

Darstellung gesundheitlicher Gefährdungen von elektrischen und elektromagnetischen Feldern

(von Prof. Dr.-Ing. Hans Martin 24.7.2014)

Gliederung

- 1 Anspruch
 - 2 Gesundheitliche Gefährdungen allgemein
 - 3 Stand der Forschung zu elektrischen Feldern
 - 4 Physiologische und psychische Auswirkungen
 - 5 Zusammenfassung
 - 6 Quellenhinweise
- Anhang 1: Zusammenstellung der relevanten physikalischen Messgrößen

1 Anspruch

In dem Gesetz über die Umweltverträglichkeitsprüfung (UVPG) wird in § 2 (1) der Umfang der von diesem Gesetz geforderten Umweltverträglichkeitsprüfung definiert:

„Die Umweltverträglichkeitsprüfung ist ein unselbständiger Teil verwaltungsbehördlicher Verfahren, die der Entscheidung über die Zulässigkeit von Vorhaben dienen. Die Umweltverträglichkeitsprüfung umfasst die Ermittlung, Beschreibung und Bewertung der unmittelbaren und mittelbaren Auswirkungen eines Vorhabens auf

*1. **Menschen, einschließlich der menschlichen Gesundheit, Tiere, Pflanzen und die biologische Vielfalt, ...“**¹*

Mit dieser Darstellung der gesundheitlichen Gefährdungen von elektrischen und elektromagnetischen Feldern sollen wissenschaftliche Erkenntnisse zusammengestellt werden, die die Gesundheit der betroffenen Menschen beeinträchtigen können.

2 Gesundheitliche Gefährdungen allgemein

In den letzten 100 Jahren haben sich gesundheitliche Schädigungen bei neu eingeführten Techniken eingestellt, die man am Anfang der technischen Einführung weitgehend ausgeschlossen hatte. Als Beispiele sind die Schädigungen durch Röntgenstrahlung, die Erkrankungen bei Expositionen von Stoffen wie Asbest, Dioxin oder polyzyklische aromatische Kohlenwasserstoffe (kurz PAK) sowie die eingetretenen GAU und Super-GAU bei havarierten Atomkraftwerken zu nennen.

In all diesen Beispielen habe die Ingenieure, die Chemiker oder die Physiker jeweils die Ungefährlichkeit behauptet und die Warner vor den möglichen Gefahren als Unwissende, Kritikaster oder als Innovationsgegner beschimpft. Leider hat die Zeit die Warner bestätigt. In den genannten Beispielen (die sich um ein Vielfaches erweitern lassen), wurden die Behauptungen der Ungefährlichkeit widerlegt. Die Hybris dieser Innovatoren hat leider zu unsäglichem Leid geführt, wenn man an die Geschädigten und die Toden denkt.

Aus diesen Katastrophen und Unglücken haben sich neue Wissenschaftsbereiche entwickelt, die versuchen, die zu erwartenden Risiken besser einschätzen und bewerten zu können. Das Risikomanagement versucht durch standardisierte Methoden die potentielle Gefährdung einer neuen Entwicklung abzuschätzen und letztlich die Unbedenklichkeit aufzuzeigen. Für technische Innovationen hat sich das technische Risikomanagement, das Umweltrisikomanagement und das Produkt- und Medizin-Risikomanagement herausgebildet, die besonders die Gefährdung der Umwelt und des Menschen im Fokus haben. Für Projekte wie SUEDLINK müssen im

Rahmen der Umweltverträglichkeitsprüfung nach dem UVPG die gesundheitlichen Gefährdungen aufgezeigt und bewertet werden.

Auch in der Rechtswissenschaft hat sich ein Umdenken hinsichtlich der Beweislast von Schädigungen durchgesetzt. Musste früher der Geschädigte nachweisen, dass er durch einen Stoff oder eine technische Einrichtung geschädigt wurde, muss er nach dem heutigen Rechtsverständnis nur plausibel aufzeigen, dass die Schädigung durch ein Produkt oder eine technische Einrichtung hervorgerufen wurde. Der Produzent muss dann nachweisen, dass sein Produkt oder die von ihm gefertigte technische Einrichtung völlig gefahrlos ist und keine Schädigung bewirken kann.

Gerade in der Medizintechnik und bei den Arzneimitteln haben sich sehr aufwendige Verfahren etabliert, um die Ungefährlichkeit vor der Markteinführung nachzuweisen.

3 Stand der Forschung zu elektrischen und elektromagnetischen Feldern

Hinsichtlich der Wirkung von elektrischen Feldern um Freileitungen auf die Natur und den Menschen muss man zwischen Wechselstrom und Gleichstrom und den jeweiligen Spannungen unterscheiden.

3.1 Wechselstrom/Drehstrom

Bei Wechselstromleitungen (im Folgenden wird mit Wechselstrom sowohl 2-adriger Wechselstrom als auch Drehstrom bezeichnet) bauen sich elektromagnetische Felder um die Übertragungskabeln auf, die je nach Höhe der Spannung unterschiedliche Feldstärken und Reichweiten haben (siehe Abb. 1). In dieser Grafik werden die unterschiedlichen Reichweiten der Feldstärke bei Freileitungen und bei Erdkabel einer 380-kV-Wechselstromleitung einmal für maximalen und bei durchschnittlichem Leitungsdurchfluss dargestellt. Man sieht, dass ein Erdkabel eine viel geringere Reichweite der Feldstärke aufweist, da die Leiter dicht beieinander liegen und die Erde um das Kabel einen hohen Dämpfungswert ausweist.

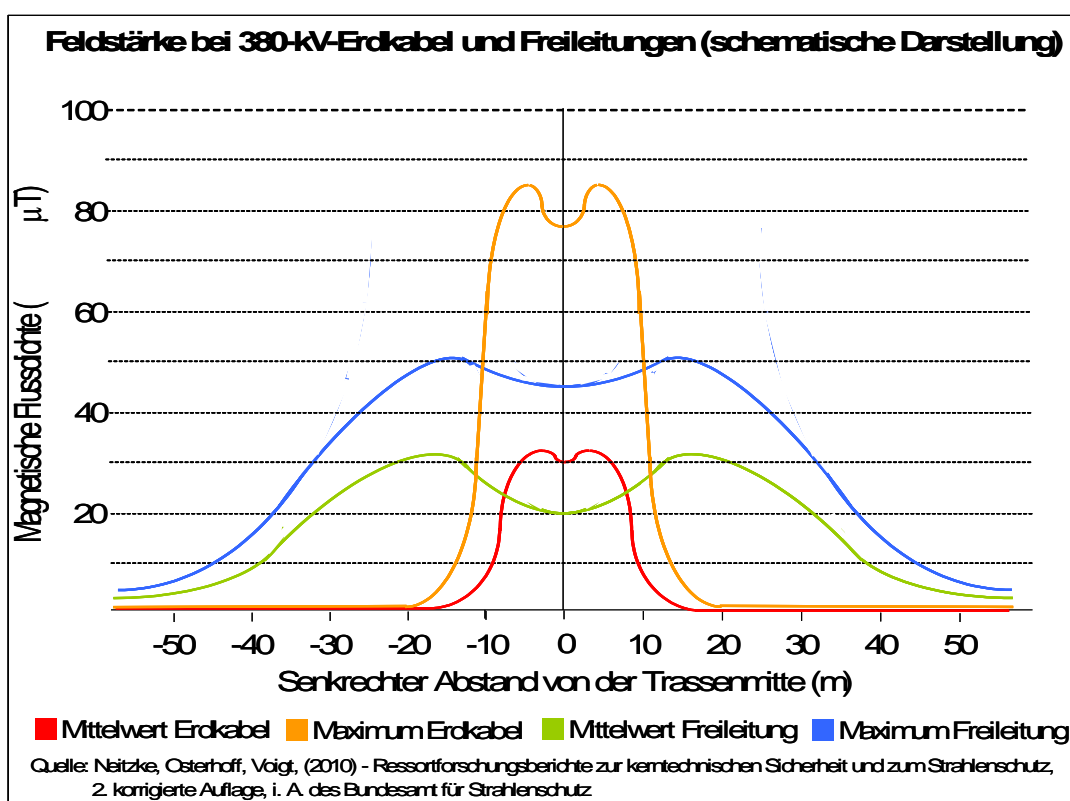


Abb. 1 Feldstärke bei 380-kV-Erdkabel und Freileitung ²

Kritisch sind die Hochspannungsleitungen bei Wechselströmen mit 110 kV bis 380 kV, da ihre elektromagnetischen Felder das Wachstum von Pflanzen und Kleintieren unter und neben diesen Leitungen beeinträchtigen. So wurden erhöhte Mutationsraten bei Pflanzen und Tieren festgestellt.

Für Wechselstromleitungen haben mehrere Studien aufgezeigt (z.B. Abschlussbericht der EMF II-Studie des Instituts für Medizinische Statistik und Dokumentation der Universität Mainz (2000) ³, aktuell das ARIMMORA-Projekt im 7. Rahmenprogramm der EU (seit 1.10.2011) ⁴ oder Forschungen des Forschungszentrums für elektromagnetische Unverträglichkeit (femu) der Uniklinik RWTH Aachen (2013) ⁵), dass es mehr oder weniger starke Wirkungen gibt. Deshalb wurden Richtwerte in verschiedenen Verordnungen und Gesetze erlassen, unterhalb deren man eine geringere Wahrscheinlichkeit von schädigenden Ereignissen vermutet. Eine absolute Unschädlichkeit konnte wissenschaftlich nicht festgestellt werden, da es auch unterhalb dieser Grenzwerte vereinzelt zu Schädigungen kommt.

So wurden folgende Richtwerte festgelegt.

a) In der **26. Bundesimmissionsschutzverordnung** (BlmSchV) (1996/2013), Anlage 1⁶

| | Elektrisches Feld | Magnetfeld |
|----------------------------------------|-------------------------------------------------------------------------------|-----------------------------------------------------------------------|
| | <i>Elektrische Feldstärke in Kilovolt pro Meter (kV/m) (effektiv)</i> | <i>Magnetische Flussdichte in Mikrottesla (µT) (effektiv)</i> |
| <i>Wechselstrom mit 50 Hz</i> | <i>5 kV/m</i> | <i>200 µT</i> |
| <i>Gleichstrom (DC-direkt current)</i> | <i>k. A.</i> | <i>500 µT</i> |

(Die Verordnung berücksichtigt nicht die Wirkungen elektrischer, magnetischer und elektromagnetischer Felder auf elektrisch oder elektronisch betriebene Implantate.)“

b) In der **EU-Arbeitsschutz-Richtlinie** 2013/35/EU (2013), Anhang II ⁷

„EXPOSITIONSGRENZWERTE

Expositionsgrenzwerte unter 1 Hz (Tabelle A1) sind Grenzwerte für statische Magnetfelder, die nicht durch das Körpergewebe beeinflusst werden.

Expositionsgrenzwerte für Frequenzen von 1 Hz bis zu 10 MHz (Tabelle A2) sind Grenzen für elektrische Felder, die im Körper infolge einer Exposition gegenüber zeitvariablen elektrischen und magnetischen Feldern induziert werden.

Expositionsgrenzwerte für eine externe magnetische Flussdichte von 0 bis zu 1 Hz

Die Expositionsgrenzwerte für sensorische Wirkungen sind die Grenzwerte für normale Arbeitsbedingungen (Tabelle A1) und beziehen sich auf Schwindelgefühle und andere physiologische Symptome aufgrund einer Störung des Gleichgewichtsorgans, wie sie hauptsächlich dann auftritt, wenn Personen sich in einem statischen magnetischen Feld bewegen.

Die Expositionsgrenzwerte für gesundheitliche Wirkungen unter kontrollierten Arbeitsbedingungen (Tabelle A1) gelten befristet während der Arbeitszeit, wenn dies aus praxis- oder verfahrensbedingten Gründen gerechtfertigt ist, sofern Vorsorgemaßnahmen wie eine Kontrolle der Bewegungen und eine Unterrichtung der Arbeitnehmer festgelegt wurden.

Tabelle A1

Expositionsgrenzwerte für externe magnetische Flussdichte (B_0) bis zu 1 Hz

| | Expositionsgrenzwerte für sensorische Wirkungen |
|----------------------------------|-----------------------------------------------------|
| Normale Arbeitsbedingungen | 2 T |
| Lokale Exposition von Gliedmaßen | 8 T |
| | Expositionsgrenzwerte für gesundheitliche Wirkungen |
| Kontrollierte Arbeitsbedingungen | 8 T |

Expositionsgrenzwerte für gesundheitliche Wirkungen bei internen elektrischen Feldstärken von 1 Hz bis 10 MHz

Die Expositionsgrenzwerte für gesundheitliche Wirkungen (Tabelle A2) beziehen sich auf die elektrische Stimulation des gesamten peripheren und autonomen Nervengewebes im Körper, einschließlich des Kopfes

Tabelle A2

Expositionsgrenzwerte für gesundheitliche Wirkungen bei internen elektrischen Feldstärken von 1 Hz bis 10 MHz

| Frequenzbereich | Expositionsgrenzwerte für gesundheitliche Wirkungen |
|--------------------------------------------|------------------------------------------------------|
| $1 \text{ Hz} \leq f < 3 \text{ kHz}$ | $1,1 \text{ Vm}^{-1}$ (Spitzenwert) |
| $3 \text{ kHz} \leq f \leq 10 \text{ MHz}$ | $3,8 \times 10^{-4} f \text{ Vm}^{-1}$ (Spitzenwert) |

Anmerkung A2-1:

f ist die Frequenz in Hertz (Hz).

Expositionsgrenzwerte für sensorische Wirkungen bei internen elektrischen Feldstärken von 1 Hz bis 400 MHz

Die Expositionsgrenzwerte für sensorische Wirkungen (Tabelle A3) beziehen sich auf die Wirkungen elektrischer Felder auf das zentrale Nervensystem im Kopf, d. h. Phosphene der Netzhaut und geringfügige vorübergehende Veränderungen bestimmter Hirnfunktionen.

Tabelle A3

Expositionsgrenzwerte für sensorische Wirkungen bei internen elektrischen Feldstärken von 1 Hz bis 400 Hz

| Frequenzbereich | Expositionsgrenzwerte für sensorische Wirkungen |
|--------------------------------------------|-------------------------------------------------|
| $1 \text{ Hz} \leq f < 10 \text{ Hz}$ | $0,7/f \text{ Vm}^{-1}$ (Spitzenwert) |
| $10 \text{ Hz} \leq f < 25 \text{ Hz}$ | $0,07 \text{ Vm}^{-1}$ (Spitzenwert) |
| $25 \text{ Hz} \leq f \leq 400 \text{ Hz}$ | $0,0028 f \text{ Vm}^{-1}$ (Spitzenwert) |

Anmerkung A3-1:

f ist die Frequenz in Hertz (Hz).“

Man erkennt, dass die Grenzwerte weit auseinanderklaffen. Wird in der 26. BImSCHV eine niedrige magnetische Feldflussdichte für Wechselstrom angegeben, sind die Grenzwerte in der EU-Arbeitsschutzrichtlinie um vieles höher. Bei der elektrischen Feldstärke verhalten sich die Grenzwerte umgekehrt. Die EU-Arbeitsschutzrichtlinie gibt geringere Grenzwerte vor als die 26. BImSchV.

Berücksichtigt man noch die Empfehlungen der WHO von 2006⁸, dann liegen die Werte für die magnetische Feldflussdichte dazwischen. („The recommended limits are time-weighted average of 200 mT during the working day for occupational exposure, with a ceiling value of 2 T. A continuous exposure limit of 40 mT is given for the general public.“)

3.2 Gleichstrom

Ganz anders sieht es für Hochspannungs-Gleichstrom-Übertragungsleitungen (HGÜ) aus. Hierzu findet man in der Forschungsliteratur fast keine Angaben. Dies begründet sich für Deutschland aus der bisher noch wenig eingesetzten Technik in Freileitungen über Land oder Erdleitungen. Eine der wenigen HGÜ-Freileitungen in Deutschland ist die Gleichstrom-Kurz-Kupplung (GKK) Etzenricht, die das deutsche Hochspannungsnetz mit dem tschechischen Netz verbindet. Lange HGÜ-Leitungen sind bisher von Deutschland aus nur als Seekabeln in die skandinavischen Länder realisiert worden.

Gegenwärtig werden mehrere HGÜ-Leitungen zum Anschluss der Offshore-Windparks (BorWin, DoWin, HelWin und SylWin) in der Nordsee an die Umspannwerke Diele, Dörpen und Büttel gebaut und umfassen Längen zwischen 45 bis 132 km Seekabel und 28 bis 90 km Landkabel. Beim Projekts „DoWin 2“ werden zwei Kabelstränge mit 640 kV und einer maximalen Leitungskapazität von 900 MW im Emsland als Erdkabel verlegt, um den Offshore-Windparks „DoWin 2“ an das Umspannwerk Dörpen/West im Emsland anzubinden.

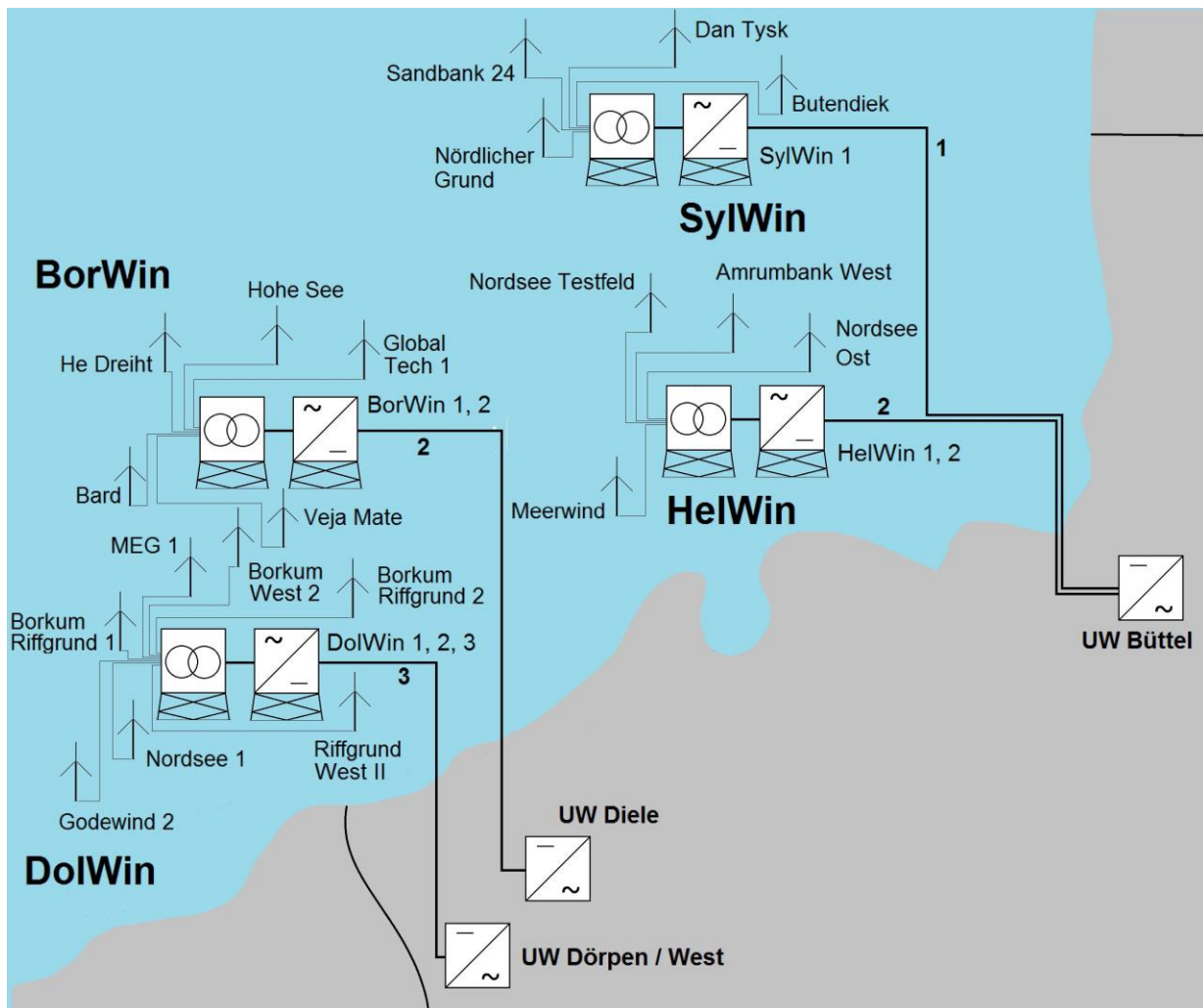


Abb.2 HGÜ-Offshore-Plattformen für Windparks in der Nordsee ⁹

Und bei den bisher aufgebauten Überlandleitungen wie in Südafrika vom Cabora Bassa-Staudamm nach Johannesburg (Länge 1420 km, Spannung 533 kV, max. Übertragungsleistung von 1920 MW) oder der bisher längsten HGÜ zwischen Kasachstan (Ekibastus) und Russland (Tambow) mit 2400 km (Spannung 750 kV, max. Übertragungsleistung von 6000 MW) wurden keine Untersuchungen zu gesundheitlichen Risiken durchgeführt.

Die geplante SUEDLINK Hochspannungs-Gleichstrom-Übertragungsleitung (HGÜ) (Länge ca. 800 km) soll bei einer Spannung von 500 kV die Kapazität von 4000 MW übertragen. Ein Strang geht von Wilster bei Hamburg bis zum Atomkraftwerk Grafenrheinfeld bei Schweinfurt und der zweite Strang von Brunsbüttel nach Großgartach in Baden-Württemberg.

4 Physiologische und psychische Auswirkungen

In der Unfallverhütungsvorschrift zu „Elektromagnetischen Felder BVG B11“¹⁰ wird am Anfang ausgeführt, dass „*elektrische, magnetische oder elektromagnetische Felder (...) unmittelbar im Gewebe wirken können (z.B. Reizwirkung, Wärmewirkung)*“ und Effekte hervorrufen, wie Reizung der Sinnesorgane sowie Nerven- und Muskelzellen, Beeinflussung der Herzaktion und Wärmeeffekte.

Im Handbuch der WHO¹¹ zur „Herstellen eines Dialogs über die Risiken elektromagnetischer Felder“ werden die möglichen gesundheitlichen Risiken wie folgt beschrieben:

„Die Wirkungen externer EMF(Elektromagnetischen Felder)-Expositionen auf den menschlichen Körper und seine Zellen hängen in erster Linie von der Frequenz und von der Größe bzw. Stärke des elektromagnetischen Feldes ab. Die Frequenz beschreibt die Zahl der Oszillationen oder Schwingungen pro Sekunde. Niederfrequente elektromagnetische Felder durchdringen den Körper vollständig, während hochfrequente Felder teilweise absorbiert werden und nur geringfügig ins Gewebe eindringen.

Niederfrequente elektrische Felder beeinflussen die Verteilung der elektrischen Ladungen an der Oberfläche leitender Gewebe und führen dazu, dass im Körper elektrischer Strom fließt (Abb. 3A).



Abb. 3A



Abb. 3B

Niederfrequente magnetische Felder induzieren im menschlichen Körper zirkulierende elektrische Ströme (Abb. 3B). Die Stärke dieser induzierten Ströme hängt von der Intensität des äußeren Magnetfelds und der Größe der vom Strom durchflossenen Schleife ab. Bei entsprechenden Stromdichten kann es zu einer Stimulation von Nerven und Muskelzellen kommen.“¹¹

Als Ergebnis wissenschaftlicher Forschung für niederfrequente Felder wird ausgeführt.

*„Der wissenschaftliche Kenntnisstand über die gesundheitlichen Wirkungen von EMF ist hoch. Er stützt sich auf eine Vielzahl epidemiologischer, tierexperimenteller und in vitro durchgeführter Studien. Eine Vielzahl von Gesundheitsfolgen von Fortpflanzungsstörungen bis hin zu Herz-Kreislauf-Erkrankungen und neurodegenerativen Krankheiten ist bereits untersucht worden. **Am schlüssigsten sind die Befunde, die derzeit für Kinderleukämie vorliegen.** Im Jahr 2001 überprüfte eine Expertenarbeitsgruppe des Internationalen Krebsforschungszentrums (IARC) der WHO Studien zur Kanzerogenität statischer und extrem niederfrequenter (ELF) elektrischer und magnetischer Felder. Ausgehend von der Standardklassifikation der IARC, die auf einer Abwägung der human-, tier- und laborexperimentellen Befundlage basiert,*

wurden die ELF-magnetischen Felder aufgrund von epidemiologischen Untersuchungen der Kinderleukämie als möglicherweise Krebs erregend bei Menschen eingestuft.“¹¹

Das Forschungszentrum für Elektro-Magnetische Umweltverträglichkeit (femu) des Instituts für Arbeits- und Sozialmedizin der Universitätsklinik der RWTH Aachen hat folgende Wirkungen niederfrequenter Felder zusammengestellt.⁵

„Wirkung elektrischer und magnetischer Felder

- Niederfrequente elektrische und magnetische Felder verursachen zusätzliche Ströme im Körper (elektrische Felder haben keine Frequenz, HM).
- Magnetfelder können leicht den Körper durchdringen.
- Elektrische Felder erzeugen vorwiegend elektrische Ladungseffekte an der Körperoberfläche.

Erwiesene Wirkungen niederfrequenter Felder

- Stimulation des Zentralnervensystems und der peripheren Nerven,
- Induktion von Nervenimpulsen und Muskelkontraktionen,
- Erzeugung transienter Phosphene (Lichtflackern) auf der Retina.

Diskutierte Wirkungen im Niederfrequenzbereich

- Neurodegenerative Erkrankungen
 - Amyotrophe Lateralsklerose (ALS) und Alzheimer: Hinweise auf ein erhöhtes Risiko für beruflich stark exponierte Personen,
 - schwer zu untersuchen, da keine offiziellen Register,
 - Expositionsabschätzung schwierig,
 - Diagnose schwierig,
 - Forschung läuft, z.B. geförderte vom Bundesamt für Strahlenschutz.
- Andere Wirkungen
 - andere Krebsarten
 - Nervensystem und Verhalten
 - neuroendokrines System
 - kardiovaskuläres System
 - Immunsystem
 - Reproduktionssystem

(nur wenige Hinweise und sehr heterogene Daten)“

Hinsichtlich der oft diskutierten Elektrosensibilität von Personen gibt ein aktueller Forschungsbefund mit Vögeln der Forschungsgruppe um Prof. Dr. Henrik Mouritsen an der Universität Oldenburg¹² aufschlussreiche Hinweise. Hinsichtlich der Wirkung des von Menschen produzierten elektromagnetischen Grundrauschens haben Biologen der Universität Oldenburg ein erstaunliches Ergebnis feststellen können. Das in Städten fast überall vorhandenen Grundrauschen elektromagnetischer Felder durch Wechselströme, Funkwellen von Radio und Fernsehen sowie Funkfrequenzen der mobilen Telekommunikation führt bei Vögel zur Desorientierung. Die Vermutung der Wissenschaftler geht so weit, dass sie auch Wirkungen des Grundrauschens annehmen, die bei sensiblen Personen für verschiedene krankhafte Symptome ursächlich sein können. Wie der ursächliche Störungsprozess verläuft, ist bisher unbekannt, aber die Forschungsgruppe will in den nächsten Jahren die ursächliche Einwirkung elektrischer und elektromagnetischer Felder auf Gehirnfunktionen bei Vögeln aufzeigen. Sie hat dabei die Hoffnung, dass sich diese Erkenntnisse auf Menschen übertragen lassen.

5 Zusammenfassung und Schlussfolgerungen

Hinsichtlich des wissenschaftlichen Erkenntnisstandes über gesundheitliche Auswirkungen von Hochspannungs-Gleichstrom-Übertragungs-Leitungen (HGÜ) kann festgestellt werden, dass er sehr gering ist. Bei Hochspannungs-Drehstrom/Wechselstrom-Übertragungs-Leitungen (HDÜ) gibt es viel mehr Erkenntnisse, da diese Technik seit über 100 Jahren in

Deutschland und den industrialisierten Ländern realisiert ist und gesundheitliche Folgen erkennbar wurden.

Da es bisher keine grundlegenden Studien zu den gesundheitlichen Gefährdungen durch HGÜ-Leitungen gibt, sollte vor einer breiten Realisierung grundlegende Forschungen zu den gesundheitlichen Wirkungen erforscht werden. Diese Umweltverträglichkeitsprüfung verlangt das UVPG.

Aus den Erfahrungen mit Hochspannungs-Wechselstrom-Leitungen und anderen Techniken muss stets die risikoärmste technische Lösung realisiert werden.

Dies bedeutet, dass in der Nähe von Wohngebieten die HGÜ-Leitungen als Erdkabel und mit genügend weitem Abstand (mindestens 400 Meter) verlegt werden sollen.

Grundsätzlich ist der Ausbau des Stromnetzes mit HGÜ-Leitungen in Deutschland zu hinterfragen, da es inzwischen zunehmend realisierte Beispiele gibt, wie die Stromversorgung in Deutschland durch weitgehend autarke Energiecluster, gelöst werden kann. Z.B. hat die Stadt Wolfhagen ihre Stromversorgung innerhalb von 6 Jahren auf 100 % Selbstversorgung mit Solarparks, Windkraftanlagen, einer Biogasanlage und Blockkraftheizwerke umgestellt. Dies geht nicht von heute auf morgen aber für Deutschland in einem Zeitraum von 10 bis 20 Jahren, wie die Studien des Fraunhofer-Instituts IWES in Kassel ¹³ aufzeigen.

6 Quellenhinweise

1. Gesetz über die Umweltverträglichkeitsprüfung in der Fassung der Bekanntmachung vom 24. Februar 2010 (BGBl. I S. 94) (das zuletzt durch Artikel 10 des Gesetzes vom 25. Juli 2013 (BGBl. I S. 2749) geändert worden ist)
2. Neitzke, Osterhoff, Voigt (2010) - Ressortforschungsberichte zur kerntechnischen Sicherheit und zum Strahlenschutz, 2. korrigierte Auflage, i. A. des Bundesamt für Strahlenschutz
3. Schüz, Joachim; Michaelis, Jörg (2000): Abschlussbericht der EMF II-Studie des Instituts für Medizinische Statistik und Dokumentation der Universität Mainz (IMSD – Technischer Bericht)
4. Advanced Research on Interaction Mechanisms of electroMagnetic exposures with Organisms for Risk Assessment (ARIMMORA), Projekt im 7. Rahmenprogramm der EU, GA Number: 282891 (seit 1.10.2011) (<http://arimmora-fp7.eu/index.php?page=project-overview>)
5. Forschungszentrums für elektro-magnetische Umweltverträglichkeit (femu) des Instituts für Arbeits- und Sozialmedizin der Uniklinik RWTH Aachen (2013/14), Vortrag von Sarah Drießen „Stromleitungen und elektromagnetische Felder“ auf dem Symposium zur "Umwelt und Akzeptanz beim Netz- und Speicherausbau" am 10.3.2014 in Berlin
6. 26. Bundesimmissionsschutzverordnung (BImSchV) (1996/2013), Anlage 1 (<http://www.gesetze-im-internet.de/bundesrecht/bimschg/gesamt.pdf>)
7. EU-Arbeitsschutz-Richtlinie 2013/35/EU (2013), Anhang II (<http://www.baua.de/de/Themen-von-A-Z/Elektromagnetische-Felder/Gesetzliche-Regelungen.html>)
8. Electromagnetic fields and public health (Empfehlungen der WHO von 2006) (<http://www.who.int/peh-emf/publications/facts/fs299/en/>)
9. Offshore-HGÜ-Systeme, Artikel in Wikipedia (<http://de.wikipedia.org/wiki/Offshore-HG%C3%9C-Systeme>)
10. Unfallverhütungsvorschrift „Elektromagnetische Felder“ (BGV B11) (2006), Hauptverband der gewerblichen Berufsgenossenschaften, Carl Heymann Verlag
11. World Health Organization (2002) (Weltgesundheitsorganisation): Herstellen eines Dialogs über die Risiken elektromagnetischer Felder, Genf (<http://www.who.int/peh-emf/publications/riskgerman/en/>)
12. Nature, Vol. 509, 15.5.2014 S. 353-356: Anthropogenic electromagnetic noise disrupts magnetic compass orientation in a migratory bird von Svenja Engels, Nils-Lasse Schneider, Nele Lefeldt, Christine Maira Hein, Manuela Zapka, Andreas Michalik, Dana Elbers, Achim Kittel, P. J. Hore & Henrik Mouritsen
13. M. Braun, F. Schlögl, F. Marten, H. Barth, D. Hidalgo, M. Jansen, K. Diwold, M. Asensio, L. Löwer, L. Mariano Faiella, D. Schneider, M. Schreiber, P. Hochloff, M. Teeken, R. Emmerich (2013): Forschungsprojekt: TWENTIES Transmission system operation with large penetration of Wind and other renewable Electricity sources in Networks by means of

Weitere Literatur zu gesundheitlichen Risiken bei elektrischen und elektromagnetischen Felder

IARC Monographs on the Evaluation of Carcinogenic Risks to Humans (2002): Non-Ionizing Radiation, Part 1: Static and Extremely Low-Frequency (ELF) Electric and Magnetic Fields (die IARC - International Agency for Research on Cancer ist eine Untergruppe der World Health Organisation – WHO)

International Commission for Non-Ionizing Radiation Protection. ICNIRP guidelines for limiting exposure to time-varying electric, magnetic, and electromagnetic fields (up to 300 GHz). Health Phys. 74, 494–522 (1998).

International Commission for Non-Ionizing Radiation Protection. ICNIRP statement on the “Guidelines for limiting exposure to time-varying electric, magnetic, and electromagnetic fields (up to 300 GHz)”. Health Phys. 97, 257–258 (2009).

World Health Organization (2007): Research Agenda for Extremely Low Frequency Fields (http://www.who.int/peh-emf/research/elf_research_agenda_2007.pdf?ua=1)

World Health Organization (2007): Extremely Low Frequency Fields. Environmental Health Criteria 238. Geneva, World Health Organization

World Health Organization (2007): Electromagnetic fields and public health. Static electric and magnetic fields (<http://www.who.int/peh-emf/publications/facts/fs322/en>)

Eine der ausführlichsten Literaturzusammenstellung zu gesundheitlichen Risiken bei niederfrequenten elektromagnetischen Felder hat das Projekt ARIMMORA auf seiner homepage veröffentlicht (<http://arimmora-fp7.eu/index.php?page=working-literature-database>)

Anhang 1: Zusammenstellung der relevanten physikalischen Messgrößen

Um die physikalischen Eigenschaften solcher Felder zu beschreiben, haben sich folgende Begriffe und Definitionen durchgesetzt:

Elektrische Feldstärke **E**

U ist die Potentialdifferenz (Spannung) zwischen zwei leitfähigen Gegenständen und **d** der räumliche Abstand dazwischen. Die Einheit der elektrischen Feldstärke ist das Volt pro Meter (V/m).

Magnetische Feldstärke **H**

I ist der in einem unendlich langen Leiter fließende Strom und $2\pi r$ die Länge einer geschlossenen, um diesen Leiter liegende magnetische Feldlinie. Die Einheit der magnetischen Feldstärke ist das Ampere pro Meter (A/m).

Magnetische Flussdichte **B** (bei niederfrequenten Feldern $f < 30$ KHz)

μ_{rel} und μ_0 sind die relativen und absoluten Permeabilitätskonstanten. Da für die Luft und die meisten nichtferromagnetischen Materialien, so auch für biologische Substanzen, $\mu_{rel} = 1$ ist, kann in vielen Fällen $B [\mu T] = 1 \times 1,256 \times 10^{-6} [Vs/Am] \times H [A/m]$ als Größengleichung benutzt werden. Die Einheit der magnetischen Flussdichte ist das Tesla (T). Gebräuchlich sind die Untereinheiten Millitesla (mT), Mikrottesla (μT) und Nanotesla (nT).

Die Wirkungen auf den Menschen lassen sich mit folgenden Sachverhalten beschreiben (nach Eggert 1994, BfAM):

Wirkung auf den Menschen

Zur Bewertung der direkten Wirkung elektromagnetischer Felder auf den Menschen sind die Stromdichte **j** und die spezifische Absorptionsrate **SAR** im Körper (abhängig von der Frequenz) definiert worden.

Stromdichte **j** im Körpergewebe

Für Felder mit niedrigen Frequenzen ($f < 30$ KHz) wird die Stromdichte im Körpergewebe, die durch influenzierte oder induzierte Ströme verursacht wird und an Nerven- und Muskelzellen Reize auslöst, benutzt.

[**j** [mA/m²] ist das Formelzeichen und die Einheit ist Milliampere pro Quadratmeter (bzw. Mikroampere pro Quadratzentimeter).]

Spezifische Absorption **SA**

Die spezifische Absorption **SA** gibt die von den Feldern bewirkte Wärmeentwicklung in Joule [J] im Körpergewebe [gemessen in kg] an.

SA [J/kg] ist die Formelbezeichnung und wird in Joule pro Kilogramm Körpermasse gemessen.

Spezifische Absorptionsrate **SAR**

Für Felder mit höheren Frequenzen ($f > 30$ KHz) wird die spezifische Absorptionsrate als Maßeinheit für die im Organismus je Masseneinheit absorbierte und in Wärme umgesetzte Energie benutzt.

SAR [W/kg] ist die Formelbezeichnung und die Einheit ist Watt pro Kilogramm Körpermasse.

Beide Größen sind nur schwer am Menschen direkt messbar. Sie werden in Modellrechnungen auf der Basis der physikalischen Feldgrößen ermittelt.

Leistungsdichte **S**

Die Leistungsdichte **S** gibt die Energie in Watt an, die durch eine Fläche von einem Quadratmeter fließt. **S** [W/m²] ist die Formelbezeichnung und die Einheiten sind Watt pro Quadratmeter.