Strahlenschutzkommission

Geschäftsstelle der
Strahlenschutzkommission
Postfach 12 06 29
D-53048 Bonn

http://www.ssk.de

Biologische Effekte der Emissionen von Hochspannungs-Gleichstromübertragungsleitungen (HGÜ)

Empfehlungen der Strahlenschutzkommission
mit wissenschaftlicher Begründung

Verabschiedet in der 263. Sitzung der Strahlenschutzkommission am 12. September 2013

Inhalt

Einleitung **3**
Empfehlungen **3**
Wissenschaftliche Begründung **4**
1 Grundlagen **4**
1.1 Physikalische Grundlagen 4
1.1.1 HGÜ-Freileitungen 4
1.1.2 HGÜ-Erdkabel 5
1.2 Emissionen 5
1.2.1 Elektrische Gleichfelder 5
1.2.2 Magnetische Gleichfelder 5
1.2.3 Ionen, Ozon und Stickoxide 5
2 Biologische Auswirkungen **6**
2.1 Elektrische Gleichfelder 6
2.1.1 Exposition 6
2.1.2 Physikalisches Wirkmodell 7
2.1.3 Biologisches Wirkmodell 8
2.1.4 Biologische Ergebnisse 8
2.1.5 Langzeit-Wirkungen 11
2.1.6 Gesamtbewertung der Evidenz 11
2.2 Magnetische Gleichfelder 11
2.2.1 Exposition 12
2.2.2 Physikalisches Wirkmodell 13
2.2.3 Biologisches Wirkmodell 14
2.2.4 Biologische Ergebnisse 15
2.2.5 Langzeit-Wirkungen 25
2.2.6 Gesamtbewertung der Evidenz 25
2.2.7 Indirekte Wirkungen 25
2.3 Ionen, Ozon und Stickoxide 26
2.3.1 Physikalisches Wirkmodell 26
2.3.2 Biologische Wirkungen und Immissionsbegrenzung 26
3 Bewertung **27**
Literatur **29**
Abkürzungsverzeichnis **39**
Abbildungsnachweis **40**
Anhang A Evidenzbewertung **41**
Anhang B Berechnung der Ozon- und NOx-Zusatzbelastungen durch HGÜ-Leitungen **44**

Einleitung

Die forcierte Nutzung erneuerbarer Energie als Folge der Energiewende in Deutschland und die damit verbundenen langen Entfernungen zwischen Erzeugungs- und Verbrauchsstätten elektrischer Energie machen den Ausbau neuer Langstrecken-Energieübertragungsleitungen erforderlich. Dafür sollen auch Hochspannungs-Gleichstromübertragungs-Leitungen[1] (HGÜ-Leitungen) zum Einsatz kommen.

Die Strahlenschutzkommission (SSK) wurde vom Bundesministerium für Umwelt, Naturschutz und Reaktorsicherheit (BMU) beauftragt, in Ergänzung ihrer Stellungnahme zu Wechselspannungs-Energieversorgungssystemen (SSK 2008) auch die HGÜ-Leitungen, insbesondere deren elektrische und magnetische Gleichfelder, aus der Sicht des Strahlenschutzes in Bezug auf den Menschen zu beurteilen. Sie hat daher die vorliegende Empfehlung erarbeitet; eine Grenzwert-Regelung ist nicht Gegenstand dieser Empfehlung.

Empfehlungen

Angesichts der zu erwartenden Immissionen durch elektrische und magnetische Felder von HGÜ-Leitungen und bestehender Regelungslücken spricht die SSK folgende Empfehlungen aus:

- Die SSK empfiehlt, die elektrischen Gleichfelder von HGÜ-Leitungen mit dem Ziel der Vermeidung gesundheitlicher Beeinträchtigungen oder erheblicher Belästigungen zu begrenzen und bei multipler Exposition durch elektrische Gleich- und Wechselfelder eine gewichtete Summation der Einzelbeiträge vorzunehmen.
- Die Angabe von belastbaren Schwellenwerten für Wahrnehmungs-, Belästigungs-, Schmerz- und Gefährdungseffekte ist im Hinblick auf die begrenzte Datenlage, insbesondere hinsichtlich der Anzahl der untersuchten Personen und der Einflüsse von Kofaktoren wie z. B. Ionendichte, derzeit nicht möglich. Die SSK empfiehlt daher die Durchführung weiterer Forschungsprojekte zur Wahrnehmung vor allem in Form von Humanstudien unter gut kontrollierten Bedingungen.
- Die SSK empfiehlt, die Netzbetreiber darauf hinzuweisen, mögliche Sekundäreffekte (z. B. Elektroschocks durch Entladung zu oder von leitfähigen Strukturen) durch geeignete, primär konstruktive Abhilfemaßnahmen zu unterbinden.
- Die SSK weist auf die Notwendigkeit des Schutzes von Personen mit magnetisch aktivierbaren Implantaten hin. Um z. B. eine Störbeeinflussung von Herzschrittmachern sicher auszuschließen, wird eine Begrenzung der magnetischen Flussdichte auf 500 µT empfohlen.

[1] Da die Langstrecken-Übertragung durch Freileitungen erfolgt, werden im Folgenden, wenn nicht gesondert anders erwähnt, unter „Übertragungsleitungen“ (HGÜ oder HWÜ) jeweils Freileitungen verstanden.

Wissenschaftliche Begründung

1 Grundlagen

1.1 Physikalische Grundlagen

Die HGÜ-Technik ist eine effiziente Möglichkeit zur Übertragung elektrischer Energie über längere Distanzen. Isolierte HGÜ-Kabel werden auf Seegrund oder im Erdreich derzeit über Distanzen von 50 km bis 150 km eingesetzt und bei Übertragungsspannungen bis ca. ± 350 kV betrieben. HGÜ-Leitungen sind dagegen schon mit Spannungen bis ± 800 kV (mit einer verketteten Spannung bis 1 600 kV) und Übertragungsdistanzen über 1 000 km in Betrieb. In Zukunft ist bei Neuinstallationen von noch höheren Spannungen auszugehen.

HGÜ-Leitungen unterscheiden sich in wesentlichen Punkten von Hochspannungs-Wechselstromübertragung (HWÜ), wie z. B. Bahnstromversorgung bzw. Hochspannungs-Drehstromübertragungsleitungen (HDÜ-Leitungen). Bei HDÜ-Leitungen wird die elektrische Energie durch ein oder mehrere Leitungssysteme mit jeweils drei Phasenleitern übertragen, wobei die zugeordneten elektrischen und magnetischen Feldvektoren eines Systems gegeneinander so versetzt sind, dass sich gegenüber einem Einzelleiter eine gegenseitige Teil-Kompensationswirkung der Felder einstellen kann. Dies geschieht umso wirkungsvoller, je geringer die Entfernungen der einzelnen Teilleiter voneinander sind. Darüber hinaus nimmt die Feldstärke mit zunehmender Entfernung zu ihnen stark ab.

1.1.1 HGÜ-Freileitungen

Bei HGÜ-Freileitungen treten die relativ höchsten Feldwerte für die Allgemeinbevölkerung an der Stelle des größten Durchhanges in Spannfeldmitte unter den Leiterseilen auf. Da die Entfernungsunterschiede mit zunehmendem Abstand zu den Leiterseilen umso unbedeutender werden und daher die Kompensationswirkung immer besser wird, je größer der Abstand zu den Leiterseilen ist, nehmen sowohl elektrische als auch magnetische Felder außerhalb der Leitungstrasse etwa mit dem Quadrat der Entfernung ab, und der Einfluss unterschiedlicher Bodenabstände der Leiter wird vernachlässigbar. (Auf die Feldverhältnisse bei HGÜ-Leitungen wird im Kapitel 2.1.1 eingegangen.)

An den Leiterseilen der HGÜ kommt es wegen der dort herrschenden hohen elektrischen Feldstärke, wie auch bei HWÜ-Leitungen, zu Mikroentladungen (Koronaentladungen) und zur Ionisation der Luft. Dies erfolgt jedoch ständig, weil die hohe elektrische Spannung nicht, wie bei der HWÜ, periodisch gegen Null geht. Bei HWÜ-Leitungen wechselt zusätzlich die Polarität der Einzelleiter und damit die Polarität der Entladungen ständig, sodass sich die erzeugten Ladungen immer wieder ausgleichen können. Bei HGÜ-Leitungen ändert sich die Polarität am Leiterseil hingegen nicht. Daher kann sich um die Leiter eine größere Raumladungswolke geladener Teilchen ausbilden. Dies hat mehrere Konsequenzen, nämlich

- dass im Vergleich zu HWÜ-Leitungen höhere elektrische Bodenfeldstärken auftreten und
- dass sich die elektrischen Felder durch Windverfrachtungen der Ladungswolke über größere Bereiche erstrecken können.

Die Raumladungswolke enthält auch durch Koronaentladung entstandene chemische Verbindungen wie Ozon und Stickoxide.

1.1.2 HGÜ-Erdkabel

Im Erdboden verlegte HGÜ-Kabelleitungen erzeugen nur magnetische Gleichfelder, aber weder äußere elektrische Felder noch Koronaentladungen (und damit auch kein Ozon oder Stickoxide). Im Vergleich zu HGÜ-Freileitungen verursachen Erdkabel wesentlich höhere Kosten. Sie erfordern aufwändige Tiefbauarbeiten in einer den HGÜ-Freileitungen vergleichbaren Trassenbreite, eine Kette von Muffenbauwerken für die Verbindung der Kabelabschnitte und die Freihaltung des Trassenbereiches für etwaige Reparaturarbeiten aufgrund von Schäden, die durch Korrosion, Überspannungen, Übererwärmungen oder durch äußere mechanische Einwirkungen verursacht werden können. Die elektrischen Verlustleistungen verursachen Bodenerwärmungen, die im Trassenbereich zur Bodenaustrocknung und zur Beeinträchtigung des Biotops führen (EFZN 2011).

1.2 Emissionen

1.2.1 Elektrische Gleichfelder

Die Stärke des elektrischen Gleichfeldes wird durch die elektrische Leiterspannung bestimmt (und nicht durch den Leiterstrom). Da die Spannung aus verschiedenen Gründen sehr konstant gehalten wird bzw. werden muss, ist der Betrag des elektrischen Feldes keinen kurzzeitigen Schwankungen ausgesetzt.

Da elektrische Gleichfelder durch elektrisch leitfähige Gebilde besonders gut abgeschirmt werden, führen äußere elektrische Gleichfelder im Inneren von Häusern, aber auch im Körperinneren nur zu vernachlässigbar kleinen elektrischen Feldeinträgen.

1.2.2 Magnetische Gleichfelder

Magnetische Felder werden von bewegten elektrischen Ladungen (Strömen) verursacht. Sie schwanken daher mit dem aktuellen Stromverbrauch. Bei überregionalen Übertragungsleitungen wie einer HGÜ-Leitung mitteln sich die Einflüsse unterschiedlicher Verbraucher aus. Kurzzeitige Stromschwankungen sind daher gering. Die magnetischen Emissionen sind daher primär stationäre magnetische Gleichfelder mit einem geringen Anteil von Oberwellen, die von der AC-DC-Konvertierung am Speiseende der Leitung verblieben sind.

1.2.3 Ionen, Ozon und Stickoxide

Wie bei allen elektrischen Entladungen entstehen bei den elektrischen Entladungsfunken der Koronaentladungen an HGÜ-Leitungen durch Ionisation geladene Teilchen (z. B. Ionen). Diese sind einem Veränderungsprozess unterworfen, der darin besteht, dass die Masse durch Anlagerung an weitere Teilchen und Aerosole kontinuierlich zunimmt, was dazu führt, dass sich ihre Beweglichkeit immer mehr verringert. Gleichzeitig nimmt die Anzahl der Ionen durch Rekombination mit seitlichem Abstand zur Leitung ab, zeitlich stellt sich ein dynamisches Gleichgewicht ein.

Ozon

Wie bei allen elektrischen Entladungen entsteht als Folge der Koronaentladungen an den Leiterseilen auch Ozon (O_3), das in höheren Konzentrationen die Gesundheit schädigen könnte. Aufgrund seiner Reaktionsfreudigkeit geht Ozon rasch chemische Bindungen ein, so dass seine Reichweite begrenzt ist. Dieser Effekt ist umso ausgeprägter, je mehr potenzielle Bindungspartner in der Luft vorhanden sind.

Stickoxide

Als Folge der Koronaentladungen an den Leiterseilen entstehen auch verschiedene Verbindungen von Sauerstoff mit Stickstoff, die insgesamt als Stickoxide (NOx) bezeichnet werden. In höheren Konzentrationen könnten Stickoxide die Gesundheit schädigen.

HGÜ-Erdkabel

Im Erdboden verlegte HGÜ-Kabelleitungen sind mit einem metallischen Schirm ausgestattet. Dieser verhindert grundsätzlich das Auftreten äußerer elektrischer Felder und damit von Ozon und Stickoxiden.

2 Biologische Auswirkungen

Die Evidenzbewertung erfolgt hier nach dem neuen Bewertungsschema, das die SSK in ihrer Stellungnahme „Vergleichende Bewertung der Evidenz von Krebsrisiken durch elektromagnetische Felder und Strahlungen“ erarbeitet hat (SSK 2012). Es ist in seinen Grundzügen im Anhang A erläutert.

2.1 Elektrische Gleichfelder

Elektrische Gleichfelder entstehen zwischen getrennten ruhenden oder gleichförmig fließenden elektrischen Ladungen. Lebewesen und elektrisch leitfähige Objekte können die Felder in Abhängigkeit von ihren elektrischen Eigenschaften, ihrer Orientierung, Form und Entfernung zu den Felderzeugern verzerren. Da elektrische Gleichfelder durch elektrisch leitfähige Gebilde besonders gut abgeschirmt werden, führen äußere elektrische Gleichfelder auch im Körperinneren nur zu vernachlässigbar kleinen elektrischen Feldern.

2.1.1 Exposition

Expositionen gegenüber elektrischen Gleichfeldern erfolgen im Freien durch das natürliche elektrische Feld zwischen Ionosphäre und Erdoberfläche. Bei Schönwetter ergibt sich im Sommer an ebenen Flächen eine Feldstärke von ca. 130 V/m, die im Winter auf das ca. Doppelte ansteigen kann. Unter Gewitterwolken können sich erheblich höhere elektrische Feldstärken bis zu ca. ± 20 kV/m ergeben. Aufgrund des Wettergeschehens und von Blitzentladungen ist die Konstanz der Feldstärkewerte jedoch eingeschränkt. Hohe elektrische Feldstärken auf der Körperoberfläche bis zum Überschreiten der Durchschlagsfestigkeit der Luft ergeben sich im Alltag vor allem als Folge von statischen Aufladungen, z. B. durch bewegungsbedingte Reibung der Kleidung, und/oder durch Trennungsvorgänge, z. B. des Schuhwerkes auf isolierenden Bodenbelägen. Technische Quellen elektrischer Gleichfelder sind mit Gleichspannung betriebene Geräte und Fahrzeuge, wie z. B. Straßenbahnen oder U-Bahnen. Berufliche Expositionen gegenüber höheren elektrischen Gleichfeldern ergeben sich z. B. bei Wartungsarbeiten an HGÜ-Anlagen, HGÜ-Leitungen oder in HGÜ-Konverterstationen. Deren Bewertung ist nicht Gegenstand dieser Empfehlung.

Die elektrischen Gleichfelder von HGÜ-Leitungen hängen außer von der Leiterspannung auch von der Betriebsart (monopolar oder bipolar), der Leiterkonfiguration und dem Bodenabstand der Leiterseile ab. Wegen der schlechteren Kompensationswirkung sind die elektrischen Gleichfelder und deren Reichweite größer als bei HWÜ-Leitungen. Darüber hinaus kann bei HGÜ-Leitungen die entstehende Raumladungswolke einerseits bewirken, dass die elektrischen Feldstärken bereits unter der Leitung erheblich höher sind als bei HWÜ-Leitungen und als es aufgrund der Leitergeometrie und -spannung zu erwarten wäre. Andererseits können die erzeugten Raumladungswolken und damit auch die von ihnen

verursachten elektrischen Felder durch Wind über große Entfernungen verfrachtet werden, so dass die elektrische Feldstärke mit zunehmender seitlicher Entfernung wesentlich langsamer abnimmt als bei Wechselspannungsleitungen. Feldberechnungen von Höchstspannungs-Hybrid-Leitungen ergaben in Spannfeldmitte ohne Berücksichtigung von Ionenwolken elektrische Feldstärken von 16 kV/m (DC) und 8,9 kV/m (AC) bei einem 400-kV-DC- und einem 380-kV-AC-Dipol-System (Amprion 2012). Aufgrund derzeit noch unbekannter Mastbilder kann auf die zu erwartende Exposition von in Deutschland geplanten HGÜ-Leitungen quantitativ nicht näher eingegangen werden.

2.1.2 Physikalisches Wirkmodell

Die physikalischen Wirkmechanismen elektrischer Gleichfelder sind gut bekannt. Elektrische Gleichfelder verursachen aufgrund der Coulomb'schen Anziehungskraft eine Ladungsumverteilung und damit eine Ansammlung elektrischer Gegenladungen an der der Feldquelle zugewandten Seite. Dies hat durch Abstoßungseffekte gleichnamiger Ladungen eine Kraftwirkung auf die Körperbehaarung zur Folge und kann zum Aufrichten der Haare führen. Das Körperinnere wird aufgrund seiner guten elektrischen Leitfähigkeit vor dem äußeren elektrischen Feld nahezu vollständig abgeschirmt.

Darüber hinaus kann es zu (Mikro-)Entladungen an der Körperoberfläche und Funkenentladungen von isolierten Personen zu geerdeten Teilen oder von isolierten Teilen zu geerdeten Personen kommen, die bei ausreichender Stärke zu gesundheitlichen Wirkungen führen können (Kap. 2.1.6). In einem homogenen elektrischen Gleichfeld ergibt sich die bei Feldzusammenbruch durch direkte[2] Entladung freisetzbare Ladungsmenge Q_E mit der Einzugsfläche[3] A_E des Menschen (ca. 5 m²), der Dielektrizitätskonstanten ε_0[4] und der elektrischen Feldstärke E zu

$$Q_E = \varepsilon_0 A_E E, \qquad (1).$$

So kann z. B. in einem elektrischen Gleichfeld von ca. 20 kV/m, wie es unter einer Gewitterwolke auftreten kann, nach Gleichung 1 bei direkter Entladung eine Ladungsmenge von ca. 0,9 µC freigesetzt werden. Bei indirekter Entladung, z. B. von einem PKW (A_E = 50 m²), ergäben sich somit 10fach höhere Ladungsmengen von 9 µC. Dem Dokument IEC/TS 60479-2 (2007) lässt sich die Wahrnehmungsschwelle mit 0,39 µC bis 0,90 µC und die Schmerzschwelle mit 8 µC entnehmen. Dem entspricht somit eine äußere elektrische Feldstärke von 8,8 kV/m für die untere Wahrnehmungsschwelle und von 180 kV/m für die Schmerzgrenze. Bei indirekter Entladung, z. B. von einem PKW, können die entsprechenden Feldstärken 10fach niedriger sein.

---

[2] Die Bezeichnung direkter Effekt eines Feldes wird im Zusammenhang mit der unmittelbaren Einwirkung des Feldes auf das Körperinnere verwendet. Effekte auf der Körperoberfläche werden als indirekte Effekte bezeichnet, wobei der Entladungsvorgang als Sekundäreffekt des elektrischen Feldes angesehen werden kann. In Bezug auf elektrische Entladungen wird unter direkter Entladung die Entladung einer Person zu einem Gegenstand und unter indirekter Entladung die Entladung eines aufgeladenen Gegenstandes zu einer Person verstanden.

[3] Als Einzugsfläche ist jene Fläche im homogenen Feldbereich zu verstehen, die alle elektrischen Feldlinien umfasst, die auf dem Körper münden.

[4] $\varepsilon_0 = 8{,}8542\ 10^{-12}$ As/Vm

Insgesamt ergibt sich wegen der guten Abschirmung des Körperinneren im Hinblick auf die *direkte* Einwirkung elektrischer Gleichfelder Evidenz[5] für das Fehlen gesundheitlich relevanter Wirkmechanismen (EN). Die Evidenz für physikalische Wirkmechanismen von elektrischen Gleichfeldern, die unter HGÜ-Leitungen auftreten und gesundheitlich relevante *indirekte* Effekte verursachen könnten, ist hingegen als überzeugend einzustufen (E3).

2.1.3 Biologisches Wirkmodell

Bei ausreichender elektrischer Feldstärke kann die Kraftwirkung auf die Körperbehaarung zum Aufrichten der Haare und dadurch an den Haarwurzeln zur Wahrnehmung führen (Clairmont et al. 1989).

Die Wahrnehmungsschwelle für Mikroentladungen hängt von der Polarität der Entladung und der Körperstelle der Einwirkung ab. Für kathodische Entladungen liegt sie um ca. 30 % niedriger als für anodische Entladung. Der kleinste ermittelte Median für die Wahrnehmungsschwelle periodisch repetitiver Entladungen beträgt 0,09 µC am Unterarm bzw. 0,11 µC an Hand und Finger (Reilly et al. 1992).

Mikroentladungen können belästigend sein und bei ausreichender Feldstärke auch als Mikroschocks empfunden werden. Die Belästigungsschwelle für einzelne monophasische Stimuli liegt je nach Einwirkungsort (Finger, Hand oder Unterarm) ca. 2,3 bis 3,5fach höher als die Wahrnehmungsschwelle, die Schmerzschwelle ca. 3,5 bis 5,5fach über der Wahrnehmungsschwelle (Reilly et al. 1992).

Aufgrund der Abschirmung des Körperinneren können elektrische Gleichfelder dort keine direkten biologischen Wirkungen entfalten (EN). Die Evidenz für den biologischen Wirkmechanismus von Mikroentladungen ist als überzeugend einzustufen (E3).

2.1.4 Biologische Ergebnisse

Untersuchungen der möglichen Auswirkungen von elektrischen Gleichfeldern sind vor allem in den 1970er Jahren durchgeführt worden, als Befürchtungen über vermeintlich schädliche Auswirkungen der Abschirmung des natürlichen elektrischen „Schönwetter-“Gleichfeldes durch Gebäude im Vordergrund standen (König 1986).

2.1.4.1 In vitro

Untersuchungen der möglichen Auswirkungen von elektrischen Gleichfeldern in den 1970er Jahren an Bakterienkulturen führten zu widersprüchlichen Ergebnissen. Es wurde sowohl über wachstumshemmende als auch -fördernde Effekte berichtet. In ihrer Bewertung kommt die WHO zum Schluss, dass elektrische Gleichfelder wegen der erzeugten Oberflächenladungen in vitro grundsätzlich nicht hinreichend genau untersucht werden können (WHO 2006a).

Aufgrund der Abschirmung des Probeninneren können elektrische Gleichfelder keine direkten biologischen Wirkungen entfalten, sodass es Evidenz für das Fehlen gesundheitsrelevanter Wirkung (EN) gibt.

[5] Der Begriff „Evidenz“ ist mehrdeutig. Er wird in dieser Empfehlung im Sinne des englischen Wortes „evidence“ mit der Bedeutung „Beleg“ oder „Beweislage“ und damit auch als Maß für die Sicherheit des Wissens verwendet.

2.1.4.2 In vivo

In-vivo-Untersuchungen an Mäusen und Ratten ergaben in starken elektrischen Gleichfeldern ab ca. 40 kV/m (WHO 2006a) statistisch signifikante physiologische Veränderungen, z. B. einen Anstieg der Laufaktivität und einen erhöhten Futterverbrauch, die jedoch durch spätere Analysen auf methodische Mängel der Versuchsanordnung, nämlich die Auswirkung von Mikroschocks beim Trinken aus dem nicht geerdeten Wasserspender zurückgeführt werden konnten.

Mikroentladungen treten im elektrischen Gleichfeld stochastisch und somit im Gegensatz zu Wechselfeldern seltener auf. Die Untersuchungen über die Wahrnehmungsschwelle von Ratten bzw. Mäusen bei Aufenthalt in elektrischen Feldern wurden sowohl mit Wechselfeldern (Stern et al. 1983, Rosenberg et al. 1983, Sagan et al. 1987) als auch mit Gleichfeldern (Stell et al. 1993) vorgenommen. Da dabei jedoch jeweils nur wenige Tiere untersucht wurden, sind die Ergebnisse nicht repräsentativ.

2.1.4.3 Humanstudien

Akuteffekte

Humanexperimente zur Wahrnehmung von elektrischen Feldern aufgrund lokaler Exposition, vorwiegend des Unterarmes, wurden zwar für elektrische Gleich- und Wechselfelder vorgenommen (Shimizu et al. 1998, Kato et al. 1989, Chapman et al. 2005), da die Ergebnisse jedoch nicht direkt auf die Ganzkörper-Exposition beim Aufenthalt in Feldern übertragen werden können, werden sie für diese Empfehlung nicht herangezogen.

Versuche zur Wahrnehmbarkeit von elektrischen Feldern durch Menschen bei Ganzkörper-Exposition wurden vorwiegend mit elektrischen Wechselfeldern durchgeführt (Cabanes und Gary 1981, Delaplace und Reilly 1978, Deno und Zaffanella 1975); zu Gleichfeldern liegen eine Humanstudie an 48 Personen (23 Männer und 25 Frauen) im Alter von 18 Jahren bis 57 Jahren (Blondin et al. 1996) sowie eine nicht ausreichend dokumentierte Studie über die gleichzeitige Exposition einer nicht genannten Anzahl von Personen gegenüber elektrischen Gleich- und Wechselfeldern vor (Clairmont et al. 1989). Da die Wahrnehmungsbedingungen wegen der nicht periodischen Einwirkungen ungünstiger sind, ist zu erwarten, dass die Wahrnehmungsschwellen für elektrische Gleichfelder höher liegen als für Wechselfelder. Dies wird durch die Versuche grundsätzlich bestätigt. Allerdings zeigen die Untersuchungen eine Abhängigkeit der Wahrnehmungsschwellen von der herrschenden Luftionenstromdichte (Blondin et al. 1996). Bei hohen Luftionenstromdichten von 120 nA/m² wird die Wahrnehmung erleichtert, und es nähern sich die Wahrnehmungsschwellen für Gleich- und Wechselfelder an. Bei Ionenfreiheit ist die Wahrnehmungsschwelle z. B. bei einer Wahrnehmungswahrscheinlichkeit von 10 % bis zu über 2fach gegenüber einer Ionenstromdichte von 120 nA/m² erhöht. Auch mit zunehmender elektrischer Feldstärke nähern sich die Wahrnehmungsschwellen für Wechsel- und Gleichfelder zunehmend an (Blondin et al. 1996).

Wie Untersuchungen an 400-kV-HGÜ-Leitungen zeigten, können die Mittelwerte der Ionenstromdichten am Boden je nach Leiterkonfiguration, Polarität der Leiter und Witterung bei Schönwetter ca. 3 nA/m² bis 55 nA/m² und bei Regen ca. 29 nA/m² bis 106 nA/m² betragen, wobei bei Nebel die 5%-Werte auch über 155 nA/m² liegen können (Johnson 1983). Die Ionenproduktion wird durch die Anwesenheit elektrischer Wechselfelder von parallel geführten HWÜ-Leitungen oder Hybridleitungen nicht wesentlich beeinflusst (Maruvada und Drogi 1988).

In Fußnoten (EU Rat 1999, ICNIRP 1998) wird darauf hingewiesen, dass von den meisten Menschen statische elektrische Feldstärken unter 25 kV/m nicht als belästigend wahrgenommen werden.

Insgesamt ist die Datenlage zu biologischen Wirkungen von Entladungen in elektrischen Gleichfeldern nicht ausreichend, um belastbare Werte für Wirkungsschwellen ableiten zu können.

Bei Hybridleitungen, also bei Leitungen, in denen HGÜ-Systeme gemeinsam mit HWÜ-Systemen geführt werden, weil sie z. B. auf denselben Tragemasten montiert sind oder HGÜ-Leitungen in Leitungskorridoren eng benachbart zu HWÜ-Leitungen geführt werden, ist in der Umwelt auch mit dem gemeinsamen Auftreten von elektrischen Gleich- und Wechselfeldern zu rechnen. Die gleichzeitige Exposition gegenüber Gleich- und Wechselfeldern wurde von Clairmont et al. (1989) untersucht. Die Ergebnisse zeigen am Beispiel der Gleichfeld-Wahrnehmung, dass die Effekte in Anwesenheit von Wechselfeldern verstärkt werden. Sie sind auch von der Polarität des Gleichfeldes abhängig (Abbildung 1).

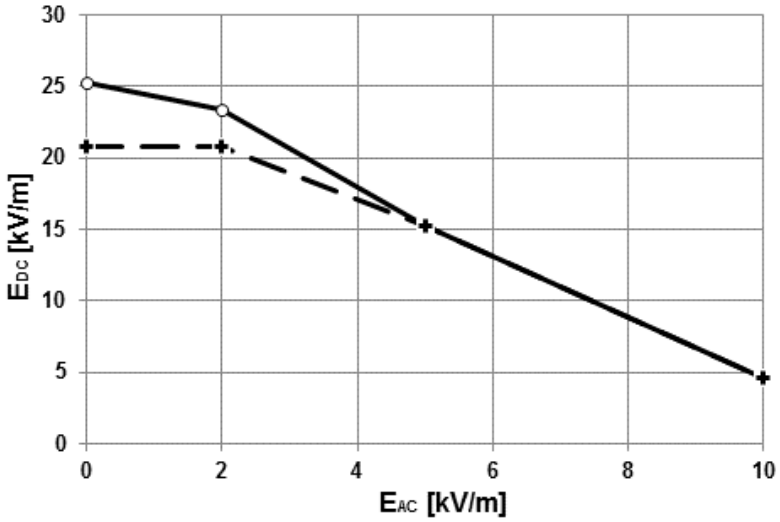

Abb. 1: Für die Wahrnehmung des Feldes erforderliche Gleichfeld-Feldstärke in Abhängigkeit eines vorhandenen Wechselfeldanteils (abgeleitet aus Clairmont et al. 1989); durchgehende Linie: mittlere Wahrnehmungsschwellen für vom negativen Pol verursachte elektrische Felder; gestrichelte Linie: mittlere Wahrnehmungsschwellen für vom positiven Pol verursachte elektrische Felder

Langzeiteffekte

Langzeit-Versuche, um vermeintlich positive Wirkungen des „Schönwetter"-Gleichfeldes über Deckenelektroden in Schul- und Krankenzimmern hervorzurufen (Fischer et al. 1977, König 1986), sind fehlgeschlagen. Expositionen gegenüber elektrischen Gleichfeldern führen derzeit im Alltag außer zur Wahrnehmung zu keinen gesundheitlich relevanten Auswirkungen, weder positiv noch negativ (ICNIRP 2003). Ab Feldstärken von einigen kV/m könnten Mikroentladungen zur Belästigung und bei deutlich höheren Feldstärken zu gefährlichen Schockwirkungen führen, wie sie aufgrund elektrostatischer Aufladungen vor allem im industriellen Bereich (ohne antistatische Maßnahmen) möglich sind.

Im Gegensatz zu akuten Wirkungen, die in engem zeitlichen Zusammenhang zur Exposition stehen, sind potenzielle Langzeit-Wirkungen nur erklärbar, wenn Expositionen zu bleibenden Veränderungen führen können, die über längere Zeit erhalten bleiben und sich mit der Zeit aufsummieren und schließlich gesundheitsrelevante (stochastische und deterministische) Wirkungen zur Folge haben. Langzeitwirkungen werden daher nicht primär durch die Feldgröße der akuten Exposition, sondern durch eine Dosisgröße und eine Dosis-Wirkungs-Beziehung charakterisiert, die jedoch für elektrische Felder nicht nachgewiesen sind.

Insgesamt ergibt sich Evidenz für das Fehlen gesundheitlich relevanter Wirkungen durch die *direkte* Einwirkung elektrischer Gleichfelder von HGÜ-Leitungen (EN). Die Evidenz für gesundheitlich relevante Wirkungen durch *indirekte* Wirkungen ist bei hohen Feldstärken als überzeugend einzustufen (E3). Insgesamt ist die Datenlage zu biologischen Wirkungen von Entladungen in elektrischen Gleichfeldern aber nicht ausreichend, um belastbare Werte für Wirkungsschwellen ableiten zu können.

2.1.4.4 Epidemiologie

Es liegen keine epidemiologischen Studien zu elektrischen Gleichfeldern vor. Es fehlen daher diesbezügliche Daten (D0).

2.1.5 Langzeit-Wirkungen

Weder physikalische noch biologische Wirkmechanismen deuten auf akkumulative Effekte und auf die Existenz einer dosisabhängigen Wirkung hin. Es gibt auch keine experimentellen oder epidemiologischen Befunde, die die Grundlage für eine Dosis-Wirkungs-Beziehung bilden könnten.

Insgesamt ergibt sich Evidenz für das Fehlen einer Dosis-Wirkungs-Beziehung durch die Einwirkung elektrischer Gleichfelder (EN).

2.1.6 Gesamtbewertung der Evidenz

Insgesamt ergibt sich für elektrische Gleichfelder Evidenz dafür, dass es bei den bei HGÜ-Leitungen zu erwartenden elektrischen Feldstärken keine *direkten* gesundheitlich relevanten Wirkungen gibt (EN). Aufgrund von *indirekten* Wirkungen sind jedoch Wahrnehmung und Belästigung bei Feldstärken, wie sie im Trassenbereich von HWÜ-Leitungen zu erwarten sind, nicht auszuschließen. Die Evidenz dazu wird als überzeugend (E3) eingestuft (Tabelle 1).

Tab. 1: Evidenz für gesundheitlich relevante Wirkungen durch direkte und indirekte Einwirkung elektrischer Gleichfelder von HGÜ-Leitungen

EF Gleichfelder	Physikal. Wirkmodell	Biolog. Wirkmodell	Dosis-Wirkung	In-vitro-Studien	In-vivo-Studien	Epidem. Studien	Gesamt-Evidenz
direkt	EN	EN	EN	EN	EN	D0	EN
indirekt	E3	E3	EN	D0	E3	D0	E3

E3 überzeugende Evidenz
EN Evidenz für Nicht-Zusammenhang
D0 keine Daten

2.2 Magnetische Gleichfelder

Magnetische Gleichfelder werden durch elektrische Gleichströme oder Materialien mit inhärenten magnetischen Eigenschaften verursacht und durch ferromagnetische Objekte so verzerrt, dass sich in deren Umfeld Zonen erhöhter und erniedrigter magnetischer Flussdichten bilden.

2.2.1 Exposition

Die Exposition gegenüber magnetischen Gleichfeldern ist dadurch charakterisiert, dass bereits der natürliche Feldpegel Werte erreicht, die es einigen Spezies ermöglichen, das magnetische Gleichfeld zur Orientierung zu nutzen. Das Erdmagnetfeld ist jedoch keineswegs konstant. Der räumliche Mittelwert hängt von der geografischen Breite ab und variiert global nach Betrag (ca. um den Faktor 2) und Richtung. Hinzu kommen, z. B. in der Nähe von Eisenerzvorkommen, noch regionale Variationen des magnetischen Erdfeldes in Bezug auf Betrag und Richtung im Bereich von ca. 100 µT mit Maximalwerten bis 1 300 µT (Wonik 1992). Im Mittel liegt die Flussdichte des natürlichen magnetischen Gleichfeldes in der Bundesrepublik Deutschland etwa bei 45 µT.

Im Alltag ist die Exposition gegenüber magnetischen Gleichfeldern keineswegs allein durch die Natur bestimmt. Magnetische Gleichfelder können durch ferromagnetische Objekte (z. B. Eisenbewehrungen im Beton, Türzargen, Heizkörper, aber auch eisenhaltige Alltagsgegenstände) lokal erheblich erhöht werden. Die Felderhöhungen können zwar ein Mehrfaches des Mittelwertes des Erdmagnetfeldes betragen, bleiben jedoch meist deutlich unter 1 mT. Technische Quellen, wie z. B. mit Gleichstrom betriebene Bahnen und Leuchten oder batteriebetriebene Geräte, führen im Alltag ebenfalls zur Exposition gegenüber magnetischen Gleichfeldern. Hinzu kommen noch am Körper getragene Magnete, z. B. Verschlüsse in Schmuck- oder Bekleidungsstücken, die lokale Expositionen bis zu einigen 10 mT verursachen können.

In beruflichen Expositionssituationen, z. B. in Betrieben, in denen Gleichströme verwendet (z. B. Elektrolyse- oder Schweißanlagen) oder Magnethebezeuge genutzt werden, können auch wesentlich höhere Werte bis zum Tesla-Bereich erreicht werden. In der Medizin, in der die Magnetresonanztomographie (MRT) bereits zu einer etablierten und sich noch immer weiter verbreitenden Diagnosemethode geworden ist, werden hohe Expositionen mit Werten, die einige Tesla erreichen können, auch des medizinischen und technischen Personals häufiger. Die Bewertung beruflicher Expositionen ist jedoch nicht Gegenstand dieser Empfehlung. Sie wurde von der SSK an anderer Stelle vorgenommen (SSK 2003).

Die magnetischen Boden-Gleichfelder von HGÜ-Leitungen hängen außer von der Stromstärke auch von der Betriebsart (monopolar oder bipolar), dem Mastbild, der Leiterkonfiguration und dem Bodenabstand der Leiterseile ab.

Im geplanten Höchstspannungsnetz sind auch Hybridleitungen vorgesehen, auf deren Masten Gleich- und Wechselspannungssysteme gemeinsam geführt werden. Auch unter Berücksichtigung dieser Mastkonfigurationen kann festgestellt werden, dass die Größe der maximal auftretenden magnetischen Flussdichten im Variationsbereich der regional und in Wohnungen auftretenden Werte des Erdmagnetfeldes liegt (Abbildung 2).

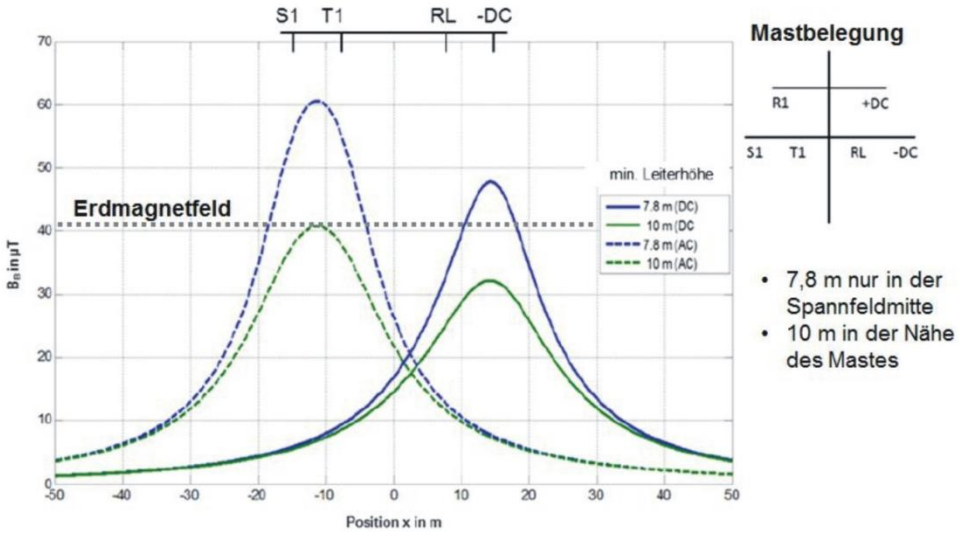

Abb. 2: Effektivwerte der AC- (gestrichelt) und DC-Anteile (voll) der magnetischen Bodenflussdichten B_B an der Position x entlang der Breite eines D1-Mastes in AC-/DC-Hybridkonfiguration für die minimalen Leiter-Boden-Abstände 7,8 m und 10 m (Amprion 2012)

HGÜ-Erdkabel

Im Erdboden verlegte HGÜ-Kabelleitungen erzeugen magnetische Gleichfelder, die direkt über den Kabeln in der gleichen Größenordnung liegen wie bei Freileitungen, sie nehmen jedoch mit seitlichem Abstand zur Trasse wesentlich schneller ab.

2.2.2 Physikalisches Wirkmodell

Die physikalischen Wirkmechanismen magnetischer Gleichfelder sind gut bekannt. Sie beruhen primär auf der Kraftwirkung auf bewegte elektrische Ladungen (Lorentz-Kraft). Die Kraftwirkung auf gleichsinnig bewegte Ladungen unterschiedlicher Polarität führt zur Ladungstrennung und zum Entstehen von elektrischen Spannungen bzw. Feldstärken. Ein zweiter Mechanismus beruht auf der Kraftwirkung des magnetischen Gleichfeldes auf magnetische Dipole (magneto-mechanischer Effekt), wie auf ferromagnetische Partikel (z. B. Magnetit) oder auf Atome mit einem inhärenten magnetischen Moment (z. B. Wasserstoff).

Physiologische Vorgänge (z. B. Herzschlag oder Blutstrom) oder Bewegungen des Körpers oder von Körperteilen führen im magnetischen Gleichfeld zu Lorentz-Kräften an Ladungen, die hierdurch getrennt werden können.

Ein weiterer (hypothetischer) Wirkmechanismus besteht darin, dass in ausreichend starken Feldern Enzymaktivitäten oder die Lebensdauer von freien Radikalen verändert werden. Hinweise darauf ergaben sich ab hohen Flussdichten von über 100 mT (Strelczyk et al. 2009). Hierdurch könnten u. a. Verschiebungen von chemischen Reaktionsgleichgewichten und Beeinflussungen z. B. von Krebserkrankungen auftreten, jedoch in ambivalenter Weise, d. h. sowohl in positivem als auch negativem Sinn. Zur Erklärung wird eine Hypothese vorgeschlagen, die als „radical-pair-mechanism“ (Abbildung 3) bezeichnet wird:

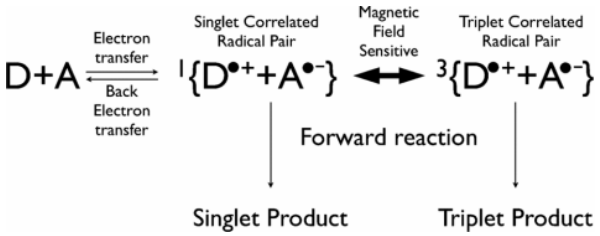

Abb. 3: Schema des „radical-pair-mechanismus" (Woodward et al. 2009)

Sie beschreibt eine Beeinflussung von Reaktionen „spingekoppelter" Radikale.

Durch die Reaktion zwischen einem Donator (D)- und einem Akzeptormolekül (A) kann es zur Bildung von Radikalpaaren kommen, bei denen sich die Elektronen im Allgemeinen im Singulettzustand befinden. Solche Radikalpaare rekombinieren meist sehr schnell. Unter dem Einfluss von ausreichend hohen Magnetfeldern könnte eine Spinkonversion induziert werden, wodurch (langlebigere) Triplettprodukte entstehen. So könnten die Rekombination behindert und die effektive Radikalkonzentration erhöht werden.

Die genauere Betrachtung zeigt eine komplexe Abhängigkeit von dem Magnetfeld (Timmel und Henbest 2004). Entscheidend hierfür ist, dass die Elektronenenergieniveaus durch die Wechselwirkung mit jenen Atomkernen, die ein magnetisches Moment besitzen, aufgespaltet werden (sogen. „Hyperfeinstruktur"). Externe Magnetfelder, die deutlich größer sind als zur Hyperfeinstrukturaufspaltung benötigt, erhöhen im Allgemeinen die Rekombinationsrate („Hochfeldeffekt"), während bei Feldstärken in der Größenordnung für eine Hyperfeinaufspaltung die Singulett-Triplett-Konversion begünstigt wird. Die Beeinflussung der Rekombinationsrate nimmt nicht mit steigender Exposition stetig zu, vielmehr erhält man ein Maximum der relativen Radikalkonzentration bei magnetischen Flussdichten um 1 mT, bei höheren Werten nimmt sie hingegen wieder ab (Timmel und Henbest 2004).

Die Existenz solcher Prozesse ist umfangreich in biochemischen Modellsystemen gezeigt worden (Eveson et al. 2000, Woodward et al. 2009), die gemessenen Erhöhungen der Radikalkonzentrationen lagen dort bei höchstens 10 %. In Anbetracht der komplexen chemischen Situation innerhalb der Zellen ist zu erwarten, dass dort die Konzentrationserhöhungen niedriger sind als im untersuchten Sonderfall. Es muss zusätzlich betont werden, dass es sich bei dem beschriebenen Mechanismus um den Spezialfall einer Wechselwirkung spingekoppelter Systeme handelt und dass dadurch nicht neue Radikale gebildet werden, sondern lediglich die Lebensdauer bestehender Radikale verlängert würde.

Insgesamt ist die Evidenz für mögliche biologisch relevante physikalische Wirkmechanismen bei ausreichend starken magnetischen Gleichfeldern als überzeugend (E3) anzusehen. Für die schwächeren magnetischen Felder von HGÜ-Leitungen fehlen jedoch Daten, so dass die Klassifizierung mit D0 vorgenommen wird.

2.2.3 Biologisches Wirkmodell

Die Erhöhung der Konzentration von reaktiven Sauerstoff-Spezies (ROS) stellt einen hypothetischen Mechanismus dar, der zu gesundheitlich relevanten Effekten führen könnte. Die dadurch möglichen chemischen Reaktionen könnten Veränderungen an wichtigen chemischen Verbindungen einschließlich der DNA bewirken. Radikale sind umso relevanter, je reaktionsfreudiger sie sind, zeichnen sich jedoch dann durch eine sehr kurze Lebensdauer aus. Um biologisch relevante Moleküle in der Zelle durch die chemische Reaktion verändern zu können, müssen sie jedoch eine ausreichende Lebensdauer besitzen, damit sie in die unmittelbare Umgebung der Moleküle vordringen und darüber hinaus in genügend hoher

Konzentration auftreten können. Ob dieser Wirkungsmechanismus starker magnetischer Gleichfelder daher im biologischen Objekt relevant werden kann, ist nicht geklärt.

Insgesamt ist die Evidenz für biologisch relevante Wirkmechanismen bei ausreichend starken magnetischen Gleichfeldern als überzeugend (E3) anzusehen. Für relevante biologische Wirkungen der schwächeren magnetischen Felder von HGÜ-Leitungen fehlen jedoch Daten, so dass die Klassifizierung mit D0 vorgenommen wird.

2.2.4 Biologische Ergebnisse

2.2.4.1 In vitro

Der Einfluss magnetischer Gleichfelder auf In-vitro-Systeme wurde zwar hinsichtlich unterschiedlicher Endpunkte untersucht, wie z. B. Zellorientierung, -proliferation und -stoffwechsel, Genexpression und -toxizität, dabei wurden jedoch Flussdichten betrachtet, die meist deutlich über der Stärke des Erdmagnetfeldes und somit der Felder von HGÜ-Leitungen liegen (ICNIRP 2009).

Frei bewegliche Zellen und Makromoleküle wie Kollagen und Actin können sich in Magnetfeldern über 1 T orientieren, die Relevanz in vivo ist allerdings unklar. In einer Zusammenfassung zu zellulären Wirkungen magnetischer Gleichfelder höherer Flussdichten stellt Miyakoshi (2005) fest, dass im untersuchten Flussdichtebereich 0,5 T bis 10 T genotoxische Wirkungen (Mutationen am HPRT-Locus, Verlust der Koloniebildungsfähigkeit, Induktion von Mikrokernen) nicht nachzuweisen sind. Die Weltgesundheitsorganisation sieht für Felder bis 9 T keinen Nachweis für Genotoxizität (WHO 2006a). Ausnahmen bilden Berichte über erhöhte Mutationsraten nach gleichzeitiger Exposition gegenüber chemischen Mutagenen und 2 T bis 5 T magnetischen Gleichfeldern im Ames-Test (Ikehata et al. 1999) oder über die Kombination einer 4 Gy Röntgenbestrahlung und eines 10 T magnetischen Gleichfeldes, die zu einer 10 %-igen Erhöhung der Mikrokernrate in CHO-K1-Zellen führte (Nakahara et al. 2002).

Untersuchungen im mT- und µT-Bereich führten zu uneinheitlichen, i. a. nicht reproduzierten Ergebnissen. Im Bereich über 100 mT wird über die Beeinflussung von Zellparametern wie Zelladhäsion, Proliferation und Apoptose und die Konzentration reaktiver Sauerstoffspezies (ROS) berichtet (WHO 2006a, Sullivan et al. 2011). In Abhängigkeit von Zelltyp und Stoffwechselstatus führten magnetische Gleichfelder ab 0,6 mT neben einer reduzierten Makrophagen-Phagozytose zu erhöhten Apoptoseraten (WHO 2006a), zu intrazellulären Kalzium-Konzentrationen und Zellaggregationen (HPA 2008). In unreifen, nicht aber in ausdifferenzierten Hippocampus-Neuronen (Primärzellen der Ratte) beobachteten Hirai et al. (2002) nach 15-minütiger Exposition gegenüber 100 mT eine erhöhte AP1 DNA-Bindung. Eine transiente Kondensation oder Dekondensation von Chromatin wird im „Intensitäts-Fenster“ bis 110 µT beschrieben (WHO 2006a).

Flipo et al. (1998) studierten die Wirkung magnetischer Gleichfelder (25 mT bis 150 mT, 24 h) auf Mitogen-stimulierte Zellen des Immunsystems von C57BL/6-Mäusen. Sie fanden in Makrophagen eine reduzierte Phagozytose, in Lymphozyten einen erhöhten Kalziumionen-einstrom bei reduzierter Stimulierbarkeit der Mitose durch Concavalin A und in T-Zellen eine Verminderung der Apoptoserate, jedoch keine Wirkungsschwelle. Die Relevanz dieser Resultate ist unklar. Ähnliche Effekte zeigten sich auch in einer Untersuchung von Fanelli et al. (1999). Magnetische Gleichfelder zwischen 0,6 mT und 6 mT allein hatten in humanen U937-und CEM-Zellen keinen Einfluss auf apoptotische Prozesse, sie verminderten aber die Wirkung zugesetzter Apoptose-auslösender Substanzen. Die Autoren vermuten auch hier einen Zusammenhang mit dem Kalziumionentransport. Eine Veränderung der mit Camptothecin induzierten Apoptoserate von humanen HL-60-Zellen durch Felder von 6 mT

wurde von Teodori et al. (2002) nicht beobachtet, allerdings ein schnelleres Erreichen der „späten“ Apoptosephase. Auch die Arbeitsgruppe um Dini beschäftigte sich mit morphologischen Parametern und Veränderungen der apoptotischen Aktvität (Dini und Abro 2005, Chionna et al. 2005). Sie setzten verschiedene transformierte und nicht transformierte Zellen Feldern von 7 mT über unterschiedlich lange Zeiträume aus. Generell fanden sie Veränderungen der Zellform, der Mikrotubuli und des Zellskeletts, nicht aber der Zellorganellen. Aufgrund der geänderten Geometrie zeigten sich auch Modifikationen des Wachstumsverhaltens, ein Einfluss auf die Proliferationsrate war jedoch nicht festzustellen. Abhängig vom Zelltyp wurde auch in diesem Fall die Apoptose beeinflusst, jedoch zeigte sich keine systematische Abhängigkeit. Magnetfelder könnten die Differenzierung von Makrophagenvorläuferzellen (Pagliara et al. 2005) sowie die Phagozytose apoptotischer Zellen beeinflussen und so indirekt gesundheitlich relevante Wirkungen auslösen (Dini und Panzarini 2010). Eine Beeinflussung des Wachstums von Säugerzellen in Kultur wurde auch von Sullivan et al. (2011) berichtet. Danach verändern sich unter dem Einfluss von Magnetfeldern (35 mT bis 120 mT) Zellform und -oberflächenstruktur, so dass die Anheftung an die Kulturschalen nicht mehr optimal gewährleistet ist.

Von verschiedenen Autoren wird eine Veränderung des Kalziumstoffwechsels und des Ionentransports (s. o.) zur Erklärung gefundener Phänomene in Erwägung gezogen (s. Miyakoshi 2005). Eine direkte Messung wurde schon 1996 von Rosen mit Hilfe der „Patch-Clamp-Technik“ durchgeführt. Bei 120 mT zeigten sich Veränderungen des Ionenstroms. Nach Liboff et al. (2003) können schon 20 µT die Aktivität der Calmodulin-abhängigen Nukleotid-Phosphodiesterase in einem zellfreien Ansatz beeinflussen. Die Konzentration freier Kalziumionen im Zytosol von Leukämiezellen menschlichen Ursprungs wird allerdings nach Rozanski et al. (2009) durch Felder von 100 mT nicht verändert. Auf der anderen Seite berichten Li et al. (2012), dass schon magnetische Gleichfelder von 5 mT einen Einfluss auf den Kalziumstoffwechsel sowie das Proliferationsverhalten von vaskulären Muskelzellen in vitro haben. Nach Bekhite et al. (2012) kann die Differenzierung embryonaler Stammzellen der Maus durch 1 mT- bis 10 mT-Felder beeinflusst werden, auch hier spielt der Kalziumstoffwechsel eine Rolle. Zmyślony et al. (2000) kombinierten magnetische Gleichfelder (7 mT) mit Eisenchlorid ($FeCl_2$), einem schwachen Oxidationsmittel in nicht-toxischen Konzentrationen, und fanden DNA-Veränderungen. Dieselbe Arbeitsgruppe untersuchte in einer identischen Versuchsdurchführung die Wirkung auf Ratten-Lymphozyten (Jajte et al. 2002). Nur in Gegenwart von Fe^{2+}-Ionen fanden sie einen Verlust der Viabilität (gemessen durch den „dye-exclusion“-Test), bei Befeldung allein ergab sich kein Effekt. Da gleichzeitig eine Erhöhung der Lipidperoxidierung gemessen wurde, ist nach Meinung der Autoren die Beteiligung von Sauerstoffradikalen als wahrscheinlich anzusehen, deren Konzentration durch die Felder wegen des Einflusses auf die Radikallebensdauer erhöht sein könnte. Radikalreaktionen sollen sogar durch µT-Felder beeinflussbar sein (Martino 2011, Martino und Castello 2011, Martino et al. 2010).

Belton et al. (2011) fanden, dass durch magnetische Gleichfelder (100 mT) die Synthese von durch Wärmeinwirkung induzierten Hitzeschockproteinen (hsp 70) nicht beeinflusst wird.

In Experimenten mit Magnetfeldern im Bereich um 10 mT wurde eine Verstärkung der Wirkung von Pharmaka beobachtet, was die Autoren u. a. auf Veränderungen der Membranpermeabilität zurückführen (Sun et al. 2012, Liu et al. 2011, Chen et al. 2010, Hao et al. 2011). Eine synergistische Wechselwirkung bei Exposition gegenüber Gammastrahlen und Magnetfeldern (15 mT) wird von Sarvestani et al. (2010) berichtet.

Darüber hinaus gibt es eine Reihe von Berichten über biopositive Einflüsse magnetischer Gleichfelder, allerdings nicht in Säugerzellen, sondern in Insekten (Todorović et al. 2012, 2013), Algen (Small et al. 2012) und höheren Pflanzen (Shine et al. 2011, 2012). Es wird

berichtet, dass Magnetfelder von 150 mT bis 200 mT das Wachstum von Sojapflanzen begünstigen.

McCann et al. (1998) stellten in einem Review über Genotoxizität magnetischer Gleichfelder fest, dass bis 1998 keine der 34 Arbeiten, in denen positive Wirkungen mitgeteilt wurden, strengen wissenschaftlichen Kriterien standhält. Sie sehen daher keine hinreichende Evidenz für das Vorliegen genotoxischer Effekte. An dieser Einschätzung hat sich seither nichts geändert. Eine Metaanalyse der bis 2006 veröffentlichten Studien kommt zwar zum Schluss, dass in Bezug auf die Wechselwirkung zytotoxischer Substanzen und magnetischer Gleichfelder positive Befunde überwiegen, jedoch ist die Datenlage dafür bei Feldern unter 0,1 mT nicht überzeugend (Juutilainen et al. 2006). Die Einschätzung, dass es keine Evidenz für einen direkten Effekt des magnetischen Gleichfeldes auf die (Zell-) Mutationsraten, Chromosomenaberrationen oder DNA-Schädigungen gibt, wird auch von der britischen Health Protection Agency (HPA 2008) geteilt. Wurden genotoxische Effekte beobachtet, waren diese transient (SCENIHR 2009, Potenza et al. 2010).

Die zusammenfassenden Stellungnahmen nationaler und internationaler Organisationen beschäftigen sich nur am Rande mit möglichen Auswirkungen niedriger Flussdichten magnetischer Gleichfelder. Die Health Protection Agency (HPA) klammert in ihrer Diskussion über magnetische Gleichfelder den Bereich niedriger Flussdichten dezidiert aus (HPA 2008). In der umfangreichen Monographie der International Agency for Research on Cancer (IARC 2002) wird In-vitro-Effekten nur geringer Raum eingeräumt.

Umfassende Untersuchungen der Genaktivität unter dem Einfluss schwacher magnetischer Gleichfelder fehlen. Unklar ist, ob sich aus den beschriebenen Einflüssen schwacher Felder auf den Kalziumstoffwechsel und den Ionentransport gesundheitlich relevante Auswirkungen ableiten lassen.

Die Evidenz für aus In-vitro-Untersuchungen abzuleitende gesundheitlich relevante Effekte von magnetischen Gleichfeldern von HGÜ-Leitungen ist somit insgesamt als unzureichend anzusehen (E0).

2.2.4.2 In vivo

Tierexperimentelle Untersuchungen konzentrieren sich häufig auf Flussdichten über 1 T, um potenzielle Auswirkungen von magnetischen Gleichfeldern der medizinisch-diagnostischen Magnetresonanztomographie (MRT) zu untersuchen. Bei Labornagern lässt das ausgelöste Aversionsverhalten auf eine Belästigung durch magnetische Gleichfelder über 4 T schließen (WHO 2006a, ICNIRP 2009, SCENIHR 2009, Houpt et al. 2011). Magnetische Gleichfelder über 100 mT induzieren elektrische Potenziale entlang der großen Blutgefäße und im Herzmuskel (WHO 2006a). Dennoch wurden bei Schweinen selbst bei Expositionen bis 8 T keine adversen kardiovaskulären Effekte beobachtet (Kangarlu et al. 1999).

Eine 2-stündige Vor-Exposition gegenüber 250 mT erhöhte bei männlichen BALB/cByJ-Mäusen die Überlebensrate von 10 % auf über 40 % bei einer durch Lipopolysaccharide (LPS) induzierten systemischen Blutung (Thrombohaemorrhagie), die bei der gewählten Dosis (50 mg LPS ip) durch septischen Schock zumeist zum Tod der Tiere führte (Lin et al. 2009). Keine oder eine nur 1-stündige Vorbehandlung verbesserten die Überlebensrate nicht. Weitere Ergebnisse zur Beeinflussung des Blutflusses und der Ödembildung bei Ratten, Kaninchen und Hamstern durch magnetische Gleichfelder im Bereich von 0,3 mT bis 500 mT sind widersprüchlich (SCENIHR 2009). Widersprüchliche Ergebnisse lieferten auch Untersuchungen zur Beeinflussung des Endokrinums (von 40 µT bis 60 mT) und zu den Effekten auf Blutzellen und das hämatopoetische System im mT- bis T-Bereich (WHO 2006a).

Untersuchungen an Säugern zu Fortpflanzung und Entwicklung in magnetischen Gleichfeldern im mT-Bereich gibt es bis auf eine Ausnahme (30 mT; Mevissen et al. 1994) nicht. Untersuchungen am Modell-Nematoden C. elegans nach Expositionen gegenüber 0 mT, 10 mT, 30 mT, 50 mT, 100 mT, 150 mT und 200 mT zeigten eine verkürzte Entwicklungsdauer der verschiedenen Larvenstadien nach einer 3-tägigen 150 mT-Exposition. Bereits bei einer magnetischen Induktion von 50 mT wurde die Expression entwicklungsbiologisch relevanter Gene identifiziert (Hung et al. 2010).

Zur In-vivo-Genotoxizität und Kanzerogenität lassen die vorliegenden Einzelstudien keine eindeutigen Schlussfolgerungen zu (IARC 2002, WHO 2006a). Die von Amara et al. (2011) beschriebenen Hinweise zu DNA-Schäden durch oxidativen Stress in Cortex und Hippocampus von Ratten infolge einer kombinierten 4-wöchigen Exposition gegenüber $CdCl_2$ (40 mg/l) und einem magnetischen Gleichfeld (128 mT, 1 h/d) sind nicht eindeutig dem Feld zuzuordnen, da identische Schäden auch nach alleiniger $CdCl_2$-Gabe auftraten. Der gegen Ende einer 30-tägigen Selengabe (0,2 mg/L Na_2SeO_3 im Trinkwasser) durch die 5-tägige kombinierte Exposition von Ratten im magnetischen Gleichfeld (128 mT, 1 h/d) induzierte oxidative Stress könnte durch die Selen-Vorbehandlung verhindert worden sein (Ghodbane et al. 2011).

Die Untersuchungen zur besseren Heilung von durch Diabetes verursachten Wunden bei Ratten durch ein magnetisches Gleichfeld mit 180 mT (Da Jing et al. 2010) sind trotz präziser experimenteller Beschreibung histopathologisch unzureichend dokumentiert und somit im Ergebnis nicht nachvollziehbar. Berichte über die Stimulation der Knochenbildung, ebenfalls im mT-Bereich (WHO 2006a), sind bisher nicht ausreichend reproduziert worden.

Zusammenfassend kann festgestellt werden, dass Gleichfelder über 4 T bei Tieren belästigend wirkten. Kardiovaskuläre Effekte wurden bis 8 T nicht beobachtet. Im mT-Bereich liegen widersprüchliche und nicht reproduzierte Ergebnisse zur Beeinflussung von Endokrinum, Blutzellen und hämatopoetischem System vor. Bezüglich Genotoxizität und Krebserkrankungen lassen die vorliegenden Daten vom mT- bis T-Bereich keine belastbaren Schlussfolgerungen zu (siehe auch SSK 2012).

Die Evidenz aus In-vivo-Untersuchungen für gesundheitliche Risiken aufgrund der Exposition gegenüber magnetischen Gleichfeldern von HGÜ-Leitungen ist daher insgesamt als unzureichend (E0) einzustufen.

Anmerkung: Mögliche Auswirkungen magnetischer Gleichfelder auf Tiere (z. B. Zugvögel, Fische) werden in dieser Empfehlung nicht betrachtet. Sie sind z. B in der BMU-Studie (2011) behandelt worden.

2.2.4.3 Humanstudien

Es gibt vergleichsweise wenig experimentelle Humanstudien zu möglichen gesundheitlichen Auswirkungen magnetischer Gleichfelder in der Größenordnung, wie sie bei HGÜ-Leitungen auftreten. Untersuchungen mit getakteten magnetischen Gleichfeldern (z. B. Feld 2 s an/ 2 s aus) bleiben hier wegen der dabei auftretenden Induktionswirkungen unberücksichtigt.

Die Europäische Union kommt in ihrem Review (SCENIHR 2009) zu dem Schluss, dass die Datenlage für eine belastbare Risikobewertung magnetischer Gleichfelder nicht ausreicht. Die WHO (2006a) stellte unter Hinweis auf die große Heterogenität der Studien hinsichtlich des untersuchten magnetischen Feldes (reines statisches Feld bzw. MRT-Exposition bis zu 8 T), der Expositionsdauer (wenige Sekunden bis zu 9 Stunden), der betrachteten Endpunkte sowie der gewöhnlich geringen Fallzahlen fest, dass Effekte magnetischer Gleichfelder auf neurophysiologische Reaktionen und kognitive Funktionen auf unbewegte Probanden weder nachgewiesen wurden noch ausgeschlossen werden können. Auch die Health Protection

Agency (HPA 2008) betont in ihrem Bericht, dass die Datenlage begrenzt ist. Bei Feldern über 2 T wurden bei einigen Personen transiente sensorische Effekte beobachtet, die jedoch z. T. im Zusammenhang mit Bewegungen im Feld stehen (WHO 2006a, HPA 2008). Die akute transiente Beeinflussung kognitiver Funktionen durch Kopfbewegungen im Streufeld von 7 T-MRT-Geräten wird durch neuere Untersuchungen bestätigt (van Nierop et al. 2012). Die ICNIRP (2009) stellt fest, dass sich bei akuten Expositionen von sich nicht bewegenden Probanden in Feldern bis zu 8 T keine Hinweise auf gravierende Gesundheitseffekte ergeben haben. Bei Kopf- oder Körperbewegungen im Feld können unangenehme sensorische Effekte wie Übelkeit und vorübergehende Leistungsminderungen auftreten (ICNIRP 2009).

Die wenigen aus Humanstudien vorliegenden Ergebnisse zum Einfluss von magnetischen Gleichfeldern bis in den Tesla-Bereich auf neuropsychologische Parameter (Reaktionszeit, visuelle Verarbeitung, Arbeitsgedächtnis und Hand-Augen-Koordination) sind von Heinrich et al. (2011) in einer Meta-Analyse bewertet worden. Von den berücksichtigten neuropsychologischen Variablen zeigte lediglich das visuelle System übereinstimmend eine signifikante Beeinflussung durch magnetische Gleichfelder. Vitalparameter waren nicht betroffen, während Schwindel und Übelkeit im Wesentlichen bei Bewegung im Feld auftraten. Diese Analyse wurde von de Vocht et al. (2012) hinsichtlich ihrer Methodik stark kritisiert.

In Tabelle 2 sind Humanstudien mit magnetischen Gleichfeldern mit Flussdichten bis 400 mT zusammengefasst. Sie betreffen mit einer Ausnahme (Winther et al. 1999) akute bzw. Kurzzeiteffekte (< 1 h) und lassen keine statistisch signifikanten Einflüsse von magnetischen Gleichfeldern auf das kardiovaskuläre System, die Hautdurchblutung, akustische und vestibuläre Funktionen des Innenohres, sensorische Effekte und kognitive Funktionen erkennen. Generell weisen insbesondere die älteren Studien Schwächen in der dosimetrischen Charakterisierung auf. Überdies sind die Stichproben in den Studien mit wenigen Ausnahmen klein, was bei großer individueller Variation insbesondere bei Parallelgruppendesign zu einer geringen Belastbarkeit (statistischen Power) führen kann.

Bei Studien zu therapeutischen Effekten von magnetischen Gleichfeldern geringerer Flussdichte liegt der Fokus auf der Therapie von schmerzhaften Erkrankungen; die Expositionsverhältnisse und exponierten Körperregionen variieren, ebenso die Expositionsdauer (Minuten bis Wochen) und die Flussdichten an der Hautoberfläche (15 mT bis 200 mT). In wenigen Studien wurden auch objektivere Indikatoren der neurologischen Funktion untersucht. Insgesamt werden die Ergebnisse als inkonsistent bewertet: In einer neueren Übersicht über Schmerztherapie kommen Salomonowitz et al. (2011) zu dem Ergebnis, dass bei Anwendung strenger Richtlinien für die wissenschaftliche Beurteilung kein schmerztherapeutischer Effekt nachweisbar ist. Eine ältere Übersicht, die auch andere Endpunkte der Magnetfeldbehandlung einschließt (Colbert et al. 2009), kommt zum Schluss, dass in 61 % der berücksichtigten Studien die dosimetrische Charakterisierung unzureichend ist. Trotz der großen Verbreitung von therapeutischen Magnetfeldgeräten wie z. B. Magnetfeldmatten legt die Richtlinie des Gemeinsamen Bundesausschusses zu Untersuchungs- und Behandlungsmethoden der vertragsärztlichen Versorgung (G-BA 2012) fest, dass die Magnetfeldtherapie ohne Verwendung implantierter Spulen zu den Methoden gehört, die nicht als vertragsärztliche Leistungen zulasten der Krankenkassen erbracht werden dürfen.

Angesichts des Umstandes, dass in den vorliegenden Humanstudien selbst bei höheren magnetischen Gleichfeldern keine direkten gesundheitlich relevanten Effekte gefunden werden konnten, kann davon ausgegangen werden, dass diese auch bei Exposition gegenüber magnetischen Gleichfeldern von HGÜ-Leitungen nicht zu erwarten sind. Für gesundheitlich

relevante Auswirkungen magnetischer Gleichfelder von HGÜ-Leitungen aus den Humanstudien gibt es keine bzw. unzureichende Evidenz (E0).

2.2.4.4 Epidemiologie

Epidemiologische Studien über mögliche gesundheitliche Auswirkungen magnetischer Gleichfelder liegen über exponierte Arbeiter (z. B. Schweißer, Arbeiter in Aluminium-schmelzen etc.) und schwangere Assistentinnen bei der Magnetresonanz-Bildgebung vor (ICNIRP 2003, 2009, WHO 2006a). Es wurden zwar für einige Krebsentitäten erhöhte Krebsrisikoschätzer ermittelt, die jedoch insgesamt kein konsistentes Bild ergaben. Eine Metaanalyse von 15 epidemiologischen Studien über Kinderleukämie und eine mögliche Beeinflussung durch das Erdmagnetfeld ergab keine signifikanten Ergebnisse. Allerdings hat sich die Erhebung der Exposition gegenüber dem Erdmagnetfeld nur auf den geografischen Mittelwert bezogen und lokale Variationen außer Acht gelassen (Swanson und Kheifets 2012). Wegen der zusätzlich einwirkenden gesundheitsbeeinträchtigenden Kofaktoren und methodischen Schwierigkeiten ist die Datenlage als unzureichend (D1) einzustufen.

Tab. 2: Humanstudien zu Effekten magnetischer Gleichfelder (< 400 mT)

untersuchte Variable(n)	**Exposition**	**Probanden**	**Ergebnisse**	**Autor(en)**
Akustische und vestibuläre Funktionen des Innenohres	2 mT bis 7 mT, 9 h Exposition im Schlaf in der Nähe eines 500 mT MRT, prä-/ post- Expositions-Design, ohne Verblindung und Sham-Kontrolle	11 männliche Probanden (23 Jahre bis 43 Jahre)	kein Effekt der Exposition auf das akustische und vestibuläre System	Winther et al. (1999)
Herzrate und Blutdruck	Exposition durch eine Matratze mit eingebautem Permanentmagneten: 40 mT bis 50 mT an der Oberfläche, inhomogene – nicht gemessene – Felder über den Querschnitt und die Dicke der liegenden Person; 3 Expositionsgruppen: negatives (25) und positives (26) magnetisches Gleichfeld Placebo (24) randomisiert, doppelblind Parallelgruppen-Design; Expositionsdauer: 15 min, Messungen: Baseline; 1 min, 5 min, 10 min und 15 min während der Exposition; 5 min nach Expositionsende	75 (davon 52 Frauen) mittleres Alter: 30,6 Jahre (21 Jahre bis 57 Jahre)	In einer multivariaten Varianzanalyse mit Messwiederholungen zeigte sich ein geringer Anstieg der Herzrate und des Blutdrucks in allen drei Gruppen, kein Effekt der Intervention ($p = 0{,}170$)	Hinman (2002)
Hautdurchblutung (dorsal am Finger)	Exposition durch keramische Permanentmagnete mit und ohne Einbettung in ein Pad; 100 mT an der Oberfläche der Magnete, 50 mT auf dem Pad 3 Expositionsgruppen, die sich durch die Lokalisation des Magnets an der Hand unterschieden. Parallelgruppendesign; Expositionsdauer: 36 min; Sham-Kontrolle war die andere Hand	16 Frauen, Alter: 27,4 ± 1,7 Jahre (21 Jahre bis 48 Jahre)	Die mit Laser-Doppler-Flowmetrie und Laser-Doppler-Imaging durchgeführten Untersuchungen zeigten während der Exposition keine Unterschiede zur Sham-Bedingung.	Mayrovitz et al. (2001)

untersuchte Variable(n)	Exposition	Probanden	Ergebnisse	Autor(en)
Hautdurchblutung (dorsal am Finger)	Exposition durch einen Permanentmagneten (25,4 mm Durchmesser, Höhe 12,7 mm); 88 mT ± 5 mT auf der Fingerrückseite, 402 mT an der Magnetoberfläche einfach blind. Expositionsdauer: konsekutiv je 15 min Sham/ Exposition oder Sham/ Sham	12 (6 Frauen) Alter: 25,3 ± 3,7 Jahre	Keine signifikanten Unterschiede zwischen den Expositionsbedingungen, wohl aber große individuelle Unterschiede zwischen exponiertem und nicht exponiertem Finger; signifikante (p = 0,016) Reduktion des Blutflusses	Mayrovitz und Groseclose (2005)
Hautdurchblutung (dorsal am Finger)	Exposition durch einen keramischen Permanentmagneten (37 mm Durchmesser, Höhe 14 mm); 85 mT an der Magnetoberfläche, 31,5 mT am Rücken des Fingers. 15 min Baseline, 20 min Sham/Verum Exposition (eine Hand Exposition, andere Kontrolle)	24 (12 Frauen) Alter: 25,7 ± 0,9 Jahre	Verminderung des Blutflusses bei einer einzelnen tiefen Inspiration im Abstand von 3 min, es wurden keinen Unterschiede in der Veränderung der Vasokonstriktion nach tiefer Inspiration beobachtet	Mayrovitz et al. (2005)
Hautdurchblutung (Unterarm)	Permanentmagnete mit 50 mT an der Oberfläche, randomisiert, doppelblind, Sham kontrolliert; crossover Design, Expositionsdauer: 30 min	20 Männer, Alter: 25 ± 2 Jahre	Keine signifikanten Unterschiede nach 10 min, 20 min und 30 min Exposition.	Martel et al. (2002)

untersuchte Variable(n)	Exposition	Probanden	Ergebnisse	Autor(en)
Sympathisches Nervensystem / sensorische Effekte	Matratze mit eingebauten Permanentmagneten 60 mT an der Oberfläche, bis 0,05 mT in 9 cm Abstand, inhomogene – nicht gemessene – Felder über den Querschnitt und die Dicke der liegenden Person; Ganzkörperexposition, Expositionsdauer: 1 h doppelblind, cross-over randomisiert	15 Probanden (7 Frauen) Alter: 25 ± 1 Jahr	Keine signifikanten Unterschiede in folgenden Parametern: durchschnittlicher arterieller Blutdruck, muskuläre sympathische Nervenaktivität (MSNA), Herzrate, Blutflussgeschwindigkeit am Unterarm, isometrische Handkraft, Muskeldurchblutung. Kein signifikanter Unterschied in der Schmerzwahrnehmung im Eiswassertest	Kuipers et al. (2007)
Kognitive Funktionen	Exposition schlecht beschrieben, Kopfscan mit MRT (Feldmix) 40 mT, keine Verblindung, kein Sham, Expositionsdauer: 10 min; psychometrische Datenerhebung vor und 1-5 Tage nach dem MRT sowie im Abstand von 2 Monaten bis 6 Monaten, es ist unklar, ob unmittelbar vor der psychometrischen Testung erneut exponiert wurde.	7 gesunde Probanden (26 Jahre bis 51 Jahre)	Mit dem Wechsler Adult Intelligence Test (WAIS), dem Wechsler Memory Test, dem Word Fluency Test und dem Stroop-Test für Wörter und Farben wurden die vor Beginn der ersten Exposition erzielten Testergebnisse mit denen, die nach der zweiten Exposition erzielt wurden, verglichen. Es zeigte sich lediglich im verbalen IQ ($p = 0,01$) sowie im Full-Scale IQ ($p = 0,05$) des WAIS eine signifikante Verbesserung, welche die Autoren auf Übungseffekte zurückführten.	Besson et al. (1984)

untersuchte Variable(n)	Exposition	Probanden	Ergebnisse	Autor(en)
Kognitive Funktionen	MRT Kopfscan (Feldmix) 150 mT, prä-post Expositions-Design und Follow-up nach 3 Monaten, 3 Parallelgruppen: exponiert (53), schein-exponiert (51) und nicht exponiert (53). Expositionsdauer: 47 min + 12,6 min oder 2x28,8 min, die Kontrollgruppe ohne Exposition hielt sich für 70 min in einem Warteraum auf.	157 Probanden (davon 95 Frauen, 18 Jahre bis 63 Jahre)	Insgesamt 17 Tests, in vier Tests waren bereits vor der Exposition signifikante Unterschiede zu beobachten, nach der Exposition wurden signifikante Unterschiede im Digit-Span Test (vorwärts) beobachtet zwischen der scheinexponierten und der exponierten Gruppe, nicht aber zwischen der exponierten und der Kontrollgruppe; in der Follow-up-Untersuchung gab es signifikante Unterschiede im Digit-Span-Test rückwärts, ebenfalls nur für die exponierte und die scheinexponierte Gruppe.	Sweetland et al. (1987)

2.2.5 Langzeit-Wirkungen

Unter Langzeit-Wirkungen werden die sich über die Zeit summierten Wirkungen von Expositionen verstanden.

Im Bereich magnetischer Gleichfelder ist eine Dosis-Wirkungs-Beziehung bisher nicht nachgewiesen. Aus physikalischen Gründen wäre jedoch grundsätzlich von der Existenz von Wirkungsschwellen auszugehen.

Für auf Kraftwirkungen beruhende Mechanismen, die akut an das Vorhandensein des Feldes gebunden sind, sind keine dosisabhängigen Wirkungen anzunehmen. Bei feldinduzierten Veränderungen der Konzentration von Radikalen sind akkumulative Effekte theoretisch zwar nicht grundsätzlich auszuschließen, aus der vorhandenen Datenlage lässt sich jedoch insgesamt keine Dosis-Wirkungs-Beziehung ableiten. Die Evidenz dafür wird daher als unzureichend (E0) eingestuft.

2.2.6 Gesamtbewertung der Evidenz

Für Expositionen gegenüber magnetischen Gleichfeldern von HGÜ-Leitungen gibt es keine ausreichende Evidenz für einen Zusammenhang mit relevanten gesundheitlichen Auswirkungen. Die International Commission on Non-Ionizing Radiation Protection kommt zu dem Schluss (Zitat S. 507): “Overall there is little convincing evidence from cellular and cell-free models of biologically harmful effects of exposure to magnetic fields with flux densities up to several teslas” (ICNIRP 2009).

Die magnetischen Gleichfelder von HGÜ-Leitungen gehen über den Variationsbereich des Erdmagnetfeldes nicht hinaus. Die gesicherten Wechselwirkungsmechanismen lassen keine gesundheitsrelevanten Wirkungen erwarten. Die Existenz und Relevanz hypothetischer Wirkungsmechanismen konnten für magnetische Gleichfelder in der Höhe der von HGÜ-Leitungen verursachten Emissionen durch experimentelle Studien nicht belegt werden. Insgesamt ist daher die Evidenz für gesundheitlich relevante Auswirkungen von Expositionen gegenüber magnetischen Gleichfeldern von HGÜ-Leitungen als nicht vorhanden bzw. unzureichend (E0) einzustufen (Tabelle 3).

Tab. 3: Evidenz für eine gesundheitsrelevante Wirkung magnetischer Gleichfelder von HGÜ-Leitungen

Physikal. Wirkmodell	Biolog. Wirkmodell	Dosis-Wirkung	In-vitro-Studien	In-vivo-Studien	Epidem. Studien	Gesamt-Evidenz
D0	D0	E0	E0	E0	D1	E0

E0 keine bzw. unzureichende Evidenz für Zusammenhang
D1 unzureichende Daten
D0 keine Daten

2.2.7 Indirekte Wirkungen

Magnetische Gleichfelder können auf ferromagnetische Teile Kräfte ausüben. In stark inhomogenen Feldern können dabei Beschleunigungen verursacht werden, die zu Gefährdungen führen könnten. Aus diesem Grund wird z. B. der Zutritt zu MRT durch Metallsuchschleusen gesichert.

Implantierte Herzschrittmacher können durch magnetische Gleichfelder im mT-Bereich in einen festfrequenten Überprüfungsmodus umgeschaltet werden. Die bestehenden

Sicherheitsvorschriften EN 45502-2-1 (DIN 2003) fordern jedoch eine Störfestigkeit bis zu 1 mT. Die Sicherheitsbestimmungen EN 60601-2-33 (DIN 2011) erlauben den Zutritt von Herzschrittmacherpatienten in Bereiche bis zu Flussdichten von 0,5 mT.

Da die magnetischen Gleichfelder selbst in Spannfeldmitte von HGÜ-Freileitungen deutlich unter den Werten liegen, bei denen relevante indirekte Wirkungen auf Herzschrittmacher auftreten können, sind diese im Bereich der Leitungstrasse zu vernachlässigen.

2.3 Ionen, Ozon und Stickoxide

Durch die hohen elektrischen Feldstärken und die dadurch bewirkten elektrischen Funkenentladungen an den Leiterseilen (Koronaeffekt) kommt es zu einer Ionisierung von Luftmolekülen und zur Erzeugung von Ozon und Stickoxiden (NOx).

Die Höhe des im Freien auftretenden natürlichen Ozonpegels unterliegt jahreszeitlichen Schwankungen und beträgt in den Wintermonaten ca. 60 µg/m³ bis 80 µg/m³ (30 ppb bis 40 ppb) und in den Sommermonaten ca. 100 µg/m³ bis 120 µg/m³ (50 ppb bis 60 ppb) (DWD 2000).

Die durch HWÜ-Leitungen (400 kV bis 600 kV, 2 stromführende Leiterseile) verursachten Ozonkonzentrationen wurden in Bodennähe bei allen experimentellen Bedingungen mit Werten unter 20 µg/m^3 (10 ppb) gemessen (Droppo et al. 1979). Daraus wurde die maximale Produktionsrate (Quellstärke) mit 14 µg/(s·m) errechnet. Die natürliche Variabilität der Ozonkonzentration wurde mit ± 10 µg/m^3 (5 ppb) angegeben (Droppo et al. 1979).

Ähnliche Werte ergeben sich aufgrund von Berechnungen mit maximal 775-kV-Leiterspannung (siehe Anhang B). Bei einer konservativen Betrachtung wurden als bodennaher Zusatzeintrag durch HGÜ-Leitungen (2 stromführende Leiterseile) für Ozon 0,8 µg/m³ (0,4 ppb) und für Stickoxide 0,04 µg/m³ (0,02 ppb) berechnet.

In unmittelbarer Nähe (1 mm bis 2 mm) der Leiterseile von HGÜ-Leitungen können NOx-Konzentrationen im ppm-Bereich auftreten, die jedoch durch atmosphärische Verdünnung schnell verringert werden und in Bodennähe nur noch unwesentlich zur Hintergrundkonzentration beitragen (Chen und Davidson 2002).

2.3.1 Physikalisches Wirkmodell

Zu Koronaentladungen kommt es an der Oberfläche der Leiterseile der HGÜ-Leitung als Folge von Stoßionisationen nach Überschreiten der Durchschlagsfestigkeit der Luft. Im Entladungskanal entsteht dabei heißes Plasma, das sich auch durch Aussendung von Licht (Funke) bemerkbar macht und die Aufspaltung von molekularem Sauerstoff (O_2) sowie die Bildung von Ozon (O_3) und Stickoxiden (NOx) bewirkt.

2.3.2 Biologische Wirkungen und Immissionsbegrenzung

Ozon

Die biologische Wirkung des Ozons wird durch seine extreme Reaktionsbereitschaft geprägt. In ausreichender Dosis kann es transiente funktionelle und entzündliche Veränderungen in der Lunge verursachen (Samet et al. 2001). Zellmembranen, an denen Ozon eine Peroxidation von ungesättigten Fettsäuren auslöst, sind die Hauptangriffspunkte. DNA-Veränderungen wurden experimentell nachgewiesen. Durch seine niedrige Wasserlöslichkeit wird Ozon in den oberen Atemwegen kaum zurückgehalten, dringt somit in die unteren Atemwege vor und kann dort die Zellmembranen der Bronchialepithelien und Alveolarzellen schädigen. Eingeatmetes Ozon wird zu etwa 50 Prozent von der Lunge absorbiert. Die Geruchsschwelle

liegt bei 40 µg/m^3 bis 50 µg/m^3 (20 ppb bis 25 ppb). Nimmt die Konzentration in der Luft allerdings langsam zu, wird das Ozon durch Riechen nicht mehr wahrgenommen[6].

Ab 140 µg/m^3 (70 ppb) wurde beim Erwachsenen eine Hyperreagibilität der Atemwege beobachtet. Auch erhöht sich die Empfindlichkeit der Atemwege gegenüber unspezifischen Reizen (z. B. Staub) und Allergenen (z. B. Pollen beim Pollenasthmatiker). Hinzu kommt eine Verminderung der Abwehr gegen Infekte des Atemtraktes. Eine Übersicht zu den Wirkungen von Ozon und Bewertung der gesundheitlichen Risiken ist folgenden Publikationen zu entnehmen (VDI 2001, Englert 2000, WHO 2006b).

Die von HGÜ-Leitungen in worst-case-Abschätzung (s. Anhang B) erzeugten bodennahen Ozonkonzentrationen liegen weit unterhalb von Konzentrationen, die beim Menschen akute Wirkungen hervorrufen.

Stickoxide (NOx)

NO_2 (als Hauptkomponente der Stickoxide (NOx)) ist stark atemwegsirritierend und stellt einen Risikofaktor für die Manifestation von Asthma dar. NO_2 gelangt wie Ozon bis in die Lungenalveolen. Analog führt es dort über seine Reaktionsprodukte mit der „epithelial lining fluid“ zu Lipidperoxidation, Membranschäden und sekundären Entzündungsprozessen (Kraft et al. 2005). Kurzfristige Belastungen gegenüber 1 mg /m³ bis 2 mg /m³ (0,5 ppm bis 1 ppm) können bei Gesunden zu einer Verschlechterung der Lungenfunktion führen. Vorgeschädigte können vergleichbare Effekte schon bei deutlich niedrigeren Konzentrationen 0,4 bis 0,5 mg/m³ (0,2 ppm bis 0,25 ppm) zeigen. Die individuelle Empfindlichkeit ist – wie beim Ozon – sehr unterschiedlich. Übersichten finden sich bei ÖAW 1998, WHO 2003, Kraft et al. 2005, WHO 2006b und EPA 2008.

Immissionsbegrenzung

Der Immissions-Zielwert für Ozon ist in der 39. BImSchV (2010) mit 120 µg/m³ (60 ppb) als höchster 8-Stundenmittelwert festgelegt, von der WHO (2011) wird als Leitwert 100 µg/m³ (50 ppb) für einen 8-Stundenmittelwert angegeben. Der Immissionsgrenzwert für das NO_2, als Hauptkomponente der Stickoxide, ist mit 40 µg/m³ (21 ppb) für das Jahresmittel und mit 200 µg/m³ (105 ppb) für das 1-Stundenmittel festgelegt (39. BImSchV 2010). Diese Werte entsprechen den Empfehlungswerten der WHO (2011).

Die Strahlenschutzkommission beschränkt sich in dieser Empfehlung auf die größenmäßige Abschätzung und den Vergleich mit den hier angegebenen Immissions-Grenz- und -Zielwerten. Es kann festgestellt werden, dass die Grenzwerte mit Abstand eingehalten werden.

3 Bewertung

Die Strahlenschutzkommission kommt zum Schluss, dass auch nach Bewertung der neueren wissenschaftlichen Literatur durch die bei Hochspannungs-Gleichstromübertragungsleitungen anzunehmenden ***magnetischen Gleichfelder*** keine direkten gesundheitlich relevanten Auswirkungen auf die Allgemeinbevölkerung zu erwarten sind. Die Expositionen gegenüber magnetischen Gleichfeldern liegen selbst direkt in Trassenmitte im Bereich der in der Natur und in der Wohnumwelt auftretenden Werte. Die maximal zu erwartenden magnetischen Flussdichten liegen somit um Größenordnungen unterhalb der bestehenden internationalen Grenzwertempfehlungen für die Allgemeinbevölkerung von 400 mT (ICNIRP 2009) bzw. 40 mT (EU Rat 1999). Indirekte Wirkungen bei Herzschrittmacherpatienten durch Um-

[6] (http://www.umweltmedizin.de/content/articles/511/537/index.html?catid=537&artid=9961&comp=18).

schaltung des Implantats in den festfrequenten Überprüfungsmode sind unter HGÜ-Leitungen nicht zu erwarten, weil die magnetischen Immissionen mit großem Abstand unter der Immunitätsschwelle von 500 µT bleiben (DIN 2003).

Elektrische Gleichfelder können nicht in das Körperinnere eindringen und daher dort keine gesundheitlichen Beeinträchtigungen hervorrufen (Evidenz EN). 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.

Im Zuge der Energiewende sollen HGÜ-Leitungen entstehen, die in der Umwelt elektrische Gleichfelder in relevanter Höhe erzeugen könnten und die es grundsätzlich erforderlich machen, auch elektrische Gleichfelder zu begrenzen und somit zum Schutz der Bevölkerung den Netzbetreibern konstruktive Rahmenbedingungen vorzugeben.

Für elektrische Wechselfelder ab 1 Hz wurde von der ICNIRP (2010) der Schutz vor gesundheitsbeeinträchtigenden Wirkungen empfohlen, (Zitat S. 827) „the electric field reference levels for general public exposure up to 10 MHz prevent adverse indirect effects (shocks and burns) for more than 90% of exposed individuals“. Der Referenzwert für die allgemeine Bevölkerung für die Frequenzen 1 Hz bis 50 Hz beträgt 5 kV/m.

Ob sich die Wahrnehmung elektrischer Gleichfelder in relevantem Ausmaß von elektrischen Wechselfeldern unterscheidet, kann anhand der experimentellen Ergebnisse diskutiert werden, wobei nur wenige Studien vorliegen. Die Resultate weisen darauf hin, dass die Wahrnehmbarkeit der elektrischen Gleichfelder im Vergleich zu Wechselfeldern bei niedrigen Feldstärken zwar tendenziell geringer ist, sie nähert sich jedoch mit zunehmender Luftionendichte und auch mit zunehmender Feldstärke jener von Wechselfeldern an.

Angesichts der zu erwartenden Immissionen durch elektrische und magnetische Felder von HGÜ-Leitungen und bestehender Regelungslücken spricht die SSK folgende Empfehlungen aus:

- Die SSK empfiehlt, die elektrischen Gleichfelder von HGÜ-Leitungen mit dem Ziel der Vermeidung gesundheitlicher Beeinträchtigungen oder erheblicher Belästigungen zu begrenzen und bei multipler Exposition durch elektrische Gleich- und Wechselfelder eine gewichtete Summation der Einzelbeiträge vorzunehmen.
- Die Angabe von belastbaren Schwellenwerten für Wahrnehmungs-, Belästigungs-, Schmerz- und Gefährdungseffekte ist im Hinblick auf die begrenzte Datenlage, insbesondere hinsichtlich der Anzahl der untersuchten Personen und der Einflüsse von Kofaktoren wie z. B. Ionendichte, derzeit nicht möglich. Die SSK empfiehlt daher die Durchführung weiterer Forschungsprojekte zur Wahrnehmung vor allem in Form von Humanstudien unter gut kontrollierten Bedingungen.
- Die SSK empfiehlt, die Netzbetreiber darauf hinzuweisen, mögliche Sekundäreffekte (z. B. Elektroschocks durch Entladung zu oder von leitfähigen Strukturen) durch geeignete, primär konstruktive Abhilfemaßnahmen zu unterbinden.
- Die SSK weist auf die Notwendigkeit des Schutzes von Personen mit magnetisch aktivierbaren Implantaten hin. Um z. B. eine Störbeeinflussung von Herzschrittmachern sicher auszuschließen, wird eine Begrenzung der magnetischen Flussdichte auf 500 µT empfohlen.

Literatur

39. BImSchV	Neununddreißigste Verordnung zur Durchführung des Bundes-Immissionsschutzgesetzes Verordnung über Luftqualitätsstandards und Emissionshöchstmengen vom 2. August 2010 (BGBl. I S. 1065).
Amara et al. 2011	Amara S, Douki T, Garrel C, Favier A, Ben Rhouma K, Sakly M, Abdelmelek H. Effects of static magnetic field and cadmium on oxidative stress and DNA damage in rat cortex brain and hippocampus. Toxicol Ind Health 2011 Mar 27(2): 99-106.
Amprion 2012	Übertragungsnetzbetreiber Amprion. Interne Mitteilung. November 2012.
Bekhite et al. 2012	Bekhite MM, Figulla HR, Sauer H, Wartenberg M. Static magnetic fields increase cardiomyocyte differentiation of Flk-1(+) cells derived from mouse embryonic stem cells via Ca(2+) influx and ROS production. Int J Cardiol. 2012 Mar 30.
Belton et al. 2011	Belton M, Prato FS, Carson JJ. Effect of glutathione depletion, hyperthermia, and a 100-mT static magnetic field on an hsp70/luc reporter system. Bioelectromagnetics 2011 Sep 32(6):453-62.
Besson et al. 1984	Besson J, Foreman EI, Eastwood LM, Smith FW, Ashcroft GW. Cognitive evaluation following NMR imaging of the brain. J Neurol Neurosurg Psychiatry 1984 Mar 47(3): 314-316.
Blondin et al. 1996	Blondin JP, Nguyen DH, Sbeghen J, Goulet D, Cardinal C, Maruvada PS, Plante M, Bailey WH. Human Perception of electric fields and Ion Currents associated with high-voltage DC transmission lines. Bioelectromagnetics 1996 17(3):230-241.
BMU 2011	BMU-Studie „Ökologische Auswirkungen von 380-kV-Erdleitungen und HGÜ-Erdleitungen (03MAP189 Laufzeit: 01.10.2009 - 31.12.2011), 4 Bände, Auftraggeber: BMU, Ref. KI III 3, Berlin.
Cabanes und Gary 1981	Cabanes J, Gary C. La perception directe du champ électrique. Proc. Int Conf Large High Voltage Electric Systems, 1981 Report No 233-08, 1-6.
Chapman et al. 2005	Capman CE, Blondin J-P, Lapierre AM, Nguyen DH, Forget R, Plante M, Goulet D. Perception of local DC and AC electric fields in humans. Bioelectromagnetics 2005 Jul 26(5):357-366.
Chen et al. 2010	Chen WF, Qi H, Sun RG, Liu Y, Zhang K, Liu JQ. Static magnetic fields enhanced the potency of cisplatin on k562 cells. Cancer Biother. Radiopharm. 2010 Aug 25(4):401-408.
Chen und Davidson 2002	Chen J, Davidson JH. Ozone Production in the Positive DC Corona Discharge: Model and Comparison to Experiments. Plasma Chemistry and Plasma Processing 2002 22(4): 495-522.

Chionna et al. 2005	Chionna A, Tenuzzo B, Panzarini E, Dwikat MB, Abbro L, Dini L. Time dependent modifications of Hep G2 cells during exposure to static magnetic fields. Bioelectromagnetics 2005 May 26(4):275-286.
Clairmont et al. 1989	Clairmont BA, Johnson GB, Zaffanella LE. The effect of HVAC-HVDC line separation in a hybrid corridor. IEEE Trans Power Delivery 4(2):1338-1350.
Colbert et al. 2009	Colbert AP, Wahbeh H, Harling N, Connelly E, Schiffke HC, Forsten C, Gregory WL, Markov MS, Souder JJ, Elmer P, King V. Static magnetic field therapy: A critical review of treatment parameters. Evid Based Complement Alternat Med. 2009 Jun 6(2):133-139.
Da Jing et al. 2010	Jing D, Shen G, Cai J, Li F, Huang J, Wang Y, Xu Q, Tang C, Luo E. Effects of 180 mT static magnetic fields on diabetic wound healing in rats. Bioelectromagnetics 2010 Dec 31(8):640-648.
de Vocht et al. 2012	de Vocht F, Stevens T, Kromhout H. Comment on: Effects of static magnetic fields on cognition, vital signs, and sensory perception: a meta-analysis. J Magn Reson Imaging 2012 Jan 35(1):235-236.
Delaplace und Reilly 1978	Delaplace LR, Reilly, JP. Electric and magnetic field coupling frim high voltage AC power transmission lines - Classification of short-term effects on people. IEEE Trans 1978 PAS-97(6):2243-2252.
Deno und Zaffanella 1975	Deno DW, Zaffanella LE. Electrostatic effects of overhead transmission lines. High electric field behavioural effects of humans and animals. In: Transmission Line Reference Book, 345 kV and above. Electric Power Research Institute, Palo Alto, 263-264.
DIN 2003	DIN EN 45502-2-1 VDE 0750-10-1:2004-08:2004-08 Aktive implantierbare medizinische Geräte, Teil 2-1: Besondere Festlegungen für aktive implantierbare medizinische Geräte zur Behandlung von Bradyarrhythmie (Herzschrittmacher), 2003.
DIN 2011	DIN EN 60601-2-33 VDE 0750-2-33:2011-07 Medizinische elektrische Geräte, Teil 2-33: Besondere Festlegungen für die Sicherheit von Magnetresonanzgeräten für die medizinische Diagnostik, 2011.
Dini und Abbro 2005	Dini L, Abbro L. Bioeffects of moderate-intensity static magnetic fields on cell cultures. Micron. 2005 36(3):195-217.
Dini und Panzarini 2010	Dini L, Panzarini E. The influence of a 6 mT static magnetic field on apoptotic cell phagocytosisdepends on monocyte/macrophage differentiation Experimental Biology and Medicine 2010 Dec 235(12):1432-1441.

Droppo et al. 1979	Droppo JG, Abbey OB, Glover DW. Ozone field studies adjacent to a HVDC transmission test line. Prepared for U.S. Department of Energy Division of Electric Energy Systems under Contract EY-76-C-06-1830. Pacific Northwest Laboratory. Richland, Washington 99352. March 1979
DWD 2000	DWD, Ozonbulletin des DWD 2000, http://www.dwd.de/ozonbulletin, zuletzt aufgerufen: 06.11.2012.
EFZN 2011	Energieforschungszentrum Niedersachsen: Ökologische Auswirkungen von 380-kV-Erdleitungen und HGÜ-Erdleitungen. BMU-Studie 2011.
Englert 2000	Englert, N. Ozon als Luftschadstoff. Bundesgesundheitsblatt, Gesundheitsforschung, Gesundheitsschutz, 2000 43(7):487-493.
EPA 2008	Environmental Protection Agency (US). Integrated Science Assessment for Oxides of Nitrogen - Health Criteria, EPA/600/R-08/071, Juli 2008.
EU Rat 1999	Europäischer Rat. Empfehlung zur Begrenzung der Exposition der Bevölkerung gegenüber elektromagnetischen Feldern (0 Hz-300 GHz). Ratsempfehlung 1999/519/EG.
Eveson et al. 2000	Eveson RW, Timmel CR, Brocklehurst B, Hore PJ, McLauchlan KA. The effects of weak magnetic fields on radical recombination reactions in micelles. Int J Radiat Biol. 2000 Nov 76(11):1509-1522.
Fanelli et al. 1999	Fanelli C, Coppola S, Barone R, Colussi C, Gualandi G, Volpe P, Ghibelli L. Magnetic fields increase cell survival by inhibiting apoptosis via modulation of Ca2+ influx. FASEB J. 1999 Jan 13(1):95-102.
Fischer et. al 1977	Fischer G, Stampfer H, Riedel H. Wirkung eines künstlichen Elektroklimas auf physiologische und psychologische Messgrößen. Zeitschr exper u. angew Psychologie 1977 24(3): 397-412.
Flipo et al. 1998	Flipo D, Fournier M, Benquet C, Roux P, Le Boulaire C, Pinsky C, LaBella FS, Krzystyniak K. Increased apoptosis, changes in intracellular Ca2+, and functional alterations in lymphocytes and macrophages after in vitro exposure to static magnetic field. J Toxicol Environ Health A. 1998 May 54(1):63-76.
G-BA 2012	Richtlinie des Gemeinsamen Bundesausschusses zu Untersuchungs- und Behandlungsmethoden der vertragsärztlichen Versorgung (Richtlinie Methoden vertragsärztliche Versorgung) in der Fassung vom 17. Januar 2006, veröffentlicht im Bundesanzeiger 2006; Nr. 48 (S.1523), in Kraft getreten am 1. April 2006 zuletzt geändert am 24. November 2011, veröffentlicht im Bundesanzeiger 2012, Nr. 31 (S. 747), in Kraft getreten am 24. Februar 2012.

Ghodbane et al. 2011	Ghodbane S, Amara S, Arnaud J, Garrel C, Faure H, Favier A, Sakly M, Abdelmelek H. Effect of selenium pre-treatment on plasma antioxidant vitamins A (retinol) and E (alpha-tocopherol) in static magnetic field-exposed rats. Toxicol Ind Health 2011 Nov 27(10):949-955.
Hao et al. 2011	Hao Q, Wenfang C, Xia A, Qiang W, Ying L, Kun Z, Runguang S. Effects of a moderate-intensity static magnetic field and adriamycin on K562 cells. Bioelectromagnetics 2011 Apr 32(3):191-199.
Heinrich et al. 2011	Heinrich A, Szostek A, Nees F, Meyer P, Semmler W, Flor H. Effects of static magnetic fields on cognition, vital signs, and sensory perception: a meta-analysis. J Magn Reson Imaging 2011 Oct 34(4):758-763.
Hinman 2002	Hinman MR. Comparative effect of positive and negative static magnetic fields on heart rate and blood pressure in healthy adults. Clin Rehabil. 2002 Sep 16(6):669-674.
Hirai et al. 2002	Hirai T, Nakamichi N, Yoneda Y. Activator protein-1complex expressed by magnetism in cultured rat hippocampal neurons. Biochem Biophys Res Commun. 2002 Mar 292(1):200-207.
Houpt et al. 2011	Houpt TA, Carella L, Gonzalez D, Janowitz I, Mueller A, Mueller K, Neth B, Smith JC. Behavioral effects on rats of motion with high static magnetic field. Physiol Behav. 2011 Mar 102(3-4):338-346.
HPA 2008	Health Protection Agency Advisory Group on Non-ionising Radiation. Static magnetic fields. Report 2008. ISBN: 978-0-85951-616-7.
Hung et al. 2010	Hung YC, Lee JH, Chen HM, Huang GS. Effects of static magnetic fields on the development and aging of Caenorhabditis elegans. J Exp Biol. 2010 Jun 213(12):2079-2085.
IARC 2002	International Agency of the Research on Cancer (IARC): Monograph 80 Non-Ionizing Radiation, Part 1: Static and Extremely Low-Frequency (ELF) Electric and Magnetic Fields. 2002.
ICNIRP 1998	International Commission on Non-Ionizing Radiation Protection. Guidelines for Limiting Exposure to Time-Varying Electric, Magnetic, and Electromagnetic Fields (up to 300 GHz). Health Physics. 1998 74(4):494-522.
ICNIRP 2003	International Commission on Non-Ionizing Radiation Protection. Exposure to Static and Low Frequency Electromagnetic Fields, Biologic Effects and Health Consequences (0 - 100kHz). Review of the Scientific Evidence and Health Consequences. München 2003.
ICNIRP 2009	International Commission on Non-Ionizing Radiation Protection. ICNIRP Guidelines on Limits of Exposure to Static Magnetic Fields. Health Physics 2009 96(4):504-514.

ICNIRP 2010	International Commission on Non-Ionizing Radiation Protection. Guidelines for Limiting Exposure to Time-Varying Electric, Magnetic, and Electromagnetic Fields (1Hz to 100kHz). Health Physics 2010 99(6):818-836.
IEC/TS 60479-2 2007	International Electrotechnical Commission (IEC). Effects of current on human beings and livestock - Part 2: Special aspects. 2007-05 Ed. 3.0.
Ikehata et al. 1999	Ikehata M, Koana T, Suzuki Y, Shimizu H, Nakagawa M. Mutagenicity and co-mutagenicity of static magnetic fields detected by bacterial mutation assay. Mutat Res. 1999 Jun 427(2):147-156.
Jajte et al. 2002	Jajte J, Grzegorczyk J, Zmyślony M, Rajkowska E. Effect of 7 mT static magnetic field and iron ions on rat lymphocytes: apoptosis, necrosis and free radical processes. Bioelectrochemistry 2002 Sep 57(2):107-111.
Johnson 1983	Johnson GB. Electric fields and ion currents of a 400kV HVDC test line. IEEE Trans. Power Apparatus Systems 1983 August PAS-102(8):2559-2568.
Juutilainen et al. 2006	Juutilainen J, Kumlin T, Naarala J. Do extremely low frequency magnetic fields enhance the effects of environmental carcinogens? A meta-analysis of experimental studies. Int J Radiat Biol. 2006 Jan 82(1):1-12.
Kangarlu et al. 1999	Kangarlu A, Burgess RE, Zhu H, Nakayama T, Hamlin RL, Abduljalil AM, Robitaille PM. Cognitive, cardiac, and physiological safety studies in ultra high field magnetic resonance imaging. Magn Reson Imaging 1999 Dec 17(10):1407-1416.
Kato et al. 1989	Kato M, Ohta S, Shimizu K, Tsuchida Y, Matsumoto G. Detection-threshold of 50Hz electric fields by human subjects. Bioelectromagnetícs 1989, 10(3):319-327.
König 1986	König HL. Unsichtbare Umwelt, 1986 Eigenverlag München.
Kraft et al. 2005	Kraft M, Eikmann T, Kappos A, Künzli N, Rapp R, Schneider K, Seitz H, Voss JU, Wichmann HE. The German view: Effects of nitrogen dioxide on human health – derivation of health-related short-term and long-term values. Int. J. Hyg Environ. Health 2005 208(4):305-318.
Kuipers et al. 2007	Kuipers NT, Sauder CL, Ray CA. Influence of static magnetic fields on pain perception and sympathetic nerve activity in humans. J Appl Physiol. 2007 Apr 102(4):1410-1415.
Li et al. 2012	Li Y, Song LQ, Chen MQ, Zhang YM, Li J, Feng XY, Li W, Guo W, Jia G, Wang H, Yu J. Low Strength Static Magnetic Field Inhibits the Proliferation, Migration, and Adhesion of Human Vascular Smooth Muscle Cells in a Restenosis Model Through Mediating Integrins β1-FAK, Ca(2+) Signaling Pathway. Ann Biomed Eng. 2012 Dec 40(12):2611-2618.

Liboff et al. 2003 Liboff AR, Cherng S, Jenrow KA, Bull A. Calmodulin-dependent cyclic nucleotide phosphodiesterase activity is altered by 20 microT magnetostatic fields. Bioelectromagnetics 2003 Jan 24(1):32-38.

Lin et al. 2009 Lin SL, Chang WJ, Lin YS, Ou KL, Lin CT, Lin CP, Huang HM. Static magnetic field attenuates mortality rate of mice by increasing the production of IL-1 receptor antagonist. Int. J. Radiat. Biol. 2009 Jul 85(7):633-640.

Liu et al. 2011 Liu Y, Qi H, Sun RG, Chen WF. An investigation into the combined effect of static magnetic fields and different anticancer drugs on K562 cell membranes. Tumori. 2011 May-Jun 97(3):386-392.

Martel et al. 2002 Martel GF, Andrews SC, Roseboom CG. Comparison of static and placebo magnets on resting forearm blood flow in young, healthy men. J Orthop Sports Phys Ther. 2002 Oct 32(10):518-524.

Martino 2011 Martino CF. Static magnetic field sensitivity of endothelial cells. Bioelectromagnetics 2011 Sep 32(6):506-508.

Martino et al. 2010 Martino CF, Portelli L, McCabe K, Hernandez M, Barnes F. Reduction of the Earth's magnetic field inhibits growth rates of model cancer cell lines. Bioelectromagnetics 2010 Dec 31(8):649-655.

Martino und Castello 2011 Martino CF, Castello PR. Modulation of hydrogen peroxide production in cellular systems by low level magnetic fields. PLoS One. 2011 6(8):e22753. doi: 10.1371/journal.pone.0022753. Epub 2011 Aug 26.

Maruvada und Drogi 1988 Maruvada PS, Drogi S. Field and Ion interaction of Hybrid AC/DC transmission lines. IEEE Trans. Power Delivery 1988 July 3(3):1165-1172.

Mayrovitz et al. 2001 Mayrovitz HN, Groseclose EE, Markov M, Pilla AA. Effects of permanent magnetis on resting skin blood perfusion in healthy persons assessed by laser doppler flowmetry and imaging. Bioelectromagnetics 2001 Oct 22(7): 494-502.

Mayrovitz et al. 2005 Mayrovitz HN, Groseclose EE, King D. No effect of 85 mT permanent magnets on laser-doppler measured blood flow response to inspiratory gasps. Bioelectromagnetics 2005 May 26(4):331-335.

Mayrovitz und Groseclose 2005 Mayrovitz HN, Groseclose EE. Effects of a static magnetic field of either polarity on skin microcirculation. Microvascular Research 2005 Jan 69(1-2):24-27.

McCann et al. 1998 McCann J, Dietrich F, Rafferty C. The genotoxic potential of electric and magnetic fields: an update. Mutat Res. 1998 Aug 411(1):45-86.

Mevissen et al. 1994 Mevissen M, Buntenkötter S, Löscher W. Effects of static and time-varying (50-Hz) magnetic fields on reproduction and fetal development in rats. Teratology 1994 Sep 50(3):229-237.

Miyakoshi 2005	Miyakoshi J. Effects of static magnetic fields at the cellular level. Prog. Biophys Mol Biol. 2005 Feb-Apr 87(2-3):213-223.
Nakahara et al. 2002	Nakahara T, Yaguchi H, Yoshida M, Miyakoshi J. Effects of exposure of CHO-K1 cells to a 10-T static magnetic field. Radiology 2002 Sep 224(3):817-822.
ÖAW 1998	Österreichische Akademie der Wissenschaften. Stickstoffoxide in der Atmosphäre - Luftqualitätskriterien NO_2 - Wirkungen auf den Menschen; Neubearbeitung 1998. Hrsg. BM für Umwelt, Jugend und Familie, Wien.
Pagliara et al. 2005	Pagliara P, Lanubile R, Dwikat M, Abbro L, Dini L. Differentiation of monocytic U937 cells under static magnetic field exposure. Eur J Histochem. 2005 Jan-Mar 49(1):75-86.
Potenza et al. 2010	Potenza L, Martinelli C, Polidori E, Zeppa S, Calcabrini C, Stocchi L, Sestili P, Stocchi V. Effects of a 300mT Static Magnetic Field on Human Umbilical Vein Endothelial Cells. Bioelectromagnetics. 2010 Dec 31(8):630-639.
Reilly et al. 1992	Reilly JP, Antoni H, Chilbert MA, Skuggevig W, Sweeney JD. Electrical Stimulation and Electropathology. Cambridge University Press 1992 ISBN 0-521-41791-0.
Rosen 1996	Rosen AD. Inhibition of calcium channel activation in GH3 cells by static magnetic fields. Biochim Biophys Acta 1996 Jun 1282(1):149-155.
Rosenberg et al. 1983	Rosenberg RS, Duffy PH, Sacher GA, Ehret CF. Relationship between field strength and aropusal response in mice exposed to 60Hz electric fields. Bioelectromagnetics 1983 4(2):181-191.
Rozanski et al. 2009	Rozanski C, Belton M, Prato FS, Carson JJ. Real-time measurement of cytosolic free calcium concentration in DEM-treated HL-60 cells during static magnetic field exposure and activation by ATP. Bioelectromagnetics 2009 Apr 30(3):213-221.
Sagan et al. 1987	Sagan PM, Stell ME, Bryan GK, Adey WR. Detection of 60 Hz vertical electric fields by rats. Bioelectromagnetics 1987 8(3):303-313.
Salomonowitz et al. 2011	Salomonowitz G, Friedrich M, Güntert BJ. Medizinische Relevanz von Magnetfeldern zur Schmerztherapie. Der Schmerz 2011 25(2):157-165.
Samet et al. 2001	Samet JM, Hatch GE, Horstman D, Steck-Scott S, Arab L, Bromberg PA, Levine M, McDonnel WF, Devlin RB. Am J Crit Care Med. 2001 164: 819-825.
Sarvestani et al. 2010	Sarvestani AS, Abdolmaleki P, Mowla SJ, Ghanati F, Heshmati E, Tavasoli Z, Jahromi AM. Static magnetic fields aggravate the effects of ionizing radiation on cell cycle progression in bone marrow stem cells. Micron. 2010 Feb 41(2):101-104.
SCENIHR 2009	SCENIHR (Scientific Committee on Emerging and Newly Identified Health Risks) European Commission. Health Effects of Exposure to EMF. 2009.

Shimizu et al. 1998	Shimizu HO, Shimizu K, Matsumoto G. Analysis of the human perception threshold of an ELF electric field. Proc. 20th Ann Conf. IEEE Med. Biol. Soc. 1998 20:3265-3268.
Shine et al. 2011	Shine MB, Guruprasad KN, Anand A. Enhancement of germination, growth, and photosynthesis in soybean by pre-treatment of seeds with magnetic field. Bioelectromagnetics 2011 Sep 32(6):474-484.
Shine et al. 2012	Shine MB, Guruprasad KN, Anand A. Effect of stationary magnetic field strengths of 150 and 200 mT on reactive oxygen species production in soybean. Bioelectromagnetics 2012 Jul 33(5):428-437.
Small et al. 2012	Small DP, Hüner NP, Wan W. Effect of static magnetic fields on the growth, photosynthesis and ultrastructure of Chlorella kessleri microalgae. Bioelectromagnetics 2012 May 33(4):298-308.
SSK 2003	Strahlenschutzkommission (SSK). Empfehlungen zur sicheren Anwendung magnetischer Resonanzverfahren in der medizinischen Diagnostik, Empfehlung der Strahlenschutzkommission, verabschiedet in der 180. Sitzung der SSK am 19./20.09.2002, veröffentlicht im BAnz Nr. 72 vom 12.04.2003.
SSK 2008	Strahlenschutzkommission (SSK). Schutz vor elektrischen und magnetischen Feldern der elektrischen Energieversorgung und -anwendung, Empfehlung der Strahlenschutzkommission, verabschiedet in der 221. Sitzung der SSK am 21./22.02.2008, veröffentlicht im BAnz Nr. 142a vom 18.09.2008.
SSK 2012	Strahlenschutzkommission (SSK). Vergleichende Bewertung der Evidenz von Krebsrisiken durch elektromagnetische Felder und Strahlungen. Stellungnahme der Strahlenschutzkommission, verabschiedet in der 248. Sitzung der SSK am 14./15.04.2011, veröffentlicht im BAnz Nr. 26 vom 15. Februar 2012.
Stell et al. 1993	Stell M, Sheppard AR, Adey WR. The effect of moving air on detection of a 60Hz electric field. Bioelectromagnetics 1993 14(1):67-78.
Stern et al. 1983	Stern S, Laties VG, Stancampiano CV, Cox C, de Lorge JO. Behavioural detection of 60Hz electric fields by rats. Bioelectromagnetics 1983 4(3):215-247.
Strelczyk et al. 2009	Strelczyk D, Eichhorn ME, Luedemann S, Brix G, Dellian M, Berghaus A, Strieth S. Static magnetic fields impair angiogenesis and growth of solid tumors in vivo. Cancer Biol Ther. 2009 Sep 8(18):1756-62.
Sullivan et al. 2011	Sullivan K, Balin AK, Allen RG. Effects of static magnetic fields on the growth of various types of human cells. Bioelectromagnetics 2011 Feb 32(2):140-147.

Sun et al. 2012	Sun RG, Chen WF, Qi H, Zhang K, Bu T, Liu Y, Wang SR. Biologic effects of SMF and paclitaxel on K562 human leukemia cells. Gen Physiol Biophys. 2012 Mar 31(1):1-10.
Swanson und Kheifets 2012	Swanson J, Kheifets L. Could the geomagnetic field be an effect modifier for studies of power-frequency magnetic fields and childhood leukaemia? J Radiol Prot. 2012 Dec 32(4): 413-418.
Sweetland et al. 1987	Sweetland J, Kertesz A, Prato FS, Nantau K. The effect of magnetic resonance imaging on human cognition. Magn Reson Imaging 1987 5(2): 129-135.
Teodori et al. 2002	Teodori L, Grabarek J, Smolewski P, Ghibelli L, Bergamaschi A, De Nicola M, Darzynkiewicz Z. Exposure of cells to static magnetic field accelerates loss of integrity of plasma membrane during apoptosis. Cytometry 2002 Nov 1;49(3):113-118.
Timmel und Henbest 2004	Timmel CR, Henbest KB. A study of spin chemistry in weak magnetic fields. Philos Transact A Math Phys Eng Sci. 2004 Dec 15 362(1825):2573-2589.
Todorović et al. 2012	Todorović D, Mirčić D, Ilijin L, Mrdaković M, Vlahović M, Prolić Z, Mataruga VP. Effect of magnetic fields on antioxidative defense and fitness-related traits of Baculum extradentatum (insecta, phasmatodea). Bioelectromagnetics 2012 Apr 33(3):265-273.
Todorović et al. 2013	Todorović D, Marković T, Prolić Z, Mihajlović S, Rauš S, Nikolić L, Janać B. The influence of static magnetic field (50 mT) on development and motor behaviour of Tenebrio (Insecta, Coleoptera). Int J Radiat Biol. 2013 Jan 89(1):44-50.
van Nierop et al. 2012	van Nierop LE, Slottje P, van Zandvoort MJE, de Vocht F, Kromhout H. Effects of magnetic stray fields from a 7 Tesla MRI scanner on neurocognition: a double-blind randomised crossover study. Occup Environ Med. 2012 Oct 69(10):759-766.
VDI 2001	Verein Deutscher Ingenieure (VDI). VDI 2310 Blatt 15 Maximale Immissions-Werte zum Schutz des Menschen - Maximale Immissions-Konzentrationen für Ozon, Dez. 2001.
WHO 2003	World Health Organization. Health aspects of air pollution with particulate matter, ozone and nitrogen dioxide. Report on a WHO Working Group Bonn, Germany 13-15 January 2003.
WHO 2006a	World Health Organization. Environmental Health Criteria 232. Static fields. Geneva. 2006.
WHO 2006b	World Health Organization. Air Quality Guidelines – Global Update 2005; Particulate Matter, Ozone, Nitrogen dioxide and Sulfur dioxide. WHO Regional Office for Europe, Copenhagen, Denmark 2006.
WHO 2011	World Health Organization. Air quality and health. Fact sheet No. 313, updated September 2011.

Winther et al. 1999	Winther FO, Rasmussen K, Tvete O, Halvorsen U, Haugsdal B. Static magnetic field and the inner ear. A functional study of hearing and vestibular function in man after exposure to a static magnetic field. Scand Audiol. 1999 28(1):57-59.
Wonik 1992	Wonik, T. Kompilation und Interpretation der magnetischen Anomalien der Totalintensität in Zentral und Nordeuropa Dissertation, Universität Göttingen 1992.
Woodward et al. 2009	Woodward JR, Foster TJ, Jones AR, Salaoru AT, Scrutton NS. Time-resolved studies of radical pairs. Biochem Soc Trans. 2009 Apr 37(Pt 2):358-362.
Zmyślony et al. 2000	Zmyślony M, Palus J, Jajte J, Dziubaltowska E, Rajkowska E. DNA damage in rat lymphocytes treated in vitro with iron cations and exposed to 7 mT magnetic fields (static or 50 Hz). Mutat Res. 2000 Sep 20 453(1):89-96.

Abkürzungsverzeichnis

AC	alternating current (Wechselstrom)
AP1	Aktivator Protein-1
BALB/cByJ-Mäuse	Mausstamm
C57BL/6-Mäuse	Mausstamm
CEM-Zellen	T-Lymphozyten-Zell-Linie
CHO-K1-Zellen	Ovarien-Fibroblasten vom chinesischen Hamster
DC	direct current (Gleichstrom)
DNA	Desoxyribonukleinsäure
HDÜ	Hochspannungs-Drehstromübertragung
HGÜ	Hochspannungs-Gleichstromübertragung
HL-60-Zellen	humane Leukämie-Zell-Linie
HPA	Health Protection Agency
HPRT	Hypoxanthin-Phosphoribosyl-Transferase
HWÜ	Hochspannungs-Wechselstromübertragung
ICNIRP	International Commission on Non-Ionizing Radiation Protection
MRT	Magnetresonanztomographie
MSNA	muskuläre sympathische Nervenaktivität
ppb	parts per billion 1 ppb Ozon entspricht 2 µg/m^3
ROS	reaktive oxygen species
SCENIHR	European Commission, Scientific Committee on Emerging and Newly Identified Health Risks
SSK	Strahlenschutzkommission
U937-Zellen	menschliche leukämische Monozyten-Zelllinie
WAIS	Wechsler Adult Intelligence Test
WHO	World Health Organization

Abbildungsnachweis

Abb. 1 Für die Wahrnehmung des Feldes erforderliche Gleichfeld-Feldstärke in Abhängigkeit eines vorhandenen Wechselfeldanteils (abgeleitet aus Clairmont et al. 1989).

Abb. 2 Effektivwerte der AC- (gestrichelt) und DC-Anteile (voll) der magnetischen Bodenflussdichten B_B an der Position x entlang der Breite eines D1-Mastes in AC-/DC-Hybridkonfiguration für die minimalen Leiter-Boden-Abstände 7,8 m und 10 m (Amprion 2012)

Abb. 3: Schema des „radical-pair-mechanismus“ (Woodward et al. 2009)

Woodward JR, Foster TJ, Jones AR, Salaoru AT, Scrutton NS. Time-resolvedstudies of radical pairs. Biochem Soc Trans. 2009 Apr 37(Pt 2):358-62 © Portland Press Limited and the International Federation for Cell Biology

Abb. A1: Modellgeometrie zur Berechnung der Konzentrationsüberhöhung. Die von der Linienquelle erzeugten Schadstoffe werden durch Konvektion in Windrichtung und durch Turbulenz in vertikale Richtung transportiert.

Abb. A2: Überhöhung der bodennahen Ozonkonzentration als Funktion des Abstandes von der Trasse.

Abb. A3: Windrose am Standort Hannover. Modifiziert.

Abb. A4: Maximale Überhöhung der bodennahen Ozonkonzentration als Funktion des zugehörigen Abstandes von der Trasse.

Anhang A Evidenzbewertung

Der Begriff „Evidenz“ ist mehrdeutig. Er wird in dieser Empfehlung im Sinne des englischen Wortes „evidence“ mit der Bedeutung „Beleg“ oder „Beweislage“ und damit auch als Maß für die Sicherheit des Wissens verwendet.

Zur Abklärung eines möglichen kausalen Zusammenhanges gibt es grundsätzlich sechs methodisch unterschiedliche Untersuchungsansätze, nämlich

Physikalische Wirkmodelle

Biologische Wirkmodelle

Dosis-Wirkungs-Beziehungen

In-vitro-Untersuchungen

In-vivo-Untersuchungen

Epidemiologische Untersuchungen.

Die Einstufung der Evidenz erfolgt in zwei Schritten: Zunächst wird die Evidenzlage in den einzelnen methodischen Untersuchungsansätzen erhoben. Danach werden die Teilergebnisse zu einem wissenschaftlichen Gesamtbild zusammengefügt und die Gesamtevidenz synoptisch bewertet.

Dabei wird beachtet, dass für die jeweilige Evidenz-Einstufung nicht notwendiger Weise in allen Untersuchungsansätzen Ergebnisse vorliegen müssen. So kann z. B. bei den elektrischen Gleichfeldern auf epidemiologische Evidenz verzichtet werden, da die anderen Untersuchungsansätze zu einer überzeugenden Beurteilung ausreichen. Darüber hinaus besitzen nicht alle Untersuchungsansätze das gleiche Gewicht. So ist die Erklärbarkeit eines Zusammenhanges durch das gesicherte Grundlagenwissen von großer Bedeutung, während epidemiologische Befunde zwar auf einen Zusammenhang hindeuten, die Kausalität jedoch nicht beweisen können.

Um kausale Zusammenhänge zwischen einem Einwirkungsfaktor und deren mögliche gesundheitlichen Auswirkungen ausreichend differenziert bewerten zu können, teilt die SSK die Evidenz in fünf Klassen, nämlich:

E3 (überzeugende Evidenz für einen kausalen Zusammenhang)

E2 (unvollständige Evidenz für einen kausalen Zusammenhang)

E1 (schwache Evidenz für einen kausalen Zusammenhang)

E0 (keine bzw. unzureichende Evidenz für einen kausalen Zusammenhang) und

EN (Evidenz für einen fehlenden kausalen Zusammenhang)

Die Kategorie E0 „keine bzw. unzureichende Evidenz für einen kausalen Zusammenhang“ gibt an, dass trotz vorgenommener Studien kein kausaler Zusammenhang gefunden worden ist, dass jedoch die vorliegenden negativen Ergebnisse nicht ausreichen, um als Evidenz für das Fehlen jeglichen Zusammenhanges zu dienen. Die Feststellung, dass es keine Evidenz ***für*** einen Zusammenhang gibt, schließt nämlich die Möglichkeit eines Zusammenhanges nicht kategorisch aus.

Eine stärkere Aussage stellt daher die Kategorie EN „Evidenz für einen fehlenden Zusammenhang“ dar, weil sie auf einer belastbareren Schlussfolgerung beruht, die aus einer ausreichenden Datenlage gezogen werden konnte. Die Evidenz für das ***Fehlen*** eines Zusammenhanges lässt sich jedoch nicht in gleicher Weise abstufen wie die Evidenz ***für*** einen

Zusammenhang. Der Grund dafür liegt darin, dass das Nicht-Vorhandensein grundsätzlich wissenschaftlich nie vollständig beweisbar ist, wenn es nicht durch die Kenntnis des Wirkmechanismus ausgeschlossen werden kann, weil ja bereits ein einziger belastbarer Gegenbeweis die Annahme des Fehlens des Zusammenhanges zu Fall bringen könnte.

Die Evidenzklassen lassen sich wie folgt charakterisieren:

Überzeugende Evidenz (E3): Sie ist gegeben, wenn eine ausreichende Anzahl der vorliegenden Studien konsistent einen statistisch signifikanten Zusammenhang zwischen Exposition und Wirkung zeigt. Die Studien müssen dabei von ausreichender Größe sein, ausreichend viele Endpunkte umfassen und mit ausreichender methodischer Qualität durchgeführt worden sein. Ferner müssen die Ergebnisse von unabhängigen Gruppen reproduziert worden sein. Confounding und Bias müssen mit hinreichender Sicherheit ausgeschlossen werden können, und die Ergebnisse müssen durch das bestehende Grundlagenwissen überzeugend gestützt werden.

Unvollständige Evidenz (E2): Sie ist gegeben, wenn nur eine begrenzte Anzahl von Studien vorliegt, die jedoch überwiegend einen statistisch signifikanten Zusammenhang zwischen Exposition und Wirkung zeigen. Die Studien können dabei von begrenzter Größe sein, unzureichend viele Endpunkte umfassen, müssen aber mit ausreichender methodischer Qualität durchgeführt worden sein. Ferner müssen die Ergebnisse von unabhängigen Gruppen wenigstens teilweise reproduziert worden sein. Confounding und Bias sollten gering sein. Es muss möglich sein, die Ergebnisse durch das bestehende Grundlagenwissen zu erklären.

Schwache Evidenz (E1): Sie ist gegeben, wenn eine unzureichende Anzahl von Studien vorliegt. Die Anzahl der untersuchten Endpunkte ist unzureichend, und die methodische Qualität sowie die Größe der Studien sind häufig begrenzt. Die Ergebnisse wurden von unabhängigen Gruppen kaum reproduziert und zeigen überwiegend keinen statistisch signifikanten Zusammenhang zwischen Exposition und Wirkung. Bias und Confounding können nicht ausgeschlossen werden. Ein kausaler Zusammenhang beruht nicht auf belegten Mechanismen, er muss aber durch Hypothesen erklärt werden können, die zum bestehenden Grundlagenwissen nicht im Widerspruch stehen dürfen.

Keine bzw. unzureichende Evidenz (E0) für das Vorhandensein bzw. Nicht-Vorhandensein eines Zusammenhanges: Sie ist gegeben, wenn nur eine begrenzte Anzahl von Studien vorliegt, die jedoch überwiegend keinen statistisch signifikanten Zusammenhang zwischen Exposition und Wirkung zeigen. Die Studien können dabei von begrenzter Größe sein, unzureichend viele Endpunkte umfassen, müssen aber mit ausreichender methodischer Qualität durchgeführt worden sein. Ferner müssen die Ergebnisse von unabhängigen Gruppen wenigstens teilweise reproduziert worden sein. Confounding und Bias sollten gering sein. Es muss möglich sein, die Ergebnisse durch das bestehende Grundlagenwissen zu erklären.

Evidenz für das Nicht-Vorhandensein (EN) eines Zusammenhanges: Sie ist gegeben, wenn eine ausreichende Anzahl der vorliegenden Studien konsistent keinen statistisch signifikanten Zusammenhang zwischen Exposition und Wirkung zeigt. Die Studien müssen dabei von ausreichender Größe sein, ausreichend viele Endpunkte umfassen und mit ausreichender methodischer Qualität durchgeführt worden sein. Ferner müssen die Ergebnisse von unabhängigen Gruppen reproduziert worden sein. Confounding und Bias müssen mit hinreichender Sicherheit ausgeschlossen werden können, und die Ergebnisse müssen durch das bestehende Grundlagenwissen überzeugend gestützt werden.

In den Fällen, in denen es die Daten nicht zulassen, die Evidenz zu bewerten, wird zur besseren Nachvollziehbarkeit die Differenzierung der Datenlage in folgender Abstufung vorgenommen

D0 fehlende Daten.

D1 (unzureichende Daten) und

D2 (widersprüchliche Daten).

Widersprüchliche Datenlage (D2): Sie ergibt sich, wenn Studien mit widersprüchlichen Ergebnissen bezüglich eines Zusammenhanges zwischen Exposition und Wirkung vorliegen, die von unabhängigen Gruppen nicht reproduziert wurden und bei denen Bias und Confounding nicht ausgeschlossen werden können.

Unzureichende Datenlage (D1): Sie folgt aus vorliegenden Studien unzureichender Größe, mit unzureichender methodischer Qualität, mit einer unzureichenden Anzahl von Endpunkten und wahrscheinlichem Bias und Confounding.

Fehlende Daten (D0): Es liegen keine oder unzureichend wenige Studien vor.

Anhang B Berechnung der Ozon- und NOx-Zusatzbelastungen durch HGÜ-Leitungen

Durch die hohen elektrischen Feldstärken (Koronaeffekte) und eine damit verbundene Ionisierung von Luftmolekülen werden beim Betrieb von HGÜ-Leitungen Ozon und Stickoxide erzeugt. Für die Berechnung der dadurch bedingten bodennahen Schadstoffzusatzbelastung in der Umgebung von HGÜ-Leitungen ist die Kenntnis der Produktionsrate pro Streckenlänge erforderlich. Daten hierzu sind einer umfangreichen Untersuchung von Roach (1973) zu entnehmen. Die Werte der Quellstärke Q liegen im Bereich zwischen 1 µg/(s·m) und 30 µg/(s·m) je nach Betriebsspannung der Übertragungsleitung (230 kV bis 775 kV) und Witterungsbedingungen. Ähnliche Werte findet man auch bei Chen und Davidson (2002). Für Stickoxide sind die Erzeugungsraten etwa einen Faktor 10 geringer. Weitere Einflussgrößen auf die Ozon- bzw. Stickoxidkonzentration sind die Höhe z_S der Leitungen, die Windgeschwindigkeit u und die Windrichtung θ sowie die Ausbreitungsklassen der bodennahen Luftschicht. Sie bestimmen die Turbulenz und damit den vertikalen Schadstoffaustausch.

Zur Abschätzung des Umwelteinflusses ist die Berechnung der Schadstoffkonzentration am Erdboden ausreichend. Dazu kann man von dem in Abbildung A1 dargestellten Szenario einer in y-Richtung unendlich ausgedehnten Linienquelle ausgehen. Die Anzahl der stromführenden HGÜ-Leitungen ist hier beispielshaft gleich zwei.

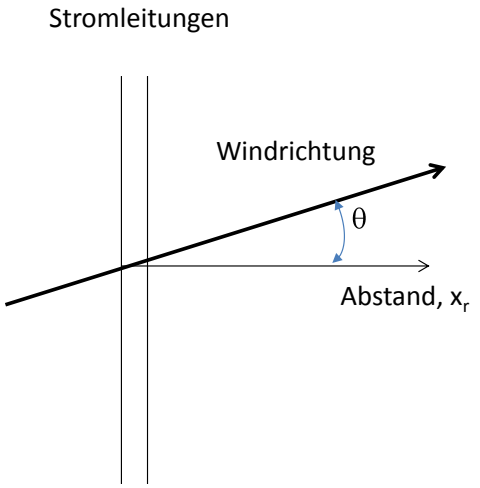

Abb. A1: Modellgeometrie zur Berechnung der Konzentrationsüberhöhung. Die von der Linienquelle erzeugten Schadstoffe werden durch Konvektion in Windrichtung und durch Turbulenz in vertikale Richtung transportiert.

Die Konzentrationsüberhöhung am Boden als Funktion des Abstands x_r von der Stromtrasse kann näherungsweise durch Anwendung des Gauß'schen Fahnenmodells berechnet werden (Esplin 1995):

$$\Delta c(x_r) = \frac{Q}{u}\sqrt{\frac{2}{\pi}}\frac{1}{\cos\theta}\cdot\frac{1}{\sigma_z}e^{-\frac{z_s^2}{2\cdot\sigma_z^2}}, \quad \sigma_z(x_r) = G\cdot\left(\frac{x_r}{\cos\theta}\right)^g \qquad \text{Gl.1}$$

Die Werte der für die Berechnungen benötigten sogenannten Dispersionsparameter g und G hängen von der Turbulenz ab und sind in Tabelle A1 gelistet.

Tab. A1: Dispersionsparameter nach TA-Luft (1986) für Quellhöhen kleiner als 50 m

Ausbreitungsklasse		*G*	*g*
V	sehr labil	0,151	1,219
IV	labil	0,127	1,108
III/2	neutral	0,165	0,996
III/1	neutral	0,215	0,885
II	stabil	0,264	0,774
I	sehr stabil	0,241	0,662

Sehr labil bedeutet hohe Turbulenz, *sehr stabil* geringe Turbulenz.

Die nachfolgende Abbildung A2 zeigt den Verlauf der bodennahen Ozonkonzentrationsüberhöhung als Funktion des Abstandes von der Trasse. Hier wurde von 2 Leitungen in einer Höhe von 8 m, und einer maximalen Quellstärke je Leitung von 30 µg/(m·s) ausgegangen. Es wurde ein mittlerer Wert für θ von 22,5° gewählt, was beispielsweise in Norddeutschland für eine in Nord-Südrichtung verlaufende Trasse typisch ist (mittlere Windrichtung Westsüdwest, Abbildung A3). Die mittlere Windgeschwindigkeit beträgt 5 m/s. Die Werte basieren auf einer 10-Jahresstatistik am Standort Flughafen Hannover.[7] Die Berechnung unter Zugrundelegung der Mittelwerte von Windrichtung und Windgeschwindigkeit geben nur einen Anhaltspunkt für die Größenordnung der Konzentrationsüberhöhung. Korrekterweise sind die Berechnungen für alle Werte der Häufigkeitsverteilungen der ausbreitungsrelevanten Parameter am Untersuchungsstandort durchzuführen, um eine genaue standortbezogene Vorhersage der Zusatzbelastung treffen zu können.

[7] (http://de.windfinder.com/windstats/windstatistic_hannover-langenhagen.htm). Zuletzt aufgerufen am 12.09.2013

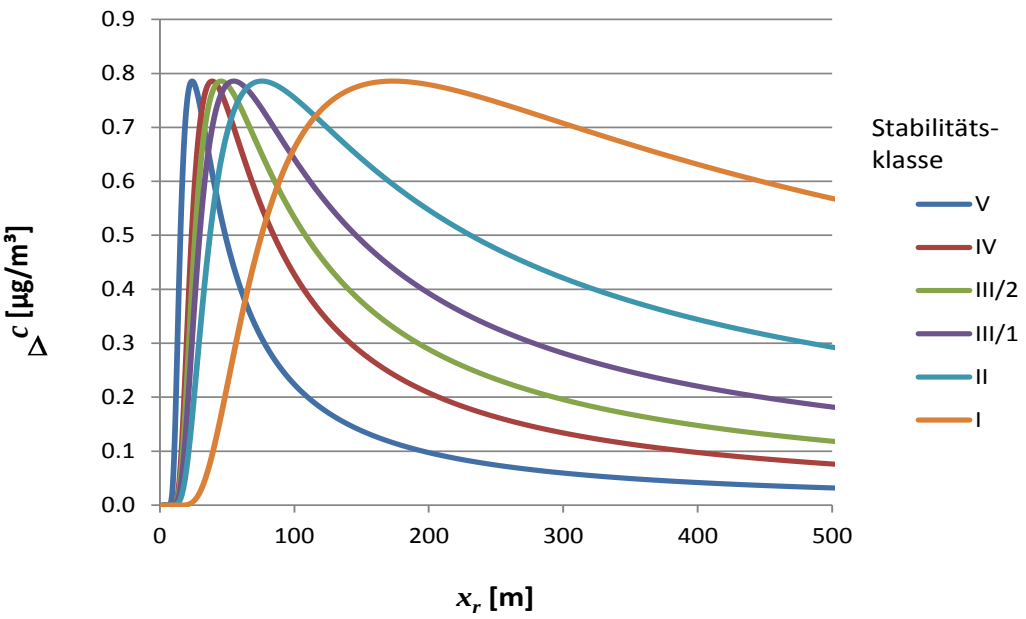

Abb. A2: Überhöhung der bodennahen Ozonkonzentration als Funktion des Abstandes von der Trasse. θ =22,5°, u=5 m/s, z_s=8 m, Q=2·30 µg/(m·s).

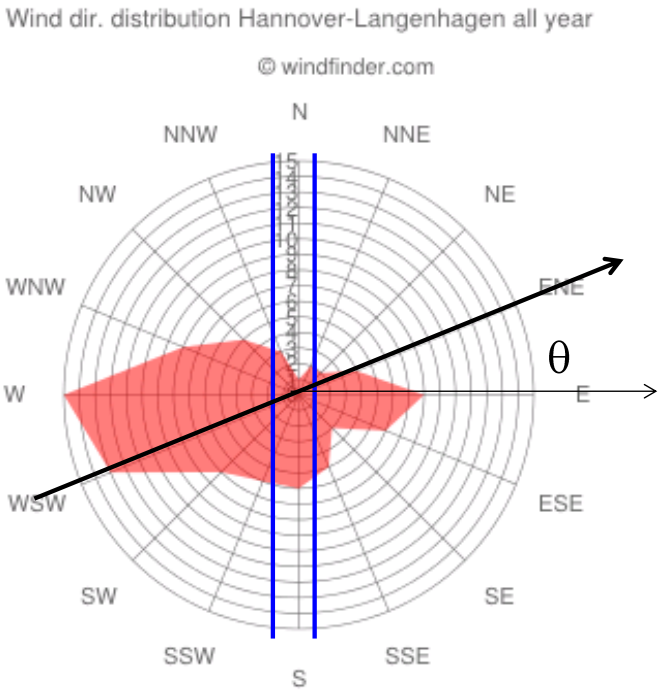

Abb. A3: Windrose am Standort Hannover, (modifiziert)

Die für dieses Szenario berechneten Überhöhungen von maximal 0,8 µg/m³ (0,4 ppb) sind sehr gering und auf einen schmalen Streifen neben der Stromtrasse von einer beidseitigen Ausdehnung von weniger als 300 m beschränkt. Ziel- und Warnwerte für Ozon liegen bei 120 µg/m³ bzw. 180 µg/m³ (60 ppb bzw. 90 ppb) (39. BImSchV 2010).

Der Abstand, für den die Konzentrationsüberhöhung ihren Maximalwert hat, ergibt sich aus:

$$x_{r,\max} = \cos\theta \cdot (z_s / G)^{1/g} \qquad \text{Gl. 2}$$

Der zugehörige Maximalwert der Überhöhung der Bodenkonzentration ist unabhängig von der Ausbreitungsklasse, wie auch in Abbildung A2 zu erkennen, und lässt sich aus

$$\Delta c\left(x_{r,\max}\right) = \frac{Q}{u} \cdot \frac{1}{z_s \cdot \cos\theta} \cdot \sqrt{\frac{2}{\pi}} \cdot e^{-1/2} \qquad \text{Gl. 3}$$

berechnen. Damit ist zumindest die maximale Konzentrationsüberhöhung in einfacher Weise auf die Quellstärke, die Quellhöhe und die Windgeschwindigkeit und -richtung zurückzuführen. Je mehr sich der Wind parallel zur Trasse ausrichtet (θ-->90°), desto höher ist die maximale Konzentration. Der relevante Einflussstreifen wird aber immer schmaler (Gl. 2). Die maximale Überhöhung ist umgekehrt proportional zur Windgeschwindigkeit am Standort. Der standortbezogene, zeitliche Mittelwert der maximalen Zusatzbelastung errechnet sich unter Verwendung der Häufigkeitsverteilung der Windgeschwindigkeit.

Die Konzentrationsüberhöhung durch Stickoxide ist wegen der im Vergleich zu Ozon 10fach geringeren Quellstärke ebenfalls zu vernachlässigen. Die Zusatzbelastung für das obige Szenario ist maximal 0,04 µg/m³ (0,02 ppb).

Eliminiert man die Windrichtung aus Gl. 1 und Gl. 2, so erhält man einen Zusammenhang zwischen der maximalen Überhöhung und dem zugehörigen Abstand, der für das Szenario in Abbildung A4 dargestellt ist. Im Bereich außerhalb eines Bandes von 50 m beidseitig von der Stromtrasse ist die Konzentrationsüberhöhung für Ozon immer kleiner als 3 µg/m³ (1,5 ppb). Auch hier muss eine genaue standortbezogenen Analyse die Häufigkeitsverteilungen der Windgeschwindigkeit und Ausbreitungsklassen berücksichtigt werden.

Selbst bei ungünstigen Windrichtungen ist die Zusatzbelastung im Abstand von mehr als 100 m zu vernachlässigen. Außerdem ist zu bemerken, dass mit der Annahme eines Wertes von 8 m für die Quellhöhe ein minimaler Wert und für die Quellstärke mit 30 µg/(m·s) ein maximaler Wert angenommen wurden. Bei Verdopplung der Quellhöhe auf 16 m und Halbierung der Quellstärke reduzieren sich die Werte der Konzentrationsüberhöhung um den Faktor 4.

Bei den Berechnungen wurden keine chemischen Reaktionen, z. B. die Oxidation von NO zu NO_2 durch O_3 berücksichtigt. Hinsichtlich Ozon bedeutet dies eine konservative Betrachtung, da Ozonverluste nicht eingerechnet wurden.

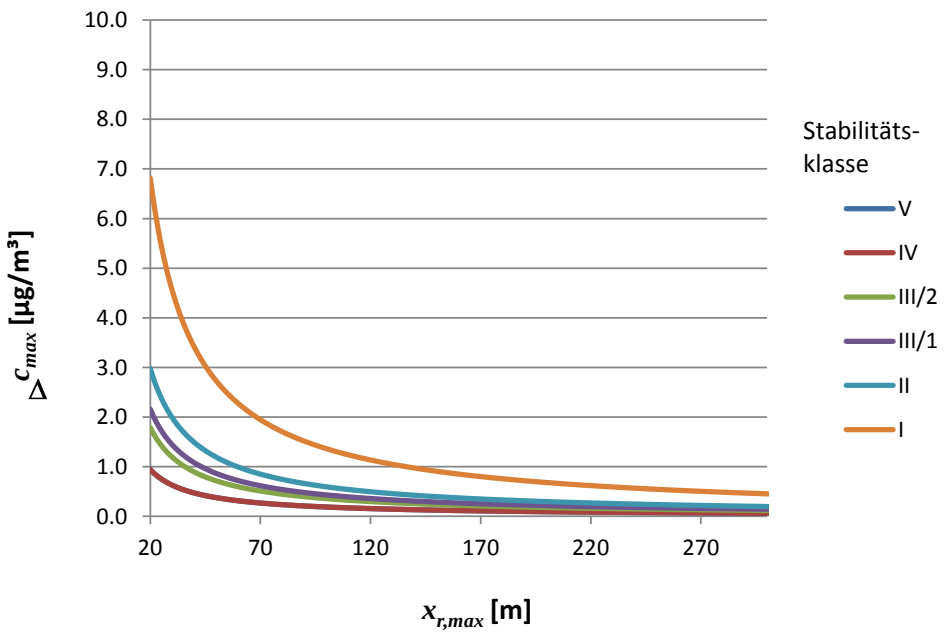

Abb. A4: Maximale Überhöhung der bodennahen Ozonkonzentration als Funktion des zugehörigen Abstandes von der Trasse: u=5 m/s, z_s=8 m, Q=2·30 µg/(m·s).

Fazit: Eine umwelt- und gesundheitsrelevante bodennahe Zusatzbelastung durch Ozon und Stickoxide geht von einer HGÜ-Trasse nicht aus.

Literatur Anhang B

39. BImSchV	Neununddreißigste Verordnung zur Durchführung des Bundes-Immissionsschutzgesetzes Verordnung über Luftqualitätsstandards und Emissionshöchstmengen vom 2. August 2010 (BGBl. I S. 1065).
Chen und Davidson 2002	Chen J, Davidson JH. Ozone Production in the Positive DC Corona Discharge: Model and Comparison to Experiments. Plasma Chemistry and Plasma Processing 2002 22(4): 495-522.
Esplin 1995	Esplin GJ. Approximate solution to the general line source problem. Atmospheric Environment 1995 29(12):1459-1463.
Roach 1973	Roach JF. Experimental oxidant production rates for EHV transmission lines and theoretical estimates of ozone concentration near operating lines. Proc. of IEES PES Summer Meeting & EHV/UHV Conference Vancouver, July 15-20, 1973.
TA Luft 1986	Technische Anleitung zur Reinhaltung der Luft. Erste Allgemeine Verwaltungsvorschrift zum Bundes-Immissionsschutzgesetz vom 27. Februar 1986 GMBl.S.95 ber S. 202. http://www.umwelt-online.de.