischen Sarcomas, welche zwischen 1962 und 2010 diagnostiziert wurden, war väterliche Exposition am Arbeitsplatz ein Risikofaktor (OR = 1.67, 95 % CI = 1.22 – 2.28). Jedoch könnte es sich gemäss Autoren um einen Zufallsbefund handeln, da sehr viele Risikofaktoren evaluiert wurden.

In der Metaanalyse von (Su, Zhao et al. 2018) mit dem Fokus auf Tumore des Nervensystems (ZNS-Tumore und Neuroblastome) errechneten die Autoren einen knapp statistisch signifikanten Zusammenhang zwischen mütterlicher Exposition während der Schwangerschaft und ZNS-Tumoren (OR = 1.13; 95 % CI = 1.02 – 1.27). Berücksichtigt man nur Studien mit einer quantitativen Expositionsabschätzung, verschwindet die Assoziation.

(Auger, Bilodeau-Bertrand et al. 2019) studierten an einer grossen Kohorte von gegen 800'000 Kindern und über 1000 Fällen (aller Arten von Krebs), ob es einen Zusammenhang zwischen Krebs bei Kindern und Magnetfeldexpositionen von HSL oder Transformatorstationen gibt. Für HSL wurde kein Zusammenhang gefunden, jedoch war bei Wohnort innerhalb von 80 m zu einem Unterwerk das Erkrankungsrisiko für alle Kinderkrebsarten (1.08; 95% CI = 0.98 – 1.20), für Tumore des blutbildenden Systems (1.04; 95% CI = 0.88 – 1.23) und für solide Tumore (1.11; 95% CI = 0.99 – 1.25) erhöht. Die Autoren interpretieren die Ergebnisse folgendermassen (p. 1):

“Residential proximity to transformer stations is associated with a borderline risk of childhood cancer, but the absence of an association with transmission lines suggests no causal link”.

3.2.2.2 Tumore bei Erwachsenen

Studien zu Leukämien und Lymphomen bei Erwachsenen unter häuslicher Magnetfeldbelastung liegen erst wenige vor. Breiter ist die Datenbasis für berufliche Exposition (siehe Kapitel 6). (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. Die Daten sind schwierig zu interpretieren, denn die hohen Risiken (Expositionszeitpunkt im Alter 0 – 15 Jahre) beziehen sich auf einen Korridor bis 300 m von der Hochspannungsleitung entfernt. Die meisten Fälle waren also wenig bis kaum exponiert. In einer brasilianischen Studie berechneten (Marcilio, Gouveia et al. 2011) für die Leukämie (n = 1'857) eine (statistisch nicht signifikante) Risikoerhöhung (OR = 1.47) für Wohnlagen < 50 m von der nächsten Hochspannungsleitung entfernt.

In der grossen Fall-Kontroll-Studie aus dem Vereinigten Königreich (Elliott and Toledano 2013) wurden die Risiken von vier Krebsarten bei Erwachsenen, darunter auch Leukämien, in Abhängigkeit von Hochspannungsleitungen untersucht. Gegen 8'000 Leukämiefälle wurden eingeschlossen. Es zeigte sich kein erhöhtes Risiko.

Hinsichtlich Hirntumorrisiken bei Erwachsenen liegen drei neuere Studien vor. In der französischen CERENAT Fall-Kontrollstudie wurde basierend auf 490 Hirntumorpatienten – diagnostiziert zwischen 2004 und 2006 – und 980 Kontrollen für Personen mit Wohnsitz näher als 50 m von einer Hochspannungsleitung Hinweise für ein erhöhtes Risiko gefunden (Carles, Esquirol et al. 2020). In einer brasilianischen Studie (Marcilio, Gouveia et al. 2011) und insbesondere in der grossen britischen Fall-Kontrollstudie (Elliott and Toledano 2013) fanden sich jedoch keine Zusammenhänge zwischen Hirntumorrisiko und häuslicher Magnetfeldbelastung. (Schüz 2013) mahnt hinsichtlich der Übungsanlage dieser Arbeiten zu

einer gewissen Zurückhaltung bei der Interpretation, denn die Resultate können nur zum Nennwert genommen werden, wenn die Risiken der als Kontrollen verwendeten Krebsarten nicht mit niederfrequenten Magnetfeldern assoziiert sind. Wäre das der Fall, könnten grundsätzlich keine Risikoanstiege nachgewiesen werden, selbst wenn es diese gäbe.

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 bei Frauen (n = 29'902) kein erhöhtes Brustkrebsrisiko errechnet. Die Autoren kommen (auch für Leukämien und Brustkrebs bei Männern) zur Schlussfolgerung (p.189):

“In summary, our results do not support an epidemiologic association of adult cancers with proximity to residential magnetic fields from high-voltage overhead power lines. Unless new biologic hypotheses emerge, our findings should help to settle a long-standing debate on the safety of residential exposures to extremely low-frequency magnetic fields from high-voltage overhead power lines and adult cancers”.

(Kato, Young et al. 2015) untersuchten in einer sehr grossen Studie den Zusammenhang zwischen Schilddrüsenkrebs bei Frauen und der Exposition gegenüber Magnetfeldern von Heizdecken. Sie fanden keine Hinweise auf eine Risikoerhöhung aus dem Gebrauch elektrischer Heizdecken.

Eine Metastudie (Zhang, Lai et al. 2016), die 42 Arbeiten einschliesst, allerdings nicht explizit zwischen Kindern und Erwachsenen, Beschäftigten und allgemeiner 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 Studien aus den USA (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. Die Review von (Habash, Gogna et al. 2019) findet für Krebs insgesamt keine klaren Hinweise auf einen Zusammenhang mit niederfrequenten Magnetfeldern.

3.2.3 Hinweise von elektrischen AC-Feldern und DC-Expositionen

Es werden generell keine gesundheitlich negativen Wirkungen von niederfrequenten (50/60 Hz) elektrischen Feldern sowie von elektrostatischen und magnetostatischen Feldern bei häuslichen Durchschnittsexpositionen erwartet. Biologische Effekte sind erst bei hohen Feldstärken deutlich über den Grenzwerten belegt. Deshalb liegen zu Alltagsexpositionen nur wenige Daten vor. Humanexperimente

sind aus ethischen Gründen nicht zulässig.

Hinsichtlich elektrischen 50 Hz-Feldern und Krebsrisiken werden in der Review der (WHO 2007) keine epidemiologischen Studien diskutiert. Die gelisteten Arbeiten thematisieren ausschliesslich AC-Magnetfelder. Auch werden keine in-vivo und in-vitro Studien zur Kanzerogenität und Genotoxizität von niederfrequenten elektrischen Feldern erwähnt. Die Schlussfolgerung der (WHO 2007), mit Bezug auf die Einschätzung der (IARC 2002), lautet (p. 257):

„There is inadequate evidence in humans for the carcinogenicity of (...) extremely low-frequency electric fields. (...) Extremely low-frequency electric fields are not classifiable as to their carcinogenicity to humans”.

Auch (ICNIRP 2010) und der fast 10 Jahre nach der WHO Publikation erschiene ausführliche Bericht von (SCENIHR 2015) thematisieren niederfrequente elektrische Felder nicht. (Kheifets, Renew et al. 2010) fassten in einem Review-Artikel 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”.

(SSK 2011) verweist u.a. auf diese Metaanalyse und einige weitere (in-vitro und in-vivo) Studien und kommt zum Schluss (p. 57):

„Angesichts der fehlenden Wirkmodelle und der fehlenden Evidenz für eine Dosiswirkung sowie der starken Schirmwirkung des Körpers für externe elektrische Felder ergibt sich trotz der widersprüchlichen Datenlage bei epidemiologischen Studien insgesamt für niederfrequente elektrische Felder keine Evidenz für einen Zusammenhang mit Krebserkrankungen einschliesslich Leukämie im Kindesalter”.

Zu statischen Feldern liegen – nicht zuletzt wegen fehlenden bzw. seltenen (akuten) Expositionen oberhalb der natürlichen Feldstärken – keine verwertbaren Humanstudien mit Alltagsexpositionen vor. Die vorhandenen Arbeiten zu statischen Expositionen beziehen sich auf berufliche Belastungen am Arbeitsplatz oder in medizinischen Kontexten (siehe Kapitel 6). Das Fazit der (WHO 2007), wiederum mit Bezug auf die IARC, lautet (p. 257):

„There is inadequate evidence in humans for the carcinogenicity of static electric or magnetic fields”.

Die Einschätzung der (SSK 2011) betreffend Alltagsexpositionen gegenüber statischen Magnetfeldern (p. 59):

„Auch wenn bei starken magnetostatischen Feldern im Bereich über einigen 100 mT Hypothesen für physikalische und biologische Modelle für eine Karzinogenität existieren und die Beeinflussung von chemischen Reaktionen und der Enzymaktivität gezeigt werden konnten, ergibt sich insgesamt für die um Größenordnungen niedrigeren Expositionen im Alltag für magnetostatische Felder keine Evidenz dafür, dass es einen Zusammenhang zwischen der Exposition und Krebserkrankungen gibt”.

(SCENIHR 2015) behandelt Alltagsexpositionen gegenüber DC-Magnetfelder im Zusammenhang mit Krebs nicht mehr, sondern fokussiert nur noch auf akute Wirkungen von Expositionen im hohen mT und T-Bereich, insbesondere im Zusammenhang mit MRI und Arbeitsplatzbelastungen. Auch (ICNIRP 2009) listet nur Arbeiten zu beruflichen Expositionen.

Ähnlich sieht die Studienlage betreffend Alltagsexpositionen gegenüber elektrostatischen Feldern aus. Die (SSK 2011) bringt es mit folgendem Zitat auf den Punkt (p. 60):

„Wegen fehlender plausibler physikalischer und biologischer Wirkungsmechanismen und dem Umstand, dass das Körperinnere vor äusseren elektrostatischen Feldern nahezu völlig abgeschirmt ist, ist ein Zusammenhang mit Krebserkrankungen nicht plausibel und wurde daher auch nicht systematisch

mit unterschiedlichen wissenschaftlichen Ansätzen oder verschiedenen biologischen Endpunkten untersucht (...) Insgesamt ergibt sich für elektrostatische Felder Evidenz dafür, dass es keinen Zusammenhang der Exposition gegenüber den Feldern und Krebserkrankungen gibt“.

Die (WHO 2006) stellt fest (p.8):

“There are no studies on exposure to static electric fields from which any conclusions on chronic or delayed effects can be made”.

Ko-Expositionen: Zu kombinierten Expositionen AC/DC liegen kaum Studien vor. Eine russische Forschungsgruppe widmet sich seit längerer Zeit dem Thema mit therapeutischen Zielen. Sie zeigte in Tierversuchen (Mäuse), dass vergleichsweise schwache Magnetfeld-Ko-Expositionen (statische Felder 30 – 150 μT , AC-Expositionen 0.04 – 0.5 μT) das Tumorstadium hemmen und die Überlebensraten von erkrankten Tieren erhöhen. Die verwendeten AC-Felder hatten Frequenzen im Bereich 2 – 20 Hz (ausgewählte Larmfrequenzen von biologisch relevanten Ionen). Bei gesunden Tieren zeigten sich keine (negativen) Effekte (Novikov, Novikov et al. 2009), (Novoselova, Novikov et al. 2019).

3.2.4 Fazit

3.2.4.1 Bewertung durch WHO, ICNIRP, SCENIHR und SSK

Die WHO Einschätzung entspricht derjenigen der Internationalen Krebsforschungsagentur IARC, die zur Weltgesundheitsorganisation gehört. Ihr Fazit (WHO 2007), p. 9ff:

“The IARC classification of ELF magnetic fields as “possibly carcinogenic to humans” (IARC 2002) 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 (...) the evidence for an association between ELF magnetic field exposure and the risk of female breast cancer is weakened considerably and does not support an association of this kind. In the case of adult brain cancer and leukaemia, the new studies published after the IARC monograph do not change the conclusion that the overall evidence for an association between ELF magnetic fields and the risk of these diseases remains inadequate (...) Thus, on balance, the evidence is not strong enough to be considered causal, but sufficiently strong to remain a concern”.

Zur Gesamteinschätzung von „möglicherweise kanzerogen“ geführt haben die Tatsachen, dass hinsichtlich aller nicht-leukämischen Krebsarten (bei Kindern wie bei Erwachsenen) keine verwertbaren Hinweise auf eine krebsfördernde Wirkung von ELF-Magnetfeldern vorlagen (inadequate evidence) und dass aus Tiermodellen keine relevanten Daten zu kanzerogenen Wirkungen von NF-EMF gefunden wurden.

Aus Sicht der ICNIRP sind die Hinweise für einen Zusammenhang zwischen kindlicher Leukämie und chronischer niederfrequenter Magnetfeldexposition zu schwach, um Kausalität zu postulieren. Das gälte noch deutlicher für Krebsrisiken von Erwachsenen. Zur Festsetzung der Grenzwerte wurden diese Hinweise deshalb nicht berücksichtigt. (ICNIRP 2010), p. 823:

“There may be a weak association between the higher levels of exposure to residential 50–60 Hz magnetic fields and childhood leukemia risk, although it is unclear whether it is causal (...) At the same time, no biophysical mechanism has been identified and the experimental results from the animal and cellular laboratory studies do not support the notion that exposure to 50–60 Hz magnetic fields is a cause of childhood leukemia”.

(SCENIHR 2015) schlussfolgert, p. 226:

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

findings, which, together with shortcomings of the epidemiological studies prevent a causal interpretation”.

Über einen möglichen Zusammenhang 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 die Deutsche Strahlenschutz Kommission eine andere Haltung ein als IARC und WHO, welche die Assoziation als belegt (statistisch, nicht kausal) betrachten. Die Argumentation der SSK basiert auf ihrer Einschätzung, dass ein physikalisches Wirkmodell unbekannt sei, Daten und theoretische Kenntnisse für einen möglichen Dosis-Wirkungs-Zusammenhang fehlen und aus in-vitro und in-vivo Studien keine (kindliche Leukämie) oder widersprüchliche (andere Krebserkrankungen bei Kindern und Erwachsenen) Daten vorlägen. Entsprechende Ursachenforschung beurteilt die SSK als anspruchsvoll (SSK 2017).

Hinsichtlich der anderen EMF-Felder (elektrische und DC-Magnetfelder) sehen alle Organisationen keine Hinweise auf möglicherweise erhöhte Risiken bei Alltagsexpositionen, wie sie auch von HSL ausgehen können, bzw. halten solche für sehr unwahrscheinlich. Die WHO betont, dass aufgrund der dünnen Datenlage eine wissenschaftliche Beurteilung kaum möglich sei.

3.2.4.2 Einschätzung FSM

Eine besondere Schwierigkeit bei der Erforschung von niederfrequenten Magnetfeldern und dem kindlichen Leukämierisiko ist, dass die Expositionssituation und die Krankheit sehr selten sind. Einzelne Studien finden selten einen signifikanten Zusammenhang. In Metaanalysen zeigen gepoolte Risikoschätzer jedoch recht konsistent in Richtung erhöhtes Risiko in der höchsten Expositions-klasse. Das ist auch das Fazit des ARIMMORA Projekts der EU (Schüz, Dasenbrock et al. 2016), und der meisten in den letzten Jahren publizierten Studien. Insgesamt bleibt damit die Einschätzung der IARC, dass niederfrequente Magnetfelder „möglicherweise kanzerogen“ sind, aktuell. Es scheint jedoch, dass Magnetfelder (allein) die Assoziation nicht erklären und alternative Modelle (Infektionsrisiko, Aerosole, Kontaktströme) keine belastbaren Erklärungen liefern (für eine Hypothese, die sich am Radikalpaar-Mechanismus orientiert, siehe: (Juutilainen, Herrala et al. 2018). Eine empirisch fundierte Begründung des statistischen Befunds fehlt damit weiterhin.

Einzelne Wissenschaftler vertreten allerdings pointiertere Meinungen. Die in der BioInitiative vertretenen Experten äussern sich kritisch gegenüber der IARC. Michael Kundi etwa schreibt im neuesten Report (BioInitiative 2012); 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. Die Expositionserfassung ist in der Tat eine zentrale Schwierigkeit bei allen hier zitierten epidemiologischen Arbeiten. 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: das Fehlen von überzeugenden Daten aus Tier- und Zellversuchen sowie 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 einzustufen, nachvollziehbar. Die Forschung der letzten 10 Jahre hat an dieser Einschätzung nicht grundsätzlich gerüttelt.

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 Deutschland wird von der SSK auf ca. 10 Neuerkrankungen pro Jahr geschätzt. Ein Grund für diese „kleine“ Zahl ist, dass nur wenige Kinder gegenüber magnetischen Flussdichten von mehr als $0.4 \mu\text{T}$ exponiert sind und dass Leukämieerkrankungen selten sind. Schlussfolgerungen für das Risikomanagement sind uneinheitlich (Maslanyj, Lightfoot et al. 2010).

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 Mehrheit der Studien untersuchte berufliche Expositionen. Die Resultate dazu finden sich im Anhang (Kapitel 6).

Bezüglich Leukämien und Lymphomen bei Erwachsenen kann man insgesamt von Verdachtsmomenten sprechen.

Was das Hirntumorrisiko anbelangt, 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, obwohl mit der kürzlich publizierte CERENAT-Studie sich die Ungewissheit etwas erhöht hat.

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

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

Nicht-epidemiologische Laborstudien sind uneinheitlich. Jüngere Metaanalysen von Zellstudien zeigen, dass ein biologischer Einfluss von ELF-Magnetfeldern auf das Genom und die Apoptose nicht ausgeschlossen werden kann (Maes and Verschaeve 2016), (Mansourian, Marateb et al. 2016). Die Sachlage ist allerdings komplex und schwierig interpretierbar, wie auch die jüngste Arbeit im Rahmen des ARIM-MORA-Projekts gezeigt hat (Manser, Sater et al. 2017).

Andere als AC-Magnetfeld Expositionen: Hinsichtlich elektrischer AC-Felder und statischer Felder von HSL ist die Datenlage dünn bzw. entwarnend. Da innerhalb von auch nahe bzw. unmittelbar an Hochspannungstrassen gelegenen Wohnungen die Feldstärken sehr tief sind, sowohl was die elektrischen Felder als auch die DC-Magnetfelder anbelangt, sind chronische Expositionen kaum von der Hintergrundbelastung zu unterscheiden. Vor diesem Hintergrund ist eine kanzerogene der krebspromovierenden Wirkungen nach heutigem Stand des Wissens nahezu ausgeschlossen. Dasselbe gilt für kombinierte Expositionen von Hybridleitungen.

3.3 Neurodegenerative Erkrankungen

3.3.1 Ausgangslage

Neurodegenerative Erkrankungen sind typische Alterserkrankungen. Aufgrund der steigenden Lebensdauer rechnet man damit, dass diese Erkrankungen in wenigen Jahrzehnten zu den häufigsten Todesursachen zählen werden. Zu den untersuchten möglichen Umwelteinflüssen gehören elektromagnetische Felder – siehe dazu: (Killin, Starr et al. 2016), (Terzi, Ozberk et al. 2016), (Consales, Merla et al. 2012). Im vorliegenden Zusammenhang interessieren vor allem niederfrequente Expositionen. Ihr möglicher Einfluss wurde v.a. bei beruflich Exponierten untersucht. Entsprechende Befunde sind im Kapitel 6 zusammengestellt. Es liegen aber auch Studien zu Alltagsexpositionen (primär HSL) in der Bevölkerung vor. Im Zentrum des Interesses stehen Alzheimer und ALS (amyotrophe Lateralsklerose). Diese zwei Erkrankungen zeigen, im Gegensatz zu anderen neurodegenerativen Endpunkte wie Parkinson oder MS (multiple Sklerose), in einzelnen Studien erhöhte Risiken. Es handelt sich deshalb um einen wissenschaftlichen Verdacht, der sich erst noch verdichten müsste, um von einem Risiko sprechen zu können.

Erwähnt werden soll einleitend und in diesem Zusammenhang auch die Tatsache, dass in der transkraniellen Stimulation starke niederfrequente Magnetfelder (im mT Bereich) oder elektrische Gleichströme u.a. zur Therapie von neurodegenerativen Erkrankungen eingesetzt werden. Wie eine Review zu diesem Gebiet zeigt (Guerriero and Ricevuti 2016), könnten verschiedene neuroprotektive Mechanismen für die therapeutischen Wirkungen zuständig sein. Der Nachweis- und Forschungsbedarf ist noch gross. Insbesondere gilt es auf zellulärer Ebene mögliche Mechanismen zu identifizieren und zu verstehen – siehe dazu etwa: (Maes and Verschaeve 2012), (Benassi, Filomeni et al. 2016), (D'Angelo, Costantini et al. 2015) –, um potenziell schädliche als auch potenziell protektive und kurative Wirkungen von ELF-Expositionen zu erkennen. Die sehr ausgedehnte Literatur zu therapeutischen Anwendungen wird hier nicht berücksichtigt, da die Expositionen um viele Grössenordnungen oberhalb derjenigen gegenüber HSL liegen.

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”.

Die Beurteilung beruht wesentlich auf beruflicher Exposition. Inzwischen liegen auch Bevölkerungsstudien vor. 2009 publizierten (Huss, Spoerri et al. 2009) eine Analyse zur Schweiz. Es wurde der Zusammenhang zwischen den verbreitetsten neurodegenerativen Erkrankungen und der Exposition gegenüber Hochspannungsleitungen (220 – 380 kV Leitungen) bezüglich Mortalitätsrisiko studiert. Die Resultate zeigten erhöhte Alzheimer-Risiken in einem Korridor bis 50 m zum Leitungstrasse (HR = 1.24; 95 % CI = 0.80 – 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, in der alle Leitungen ≥ 132 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 erhöhten, 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 Studie war, waren nur 5 Fälle innerhalb von 50 m von einer Höchstspannungsleitung (>

200 kV) aufgetreten. Das entsprechende Risiko war leicht aber nicht signifikant erhöht.

Die neueste Studie (Gervasi, Murtas et al. 2019), welche den Zusammenhang zwischen HSL und Alzheimer untersuchte, wurde in der Region Mailand durchgeführt. Es zeigte sich ein leicht erhöhtes, aber statistisch nicht signifikantes Risiko von $OR = 1.11$ (95 % CI = 0.95 – 1.3). Die Autoren (p.1949):

“The finding of a weak association between exposure to the extremely low frequency magnetic field and neurodegenerative diseases suggests the continuation of research on this topic”.

Die Review von (Habash, Gogna et al. 2019) findet für Alzheimer Hinweise für einen Zusammenhang, allerdings werden häusliche und berufliche Expositionen insgesamt beurteilt.

Bevölkerungsstudien zu Magnetfeldbelastungen durch Hochspannungsleitungen und Demenz im allgemeinen (bzw. neurodegenerative Erkrankungen generell) 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, Poulsen 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 ALS

In der Beurteilung der (WHO 2007) ist die Evidenz für einen Zusammenhang zwischen niederfrequenten Magnetfeldern und ALS (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”.

Die meisten publizierten Arbeiten betreffen Beschäftigte, die beruflich gegenüber niederfrequenten Magnetfeldern exponiert sind (siehe Kapitel 6). Studien zur Exposition der Allgemeinbevölkerung liegen fünf 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 neuesten Arbeiten sind von (Seelen, Vermeulen et al. 2014) und von (Vinceti, Malagoli et al. 2017), beides bevölkerungsbasierte Fall-Kontroll-Studie. Weder für Hoch- (50 – 150 kV) noch für Höchstspannungsleitungen (220 – 380 kV) zeigten sich bei Seelen und Kollegen in den untersuchten Distanzkorridoren (Grenzen: 50 m, 200 m, 600 m) Auffälligkeiten. Vicenti und Kollegen modellierten die Magnetfeldstärke ($< 0.1 \mu T$, $0.1 - 0.2 \mu T$, $> 0.2 - 0.4 \mu T$, $> 0.4 \mu T$). Es wurden keine Zusammenhänge gefunden. Allerdings gilt es zu betonen, dass es sich um eine sehr seltene Erkrankung handelt und deshalb nur sehr wenige Fälle in die Analysen eingegangen sind; maximal 10 in der Studie von (Huss, Spoerri et al. 2009). Eine Metaanalyse dieser Arbeiten kommt denn auch zum nicht überraschenden Befund, dass es keine Hinweise auf ein erhöhtes, durch Magnetfelder von HSL verursachtes Risiko für ALS gibt (Rösli and Jalilian 2018), p. 1):

“Overall, we found no evidence for an association between residential exposure to ELF-MF and the risk of ALS, although the number of exposed cases is low”.

3.3.4 Andere neurodegenerative Erkrankungen

Ob niederfrequente Magnetfelder das Risiko, an Parkinson zu erkranken oder frühzeitig daran zu sterben erhöhen, wurde in mehreren Untersuchungen mit beruflich Exponierten geprüft. Die Daten sprechen dagegen (siehe Kapitel 6).

Bei den drei bevölkerungsbasierten Studien von (Huss, Spoerri et al. 2009), (Frei, Poulsen et al. 2013)

und (Gervasi, Murtas et al. 2019) zeigten sich keine oder kaum erhöhte Risiken. In dieselbe Richtung weist der Befund von (van der Mark, Vermeulen et al. 2015). Sie untersuchten in einer spitalbasierten Fall-Kontroll Studie den möglichen Zusammenhang zwischen Parkinson und der kombinierten beruflichen (elektrische Schläge) und privaten Exposition (Gebrauch von elektrischen Geräten und Maschinen) und fanden keine Belege dafür.

Nur zwei bevölkerungsbasierte Arbeiten gibt es zu Multipler Sklerose im Zusammenhang mit niederfrequenten Magnetfeldexpositionen: die Studien (Huss, Spoerri et al. 2009) und (Frei, Poulsen et al. 2013) stellten keine erhöhten Risiken fest.

Zwei Forschergruppen widmeten sich der Frage eines möglichen Zusammenhangs der Krankheit bzw. der Krankheitsschübe mit geomagnetischen Veränderungen (Sonnenaktivität) und stellen, bei unterschiedlichen "Inkubationszeiten", eine Assoziation fest (Abdollahi and Sajedi 2014), (Kargiotis, Preka-Papadema et al. 2017). (Papathanasopoulos, Preka-Papadema et al. 2016) spekuliert dabei über einen denkbaren Zusammenhang via reaktive Sauerstoffspezies (ROS). In den letzten Jahren wurde der Frage, ob schwache Magnetfelder (Erdmagnetfeld, niederfrequente Magnetfelder) die ROS Bildung via Radikalpaar-Mechanismus begünstigen, verschiedentlich nachgegangen. Für eine neuere Publikation zu dieser Frage mit Bezug zu Alterserkrankungen und neurodegenerativen Prozessen siehe (Liguori, Russo et al. 2018) oder – etwas älter – (Mattsson and Simkó 2012) und (Phaniendra, Jestadi et al. 2015). Der Zusammenhang zwischen MS, ROS und geomagnetischen Veränderungen ist wissenschaftlich nicht belegt, sondern eine Vermutung.

3.3.5 Hinweise von elektrischen AC-Feldern und DC-Expositionen

Es werden generell keine gesundheitlich negativen Wirkungen von niederfrequenten (50/60 Hz) elektrischen Feldern sowie von elektrostatischen und magnetostatischen Feldern bei häuslichen Durchschnittsexpositionen erwartet. Biologische Effekte sind erst bei hohen Feldstärken deutlich über den Grenzwerten belegt. Deshalb liegen zu Alltagsexpositionen nur wenige Daten vor.

Elektrische AC-Felder werden von der (WHO 2007) im Zusammenhang mit neurodegenerativen Erkrankungen nicht thematisiert. Die relevanten epidemiologischen Studien beziehen sich auf AC-Magnetfelder und auf Kontaktströme bzw. elektrische Schläge. In-vivo und in-vitro-Studien mit 50 Hz elektrischen Feldern werden ebenfalls nicht thematisiert. (ICNIRP 2010) spricht nur von niederfrequenten Expositionen und differenziert nicht zwischen elektrischen und magnetischen Feldern (die Literaturverweise beziehen sich jedoch auf Magnetfelder), und in der umfassenden Wissenszusammenstellung von (SCENIHR 2015) werden elektrische 50 Hz-Wechselfelder im Zusammenhang mit neurodegenerativen Erkrankungen nicht behandelt. Auch in der kritischen Review von (Belyaev, Dean et al. 2016) sind keine Studien erwähnt.

Zu statischen Feldern liegen – nicht zuletzt wegen fehlenden bzw. seltenen (akuten) Expositionen oberhalb der natürlichen Feldstärken – keine verwertbaren Humanstudien zu Alltagsexpositionen vor.

3.3.6 Fazit

3.3.6.1 Bewertung durch WHO, ICNIRP, SCENIHR und SSK

Die WHO bewertet den Zusammenhang zwischen neurodegenerativen Erkrankungen und ELF-Magnetfeldern wie folgt. (WHO 2007), p. 7:

"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 (...)

Für die ICNIRP sind die Hinweise auf einen Zusammenhang nicht schlüssig. (ICNIRP 2010), p. 822:

“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”.

Nicht grundsätzlich anders lautet die Einschätzung von (SCENIHR 2015), p. 226:

“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”.

Die SSK hat in ihrem Bericht zu nicht-medizinischen EMF-Anwendungen (SSK 2019) das Thema im Anhang angesprochen, aber nicht bewertet (p. 63):

“Ein möglicherweise erhöhtes Risiko für die Alzheimer-Demenz fand auch eine Schweizer Studie bei der Allgemeinbevölkerung, die in einer Entfernung von weniger als 50 Metern zu einer Hochspannungsleitung (220 kV bis 380 kV) wohnen (Huss et al.2009). Das Risiko steigt zusätzlich mit der Wohndauer. Eine Studie aus Dänemark, die mit einem sehr ähnlichen methodischen Ansatz durchgeführt wurde, konnte die Ergebnisse nicht in vollem Umfang bestätigen (Frei et al. 2013)”.

Studien zu anderen EMF-Expositionen von HSL (elektrische Felder und DC-Magnetfelder) werden von den Organisationen im Zusammenhang mit neurodegenerativen Erkrankungen keine diskutiert.

3.3.6.2 Einschätzung FSM

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 fünf 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 Todesscheinen gearbeitet haben, Demenzerkrankungen untervertreten sind, was eine zusätzliche Fehlerquelle bedeutet. 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 Zurückhaltung interpretiert werden müssen.

Ein vorsichtig formuliertes Gesamtbild sieht folgendermassen aus: Es ist unwahrscheinlich, dass niederfrequente Magnetfeldexpositionen gegenüber HSL das Risiko von ALS, Parkinson und MS erhöhen. Für Alzheimer, allenfalls auch für andere Demenzerkrankungen, deuten vereinzelte Studien auf ein mögliches Risiko von erhöhten Alltagsexpositionen hin, allerdings ist die Datenlage dünn. In den im ersten Kapitel zitierten Review-Berichten wird auf die uneinheitlichen Resultate zu Alzheimer hingewiesen. Es handelt sich deshalb um einen wissenschaftlichen Verdacht, der sich erst noch verdichten müsste, damit man von einem Risiko sprechen kann.

Andere als AC-Magnetfeld Expositionen: Aufgrund fehlender Humanstudien kann keine datenbasierte Aussage zu Expositionen gegenüber elektrischen AC-Feldern und statischen Feldern von HSL gemacht werden. Da innerhalb von auch nahe bzw. unmittelbar an Hochspannungstrassen gelegenen Wohnungen die Feldstärken sehr tief sind, sowohl was die elektrischen Felder als auch die DC-Magnetfelder anbetrifft, sind chronische Expositionen kaum von der Hintergrundbelastung zu unterscheiden. Vor diesem Hintergrund ist ein allfälliges Risiko hinsichtlich neurodegenerativer Erkrankungen nach heutigem Stand des Wissens nahezu ausgeschlossen. Dasselbe gilt für kombinierte Expositionen von Hybridleitungen.

3.4 Fruchtbarkeit, Schwangerschaft, Geburt

3.4.1 Männliche Fruchtbarkeit

Den Grossteil der Untersuchungen zu dieser Fragestellung machen Tierstudien mit Expositionen gegenüber 50 Hz-Felder 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 Arbeiten 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 (ein von der Zelle selbst eingeleitetes Absterben) 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: 3 x 30 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”.

In der kürzlich veröffentlichten Studie von (Ruan, Liu et al. 2019) mit Ratten und Mäusen, die langfristig (24 bzw. 12 Wochen) unterschiedlich starken 50 Hz-Magnetfeldern ausgesetzt waren (30 μ T, 100 μ T, 500 μ T) zeigten sich für beiden Tierarten keine Einflüsse auf die Fruchtbarkeit.

Humanstudien neueren Datums mit Spermiodonatoren 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) bekannt sein, um einen möglichen direkten Einfluss von EMF feststellen zu können.

(Lewis, Hauser et al. 2016c) legten 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). Die Autoren bewerten die Arbeit nicht. Der Review von (Darbandi, Darbandi et al. 2018), in den 27 Artikel einflussen (in-vitro, in-vivo und Humanstudien), fand keine Belege für eine negative Beeinflussung der männlichen Fruchtbarkeit durch niederfrequente Magnetfelder.

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

3.4.2 Schwangerschaft/Entwicklung und Geburt

(Juutilainen 2005) fasste in seiner Übersichtsarbeit zu Tierversuchen den Einfluss von Magnetfeldexpositionen auf die Entwicklung von Föten wie folgt 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 (siehe dazu etwa: (Saunders and McCaig 2005).

Die bereits zitierte Arbeit von (Ruan, Liu et al. 2019) lieferte für Ratten und Mäuse keine Hinweise auf negative Effekte von chronischer 50 Hz-Magnetfeldexpositionen bis 500 μ T auf die Embryonalentwicklung.

Relevanter als Tierversuche sind zur Beurteilung allfälliger gesundheitlicher Risiken für den Menschen epidemiologische Arbeiten. Bei den neueren Befunden handelt es sich mehrheitlich um Studien zu Magnetfeldexpositionen gegenüber Hochspannungsleitungen. In den frühen Studien wurde auch die berufliche Belastung von Schwangeren durch Bildschirmarbeit (Röhrenmonitore) studiert. In einem Reviewbericht kamen (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, schreiben die Autoren (p. 541):

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

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

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

Bei den von Feychting und der WHO erwähnten Arbeiten 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 Schwangeren in San Francisco den Zusammenhang zwischen Magnetfeldexposition während der Schwangerschaft und Fehlgeburten. Alle Frauen haben während 24 Stunden mit einem mobilen Feldmessgerät die persönliche Exposition gegenüber 60 Hz Magnetfeldern gemessen. Die Studie fand keine

Risikozunahmen mit steigenden durchschnittlichen Magnetfeldstärken, errechnete jedoch einen Risikoanstieg, wenn die maximale Feldstärke über $\sim 1.6 \mu\text{T}$ 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), rekonstruierten die Magnetfeldexpositionen der Mütter während der Schwangerschaft und verglichen diese mit denjenigen aus einer Kontrollgruppe mit vergleichbaren gesunden Neugeborenen. Die Autoren fanden keine Hinweise auf ein erhöhtes Risiko, aber die Studie ist nicht aussagekräftig, weil nur ein exponierter Fall in die Analyse Eingang fand.

(Auger, Arbour et al. 2019) fanden in einer bevölkerungsbasierten Studie mit mehr als 2 Mio. Kindern in Quebec für Mütter, welche zum Zeitpunkt der Geburt weniger als 200 Meter von einer Hochspannungsleitung oder einem Transformator entfernt lebten, das Risiko für einen Geburtsdefekt nur gering, um 2 % bzw. 5 %, erhöht. Dabei war das Risiko im Umkreis von 50 Metern nicht höher als im Abstand von 200 Metern von einer Hochspannungsleitung, was gegen einen Zusammenhang mit ELF-MF spricht. Die individuell geringfügig erhöhten Risiken innerhalb von 200 Metern könnten auch auf nicht berücksichtigte Störvariablen (Confounder) zurückzuführen sein.

(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, jedoch war das Risiko für die höchste Expositionskategorie – unter 25 m Distanz –signifikant erhöht; 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, Hannam et al. 2014) untersuchten 140'000 Geburten in Nordwest-England hinsichtlich Auffälligkeiten im Zusammenhang mit niederfrequenten Magnetfeldern. Sie fanden zu keinem der untersuchten Endpunkte einen statistisch signifikanten Effekt. Erniedrigtes Geburtsgewicht wurde jedoch in der höchsten Expositionskategorie (< 50 m Distanz zu einer Hochspannungsleitung oder Trafostation) beobachtet. Die Unsicherheit dieser Studie ist hoch, weil das Resultat auf nur 89 Kindern (von ca. 140'000) basiert, die näher als 50 m von einer Hochspannungsleitung wohnen. Das Ergebnis eines leicht tieferen Geburtsgewichts blieb aber auch nach Korrektur mit möglichen Störgrößen stabil (de Vocht and Lee 2014).

(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. Ebenfalls keine signifikanten Einflüsse von ELF-Magnetfeldexpositionen auf Entwicklungsparametern während der Schwangerschaft und auf das Geburtsgewicht diagnostizierte eine finnische Studie (Eskelinen, Roivainen et al. 2016).

Auf 18'000 Kinder, die 2011 geboren wurden, stützt sich die Kohortenstudie von (Migault, Piel et al. 2018). Sie fanden keine Zusammenhänge zwischen Geburtszeitpunkt sowie Geburtsgewicht und der Magnetfeldexposition während der Schwangerschaft der Mutter. Eine neuere Arbeit mit gleicher Ausrichtung, welche die Daten mit denjenigen einer kleineren, zweiten französischen Kohorte poolte, kam zu keinen klaren Ergebnissen (Migault, Garlantezec et al. 2020). (Ren, Chen et al. 2019) beobachtete

dagegen einen Zusammenhang mit Gewicht und Grösse bei neugeborenen Mädchen (nicht bei Knaben). Der Befund basiert auf einem vergleichsweise kleinen Datensatz von 128 Geburten (64 Mädchen), einfachen linearen Modellen und einer Expositionserfassung (persönliche Messungen mit EMDEX-Geräten), die keine klaren Expositionskategorien zeigte (höchste protokollierte Exposition 0.12 μT).

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 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 μT : HR = 1.15; 95 % CI = 1.04 – 1.27). In der Publikation von 2012 wurde der Zusammenhang mit kindlicher Fettleibigkeit untersucht und ein statistisch signifikant erhöhtes Risiko (OR = 1.69; 95 % CI = 1.01 – 2.84) von Kindern, deren Mütter über 0.15 μT (24 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 Expositionskategorien gebildet wurden, führt (SSM 2013) zur Feststellung (p. 32):

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

Das gilt auch hinsichtlich der jüngsten Arbeit der Gruppierung (Li, Chen et al. 2017), die nochmals Fehlgeburten thematisiert. Die Zahlen zum verwendeten Sample deuten auf den bereits früher genutzten Datensatz hin, was fehlende Angaben zum Zeitpunkt der Datenerhebung zusätzlich nahelegen. Mit gegenüber (Li, Odouli et al. 2002) veränderten Expositionskategorien erhalten die Autoren signifikante Effekte bereits ab 0.25 μT – allerdings ohne klare Dosis-Wirkungs-Beziehung (die höchste Kategorie zeigt keine Effekte) und basierend auf einer Referenzgruppe von nur 11 Fällen.

Ebenfalls wenig robust sind die Resultate von (Sadeghi, Ahmadi et al. 2017). Diese iranische Arbeit untersuchte Frühgeburten und fand einen signifikanten Zusammenhang mit der Distanz des Wohnortes von HSL. Das verwendete Expositionsmass ist aber nahezu unbrauchbar (als exponiert taxiert wurde, wer in einem Korridor von 600 m zur Hochspannungsleitung wohnte) und die Analyse basiert auf einer Referenzgruppe die lediglich 8 Kontrollen umfasste. Ebenso wenig brauchbar ist die Studie zur Unfruchtbarkeit von Frauen von (Esmailzadeh, Delavar et al. 2019), deren Hauptergebnis (statistisch signifikanter Zusammenhang zwischen Unfruchtbarkeitsrisiko und Wohndistanz zu HSL) quantitativ auf der Distanzklasse 500 – 1000 m beruht.

3.4.3 Hinweise von elektrischen AC-Feldern und DC-Expositionen

Es werden generell keine gesundheitlich negativen Wirkungen von niederfrequenten (50/60 Hz) elektrischen Feldern sowie von elektrostatischen und magnetostatischen Feldern bei häuslichen Durchschnittsexpositionen erwartet. Biologische Effekte sind erst bei hohen Feldstärken deutlich über den Grenzwerten belegt. Deshalb liegen zu Alltagsexpositionen nur wenige Daten vor.

Epidemiologische Studien zu elektrischen AC-Feldern werden von der (WHO 2007) im Zusammenhang mit Schwangerschaft und Geburt nicht thematisiert. Die zitierten Arbeiten beziehen sich auf AC-Magnetfelder. Uns sind keine Untersuchungen in diesem Zusammenhang bekannt. Auch (SCENIHR 2015)

und (Belyaev, Dean et al. 2016) diskutieren keine Publikationen dazu. Eine Review von (Juutilainen 2005) zu in-vivo Experimenten zeigte, dass bei niederfrequenten Expositionen bis 150 kV/m keine Effekte belegt sind. (ICNIRP 2010) bezieht sich auf die in der Review von Juutilainen diskutierten Studien.

Zu statischen Feldern liegen – nicht zuletzt wegen fehlenden bzw. seltenen (akuten) Expositionen oberhalb der natürlichen Feldstärken – keine verwertbaren Humanstudien zu Alltagsexpositionen vor. Neuere Tierstudien mit statischen Magnetfeldexpositionen zeigen keine Effekte (Zaun, Zahedi et al. 2014), (Zahedi, Zaun et al. 2014). (Wu, Di et al. 2017) beobachteten bei Mäusen, die gegenüber elektrostatistischen Feldern von 56 kV/m chronisch exponiert wurden, keine Wirkung auf die Fruchtbarkeit. Schwierig interpretierbar sind Arbeiten mit MRI-Expositionen, da es sich dabei um Ko-Expositionen handelt. (Møllerløgken, Moen et al. 2012) stellten bei Probanden, die sich MRI-Feldern aussetzten, keine negativen Wirkungen auf die Reproduktion, insbesondere Hormone, fest.

In den umfassenden Wissenszusammenstellungen von WHO, ICNIRP und SCENIHR zu diesen Expositionen sind im Zusammenhang mit Entwicklungsfragen keine zusätzlichen oder anderen Informationen vorhanden. In der kritischen Review von (Belyaev, Dean et al. 2016) sind keine Studien erwähnt.

3.4.4 Fazit

3.4.4.1 Bewertung durch WHO, ICNIRP, SCENIHR und SSK

Die Bewertung der (WHO 2007), lautet wie folgt (p. 8f):

“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”.

(ICNIRP 2010) ist hier noch deutlicher und kommt hinsichtlich niederfrequenter Felder (elektrische und magnetische) zur Einschätzung (p. 822):

“Overall, the evidence for an association between low frequency and developmental and reproductive effects is very weak”.

Das Fazit von (SCENIHR 2015) lautet gleich (p. 16):

“Recent results do not show that ELF fields have any effect on the reproductive function in humans”.

Humanstudien zu anderen EMF-Expositionen von HSL (elektrische Felder und DC-Magnetfelder) werden von den Organisationen im Zusammenhang mit Fruchtbarkeit, Schwangerschaft und Geburt keine diskutiert. In den neueren Tierstudien mit hohen Expositionen haben sich keine Effekte gezeigt.

3.4.4.2 Einschätzung FSM

Tierstudien zu Einflüssen von niederfrequenten Magnetfeldern auf die Fruchtbarkeit zeigen häufig Effekte. Ihre Interpretation ist aber schwierig. So gesehen sind diese Arbeiten, solange sie nicht über Wirkmechanismen Auskunft geben, für die gesundheitliche Risikoeinschätzung nur sehr begrenzt brauchbar. 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. Das gilt auch hinsichtlich Expositionen gegenüber starken elektrischen Feldern.

Betreffend Effekten auf Schwangerschaft und Geburt haben Tierversuche in der Mehrheit keine negativen Resultate gezeigt. Das bestätigte auch eine neuere Studie mit Ratten und Mäusen und (chronischer) Expositionen unter 1 mT. Jüngere Arbeiten mit vergleichsweise starken langzeitigen Magnetfeldexpositionen im mT-Bereich beobachteten jedoch verschiedene potenziell schädliche Wirkungen. Das Gesamtbild hat sich durch diese Untersuchungen aber nicht grundlegend verändert. Für die Risikobeurteilung wichtiger ist die Gesamtheit der epidemiologischen Studien. Hier wurden in den letzten

Jahren einige Arbeiten zu Geburtsgewicht, Frühgeburten, Totgeburten, Missbildungen und Aborten veröffentlicht. Insgesamt fanden die Studien nur vereinzelt und nicht konsistent erhöhte Risiken. Diese Heterogenität könnte auf Zufallseffekte hindeuten. Das ist insofern möglich, als in den meisten Arbeiten nur wenige exponierte Fälle in die Analysen Eingang fanden. Die jüngst veröffentlichten Untersuchungen mit grossen Samples fanden keine Zusammenhänge. Insgesamt gesehen scheint ein Risiko eher unwahrscheinlich, es kann aber aufgrund der noch zu wenig homogenen Datenlage nicht ausgeschlossen werden. Diese Befunde beziehen sich auf niederfrequente Magnetfelder.

Andere als AC-Magnetfeld Expositionen: Die Datenlage zu diesen Expositionen ist dünn und erlaubt keine seriösen, datenbasierten Aussagen. Da innerhalb von auch nahe bzw. unmittelbar an Hochspannungstrassen gelegenen Wohnungen die Feldstärken sehr tief sind, sowohl was die elektrischen Felder als auch die DC-Magnetfelder anbetrifft, sind chronische Expositionen kaum von der Hintergrundbelastung zu unterscheiden. Vor diesem Hintergrund ist ein allfälliges Fruchtbarkeits- oder Schwangerschaftsrisiko nach heutigem Stand des Wissens nahezu ausgeschlossen. Dasselbe gilt für kombinierte Expositionen von Hybridleitungen.

3.5 Elektromagnetische Sensibilität

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. Auslöser waren die im Zusammenhang mit der aufkommenden Bildschirmarbeit von Beschäftigten geäusserten Beschwerden. Viele Studien dazu wurden damals in Schweden durchgeführt. Gegenwärtig steht eher die Mobilkommunikation im Fokus des Interesses.

Mit elektromagnetischer 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, Hautausschläge 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 in der 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”.

Wie viele Menschen sind in etwa von EHS betroffen? In einer repräsentativen Befragung aus der Schweiz von 2004 (Schreier, Huss et al. 2006) wird die Anzahl mit 5 % angegeben. Diese Grössenordnung deckt sich mit Zahlen aus anderen Ländern: Österreich 3.5 % (Schröttner and Leitgeb 2008), Schweden 1.5 % (Hillert, Berglind et al. 2002), Kalifornien 3.2 % (Levallois, Neutra et al. 2002), Vereinigtes Königreich 4 % (Eltiti, Wallace et al. 2007); (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 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 (Röösl, Moser et al. 2004). Insgesamt scheint das Krankheitsbild jedoch nicht quellenspezifisch zu sein (Schüz, Petters et al. 2006), (Rubin, Das Munshi et al. 2005). So schreiben (Röösl, 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 auf Arbeiten zur Elektrosensibilität, die ELF-EMF thematisieren.

3.5.2 Epidemiologische Studien

Es liegen nur wenige epidemiologische Arbeiten zu EHS gegenüber 50/60 Hz Magnetfeldern vor. Die meisten untersuchten Personen aus der allgemeinen Bevölkerung, einige studierten die Frage im Zusammenhang mit beruflichen Magnetfeldbelastungen.

Berufliche Exposition. Weil nur wenige Studien vorliegen, werden diese hier vorgestellt und nicht im Anhang erläutert. (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. (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. (Bagheri Hosseinabadi, Khanjani et al. 2019) fanden signifikante Hinweise auf Schlafprobleme, Stress und weitere subjektive Symptome von exponierten Arbeitern eines Elektrizitätswerks. Die rapportierten Daten zum Sample sind jedoch inkonsistent und die Kontrollgruppe ist ungenügend beschrieben, um die Validität der Daten beurteilen zu können.

Alltagsexposition. 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 (Röösl, 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. (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.

Die einzige epidemiologische Arbeit, die ätiologische Ansprüche stellt, ist diejenige von (Baliatsas, Bolte

et al. 2015). Sie untersuchte in den Niederlanden bei 6'000 Personen die Beziehungen zwischen realer Exposition, wahrgenommener Exposition, subjektiven Symptomen (NSPS = non-specific physical symptoms) und von Ärzten erhobenen Gesundheitsangaben. Für die Expositionen im ELF-Bereich wurden sowohl die berechnete Nähe von Hochspannungsleitungen als auch der Gebrauch verschiedener elektrischer Geräte und Maschinen berücksichtigt. Die subjektive Exposition wurde auf einer Skala von 0 bis 10 abgefragt. Beobachtete Zusammenhänge zwischen Symptomaufreten und Exposition gegenüber elektrischen Geräten: Am konsistentesten waren Symptome für Personen mit einem Ladegerät in der Nähe (≤ 50 cm) vom Kopfkissen und für Personen, die elektrische Heizdecken benutzten. In beiden Fällen war aber die Schlafqualität nicht beeinträchtigt. Personen, die weniger als 200 Meter von einer Hochspannungsleitung entfernt lebten, hatten nicht mehr Symptome als der Rest des Studienkollektivs. Die selbst berichteten Angaben zur Benutzung von elektrischen Geräten wurde nicht validiert und ist deshalb 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”.

In Analogie zum Plazebo-Effekt (Hoffnung auf Heilung) spricht man im Fall von Angst vor einer Beeinträchtigung von einem Nozebo-Effekt. Plazebo- und Nozebo-Effekte wurden v.a. im Zusammenhang mit Medikamenten studiert, aber auch mit Psychotherapien (Locher, Koechlin et al. 2019), wobei in neueren Arbeiten v.a. die Wirkfaktoren interessieren, z.B. der Einfluss der Wahlmöglichkeit (Bartley, Faasse et al. 2016) oder das Wissen über Nebenwirkungen (Faasse, Grey et al. 2015). Für ein psychologisches bzw. ein psychosomatisches Wirkmodell mit EMF-Bezug siehe: (Kjellqvist, Palmquist et al. 2016) bzw. (Osterberg, Persson et al. 2007); für eine Studie zu neuronalen Korrelaten dazu: (Landgrebe, Barta et al. 2008).

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. Diese kognitive (mentale) Dimension haben auch (Szemerszky, Domotor et al. 2016) festgestellt. Sie haben eine Untersuchung durchgeführt, in welcher nur Scheinexpositionen zum Einsatz kamen. Sie interpretierten die Resultate so, dass die Attribution von Symptomen keine (rein) emotionale, sondern eine rationale Begleiterscheinung von Technikwahrnehmung ist.

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.

In aller Regel reagieren elektrosensible Menschen nach eigenen Aussagen schon auf schwache Feldstärken. Starke Felder wirken physiologisch und können ab einer – individuell vergleichsweise stark variablen – Mindestfeldstärke wahrgenommen werden. Darüber wurde in Abschnitt 2.2 mit Bezug zu elektrischen und magnetischen AC- und DC-Feldern bereits berichtet.

Review-Studien: (Rubin, Das Munshi et al. 2005) haben in einer Literatuarbeit 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 niederfrequente Anwendungen) beinhalteten. Insgesamt wurden 31 Publikationen analysiert. Die Schlussfolgerung, 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 bilanziert (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”.

Die systematische Übersichtsarbeit von (Schmiedchen, Driessen et al. 2019) evaluierte experimentelle, verblindete Provokations- und Interventions-Studien im Frequenzbereich von 0 bis 300 GHz mit Personen, die angaben an EHS zu leiden; inklusive einer systematische “risk of bias” Analyse. Von den 28 eingeschlossenen Studien fokussierten 6 Arbeiten auf ELF-Magnetfelder. Insgesamt fanden sieben der 28 Studien statistisch signifikante Zusammenhänge zwischen EMF-Expositionen und Gesundheitsauswirkungen (zwei von den ELF-Studien). Dabei wurde sowohl vermehrtes wie auch vermindertes Auftreten von Symptomen bei Exposition beobachtet. 21 Studien fanden hingegen keine Anhaltspunkte dafür, dass die von den Studienteilnehmenden angegebenen gesundheitlichen Symptome in einem Zusammenhang mit EMF-Exposition standen. Gemäss den Autoren spricht ihre Übersichtsarbeit insgesamt eher gegen einen ursächlichen Zusammenhang von EMF-Exposition und Gesundheitseffekten. Falls ein solcher Zusammenhang bestehe, sei er schwach oder betreffe nur sehr wenig Personen. Die Studien zeigen, dass Nozebo relevant ist

Hinsichtlich der Wahrnehmbarkeit von (meist schwachen) 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 einhergehen, und umgekehrt (McCarty, Carrubba et al. 2011), (Szemerszky, Gubanyi et al. 2015). (Leitgeb and Schröttner 2003) und (Leitgeb, Schröttner et al. 2007) schliessen aus ihren Experimenten, dass es unter den elektrosensiblen Personen eine Gruppe von sensitiven Menschen gibt. In ihrem Fall bezieht sich die Empfindlichkeit auf am Unterarm applizierte 50 Hz-Ströme. Der Anteil sensitiver Personen an der Gesamtbevölkerung wird auf 2 % geschätzt. (Koteles, Szemerszky et al. 2013) kamen zum Schluss, dass EHS-Personen Expositionen eher korrekt erkennen können als nicht-EHS Personen. Dabei wurden bei Einzelpersonen auch bei sehr tiefen Feldstärken Sensitivitäten festgestellt. Dasselbe Ergebnis zeigte auch (Maestu, Blanco et al. 2013). Möglicherweise sind diese Befunde auf methodische Unzulänglichkeiten zurückzuführen.

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 aus der Forschungsgruppe um Frank Prato). Gleiches gilt für die Ergebnisse einer niederländischen Gruppe, welche mit einer mobilen Expositionseinheit – siehe: (Huss, Murbach et al. 2016) – genau die Signale in Blindexperimenten einsetzte, die gemäss Aussagen der Probanden ihre gesundheitlichen Probleme verursachten. Die Studie fand jedoch keine Hinweise auf die Detektierbarkeit niederfrequenter Magnetfelder (van Moorselaar, Slottje et al. 2017). Die Arbeit ist besonders interessant, weil sie einen neuen Ansatz zur Behandlung von EHS Patienten getestet hat. Und zwar wurden Patienten, die sagten, innerhalb von kurzer Zeit auf EMF zu reagieren, zuhause mehrfach getestet. Bei diesen Tests konnte kein Patient besser als zufällig wahrnehmen, ob ein EM-Feld eingeschaltet war oder nicht. Diese Erkenntnis hatte keinen Einfluss auf die selbst eingeschätzte Hypersensibilität 2 und 4 Monate nach dem Experiment. Aber die (ursprüngliche) Gewissheit innerhalb von wenigen Minuten auf eine EMF Exposition zu reagieren hatte sich etwas vermindert und Häufigkeit und Schweregrad von Symptomen waren nach 4 Monaten reduziert. Da die Studie keine Kontrollgruppe hatte, ist nicht klar, ob die Veränderungen auf die Intervention zurückzuführen sind. Interessant ist auch, dass von den 42 Probanden nur 4 ihre Beschwerden auf niederfrequente Magnetfelder zurückgeführt haben, die anderen 38 gaben HF-EMF als Ursache an. Insofern ist die Studie in Bezug auf ELF-Magnetfelder wenig aussagekräftig.

(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.

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 Treffer-rate 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. 2013) Nullbefunde. Das Wort “Nullbefund” bedeutet dabei nichts Negatives. Es besagt nur, dass die Studie den untersuchten Zusammenhang nicht bestätigen konnte. 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 ein vermeintlich starkes Magnetfeld „verabreicht“ wurde, fühlten sie sich in ihrem Wohlbefinden deutlich stärker beeinträchtigt als bei Exposition gegenüber einem vermeintlich schwachen oder gar keinem Magnetfeld.

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 besser war als ohne Feld. Das bestätigt die Studie von (Ohtsuki, Nabeta et al. 2017), welche in einer experimentellen Studie mit 17 Personen, die unter Schlafstörungen litten, eine Verbesserung der Schlafqualität bei täglich 30-minütiger therapeutischer Exposition gegenüber einem 50 Hz elektrischen Feld von 18 kV feststellte.

Hinweise auf einen Zusammenhang zwischen niederfrequenter Magnetfeldexposition und reduziertem Wohlbefinden fanden (McCarty, Carrubba et al. 2011) bei ausführlichen Test mit einer elektrosensiblen 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 beurteilten sie die Ergebnisse eher als Unterstützung der These einer psychosomatischen Verursachung (Nozebo-Reaktion). In der neuesten Studie (Domotor, Doering et al. 2016) bestätigte sich diese Beurteilung. Die niederländische Arbeit von (van Moorselaar, Slottje et al. 2017) ist hinsichtlich 50 Hz-Feldern wenig ergiebig, da nur 5 % der Probanden sich auf ELF testen lassen wollten.

3.5.4 Hinweise von elektrischen AC-Feldern und DC-Expositionen

Es werden generell keine gesundheitlich negativen Wirkungen von niederfrequenten (50/60 Hz) elektrischen Feldern sowie von elektrostatischen und magnetostatischen Feldern bei häuslichen Durchschnittsexpositionen erwartet. Biologische Effekte sind erst bei hohen Feldstärken deutlich über den Grenzwerten belegt. Allerdings scheint es, dass die Wahrnehmbarkeitsschwelle individuell stark unterschiedlich ist und Einzelpersonen deshalb schon bei tieferen Feldstärken Expositionen wahrnehmen und als unangenehm empfinden können. Insgesamt liegen zu Alltagsexpositionen aber nur wenige Daten vor.

Aus elektrophysiologischer Sicht sind elektrische AC-Felder bedeutsam. So schreibt etwa die (WHO 2007) hinsichtlich der Relevanz von 50 Hz elektrischen Feldern, p. 121:

“Generally, however, the surface charge effects of exposure to low frequency electric fields become prohibitive long before the internal electric fields become large enough to elicit a response in the tissue”.

Über die Wahrnehmungs- und Belästigungsschwellen wurde bereits in 2.2 berichtet. Epidemiologische Studien zu häuslichen Expositionen gegenüber HSL sind wegen des Schirmeffekts nicht durchführbar. In einigen Provokationsstudien wurden neben den Magnetfeldern auch elektrische Felder gemessen. Die Resultate dieser Arbeiten sind gemäss WHO schwierig interpretierbar, und wegen der Ko-Exposition kann über die Bedeutung der elektrischen Feldkomponente nur spekuliert werden. Die Hinweise aus einer Studie von (McCarty, Carrubba et al. 2011) auf kausale Verursachung von Symptomen bei schwacher Exposition (300 V/m) können nicht als robust bezeichnet werden, weil sie auf lediglich einer getesteten Person beruhen. In-vivo Experimente mit starken elektrischen AC-Feldern (> 10 kV/m) führten bei Versuchstieren zu vorübergehenden Stressreaktionen und zu Ausweichverhalten (SCENIHR 2015). (ICNIRP 2010) bezieht sich auf die WHO und schreibt (p. 821):

“(...) 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 low-frequency electric and magnetic fields causes depressive symptoms or suicide”.

Zu statischen Feldern liegen – nicht zuletzt wegen fehlenden bzw. seltenen (akuten) Expositionen oberhalb der natürlichen Feldstärken – generell wenig Humanstudien vor. Hinsichtlich statischer Magnetfelder sind Schwindel und Übelkeit im Zusammenhang mit Bewegungen in starken Feldern bei MRI Anwendungen ($> 2\text{ T}$) belegt (Heinrich, Szostek et al. 2011). Die Wahrnehmungsschwelle bei elektrischen Gleichfeldern liegt im Bereich um bzw. oberhalb 10 kV/m und ist individuell variabel. Ab welcher Feldstärke ein Mensch die Exposition als lästig zu empfinden beginnt, ist ebenfalls variabel. Robuste Daten fehlen. Unter HGÜ-Leitungen können aber ausreichend starke elektrische Felder vorhanden sein, um sie wahrzunehmen. Die (SSK 2013a) fasst die Sachlage folgendermassen zusammen (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“.

Studien zu Personen, die gegenüber statischen elektrischen oder magnetischen Feldern speziell sensibel wären, liegen unseres Wissens keine vor.

3.5.5 Fazit

3.5.5.1 Bewertung durch WHO, ICNIRP, SCENIHR und SSK

Die (WHO 2007) schreibt (p. 137 und 160):

“IEI individuals [hypersensitive people] cannot detect EMF exposure any more accurately than non-IEI individuals (...) 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”.

Die Schlussfolgerungen der (ICNIRP 2010) auf p. 821 ist (wörtlich) gleichlautend wie die oben zitierte Passage der WHO auf p.160.

(SCENIHR 2015) veröffentlichte folgende Schlussfolgerungen aus den publizierten Studien (p.184):

“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”.

Von der SSK (SSK 2008) und (SSK 2013b) ist EHS im Zusammenhang mit HSL-Expositionen nicht thematisiert worden.

Studien zu EHS gegenüber elektrischen 50 Hz-Feldern gibt es nur wenige bzw. solche zur Feldwahrnehmung (siehe 2.2). Daraus lassen sich keine robusten Aussagen ableiten. Studien zu unspezifischen Gesundheitssymptomen aufgrund tiefer Umweltexpositionen gegenüber statischen Feldern werden in den Berichten keine gelistet.

3.5.5.2 Einschätzung FSM

Einige wenige Prozent der Bevölkerung bezeichnen sich als elektrosensibel. Dabei handelt es sich um Symptome wie Kopfweg, Müdigkeit oder Schlafstörungen, deren Ursache Betroffene in (schwachen)

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 Personen, die gewisse elektromagnetische Felder physiologisch besser wahrnehmen als andere Menschen, wobei dieses Phänomen bei relativ starker Exposition beobachtet wurde und der typischen Variabilität innerhalb einer Bevölkerung entspricht. Es wäre lohnend, diese Gruppe von Menschen genauer zu untersuchen. Insgesamt aber scheint es so, dass Menschen kein Sensorium für schwache niederfrequente oder hochfrequente Felder besitzen. Personen, die das von sich behaupten, schliessen – abgesehen von wenigen Ausnahmen, deren Gültigkeit nicht restlos klar ist – in Blindversuchen nicht besser ab als Personen ohne diese vermeintliche Fähigkeit. Insofern ist die Evidenz für eine objektivierbare Hypersensibilität gering. Die vorliegenden Provokationsstudien zeigen insgesamt auch, dass es keinen Zusammenhang 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 oder der Zuschreibung bestehender Symptome, für die man keine ursächliche Erklärung hat, auf die Felder (Dieudonné 2019). Es ist somit wahrscheinlich, dass Elektrosensibilität eine mentale und nicht eine physikalische Ursache hat.

Studien zur Elektrosensibilität gegenüber elektrischen 50 Hz-Feldern gibt es nur eine, aus der sich keine Aussage verallgemeinern lässt. Statische Felder, wie man sie im Alltag antrifft, sind unseres Wissens im Zusammenhang mit unspezifischen Gesundheitssymptomen nicht untersucht worden. Aufgrund der Tatsache, dass auch in sehr nahe an HSL-Korridoren liegenden Wohnungen die Expositionen kaum über der Hintergrundstrahlung liegen, ist es unwahrscheinlich, dass allfällige Beschwerden, die HSL zugeschrieben werden, kausal durch diese Felder verursacht sind bzw. wären. Wir stimmen der Schlussfolgerung der (SSK 2008) zu, die lautet, dass zu diesen Expositionen keine bzw. unzureichende Evidenz für Effekte vorliegt. Dasselbe gilt für kombinierte Expositionen von Hybridleitungen.

3.6 Andere Wirkungen

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 reaktionen. Verändern sich diese unter Exposition, so kann das als Hinweis interpretiert werden, dass die entsprechenden sinnlichen bzw. kognitiven Fähigkeiten durch die Exposition beeinflusst werden.

Elektrophysiologische Studien mit Magnetfeldexpositionen verwenden typischerweise Feldstärken die deutlich über den Alltagsbelastungen, auch von exponierten Standorten nahe bei Hochspannungsleitungen, liegen. In vielen Studien überschreiten die eingesetzten magnetischen Flussdichten die Immissionsgrenzwerte / Referenzwerte. Ein Interesse an neurobiologischen Effekten bezieht sich denn auch nicht auf mögliche gesundheitliche Risiken, sondern auf therapeutische Potenziale im Zusammenhang mit transkranieller Magnetfeldstimulation (TMS) oder transkranieller elektrischer Stimulation (TES). Für

eine Darstellung der entsprechenden Therapieformen siehe etwa: (Amon and Alesch 2017), (Dürrenberger, Fröhlich et al. 2018), (SSK 2019).

Es sei an dieser Stelle explizit darauf hingewiesen, dass die eingesetzten Feldstärken massiv über den Werten liegen, welche unter und im Umfeld von HSL gemessen werden. Ein externes elektrisches Feld von 6 kV/m (50 Hz) bewirkt eine Feldstärke im Gehirn von 6 mV/m. Es ist damit nahezu 1'000 Mal zu schwach für eine Nervenstimulation, denn um (myelinisierte) Nervenfasern zu stimulieren braucht es gewebeinterne Feldstärken von mehreren V/m (Dimbylow 2005), (Reilly and Diamant 2011). TES und TMS erzeugen solche elektrischen Kräfte: induzierte Ströme im Bereich von 1 – 2 mA, wie sie in der transkraniellen elektrischen Stimulation vorkommen, werden von gewebeinternen elektrischen Feldstärken um 1 V/m angetrieben, Magnetfelder mit Pulsspitzen im Tesla-Bereich, wie sie von TMS-Spulen erzeugt werden, induzieren sogar elektrische Feldstärken von mehreren 10 bis gegen 100 V/m.

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 hirregionsspezifisch 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.

Eine grosse Herausforderung elektrophysiologischer Studien hinsichtlich therapeutischem Potenzial oder Risikobewertung betrifft die Synthese der verschiedenen Forschungsstränge (in-silico, in-vitro, in-vivo, Humanstudien). Während Modellierungsstudien oft mit grossen elektrischen Feldstärken im Bereich der Aktivierungspotenziale der Nervenzellen im Gehirn arbeiten (Bereich 10 – 100 V/m), verwenden die anderen Ansätze meist deutlich tiefere Felder, wie sie etwa TES-Anwendungen im Hirn induzieren (~ 1 V/m). Sodann wird in-silico oft nur eine einzige Zelle – siehe etwa: (Migliore, De Simone et al. 2016) – und nicht ein Neuronenverband oder das Gehirn als Ganzes simuliert. Dass gerade auch die räumlich hoch spezifische Struktur der Nervenzellen im Gehirn einen entscheidenden Einfluss auf die Effekte hat, darauf haben in einer kürzlichen Review Modolo und Kollegen hingewiesen (Modolo, Denoyer et al. 2018).

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, drei 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 Untersuchungen grosse Heterogenität und Gegensätzlichkeit, die sich nicht zu einem Gesamtbild bündeln lassen. 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 belegten mehrheitlich, aber nicht durchgängig und homogen, (negative) Einflüsse auf die Kurzzeitgedächtnisleistung.

In der Studie von (Corbacio, Brown et al. 2011) wurden 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. In der bereits erwähnten Studie von (Szemerszky, Domotor et al. 2016) wurden von den Probanden kognitive Effekte rapportiert. Da nur Sham-Expositionen eingesetzt worden sind, erklären die Autoren den Befund mit Nozebo-Wirkung. Neuere Humanstudien zum Thema liegen keine vor.

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. Einen möglichen Wirkmechanismus, wie Magnetfelder auf das kardiovaskuläre System einwirken könnten, beschreibt (Niederhauser 2018).

In den letzten Jahren wurde zum Thema nicht viel publiziert. 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 Herzkreislaufkrankungen im Zusammenhang mit ELF-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 Risikoschätzer 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 Übersichtsarbeit von (Elmas 2016) ist insgesamt wenig ergiebig und nur beschränkt informativ. Das gilt auch und besonders für die jüngste publizierte Übersicht, die kaum differenziert zwischen Frequenzen und zwischen Tier- und Humanstudien (Azab and Ebrahim 2017).

Von den neueren epidemiologischen Arbeiten seien erwähnt: (Röösli, Egger et al. 2008) untersuchten in ihrer Mortalitätsstudie 4 verschiedene Herz-Kreislaufkrankungen 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 8'200 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 Hochspannungsleitung (60 kV) in Rom lebten, fest, dass die am meisten exponierte Gruppe ein doppelt so hohes Risiko für Herzkranzgefässerkrankungen 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 μ T bzw. einem 200 μ T 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. (Okano, Fujimura et al. 2017) beobachtete bei einer kleinen Gruppe von 6 Probanden eine Erhöhung des Blutflusses (gemessen am Arm) bei 15 minütiger Exposition gegenüber 50 Hz 180 mT Magnetfeldern.

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 einerseits eine wichtige Rolle als diurnaler Taktgeber spielt und so auch im Zusammenhang mit Schlafproblemen stehen kann. Andererseits ist Melatonin als ein „Schutzfaktor“ gegenüber Krebs, insbesondere Brustkrebs, bekannt. Eine Senkung des Melatoninspiegels durch ELF-EMF hätte folglich die unerfreuliche Konsequenz, dass damit das Krebsrisiko ansteigen würde. Dieser Zusammenhang ist als sog. Melatonin-Hypothese bekannt. In Tierstudien wurde für Expositionen gegenüber ELF elektrischen Feldern eine Reduktion des Melatoninspiegels gezeigt, für Expositionen gegenüber ELF-Magnetfeldern sind die Resultate widersprüchlich (ICNIRP 2010). Ende der 90er wurden einige epidemiologische Arbeiten veröffentlicht, welche nicht einfach zu interpretierende Hinweise auf veränderte Melatoninspiegel bei beruflicher Magnetfeldexpositionen zeigten (Pfluger and Minder 1996), (Burch, Reif et al. 1998), (Burch, Reif et al. 2000), (Juutilainen, Stevens et al. 2000). Eine Schwierigkeit besteht in der Abschätzung des

Einflusses von Licht als Störgrösse (Juutilainen and Kumlin 2006), (Lewczuk, Redlarski et al. 2014). 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 ist schwierig, v.a. weil der Einfluss von Störgrössen (Licht, 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, insbesondere auch, weil die wenigen Humanstudien mit chronischer Exposition keine Effekte gefunden haben (Touitou, Bogdan et al. 2006), (Touitou, Djeridane et al. 2013).

Jüngere 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 Veröffentlichungen 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 Arbeiten, kommt aber zu einer vorsichtigeren Schlussfolgerung was mögliche Langzeiteffekte betrifft. Die Review von (Lewczuk, Redlarski et al. 2014) vertritt die Meinung, dass Effekte auf das Hormonsystem nicht ausgeschlossen werden könnten, die Melatoninhypothese aber nicht durch die Daten gestützt würde. Die jüngste Übersichtsarbeit (Ohayon, Stolc et

al. 2019) ist eine eher unkritische Zusammenstellung, die das ganze EMF-Spektrum berücksichtigt und keine neuen Erkenntnisse bringt. (Bouche and McConway 2019) präsentierten eine mathematische Modellierung aus Literaturdaten, die für Langzeitexpositionen (> 3 Wochen) einen schwachen Zusammenhang sieht. Jedoch wird nicht zwischen beruflichen und häuslichen Expositionen sowie experimentellen und epidemiologischen Arbeiten unterscheiden.

Neuere Einzelstudien. (Vanderstraeten, Verschaeve et al. 2012) vermuten, dass nicht der Melatoninspiegel selbst, sondern Veränderungen im täglichen Rhythmus, der durch Magnetfelder beeinflusst werde, wichtig sind und „modernisieren“ deshalb die Melatoninhypothese und stellen sie in den Zusammenhang mit kindlicher Leukämie (ein Einfluss von ELF-EMF auf Brustkrebs wird inzwischen als unwahrscheinlich angenommen, siehe 3.2.2.2). (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 Arbeit (Mortazavi et al., 2012) wurden jedoch tiefere Cortisolspiegel bei exponierten Personen festgestellt. Untersucht wurden Zahnärzte. Dazu verglichen die Autoren eine exponierte mit einer nicht-exponierten Gruppe. Die exponierten Personen benutzten häufig sog. Cavitrons (Gerät zur Entfernung von Zahnstein), die nicht exponierte Gruppe dagegen nicht. Leider fehlen in der Studie nähere Angaben zur Exposition, ebenso wie zum Alter und zu den Arbeitsbedingungen und Arbeitsabläufen der zwei Gruppen. Es ist deshalb schwierig, gültige Aussagen aus diesen Resultaten abzuleiten.

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

3.6.5 Weitere Endpunkte

Studiert wurden auch die Wirkungen von ELF-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 dannzumal vorliegenden Studien zeigten widersprüchliche Resultate, nämlich keine Effekte oder aber sowohl das Immunsystem schwächende oder stärkende Wirkungen. Das trifft insbesondere auf die zahlreicheren Tier- und Zellstudien zu. An der WHO Einschätzung hat sich bis heute materiell wenig geändert. In ihren Reviews bestätigen (Rosado, Simko et al. 2018) und (Mahaki, Tanzadehpanah et al. 2019), dass es schwierig ist zwischen positiven und negativen Immunreaktionen auf Magnetfeldexpositionen zu unterscheiden und Studien, die einen Parameter aus einer ganzen Signalkaskade testen, wenig aussagekräftig sind hinsichtlich konkreter Immunreaktionen. Das therapeutische Potenzial (z.B. für Knochen- und Wundheilung) sei gegenwärtig nicht wirklich abschätzbar. Im Zentrum vieler Studien stehen die sog. freien Radikale. Sie sind ein zentrales Element des Immunsystems zur chemischen Bekämpfung von Fremdstoffen. In chronisch erhöhter Konzentration sind sie jedoch gesundheitlich schädlich. Allerdings ist noch vieles unklar und voreilige Schlüsse aus Einzelstudien sollten vermieden werden. Das ist auch die Quintessenz einer neueren Darstellung der Sachlage durch Henry Lai (Lai 2019).

(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 langzeitexponierten Personen, gefunden. Dagegen publizierte Hosseinabadi zwei Studien mit beruflich Exponierten (Hosseinabadi and Khanjani 2019a), (Hosseinabadi, Khanjani et al. 2019b), welche Auswirkungen auf im Blut vorhandene Immunparameter nahelegt. In beiden Studien wurden die unterschiedlichen Arbeitsplatzbedingungen zwischen Exponierten und nicht-Exponierten nur rudimentär berücksichtigt und die Effekte betrafen einzelne Immunparameter, nicht aber die untersuchten gesundheitlichen Probleme.

Der Vollständigkeit halber sei hier noch die Beurteilung von (BioInitiative 2012) dargestellt: ELF- und HF-EMF haben danach ein grosses Potenzial, das Immunsystem zu schwächen. Dieses Urteil wird im entsprechenden Kapitel fast ausschliesslich anhand von Studien mit Hochfrequenzexpositionen begründet. Einzige Ergebnisse zu niederfrequenten Expositionen betreffen allergische Hautreaktionen bei EHS Personen, wie sie v.a. in Schweden im Zusammenhang mit Arbeiten an Röhrenbildschirmen aufgetreten sind (siehe 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 (siehe auch 3.5). Eine Untersuchungsmethode ist dabei die Aufzeichnung des Schlaf-EEG (siehe 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. (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.

Die bereits zitierte Studie von (Bagheri Hosseinabadi, Khanjani et al. 2019) fand ebenfalls Hinweise auf Schlafprobleme bei exponierten Arbeitern eines Elektrizitätswerks. Allerdings wurden bei beiden Arbeiten Störgrössen nur rudimentär erfasst. So bleibt etwa in der ersten Studie 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 (Abschnitt 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, etwa zur 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 ELF-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 Füßen – siehe auch: (de Vocht and Olsen 2016). Dasselbe gilt für die Studie von (Li, Ferber et al. 2012), die einen datengetriebenen Eindruck hinterlässt (siehe 3.4.2). Bis weitere Studien greifbar sind bleibt unklar, welcher Stellenwert der Arbeit von (Li, Ferber et al. 2012) wissenschaftlich zugemessen werden kann.

Dasselbe gilt für die Arbeit, die mit derselben Stossrichtung ADHS als Endpunkt untersuchte. Der Zusammenhang wurde erstmals von (Beale, Pearce et al. 2001) postuliert. Die Studie von (Li, Chen et al. 2020) ist schwierig zu interpretieren, da die Exposition nur an einem Tag während der Schwangerschaft erhoben wurde und die Analysen an nicht aussagekräftigen kleinen Fallzahlen von 2, 4 oder 6 exponierten Kinder (Hauptanalyse: 12 Fälle) leiden.

Der von (Li, Chen et al. 2011) dokumentierte Zusammenhang zwischen ELF-Magnetfeldern und Asthma wurde kürzlich von (Sudan, Arah et al. 2017) anhand der dänischen Kohortendaten analysiert, wobei sie sich bemühten, die Li und Kollegen zur Last gelegten Defizite weitgehend zu vermeiden bzw. zu verringern. Die Autoren fanden keinen Zusammenhang in den dänischen Daten.

3.6.6 Hinweise von elektrischen AC-Feldern und DC-Expositionen

Es werden generell keine gesundheitlich negativen Wirkungen von niederfrequenten (50/60 Hz) elektrischen Feldern sowie von elektrostatischen und magnetostatischen Feldern bei häuslichen Durchschnittsexpositionen erwartet. Biologische Effekte sind erst bei hohen Feldstärken deutlich über den Grenzwerten belegt.

Über die Wahrnehmungsschwelle und physiologische Effekte von elektrischen AC-Feldern wurde bereits in 2.2 berichtet. Epidemiologische und experimentelle Humanstudien zu kognitiven Effekten liegen kaum, in-vivo Arbeiten nur in begrenzter Zahl vor (WHO 2007). (SCENIHR 2015) und (ICNIRP 2010) diskutieren keine Studien. Zu allfälligen Wirkungen auf den Hormonhaushalt und das Immunsystem sind keine robusten Daten verfügbar, weil elektrische Feldexpositionen, wenn sie überhaupt Gegenstand der Fragestellung waren, als Ko-Expositionen zusammen mit Magnetfeldern verwendet wurden. Erstbefunde aus Tierstudien der 80er Jahren zur Reduktion des Melatoninspiegels aufgrund von Expositionen gegenüber niederfrequenten elektrischen Feldern konnten in späteren Arbeiten nicht bestätigt werden. (ICNIRP 2010) kommt vor diesem Hintergrund zum Schluss:

“Overall, these data do not indicate that low frequency electric and/or magnetic fields affect the neuro-endocrine system in a way that would have an adverse impact on human health”.

Effekte auf das Herz-Kreislauf-System werden von (ICNIRP 2010) und (SCENIHR 2015) nicht explizit im Zusammenhang mit elektrischen Feldern diskutiert. Die von der (WHO 2007) gelisteten Studien betreffen Magnetfelder oder Ko-Expositionen (Magnet- und elektrische Felder). Negative gesundheitliche Wirkungen bei Alltagsexpositionen (akut und chronisch) wurden dabei keine festgestellt (p. 220):

“Overall, the evidence does not support an association between ELF exposure and cardiovascular disease”.

Von der kritischen Gruppierung ”European Academy for Environmental Medicine (EUROPAEM) – EMF working group” (Belyaev, Dean et al. 2016) wird keiner der in diesem Kapitel erwähnten Endpunkte im Zusammenhang mit niederfrequenten elektrischen Feldern diskutiert.

Zu statischen Feldern liegen – nicht zuletzt wegen fehlenden bzw. seltenen (akuten) Expositionen oberhalb der natürlichen Feldstärken – nur wenige verwertbare Humanstudien vor. In einer Metaanalyse stellten (Heinrich, Szostek et al. 2011) Effekte von statischen Magnetfeldern im Tesla-Bereich auf die Kognition fest. Die Befunde waren allerdings nicht einheitlich. In ihrer eigenen Studie (Heinrich, Szostek et al. 2013) mit 41 Probanden und Flussdichten bis 7 T fanden sie hingegen keine Effekte auf die Kognition. (He and Leung 2019) untersuchten die Wirkung von statischen Magnetfeldern auf das EEG und die kognitive Aufmerksamkeit in einem Fahrsimulator. Die Magnetfeldexposition betrug 350 μ T, was laut Autoren einer eher höheren Magnetfeldbelastung in einem Elektrofahrzeug entspricht. Es wurden keine Effekte auf die kognitiven Fähigkeiten der Fahrer gefunden, aber Hinweise auf EEG-Veränderungen unter Exposition. Das Sample war allerdings klein (n = 17). Verschiedene transitorische kognitive (aber auch andere) Effekte von statischen Magnetfeldern wurden v.a. im Zusammenhang mit der Arbeit von technischem und Pflegepersonal mit Magnetresonanz-Geräten rapportiert, z.B. (Rathebe 2020). Die

Expositionen liegen allerdings viele Grössenordnungen über den Alltagsbelastungen im Zusammenhang mit HGÜ. Die Studie von (Derkacz, Gawrys et al. 2018) notierte bei MRI-Patienten bei Exposition gegenüber 1.5 T statischen Magnetfeldern signifikante Einflüsse auf die Herzrhythmus (EKG-Aufzeichnungen). (Gayathri and Shailendhra 2019) protokollierten bis 3 T Flussdichte keine Wirkung auf die Blutzirkulation (arterieller Blutfluss).

Untersuchungen zu kognitiven Effekten unter elektrostatischen Expositionen sind uns keine bekannt. Es liegen einige jüngere Tierstudien vor (Cieslar, Sowa et al. 2018), (Xu, Gu et al. 2018), (Di, Kim et al. 2019), die allesamt keine Effekte chronischer Exposition (16 – 56 kV/m) fanden. Einzig Xu und Kollegen stellten eine temporäre Einbusse der Orientierung im Labyrinth nach einer Woche fest, die nach Angewöhnung jedoch wieder verschwand. Zu anderen Endpunkten sind nur punktuell Arbeiten publiziert worden. So stellte etwa eine jüngst veröffentlichte in-vivo Arbeit mit Mäusen (Lin, Dong et al. 2018) keine Effekte auf die Lebertätigkeit fest, ausser einer temporären Erhöhung von Stressproteinen bei 56 kV/m Befeldung (ohne schädliche Wirkungen).

Andere Expositionen: (Fang, Mahmoud et al. 2016) stellten in Provokationsexperimenten mit gepulster niederfrequenter Strahlung (PEMF-Signale) einen schwachen Einfluss auf die Herzrhythmus fest. (Sun, Kwan et al. 2016) stellten in einer Studie mit 22 Diabetes-Patienten und 21 Kontrollen einen Einfluss von PEMF auf den peripheren Blutfluss (Erhöhung; gemessen am Fuss) in beiden Gruppen fest. Interessant ist in diesem Zusammenhang die Arbeit von (Di, Gu et al. 2018), welche ELF und statische Magnetfeldwirkungen hinsichtlich Immuneffekten miteinander verglichen hat. Effekte zeigten sich keine bei statischen Feldern.

Dass Magnetfeldexpositionen gegen Schlafstörungen eingesetzt werden können, haben (Pelka, Jaenicke et al. 2001) schon vor 20 Jahren mit PEMF (gepulste Magnetfeldtherapie) gezeigt (siehe auch (Ohtsuki, Nabeta et al. 2017)). Die nicht durchwegs überzeugende Review von (Ohayon, Stolc et al. 2019) kommt zum Schluss, dass insgesamt keine Wirkungen von ELF-EMF auf die Schlafarchitektur belegt sei.

3.6.7 Fazit

3.6.7.1 Bewertung durch WHO, ICNIRP, SCENIHR und SSK

Betreffend neurophysiologischen, hormonalen und immunspezifischen Effekten schreibt die (WHO 2007), p. 5ff:

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

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 (...)

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”.

Die Einschätzungen der (ICNIRP 2010), p. 821 und 830:

„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 (...)

a causal relationship between magnetic fields and childhood leukemia has not been established nor have any other long term effects been established”.

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“.

(SCENIHR 2015) diskutiert mögliche hormonale und immunbiologische Effekte nicht explizit und zieht hinsichtlich Hirnphysiologie und Verhaltenseffekten folgendes Fazit (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”.

Hinsichtlich schwacher elektrischer AC-Felder und DC-Expositionen sind in den zitierten Expertenberichten keine Humanstudien zu den in diesem Kapitel thematisierten Endpunkten erwähnt.

3.6.7.2 Einschätzung FSM

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 darauf hin, dass niederfrequente Magnetfelder kognitive Leistungen nicht negativ (oder positiv) beeinflussen.

Betreffend Wirkungen auf das Herz Kreislaufsystem (Blutdruck, Puls, Herzratenvariabilität) sind die Befunde aus denjenigen Arbeiten, die ausreichend detaillierte Protokolle veröffentlicht haben um die Resultate wissenschaftlich würdigen zu können, relativ eindeutig: niederfrequente Magnetfelder, auch bei Langzeitexposition, dürften das Herz Kreislaufsystem 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 Ergebnisse auf und können nicht zu einem klaren Fazit gebündelt werden. Im Zentrum des Interesses steht das Melatonin, das bei der Schlafregulation eine wichtige Rolle spielt und dem eine präventive Wirkung bei Brustkrebs (und anderen Erkrankungen) zugesprochen wird.

Die Datenlage zu Wirkungen auf das Immunsystem ist ebenfalls uneinheitlich und noch lückenhaft. Die Zusammenhänge sind komplex und neue Studien – v.a. Laborarbeiten – haben die Sachlage eher noch unübersichtlicher gemacht. Effekte auf einzelne immunbiologische Parameter – nicht aber auf gesundheitliche Endpunkte – wurden häufig protokolliert.

Möglich ist, dass NF-EMF den Schlaf beeinflussen kann. Der Einfluss zeigt sich primär elektrophysiologisch im Schlaf-EEG, jedoch selten in der Schlafarchitektur. 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 epidemiologischen Arbeiten teilweise deutliche methodische Mängel zeigen. Ein Gesamturteil ist gegenwärtig kaum möglich.

Andere Wirkungen, die in der Literatur beschrieben werden (Asthma, Adipositas, ADHS, etc.) sind kaum durch Magnetfelder verursacht und die in den Studien präsentierte Datenlage ist nicht überzeugend, was einen möglichen Zusammenhang anbetrifft.

Andere als AC-Magnetfeld Expositionen. Aufgrund fehlender Humanstudien kann keine datenbasierte Aussage zu Expositionen gegenüber elektrischen AC-Feldern und statischen Feldern von HSL gemacht werden. Da innerhalb von auch nahe bzw. unmittelbar an Hochspannungstrassen gelegenen Wohnungen die Feldstärken sehr tief sind, sowohl was die elektrischen Felder als auch die DC-Magnetfelder anbetrifft, sind chronische Expositionen kaum von der Hintergrundbelastung zu unterscheiden. Vor diesem Hintergrund ist ein allfälliges Risiko nach heutigem Stand des Wissens nahezu ausgeschlossen. Dasselbe gilt für kombinierte Expositionen von Hybridleitungen.

4. Koronaeffekte und Gesundheit

4.1 Lärmbedingte Erkrankungen

Ein möglicher gesundheitsrelevanter Effekt ist die durch die Koronaaktivität bewirkte Lärmbelastung (siehe 2.3.3). Bei mittleren Lärmpegeln nachts unter 25 dB und tags unter 35 dB sind keine gesundheitlichen Beeinträchtigungen zu erwarten. In Innenräumen werden diese Belastungen bei leicht geöffneten Fenstern dann erreicht, wenn die Aussenpegel unter 40 dB bzw. unter 50 dB liegen (Locher, Piquerez et al. 2018). Es gibt keine epidemiologischen Studien zu den gesundheitlichen Wirkungen von Lärmbelastungen durch Hochspannungsleitungen. Die Lärmforschung fokussierte sich bisher hauptsächlich auf Strassen-, Bahn- und Fluglärm. Damit ergeben sich bei der Übertragbarkeit der Resultate gewisse Unsicherheiten. So ist zum Beispiel stark intermittierender Bahn- oder Fluglärm auch bei tiefen Durchschnittswerten noch wahrnehmbar, während eine kontinuierliche Lärmquelle wie eine Hochspannungsleitung eher im Hintergrundgeräusch verschwindet.

Um die Gesundheit zu schützen, sollten gemäss den neuen Empfehlungen der (WHO 2018) die Pegel je nach Lärmquelle folgende Werte nicht übersteigen (erste Zahl: Tagesdurchschnitt als L_{DEN}^1 , zweite Zahl: Durchschnitt während der Nacht): Strassenlärm 53 dB, 45 dB; Eisenbahnlärm 54 dB, 44 dB; Fluglärm 45 dB, 40 dB; Windturbinen 45 dB (24-Stunden Richtwert). Für die Regelung der Lärmemissionen durch Anlagen in Deutschland siehe Abschnitt 2.3.3.1. Die durchschnittlichen Expositionen in Deutschland gegenüber dem Strassenverkehr betragen 55 dB (Tag) bzw. 45 dB (Nacht). 15 % der Bevölkerung sind tagsüber mit mindestens 65 dB, nachts mit 55 dB belastet.

Sehr hohe Schallpegel können zu einer dauerhaften Schädigung des Gehörs führen. Dazu zählt auch (zu) lautes Musikhören (Śliwińska-Kowalska and Zaborowski 2017). Diesbezüglich empfiehlt die WHO, dass ein 24-Stunden Richtwert von 70 dB nicht überschritten werden sollte (wobei für regulatorische Zwecke kürzere Zeitfenster, die sich aus diesem Durchschnittswert errechnen lassen, geeigneter sind).

Am Wohnort stehen jedoch sogenannte nicht auditive Wirkungen im Vordergrund. Sie sind Folge einer chronischen Stressbelastung durch Lärm (Eriksson, Pershagen et al. 2018). Zu den gesundheitlichen Risiken zählen hier Herz-Kreislaufprobleme, Stoffwechselerkrankungen (Diabetes, Übergewicht), Schlafstörungen und kognitive Einbussen (Beeinträchtigung von Konzentration, Leistungen und Gedächtnis). Möglicherweise werden auch die mentale Gesundheit und die Schwangerschaft beeinflusst. Physiologisch eher leichtere Lärmbelastungen können ebenfalls gesundheitliche Konsequenzen haben. Dabei geht es primär um das subjektive Wohlbefinden und die Lebensqualität. Ob diese Risiken für lärmempfindliche Personen erhöht sind, ist jedoch umstritten.

Zu den einzelnen gesundheitlichen Endpunkten liegen sehr viele wissenschaftliche Studien vor, die das Risiko auch quantifizieren. Für die neuen Empfehlungen der WHO sind die entsprechenden Studien analysiert worden (Héroux and Verbeek 2018).

(Van Kempen, Casas et al. 2018) untersuchten in ihrer Review den Zusammenhang zwischen Lärm und Herz-Kreislaufkrankungen. Aus 7 Arbeiten (3 Kohorten-, 4 Fall-Kontroll-Studien) zum Strassenlärm errechneten sie ein um 8 % höheres Risiko für ischämische Erkrankungen (meist Folgewirkungen von Blutgefässerengungen, etwa: Angina Pectoris, Herzinfarkt) pro 10 dB Zusatzbelastung oberhalb 53 dB. Für Fluglärm, Eisenbahnlärm und Immissionen von Windkraftanlagen wird die Datenqualität als ungenügend für quantitative Risikoabschätzungen angesehen. (Münzel, Kröller-Schön et al. 2020) präzisierten den Befund indem sie zeigten, dass besonders der Nachtlärm problematisch ist und für die Beurteilung relevanter sein dürfte als der 24-Stunden Durchschnittslärm.

¹ L_{DEN} : **d**ay, **e**vening, **n**ight; Zuschlag von 5 dB am Abend (18:00 – 22:00 oder 19:00 – 23:00) und 10 dB in der Nacht (22:00 – 06:00 oder 23:00 – 07:00)

(Guski, Schreckenberg et al. 2017) widmeten sich in ihrer Review zu neueren (2010 – 2014) Übersichtsarbeiten dem Zusammenhang zwischen Lärm und subjektiver Beeinträchtigung (annoyance). Der Zusammenhang ist statistisch signifikant, am deutlichsten im Zusammenhang mit Fluglärm. Betreffend Strassenlärm kam die Metaanalyse zu einer knappen Verdreifachung des Risikos (dass sich Betroffene stark gestört und beeinträchtigt fühlen) pro 10 dB an Mehrlärm. Für Eisenbahn und Fluglärm sind die Risiken höher (Faktoren 4 und 5). Diese Resultate wurden auch in neueren grossen repräsentativen Befragungen aus Deutschland und der Schweiz bestätigt. Der Anteil stark Belästigter lag bei der Frankfurter NORAH-Studie bei einem Tagesdurchschnitt (L_{DEN}) von 35 dB (45 dB) bei 10% (40%). Bei Bahn- und Strassenlärm waren hingegen selbst bei 45 dB nur 3% bzw. 6% stark belästigt (Guski, Schreckenberg et al. 2017). In der Schweiz lagen die entsprechenden Werte bei 45 dB für Fluglärm bei rund 5% und für Bahn- und Strassenlärm bei rund 3% (Röösli, Wunderli et al. 2019).

Interessant sind in diesem Zusammenhang die zwei Arbeit von (Brown and Van Kamp 2017) und (Brink, Schäffer et al. 2019). Letztere zeigte, dass nicht allein die durchschnittliche Höhe der Lärmbelastung beeinträchtigt, sondern auch die Lärmintervalle. Wenige bzw. gelegentliche Spitzen, die sich deutlich hörbar vom Hintergrundlärm unterscheiden (z.B. Fluglärm und Eisenbahnlärm), sind problematischer als vergleichsweise gleichmässige Lärmteppiche, insbesondere in ländlichen Gebieten mit wenig Hintergrundgeräuschen. Da aber auch die Art des Geräuschs eine Rolle spielt und bisher keine grösseren Befragungen zur Belästigung von Geräuschen von Übertragungsleitungen durchgeführt wurden, bleibt die Belästigungswirkung dieser Lärmart unklar.

Brown und Kollegen sichteten Interventionsstudien und zeigten, dass die Wirkung von Lärmschutzmassnahmen in der subjektiven Bedeutung grösser ist als sie aufgrund der physikalisch messbaren Lärmreduktion zu erwarten wäre. (Shin, Oh et al. 2019) führten Tests an einer 500 kV bipolarer HGÜ durch: 7 % der Testpersonen nahmen Koronageräusche unter 40 dB wahr, bei einem Hintergrundlärmpegel von 35 dB. Anders ausgedrückt: wenn der Koronälärm weniger als 5 dB über dem Hintergrundlärm liegt, wird er kaum wahrgenommen und als Beeinträchtigung empfunden.

Die Auswirkungen von nächtlichem Lärm auf den Schlaf sind in der Metaanalyse von (Basner and McGuire 2018) zusammengestellt worden. Es zeigten sich signifikante Effekte sowohl auf objektive Schlafparameter als auch auf das subjektive Schlafempfinden, zumindest in denjenigen Studien, welche die Studienteilnehmer über den Hintergrund der Untersuchung – Lärm – informierten. Die Anzahl Personen, welche sich im Schlaf stark beeinträchtigt fühlt, verdoppelt sich pro 10 dB zusätzlichen Strassen- oder Fluglärm. Im Falle von Eisenbahnlärm verdreifacht sie sich sogar. Für Studien, welche die Studienabsichten (Lärmwahrnehmung) nicht offenlegten, waren die Risikoschätzer nur wenig erhöht und statistisch nicht signifikant.

Hinsichtlich kognitiver Effekte (Clark and Paunovic 2018a), Effekte auf Wohlbefinden und Psyche (Clark and Paunovic 2018b), sowie Effekte auf Geburten – Frühgeburten, Geburtsgewicht und -grösse, etc., (Nieuwenhuijsen, Ristovska et al. 2017) – ist die Datenlage von zu schlechter Qualität, um evidenzbasierte Schlussfolgerungen ziehen zu können.

4.2 Atemwegserkrankungen

Der Grund, dass im Zusammenhang mit HSL auch von Atemwegserkrankungen und weiteren gesundheitlichen Wirkungen gesprochen wird, hat mit den Koronaionen zu tun: wie in Kapitel 2.3 dargestellt, können sich Koronaionen an Aerosole anlagern und mit dem Wind verweht werden. Weil der Organismus sensibler auf geladene Feinstaubpartikel reagiert als auf neutrale, ist es denkbar, dass es im Umfeld von HSL – insbesondere von HGÜ, welche stärkere Ionenströme aufweisen als HDÜ – zu einer erhöhten Aufnahme solcher biologisch aktiven Substanzen kommt. Epidemiologische Studien müssten folglich in der Nähe von Hochspannungstrassen höhere Risiken bei den entsprechenden Erkrankungen zeigen.

Was die Produktion von Ozon und Stickoxiden durch die Koronaaktivität anbetrifft, ist aufgrund der sehr geringen zusätzlichen Expositionen auf Bodenhöhe im Vergleich mit der Hintergrundbelastung (unter 5 %) nicht mit gesundheitlichen Risiken zu rechnen.

Aerosole bzw. Feinstäube sind fast allgegenwärtig. Beim Einatmen lagern sie sich im Nasen-/Rachenraum, in der Luftröhre oder in den unteren Atemwegsorganen ab. Die Grössenordnung: um 10 % der inhalierten Partikel können absorbiert werden. Je kleiner die Partikel sind, desto weiter dringen sie in die Atemwege ein. Teilchen unter 2.5 µm (PM_{2.5}) scheiden sich in den Bronchien ab, Teilchen unter 1 µm in den Lungen (Lungenbläschen). Kleinere Teilchen (PM_{0.1}; dazu zählt der Dieseleruss) können auch ins Blut gelangen. Nicht-lösliche Substanzen können jahrelang im Lungenbereich bleiben und zu chronisch entzündlichen Reaktionen bis hin zu Krebs führen, letzteres insbesondere, wenn an den Partikeln krebserregende Stoffe angelagert sind, v.a. sog. PAK (polyzyklische aromatische Kohlenwasserstoffe). PAK sind v.a. im Zigarettenrauch und im Dieseleruss zu finden.

Dass Feinstaubbelastungen gesundheitlich schädlich sind, ist bekannt und speziell im Zusammenhang mit Verkehrsemissionen untersucht worden – siehe etwa: (Meier-Girard, Delgado-Eckert et al. 2019). Das trifft sowohl für chronische (Pun, Kazemiparkouhi et al. 2017) als auch für akute Belastungen (Alessandrini, Stafoggia et al. 2016) zu, die beide das Risiko von Atemwegserkrankungen, Herz-Kreislaufproblemen oder Lungenkrebs, insbesondere bei älteren Personen, erhöhen. Allerdings sind die kausalen Zusammenhänge noch in vielen Teilen unbekannt. Das gilt erst recht, wenn es um noch komplexere Zusammenhänge wie zwischen ionisierten Luftschadstoffen, Atemwegserkrankungen und Leukämien geht – siehe dazu etwa (Alexander, Bailey et al. 2013).

Zu letzterem gehört die Koronaionen-Hypothese. Sie besagt, dass sich Ionen der Koronaentladung an Aerosole wie Russ, PAK oder Benzol anlagern, die alle als kanzerogen gelten (Benzol ist als Risikofaktor für Leukämie anerkannt), auf diese Weise mit dem Wind in die Umgebung getragen und durch Anwohner eingeatmet werden. Weil sich die in vielen Studien festgestellte erhöhte kindliche Leukämierate im Umfeld von HSL nicht überzeugend durch die Magnetfeldexposition erklären lässt, könnte möglicherweise mit dieser Hypothese der höheren Konzentration an geladenen und damit biologisch reaktiveren Aerosolen bzw. Feinstäuben im Umfeld von HSL eine schlüssigere Erklärung vorliegen. Die Hypothese wurde von einer englischen Forschungsgruppe formuliert und untersucht (Fews, Henshaw et al. 1999). Eine Studie von (Swanson, Bunch et al. 2014), in der die Windrichtung modelliert und statistisch berücksichtigt wurde, konnte die Vermutung allerdings nicht bestätigen. (Jeffers 2015) kam mit einem differenzierteren Verbreitungsmodell zu demselben Befund.

Für eine gesundheitlich robuste Beurteilung müssen jedoch auch Teilchengrösse und Ladungen pro Teilchen berücksichtigt werden. Je kleiner ein Partikel ist und je mehr Ladungen er enthält, desto relevanter ist er in biologischer Hinsicht, u.a. weil er tiefer in die Atmungsorgane eindringen kann und besser mit dem Gewebe reagiert. (Bailey, Johnson et al. 2012) hat gezeigt, dass der grösste Anteil an Teilchen, welche im Umfeld von HSL gemessen werden, eine zusätzliche Ladung enthalten, 97 % haben drei oder weniger Ladungen. Gesundheitlich problematisch wird es nach (Melandri, Tarroni et al. 1983) bei Kleinstpartikeln (PM 0.3) ab ca. 10, bei Kleinpartikeln (PM 1) ab ca. 20 zusätzlichen Ladungen. (Prodi and Mularoni 1985) hat aus Messungen sogar 30 Ladungen für PM₁-Teilchen abgeleitet. (Jeffers 2007) errechnete, dass HSL-Koronas die gesundheitlich kritische Menge an Ladungen in Aerosolen nicht produzieren können. (Fatokun, Jayaratne et al. 2010) stellte für HSL zudem keinen Zusammenhang zwischen Teilchenkonzentration und Teilchenladung fest: während die Anzahl Teilchen (Aerosolkonzentration) im Umfeld von HSL nur wenig variiert, nimmt die Anzahl geladener Teilchen pro Luftvolumen mit der Distanz deutlich ab. Erhöhte Konzentrationen an negative Ionen sind in Windrichtung bis ca. 200 m, positive Ionen bis ca. 50 m messbar.

Aus diesen Literaturdaten ergibt sich der epidemiologische Befund, dass Studien zu Koronaionen, welche Personen als exponiert behandeln die über 200 m von einer HSL entfernt wohnen, zu Missklassifikationen führen und an Aussagekraft einbüßen. Viel wichtiger ist jedoch der biologische Befund, dass die Exposition gegenüber koronaverursachten geladenen Aerosolen die Deposition von Feinstaub in den Atemwegen nicht erhöht, weil die Ladungskonzentration dafür zu gering ist. Hinzu kommt noch,

dass die gesundheitliche Bedeutung von Koronaionen im Vergleich mit Hintergrundbelastungen und mit Umwelteinflüssen beispielsweise des Strassenverkehrs relativiert werden muss (Jayaratne, J-Fatokun et al. 2008), (Jayaratne, Ling et al. 2015).

Die neueste Untersuchung zum Thema mit den Endpunkt Krebs bei Erwachsenen, fand keinen Zusammenhang zwischen Krebsrisiko und der Konzentration von Koronaionen sowie elektrischen Feldstärken (Toledano, Shaddick et al. 2020). Jedoch wurde das Expositionsmodell für Koronaionen nicht mit unabhängigen Daten validiert und es kann daher nicht vollständig geklärt werden, ob die fehlende Assoziation die Folge von grosser Expositionsmissklassifikation ist. Dennoch erscheint insgesamt die Gültigkeit der Koronaionen-Hypothese unwahrscheinlich und daher auch ein möglicher Zusammenhang zwischen HSL und Atemwegserkrankungen.

Zum Schluss: es gibt den wissenschaftlich nicht belegten Mythos, dass negative Ionen gesundheitsfördernd, positive gesundheitsgefährdend seien. Gegen diese Volksweisheit spricht anderes überliefertes Wissen, etwa dass Bergluft gesund sei (Bergluft enthält mehr positive als negative Ionen). Die Sachlage ist wissenschaftlich nicht intensiv untersucht, wird aber gern von esoterischen Kreisen bewirtschaftet. Eine Review von (Alexander, Bailey et al. 2013) über publizierte Humanstudien zeigte keine Effekte der Ionenkonzentration auf Atemwegserkrankungen bzw. -verbesserungen. (Bailey, Williams et al. 2018) stellten in einer Metaanalyse von Tierstudien ebenfalls keine Effekte von Ionen auf alle untersuchten Endpunkte fest. In einer Arbeit von (Flory, Ametepe et al. 2010) wurde der Einfluss von negativen Ionen in Innenräumen auf wintersaisonale Depressionen bei Frauen getestet. 15 Frauen die an diesen Depressionen litten bildeten die Expositionsgruppe und wurden mit 41 Frauen einer anderen Therapie plus Placebogruppen verglichen. Es wurde ein Effekt, der statistisch nicht signifikant war festgestellt.

4.3 Fazit

Der Koronalärm kann das Wohlbefinden negativ beeinflussen. Das gilt in erster Linie für Lärmimmissionen während der Nacht. Störende Koronaentladungen kommen sowohl bei HDÜ- als auch bei HGÜ-Leitungen vor. Bei Hybridleitungen können einzelne Lärmkomponenten abnehmen, allerdings werden die Immissionen zeitlich ausgedehnter erfolgen, weil die Koronaprozesse bei HDÜ während des schlechten Wetters intensiver sind, bei HGÜ während des schönen Wetters. Hybridleitungen dürften deshalb höher Akzeptanzhürden aufweisen was die Lärmemissionen anbetrifft als herkömmliche 50 Hz- oder Gleichstrom-Leitungen. Durch die konkrete Wahl von Seil- und Mastdimensionen sowie geometrischer Leiteranordnung können die Immissionen optimiert werden. Wenn der Koronalärm weniger als 5 dB über dem Hintergrundlärm liegt, wird er kaum wahrgenommen bzw. als Beeinträchtigung empfunden. Je deutlich hörbarer er ist, desto mehr wird er als Belästigung eingestuft und führt zu Einbussen von Wohlbefinden und Gesundheit.

Was mögliche Risiken von Atemwegserkrankungen aufgrund erhöhter Konzentrationen von geladenen Aerosolpartikeln im Umfeld von HSL (insbesondere HGÜ) anbetrifft, gibt die Literatur Entwarnung. Einerseits unterscheiden sich die Konzentrationen von Aerosolteilchen nicht stark zwischen HSL-nahen und HSL-fernen Gebieten, andererseits sind die zusätzlichen Ladungen, welche der Feinstaub durch die koronabedingte Luftionisation erhält, tief und die Partikel sind deshalb biologisch kaum reaktiver als elektrisch neutrale Stäube. Das gilt auch, wenn es um kanzerogene Aerosolteilchen geht. Die Aufnahme dieser gesundheitlich gefährlichen Partikel ist folglich im Umfeld von HSL nicht erhöht. Die Hauptursachen von Atemwegserkrankungen und Tumoren des Atemtrakts sind, von den natürlichen Quellen wie Pollenflug, Mikroben oder Bodenerosion abgesehen, Zigarettenrauch und Luftverschmutzung (Feuerungen, Autoabgase).

5. Schlussfolgerungen

In Bezug auf EMF kommen die in diesem Bericht verwendeten Expertengremien zu einer recht einheitlichen Sicht der Dinge: Ungelöst ist nach wie vor die Frage, ob der statistische Zusammenhang zwischen HDÜ-Magnetfeldexposition und kindlicher Leukämie, den viele epidemiologische Studien zeigen, auf eine kausale Beziehung (Verursachung der Krankheit durch niederfrequente Magnetfelder) hindeutet oder nicht (also eher ein methodisches Artefakt ist). Aus Tier- und Zellstudien konnte bei tiefen Expositionen wie sie in Häusern um HDÜ auftreten, kein Wirkungsmechanismus konsistent nachgewiesen werden. Allerdings wurden in Zellexperimenten wiederholt Effekte auf die DNA nachgewiesen (typischerweise bei 100 μT und darüber), 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. Sie werden aber nicht als Belege für Kausalität gesehen.

Sodann weisen die Review-Berichte darauf hin, dass die Frage, ob niederfrequente Magnetfelder das Risiko für Alzheimer und ALS (Amyotrophe Lateralsklerose) erhöhen oder nicht, gegenwärtig keine endgültige Antwort kennt. Hinweise für Zusammenhänge stammen vorwiegend von Studien zu beruflichen Expositionen. Zu HDÜ gibt es weniger Daten und diese weisen insbesondere in Bezug auf ALS eher nicht auf ein erhöhtes Risiko hin. 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 auch für Symptome der Elektrosensibilität.

Eine Minderheit von Forschenden, die sich Grossteils in der (Biolinitiative 2012) zusammengefunden hat, interpretiert die Studienlandschaft deutlich kritischer und ist sogar überzeugt, dass eine Erhöhung des kindlichen Leukämierisikos durch langzeitige Exposition gegenüber HDÜ wissenschaftlich als sehr wahrscheinlich angesehen werden muss, und dass auch bei anderen Endpunkten (etwa neurodegenerative Erkrankungen) mit erhöhten Risiken gerechnet werden müsse.

Betreffend elektrischen AC-Feldern sind die Diskussionen in den Berichten eher dünn. Humanstudien werden nur wenige zitiert und vielen Endpunkte sind nicht diskutiert, nicht zuletzt mangels Daten. Insgesamt sind die Einschätzungen entwarnend, was chronische Risiken anbetrifft. Bekannt sind physiologische Effekte von hohen Expositionen um oder über den Grenzwerten. Solche Expositionen sind auf Trassen von HSL nicht ausgeschlossen, weshalb sensitive Menschen die Felder sinnlich wahrnehmen.

Expositionen gegenüber statischen Magnetfeldern, wie sie HGÜ bewirken können, liegen im Bereich der Erdmagnetfeldstärke und werden als gesundheitlich unproblematisch angesehen. Fast alle Studien widmen sich beruflichen und medizinischen Expositionen. Elektrostatische Felder können direkt unterhalb oder sehr nahe an entsprechenden Leitungskorridoren markante Feldstärken aufweisen und von sensiblen Personen (als unangenehm) wahrgenommen werden. Gesundheitlich negative Wirkungen sind wissenschaftlich nicht belegt. Aus den Berichten wird auch ersichtlich, dass es zu diesen Expositionen nur wenige und zu vielen Endpunkten, die im Zusammenhang mit AC-Magnetfeldern studiert werden, gar keine experimentellen Human- oder epidemiologischen Studien gibt.

Kaum thematisiert hinsichtlich Gesundheit wurden bisher schnelle Veränderungen der Stromstärken bei HGÜ. Hier wären entsprechende Abschätzungen und Leitungsdaten hilfreich. Den "worst-case" dürfte der Fehlerstrom darstellen. Bei Verwendung von Halbleitertechnologie (IGBT) können kurzzeitige Stromänderungen um 3 kA/ms auftreten, was 10 Mal mehr ist als die Amplitudenänderung einer grossen HDÜ-Leitung. Bei mechanischen Schaltern liegen die Änderungen wegen der längeren Reaktionszeiten (bis 50 ms) deutlich unterhalb der HDÜ-Werte. Seitens Lastflussregelung sind Stromänderungen kleiner und weniger schnell als im Kurzschlussfall, so dass davon ausgegangen werden kann, dass solche Transiente kaum biologisch relevante Körperströme induzieren.

Gesundheitliche Wirkungen durch schwache Kontaktströme oder elektrisch geladenen Moleküle oder Aerosole sind vergleichsweise wenig untersucht worden. Aufgrund der vorliegenden Daten und von

theoretischen Überlegungen scheinen negative Wirkungen unwahrscheinlich.

Zu der Störfunktion der Korona-Entladungsgeräusche gibt es bisher keine Befragungen. Anekdotische Berichte und Daten zu Verkehrslärm lassen vermuten, dass das Störpotenzial relativ gross ist. Ob damit auch Schlafprobleme oder gesundheitliche Wirkungen verbunden sind, wurde bisher nicht untersucht.

Einige epidemiologische Arbeiten untersuchten das Erkrankungsrisiko in Abhängigkeit von der Distanz zur Hochspannungsleitung. Damit werden implizit alle oben erwähnten Faktoren untersucht, die mit zunehmender Distanz von der Hochspannungsleitung abnehmen, obwohl eine gewisse Expositionsmissklassifikation nicht vermieden werden kann. Die Analysen fanden keine oder nur sehr schwache Zusammenhänge, was den Schluss erlaubt, dass allfällige gesundheitliche Wirkungen in der Nähe von Hochspannungsleitungen relativ gering sind, unabhängig von der Wirkungsgrösse wie Magnetfeld, elektrisches Feld oder Immissionen als Folge von Koronaentladungen.

Gesundheitliche Effekte von kombinierten Expositionen AC/DC werden in der Literatur nicht diskutiert, weil es diese Alltagsexpositionen bislang nicht gab oder kaum gibt. Vor dem Hintergrund von zukünftig vermehrt bzw. neu auftretenden HSL DC- bzw. AC/DC-Ko-Expositionen sind folgende Punkte von Bedeutung:

- Die Magnetfelder von HGÜ-Leitungen liegen selbst unterhalb der Seile in der Grössenordnung des Erdmagnetfeldes und sind aus gesundheitlicher Sicht unproblematisch. Das gilt auch, wenn sie in Kombination mit AC-Systemen auftreten. Hybridleitungen generieren keine grundsätzlich neuen Magnetfeldexpositionen.
- Die AC-Magnetfelder einer Hybridleitung können am Boden eine höhere Feldstärke aufweisen als bei üblichen Drehstrom-Doppelsystemen, weil die Phasenoptimierung weniger effektiv ist. Durch entsprechende Leiteranordnung und Mastgeometrie können die Feldstärken am Boden jedoch so weit reduziert werden, dass eine Hybridleitung bei insgesamt mehr Kapazität keine höhere AC-Magnetfeldexposition verursacht als die (ursprüngliche) HDÜ-Leitung. Das geht aber auf Kosten der Wirtschaftlichkeit (Verluste, Kompensationen), denn je nach Anordnung der Seile sind die gegenseitigen Feldeinkopplungen zwischen AC und DC grösser oder kleiner. Je nach Gewichtung von Exposition und Wirtschaftlichkeit wird die Optimierung ein anderes Resultat liefern.
- Das Optimierungskalkül gilt auch für die elektrischen Felder von Hybridleitungen.
- Hinsichtlich Gesundheit ist bei Ko-Expositionen von elektrischen Feldern v.a. die Wahrnehmung zu beachten. Die wenigen verfügbaren Daten weisen darauf hin, dass ein elektrisches AC-Feld (DC-Feld) in Ko-Exposition mit einem elektrischen DC-Feld (AC-Feld) bei tieferen Feldstärken als unangenehm empfunden wird. Robuste Daten zu entsprechenden Wahrnehmungs- und Belästigungsschwellen fehlen leider noch, sollten aber bald verfügbar sein.
- Chronische Expositionen gegenüber elektrischen Feldern (AC, DC, kombiniert) auf tiefem Niveau sind nach aktuellem Stand des Wissens gesundheitlich unproblematisch.
- Die Ionenströme von DC-Leitungen sind beachtlich. Sie erhöhen die elektrische Feldstärke am Boden und damit auch die Wahrnehmbarkeit der Felder. Die Datenlage über individuelle Sensitivitäten ist noch zu dünn, um Schlussfolgerungen für die Dimensionierung von HGÜ- oder Hybridleitungen ziehen zu können.
- Hingegen ist es unwahrscheinlich, dass Koronaionen einen Einfluss auf die Gesundheit von Anwohnern von HSL haben. Die Aufladung von (problematischen) Aerosolteilchen ist biologisch unbedeutend. Von ihnen gehen keine Risiken für Atemwegserkrankungen aus.
- Dasselbe gilt für die durch die Koronaaktivität produzierten Luftschadstoffe. Sie erhöhen die Hintergrundkonzentrationen dieser Stoffe am Boden um einige wenige Prozent.
- Die Lärmemissionen sind aus Belästigungs- und gesundheitlicher Sicht wahrscheinlich am problematischsten und bei Hybridleitungen besonders zu beachten. Weil die Belastungen von DC-Lärm bei gutem Wetter höher sind als bei schlechtem (bei AC ist es genau umgekehrt), kann ein AC/DC-Korridor mehr Koronalärm (in Jahresstunden) verursachen als ein HDÜ-Korridor. Die gegenseitige

Einkopplung der AC- und DC-Felder erhöht zudem die Koronaaktivitäten, so dass auch hier mit höheren Lärmwerten gerechnet werden muss. Findet eine Leitungskonversion HDÜ zu Hybrid statt, so haben Anwohner mit mehr Lärm zu rechnen, was die Akzeptanz eines solchen Projekts verschlechtern dürfte. Mit Lärmsimulationen können die technischen Parameter (bei Neuleitungen auch die Linienführung) optimiert werden. Mit experimentellen Studien könnte die Stresswirkung von Lärm untersucht werden; mit epidemiologischen Studien die für Lärm relevanten Gesundheitseffekte auf das Herz-Kreislaufsystem, den Stoffwechsel und die Psyche. Solche Daten liegen noch nicht vor.

6. Anhang berufliche EMF-Exposition

6.1 Krebs

6.1.1 Leukämien und Lymphome

Metaanalysen. In einer gepoolten Analyse aller relevanten Publikationen bis 2007 durch (Kheifets, Monroe et al. 2008) wurde u.a. das Leukämierisiko bei beruflicher Exposition² 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 werden. 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”.

Die Metaanalyse in (Huss, Spoerri et al. 2018) errechnete auf Basis von 27 Studien zu beruflicher Exposition für akute myeloische Leukämie (AML) ein leicht erhöhtes Risiko von 1.21 (95 % CI = 1.08 – 1.37).

Einzelstudien. In einer Schweizer Nachfolgestudie zu (Minder and Pfluger 2001) über die Mortalität beim Eisenbahnpersonal, waren die Befunde (Röösli, Lörtscher et al. 2007) hinsichtlich Leukämie- und Lymphomrisiko bei niederfrequenter Magnetfeldexposition schwächer als in der Erststudie (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”.

(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 (follikuläres Lymphom sowie AML) erhöhte Risiken. Die Autoren ziehen folgende vorsichtige Schlussfolgerung (p. 213):

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

(Guxens, 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. Dasselbe gilt für die Studien von (Johansen,

² In epidemiologischen Untersuchungen zur beruflichen Exposition werden die Expositionen meist über eine „Job-Exposure Matrix“ den Personen zugeordnet. Die Matrix enthält für die verschiedenen statistisch erfassten Berufs- und Tätigkeitsgruppen den relevanten Expositionsgrad, der häufig über Expertenschätzungen und/oder Messungen erhoben worden ist.

Raaschou Nielsen et al. 2007) zu dänischen Angestellten und von (Sorahan 2012) zu britischen Beschäftigten.

In der schweizerischen Studie von (Huss, Peters et al. 2018), ergab sich ein statistisch signifikanter Zusammenhang zwischen Sterberisiko und beruflicher Magnetfeldbelastung (einzig) im Falle von AML und langzeitiger (hoher) Exposition. Das Fazit der Autoren (p. 467):

“Our analysis provided no convincing evidence for an increased risk of death from a range of hemato-lymphopoietic cancers in workers exposed to high or medium levels of ELF magnetic fields”.

6.1.2 Hirntumore

Hinsichtlich Hirntumorrisiko und beruflicher Magnetfeldexposition liegen eine Reihe von älteren und neueren Einzelstudien vor. In den bereits zitierten Arbeiten von (Röösl, Lörtscher et al. 2007) mit Eisenbahnangestellten, (Koeman, van den Brandt et al. 2014) mit einer dänischen Kohorte, (Navas-Acien, Pollan et al. 2002) mit einer schwedischen Kohorte und (Sorahan 2014) mit Angestellten von Elektrizitätsunternehmen in U.K. zeigten sich keine erhöhten Risiken. Als Beispiel hier das Fazit der Studie von Sorahan – ein Update von (Sorahan, Nichols et al. 2001) – (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. 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 Arbeit 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, die gegenüber niederfrequenten Magnetfeldern exponiert waren.

(Coble, Dosemeci et al. 2009) fanden in einer spitalbasierten Fall-Kontroll-Studie in den USA keine Risikozunahmen 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. Es zeigten sich keine erhöhten Risiken hinsichtlich Gesamtexposition (kumulierte lebenslange Berufsexposition), durchschnittliche Exposition, maximale Exposition und Expositionsdauer in Jahren. Auch eine neuere Simulation (Oraby, Sivaganesan et al. 2018) mit unterschiedlichen Expositionsmassen bestätigte diese Befunde (p.7):

„This analysis provided no evidence that cumulative lifetime occupational exposure to ELF is associated with brain tumour risk. This was seen using the AM, GM, and MGM as exposure surrogates, as well as when exposure was adjusted for Berkson error. These findings are in accordance with those recently

reported by (Bowman, Touchstone et al. 2007) for cumulative lifetime exposure in the full seven country INTEROCC study, as well as those in a prospective cohort study in the Netherlands conducted by (Koeman, van den Brandt et al. 2014)“.

Die Daten zur längsten Expositionszeit (über 25 Jahre) zeigten jedoch ein statistisch signifikant erhöhtes Risiko für Hirnhauttumore (OR = 1.3) und ein erhöhtes (OR = 1.22) aber nicht signifikantes Risiko für Gliome. Sodann ergab sich in der Detailanalyse (bei korrigiertem Beschäftigungsstatus) für den Expositionszeitraum 1 – 4 Jahre vor der Diagnose eine statistisch signifikante dosisabhängige Risikoerhöhung für Gliome, nicht aber für Meningiome. Für die zwei anderen Expositionszeitfenster (4 – 9 Jahre und ≥ 10 Jahre vor der Diagnose) zeigten sich keine Auffälligkeiten. Die Autoren interpretieren diesen Befund als Hinweis auf einen möglicherweise wachstumsfördernden (promotionalen) Effekt niederfrequenter elektromagnetischer Felder. In der Arbeit zu Ko-Expositionen mit Chemikalien zeigten sich in denselben Daten keine signifikanten Effekte (Turner, Benke et al. 2017), im Gegensatz zur Studie von (Navas-Acien, Pollan et al. 2002), die für Lösungsmittel, Blei und Pestizide im Zusammenwirken mit ELF erhöhte Risiken auswies.

Die Arbeiten der schwedischen Forschungsgruppe um Lennart Hardell haben für die hohen Expositions-kategorien einen Zusammenhang mit Grad IV Astrozytomen (Carlberg, Koppel et al. 2017), aber keinen mit Meningiomen (Carlberg, Koppel et al. 2018) errechnet.

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 Leukämiebefund (siehe oben).

6.1.3 Brustkrebs

(Sun, Li et al. 2013) legte eine Metaanalyse von 18 Studien von beruflich exponierten Männern (darunter 2 Studien mit häuslicher Exposition) vor. Die Originalarbeiten waren: (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. Eine in jüngerer Zeit publizierte Arbeit betraf kanadische Arbeiter und 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 (Grundy, Harris et al. 2016).

Bei beruflich exponierten Frauen konnte eine 2005 publizierte schwedische Untersuchung keine erhöhten Risiken feststellen (Forssen, Rutqvist et al. 2005). 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, Slotte et al. 2014) stellten keine erhöhten Risiken fest. Insgesamt können die neueren Arbeiten im Sinne einer Entwarnung interpretiert werden (SSM 2016).

6.1.4 Andere Tumore

Erwähnenswert sind noch zwei Studien zu anderen Tumorarten. (Behrens, Lynge 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. schlussfolgern, 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 Umwelteinflüssen, 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. Die Autoren sind 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.

6.1.5 Hinweise von AC elektrischen Feldern und DC-Expositionen

Daten zu möglichen Krebsrisiken beruflicher Expositionen gegenüber elektrischen AC-Feldern liegen nahezu keine vor. Wenn solche Felder in Studien erwähnt werden, dann nur in Form von Ko-Expositionen mit AC-Magnetfeldern (SCENIHR 2015). Daraus lassen sich keine Schlussfolgerungen hinsichtlich des Anteils der elektrischen Feldkomponente ziehen. Die IARC (2002) kam deshalb zum Schluss, dass elektrische 50/60 Hz-Felder hinsichtlich ihrer Karzinogenität nicht klassifiziert werden können (Kategorie 3). Der Monograph der WHO (2007) listet keine Humanstudie mit beruflicher Exposition gegenüber niederfrequenten elektrischen Feldern. Dasselbe gilt für (ICNIRP 2010) und (Belyaev, Dean et al. 2016).

Hingegen wurde in epidemiologischen Studien eine allfällige kanzerogene Wirkung von statischen Magnetfeldexpositionen untersucht. 2006 lautet das Fazit der WHO (2006) aus den bis dato veröffentlichten Erkenntnissen (p. 8):

“Increased risks of various cancers, e.g. lung cancer, pancreatic cancer, and haematological malignancies, were reported, but results were not consistent across studies. The few epidemiological studies published to date leave a number of unresolved issues concerning the possibility of increased cancer risk from exposure to static magnetic fields. Assessment of exposure has been poor, the number of participants in some of the studies has been very small, and these studies are thus able to detect only very large risks for such rare diseases. The inability of these studies to provide useful information is confirmed by the lack of clear evidence for other, more established carcinogenic factors present in some of the work environments”.

Die Schlussfolgerung von (ICNIRP 2009) lautet fast identisch (p. 510):

“Overall, the few available epidemiological studies have methodological limitations and leave a number of issues unresolved concerning the possibility of risk of cancer or other outcomes from long-term exposure to static magnetic fields. These studies do not indicate strong effects of static magnetic field exposure of the level of tens of mT on the various health outcomes studied, but they would not be able to detect small to moderate effects”.

Die Einschätzung der (SSK 2011) deckt sich mit der WHO-Meinung (p. 58):

“Epidemiologische Studien liegen über exponierte Arbeiter (z. B. Schweißer, Arbeiter in Aluminiumschmelzen etc.) und schwangere Assistentinnen bei der MR-Bildgebung vor (...). Es wurden zwar für einige Endpunkte erhöhte Krebsrisikoschätzer ermittelt, die jedoch insgesamt kein konsistentes Bild ergaben. Wegen der zusätzlichen gesundheitsbeeinträchtigenden Kofaktoren und methodischer Schwierigkeiten ist die Datenlage als ungenügend einzustufen”.

(SCENIHR 2015) fokussiert auf akute Wirkungen hoher Expositionen, insbesondere im Zusammenhang mit MRIs (p. 189):

“The studies on effects on DNA integrity after an MRI scan are clearly of interest to follow up. However, it is not clear what part of the exposure in the scanner causes the effect: static, switched gradient field or the pulsed RF field”.

Nicht grundsätzlich anders als bei elektrischen AC-Feldern sieht die Sachlage bei elektrostatischen Feldern aus. Die (SSK 2011) bringt es mit folgendem Zitat auf den Punkt (p. 60):

“Wegen fehlender plausibler physikalischer und biologischer Wirkungsmechanismen und dem Umstand, dass das Körperinnere vor äußeren elektrostatischen Feldern nahezu völlig abgeschirmt ist, ist ein Zusammenhang mit Krebserkrankungen nicht plausibel und wurde daher auch nicht systematisch mit unterschiedlichen wissenschaftlichen Ansätzen oder verschiedenen biologischen Endpunkten untersucht”.

6.1.6 Fazit

Leukämien und Lymphome: Insgesamt gibt es keine oder nur schwache Hinweise auf die meisten Endpunkte in diesem Feld. Einzig hinsichtlich einer Leukämieart (AML - akute myeloische Leukämie) finden sich in einer holländischen und einer schweizerischen Studie, sowie in einer Metaanalyse, Hinweise auf erhöhte Risiken bei beruflicher Exposition.

Hirntumore: Mehrheitlich wurden keine Risiken erkannt. 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 meist 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.

Brustkrebs: Die Studien bei Männern gaben vereinzelt Hinweise für ein erhöhtes Risiko, namentlich bei Beschäftigten in Elektrizitätsunternehmen. Da Brustkrebs bei Männern sehr selten ist, sind die einzelnen Untersuchungen wenig aussagekräftig und Publikationsbias erscheint möglich. Bei den Frauen gibt es kaum Hinweise auf einen Zusammenhang zwischen beruflicher Exposition und Brustkrebs, auch in den neueren Studien nicht.

Andere als AC-Magnetfeld Expositionen: Aufgrund fehlender Humanstudien kann keine datenbasierte Aussage zu beruflichen Expositionen gegenüber elektrostatischen und elektrischen AC-Feldern gemacht werden. Die verfügbaren Arbeiten zu statischen Magnetfeldern lassen wegen methodischer Mängel, insbesondere Ko-Expositionen mit anderen elektromagnetischen Feldern und Arbeitsplatz-Ko-Faktoren, keine Schlussfolgerungen zu.

6.2 Neurodegenerative Erkrankungen

6.2.1 Alzheimer

(Hug, Rösli et al. 2006) zogen in ihrer Metaanalyse von 8 Veröffentlichungen zu berufsbedingten Expositionen und Alzheimerisiko das Fazit (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”.

Diese Einschätzung bestätigte eine Review von (Killin, Starr et al. 2016) und eine Metaanalyse von 2018 (Jalilian, Teshnizi et al. 2018), in der 20 (eher heterogene) Studien zu berufsbedingten Expositionen analysiert wurden und eine erhöhtes Risiko zeigten (OR = 1.63; 95 % CI = 1.35 – 1.96). Trotz des statistisch signifikanten Resultats warnen die Autoren jedoch vor eine Überbewertung des Zusammenhangs (p. 242):

“However, this suggestion should be interpreted with caution given the moderate to high heterogeneity and indication for publication bias”.

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 Metaanalyse von (Vergara, Kheifets et al. 2013) beurteilte den Sachstand mit Hilfe von 42 Studien, worunter auch solche, die sich nicht explizit mit EMF beschäftigt hatten, deren Angaben aber als ausreichend erachtet wurden, um daraus berufliche Magnetfeldexpositionen abzuleiten. In der Studie wurden Alzheimer und ALS (genauer: MND [Motor Neuron Disease], wobei in der Studie der ALS-Anteil 90 % betrug) untersucht. Das Ausgangsmaterial war sehr heterogen und über 60 Risikoschätzer wurden berechnet. Es wurde für beruflich exponierte Personen ein 27 % höheres Risiko, das statistisch signifikant war (95 % CI = 15 – 40 %), errechnet. 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“.

Auch die Meta-Analysen von (Huss, Spoerri et al. 2014) und von (Gunnarsson and Bodin 2019) errechnete einen Zusammenhang zwischen dem Alzheimer Erkrankungsrisiko und der durchschnittlichen Höhe der Magnetfeldbelastung von Berufstätigen. Nach Gunnarsson und Bodin beträgt das Risiko, eher an Alzheimer zu erkranken, wenn man beruflich erhöhten Magnetfeldern ausgesetzt ist, um 10%.

Einzig die Literaturanalyse von (Santibanez, Bolumar et al. 2007), basierend auf 7 Studien zu beruflichen Expositionen, kam zum Schluss, dass berufsbedingte, niederfrequente Magnetfeldexpositionen das Risiko an Alzheimer zu Erkrankung nicht erhöhen.

Nachfolgend einige Ergebnisse jüngerer Einzelstudien zum Thema. (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 Untersuchung (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 ein 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.

(Röösli, Lörtscher 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 diese Zahlen mit Vorsicht zu interpretieren sind. 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.

Einige Studien haben sich mit Demenzerkrankungen 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: (Röösli, Lörtscher et al. 2007) errechneten in ihrer Arbeit zu neurodegenerativen Erkrankungen bei Eisenbahnangestellten erhöhte Risiken für senile Demenz bei den exponierten Lokführern von 1.96 (95 % CI = 0.98 – 3.92). (Andel, 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 μT 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 statistischen Befunde bei derart tiefen Fallzahlen nur mit sehr grosser Vorsicht interpretiert werden dürfen. Die Schlussfolgerung der Autoren ist nur dann faktengerecht, wenn dem Wort „may“ das nötige Gewicht gegeben wird (p. 1641):

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

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

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

6.2.2 ALS

Seit 2007 sind eine Reihe von Einzelstudien publiziert worden, welche eine robustere Beurteilung erlauben. Keine erhöhten Risiken bei beruflicher Exposition fand die bereits zitierte Arbeit von (Sorahan and Kheifets 2007) zu Angestellten in Elektrizitätsunternehmen im Vereinigten Königreich. Die follow-up Studie (Sorahan and Mohammed 2014) fand erneut keinen Zusammenhang zwischen ALS und Magnetfeldexposition. (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. (Fischer, Kheifets et al. 2015) analysierten über 4'500 schwedische ALS Patienten und mehr als 20'000 Kontrollen und fanden keine Zusammenhänge zwischen ALS und Magnetfeldexpositionen (erfasst nach INTEROCC JEM, ergänzt mit Messdaten). 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 ALS Risiko (OR = 1.22; 95 % CI = 1.03 – 1.43).

Folgende Einzelstudien haben dagegen einen Zusammenhang identifiziert: Zunächst die Arbeit von (Rösli, Lörtscher et al. 2007) zu neurodegenerativen Erkrankungen bei Eisenbahnangestellten. Sie errechnete erhöhte Risiken für ALS, allerdings ist wegen der wenigen Fälle die statistische Unsicherheit bedeutsam, so dass sich keine wirklich robuste Aussage ableiten lässt. 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 Expositions-kategorie 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”.

Zum qualitativ gleichen Ergebniss kamen (Koeman, Slottje et al. 2017). Sie untersuchten eine holländische Kohorte von über 130'000 Beschäftigten. Eine Subkohorte von 4'344 Personen und 136 ALS-Fälle wurde mit detailliertem Fragebogen hinsichtlich verschiedener Arbeitsplatzexpositionen, darunter auch niederfrequente Magnetfelder, analysiert. Die Autoren fanden einen statistisch signifikanten Zusammenhang zwischen ALS-Mortalitätsrisiko und Anstellung in einem Beruf, der hohen Magnetfeldstärken ausgesetzt ist (OR = 2.19; 95 % CI = 1.02 – 4.73). Zu anderen Arbeitsplatzbelastungen, darunter elektrische Schläge, ergaben sich keine positiven Befunde. Eine Stärke dieser Arbeit ist, dass es sich um eine prospektive Fall-Kontroll-Studie handelt (follow-up 17.3 Jahre) und vergleichsweise viele Fälle dieser sehr seltenen Krankheit vorlagen. Limitationen besitzt wie fast jede epidemiologische Arbeit auch diese, insbesondere wurde die berufliche Magnetfeldbelastung (über eine Job-Exposure Matrix) nur einmal, bei der Rekrutierung der Beschäftigten, erhoben. Es muss deshalb mit zufälligen Expositions-Missklassifikationen gerechnet werden

Auch die jüngste und bislang grösste Studie (Peters, Visser et al. 2019), die 1'323 ALS Fälle und 2'704 Kontrollen aus Irland, Italien und den Niederlanden zählte, wies ein statistisch (knapp) signifikantes Risiko aus (OR = 1.16; 95 % CI = 1.01 – 1.33). Ebenfalls statistisch signifikant war das Risiko bezüglich der Exposition gegenüber Elektroschocks (OR = 1.23).

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

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

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

(Huss, Peters et al. 2018) schlossen 20 publizierte Arbeiten in ihre Metaanalyse zu ALS und beruflicher Exposition gegenüber Magnetfeldern und/oder elektrischen Schlägen ein. Es ergab sich über alles gesehen ein leicht erhöhtes Risiko von OR = 1.14 (95 % CI = 1.0 – 1.30) für Magnetfelder, von OR = 1.41 (95 % CI = 1.05 – 1.92) für elektrische Schläge. Die Studien waren eher heterogen und die Risikoschätzer tendierten bei qualitativ guter Expositionsabschätzung grösser zu sein.

Die Metaanalyse von (Gunnarsson and Bodin 2018) wies eine statistisch signifikante OR von 1.18 für niederfrequente Magnetfelder und elektrische Schläge zusammengenommen aus. Allerdings basieren die Daten zu EMF-Expositionen auf lediglich vier Artikeln.

6.2.3 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 Expositions-kategorien 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 (Röösli, Lörtscher et al. 2007) gab es unter den besonders exponierten Lokführern keine Auffälligkeit, und dasselbe gilt für die ebenfalls besonders exponierten Schweisser in den Arbeiten 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 elektrischen Geräten 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 niederländischen Kohorte einen Einfluss beruflicher Magnetfeldexposition auf das Parkinson-Risiko berechnet. Allerdings sind die Fallzahlen tief und die Autoren mahnen zur vorsichtigen Interpretation, weil es kein Dosis-Wirkungsmuster gibt. Einen negativen statistischen Zusammenhang zeigte die Analyse von (Pedersen, Poulsen et al. 2017) über eine Kohorte von Elektrizitätsarbeitern (n = 32'006) in Dänemark.

Eine Metaanalyse von 11 Studien zu beruflich Exponierten (Huss, Koeman et al. 2015) fand kein, bzw. ein nur marginal erhöhtes Risiko (OR = 1.05; 95 % CI = 0.98 – 1.13).

Nur zwei Arbeiten gibt es zu Multipler Sklerose im Zusammenhang mit beruflicher, niederfrequenter Magnetfeldexposition: (Röösli, Lörtscher et al. 2007) und die oben erwähnte Arbeit von (Pedersen, Poulsen et al. 2017). Während die schweizerische Arbeit keine Auffälligkeiten beobachtete, fand die dänische Arbeit ein marginal und statistisch nicht signifikant erhöhtes Risiko.

6.2.4 Hinweise von elektrischen AC-Feldern und DC-Expositionen

Die (WHO 2007) thematisiert im Zusammenhang mit beruflichen EMF-Expositionen und neurodegenerativen Erkrankungen nur 50/60 Hz Magnetfelder, Körperableitströme und elektrische Schläge als mögliche Quellen von körperintern induzierten biologisch relevanten elektrischen Spannungen. Elektrische AC-Felder werden nicht thematisiert. Einzig in einigen wenigen Studien, die EMF-Arbeitsplatz-Expositionen generell typisieren, werden elektrische Felder erwähnt. Häufig basiert die Expositionseinteilung in diesen Studien auf Schätzungen zu den magnetischen Feldern. Die Resultate sind nicht aussagekräftig hinsichtlich elektrischer Feldexpositionen. (SCENIHR 2015) und (ICNIRP 2010) behandeln die Sachlage nicht anders. Vor diesem Hintergrund ist eine Risikoeinschätzung von beruflichen Expositionen gegenüber 50/60 Hz elektrischen Feldern hinsichtlich neurodegenerativen Erkrankungen mangels Daten nicht möglich.

Statische Felder. Im Bericht der (WHO 2006) spielen neurodegenerative Erkrankungen keine Rolle. Auch die (ICNIRP 2009), (SSK 2013b) und (SCENIHR 2015) fast 10 Jahre später thematisieren sie mangels Daten nicht.

6.2.5 Fazit

Wissenschaftlich belastbare Aussagen zum Zusammenhang zwischen beruflicher Magnetfeldexposition und neurodegenerativen Erkrankungen sind nicht einfach, insbesondere nicht zu den teilweise recht seltenen Erkrankungen wie ALS oder MS. Aufgrund der heute verfügbaren Daten lässt sich nur ein Fazit zu niederfrequenten Magnetfeldexpositionen ziehen. Folgendes Bild lässt sich erkennen:

Es ist unwahrscheinlich, dass niederfrequente Magnetfeldexpositionen, 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. Hinsichtlich ALS bleibt unklar ob berufliche Belastungen an Magnetfeld-exponierten Jobs das Risiko erhöht oder ob auch (und zusätzlich) 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.

Andere als AC-Magnetfeld Expositionen: Aufgrund fehlender Studien kann keine Risikoaussage hinsichtlich beruflichen Expositionen gegenüber elektrostatischen und elektrischen AC-Feldern gemacht werden.

7. Anhang Forschungsbedarf

7.1 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 Transformatoren). 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 bezüglich der Anzahl untersuchter Fälle sein müssen und entsprechend aufwändig sind.

Nötig wäre auch eine systematische Evaluation, ob die beobachteten Zusammenhänge zwischen Magnetfeldbelastungen und Kinderleukämien durch andere Faktoren ausgelöst sind, die im Zusammenhang mit Magnetfeldern stehen könnten. Diskutiert wurden in diesem Zusammenhang insbesondere in der Umgebung von Hochspannungsleitung auftretende Kontaktströme oder Koronaentladungen, 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 wurden, obwohl dort die Magnetfeldbelastung bereits Hintergrundwerte erreicht. Ein Expertenworkshop mit den wichtigsten Fachleuten zu diesem Thema, an dem die verfügbare Evidenz und Plausibilität kritisch gewürdigt wird, wäre hier (im Vorfeld einer allfälligen weiteren empirischen Studie) angezeigt. Das scheint vor allem sinnvoll weil (1) die Kontaktstrom- und Koronaionen-Hypothese heute als unwahrscheinlich beurteilt wird und (2) eine sinnvolle empirische Studie eine sehr grosse Datenbasis brauchen würde, um solche zeitlich und räumlich korrelierenden Faktoren unabhängig voneinander untersuchen zu können.

(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).

7.2 Neurodegenerative Erkrankungen

Um die Unklarheiten in Bezug auf ein möglicherweise erhöhtes Alzheimer oder ALS Risiko zu klären sind weitere epidemiologische Studien nötig, insbesondere zu Alltagsbelastungen. Zentral für solche Untersuchungen 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 seltenen starken Ereignisse oder die häufigen schwachen Ereignisse? Die zurzeit vorhandenen Berufs-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 neuen Tiermodellen sowie in-vitro Anordnungen zur Untersuchung möglicher Wirkmechanismen im Vordergrund stehen.

7.3 Elektromagnetische Sensibilität

Offene Fragen betreffen hier unter anderem die Wahrnehmbarkeit von Feldern. Mittels randomisierter Doppelblindstudien sollte systematisch erhoben werden, wo die relevanten biologischen Schwellen (Wahrnehmung, Belästigung, Schmerz) für statische und niederfrequenten Magnetfelder und auch elektrische Felder ist. Da die Sensitivität gegenüber Feldern, die Risikowahrnehmung beeinflusst ist solches Wissen wichtig. Dabei sollte auch systematisch evaluiert werden, ob es Personen gibt, die eine gute Wahrnehmungsfähigkeit besitzen. Diese Untersuchungen müssten sich auch auf Ko-Expositionen von statischen und Wechselfeldern beziehen, möglicherweise auch unter Einbezug von begleitenden Faktoren wie Ionenströme, nicht zuletzt um länger zurückliegende Resultate zu replizieren. Hinsichtlich der Akzeptanz von Hybridleitungen sind Erkenntnisse zur Wahrnehmbarkeit von kombinierten Expositionen wichtig. Sie werden auch von der SSK (2013b) empfohlen.

Vorteilhaft 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 tatsächliche wahrnehmen können, wie sie das häufig angeben. Möglicherweise hilft die systematische Testung der Wahrnehmbarkeit begleitet mit Informationen in Bezug auf 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 ELF-Felder reagieren, als prioritäres Forschungsfeld.

7.4 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 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 niederfrequenter 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 ELF-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 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).

Hinsichtlich chronischer statischer Expositionen auf tiefem Niveau sind aus unserer Sicht keine gesundheitlichen Studien notwendig, da sich die relevanten HSL-Feldstärken kaum von der Hintergrundexposition unterscheiden. Auch Ko-Expositionen auf tiefem (häuslichem) Niveau sind nicht von grosser Priorität, da sie auch natürlicherweise vorliegen und nach heutigem Stand des Wissens keine Gründe bekannt sind, weshalb diese Expositionen problematisch sein könnten.

Eine Forschungslücke gibt es in Bezug auf die Geräusche durch Korona-Entladungen. Da diese bei Hybridleitungen noch zunehmen können, empfiehlt es sich dieses Thema systematisch zu evaluieren. Wichtige Themen sind die Belästigungswirkung im Vergleich zu anderen Schallquellen, die akute und langfristige Stresswirkung sowie langfristige Auswirkungen auf die Schlafqualität, Herz-/Kreislaufkrankungen, den Stoffwechsel und die Psyche.

Um den gesamten gesundheitlichen Impact, unabhängig vom Wirkungsmechanismus abschätzen zu können, sind epidemiologische Ansätze, welche auf der Distanz zu Hochspannungsleitungen beruhen, hilfreich. Wenn Daten von Bevölkerungs- und Krankheits- wie auch Todesursachenregister genutzt werden können, sind solche Analysen vergleichsweise einfach zu realisieren. Je nach gesundheitlichem Endpunkt wären auch wichtige konfundierende Grössen in die Auswertung einzuschliessen. Solche Daten liegen bei der deutschen nationalen Kohortenstudie vor.

Referenzen

- Abdollahi, F. and S. A. Sajedi (2014). "Correlation of multiple sclerosis (MS) incidence trends with solar and geomagnetic indices: Time to revise the method of reporting MS epidemiological data." Iran J Neurol **13**(2): 64-69.
- 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.
- 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, Iasi.
- 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.
- Al-Akhras, M. A., H. Darmani and A. Elbetiha (2006). "Influence of 50 Hz magnetic field on sex hormones and other fertility parameters of adult male rats." Bioelectromagnetics **27**(2): 127-131.
- Alessandrini, E. R., M. Stafoggia, A. Faustini, G. Berti, C. Canova, A. De Togni, K. Di Biagio, B. Gherardi, S. Giannini, P. Lauriola, P. Pandolfi, G. Randi, A. Ranzi, L. Simonato, S. Zauli Sajani, E. Cadum and F. Forastiere (2016). "Association Between Short-Term Exposure to PM2.5 and PM10 and Mortality in Susceptible Subgroups: A Multisite Case-Crossover Analysis of Individual Effect Modifiers." Am J Epidemiol **184**(10): 744-754.
- Alexander, D. D., W. H. Bailey, V. Perez, M. E. Mitchell and S. Su (2013). "Air ions and respiratory function outcomes: a comprehensive review." J Negat Results Biomed **12**: 14.
- Amon, A. and F. Alesch (2017). "Systems for deep brain stimulation: review of technical features." Journal of Neural Transmission **124**(9): 1083-1091.
- Amoon, A. T., O. A. Arah and L. Kheifets (2019). "The sensitivity of reported effects of EMF on childhood leukemia to uncontrolled confounding by residential mobility: a hybrid simulation study and an empirical analysis using CAPS data." Cancer Causes Control **30**(8): 901-908.
- Amoon, A. T., C. M. Crespi, A. Ahlbom, M. Bhatnagar, I. Bray, K. J. Bunch, J. Clavel, M. Feychting, D. Hemon, C. Johansen, C. Kreis, C. Malagoli, F. Marquant, C. Pedersen, O. Raaschou-Nielsen, M. Rösli, B. D. Spycher, M. Sudan, J. Swanson, A. Tittarelli, D. M. Tuck, T. Tynes, X. Vergara, M. Vinceti, V. Wunsch-Filho and L. Kheifets (2018). "Proximity to overhead power lines and childhood leukaemia: an international pooled analysis." Br J Cancer **119**(3): 364-373.
- Amoon, A. T., S. Oksuzyan, C. M. Crespi, O. A. Arah, M. Cockburn, X. Vergara and L. Kheifets (2018). "Residential mobility and childhood leukemia." Environ Res **164**: 459-466.
- Amoon, A. T., J. Swanson, X. Vergara and L. Kheifets (2020). "Relationship between distance to overhead power lines and calculated fields in two studies." J Radiol Prot **40**(2): 431-443.
- 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.
- Anzivino, L., G. Gela, W. Guidi, G. Johnson, J. LaForest, C. Nicholls, H. Schneider and L. Zaffanella (1993). HVDC transmission line reference book, Electric Power Research Institute.
- ARIMMORA (2015). Advanced Research on Interaction Mechanisms of electroMagnetic exposures with Organisms for Risk Assessment Brussels, FP7-ENV-2011.
- Arruda, C. K. and A. C. Lima (2015). "Corona modeling in HVDC transmission lines based on a modified particle-in-cell approach." J Electric Power Systems Research **125**: 91-99.
- Auger, N., L. Arbour, W. Luo, G. E. Lee, M. Bilodeau-Bertrand and T. Kosatsky (2019). "Maternal proximity to extremely low frequency electromagnetic fields and risk of birth defects." Eur J Epidemiol **34**(7): 689-697.
- Auger, N., M. Bilodeau-Bertrand, S. Marcoux and T. Kosatsky (2019). "Residential exposure to electromagnetic fields during pregnancy and risk of child cancer: A longitudinal cohort study." Environ Res **176**: 108524.

- 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.
- Azab, A. E. and S. A. Ebrahim (2017). "Exposure to electromagnetic fields induces oxidative stress and pathophysiological changes in the cardiovascular system." Journal of Applied Biotechnology & Bioengineering **4**(2): 540-545.
- Bagheri Hosseinabadi, M., N. Khanjani, M. H. Ebrahimi, B. Haji and M. Abdolahfard (2019). "The effect of chronic exposure to extremely low-frequency electromagnetic fields on sleep quality, stress, depression and anxiety." Electromagn Biol Med **38**(1): 96-101.
- Bailey, W. H., G. B. Johnson, J. Bishop, Z. Hetrick and S. Su (2012). "Measurements of Charged Aerosols Near 500-kV DC Transmission Lines and in Other Environments." IEEE Transactions on Power Delivery **27**(1): 371-379.
- Bailey, W. H., A. L. Williams and M. J. Leonhard (2018). "Exposure of laboratory animals to small air ions: a systematic review of biological and behavioral studies." Biomed Eng Online **17**(1): 72.
- 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. Rössli. 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. Lebret (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. Lebret 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.
- Balid, W., H. Tafish and H. H. Refai (2017). "Intelligent vehicle counting and classification sensor for real-time traffic surveillance." IEEE Transactions on Intelligent Transportation Systems **19**(6): 1784-1794.
- Ballmann, R., N. Bruggisser, P. Bruggisser, S. Bugmann, L. Emmenegger, A. Fischer, P. Graf, M. Hill, C. Hübli, S. Reimann, B. Schwarzenbach, T. Seitz, M. Steinbacher, M. Vollmer, R. WEber, S. Wyss and C. Zellweger (2018). Technischer Bericht zum Nationalen Beobachtungsnetz für Luftfremdstoffe (NABEL). C. Hüglin and L. Emmenegger. Dübendorf, EMPA.
- Barth, A., I. Ponocny, E. Ponocny-Seligler, 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.
- Bartley, H., K. Faasse, R. Horne and K. J. Petrie (2016). "You Can't Always Get What You Want: The Influence of Choice on Nocebo and Placebo Responding." Ann Behav Med **50**(3): 445-451.
- Basner, M. and S. McGuire (2018). "WHO environmental noise guidelines for the European region: a systematic review on environmental noise and effects on sleep." International journal of environmental research and public health **15**(3): 519.
- Bayat, P. D., M. R. Darabi, A. Ghanbari, S. Amiri and P. Sohoulí (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.
- Beale, I., N. Pearce, R. J. Booth and S. Heriot (2001). "Association of health problems with 50 Hz magnetic fields in human adults living near power transmission lines." Journal of the Australasian College of Nutritional Environmental Medicine **20**(2): 9.
- 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.
- Belliemi, 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., A. Dean, H. Eger, G. Hubmann, R. Jandrisovits, M. Kern, M. Kundi, H. Moshhammer, P. Lercher, K. Muller, G. Oberfeld, P. Ohnsorge, P. Pelzmann, C. Scheingraber and R. Thill (2016). "EUROPAEM EMF Guideline 2016 for the prevention, diagnosis and treatment of EMF-related health problems and illnesses." *Rev Environ Health* **31**(3): 363-397.
- 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.
- Benassi, B., G. Filomeni, C. Montagna, C. Merla, V. Lopresto, R. Pinto, C. Marino and C. Consales (2016). "Extremely Low Frequency Magnetic Field (ELF-MF) Exposure Sensitizes SH-SY5Y Cells to the Pro-Parkinson's Disease Toxin MPP(.)." *Mol Neurobiol* **53**(6): 4247-4260.
- 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. Camelli, 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.
- BiolInitiative (2012). A Rationale for Biologically-Based Exposure Standards for Low-Intensity Electromagnetic Radiation. C. Sage and D. Carpenter, BiolInitiative Working Group.
- Blondin, J. P., D. H. Nguyen, J. Sbeghen, D. Goulet, C. Cardinal, P. S. Maruvada, M. Plante and W. H. Bailey (1996). "Human perception of electric fields and ion currents associated with high-voltage DC transmission lines." *Bioelectromagnetics* **17**(3): 230-241.
- 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.
- Bouche, N. F. and K. McConway (2019). "Melatonin Levels and Low-Frequency Magnetic Fields in Humans and Rats: New Insights From a Bayesian Logistic Regression." *Bioelectromagnetics* **40**(8): 539-552.
- Bowman, J. (2014). Exposures to ELF-EMF. *Epidemiology of Electromagnetic Fields*. M. Rösli. 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.
- Brink, M., B. Schäffer, D. Vienneau, M. Foraster, R. Pieren, I. C. Eze, C. Cajochen, N. Probst-Hensch, M. Rösli and J.-M. Wunderli (2019). "A survey on exposure-response relationships for road, rail, and aircraft noise annoyance: Differences between continuous and intermittent noise." *Environment international* **125**: 277-290.
- 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.
- Brown, A. L. and I. Van Kamp (2017). "WHO environmental noise guidelines for the European region: a systematic review of transport noise interventions and their impacts on health." *International journal of environmental research and public health* **14**(8): 44.
- Bunch, K., J. Swanson, T. Vincent and M. Murphy (2016). "Epidemiological study of power lines and

- childhood cancer in the UK: further analyses." Journal of Radiological Protection **36**(3): 437.
- 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.
- Bundestag (2017). Aktuelle Forschung zu Wirkungen elektrischer und magnetischer Felder von Hochspannungsfreileitungen (HGÜ). D. Bundestag. Berlin: 1-13.
- Burch, J. B., J. S. Reif, C. W. Noonan and M. G. Yost (2000). "Melatonin metabolite levels in workers exposed to 60-Hz magnetic fields: work in substations and with 3-phase conductors." J Occup Environ Med **42**(2): 136-142.
- Burch, J. B., J. S. Reif, M. G. Yost, T. J. Keefe and C. A. Pitrat (1998). "Nocturnal excretion of a urinary melatonin metabolite among electric utility workers." scandinavian journal of work, environment and health **24**(3): 183-189.
- Bürgi, A. (2011). Immissionskataster für Niederfrequente Magnetfelder von Hochspannungsleitungen - Machbarkeits und Pilotstudie. Bern, BAFU.
- BUWAL (2005). Elektrosmog in der Umwelt. Bern, BUWAL.
- Carlberg, M., T. Koppel, M. Ahonen and L. Hardell (2017). "Case-control study on occupational exposure to extremely low-frequency electromagnetic fields and glioma risk." Am J Ind Med **60**(5): 494-503.
- Carlberg, M., T. Koppel, M. Ahonen and L. Hardell (2018). "Case-Control Study on Occupational Exposure to Extremely Low-Frequency Electromagnetic Fields and the Association with Meningioma." Biomed Res Int **2018**: 5912394.
- Carles, C., Y. Esquirol, M. Turuban, C. Piel, L. Migault, C. Pouchieu, G. Bouvier, P. Fabbro-Peray, P. Lebailly and I. Baldi (2020). "Residential proximity to power lines and risk of brain tumor in the general population." Environmental Research **185**: 109473.
- Carpenter, D. O. (2019). "Extremely low frequency electromagnetic fields and cancer: How source of funding affects results." Environmental Research **178**: 108688.
- CEPRI (2017). UHV Transmission Technology. London, Academic Press.
- 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.
- Chapman, C. E., J.-P. Blondin, A. M. Lapierre, D. H. Nguyen, R. Forget, M. Plante and D. Goulet (2005). "Perception of local DC and AC electric fields in humans." Bioelectromagnetics **26**(5): 357-366.
- 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.
- Cieslar, G., P. Sowa, K. Sieron and A. Sieron (2018). Impact of chronic exposure to static, high voltage electric field generated nearby HVDC transmission lines on behavior of rats. 2018 Baltic URSI Symposium (URSI).
- Clairmont, B., G. Johnson, L. Zaffanella and S. Zelingher (1989). "The effect of HVAC-HVDC line separation in a hybrid corridor." IEEE Power Engineering Review **9**(4): 95-96.
- Clark, C. and K. Paunovic (2018a). "WHO Environmental Noise Guidelines for the European Region: A systematic review on environmental noise and cognition." International journal of environmental research public health **15**(2): 285.
- Clark, C. and K. Paunovic (2018b). "WHO Environmental noise guidelines for the European Region: A systematic review on environmental noise and quality of life, wellbeing and mental health." International journal of environmental research and public health **15**(11): 2400.
- 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.

- Consales, C., C. Merla, C. Marino and B. Benassi (2012). "Electromagnetic fields, oxidative stress, and neurodegeneration." *Int J Cell Biol* **2012**: 683897.
- 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.
- Crasson, M. (2003). "50-60 Hz electric and magnetic field effects on cognitive function in humans: a review." *Radiat Prot Dosimetry* **106**(4): 333-340.
- Crespi, C. M., J. Swanson, X. P. Vergara and L. Kheifets (2019). "Childhood leukemia risk in the California Power Line Study: Magnetic fields versus distance from power lines." *Environ Res* **171**: 530-535.
- Crespi, C. M., X. P. Vergara, C. Hooper, S. Oksuzyan, S. Wu, M. Cockburn and L. Kheifets (2016). "Childhood leukaemia and distance from power lines in California: a population-based case-control study." *Br J Cancer* **115**(1): 122-128.
- 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.
- D'Angelo, C., E. Costantini, M. A. Kamal and M. Reale (2015). "Experimental model for ELF-EMF exposure: Concern for human health." *Saudi J Biol Sci* **22**(1): 75-84.
- Darbandi, M., S. Darbandi, A. Agarwal, R. Henkle and M. R. Sadeghi (2018). "The Effects of Exposure to Low Frequency Electromagnetic Fields on Male Fertility." *Altern Ther Health Med* **24**(4): 24-29.
- Das, H., K. Gogoi and S. Chatterjee (2015). Analysis of the effect of electric field due to High Voltage Transmission lines on humans. 2015 1st Conference on Power, Dielectric and Energy Management at NERIST (ICPDEN).
- 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., K. Hannam, P. Baker and R. Agius (2014). "Maternal residential proximity to sources of extremely low frequency electromagnetic fields and adverse birth outcomes in a UK cohort." *Bioelectromagnetics* **35**(3): 201-209.
- 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.
- Derkacz, A., J. Gawrys, K. Gawrys, M. Podgorski, A. Magott-Derkacz, R. Poreba and A. Doroszko (2018). "Effect of electromagnetic field accompanying the magnetic resonance imaging on human heart rate variability - a pilot study." Int J Inj Contr Saf Promot **25**(2): 229-231.
- Di, G., X. Gu, Q. Lin, S. Wu and H. B. Kim (2018). "A comparative study on effects of static electric field and power frequency electric field on hematology in mice." Ecotoxicol Environ Saf **166**: 109-115.
- Di, G., H. Kim, Y. Xu, J. Kim and X. Gu (2019). "A comparative study on influences of static electric field and power frequency electric field on cognition in mice." Environ Toxicol Pharmacol **66**: 91-95.
- 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.
- Dieudonné, M. (2019). "Becoming electro-hypersensitive: A replication study." Bioelectromagnetics **40**(3): 188-200.
- Dimbylow, P. (2005). "Development of the female voxel phantom, NAOMI, and its application to calculations of induced current densities and electric fields from applied low frequency magnetic and electric fields." Physics in Medicine & Biology **50**(6): 1047.
- 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., J. Fröhlich, K. Meya and M. Schmid (2018). Kosmetik, Wellness und die Gesundheit–EMF-Quellen ausserhalb der Medizin. Systematische Erfassung und Charakterisierung von hoch- und niederfrequenten Quellen einschl. Ultraschall im gewerblichen Bereich und in der Anwendung für zuhause. Salzgitter, BfS.
- Dürrenberger, G., J. Fröhlich, M. Rösli and M. O. Mattsson (2014). "EMF monitoring-concepts, activities, gaps and options." Int J Environ Res Public Health **11**(9): 9460-9479.
- Dürrenberger, G., P. Leuchtmann, M. Rösli, M. Siegrist and B. Sütterlin (2017). EMF von Stromtechnologien. Fachliteratur-Monitoring. Statusbericht 2017. BFE. Bern.
- Eden, T. (2010). "Aetiology of childhood leukaemia." Cancer Treat Rev **36**(4): 286-297.
- Elhabashi, S. (2007). Electric Fields Intensity Around the new 400kV Power Transmission Lines In Libya. 6th WSEAS International Conference on Circuits, Systems, Electronics, Control & Signal Processing Cairo: 390-398.
- Elliott, P. and M. B. Toledano (2013). "Adult cancers near high-voltage power lines." Epidemiology **24**(5): 783-784.
- 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. Razor and E. Fox (2007). "Development and evaluation of the electromagnetic hypersensitivity questionnaire." Bioelectromagnetics **28**(2): 137-95/114

151.

- Eriksson, C., G. Pershagen and M. Nilsson (2018). Biological mechanisms related to cardiovascular and metabolic effects by environmental noise. Geneva, WHO.
- Erren, T. C. (2001). "A meta-analysis of epidemiologic studies of electric and magnetic fields and breast cancer in women and men." Bioelectromagnetics Suppl **5**: S105-119.
- Eskelinen, T., P. Roivainen, P. Makela, J. Keinanen, O. Kauhanen, S. Saarikoski and J. Juutilainen (2016). "Maternal exposure to extremely low frequency magnetic fields: Association with time to pregnancy and foetal growth." Environ Int **94**: 620-625.
- Esmailzadeh, S., M. A. Delavar, A. Aleyassin, S. A. Gholamian and A. Ahmadi (2019). "Exposure to Electromagnetic Fields of High Voltage Overhead Power Lines and Female Infertility." Int J Occup Environ Med **10**(1): 11-16.
- EU (1999). "1999/519/EG: Empfehlung des Rates vom 12. Juli 1999 zur Begrenzung der Exposition der Bevölkerung gegenüber elektromagnetischen Feldern (0 Hz - 300 GHz)." Amtsblatt der Europäischen Gemeinschaft (L199): 12.
- EU (2003). "Richtlinie 2003/10/EG über Mindestvorschriften zum Schutz von Sicherheit und Gesundheit der Arbeitnehmer vor der Gefährdung durch physikalische Einwirkungen (Lärm)." Amtsblatt der Europäischen Union (L42): 7.
- Faasse, K., A. Grey, R. Jordan, S. Garland and K. J. Petrie (2015). "Seeing is believing: Impact of social modeling on placebo and nocebo responding." Health Psychol **34**(8): 880-885.
- 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.
- Fang, Q., S. S. Mahmoud, J. Yan and H. Li (2016). "An Investigation on the Effect of Extremely Low Frequency Pulsed Electromagnetic Fields on Human Electrocardiograms (ECGs)." Int J Environ Res Public Health **13**(11).
- Fatokun, F. J., R. Jayaratne, L. Morawska, D. Birtwhistle, R. Rachman and K. Mengersen (2010). "Corona ions from overhead transmission voltage powerlines: effect on direct current electric field and ambient particle concentration levels." Environ Sci Technol **44**(1): 526-531.
- 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.
- Fews, A. P., D. L. Henshaw, R. J. Wilding and P. A. Keitch (1999). "Corona ions from powerlines and increased exposure to pollutant aerosols." Int J Radiat Biol **75**(12): 1523-1531.
- Fews, A. P., R. J. Wilding, P. A. Keitch, N. K. Holden and D. L. Henshaw (2002). "Modification of atmospheric DC fields by space charge from high-voltage power lines." Atmospheric Research **63**(3-4): 271-289.
- 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.
- 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.
- 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.
- Flory, R., J. Ametepe and B. Bowers (2010). "A randomized, placebo-controlled trial of bright light and high-density negative air ions for treatment of Seasonal Affective Disorder." Psychiatry Res **177**(1-2): 101-108.

- Forssten, 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.
- Foster, K. R. (2003). "Mechanisms of interaction of extremely low frequency electric fields and biological systems." Radiat Prot Dosimetry **106**(4): 301-310.
- Franck, C. M., M. Pfeiffer, S. Hedtke, P. Bleuler and C. Stamatopoulos (2019). Hybride Freileitungen – technische Herausforderungen und Lösungen. Science Brunch 31. Zürich, FSM.
- Frei, P., A. H. Poulsen, G. Mezei, C. Pedersen, L. Cronberg Salem, C. Johansen, M. Rössli and J. Schüz (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.
- Friedl, K. and G. Schmid (2019). Expositionsbewertung elektrischer und magnetischer Felder beim Stromtransport. Emissionen beim Stromtransport, Graz, TU Graz.
- Fuchs, K., A. Novitskiy, F. Berger and D. Westermann (2014). Hochspannungsgleichstromübertragung - Eigenschaften des Übertragungsmediums Freileitung. Illmenauer Beiträge zur elektrischen Energiesystem-, Geräte- und Anlagentechnik (IBEGA). D. Westermann and F. Berger. Illmenau, TU Illmenau.
- Gajsek, P., P. Ravazzani, J. Grellier, T. Samaras, J. Bakos and G. Thuroczy (2016). "Review of Studies Concerning Electromagnetic Field (EMF) Exposure Assessment in Europe: Low Frequency Fields (50 Hz-100 kHz)." Int J Environ Res Public Health **13**(9).
- 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. Rössli 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.
- Gayathri, K. and K. Shailendra (2019). "MRI and Blood Flow in Human Arteries: Are There Any Adverse Effects?" Cardiovasc Eng Technol **10**(2): 242-256.
- Gela, G., J. LaForest and L. Zaffanella (1993). Corona phenomena on HVDC transmission lines. HVDC Transmission Line Reference Book. EPRI, EPRI.
- Gervasi, F., R. Murtas, A. Decarli and A. G. Russo (2019). "Residential distance from high-voltage overhead power lines and risk of Alzheimer's dementia and Parkinson's disease: a population-based case-control study in a metropolitan area of Northern Italy." Int J Epidemiol **48**(6): 1949-1957.
- Golbach, L. A., M. H. Scheer, J. J. Cuppen, H. Savelkoul and B. M. Verborg-van Kemenade (2015). "Low-Frequency Electromagnetic Field Exposure Enhances Extracellular Trap Formation by Human Neutrophils through the NADPH Pathway." J Innate Immun **7**(5): 459-465.
- 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.
- Grave, H. (2019). Schalltechnische Beurteilung in Genehmigungsverfahren. Emissionen beim Stromtransport. U. Schichler. Graz, TU Graz: 79-105.
- 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.
- 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.
- Guerriero, F. and G. Ricevuti (2016). "Extremely low frequency electromagnetic fields stimulation modulates autoimmunity and immune responses: a possible immuno-modulatory therapeutic effect

- in neurodegenerative diseases." Neural Regen Res **11**(12): 1888-1895.
- Guillod, T., M. Pfeiffer and C. M. Franck (2014). "Improved coupled ion-flow field calculation method for AC/DC hybrid overhead power lines." IEEE Transactions on Power Delivery **29**(6): 2493-2501.
- Gunnarsson, L. G. and L. Bodin (2018). "Amyotrophic Lateral Sclerosis and Occupational Exposures: A Systematic Literature Review and Meta-Analyses." Int J Environ Res Public Health **15**(11).
- Gunnarsson, L. G. and L. Bodin (2019). "Occupational Exposures and Neurodegenerative Diseases-A Systematic Literature Review and Meta-Analyses." Int J Environ Res Public Health **16**(3).
- Guski, R., D. Schreckenber and R. Schuemer (2017). "WHO environmental noise guidelines for the European region: A systematic review on environmental noise and annoyance." International journal of environmental research public health **14**(12): 39.
- 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.
- Habash, M., P. Gogna, D. Krewski and R. W. Y. Habash (2019). "Scoping Review of the Potential Health Effects of Exposure to Extremely Low-Frequency Electric and Magnetic Fields." Crit Rev Biomed Eng **47**(4): 323-347.
- 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.
- He, Y. and P. S. W. Leung (2019). The Effect of Static Magnetic Field Exposure to Drivers Cognitive Ability. 2019 Joint International Symposium on Electromagnetic Compatibility, Sapporo and Asia-Pacific International Symposium on Electromagnetic Compatibility (EMC Sapporo/APEMC).
- Hedtke, S., M. Pfeiffer and C. M. Franck (2019). "Corona discharge pulse pattern and audible noise on hybrid AC/DC transmission lines under electric field bias, ripple and ion coupling." Journal of Electrostatics **102**: 103373.
- Hedtke, S., M. D. Pfeiffer and C. Franck (2015). AC/DC-Hybridfreileitungen: Hybride Kopplung bei Koronaeffekten und Magnetfeld. Leitungsbau-Fachtagung, Frankfurt am Main, Germany, May 7-8, 2015.
- Hedtke, S., M. D. Pfeiffer, C. Franck, C. Dermont, I. Stadelmann-Steffen and J. Jullier (2018). HVDC & hybrid HVAC/HVDC overhead line conversion: An acceptance case study. CIGRE Session 2018, Cigré.
- Heinrich, A., A. Szostek, P. Meyer, F. Nees, J. Rauschenberg, J. Gröbner, M. Gilles, G. Paslakis, M. Deuschle, W. Semmler and H. Flor (2013). "Cognition and sensation in very high static magnetic fields: a randomized case-crossover study with different field strengths." Radiology **266**(1): 236-245.
- Heinrich, A., A. Szostek, F. Nees, P. Meyer, W. Semmler and H. Flor (2011). "Effects of static magnetic fields on cognition, vital signs, and sensory perception: a meta-analysis." J Magn Reson Imaging **34**(4): 758-763.
- Henshaw, D. L. (2002). "Does our electricity distribution system pose a serious risk to public health?" Med Hypotheses **59**(1): 39-51.
- Héroux, M. E. and J. Verbeek (2018). Results from the search for available systematic reviews and meta-analyses on environmental noise. Geneva, WHO.
- Heutschi, K. (2010). Aufarbeitung der CONOR Forschungsergebnisse für den Vollzug. Dübendorf, Empa.
- 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.
- Hosseinabadi, M. B. and N. Khanjani (2019a). "The Effect of Extremely Low-Frequency Electromagnetic Fields on the Prevalence of Musculoskeletal Disorders and the Role of Oxidative Stress." Bioelectromagnetics **40**(5): 354-360.
- Hosseinabadi, M. B., N. Khanjani, S. E. Samaei and F. Nazarkhani (2019b). "Effect of long-term occupational exposure to extremely low-frequency electromagnetic fields on proinflammatory cytokine and hematological parameters." Int J Radiat Biol **95**(11): 1573-1580.
- 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. Schüz (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., M. Rösli 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., S. Peters and R. Vermeulen (2018). "Occupational exposure to extremely low-frequency magnetic fields and the risk of ALS: A systematic review and meta-analysis." Bioelectromagnetics **39**(2): 156-163.
- 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, H. Kromhout and R. Vermeulen (2018). "Occupational extremely low frequency magnetic fields (ELF-MF) exposure and hematolymphopoietic cancers - Swiss National Cohort analysis and updated meta-analysis." Environ Res **164**: 467-474.
- Huss, A., A. Spoerri, M. Egger and M. Rösli (2009). "Residence near power lines and mortality from neurodegenerative diseases: longitudinal study of the Swiss population." Am J Epidemiol **169**(2): 167-175.
- Hwang, J. H., S. I. Kwak, J. H. Kwon and H. D. Choi (2016). Development of multi-band personal dosimeter for RF and ELF exposure monitoring. 2016 URSI Asia-Pacific Radio Science Conference (URSI AP-RASC).
- IARC (2002). Non-ionizing Radiation, Part 1: Static and extremely low-frequency (ELF) electric and magnetic fields. Lyon, IARC.
- ICNIRP (1998). "Guidelines for limiting exposure to time-varying electric, magnetic, and electromagnetic fields (up to 300 GHz). International Commission on Non-Ionizing Radiation Protection." Health Phys **74**(4): 494-522.
- ICNIRP (2009). "Guidelines on limits of exposure to static magnetic fields." Health Physics **96**(4): 504-514.
- ICNIRP (2010). "Guidelines for limiting exposure to time-varying electric and magnetic fields (1 Hz to 100 kHz)." Health Phys **99**(6): 818-836.
- ICNIRP (2014). "ICNIRP Guidelines for Limiting Exposure to Electric Fields Induced by Movement of the Human Body in a Static Magnetic Field and by Time-Varying Magnetic Fields Below 1 Hz." Health Phys **106**(3): 418-425.
- Jalilian, H., S. H. Teshnizi, M. Rösli and M. Neghab (2018). "Occupational exposure to extremely low frequency magnetic fields and risk of Alzheimer disease: A systematic review and meta-analysis." Neurotoxicology **69**: 242-252.
- Jauch, F. (2010). Applikation zur Berechnung der akustischen Geräuschemissionen von Hochspannungsfreileitungen. Zürich, Institut für elektrische Energieübertragung und Hochspannungstechnik, ETH.
- Jayaratne, E. R., F. O. J-Fatokun and L. Morawska (2008). "Air ion concentrations under overhead high-voltage transmission lines." Atmospheric Environment **42**(8): 1846-1856.
- Jayaratne, E. R., X. Ling and L. Morawska (2015). "Comparison of charged nanoparticle concentrations near busy roads and overhead high-voltage power lines." Sci Total Environ **526**: 14-18.
- Jeffers, D. (2007). "Modelling and analyses do not support the hypothesis that charging by power-line corona increases lung deposition of airborne particles." Radiat Prot Dosimetry **123**(2): 257-261.
- 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. Schüz (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.
- Juutilainen, J., M. Herrala, J. Luukkonen, J. Naarala and P. J. Hore (2018). "Magnetocarcinogenesis: is there a mechanism for carcinogenic effects of weak magnetic fields?" Proc Biol Sci **285**(1879).
- Juutilainen, J. and T. Kumlin (2006). "Occupational magnetic field exposure and melatonin: interaction with light-at-night." Bioelectromagnetics **27**(5): 423-426.
- Juutilainen, J., R. G. Stevens, L. E. Anderson, N. H. Hansen, M. Kilpeläinen, T. Kumlin, J. T. Laitinen, E. Sobel and B. W. Wilson (2000). "Nocturnal 6-hydroxymelatonin sulfate excretion in female workers exposed to magnetic fields." J Pineal Res **28**(2): 97-104.
- 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.
- Kargiotis, O., P. Preka-Papadema and P. Papatheanasopoulos (2017). "Response to letter regarding article: "The possible effects of the solar and geomagnetic activity on multiple sclerosis"." Clinical Neurology and Neurosurgery **153**: 111-112.
- 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.
- Kato, M., S. Ohta, K. Shimizu, Y. Tsuchida and G. Matsumoto (1989). "Detection-threshold of 50-Hz electric fields by human subjects." Bioelectromagnetics **10**(3): 319-327.
- Kaul, G. (2009). Was verursacht "elektromagnetische Hypersensibilität"? Dortmund, Bundesanstalt für Arbeitsschutz und Arbeitsmedizin.
- 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.
- 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.
- 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 (2013). "Case-control study of paternal occupation and social class with risk of childhood central nervous system tumours in Great Britain, 1962-2006." Br J Cancer **108**(9): 1907-1914.
- 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.
- Kendall, G. M., K. J. Bunch, C. A. Stiller, T. J. Vincent and M. F. G. Murphy (2020). "Case-control study of paternal occupational exposures and childhood bone tumours and soft-tissue sarcomas in Great Britain, 1962-2010." Br J Cancer **122**(8): 1250-1259.
- 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., C. M. Crespi, C. Hooper, M. Cockburn, A. T. Amoon and X. P. Vergara (2017). "Residential magnetic fields exposure and childhood leukemia: a population-based case-control study in California." Cancer Causes Control **28**(10): 1117-1123.
- 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.
- Kheifets, L., J. Swanson, Y. Yuan, C. Kusters and X. Vergara (2017). "Comparative analyses of studies of childhood leukemia and magnetic fields, radon and gamma radiation." J Radiol Prot **37**(2): 459-491.
- Killin, L. O., J. M. Starr, I. J. Shiue and T. C. Russ (2016). "Environmental risk factors for dementia: a systematic review." BMC Geriatr **16**(1): 175.
- 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.
- 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.
- Kjellqvist, A., E. Palmquist and S. Nordin (2016). "Psychological symptoms and health-related quality of life in idiopathic environmental intolerance attributed to electromagnetic fields." J Psychosom Res **84**: 8-12.
- 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, L. J. Schouten, S. Peters, A. Huss, J. H. Veldink, H. Kromhout, P. A. van den Brandt and R. Vermeulen (2017). "Occupational exposure and amyotrophic lateral sclerosis in a prospective cohort." Occup Environ Med.
- 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.
- 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.
- 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.
- Lai, H. (2019). "Exposure to Static and Extremely-Low Frequency Electromagnetic Fields and Cellular Free Radicals." Electromagn Biol Med **38**(4): 231-248.
- 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.
- 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. (2014). "Limiting electric fields of HVDC overhead power lines." Radiat Environ Biophys **53**(2): 461-468.
- Leitgeb, N. (2015b). "Synoptic Analysis Clarifies Childhood Leukemia Risk from EKF Magnetic Field Exposure." Journal of Electromagnetic Analysis and Applications **7**: 14.
- Leitgeb, N. and J. Schröttner (2003). "Electrosensibility and electromagnetic hypersensitivity." Bioelectromagnetics **24**(6): 387-394.
- Leitgeb, N., J. Schröttner 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.
- Lewczuk, B., G. Redlarski, A. Zak, N. Ziółkowska, B. Przybylska-Gornowicz and M. Krawczuk (2014). "Influence of electric, magnetic, and electromagnetic fields on the circadian system: current stage of knowledge." Biomed Res Int **2014**: 169459.
- 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 (2016c). "Exposure to Power-Frequency Magnetic Fields and the Risk of Infertility and Adverse Pregnancy Outcomes: Update on the Human Evidence and Recommendations for Future Study Designs." J Toxicol Environ Health B Crit Rev **19**(1): 29-45.
- Lewis, R. C., R. Hauser, A. D. Maynard, R. L. Neitzel, L. Wang, R. Kavet, P. Morey, J. B. Ford and J. D. Meeker (2016b). "Personal Measure of power-frequency magnetic field exposure among men from an infertility clinic: distribution, temporal variability and correlation with their female partners' exposure." Radiat Prot Dosimetry **172**(4): 401-408.
- Lewis, R. C., R. Hauser, L. Wang, R. Kavet and J. D. Meeker (2016a). "Personal power-frequency magnetic field exposure in women recruited at an infertility clinic: association with physical activity and temporal variability." Radiat Prot Dosimetry **168**(4): 478-488.
- Li, D. K., H. Chen, J. R. Ferber, A. K. Hirst and R. Odouli (2020). "Association Between Maternal Exposure to Magnetic Field Nonionizing Radiation During Pregnancy and Risk of Attention-Deficit/Hyperactivity Disorder in Offspring in a Longitudinal Birth Cohort." JAMA Netw Open **3**(3): e201417.

- Li, D. K., H. Chen, J. R. Ferber, R. Odouli and C. Quesenberry (2017). "Exposure to Magnetic Field Non-ionizing Radiation and the Risk of Miscarriage: A Prospective Cohort Study." *Sci Rep* **7**(1): 17541.
- 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, 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.
- Liguori, I., G. Russo, F. Curcio, G. Bulli, L. Aran, D. Della-Morte, G. Gargiulo, G. Testa, F. Cacciatore, D. Bonaduce and P. Abete (2018). "Oxidative stress, aging, and diseases." *Clin Interv Aging* **13**: 757-772.
- Lin, Q., L. Dong, Y. Xu and G. Di (2018). "Studies on effects of static electric field exposure on liver in mice." *Sci Rep* **8**(1): 15507.
- Liorni, I., M. Parazzini, S. Fiocchi, M. Douglas, M. Capstick, N. Kuster and P. Ravazzani (2016). "Computational Assessment of Pregnant Women Modrels 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* **172**(4): 382-392.
- Liorni, I., M. Parazzini, B. Struchen, S. Fiocchi, M. Rösli and P. Ravazzani (2016). "Children's Personal Exposure Measurements to Extremely Low Frequency Magnetic Fields in Italy." *Int J Environ Res Public Health* **13**(6).
- 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, 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.
- Liu, Z. (2014). *Ultra-High Voltage AC/DC Grids*. Waltham, MA., Academic Press.
- Locher, B., A. Piquerez, M. Habermacher, M. Ragetti, M. Rösli, M. Brink, C. Cajochen, D. Vienneau, M. Foraster, U. Müller and J. M. Wunderli (2018). "Differences between Outdoor and Indoor Sound Levels for Open, Tilted, and Closed Windows." *International journal of environmental research and public health* **15**(1): 149.
- Locher, C., H. Koehlin, J. Gaab and H. Gerger (2019). "The Other Side of the Coin: Nocebo Effects and Psychotherapy." *Front Psychiatry* **10**: 555.
- 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.
- Ma, A. and J. Chen (2018). "Analysis of the three-dimensional hybrid electric fields and the related electrostatic induction effects of 800 kV DC and 500 kV AC parallel transmission lines considering environmental factors." *Electric Power Systems Research* **163**: 638-646.
- Maes, A. and L. Verschaeve (2012). "Can cytogenetics explain the possible association between exposure to extreme low-frequency magnetic fields and Alzheimer's disease?" *J Appl Toxicol* **32**(2): 81-87.

- Maes, A. and L. Verschaeve (2016). "Genetic damage in humans exposed to extremely low-frequency electromagnetic fields." Arch Toxicol **90**(10): 2337-2348.
- 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., M. Souques, I. Bureau, A. Duburcq, E. Remy and J. Lambrozo (2016). "Exposure of children to extremely low frequency magnetic fields in France: Results of the EXPERS study." J Expo Sci Environ Epidemiol.
- 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.
- Mahaki, H., H. Tanzadehpanah, N. Jabarivasal, K. Sardanian and A. Zamani (2019). "A review on the effects of extremely low frequency electromagnetic field (ELF-EMF) on cytokines of innate and adaptive immunity." Electromagn Biol Med **38**(1): 84-95.
- 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.
- Manninen, H., A. Franchin, S. Schobesberger, A. Hirsikko, J. Hakala, A. Skromulis, J. Kangasluoma, M. Ehn, H. Junninen and A. Mirme (2011). "Characterisation of corona-generated ions used in a Neutral cluster and Air Ion Spectrometer (NAIS)." Atmospheric Measurement Techniques Discussions **4**(2): 2099-2125.
- Manser, M., M. R. Sater, C. D. Schmid, F. Noreen, M. Murbach, N. Kuster, D. Schuermann and P. Schar (2017). "ELF-MF exposure affects the robustness of epigenetic programming during granulopoiesis." Sci Rep **7**: 43345.
- Mansourian, M., H. R. Marateb and G. Vaseghi (2016). "The effect of extremely low-frequency magnetic field (50-60 Hz) exposure on spontaneous apoptosis: The results of a meta-analysis." Adv Biomed Res **5**: 141.
- 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.
- Maruvada, P. S. (2012). "Electric Field and Ion Current Environment of HVdc Transmission Lines: Comparison of Calculations and Measurements." IEEE Transactions on Power Delivery **27**(1): 401-410.
- 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.
- Mathie, A., L. E. Kennard and E. L. Veale (2003). "Neuronal ion channels and their sensitivity to extremely low frequency weak electric field effects." Radiat Prot Dosimetry **106**(4): 311-316.
- Mattsson, M. O. and M. Simkó (2012). "Is there a relation between extremely low frequency magnetic field exposure, inflammation and neurodegenerative diseases? A review of in vivo and in vitro experimental evidence." Toxicology **301**(1-3): 1-12.
- 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.
- McColl, N., A. Auvinen, A. Kesminiene, C. Espina, F. Erdmann, E. de Vries, R. Greinert, J. Harrison and

- J. Schuz (2015). "European Code against Cancer 4th Edition: Ionising and non-ionising radiation and cancer." *Cancer Epidemiol* **39 Suppl 1**: S93-100.
- 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.
- Meier-Girard, D., E. Delgado-Eckert, E. Schaffner, C. Schindler, N. Künzli, M. Adam, V. Pichot, F. Kronenberg, M. Imboden, U. Frey and N. Probst-Hensch (2019). "Association of long-term exposure to traffic-related PM(10) with heart rate variability and heart rate dynamics in healthy subjects." *Environ Int* **125**: 107-116.
- Melandri, C., G. Tarroni, V. Prodi, T. De Zaiacomo, M. Formignani and C. Lombardi (1983). "Deposition of charged particles in the human airways." *Journal of Aerosol Science* **14**(5): 657-669.
- 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.
- Migault, L., R. Garlantezec, C. Piel, L. Marchand-Martin, S. Orazio, M. Cheminat, C. Zaros, C. Carles, E. Cardis, P. Y. Ancel, M. A. Charles, R. de Seze, I. Baldi and G. Bouvier (2020). "Maternal cumulative exposure to extremely low frequency electromagnetic fields, prematurity and small for gestational age: a pooled analysis of two birth cohorts." *Occup Environ Med* **77**(1): 22-31.
- Migault, L., C. Piel, C. Carles, F. Delva, A. Lacourt, E. Cardis, C. Zaros, R. de Seze, I. Baldi and G. Bouvier (2018). "Maternal cumulative exposure to extremely low frequency electromagnetic fields and pregnancy outcomes in the Elfe cohort." *Environ Int* **112**: 165-173.
- Migliore, R., G. De Simone, X. Leinekugel and M. Migliore (2016). "The possible consequences for cognitive functions of external electric fields at power line frequency on hippocampal CA1 pyramidal neurons." *Eur J Neurosci*.
- 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.
- 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.
- Modolo, J., Y. Denoyer, F. Wendling and P. Benquet (2018). "Physiological effects of low-magnitude electric fields on brain activity: advances from in vitro, in vivo and in silico models." *Curr Opin Biomed Eng* **8**: 38-44.
- Mohler, E., P. Frei, C. Braun-Fahrlander, J. Fröhlich, G. Neubauer and M. Rössli (2010). "Effects of everyday radiofrequency electromagnetic-field exposure on sleep quality: a cross-sectional study." *Radiat Res* **174**(3): 347-356.
- Møllerlækken, O. J., B. E. Moen, V. Baste, N. Magerøy, G. Oftedal, E. Neto, L. Ermland, L. Bjørge, P. A. Torjesen and K. H. Mild (2012). "No effects of MRI scan on male reproduction hormones." *Reprod Toxicol* **34**(1): 133-139.
- 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.
- 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.
- Münzel, T., S. Kröller-Schön, M. Oelze, T. Gori, F. P. Schmidt, S. Steven, O. Hahad, M. Rössli, J. M. Wunderli, A. Daiber and M. Sørensen (2020). "Adverse Cardiovascular Effects of Traffic Noise with a Focus on Nighttime Noise and the New WHO Noise Guidelines." *Annu Rev Public Health* **41**: 309-328.

- 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.
- 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.
- Niederhauser, J. (2018). "An engineer's approach: How can 10-100 μ T, 10-100 Hz magnetic field influence human cardiovascular regulation?" International Journal of Bioelectromagnetism **20**(1): 4.
- 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.
- Nieuwenhuijsen, M. J., G. Ristovska and P. Dadvand (2017). "WHO Environmental Noise Guidelines for the European Region: A Systematic Review on Environmental Noise and Adverse Birth Outcomes." Int J Environ Res Public Health **14**(10).
- 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.
- Novikov, V. V., G. V. Novikov and E. E. Fesenko (2009). "Effect of weak combined static and extremely low-frequency alternating magnetic fields on tumor growth in mice inoculated with the Ehrlich ascites carcinoma." Bioelectromagnetics **30**(5): 343-351.
- Novoselova, E. G., V. V. Novikov, S. M. Lunin, O. V. Glushkova, T. V. Novoselova, S. B. Parfenyuk, S. V. Novoselov, M. O. Khrenov and E. E. Fesenko (2019). "Effects of low-level combined static and weak low-frequency alternating magnetic fields on cytokine production and tumor development in mice." Electromagn Biol Med **38**(1): 74-83.
- Odagiri-Shimizu, H. and K. Shimizu (1999). "Experimental analysis of the human perception threshold of a DC electric field." Med Biol Eng Comput **37**(6): 727-732.
- Ohayon, M. M., V. Stolc, F. T. Freund, C. Milesi and S. S. Sullivan (2019). "The potential for impact of man-made super low and extremely low frequency electromagnetic fields on sleep." Sleep Med Rev **47**: 28-38.
- Ohtsuki, T., T. Nabeta, H. Nakanishi, H. Kawahata, T. Ogihara, R. Morishita and M. Aoki (2017). "Electric field exposure improves subjective symptoms related to sleeplessness in college students: A pilot study of electric field therapy for sleep disorder." Immunology, Endocrine Metabolic Agents in Medicinal Chemistry **17**(1): 37-48.
- Okano, H. (2008). "Effects of static magnetic fields in biology: role of free radicals." Front Biosci **13**: 6106-6125.
- Okano, H., A. Fujimura, H. Ishiwatari and K. Watanuki (2017). The physiological influence of alternating current electromagnetic field exposure on human subjects. 2017 IEEE International Conference on Systems, Man, and Cybernetics (SMC).
- 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.
- Oraby, T., S. Sivaganesan, J. D. Bowman, L. Kincl, L. Richardson, M. McBride, J. Siemiatycki, E. Cardis and D. Krewski (2018). "Berkson error adjustment and other exposure surrogates in occupational case-control studies, with application to the Canadian INTEROCC study." J Expo Sci Environ Epidemiol **28**(3): 251-258.
- 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.
- Papathanasopoulos, P., P. Preka-Papadema, A. Gkotsinas, N. Dimisianos, A. Hillaris, C. Katsavrias, G. Antonakopoulos, X. Moussas, E. Andreadou, V. Georgiou, P. Papachristou and O. Kargiotis (2016). "The possible effects of the solar and geomagnetic activity on multiple sclerosis." Clin Neurol Neurosurg **146**: 82-89.
- 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.
- 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., E. V. Brauner, N. H. Rod, V. Albieri, C. E. Andersen, K. Ulbak, O. Hertel, C. Johansen, J. Schuz and O. Raaschou-Nielsen (2014). "Distance to high-voltage power lines and risk of childhood leukemia--an analysis of confounding by and interaction with other potential risk factors." PLoS One **9**(9): e107096.
- 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., A. H. Poulsen, N. H. Rod, P. Frei, J. Hansen, K. Grell, O. Raaschou-Nielsen, J. Schuz and C. Johansen (2017). "Occupational exposure to extremely low-frequency magnetic fields and risk for central nervous system disease: an update of a Danish cohort study among utility workers." Int Arch Occup Environ Health **90**(7): 619-628.
- Pedersen, C., O. Raaschou-Nielsen, N. H. Rod, P. Frei, A. H. Poulsen, C. Johansen and J. Schüz (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.
- Pelka, R. B., C. Jaenicke and J. Gruenwald (2001). "Impulse magnetic-field therapy for insomnia: a double-blind, placebo-controlled study." Adv Ther **18**(4): 174-180.
- Peters, S., A. E. Visser, F. D'Ovidio, E. Beghi, A. Chio, G. Logroscino, O. Hardiman, H. Kromhout, A. Huss, J. Veldink, R. Vermeulen and L. H. van den Berg (2019). "Associations of Electric Shock and Extremely Low-Frequency Magnetic Field Exposure With the Risk of Amyotrophic Lateral Sclerosis." Am J Epidemiol **188**(4): 796-805.
- Petri, A. K., K. Schmiedchen, D. Stunder, D. Dechent, T. Kraus, W. H. Bailey and S. Driessen (2017). "Biological effects of exposure to static electric fields in humans and vertebrates: a systematic review." Environ Health **16**(1): 41.
- Pfeiffer, M., T. Guilloid, M. Weber and C. M. Franck (2013). "Erhöhung der Übertragungskapazität durch hybride AC/DC-Freileitungen." Bulletin VSE **2013**(12).
- Pfeiffer, M., S. Hedtke and C. M. Franck (2018). "Corona Current Coupling in Bipolar HVDC and Hybrid HVAC/HVDC Overhead Lines." IEEE Transactions on Power Delivery **33**(1): 393-402.
- Pfeiffer, M., T. Schultz, S. Hedtke and C. M. Franck (2016). "Explaining the impact of conductor surface type on wet weather HVDC corona characteristics." Journal of Electrostatics **79**: 45-55.
- Pfluger, D. H. and C. E. Minder (1996). "Effects of exposure to 16.7 Hz magnetic fields on urinary 6-hydroxymelatonin sulfate excretion of Swiss railway workers." J Pineal Res **21**(2): 91-100.
- Phaniendra, A., D. B. Jestadi and L. Periyasamy (2015). "Free radicals: properties, sources, targets, and their implication in various diseases." Indian J Clin Biochem **30**(1): 11-26.
- 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.
- 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, 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.
- Prodi, V. and A. J. T. A. o. o. h. Mularoni (1985). "Electrostatic lung deposition experiments with humans and animals." **29**(2): 229-240.
- Pun, V. C., F. Kazemiparkouhi, J. Manjourides and H. H. Suh (2017). "Long-Term PM2.5 Exposure and Respiratory, Cancer, and Cardiovascular Mortality in Older US Adults." Am J Epidemiol **186**(8): 961-969.
- 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.
- Rathebe, P. J. A. J. o. B. R. (2020). "Health effects of exposure to static magnetic fields and radiofrequency energy among MRI staff working with 1.5 and 3 T MRI scanners." 23(1): 57-63.
- 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. M. Diamant (2011). Electrostimulation: theory, applications, and computational model, Artech House.
- Ren, Y., J. Chen, M. Miao, D. K. Li, H. Liang, Z. Wang, F. Yang, X. Sun and W. Yuan (2019). "Prenatal exposure to extremely low frequency magnetic field and its impact on fetal growth." Environ Health 18(1): 6.
- Riba, J.-R., A. Morosini and F. Capelli (2018). "Comparative study of AC and positive and negative DC visual corona for sphere-plane gaps in atmospheric air." Energies 11(10): 2671 (2671-2618).
- Röösli, 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.
- Röösli, M. and H. Jalilian (2018). "A meta-analysis on residential exposure to magnetic fields and the risk of amyotrophic lateral sclerosis." Rev Environ Health 33(3): 295-299.
- Röösli, M., M. Lörtscher, M. Egger, D. Pfluger, N. Schreier, E. Lörtscher, 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.
- Röösli, M., M. Lörtscher, M. Egger, D. Pfluger, N. Schreier, E. Lörtscher, 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.
- Röösli, 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.
- Röösli, 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., J.-M. Wunderli, M. Brink, C. Cajochen and N. Probst-Hensch (2019). Die SIRENE-Studie: Verkehrslärm, kardiovaskuläre Sterblichkeit, Diabetes, Schlafstörung und Belästigung. Schweizerisches Medizin-Forum, EMH Schweizerischer Ärzte-Verlag.
- Rosado, M. M., M. Simko, M. O. Mattsson and C. Pioli (2018). "Immune-Modulating Perspectives for Low Frequency Electromagnetic Fields in Innate Immunity." Front Public Health 6: 85.
- 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.
- Ruan, G., X. Liu, Y. Zhang, B. Wan, J. Zhang, J. Lai, M. He and C. Chen (2019). "Power-frequency magnetic fields at 50 Hz do not affect fertility and development in rats and mice." Electromagn Biol Med 38(1): 111-122.
- 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.
- Sadeghi, T., A. Ahmadi, M. Javadian, S. A. Gholamian, M. A. Delavar, S. Esmailzadeh, B. Ahmadi and M. S. H. Hadighi (2017). "Preterm birth among women living within 600 meters of high voltage overhead Power Lines: a case-control study." Rom J Intern Med 55(3): 145-150.
- 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.

- Samborsky, M. (2017). Conceptual Aspects of Future High Voltage Direct Current (HVDC) Electrical Power Transmission Networks. MSc, Brandenburgische Technische Universität.
- Sames, P. and M. Goossens (2015). Messtechnische Felduntersuchungen zu Koronageräuschen. Umwelt und Geologie, Lärmschutz in Hessen. Wiesbaden, Hessisches Landesamt für Umwelt und Geologie.
- Samy, M. M. (2017). Computation of electromagnetic fields around HVDC transmission line tying Egypt and KSA. 2017 Nineteenth International Middle East Power Systems Conference (MEPCON).
- 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.
- Saunders, R. D. and C. D. McCaig (2005). "Developmental effects of physiologically weak electric fields and heat: an overview." Bioelectromagnetics Suppl **7**: S127-132.
- 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.
- Schichler, U. (2019). Aktuelle Innovationen zur Schallminimierung von Freileitungen. Emissionen beim Stromtransport. U. Schichler. Graz, TU Graz: 105-124.
- Schmid, G. (2020). On ELF exposure and induced electric fields. Personal Communication, 09.06.2020.
- Schmid, G. and R. Hirtl (2016). "On the importance of body posture and skin modelling with respect to in situ electric field strengths in magnetic field exposure scenarios." Phys Med Biol **61**(12): 4412-4437.
- Schmiedchen, K., S. Driessen and G. Oftedal (2019). "Methodological limitations in experimental studies on symptom development in individuals with idiopathic environmental intolerance attributed to electromagnetic fields (IEI-EMF) - a systematic review." Environ Health **18**(1): 88.
- Schreier, N., A. Huss and M. Rössli (2006). "The prevalence of symptoms attributed to electromagnetic field exposure: a cross-sectional representative survey in Switzerland." Soz Präventivmed **51**(4): 202-209.
- Schröttner, J. and N. Leitgeb (2008). "Sensitivity to electricity--temporal changes in Austria." BMC Public Health **8**: 310.
- Schüz, 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.
- Schüz, J. (2013). "Commentary: power lines and cancer in adults: settling a long-standing debate?" Epidemiology **24**(2): 191-192.
- Schüz, J., C. Dasenbrock, P. Ravazzani, M. Rössli, 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. Müller, C. D. Schmid, D. Schürmann, B. Struchen and N. Kuster (2016). "Extremely low-frequency magnetic fields and risk of childhood leukemia: A risk assessment by the ARIMMORA consortium." Bioelectromagnetics **37**(3): 183-189.
- Schüz, 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.
- Schüz, 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.
- Schüz, J., J. P. Grigat, B. Stormer, G. Rippin, K. Brinkmann and J. Michaelis (2000). "Extremely low frequency magnetic fields in residences in Germany. Distribution of measurements, comparison of two methods for assessing exposure, and predictors for the occurrence of magnetic fields above background level." Radiat Environ Biophys **39**(4): 233-240.
- Schüz, 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.
- Schüz, 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.
- 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. Frölich (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.
- 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.
- Shin, K. Y., J. A. Oh, G. M. Kwon, M. N. Ju and J. M. Woo (2019). "Long-term evaluation of HVDC transmission line audible noise and its correlation with background noise." AIP Advances **9**(9): 095014.
- Śliwińska-Kowalska, M. and K. Zaborowski (2017). "WHO environmental noise guidelines for the European region: a systematic review on environmental noise and permanent hearing loss and tinnitus." International journal of environmental research and public health **14**(10): 19.
- 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.
- 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.
- SSK (2008). Deutsches Mobilfunk-Forschungsprogramm. Bonn, SSK.
- SSK (2011). Biologische Auswirkungen des Mobilfunks, Gesamtschau. Bonn, SSK.
- SSK (2011). Vergleichende Bewertung der Evidenz von Krebsrisiken durch elektromagnetische Felder und Strahlungen. Bonn, SSK.
- SSK (2013a). Elektromagnetische Felder neuer Technologien. Bonn, SSK.
- SSK (2013b). Biologische Effekte der Emissionen von Hochspannungs-Gleichstromübertragungsleitungen (HGÜ). Strahlenschutzkommission. Bonn, SSK.
- SSK (2017). EMF Anwendungen an Menschen - Empfehlung/Stellungnahme der Strahlenschutzkommission. Strahlenschutzkommission. Bonn, SSK.
- SSK (2019). Anwendungen elektrischer, magnetischer und elektromagnetischer Felder (EMF) zu nichtmedizinischen Zwecken am Menschen. Bonn, SSK.
- SSM (2013). 8th report from SSM's scientific council on electromagnetic fields. Stockholm, SSM.
- 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.
- 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.
- 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.
- Straumann, U. and C. Franck (2011). "Discussion of converting a double-circuit AC overhead line to an AC/DC hybrid line with regard to audible noise."
- Struchen, B., I. Liorni, M. Parazzini, S. Gangler, P. Ravazzani and M. Rösli (2016). "Analysis of personal and bedroom exposure to ELF-MFs in children in Italy and Switzerland." J Expo Sci Environ Epidemiol **26**(6): 586-596.
- 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, L., C. Zhao, Y. Jin, Y. Lei, L. Lu and G. Chen (2018). "Association between parental occupational exposure to extremely low frequency magnetic fields and childhood nervous system tumors risk: A meta-analysis." Sci Total Environ **642**: 1406-1414.
- 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.
- Sudan, M., O. A. Arah, T. Becker, Y. Levy, T. Sigsgaard, J. Olsen, X. Vergara and L. Kheifets (2017). "Re-examining the association between residential exposure to magnetic fields from power lines and childhood asthma in the Danish National Birth Cohort." PLoS One **12**(5): e0177651.
- Sun, J., R. L. Kwan, Y. Zheng and G. L. Cheing (2016). "Effects of pulsed electromagnetic fields on peripheral blood circulation in people with diabetes: A randomized controlled trial." Bioelectromagnetics **37**(5): 290-297.
- 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.
- Sun, Q., J. Wu, H. Lv, L. Wang, W. Han, J. Min, Q. Zhang, Y. Li and X. Li (2017). Analysis of coupling characteristics of hybrid electric field in the 750kV HVAC and ±800kV HVDC parallel transmission lines. 2017 IEEE 5th International Symposium on Electromagnetic Compatibility (EMC-Beijing), IEEE.
- Swanson, J. (2013). "Residential mobility of populations near UK power lines and implications for childhood leukaemia." J Radiol Prot **33**(3): N9-14.
- 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.
- Swanson, J., L. Kheifets and X. Vergara (2019). "Changes over time in the reported risk for childhood leukaemia and magnetic fields." J Radiol Prot **39**(2): 470-488.
- Szemerszky, R., Z. Domotor, T. Berkes and F. Koteles (2016). "Attribution-Based Nocebo Effects. Perceived Effects of a Placebo Pill and a Sham Magnetic Field on Cognitive Performance and Somatic Symptoms." Int J Behav Med **23**(2): 204-213.
- 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. Uuksulainen 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., H. Kuisti, L. Korpinen, N. Hayashi and K. Isaka (2012). "Effects of tissue conductivity and electrode area on internal electric fields in a numerical human model for ELF contact current exposures." Phys Med Biol **57**(10): 2981-2996.
- 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.
- Terzi, M., B. Ozberk, O. G. Deniz and S. Kaplan (2016). "The role of electromagnetic fields in neurological disorders." J Chem Neuroanat **75**(Pt B): 77-84.
- Theriault, 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.
- Toledano, M. B., G. Shaddick, K. de Hoogh, D. Fecht, A. F. Sterrantino, J. Matthews, M. Wright, J. Gulliver and P. Elliott (2020). "Electric field and air ion exposures near high voltage overhead power lines and adult cancers: a case control study across England and Wales." Int J Epidemiol **49**(Supplement 1): i57-i66.
- Toutou, Y., A. Bogdan, J. Lambrozo and B. Selmaoui (2006). "Is melatonin the hormonal missing link between magnetic field effects and human diseases?" Cancer Causes Control **17**(4): 547-552.
- 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.
- Tourab, W. and A. Babouri (2016). "Measurement and Modeling of Personal Exposure to the Electric and Magnetic Fields in the Vicinity of High Voltage Power Lines." Saf Health Work **7**(2): 102-110.
- 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. Schlaefel, B. Schlehofer, J. Schuz, J. Siemiatycki, M. V. Tongeren and E. Cardis (2017). "Interactions between occupational exposure to extremely low frequency magnetic fields and chemicals for brain tumour risk in the INTEROCC study." Occup Environ Med.
- 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. Schlaefel, 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.
- UKCCS (1999). "Exposure to power-frequency magnetic fields and the risk of childhood cancer. UK Childhood Cancer Study Investigators." Lancet **354**(9194): 1925-1931.
- Umweltbundesamt (2016). Polyzyklische Aromatische Kohlenwasserstoffe. Umweltschädlich! Giftig! Unvermeidbar? Dessau-Rosslau, Umweltbundesamt.
- Ungureanu, M., A. C. T. Rusu and I. Baran (2007). "Field components of the electromagnetic environment related to the presence of the overhead transmission lines." WSEAS Transactions on

- Environment and Development **3**: 149-164.
- 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 Kempen, E., M. Casas, G. Pershagen and M. Foraster (2018). "WHO environmental noise guidelines for the European region: a systematic review on environmental noise and cardiovascular and metabolic effects: a summary." International journal of environmental research public health **15**(2): 379.
- van Moorselaar, I., P. Slottje, P. Heller, R. van Strien, H. Kromhout, M. Murbach, N. Kuster, R. Vermeulen and A. Huss (2017). "Effects of personalised exposure on self-rated electromagnetic hypersensitivity and sensibility - A double-blind randomised controlled trial." Environ Int **99**: 255-262.
- 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.
- 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. Heikkila and M. Koskenvuo (1993). "Risk of cancer in Finnish children living close to power lines." BMJ **307**(6909): 895-899.
- 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.
- Vinceti, M., C. Malagoli, S. Fabbri, L. Kheifets, F. Violi, M. Poli, S. Caldara, D. Sesti, S. Violanti, P. Zanichelli, B. Notari, R. Fava, A. Arena, R. Calzolari, T. Filippini, L. Iacuzio, E. Arcolin, J. Mandrioli, N. Fini, A. Odone, C. Signorelli, F. Patti, M. Zappia, V. Pietrini, P. Oleari, S. Teggi, G. Ghermandi, A. Dimartino, C. Ledda, C. Mauceri, S. Sciacca, M. Fiore and M. Ferrante (2017). "Magnetic fields exposure from high-voltage power lines and risk of amyotrophic lateral sclerosis in two Italian populations." Amyotroph Lateral Scler Frontotemporal Degener **18**(7-8): 583-589.
- 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.
- Wang, D. L., T. B. Lu, X. S. Li, B. Chen, X. B. Li, L. Xie and Y. Ju (2018). "Simulation and analysis of human body micro-shocks in the ion flow field near HVDC transmission lines." Journal of Electrostatics **93**: 10-16.
- 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 (2006). Static Fields. Geneva, WHO.
- WHO (2007). Extremely low frequency fields. Geneva, WHO.
- WHO (2018). Environmental noise guidelines for the European region. Geneva, WHO.
- Wood, A. and K. Karipidis (2017). Non-ionizing radiation protection: summary of research and policy options Hoboken, John Wiley
- Wu, S., G. Di and Z. Li (2017). "Does static electric field from ultra-high voltage direct-current transmission lines affect male reproductive capacity? Evidence from a laboratory study on male mice." Environ Sci Pollut Res Int **24**(22): 18025-18034.
- 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.

- Xu, Y., X. Gu and G. Di (2018). "Duration-dependent effect of exposure to static electric field on learning and memory ability in mice." Environ Sci Pollut Res Int **25**(24): 23864-23874.
- Yamaguchi-Sekino, S., M. Sekino and S. Ueno (2011). "Biological effects of electromagnetic fields and recently updated safety guidelines for strong static magnetic fields." Magnetic Resonance in Medical Sciences **10**(1): 1-10.
- Zahedi, Y., G. Zaun, S. Maderwald, S. Orzada, C. Pütter, A. Scherag, E. Winterhager, M. E. Ladd and R. Grümmer (2014). "Impact of repetitive exposure to strong static magnetic fields on pregnancy and embryonic development of mice." J Magn Reson Imaging **39**(3): 691-699.
- Zahner, M., J. Fröhlich and J. Leuthold (2016). ExpoM: Exposure Measurement Platform Enabling ELF Magnetic Field and RF Electromagnetic Field Strength Measurements. BioEM 2016 The Joint Annual Meeting of The Bioelectromagnetics Society and the European BioElectromagnetics Association. Ghent, Belgium: 387-390.
- Zamaniah, 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.
- Zaun, G., Y. Zahedi, S. Maderwald, S. Orzada, C. Pütter, A. Scherag, E. Winterhager, M. E. Ladd and R. Grümmer (2014). "Repetitive exposure of mice to strong static magnetic fields in utero does not impair fertility in adulthood but may affect placental weight of offspring." J Magn Reson Imaging **39**(3): 683-690.
- 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.
- Zhang, Y., Y. Zhang, H. Yu, Y. Yang, W. Li and Z. Qian (2017). "Theta-gamma coupling in hippocampus during working memory deficits induced by low frequency electromagnetic field exposure." Physiol Behav **179**: 135-142.
- 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.
- Zhou, X., X. Cui, T. Lu, Y. Liu, X. Li, J. He, R. Bai and Y. Zhen (2013). "Shielding Effect of HVAC Transmission Lines on the Ion-Flow Field of HVDC Transmission Lines." IEEE Transactions on Power Delivery **28**(2): 1094-1102.
- Zou, Z., L. Li and X. Cui (2019). "Calculation of the Ionized Field of ± 800 kV High Voltage DC Power Lines With the Presence of Charged Atmospheric Particles." IEEE Transactions on Magnetics **55**(10): 1-4.
- 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.