

Zeitschrift: Bulletin des Schweizerischen Elektrotechnischen Vereins, des Verbandes Schweizerischer Elektrizitätsunternehmen = Bulletin de l'Association suisse des électriciens, de l'Association des entreprises électriques suisses

Herausgeber: Schweizerischer Elektrotechnischer Verein ; Verband Schweizerischer Elektrizitätsunternehmen

Band: 79 (1988)

Heft: 22

Artikel: Die Auswirkungen elektromagnetischer Felder in der Nähe von Hochspannungsleitungen und -schaltanlagen

Autor: Rollier, Y.

DOI: <https://doi.org/10.5169/seals-904105>

Nutzungsbedingungen

Die ETH-Bibliothek ist die Anbieterin der digitalisierten Zeitschriften. Sie besitzt keine Urheberrechte an den Zeitschriften und ist nicht verantwortlich für deren Inhalte. Die Rechte liegen in der Regel bei den Herausgebern beziehungsweise den externen Rechteinhabern. [Siehe Rechtliche Hinweise.](#)

Conditions d'utilisation

L'ETH Library est le fournisseur des revues numérisées. Elle ne détient aucun droit d'auteur sur les revues et n'est pas responsable de leur contenu. En règle générale, les droits sont détenus par les éditeurs ou les détenteurs de droits externes. [Voir Informations légales.](#)

Terms of use

The ETH Library is the provider of the digitised journals. It does not own any copyrights to the journals and is not responsible for their content. The rights usually lie with the publishers or the external rights holders. [See Legal notice.](#)

Download PDF: 30.01.2025

ETH-Bibliothek Zürich, E-Periodica, <https://www.e-periodica.ch>

Die Auswirkungen elektromagnetischer Felder in der Nähe von Hochspannungsleitungen und -schaltanlagen

Y. Rollier

Haben die von elektrischen Anlagen erzeugten elektromagnetischen Felder schädliche Auswirkungen auf die Umwelt, auf Pflanzen und Lebewesen? Selbst wenn in diesem Bereich gewisse Unsicherheiten existieren, ist doch zu betonen, dass seit vielen Jahren Spezialisten der Elektrotechnik, der Biologie, der Medizin und Epidemiologie sowie Kommissionen und internationale Organisationen diese Fragen untersuchen. Beim heutigen Stand des Wissens kann man mit Gewissheit feststellen, dass die elektromagnetischen Felder von Hoch- und Höchstspannungsfreileitungen und -schaltanlagen keine schädlichen Auswirkungen auf den Menschen, auf Tiere und Pflanzen haben. Es ist allerdings möglich, unter gewissen Bedingungen das elektrische Feld in der Nähe solcher Anlagen wahrzunehmen, etwa in Form von unangenehmen Sekundäreffekten; aus diesem Grund sind die in verschiedenen Ländern vorgeschriebenen oder vorgeschlagenen Grenzwerte in der gleichen Größenordnung wie die maximalen Feldstärken, die man in der Nähe dieser Anlagen messen kann.

Adresse des Autors

Yves Rollier, S.A. l'Energie de l'Ouest-Suisse (EOS), Place de la Gare 12, 1001 Lausanne.

1. Allgemeines

1.1 Das elektromagnetische Umfeld

Unsere Umwelt ist von elektromagnetischen Feldern umgeben: Sobald elektrische Ladungen auftreten, gibt es auch ein elektrisches Feld, und sobald eine Verschiebung oder eine Ausrichtung von elektrischen Ladungen stattfindet, tritt auch ein magnetisches Feld auf.

Diese elektromagnetischen Felder können natürlichen oder künstlichen Ursprungs sein. Solche Felder gibt es auch im menschlichen Körper, in dem bestimmte biologische Vorgänge elektrischer oder elektrochemischer Natur sind. So sind z.B. Nervenreaktionen auf Veränderungen der elektrischen Polarisation der Zellen zurückzuführen (Wanderung von Kalium- oder Natriumionen).

Bei den elektromagnetischen Feldern kann es sich um Gleich- oder Wechselfelder handeln, je nach der Art des elektrischen Stroms, der sie induziert. In Abhängigkeit von ihrer Frequenz oder ihrer Wellenlänge können Wechselfelder Auswirkungen unterschiedlicher Art auf biologische Organismen haben. Wechselfelder sind immer elektromagnetisch, d.h. dass gleichzeitig elektrische und magnetische Felder auftreten. Reine elektrische Felder oder reine magnetische Felder existieren nur im statischen Zustand, z.B. zwischen den Polen einer Batterie oder in der Nähe eines Permanentmagneten.

1.2 Auswirkungen elektromagnetischer Felder und Strahlungen

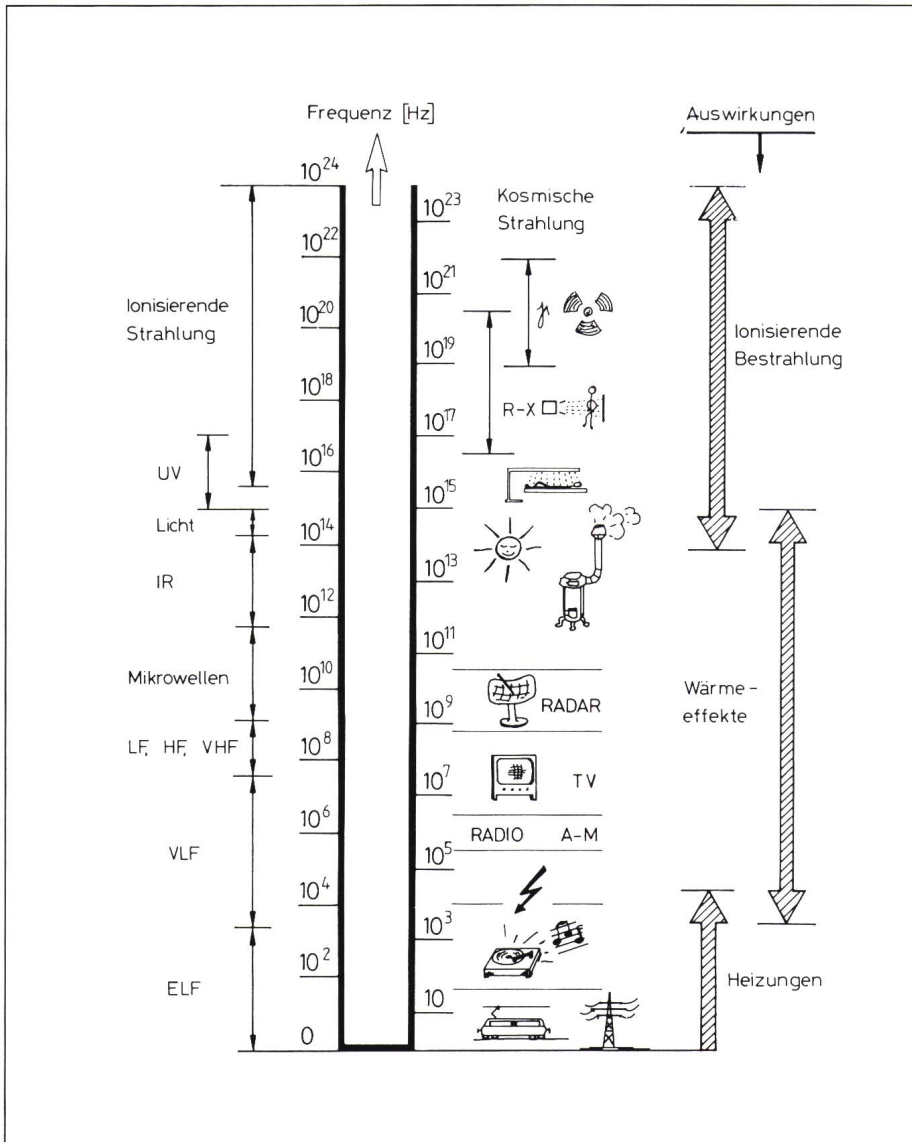
Man kann die bekannten Auswirkungen elektromagnetischer Felder in drei Hauptkategorien unterteilen (Figur 1):

- Ionisation infolge Strahlung bei sehr hohen Frequenzen: kosmische Strahlen, radioaktive Substanzen, Röntgen- und Ultraviolettstrahlen
- Wärmewirkungen infolge von Wellen im mittleren Frequenzbereich: Infrarotstrahlung (Sonne, Heizung, Mikrowellen- und Induktionsöfen)
- Reizung und Anregung der Nerven und Muskeln infolge von Feldern mit sehr niedriger Frequenz: Schall, elektrischer Starkstrom (16 $\frac{2}{3}$, 50 und 60 Hz).

Die Felder und Strahlungen der beiden ersten Kategorien können bei einigen heute üblichen Anwendungen schädliche Auswirkungen haben, während dies praktisch nicht der Fall ist bei den Feldern, die durch Starkstromanlagen wie z.B. Schaltanlagen und Hochspannungsleitungen verursacht werden.

2. Die elektromagnetischen Felder von Hochspannungsleitungen und -schaltanlagen und ihr Einfluss auf die Umwelt

Alle Wechselstromanlagen erzeugen in ihrer nahen Umgebung elektromagnetische Felder (elektrische und magnetische Felder), die die natürlichen elektromagnetischen Bedingungen verändern und gewisse Auswirkungen oder gewisse Störungen hervorrufen. Seit Jahren wurden zahlreiche Studien durchgeführt, um den elektromagnetischen Einfluss von elektrischen Anlagen auf die materielle und biologische Umwelt zu prüfen. Als Folge der Steigerung der Betriebsspannungen der Hochspannungsleitungen und der immer rascher ansteigenden Zahl von elektrischen Anlagen wurden in letzter Zeit erneut Besorgnisse über allfällige



Figur 1 Elektromagnetische Felder: Die verschiedenen Frequenzen und ihre Auswirkungen

physiologische Auswirkungen von elektrischen und magnetischen Feldern geäußert, die in der Nähe von elektrischen Anlagen auftreten.

2.1 Die elektromagnetischen Felder von Hochspannungsleitungen und -schaltanlagen

In der Umgebung elektrotechnischer Anlagen sind die elektromagnetischen Felder weder homogen noch gleichförmig zwischen zwei Punkten: Sie werden von der Form und Art der elektrischen Leiter und von allen Gegenständen, die sich in ihrer Einflusszone befinden, beeinflusst. Auch die Felder von Hochspannungsleitungen variieren, sie sind am stärksten in der Nähe der Leitung in der Mitte der Spannweite zwischen zwei Masten und verringern sich, sobald man sich

diesem nähert oder sich von den Leitern entfernt. Die Hochspannungsleitungen transportieren dreiphasigen Strom und umfassen normalerweise 2×3 Bündel von Leitern (2×3 Phasen). Durch eine günstige Anordnung dieser drei Phasen zueinander kann man die Felder auf minimale Werte verringern. In der Praxis bestimmt man die Feldstärke am Boden, gemessen oder berechnet in einem Meter Höhe. Tabelle I gibt die maximal möglichen und die berechneten Werte an. Die Diagramme von Figur 2 stellen die seitliche Verteilung der Felder in der Mitte der Spannweite von projektierten 380-kV-Leitungen der EOS dar.

2.2 Das Phänomen der Induktion

In einem elektrisch leitenden Material, das sich in einem elektromagnetischen Wechselfeld befindet, werden

Spannungen und Ströme induziert. Die induzierten Ströme stammen von kleinen Schwingungen von geladenen Teilchen. In einem metallischen Gegenstand handelt es sich im wesentlichen um Bewegungen von Elektronen, während im Gewebe und in Flüssigkeiten von Lebewesen die Ionenleitung überwiegt (Verschiebung von Ionen). Die Stärke dieser induzierten Ströme hängt von der Stärke des Feldes, seiner Frequenz, von der Form und von den Abmessungen des Gegenstandes sowie seinem Widerstand gegen Erde ab. So wird beispielsweise in einer erwachsenen Person, die sich aufrecht in einem elektrischen Vertikalfeld von 1 kV/m Stärke befindet, ein Strom von etwa 0,015 mA induziert.

2.3 Der Korona-Effekt

An der Oberfläche der Leiter von Hochspannungsleitungen und an den Aufhängungen sind die elektrischen Felder sehr stark, sie werden noch an einzelnen Punkten verstärkt wie z.B. an Spitzen, Kratzern, Ablagerungen von Verunreinigungen, Wassertropfen und Rauhreif. Wenn an diesen Stellen das elektrische Feld ein bestimmtes Niveau übersteigt (11 bis 18 kV_{eff}/cm je nach den meteorologischen Bedingungen), so entstehen stark lokalisierte elektrische Entladungen, die eine Ionisation der Luft erzeugen: Dies ist der Korona-Effekt, der folgende Auswirkungen hat:

- zusätzliche Transportverluste
- Störung von Radiosendungen im Bereich niedriger Frequenzen
- Lärm
- eine selten sichtbare, leuchtende Korona (im wesentlichen UV-Strahlung)
- eine ganz geringe Erzeugung von Ozon (O₃) und von Stickoxiden (NO_x).

Maximale elektrische/magnetische Felder

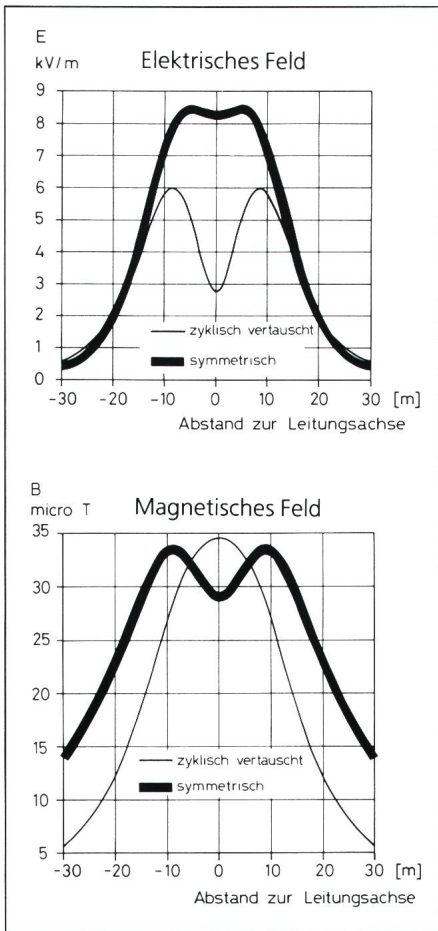
220-kV-Leitung: 6,4 kV/m / 0,030 mT
380-kV-Leitung: 9,6 kV/m / 0,055 mT

380/132 kV, 2000/380-A-Leitung der EOS-SBB (2 Stränge EOS, 1 Strang SBB)

Vertauschte Phasenlage:
max 5,98 kV/m / 0,035 mT

Symmetrische Phasenlage:
max 8,45 kV/m / 0,034 mT

Tabelle I: Elektromagnetische Felder von 220/380-kV-Hochspannungsleitungen



Figur 2 Seitliche Verteilung der elektromagnetischen Felder einer 380-kV-Hochspannungsleitung der EOS bei unterschiedlicher Stranganordnung

- Untersuchte Auswirkungen auf Menschen und Tiere durch**
- induzierte Ströme und Felder
 - elektrische Entladungen
 - Lärm infolge Koronaentladung
 - Schadstoffe: Ozon O₃ und Stickoxide NO_x als Folge des Koronaeffektes
- Untersuchte Auswirkungen auf Pflanzen durch**
- induzierte Ströme und Felder
 - induzierter Koronaeffekt
 - Schadstoffe: Ozon O₃ und Stickoxide NO_x
- Untersuchte Auswirkungen auf Werkstoffe und Geräte**
- Fahrzeuge
 - Gebäude und metallische Konstruktionen
 - Bewässerungsanlagen
 - Herzschrittmacher
 - Zuleitungen zu Sprengladungen
 - leicht entflammare Mischungen
 - Radio- und Fernsehstörungen infolge des Koronaeffektes

Tabelle II: Auswirkungen elektromagnetischer Felder

3. Die Auswirkungen elektromagnetischer Felder in der Nähe von Hochspannungsleitungen und -schaltanlagen

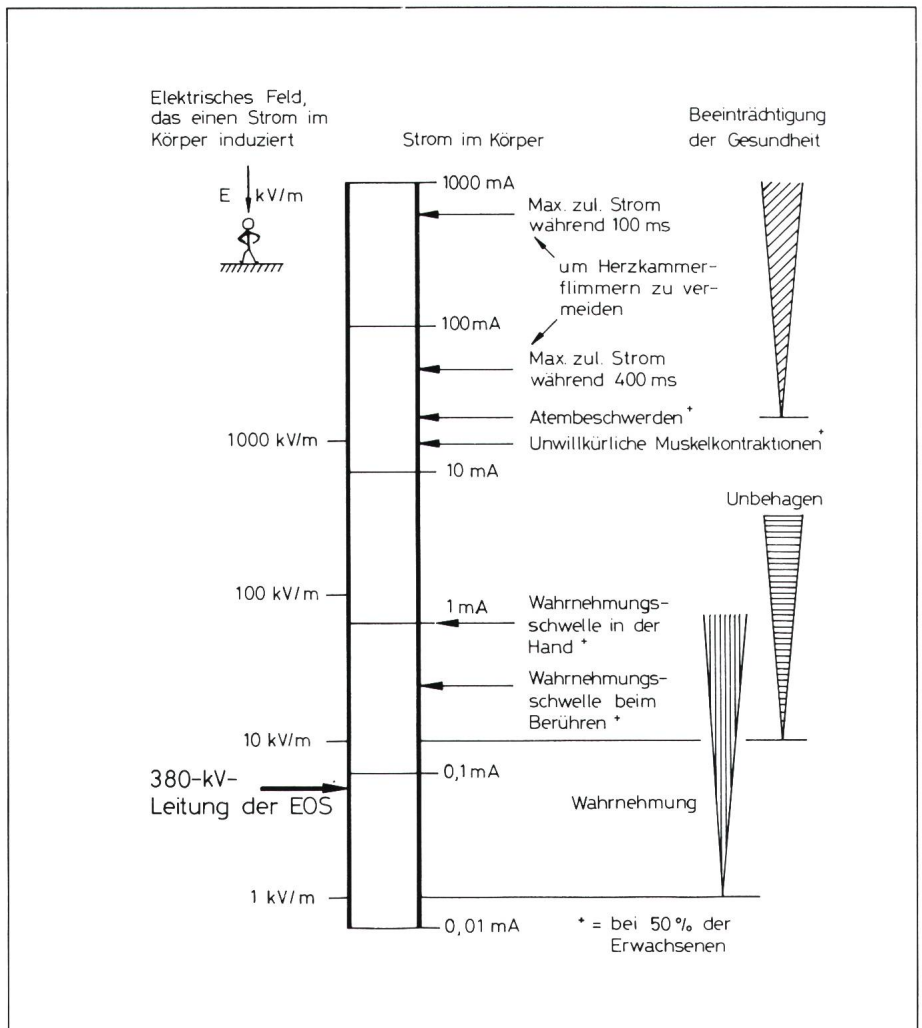
Nachdem in den sechziger und siebziger Jahren einige wissenschaftliche Berichte und Mitteilungen Langzeitwirkungen elektromagnetischer Felder auf die Gesundheit von Tieren und Menschen behauptet hatten, wurden in der Zwischenzeit zahlreiche Studien und Forschungsprojekte über sämtliche Auswirkungen dieser Felder durchgeführt, und zwar insbesondere über solche, die von Hochspannungselektroanlagen herrühren. Diese verschiedenen Studien können in drei Kategorien eingeteilt werden, die in Tabelle II dargestellt sind.

3.1 Biologische Auswirkungen von Hochspannungsleitungen und -schaltstationen

Da die biologischen Funktionen des Körpers auf elektrischen Strömen und

Spannungen beruhen, muss man annehmen, dass elektromagnetische Wechselfelder durch Induktion und Polarisation auf den Körper einwirken können, dessen Gewebe ein guter elektrischer Leiter ist. Es stellt sich daher die Frage, ob Spannungen und Ströme, die im Körper von natürlichen und künstlichen elektromagnetischen Feldern induziert werden, unmittelbar oder langfristig gefährlich werden können. Zur Untersuchung dieser Frage haben Fachleute der Elektrotechnik, Biologie und Medizin, die in Stromproduktions- und Verteilgesellschaften, in Universitätsforschungsinstituten und in internationalen Organisationen arbeiten [1-9+14], zahlreiche Untersuchungen durchgeführt:

- die Messung, Berechnung und Beurteilung der Stärke von elektromagnetischen Feldern in der Nähe von elektrischen Anlagen
- die Beurteilung der Auswirkungen von elektromagnetischen Feldern auf den menschlichen Körper mit Hilfe von mathematischen Modellen



Figur 3 Auswirkungen des elektrischen Feldes auf den menschlichen Körper

- Laborversuche mit lebenden Zellen und mit Pflanzen und Tieren, um den Einfluss elektromagnetischer Felder zu bestimmen und Grundlagen für Versuche mit Menschen festzulegen
- Laborversuche mit Freiwilligen, um den Einfluss der stärksten Felder, die in der Praxis auftreten, kennenzulernen
- Versuche mit Pflanzenkulturen und Tieren unter Hochspannungsleitungen bis 1200 kV
- Epidemiologische Studien über Bevölkerungsgruppen, die elektromagnetischen Feldern besonders ausgesetzt sind.

3.2 Kurzfristige biologische Auswirkungen von Hochspannungsanlagen

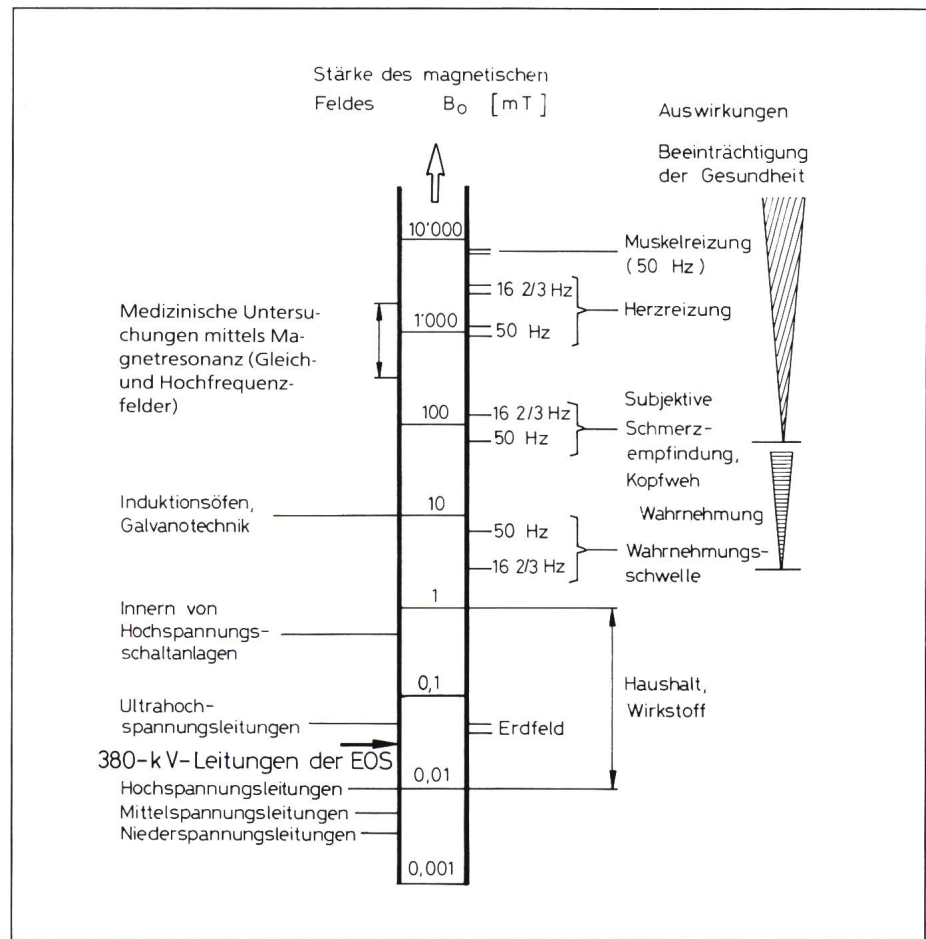
3.2.1 Auswirkungen auf den menschlichen Körper

Die durchgeführten Untersuchungen haben es gestattet, die Grenzen festzustellen, bei denen elektrischer Wechselstrom und elektromagnetische Felder wahrgenommen werden und Auswirkungen auf den menschlichen Körper haben.

● Auswirkungen elektrischer Felder:

Die maximalen elektrischen Felder am Boden unter 380-kV-Hochspannungsleitungen und -schaltanlagen liegen zwischen 10 und 15 kV/m. Sie induzieren im menschlichen Körper Ströme zwischen 0,15 und 0,23 mA, was unter dem Wahrnehmungsvermögen von 50% der Bevölkerung liegt (0,36 mA). Im Vergleich zum unteren Grenzwert für Muskelkontraktionen (9 mA bei 0,5% der Personen) und dem Herzmuskelflimmern (100 mA bei 0,5% der Personen) sind diese Ströme 40- bis 700mal schwächer, wie Figur 3 zeigt.

Es ist dennoch möglich, dass einzelne Personen das elektrische Feld dieser Anlagen wahrnehmen, ohne dass dies eine Beeinträchtigung oder Gefährdung bedeutet, denn Laborversuche haben gezeigt, dass ein sehr geringer Prozentsatz der Bevölkerung bereits Felder von 1 bis 5 kV/m feststellen kann. Es ist auch möglich, dass Influenzeffekte in metallischen Gegenständen, die sich unter den Hochspannungsleitungen befinden, Induktionsströme und Entladungen hervorrufen können, die von den Personen, die sich unter den Hochspannungsleitungen befinden und diese Gegenstände berühren, wahrgenommen werden



Figur 4 Auswirkungen des magnetischen Feldes auf den menschlichen Körper

können. Diese störenden Erscheinungen können mit einfachen technischen Mitteln, die wenig kosten, sowie durch die Vorschrift zur Erdung metallischer Gegenstände vermieden werden.

● Auswirkungen magnetischer Felder:

Die maximale Feldstärke der magnetischen Induktion am Boden in der Nähe von 380-kV-Hochspannungsleitungen und -schaltanlagen liegt bei 0,055 bzw. 0,5 mT. Sie liegt deutlich tiefer als die Grenzwerte für die Wahrnehmbarkeit magnetisch bedingter Lichterscheinungen in den Augen, für Kopfschmerzen oder für die Beeinflussung des Herzens, die bei 5 mT, 60 mT bzw. 1 bis 2 T liegen. Im täglichen Leben, auf der Strasse, im Haus oder bei der Arbeit befindet man sich in Magnetfeldern, die gleich stark oder stärker sind als jene, die man unter den Hochspannungsleitungen antrifft, wie dies Figur 4 darstellt.

Man kann daher feststellen, dass die elektromagnetischen Felder von Hochspannungsleitungen oder -schaltanlagen keine kurzfristigen Auswirkungen auf die Gesundheit des Men-

schlichen haben. Dennoch kann nicht ausgeschlossen werden, dass gewisse Personen das elektrische Feld unter Hochspannungsleitungen durch Primär- oder Sekundäreffekte wahrnehmen können, die jedoch nicht gefährlich sind.

3.2.2 Auswirkungen auf Pflanzen und Tiere

● Auswirkungen auf Pflanzen:

Der einzige Effekt des elektrischen Feldes, den man feststellen konnte, ist die Zerstörung der äussersten Zweige von Bäumen, die sich zu nahe an Hochspannungsleitungen befinden, aufgrund einer induzierten Korona.

● Auswirkungen auf Tiere:

Der Einfluss elektromagnetischer Felder auf das Verhalten gewisser Tiere wurde durch Versuche festgestellt. Er ist auf die Wahrnehmung dieser Felder (Vibrieren der Haare, relativ starke induzierte Ströme in Pfoten, Mikroschocks) zurückzuführen, in Verbindung mit der Unmöglichkeit des Verständnisses dieser Phänomene durch das Tier. Man hat die Hoch-

spannungsleitungen beschuldigt, die Orientierung von Vögeln zu beeinträchtigen und sie zu elektrisieren; Studien haben gezeigt, dass Vögel magnetische Wechselfelder mit einer Stärke, die etwa jenem des magnetischen Gleichfeldes der Erde vergleichbar ist, wahrnehmen können. Man kann daraus aber nicht schlüssige Beweise für die Desorientierung der Vögel ableiten, die im Verlauf ihres Vogelzuges Hunderte, ja Tausende von Hochspannungsleitungen überqueren. Für grosse Vögel besteht die Gefahr, dass sie durch einen elektrischen Schlag getötet werden, wenn sie gleichzeitig einen Leiter und an Erde liegende Teile oder die Leiter von zwei Phasen berühren; dies kann vor allem bei Leitungen im Mittelspannungsbereich, bis maximal 70 kV, auftreten; bei höheren Spannungen sind die Leiter weit genug voneinander entfernt, so dass diese Gefahr vermieden wird.

3.3 Biologische Langzeitauswirkungen von Hochspannungsanlagen

Die biologischen Langzeitauswirkungen von elektromagnetischen Feldern auf Pflanzen und Tiere wurden mit Hilfe von Laborversuchen und unter Höchst- und Ultrahochspannungsleitungen untersucht. Um eventuelle Auswirkungen auf den Menschen festzustellen, wurden ferner zahlreiche epidemiologische Untersuchungen durchgeführt.

Neuere Veröffentlichungen der WHO, der Gesundheitsdepartemente von Ontario (Kanada) und des Staates von New York, des Eidg. Verkehrs- und Energiewirtschaftsdepartementes, des Schweizerischen Elektrotechnischen Vereins, des amerikanischen Energieministeriums sowie der Bonneville Power Administration, der EDF usw. [1-9 und 13-14] stellen eine Synthese der wichtigsten Studien dar, die bis 1987 veröffentlicht wurden.

3.3.1 Versuche im Labor und unter Hochspannungsleitungen

Laborversuche: Lebende Zellen von Pflanzen (Blumen, Getreidekörner, Keimlinge) und Tieren (Hühnerembryos, Mäuse, Ratten, Katzen, Affen und Schweine usw.) wurden elektromagnetischen Felder ausgesetzt. Dabei wurden verschiedene Effekte auf die Zellen, das Nervensystem und das Verhalten der Tiere festgestellt. Diese Auswirkungen stellen keine grössere Gefährdung dar, denn sie sind zumeist reversibel. Insgesamt kann man dar-

aus schliessen, dass beim heutigen Stand des Wissens keine signifikanten und bleibenden Auswirkungen festgestellt wurden, die die Gesundheit beeinträchtigen würden.

Versuche unter Hochspannungsleitungen: In den USA wurden zahlreiche Versuche unter Leitungen im Ultrahochspannungsbereich von 500 bis 1200 kV unternommen, bei denen elektrische Felder zwischen 2 und 16 kV/m auftraten:

- Versuche mit Blumen, Getreidekörnern, Zwiebeln, Futterpflanzen, Bäumen und Sträuchern
- Versuche mit Säugetieren (Rinder und andere in Farmen gezüchtete Tiere, kleine Säuger im Wald), Vögeln, Fischen, Insekten (Bienen).

Die Versuche mit Pflanzen haben gezeigt, dass elektromagnetische Felder weder schädigende Auswirkungen noch Produktionsverluste verursachen.

Andere Versuche haben auch gezeigt, dass die elektromagnetischen Felder von Hochspannungsleitungen keine schädlichen Auswirkungen auf Tiere haben, mit einer Ausnahme: Bienenvölker in Bienenstöcken aus Holz, die sich in elektrischen Feldern von 2 bis 12 kV/m befinden. Man hat dort eine verstärkte Reizbarkeit und Sterberate der Bienen sowie eine übermässige Verstopfung der Bienenstöcke mit Propolis festgestellt. Diese Effekte sind auf die im Inneren der Bienenstände induzierten Ströme zurückzuführen, die bei den Bienen zu elektrischen Mikroschocks führen. Um diese Effekte zu vermeiden, genügt es, die Bienenstände durch eine metallische und geerdete Umhüllung zu schützen. Untersuchungen an Vögeln, die in der Nähe von Hochspannungsleitungen oder auf Hochspannungsmasten nisten, haben bestätigt, dass elektromagnetische Felder keine Auswirkungen auf sie haben, und gezeigt, dass ihr Verhalten vor allem durch die Vegetation in der Umgebung bestimmt ist.

3.3.2 Epidemiologische Untersuchungen

Seit den siebziger Jahren wurden zahlreiche epidemiologische Untersuchungen der Krankheitshäufigkeit und der Sterblichkeit in verschiedenen Ländern durchgeführt (USA, Kanada, UdSSR, Grossbritannien, Schweden, Spanien, Tschechoslowakei, China), und zwar an Bevölkerungsgruppen, die in der Nähe von Hochspannungsanlagen leben oder die beruflich elek-

tromagnetischen Feldern ausgesetzt sind.

Verschiedene neuere Artikel nehmen auf einige epidemiologische Untersuchungen Bezug, die behaupten, dass schwache magnetische Felder eine Erhöhung des Risikos für Krebs, Leukämie, Fehlgeburten und genetische Mutationen bewirken. Nach Ansicht der Fachleute enthalten diese Studien folgende Schwächen: die Grösse der untersuchten Bevölkerungsgruppen, die Beurteilung der Intensität und Dauer der Exposition und die Berücksichtigung anderer Faktoren, die die festgestellte Beeinträchtigung der Gesundheit in den geprüften Bevölkerungsgruppen mit beeinflussen können. Keine der sonstigen zahlreichen epidemiologischen Untersuchungen hat einen solchen Zusammenhang gezeigt. Nach dem heutigen Stand des Wissens hat man weder einen Ursache-Wirkung-Zusammenhang noch einen Zusammenhang zwischen der Dosis und den Reaktionen bei schwachen magnetischen Feldern und den genannten Gesundheitseffekten festgestellt. Bei den bekannten Krebsursachen wie Rauchen, chemischen Substanzen und Strahlen ist das Risiko bei starker Exposition wesentlich höher. Die oben genannten Untersuchungen beziehen sich immer auf schwache magnetische Felder, während zahlreiche Personen in wesentlich stärkeren Feldern leben oder arbeiten und daher höhere Belastungsdosen akkumulieren, ohne dass man negative Effekte festgestellt hätte. Grundsätzlich weisen die Statistiken für diese Krankheiten für schwache Expositionen so starke Fluktuationen auf, dass es schwierig ist, daraus mit Sicherheit auf ein Risiko zu schliessen.

Es ergibt sich damit, dass elektromagnetische Felder das Risiko der oben genannten Beeinträchtigung sicher nicht in signifikanter Weise erhöhen. Falls ein solches Risiko existiert, so kann es allenfalls sehr klein sein im Vergleich zu anderen Ursachen, die diese Krankheiten verursachen, und nach dem heutigen Stand des Wissens ist es nicht möglich, dieses Risiko zu widerlegen oder es zu bestätigen.

3.4 Schlussfolgerungen bezüglich der biologischen Auswirkungen auf den Menschen

Beim heutigen Stand des Wissens bleiben die von der WHO in Kapitel VIII ihrer Studie aus dem Jahr 1984 gezogenen Schlussfolgerungen nach wie vor gültig [1]:

«...aus der kritischen Prüfung sämtlicher Laborstudien in vivo und in vitro sowie der Untersuchungen am Menschen kann man folgende Schlussfolgerungen ziehen:

- Es war nicht möglich, für die Gesundheit schädliche Wirkungen der Exposition auf elektrische Felder extrem niedriger Frequenz (ELF), wie man sie normalerweise in der Umgebung und an Arbeitsplätzen findet, zu bestätigen.

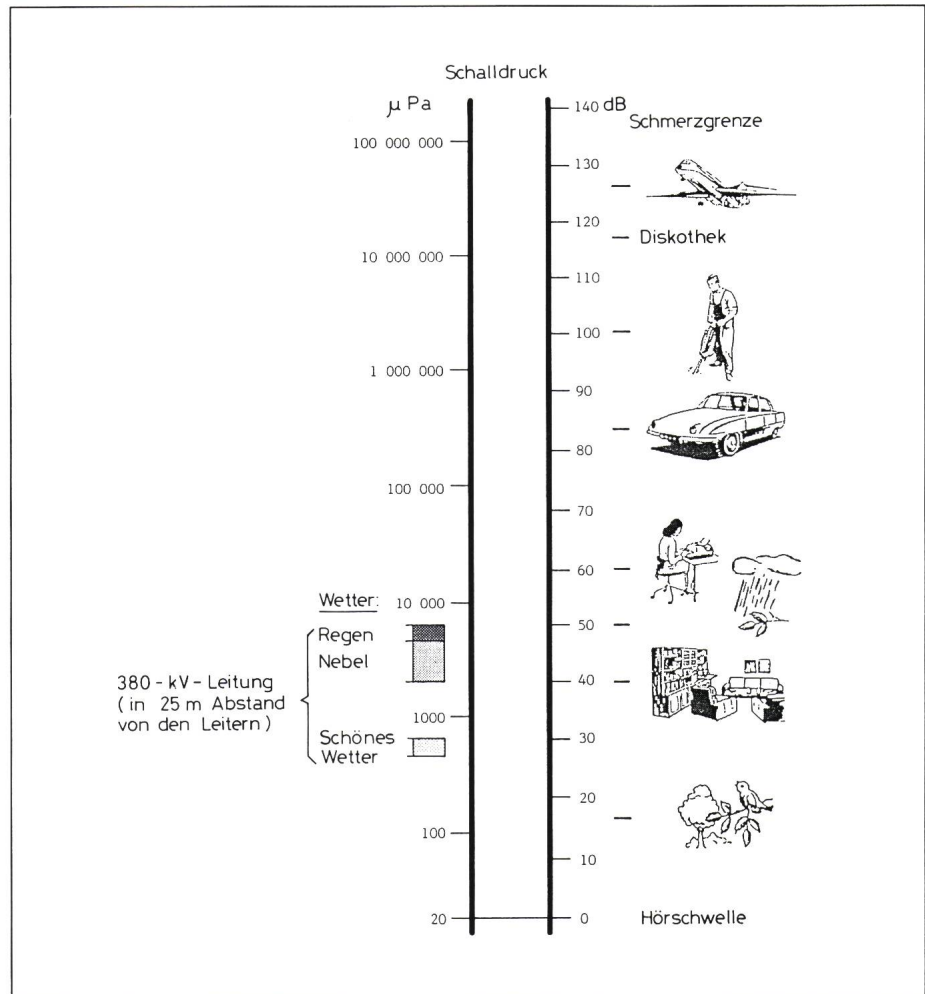
- Einige Personen können kleine elektrische Entladungen in Feldern von mehr als 3 kV/m empfinden und Felder zwischen 2 und 10 kV/m wahrnehmen. Es gibt jedoch heute keinerlei wissenschaftliche Daten, die bedeuten, dass die Wahrnehmung eines elektrischen Feldes für die Gesundheit schädliche Auswirkungen haben könnte.

- Die Exposition auf elektrische Felder extrem niedriger Frequenz kann Modifikationen in der Zelle, in der Physiologie und im Verhalten hervorrufen. Obwohl es nicht möglich ist, diese Erkenntnisse auf den Menschen zu übertragen, regen diese Studien zur Vorbeugung an, d.h. es gilt, unnötige Expositionen zu vermeiden.

- Sowohl der vorläufige Charakter der Ergebnisse der epidemiologischen Studien über den Anstieg der Krebsrate bei Kindern und Erwachsenen, die den von elektrischen Anlagen hervorgerufenen elektromagnetischen Feldern sehr niedriger Frequenzen ausgesetzt wurden, als auch die relativ niedrigen Werte dieses Anstiegs deuten darauf hin, dass – obwohl man die epidemiologischen Daten nicht widerlegen kann – man noch sehr viele Studien durchführen müsste, um sie als Basis für die Beurteilung des Risikos zu verwenden.»

Wenn man sich die bereits ausgeführten zahlreichen Studien und Untersuchungen vor Augen hält, wie auch die Tatsache, dass bei unzähligen Stromanwendungen Personen häufig stärkeren elektromagnetischen Feldern ausgesetzt sind als jene, die von Hochspannungsleitungen herrühren, so ist es sicher, dass, wenn ein bemerkbares Risiko existierte, man dieses bereits festgestellt hätte.

Man kann daher ein Gesundheitsrisiko aufgrund elektromagnetischer Felder, wie sie in der Umgebung von heutigen Anlagen zum Transport von Elektrizität bei hoher Spannung entstehen, praktisch ausschliessen.



Figur 5 Lärmemissionen von Hochspannungsleitungen infolge des Korona-Effektes

3.5 Der Korona-Effekt

Der Korona-Effekt und seine Auswirkungen wurden bereits in Abschnitt 2.3 erläutert. Durch entsprechende Massnahmen bezüglich Geometrie und Abmessungen der Leiter und ihrer Befestigungen (Aufhängung, Isolatoren) versuchen die Konstrukteure der Hochspannungsleitungen seit jeher, den Korona-Effekt zu verringern, um damit die Transportverluste und gleichzeitig auch den Lärm zu reduzieren. Während man bis zu mittleren und hohen Spannungen bis 100 kV den Korona-Effekt praktisch vollständig unterdrücken kann, ist dies bei höheren Spannungen nicht mehr möglich, wo er vor allem bei schlechter Witterung (Regen und Nebel) auftritt.

3.5.1 Transportverluste und leuchtende Korona

Die Verluste sind zwar nicht direkt störend, aus wirtschaftlichen Gründen ist man jedoch daran interessiert, sie so niedrig wie möglich zu halten. Die

selten sichtbare, leuchtende Korona ist für die Umgebung nicht störend.

3.5.2 Störungen von Radiosendungen

Der Korona-Effekt bewirkt die Emission von elektromagnetischen Wellen, die den Radioempfang stören können. Es handelt sich vor allem um Radiostörungen im Bereich der Mittel- und Langwellen. Radiowellen im Bereich der Frequenzmodulation und der TV-Empfang werden im allgemeinen nicht gestört, allenfalls bei schlechten meteorologischen Bedingungen in Regionen, wo der Empfang ohnehin sehr schwach ist. In der Schweiz begrenzen Vorschriften diese Störfelder [10].

3.5.3 Lärm

Der Korona-Effekt erzeugt ein Knistern unterschiedlicher Lautstärke. Dieses ist in der Umgebung von Hochspannungsleitungen bis 380 kV nicht störend. Bei höheren Spannungen nimmt es noch zu, da es aber bei Re-

gen am stärksten ist, wird es durch den von diesem verursachten Lärm überdeckt. In Figur 5 ist ein Vergleich des Geräusches einer 380-kV-Leitung mit anderen Lärmquellen unserer täglichen Umgebung dargestellt.

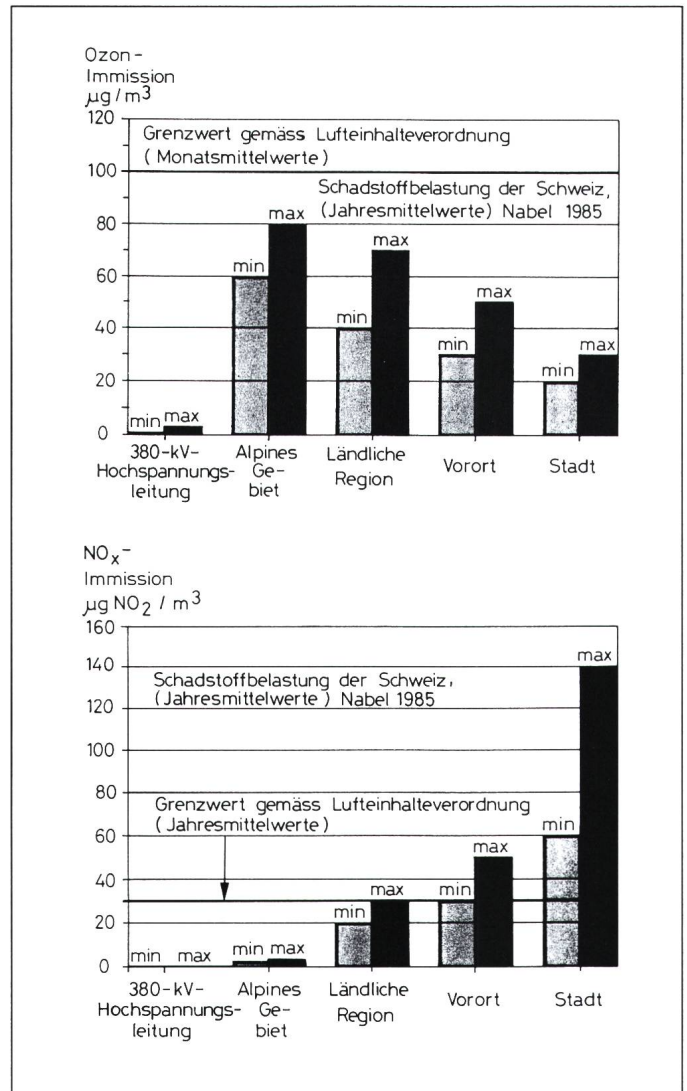
3.5.4 Erzeugung von Oxidantien und Ionen

Die Entladungen aufgrund des Korona-Effektes führen zur Bildung von Oxidantien und Ionen. Die Oxidantien sind im wesentlichen Ozon (O_3) und Stickoxide (NO_x). Diese zwei Gase treten in der Atmosphäre bereits auf, und zwar herrührend aus natürlichen oder künstlichen Quellen; oberhalb einer bestimmten Konzentration werden sie für biologische Systeme schädlich. Die Produktion von Stickoxiden aufgrund des Korona-Effektes macht nur etwa 5 bis 10% der Produktion von Ozon aus; man kann sich daher auf die Untersuchung des Ozons konzentrieren und daraus Rückschlüsse auf NO_x ziehen.

Die Erzeugung von Ozon mit elektrischen Entladungen ist wohlbekannt, denn diese Methode wird für die Produktion von Ozon für die Wasseraufbereitung und in Luftreinigern (Ionisatoren und Ozonatoren) angewandt. In diesen Fällen sind die Anlagen auf eine optimale Ozonproduktion ausgelegt, die sich bei etwa 100 bis 150 g O_3 /kWh bewegt. Im Fall des Korona-Effektes von Hochspannungsleitungen ist der Wirkungsgrad der Produktion von Ozon sehr niedrig, und es war nicht möglich, die Ozonkonzentration in der unmittelbaren Umgebung der Leitungen zu messen, denn sie erreichte nicht die Ansprechschwelle der Messapparate (1 ppb_v oder ungefähr 2 $\mu g O_3/m^3$). Man musste daher in den USA eine Versuchsleitung mit 775 kV mit sehr hohem Korona-Effekt errichten, um einige ppb_v Ozon während einem Dutzend Stunden des insgesamt 300stündigen Versuchs, der bei schlechtem Wetter durchgeführt wurde, messen zu können.

Aufgrund der Ergebnisse dieses Versuchs und von Versuchen, die in Hochspannungslabors durchgeführt wurden (z.B. 1986 an der ETH Zürich im Institut für elektrische Energieübertragung und Hochspannungstechnik), war es möglich, die Ozonproduktion von 380-kV-Leitungen zu berechnen und damit die Konzentration unter den ungünstigsten Voraussetzungen in der Schweiz zu bestimmen (4 dreiphasige 380-kV-Leitungen, Regen, enges Tal mit Inversion, die die Vertei-

Figur 6
 O_3 - und NO_x -Immissionen bei einer 380-kV-Hochspannungsleitung



lung der Schadstoffe in der Höhe behindert). Die Ozonkonzentration in unmittelbarer Nähe der Leitung wäre dabei 2 bis 3 $\mu g O_3/m^3$, d.h. ungefähr 10% der natürlichen Konzentration. Bei guter Witterung wäre diese Konzentration etwa 0,7 $\mu g O_3/m^3$, d.h. unterhalb der Messschwelle. Diese Konzentrationen sind sehr schwach im Vergleich zu den Ozonimmissionen, die aus natürlichen Quellen resultieren oder von photochemischen Reaktionen von Schadstoffen, die bei der Verbrennung an die Atmosphäre abgegeben werden; das gleiche gilt für die Konzentration von Stickoxiden aus dem Korona-Effekt, die im Vergleich zu jener aus anderen Quellen vernachlässigbar ist (Figur 6).

Beim Korona-Effekt entstehen Ionen, deren Dichte in unmittelbarer Nähe der Leiter bedeutend ist. Der Wechsel der Spannung erzeugt ein Kommen und Gehen der Ionen, die nur sehr schwer aus der Zone unmittel-

bar um die Leiter entweichen können und die sich rasch gegenseitig neutralisieren. In einigen Metern Abstand vom Leiter treten Ionen aufgrund des Korona-Effektes nur in absolut vernachlässigbarer Menge auf.

3.6 Einflüsse auf Werkstoffe und Geräte

In elektrischen Leitern können elektromagnetische Felder Spannungen und Ströme induzieren (vgl. Abschnitt 2.2) oder in dielektrischen Stoffen eine Polarisation bewirken (Vibrieren von Haaren in starken elektrischen Feldern). Wenn sich elektromagnetische Felder aus mehreren Quellen überlagern, können daraus Störungen resultieren. Manchmal wirken diese Phänomene gemeinsam. Durch Kapselung, gute Erdung, durch die Verwendung von Isolationsmaterial zur Abtrennung oder durch den Ersatz von leitenden Teilen ist es im allgemei-

nen möglich, die störenden Phänomene zu vermeiden oder zu unterdrücken.

In folgenden Fällen wurden Studien und Untersuchungen über die Auswirkungen elektromagnetischer Felder und der zu ergreifenden Gegenmassnahmen durchgeführt [4]:

- Auswirkungen auf Herzschrittmacher: Einige wenige Modelle werden durch elektromagnetische Felder beeinflusst; das Risiko für die Gesundheit ist jedoch gering und kann durch die Wahl eines guten Apparates beseitigt werden.
- Auswirkungen auf leicht entflammbare Materialien: Durch vorbeugende Massnahmen ist es möglich, Selbstentzündung zu vermeiden (Umfülleinrichtungen für Benzin).
- Sprengungen in der Nähe von Hochspannungsleitungen/Induktion in elektrischen Zündanlagen: In der Nähe von Leitungen können andere Systeme zum Zünden verwendet werden.
- Durch Beachtung besonderer Vorschriften kann die Gefährdung von Menschen durch Wasserstrahlen von Bewässerungsanlagen oder durch lange Bewässerungsleitungen in der Nähe von Hochspannungsleitungen vermieden werden.
- Grosse metallische Konstruktionen: Durch Beachtung der Vorschriften zur Erdung der metallischen Teile können die durch benachbarte Hochspannungsleitungen induzierten Ströme beschränkt werden.

4. Verordnung über die elektromagnetischen Felder von Hochspannungsleitungen

Nach dem heutigen Stand des Wissens gibt es keinen Grund, Grenzwerte für elektrische und magnetische Felder von Hochspannungsleitungen und -anlagen vorzuschreiben, da ihre Stärke so gering ist, dass sie keine Beeinträchtigung der Gesundheit verursachen. Um unangenehme Empfindungen als Folge der Wahrnehmung elektrischer Felder oder schwacher Entladungen, die durch das Phänomen der Induktion erzeugt werden können, zu vermeiden, könnte man einzig für das elektrische Feld folgende Grenzwerte für einen längerdauernden Aufenthalt empfehlen:

- für die Bevölkerung: etwa 10 kV/m
- für Arbeiter in Hochspannungsanlagen: etwa 20 kV/m.

5. Schlussfolgerungen

Unsere Umgebung ist erfüllt von elektromagnetischen Feldern, die mit denjenigen unseres Körpers im Wechselspiel stehen. Sie sind unsichtbar, sie treten manchmal durch Empfindungen und Sekundäreffekte in Erscheinung, sie erscheinen rätselhaft. Es ist daher normal, dass die Menschen beunruhigt sind, dass sie diese Felder manchmal nützlich und manchmal störend empfinden. Was erstaunen kann, ist, dass manchmal gewisse besondere Felder ganz genau hinterfragt werden, während man vergisst, dass man im täglichen Leben die Elektrizität in zahlreichen Formen nutzt, ohne sich jemals über die damit zusammenhängenden elektromagnetischen Felder zu beunruhigen, die häufig stärker sind als jene, die man fürchtet.

Selbst wenn, wie in allen Bereichen der wissenschaftlichen Kenntnisse, noch gewisse Unsicherheiten existieren, die zusätzliche Untersuchungen erfordern, kann man doch feststellen, dass die zahlreichen Untersuchungen, die in den letzten 20 Jahren durchgeführt wurden, genügend Information zutage gebracht haben, um sicher zu sein, dass die elektromagnetischen Felder extrem niedriger Frequenz, wie sie bei Hochspannungsleitungen und -schaltanlagen entstehen, keine signifikanten schädlichen Effekte auf den Menschen, die Tiere und die Pflanzen haben. In den wenigen Fällen, wo sie störend empfunden werden könnten, ist es möglich, wirksame Vorbeugemassnahmen zu ergreifen. Angesichts der sehr grossen Zahl von Anwendungen der Elektrizität und der Exposition auf die daraus resultierenden elektromagnetischen Felder sowie der bereits durchgeführten Studien und Untersuchungen ist es sicher, dass, wenn ein echtes Risiko existieren würde, es bereits festgestellt worden wäre; dies ist aber nicht der Fall. Zusammenfassend lässt sich feststellen, dass die kurzfristigen und langfristigen Risiken für Bevölkerung und Arbeiter, die aus der Exposition auf elektromagnetische Felder in Hochspannungsanlagen resultieren, sehr gering sind im Vergleich zu anderen Risiken des täglichen Le-

bens und anderer Tätigkeiten.

Wie in anderen Bereichen der Technik ist Vorbeugung notwendig, vor allem um unnötige Exposition und Störungen als Folge der Wahrnehmung elektromagnetischer Felder zu vermeiden, die durch die Phänomene der Influenz und des Korona-Effektes erzeugt werden. Es gilt daher, sinnvollen Gebrauch von den technischen Möglichkeiten zur Verminderung der elektromagnetischen Felder zu machen und grosse metallische Strukturen gut zu erden, die sich in der Nähe von Hochspannungsleitungen befinden könnten.

Literatur

- [1] OMS, UNEP, IRPA, «Extremely Low Frequency (ELF) Fields». OMS, Environmental Health Criteria 35, Genève 1984.
- [2] Ahlbom A., ... «Biological effects of power line fields», New York State Power Lines Project (NYSPLP) Scientific Advisory Panel final Report, July 1, 1987.
- [3] Ontario Ministry of Health, «Health Effects of Extremely-Low-Frequency Electromagnetic Fields, a Review of Clinical and Epidemiological Studies», July 30, 1987.
- [4] Biological Studies Task Team, Lee J.M. Jr. (Chairman), US DOE/BPA, «Electrical and Biological Effects of Transmission Lines: a Review», 3rd edition, revised June 1986, DOE/BP-524 March 1987.
- [5] Leuthold P., DFTCE, «Effet des champs électromagnétiques sur l'environnement», Berne 10.86, 700 36043, EDMZ.
- [6] SEV, Informationstagung, «Aktuelle Probleme der Einwirkung elektromagnetischer Felder auf den Menschen», 5. März 1987.
- [7] EDF, «Les champs électriques et magnétiques au voisinage des ouvrages électriques», LB 524.
- [8] Berndt H., «Freileitungen und ihre Bewertung als Umweltfaktor». Bull. SEV/VSE 77, 22. Novembre 1986.
- [9] Haubrich H.-J., VEW Dortmund, «Biologische Wirkung elektromagnetischer 50-Hz-Felder auf den Menschen», Elektrizitätswirtschaft, Jg. 86 (1987), Heft 16/17.
- [10] DFTCE, «Ordonnance sur la protection contre les perturbations électromagnétiques». 1.5.1979.
- [11] Keller P., BKW, «Die Erzeugung von Oxidanten an Hochspannungsleitungen». Unterausschuss «Forschung und Entwicklung» der Überlandwerke (UAF), August 1987.
- [12] Heizmann T., Staub R. «Koronaverluste - ein Umweltproblem?» ETHZ, Institut für Elektrische Energieübertragung und Hochspannungstechnik, Fachgruppe Hochspannungstechnik, Semesterarbeit SS 86.
- [13] Carstensen E.L. «Biological Effects of Transmission Line Fields» Elsevier Science Publishing Co., Inc. New York, 1987.
- [14] OMS, UNEP, IRPA, «Magnetic Fields» Environmental Health Criteria 69, Genève 1987.