**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:** 77 (1986)

**Heft:** 22

**Artikel:** Freileitungen und ihre Bewertung als Umweltfaktor

**Autor:** Berndt, H.

**DOI:** https://doi.org/10.5169/seals-904297

**Nutzungsbedingungen**

Die ETH-Bibliothek ist die Anbieterin der digitalisierten Zeitschriften auf E-Periodica. 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. Das Veröffentlichen von Bildern in Print- und Online-Publikationen sowie auf Social Media-Kanälen oder Webseiten ist nur mit vorheriger Genehmigung der Rechteinhaber erlaubt. Mehr erfahren

**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. La reproduction d'images dans des publications imprimées ou en ligne ainsi que sur des canaux de médias sociaux ou des sites web n'est autorisée qu'avec l'accord préalable des détenteurs des droits. En savoir plus

**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. Publishing images in print and online publications, as well as on social media channels or websites, is only permitted with the prior consent of the rights holders. Find out more

**Download PDF:** 09.12.2025

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

# Freileitungen und ihre Bewertung als Umweltfaktor

H. Berndt

***Freileitungen sind technische Objekte, die in unberührter Natur als Fremdkörper empfunden werden können. Ihnen jedoch gesundheitsgefährdende oder umweltschädigende Wirkungen anzulasten, wie dies in der Öffentlichkeit immer wieder geschieht, entspricht in keiner Weise den heute vorliegenden, übereinstimmenden wissenschaftlichen Erkenntnissen.***

***Les lignes aériennes sont des réalisations techniques qui peuvent être ressenties comme corps étrangers rompant l'unité de la nature. Mais prétendre, ainsi que cela se produit régulièrement dans le public, qu'elles sont nuisibles à la santé ou à l'environnement ne correspond en rien aux résultats scientifiques, qui de nos jours sont unanimes.***

Überarbeitete Fassung eines Vortrages, gehalten am 6. März 1986 anlässlich der Tagung «Freileitungen und Naturschutz» der Akademie für Naturschutz und Landschaftspflege in Laufen (BRD).

**Adresse des Autors**
*Hermann Berndt*, Dipl.-Ing.,
Isar-Amperwerke AG, D-8000 München

## 1. Einleitung

Der Mensch ist in seiner Umwelt dem Einfluss elektrischer, magnetischer und elektromagnetischer Felder unterschiedlichster Frequenzen ausgesetzt. Diese Felder sind sowohl natürlichen, als auch technischen Ursprungs.

Figur 1 zeigt das gesamte Frequenzspektrum der elektromagnetischen Felder. Die technischen Frequenzen der Stromversorgung mit 0 Hz (HGÜ) und 16⅔, 50 oder 60 Hertz stellen sich auf dieser Skala nur als sehr schmales Band dar.

Interessant ist nun, dass die Auswirkungen elektromagnetischer Felder auf biologische Organismen sehr unterschiedlich sind: Im unteren Frequenzbereich lassen sich bei entsprechender Intensität der Felder Reizwirkungen feststellen; sie gehen mit zunehmender Frequenz in Wärmewirkungen über.

Im Bereich höchster Frequenzen – also der Gamma- und Röntgenstrahlung – kommt es schliesslich zu ionisierenden Effekten und zur Zerstörung von organischen Gewebestrukturen.

Auch in der Ausbreitung elektromagnetischer Wellen zeigen sich Unterschiede: im unteren Frequenzbereich – bis etwa 30 kHz – erfolgt die Übertragung der leitungsgebunden, im höheren Frequenzbereich – der durch Rundfunk und Fernsehen bekannt ist – bedarf die Ausbreitung keiner Leitung mehr; Antennen übernehmen die Abstrahlung in den Raum. Je höher die Frequenzen werden, um so mehr lässt sich auch eine Bündelungsfähigkeit – also Richtwirkung – feststellen, ein Effekt, der sich in Richtung zum sichtbaren Licht laufend steigert.

Für den unteren, leitungsgebundenen Bereich technischer Frequenzen, über den hier berichtet werden soll, lässt sich schliesslich noch eine weitere Differenzierung aufzeigen: Es ist dies die physikalisch begründbare Möglichkeit, die elektrischen und magnetischen Felder elektromagnetischer Wellen getrennt zu betrachten. Diese Trennung trägt sehr dazu bei, die einzelnen Vorgänge verständlicher zu beschreiben.

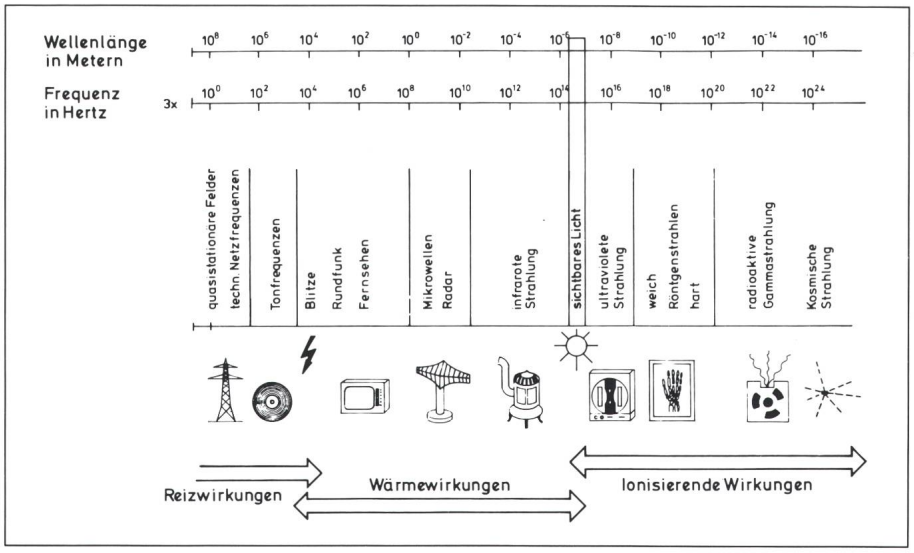



**Fig. 1 Frequenzbereiche der elektromagnetischen Energie und ihre Wirkungen**

## 2. Das elektrische Feld

Durch die Einwirkung der kosmischen Strahlen – und auch anderer z.T. terrestrischer Faktoren – kommt es zur Ionisierung in der Atmosphäre und damit zur Ladungsbildung, d.h. zum Aufbau elektrischer Felder. Seit Urzeiten ist deshalb der Organismus aller Lebewesen von den natürlichen atmosphärischen Feldern unseres Planeten Erde exponiert. Sie sind in ihrer Intensität mit technischen Feldern, die auf uns wirken, durchaus vergleichbar.

So kann man bei Schönwetter Werte zwischen 50 und 500 Volt je Meter (V/m) messen und bei Schlechtwetter bzw. vor Gewittern sogar Werte bis zu 20 000 V/m. Schliesslich ist Bergsteigern bekannt, dass im Hochgebirge bei gewissen Wetterlagen Glimmerscheinungen an allen Metallteilen – etwa an Eispickeln und Steigeisen – auftreten und die Haare zu vibrieren beginnen. Hier wirken dann – lokal begrenzt – Feldstärken von 100 kV/m (Kilovolt je Meter) und mehr.

*Elektrische Felder ausserhalb und innerhalb von Gebäuden* Tabelle I

| | |
|---|---|
| *Feldstärken unter Freileitungen* (gemessen in 1 m Höhe über Erdboden) | V/m |
| 20-kV-Leitungen | 500 bis 1 000 |
| 110-kV-Leitungen | 1 000 bis 2 000 |
| 220-kV-Leitungen | 2 500 bis 6 000 |
| 380-kV-Leitungen | 5 000 bis 6 000 |
| 750-kV-Leitungen | 10 000 bis 12 000 |
| 1150-kV-Leitungen | 12 000 bis 20 000 |
| *Feldstärken in Schaltanlagen* (gemessen in 1 m Höhe über Erdboden) | |
| 110-kV-Schaltanlagen | 2 000 bis 3 000 |
| 220-kV-Schaltanlagen | 5 000 bis 6 000 |
| 380-kV-Schaltanlagen | 10 000 bis 15 000 |
| *Feldstärken innerhalb von Gebäuden* (gemessen in 30 cm Abstand vom Gerät) | |
| Elektrischer Kochherd | 8 |
| Toaster | 80 |
| Heizdecke | 500 |
| Bügeleisen | 120 |
| Boiler | 260 |
| Haarfön | 80 |
| Verdampfer | 80 |
| Kühlschrank | 120 |
| Farbfernseher | 60 |
| Stereoempfänger | 180 |
| Kaffeemaschine | 60 |
| Staubsauger | 50 |
| Uhr | 30 |
| Handmixer | 100 |
| Glühbirne | 5 |
| Von aussen in das Haus wirkende Felder bei Gebäudeüberspannung | 20 |

Vergleicht man diese Werte mit den Feldern der technischen Stromversorgung (Tab. I), so treten in den Haushalten [1] Felder von 10 bis 500 V/m auf (sie entstehen in den von uns genutzten elektrischen Geräten); unter 110-kV-Freileitungen können 500 bis 1500 V/m gemessen werden, unter 380-kV-Leitungen etwa bis 6000 V/m und schliesslich in Schaltanlagen, die nur von Fachpersonal betreten werden, sogar bis zu 20 000 V/m oder abgekürzt 20 kV/m.

Die Grössenordnungen der natürlichen Felder und der technischen Felder – soweit die breite Öffentlichkeit damit konfrontiert wird – sind also gar nicht so unterschiedlich. Allerdings handelt es sich bei den natürlichen Feldern meist um quasistationäre Felder, bei den technischen Feldern dagegen vorwiegend um Wechselfelder. Bei den letzteren kommt als weitere Kenngrösse noch die «Frequenz» hinzu. Aber auch dies ist bei niedrigeren Frequenzen kein so grundsätzlicher Unterschied, weil es im Ergebnis gleichgültig ist, ob man sich in einem Gleichfeld bewegt oder in einem Wechselfeld still sitzt; in beiden Fällen geraten Ladungen in Bewegung.

### *2.1 Ungestörte und gestörte elektrische Felder*

Nach der klassischen Definition ist ein elektrisches Feld ein Raum, in dem auf geladene Körper Kräfte ausgeübt werden. Elektrostatische Felder wirken also ähnlich wie Magnetismus oder Gravitation mit Kräften über Entfernungen.

Man unterscheidet zwischen ungestörten und gestörten Feldern. Für letztere ist charakteristisch, dass sich im Feldraum Gegenstände befinden oder eingebracht werden. Das Feld wird durch die Anwesenheit dieser Gegenstände, die zu Ladungsträgern werden, verzerrt. Je grösser ein Gegenstand ist – und je spitzer am oberen Ende –, um so ausgeprägtere Feldstörungen sind zu erwarten. Jede Bündelung von Kraftlinien oder Äquipotentialflächen zeigt also Feldkonzentration an; das Feld wirkt an diesen Stellen stärker.

Selbstverständlich gilt das hier Erwähnte auch dann, wenn sich Menschen oder Tiere im Feldbereich [2] befinden (Fig. 2). Man kann davon ausgehen, dass die immer etwas feuchte Haut der Körperoberfläche leitend wirkt. Somit werden Mensch oder Tier in die Potentialfläche der Kondensatorplatte «Erde» mit einbezogen, auf der sie stehen. Der zwischen den Kondensatorplatten messbare Verschiebestrom fliesst in Richtung der Kraftlinien bevorzugt dorthin, wo sich das Feld konzentriert, d.h. die Äquipotentiallinien dicht liegen. Damit konzentrieren sich Feldstärke und auch Verschiebestrom im gezeigten Bild auf Kopf und Oberkörper. Dort beträgt die Feldstärke ein Vielfaches des ungestörten Feldes, also des Feldes, das ohne den Menschen im Raum herrschen würde.

Nimmt man an, die Stärke des ungestörten Feldes ($E_0$) würde 20 kV/m betragen, dann ergäbe sich am Kopf – wie man durch Messungen [3] nach-

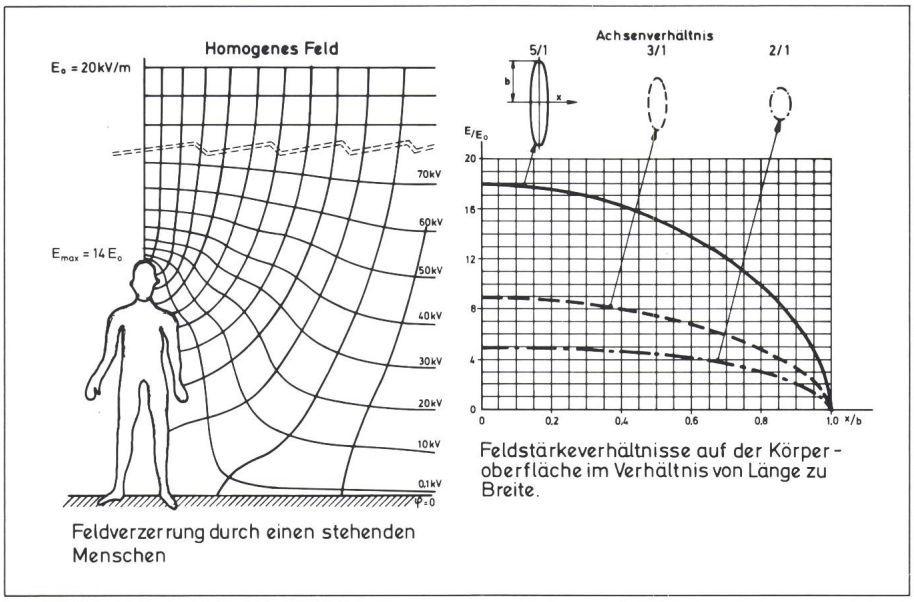



**Fig. 2 Der Mensch im elektrischen Feld** Quelle: Silny [2]

weisen kann – ein Feld ($E_{max}$) von etwa 300 kV/m. Auf den Gesamtkörper würde dabei ein Verschiebestrom von rund 0,3 mA zufliessen; ⅔ davon über Kopf und Oberkörper – also über den Bereich, um den sich das Feld konzentriert.

Ströme dieser Grössenordnung können wir allerdings überhaupt noch nicht spüren! Vielmehr beginnt die Wahrnehmbarkeit bei Berühren einer Stromquelle frühestens bei 0,5 mA – meist sogar erst bei Werten um 1,0 mA.

Steigt die Stromstärke weiter, so beginnt es bei etwa 3,0 mA unangenehm zu werden, und bei 10 bis 15 mA kommt es zu Muskelverkrampfungen, d.h. zu den ersten Warnzeichen akuter Gefahr. Je höher die Spannung der berührten Stromquelle ist, desto höher ist der zu erwartende Stromfluss. Um deshalb die bei einer Berührung von spannungsführenden Teilen fliessenden Ströme in zulässigen Grenzen zu halten, schreiben die Sicherheitsvorschriften entsprechende Grenzwerte für die Berührungsspannung vor. Wie gezeigt, kommt es im elektrischen Feld ohne Berührung von spannungsführenden Teilen ebenfalls zu einem Stromfluss, der sich über den ganzen Körper verteilt.

Elektrische Felder wandeln sich also im Körperbereich in Influenz- oder Induktionsströme um. Mit dieser wichtige Tatsache muss man sich auseinandersetzen und darauf achten, dass auch diese Ströme in den einzelnen Körperteilen gewisse Grenzwerte nicht überschreiten. Solange die über Felder auf uns einwirkenden Ströme unsere Sinnesrezeptoren, unser Nerven- und Muskelsystem nicht stören oder gar schädigen, bleiben sie ungefährlich.

## 2.2 Elektrische Felder von Freileitungen

Wie bilden sich nun im Bereich von Freileitungen – und speziell unter ihnen – Felder aus? Freileitungsmaste tragen stets mehrere Phasenseile, je System jeweils drei. In der öffentlichen Stromversorgung wird Drehstrom übertragen. Von den drei Phasen jedes Systems werden jeweils drei Felder erzeugt, die gegeneinander um jeweils 120 Grad phasenverschoben sind. Durch diese Phasenverschiebung kompensieren sich die Felder gegenseitig weitgehend. Was man am Boden unter Freileitungen messen kann, sind die sogenannten Rest- oder Streufelder; das sind Feldanteile, die aus geometrischen Gründen von der Kompensation nicht erfasst werden konnten.

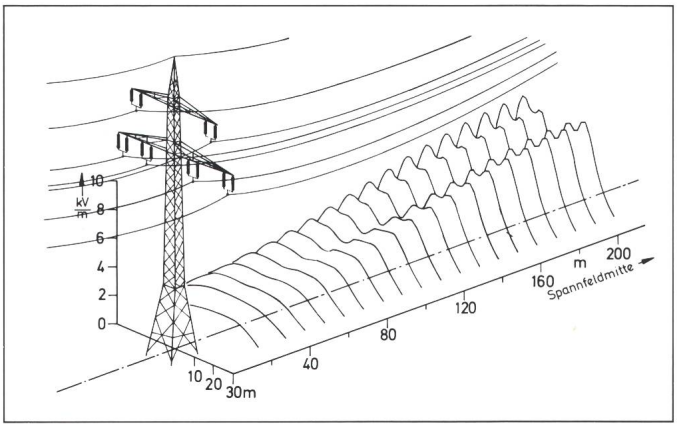



**Fig. 3**
**Verteilung des elektrischen Feldes unter Freileitungen**
Quelle: VEW

Die Grösse dieser Felder ist sehr stark abhängig von der Betriebsspannung der Leitung und vom Abstand der Phasenseile – etwa zum Boden. In der Regel misst man die Felder in Spannfeldmitte, also dort, wo die Phasenseile den kleinsten Bodenabstand besitzen und die Felder somit ihre Maximalwerte erhalten. Da es sich um liniengerichtete Felder handelt, nimmt die Feldstärke umgekehrt proportional zur Entfernung von den Phasenseilen sehr schnell ab.

Zu den Masten hin vergrössert sich nun der Bodenabstand der Seile; entsprechend schwächen sich deshalb die Felder in dieser Richtung sehr stark ab, und gleiches gilt mit zunehmendem Seitenabstand von der Leitungsachse (Fig. 3).

Nun wäre es sehr aufwendig, die Felder unter Freileitungen stets, wie in dieser Figur gezeigt, darstellen zu wollen. Figur 4 zeigt die übliche Darstellungsform der Feldverteilung unter Freileitungen, und zwar den Feldverlauf unter einer 380-kV-Leitung in Spannfeldmitte, in einem Schnitt quer zur Leitungsachse.

Man kann die Feldverteilung durch die Geometrie des Mastkopfbildes und durch die Anordnung der Phasen am Mast weitgehend beeinflussen. Ein Beispiel dafür ist in Figur 5 zu sehen. Es war in diesem Fall der ausdrückliche Wunsch eines Eigentümers, die Feldstärke in der Nähe des Schwimmbeckens so niedrig wie möglich zu halten. Aktuell wurde dies, als eine 110-kV-Leitung in Einebenen-Bauform durch zwei parallele 110-kV-Tonnenmastleitungen ersetzt werden

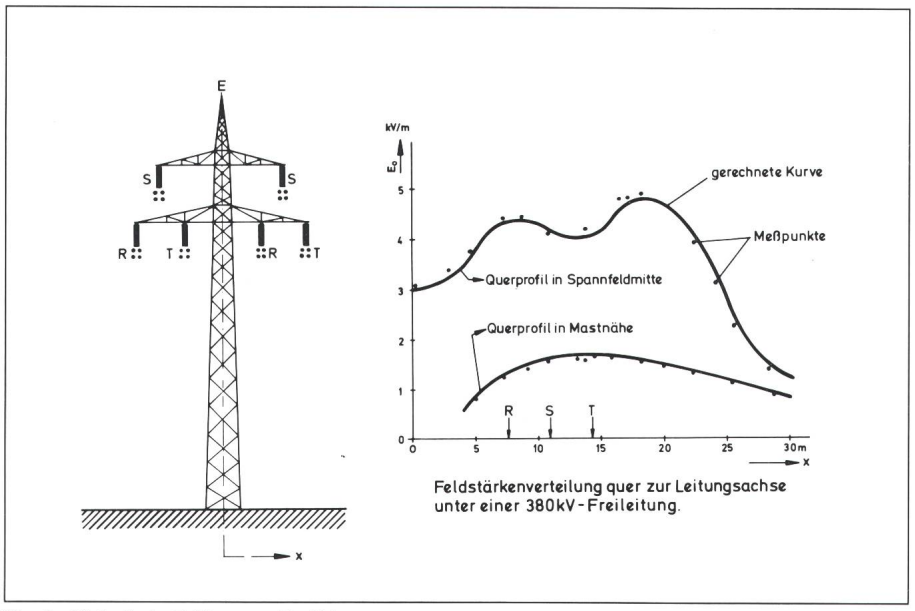



**Fig. 4 Elektrische Felder unter Freileitungen**
Quelle: Newi [12]

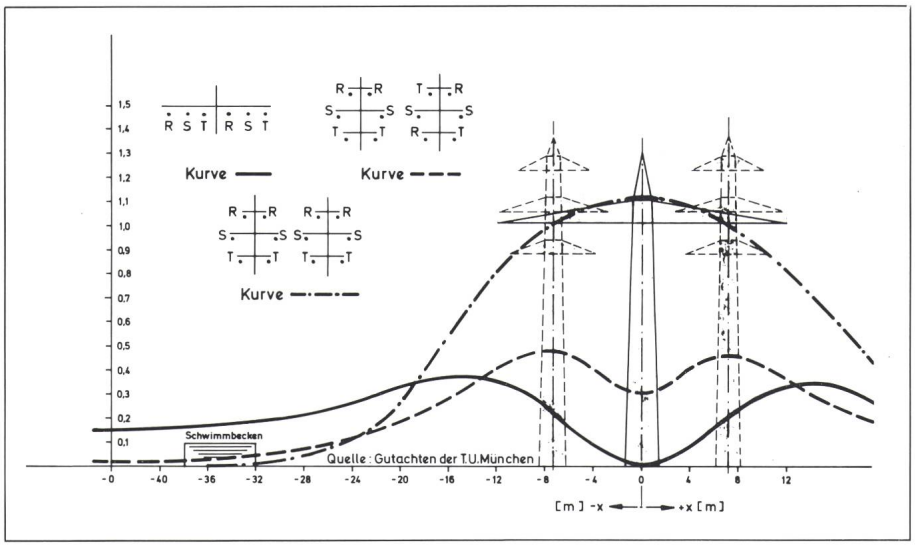



**Fig. 5 Feldverteilung unter 100-kV-Leitungen**

musste. Durch entsprechende Anordnung der Phasen war es nicht schwer, diesem Wunsch nachzukommen. Es muss aber ausdrücklich erwähnt werden, dass damit de facto nur ein psychologischer Effekt erreicht wurde, der den Eigentümer veranlasste, dem geplanten Bauvorhaben zuzustimmen.

### *2.3 Einfluss auf den Menschen*

Bis vor 15 Jahren waren energietechnische Felder von Freileitungen nur im Zusammenhang mit der Minimierung von Koronaverlusten interessant; von Gesundheitsgefährdung war keine Rede.

Erstmals kam dieses Thema zur Diskussion, als im Jahre 1972 russische Wissenschaftler in Paris bei der CIGRE-Konferenz (CIGRE = Conférence International des Grands Reséaux Electriques) einen Bericht [4] vorlegten, in dem von möglicher Gesundheitsbeeinträchtigung bei längerem Aufenthalt in stärkeren elektrischen Feldern der Stromversorgung berichtet wurde (Tab. II). Kopfschmerzen, Ermüdungserscheinungen, Schwindelanfälle, allgemeine Kraftlosigkeit - ja sogar Impotenz sollten die Feldeinwirkungen zur Folge haben. Es wurden Grenzwerte vorgegeben, um diesen Feldeinwirkungen vorzubeugen. Es versteht sich von selbst, dass die gesamte westliche Fachwelt irritiert war, weil derartige Folgen trotz über 50jähriger internationaler Erfahrung und Nutzung dieser Energie bisher noch nie festgestellt wurden. Weltweit wurde deshalb dieser Bericht aufgegriffen und damit begonnen, seine Aussagen zu überprüfen. Nicht nur wir, sondern auch die Russen wissen inzwischen, dass die damaligen Behauptungen in der dargestellten Form in keiner Weise haltbar sind.

Damals aber, als diese Klarstellung noch fehlte, wurde die momentane Verunsicherung von inkompetenten Seiten noch dadurch gesteigert, dass man Berichte über Tierversuche veröffentlichte (Tab. III), die mit extremen Feldstärken und unterschiedlichsten Frequenzen durchgeführt wurden [5].

Dabei machte man dem Leser, der sich informieren wollte, keineswegs erkennbar, dass die angewandten Feldstärken oder -frequenzen um Zehnerpotenzen über denen der praktischen technischen Anwendungen lagen, und auch nicht, dass es im Leben überall physikalische Erscheinungsformen gibt, die erst bei der Überschreitung von Grenzwerten zur Gefährdung werden.

Wenn beispielsweise jemand bei 30 Grad Celsius badet, wird er sich wohlfühlen. Erreicht das Badewasser allerdings nur den dreifachen Wert - also 90 Grad Celsius - so wird ein Bad erfahrungsgemäss lebensgefährlich. Ist es da so ungewöhnlich, wenn bei Versuchen mit den 100fachen Werten der normal üblichen Feldstärken lebensgefährliche Effekte zu beobachten waren? Betrachtet man Tabelle III aus dieser Sicht, so ist es eigentlich verwunderlich, dass es überhaupt noch «Überlebende» gab - und es darf nach dem Sinn dieser Experimente gefragt werden. Auch sind in dieser Tabelle die Wirkungen unterschiedlichster Frequenzen zusammengefasst, obwohl sich der Autor vorwiegend mit den Wirkungen technischer Frequenzen auseinandersetzen wollte. Diese Darstellung ist ein Beispiel dafür, wie man unterschwellig Angst vermitteln kann.

Als nach dem Bekanntwerden des russischen Berichtes weltweit die Forschung begann, musste man erst Versuchserfahrungen sammeln. Dazu gehört, dass sämtliche Randbedingungen richtig erkannt und auch beurteilt in das Ergebnis, d.h. den Schlussbericht einfliessen. Anfangs gab es dabei Pannen. Beispielsweise wurde einmal vergessen, den Futternapf einer im elektrischen Feld sitzenden Ratte zu erden. Der Futternapf konnte sich daher aufladen, und die Ratte erhielt bei jedem Versuch, zu fressen, elektrische Schläge. Schliesslich verweigerte das Tier jede Nahrungsaufnahme, und die Forscher zogen daraus den Schluss, dass Ratten in elektrischen Feldern jede Nahrungsaufnahme verweigern.

Erst später stellte man fest, dass es genügt, den Futternapf zu erden, um die Ratte wieder zur Futteraufnahme anzuregen - auch in starken elektri-

*Zulässige Aufenthaltsdauern in elektrischen Feldern von 500- und 750-kV-Höchstspannungsschaltanlagen der UdSSR nach dem CIGRE-Bericht 23-06, 1972 [4]* Tabelle II

| Lfd. Nr. | Elektrische Feldstärke | Zulässige Aufenthaltsdauer von Personal in elektrischen Feldern im Zeitraum von 24 Stunden | Bemerkungen |
|---|---|---|---|
| | kV/m | Minuten | |
| 1 | 5 | unbegrenzt | Die Punkte 2, 3, 4 und 5 dieser Vorschrift sind variabel<br>1. wenn ein Monteur sich die restliche Zeit in elektrischen Feldern mit Feldstärken kleiner als 5 kV/m aufhält,<br>2. wenn keine Aufladungserscheinungen zu erwarten sind. |
| 2 | 10 | 180 | |
| 3 | 15 | 90 | |
| 4 | 20 | 10 | |
| 5 | 25 | 5 | |

*Wirkung extremer Feldstärken auf Tiere* Tabelle III

| Elektrotechnischer Parameter | Tier | Feldstärke | Bestrahlungsdauer min. | Temperaturanstieg °C | % tödlicher Ausgang | Bemerkungen |
|---|---|---|---|---|---|---|
| konstantes Magnetfeld | Fliege | 9600 kA/m<br>12 Tesla | 60 | - | 100 | statisches Magnetfeld |
| 50–500 Hz<br>50 Hz<br>500 Hz | Maus | 650 kV/m<br>650 kV/m<br>650 kV/m | 60–120<br>270<br>90 | -<br>-<br>- | 70–90<br>50<br>50 | elektrische Niederfrequenzen |
| 14,88 MHz<br><br><br>69,70 MHz | Ratte | 9 kV/m<br>5 kV/m<br>4 kV/m<br>5 kV/m<br>2 kV/m | 10<br>100<br>100<br>5<br>100 | -<br>-<br>-<br>-<br>- | 100<br>80<br>25<br>100<br>80 | elektromagnetische Hochfrequenzfelder (UKW) |
| 200 MHz | Hund<br>Hund<br>Meerschweinchen<br>Meerschweinchen<br>Meerschweinchen<br>Kaninchen | 330 mW/cm²<br>220 mW/cm²<br>590 mW/cm²<br>410 mW/cm²<br>330 mW/cm²<br>165 mW/cm² | 15<br>21<br>20<br>20<br>20<br>30 | 5<br>4,1<br>5,9<br>4,2<br>4,1<br>6–7 | 50<br>25<br>100<br>67<br>100<br>100 | elektromagnetische Hochfrequenzfelder (Fernsehen) |
| 2800–3000 MHz<br><br><br>gepulst | Hund<br>Kaninchen<br>Kaninchen<br>Ratte<br>Ratte<br>Ratte | 165 mW/cm²<br>300 mW/cm²<br>100 mW/cm²<br>300 mW/cm²<br>100 mW/cm²<br>40 mW/cm² | 270<br>25<br>103<br>15<br>25<br>90 | 4–6<br>6–7,5<br>4–5<br>8–10<br>6–7<br>- | 100<br>100<br>100<br>100<br>100<br>100 | Mikrowellen |

Quelle: König [5]

schen Feldern! Diese anfänglich zum Teil einander widersprechenden Forschungsergebnisse wurden natürlich von den an Schlagzeilen interessierten Medien begierig aufgegriffen. So verbreitete sich in der Öffentlichkeit die Vorstellung von gesundheitsgefährdenden Feldeinwirkungen, und damit kam es verständlicherweise auch zu einer ablehnenden Einstellung breiter Kreise gegen Freileitungen. Vielen war diese Verunsicherung sogar ein willkommenes Argument, sich gegen den Bau neuer Freileitungen besser zur Wehr setzen zu können, und verschiedene «baubiologische Institute» leben noch heute gut von diesen durch Pannen entstandenen und teilweise gezielt verbreiteten Fehlinformationen.

Es würde den Rahmen dieses Berichtes sprengen, alle Wissenschaftler namentlich zu nennen, die wertvolle Beiträge zur Beurteilung vermuteter Wirkungen elektrischer Felder lieferten. Besonders wichtig war in diesem Zusammenhang, dass die Ergebnisse nachprüfbar wurden; daran krankte es nämlich in erster Zeit besonders.

Bemerkenswert ist auch, dass es mit den Jahren immer selbstverständlicher wurde, Mediziner und Elektrotechniker im Team arbeiten zu lassen. Die Mediziner erhielten so Gewähr dafür, dass ihre Versuchseinrichtungen einwandfrei waren und ihre Forschung nicht durch unbeabsichtigte Nebeneffekte gestört wurde. Diese wichtige Voraussetzung fehlte bei allen früheren Versuchen – auch deshalb sind viele Forschungsergebnisse der ersten Zeit mit Mängeln behaftet. Man darf ihre Aussagen somit nur übernehmen, wenn sie dem heutigen Stand der Wissenschaft nicht widersprechen.

Insgesamt kam man im Rahmen internationaler Forschung übereinstimmend zu dem Ergebnis, dass zumindest bis zu den untersuchten elektrischen Feldstärken von 20 kV/m auch bei längerer Einwirkungsdauer gesundheitliche Gefährdungen ausgeschlossen sind. Dies ist eine sehr wichtige Klarstellung, weil die in öffentlich zugänglichen Bereichen auftretenden Feldstärken um ein bis zwei Grössenordnungen kleiner sind. Den heutigen Kenntnisstand vermittelt zusammenfassend eine Veröffentlichung der Weltgesundheitsorganisation [8].

## *2.4 Grundlagenforschung*

Was geschieht nun im Körper – und speziell im Bereich der empfindlichen Gehirnzellen, wenn dort durch Feldeinwirkung Ströme zu fliessen beginnen? Damit ist die Grundlagenforschung (siehe dazu [6; 10; 11; 12] angesprochen, deren Aussage zu diesem Thema ebenso wichtig ist.

Zunächst muss darauf hingewiesen werden, dass alle Sinnesrezeptoren, Nerven und Muskeln, auf elektrische Reize reagieren; sie werden also durch Ströme aktiviert. Bereits im Ruhezustand herrscht in diesen Zellbereichen eine Wechselspannung, die – etwa im Gehirn – als Elektroenzephalogramm (EEG) gemessen werden kann. Dieser Wechselspannung ist noch eine Gleichspannung überlagert, deren Potential sich bei Reizungen verändert.

Die Stromdichten in diesem Zusammenhang können für den Ruhezustand mit der Grössenordnung von etwa 0,1 μA/cm² angegeben werden. Im Falle einer Nervenreizung erhöht sich dieser Wert auf das 250- bis 500fache; d.s. etwa 25 bis 50 μA/cm². Figur 6 zeigt schematisch eine Nerven- oder Muskelzelle. Ihr Zellkern ist von einer hochohmigen Zellmembran umgeben, sodass Ruheströme nicht eindringen können, sondern die Zelle umfliessen. In diesem Zustand der Ruhe ist die Zelle polarisiert in der Form, dass in ihr ein Überschuss von Kaliumionen und ausserhalb von ihr ein Überschuss von Natriumionen besteht.

Im Falle einer Reizwirkung – also Anregung der Nerven- oder Muskelzellen – kommt es zu einer Depolarisierung der Zelle; Kaliumionen fliessen durch die Zellmembran nach aussen, Natriumionen dringen ein. Bleiben nachfolgend weitere Reize aus, so polarisiert sich die Zelle wieder, d.h. der ursprüngliche Ruhezustand tritt wieder ein.

Aus diesem Mechanismus wird verständlich, dass von aussen in diesen Reaktionskreis eindringliche Fremd-

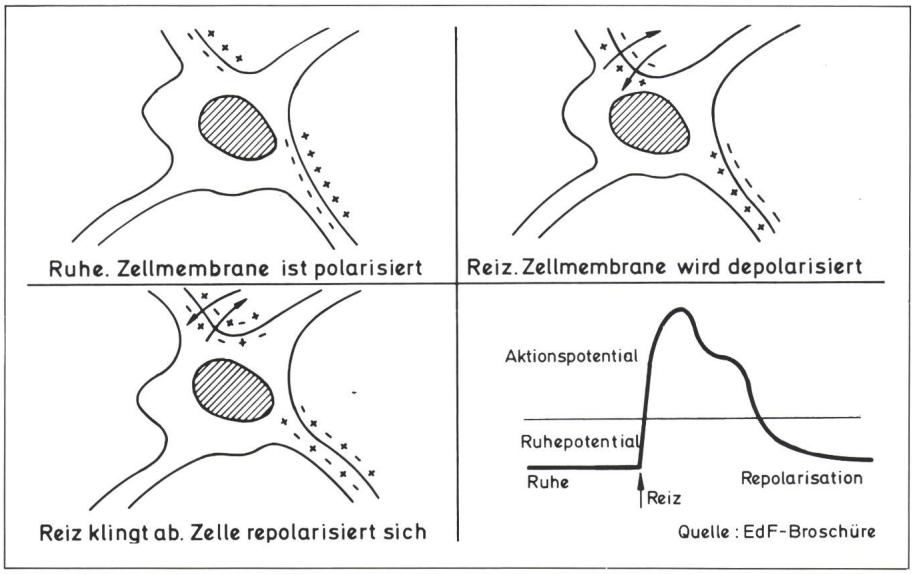



**Fig. 6 Elektrische Vorgänge in Nervenzellen**
Quelle: EdF [10]

ströme (also feldverursachte Ströme) keinesfalls grösser sein sollten als der natürliche körpereigene Ruhestrom. Wäre dies nämlich in merkbarem Umfang (Faktor 100) der Fall, so könnte es zu Reizwirkungen auf das Nerven- oder Muskelsystem kommen – und dies sollte unbedingt unterbleiben.

Glücklicherweise kommt dieser Forderung die Tatsache entgegen, dass die Grösse von Fremdströmen – also etwa von feldbedingten Verschiebeströmen – im Zellbereich des Kopfes von zwei Faktoren begrenzt wird:

- die gute Leitfähigkeit der Kopfhaut und die schlechte des darunterliegenden Schädelknochens; nur ein kleiner Anteil des Stromes dringt daher überhaupt in das Nervengewebe des Gehirns ein.
- die Tatsache, dass die Zellmembrane einen viel grösseren Widerstand als der Bereich ausserhalb der Zelle besitzt, so dass die Ströme örtlich zum grössten Teil die Zellen umfliessen und nicht eindringen.

Die Natur hat also gut vorgebeugt; es ist dafür gesorgt, dass es nicht vorzeitig zu möglicherweise schädlichen Reizwirkungen kommen kann.

Erwähnenswert in diesem Zusammenhang sind auch die Forschungsergebnisse von Bernhardt [9]. Er konnte nachweisen, dass bei ausreichend grossen Feldstärken, die natürlich auch entsprechende Verschiebeströme auslösen, Reizwirkungen sich auf den unteren Frequenzbereich – etwa bis 30 000 Hz – beschränken. Bei noch höheren Frequenzen führen die Feldwirkungen dann mehr und mehr zur Wärmeerzeugung im Zellbereich; die Zelldipole beginnen zu schwingen. Dies sind im übrigen Wirkungen, die man sich bei Diathermiegeräten oder etwa beim Mikrowellenherd zunutze macht. Schliesslich trennt die hohe Energie ionisierender Strahlung höchster Frequenzen (z.B. Röntgenstrahlen) Elektronen von den Molekülen der Gewebezellen und führt so zu organischen Schädigungen. Während also bei niedrigen Frequenzen kaum Energie in organische Substanz übertragen wird, ist dies mit Anhebung der Frequenz zunehmend der Fall. So schätzt man beispielsweise, dass bei gleicher Energiedichte ein Mensch in einem 50-MHz-Feld (Fernsehfrequenz) etwa um das $10^{12}$fache an Energie absorbiert, als in einem 50-Hz-Feld von Freileitungen. Dies alles gehört aber nicht mehr in den Themenkreis der Stromversorgung, der hier behandelt wird, sondern soll nur kurz auch über das Umfeld informieren.

Figur 7 zeigt den von Bernhardt ermittelten Verlauf von Schwellwertkurven und den Verlauf des absolut sicheren Bereiches A in logarithmischer Darstellung. Die Kurve A gibt also Gewähr für absolute Wirkungslosigkeit, ohne dass bei deren Überschreitung unmittelbar auf Gefährdung geschlossen werden müsste.

Bei der Stromeinwirkung handelt es sich übrigens um einen völlig anderen Mechanismus als etwa bei der Einwirkung von Gift. Während sich viele Gifte – wie z.B. Schwermetalle – bei längerem Konsum im Körper speichern und in Summe schädigend wirken, ist dies bei Strom nicht möglich. Strom fliesst nur, solange ein Feld einwirkt; schädigende Speicherwirkung gibt es nicht. Nur dann, wenn er die vorgegebenen Grenzwerte überschreitet – und auf Dauer dieses Zustandes – könnte es zu möglicherweise schädigenden Reizwirkungen kommen; genauer weiss man es heute noch nicht. Es wurde aber bereits begründet, dass selbst in Höchstspannungsschaltanlagen elektrische Felder von mehr als 20 kV/m kaum erreicht werden. Damit stellt sich das Problem der Grenzwertüberschreitung überhaupt nicht, weil erst bei elektrischen Feldstärken von mehr als 20 kV/m Fremdstromdichten in der Grössenordnung von 0,1 μA/cm² im Bereich menschlicher Sinnesrezeptoren auftreten können.

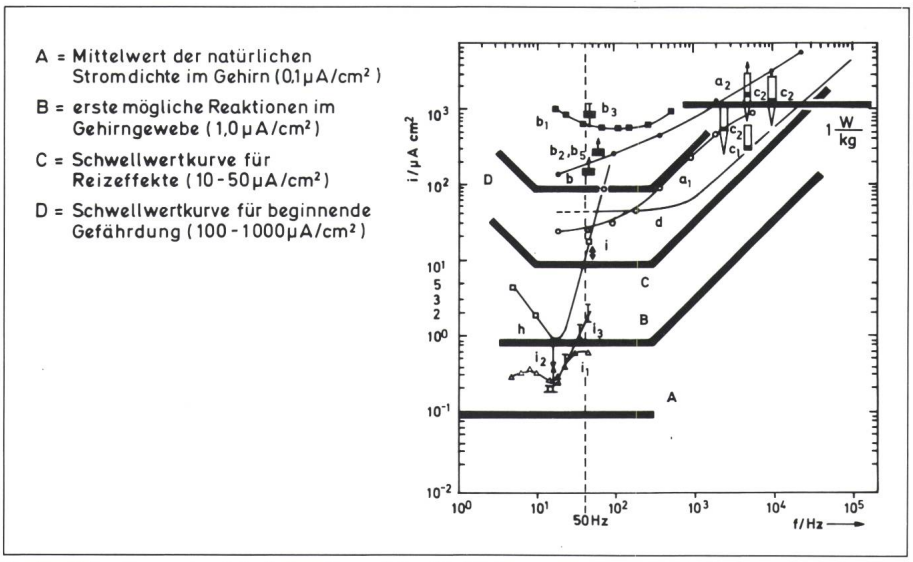



**Fig. 7 Schwellwerte der elektrischen Stromdichte für Wirkungen an Nerven- und Muskelzellen**
Quelle: Bernhardt [9]

Wegen der Bedeutung dieser Aussagen sei hier nochmals kurz zusammengefasst:

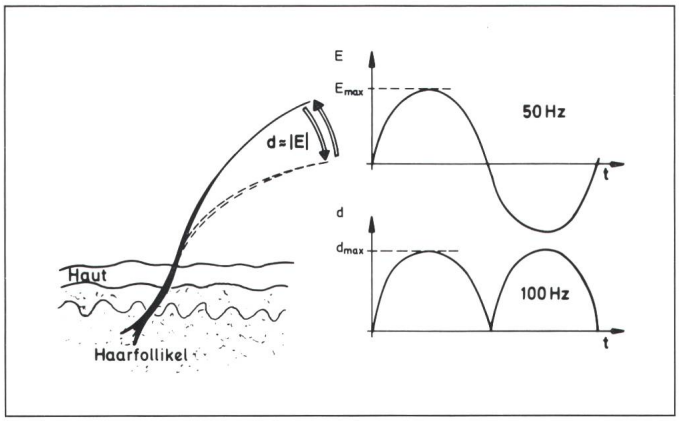
- Die natürliche Ruhestromdichte im Nervenzellenbereich liegt mit weniger als 1% weit unter der zur Reizaktivierung notwendigen Reizstromdichte.
- Feldbedingte Fremdströme, die kleiner als die natürlichen Reizstromdichten sind, können somit keine Wirkung haben. Und dem wird die Stromversorgung mehr als gerecht, liegen doch beispielsweise die feldbedingten Fremdströme von Hausinstallationen etwa in den Grössenordnungen von 0,001 bis 0,01% der Reizstromdichte – also noch um Zehnerpotenzen unter den Ruhestromdichten.
- Selbst wenn man im Freien in Spannfeldmitte unter Hochspannungsleitungen steht, sind auch dort nur Fremdströme in der Grössenordnung von etwa einem Zehntel der Ruhestromdichten zu erwarten, also ebenfalls völlig unproblematische Werte. Man darf in diesem Zusammenhang nicht übersehen, dass es hier nicht um konkrete Zahlenwerte geht, sondern um Grössenordnungen, seien es Reiz-, Ruhe- oder Fremdstromdichten. Der Abstand – in Zehnerpotenzen ausgedrückt – ist also der Beurteilungsmassstab. Schon daraus lässt sich erkennen, wie sinnlos jede Forderung ist, etwa in Wohnungen die an sich schon minimalen Felder durch aufwendige Nachinstallationen noch weiter zu reduzieren.

Die Erkenntnisse der Grundlagenforschung machen also verständlich, weshalb alle Bemühungen auf medizinischer Ebene fehlschlagen mussten, gesundheitsschädliche Wirkungen elektrischer Felder festzustellen; im Bereich üblicher technischer Feldstärken gibt es sie nicht.

### *2.5 Sekundäreffekte*

Neben den bisher beschriebenen Effekten gibt es verschiedene Erscheinungen, die man als Sekundäreffekte oder mittelbare Einwirkungen bezeichnet. Ein solcher Sekundäreffekt ist beispielsweise das Vibrieren der Haare im elektrischen Feld. Dies lässt sich bei Menschen feststellen, wenn die Feldstärken etwa 10 kV/m überschreiten. Figur 8 zeigt den Zusammenhang. Die dünnen Haare werden in verstärktem Masse zu Ladungsträgern – und diese Ladungen schwingen im Wechselfeld mit doppelter Frequenz. An sich ist diese Erscheinung völlig ungefährlich. Man muss aber hinzufügen, dass derartige Phänomene bei Tierversuchen als Nebeneffekte eine grosse Rolle spielen können. Bekanntlich sind die Barthaare vieler Tiere Tastorgane und als solche besonders empfindlich. Man muss verstehen, dass diese Tiere – nicht wissend was geschieht – in solchen Fällen sehr ängstlich reagieren, was schon oft zu Fehlinterpretationen von Versuchsergebnissen führte.

**Fig. 8**
**Vibration der Haare im elektrischen Wechselfeld**
Quelle: Silny [2]




Wohlbekannt sind auch die mit Aufladungserscheinungen verbundenen unangenehmen Effekte: kleine Funken, die beim Händedruck oder beim Angreifen einer Türklinke überspringen und uns oft auch beim Aussteigen aus dem Auto belästigen. Derartige Effekte kann es auch unter Freileitungen geben, deren Bodenfeldstärke ausreichend gross ist – etwa bei einer 380-kV-Leitung.

In Figur 9 zeigt Newi [12] einige mögliche Varianten der Belästigung durch Verschiebeströme, die in ihrer Wirkung unterschiedlich gross sind. Es kommt – das soll hier gezeigt werden – sehr darauf an, ob die Person oder der berührte Gegenstand geerdet ist oder nicht, bzw. auch, wie gross eine isoliert aufgestellte Metallfläche ist, die berührt wird. Schliesslich unterscheiden sich auch die Empfindungen einmaliger Entladungsimpulse (transiente Ströme) und ständig fliessender Verschiebeströme.

Gefährlich sind alle Sekundäreffekte in der Regel nicht – aber zugegebenermassen können sie als unangenehm empfunden werden, besonders

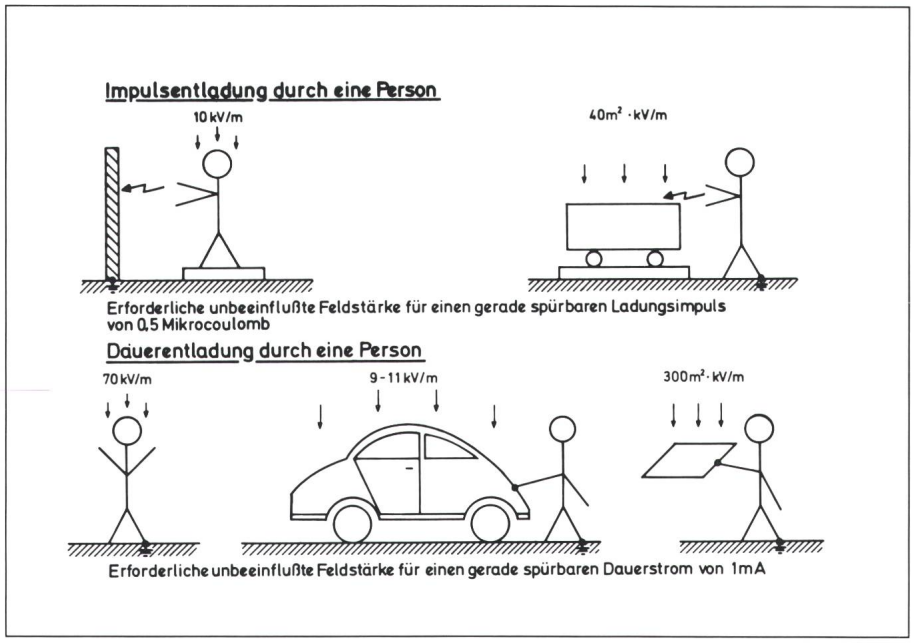



**Fig. 9 Aufladungserscheinungen in elektrischen Feldern**
Quelle: Newi [12]

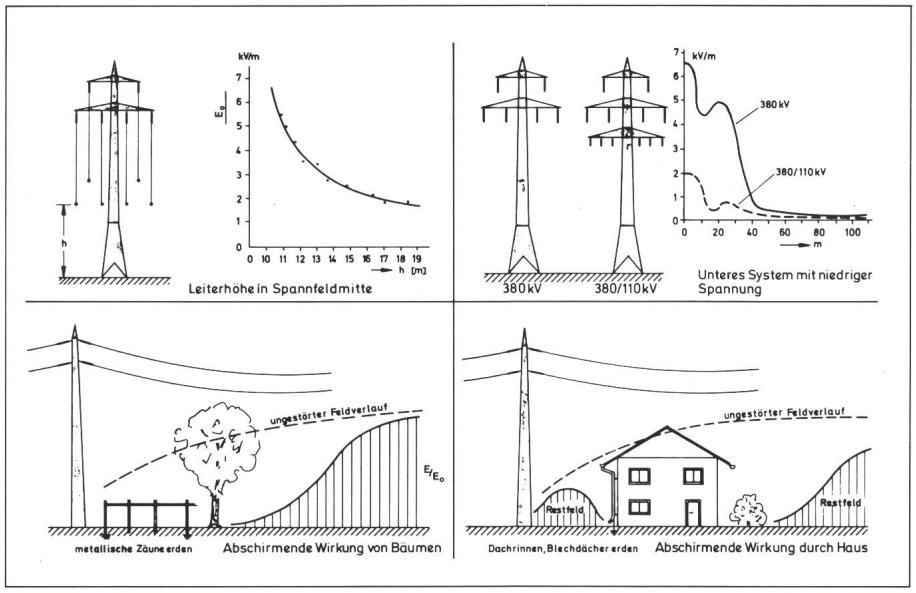



**Fig. 10 Massnahmen zur Reduzierung der Wirkungen elektrischer Felder unter Freileitungen**

wenn sie öfters oder länger wirken. Dann kann es schliesslich sogar so weit kommen, dass diese Erscheinungen als Stress empfunden werden und damit auf das vegetative Nervensystem zu wirken beginnen. Damit aber sind durchaus Reaktionen wie Kopfweh, Müdigkeit, Übelkeit u.a.m. möglich. Es mag sein, dass die russischen Forscher in ihrem CIGRE-Bericht diesen Sekundäreffekten ihr Augenmerk schenkten und es so zu einer falschen Interpretation kam.

Wäre dem so, dann müsste allerdings festgestellt werden, dass man diesen Aufladungserscheinungen keineswegs wehrlos ausgeliefert ist, sondern mit einfachen technischen Massnahmen wirksam Abhilfe schaffen kann. Figur 10 zeigt Massnahmen in diesem Zusammenhang. Beispielsweise schirmen Bepflanzungen in Leitungsnähe die elektrischen Felder wirksam ab. Auch sind elektrische Felder im Inneren von Gebäuden kaum noch messbar. Die natürliche Feuchtigkeit von Holz, Mauern und Beton bietet ausreichende Leitfähigkeit, so dass die Verschiebeströme aufgenommen und zur Erde abgeleitet werden. Jedes Haus wirkt also wie ein Faraday'scher Käfig.

Auch technische Möglichkeiten der Abhilfe sind in Figur 10 dargestellt. Vergrössert man den Bodenabstand der Leiterseile, so reduziert sich die Bodenfeldstärke – sie ist in jedem Falle die Messgrösse – ganz beachtlich. Auch wenn Maste mit zusätzlichen Leitersystemen niedrigerer Spannung belegt werden – etwa eine 110-kV-Leitung unter einer 380-kV-Leitung, oder eine 20-kV-Leitung unter einer 110-kV-Leitung – wirkt sich dies sehr wirksam reduzierend für die Bodenfeldstärke aus. Weiterhin sollen in kritischen Fällen – dies alles wird erst bei 380 kV aktuell – überkreuzte Weidezäune geerdet werden; gleiches gilt für Dachrinnen oder Blechdächer, wenn Häuser zu überspannen sind. Schliesslich ist es für grössere Fahrzeuge – also Autobusse – ratsam, eine Kupferlitze nachzuschleppen, sofern die Reifen nicht halbleitend sind. Aussteigende Personen sind vor Aufladungserscheinungen selbst dann noch wirksam geschützt, wenn eine Haltestelle direkt unter einer 380-kV-Leitung liegen sollte. Wichtig ist es in allen diesen Fällen, die feldbedingten Ladeströme so zur Erde zu leiten, dass wesentliche Berührungsspannungen erst gar nicht entstehen.

Als wichtige Hinweise für die Gefährlichkeit elektrischer Felder werten Verteter der Gegenseite oft die Reaktionen von Bienen im unmittelbaren Nahbereich von Höchstspannungsleitungen. Dazu muss gesagt werden, dass Insekten ausserordentlich empfindliche Sinnesorgane für elektrische Ladungen besitzen. Ihr Chitinpanzer, ihre feine Behaarung fördern die Wirksamkeit von Sekundäreffekten ganz gewaltig. Dies kann im Endeffekt dazu führen, dass in Bienenstöcken, die unmittelbar unter Höchstspannungsleitungen stehen, erhöhte Reizbarkeit und Sterblichkeit der Tiere beobachtet werden kann [13]. Wenn man dies weiss, ist dem allerdings schnell abzuhelfen. Indessen wäre es völlig falsch, aus den Ergebnissen von Tierversuchen unmittelbar Auswirkungen auf Menschen ableiten zu wollen.

## 3. Das magnetische Feld

Auch magnetische Felder wirken auf unsere Erde seit Urzeiten. Alle Lebewesen haben sich darauf eingestellt; manche nutzen sie sogar – und zwar vorwiegend für Zwecke der Orientierung.

Der Mensch hat inzwischen gelernt, weitaus stärkere Magnetfelder mit Hilfe der Elektrizität herzustellen – und eisenhaltige Spulen wurden inzwischen zu den wichtigsten Bauelementen der Elektrotechnik; ohne sie gäbe es beispielsweise keine elektrischen Motoren.

War für die elektrische Feldstärke die Spannung massgebend, so ist dies für die magnetische Feldstärke der Strom. Gemessen wird die magnetische Feldstärke in A/m (Ampere je Meter). Üblicher ist es jedoch, die Dichte des magnetischen Flusses als Messgrösse zu wählen; ihre Einheit ist ein Tesla (T).

Aus Tabelle IV geht hervor, mit welchen magnetischen Flussdichten man

*Magnetische Flussdichten ausserhalb und innerhalb von Gebäuden* Tabelle IV

| | |
|---|---|
| *Magnetische Flussdichten unter Freileitungen* | |
| Niederspannungsleitungen | 4 µT |
| Mittelspannungsleitungen | 6 µT |
| Hochspannungsleitungen | 10 µT |
| Höchstspannungsleitungen | 47 µT |
| *Magnetische Flussdichten in Industrie und Medizin* | |
| Starkstromanlagen | 1 mT |
| Induktionsofen, Galvanik | 10 mT |
| Magnet-Schwebebahn | 0,1 T |
| Spin-Tomographie | 1–2 T |
| *Magnetfeld der Erde* | 40–50 µT |
| *Magnetische Flussdichten in Haushalt und Werkstatt* | |
| Lötkolben, Rührwerk, Fön, Kabel | 1,0–2,5 mT |
| Büchsenöffner, Tischlampe, Küchenherd, Rasierapparat | 0,5–1,0 mT |
| Mixer, Farbfernseher, Bohrmaschine, Heizlüfter | 0,1–0,5 mT |
| Müllzerkleinerer, Wäschetrockner, Staubsauger, Toaster | 10–1000 µT |
| Spülmaschine, Küchenlampe, Waschmaschine, Bügeleisen | 10–100 µT |

1 Tesla = 1000 Millitesla = 1 000 000 Mikrotesla
1 T = $10^3$ mT = $10^6$ µT

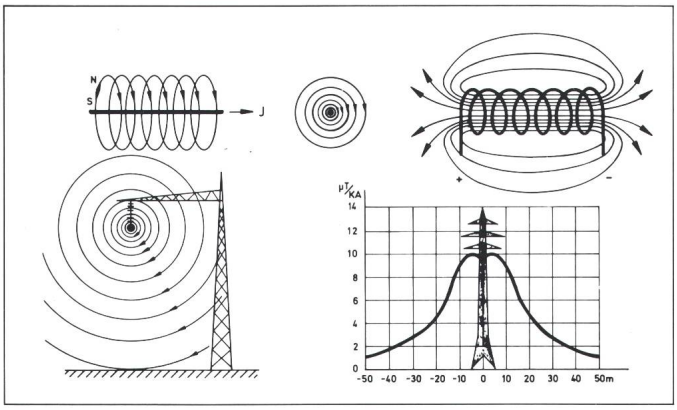



**Fig. 11**
**Magnetfelder um Leiter und Spulen**

im praktischen Leben rechnen muss. Das magnetische Erdfeld mit 40 bis 50 μT (in München 47 μT) sei als Vergleichsgrösse genannt. Es ist allerdings nahezu ein Gleichfeld, während Magnetfelder unter Freileitungen 50 Hz Wechselfelder bzw. Drehfelder mit Werten zwischen 4 und 50 μT sind.

Im Haushalt treten in der Regel weitaus grössere Magnetfelder auf, aber auch alle diese Felder sind vernachlässigbar klein (mT-Bereich) im Vergleich zu den Magnetfeldern, die bei industrieller Anwendung erreicht werden. Und den Spitzenplatz bei der Anwendung von starken Magnetfeldern nimmt schliesslich die Medizin ein. Bei der Kernspin-Tomographie, die inzwischen vielfach an die Stelle der Röntgengeräte getreten ist, werden Magnetfelder von 0,3 bis 2 Tesla gebraucht. Dies sind extreme Werte, die sich nur mit grossem technischen Aufwand erreichen lassen.

In Figur 11 wird das Entstehen von Magnetfeldern durch elektrischen Strom gezeigt. Fliesst ein Strom durch einen geraden Leiter im Luftraum (Seil einer Freileitung), so bildet sich kreisförmig um diesen ein Magnetfeld, dessen Stärke proportional zum Abstand vom Leiter absinkt. Felder dieser Art sind relativ schwach, weil jede Verstärkung fehlt, die sich etwa durch grosse Windungszahlen und Eisenkerne ergeben könnte.

Wie wirkt nun das magnetische Feld auf Lebewesen? Die linke Hälfte von Figur 12 zeigt den beachtlichen Messaufwand solcher Versuche [22]. In der rechten Bildhälfte ist ein Tierversuch zu sehen – und auch, wie rasch das magnetische Feld seitlich der Spulen abklingt. Von Wirkungen auf Menschen ist nur bekannt, dass sich bei grösseren Feldstärken visuelle Reize einstellen können, d.s. Nervenreizungen im Augenbereich, die man «Phosphene» nennt. Gesundheitliche Störungen hat man allerdings bisher selbst dort nicht feststellen können, wo Menschen längerfristig in starken Feldern arbeiten.

Bei den elektrischen Feldern wurde die Möglichkeit von Abschirmungen erwähnt. Diese Hilfe gibt es bei magnetischen Feldern praktisch nicht.

Magnetische Felder durchdringen unbehindert den ganzen Körper von Lebewesen und können dort in Bereichen guter Leitfähigkeit (Blutbahnen) auch Wirbelströme induzieren. Daraus folgende Reizwirkungen oder auch Erwärmungen im Zellbereich sind jedoch erst bei Feldstärken feststellbar, die um Zehnerpotenzen über den Werten der praktischen technischen Anwendung – insbesondere im Bereich der öffentlichen Stromversorgung – liegen.

Auch die Erforschung möglicher gesundheitlicher Wirkungen von Ma-

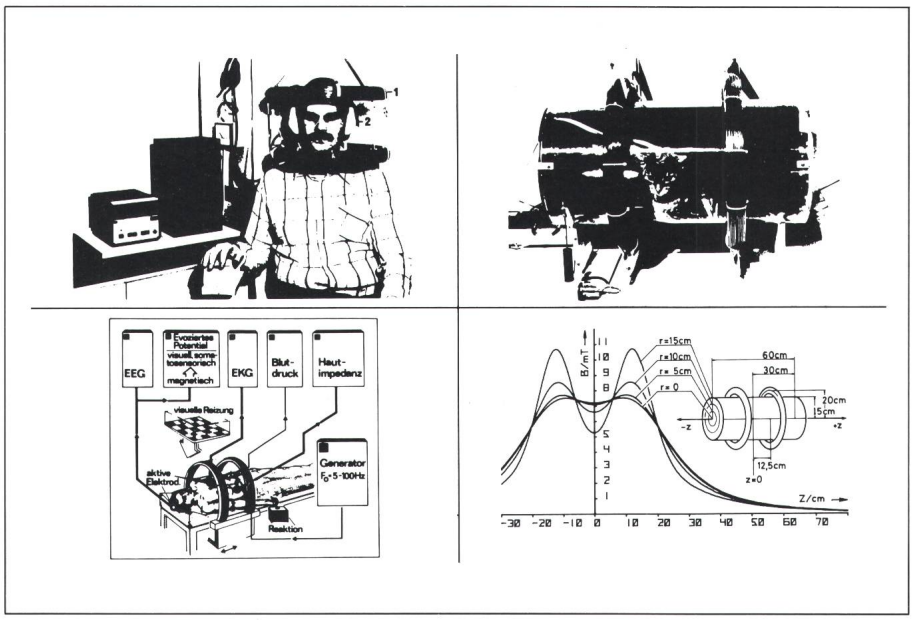



**Fig. 12 Wirkungen magnetischer Felder auf menschliche und tierische Organismen** Quelle: Silny [22]

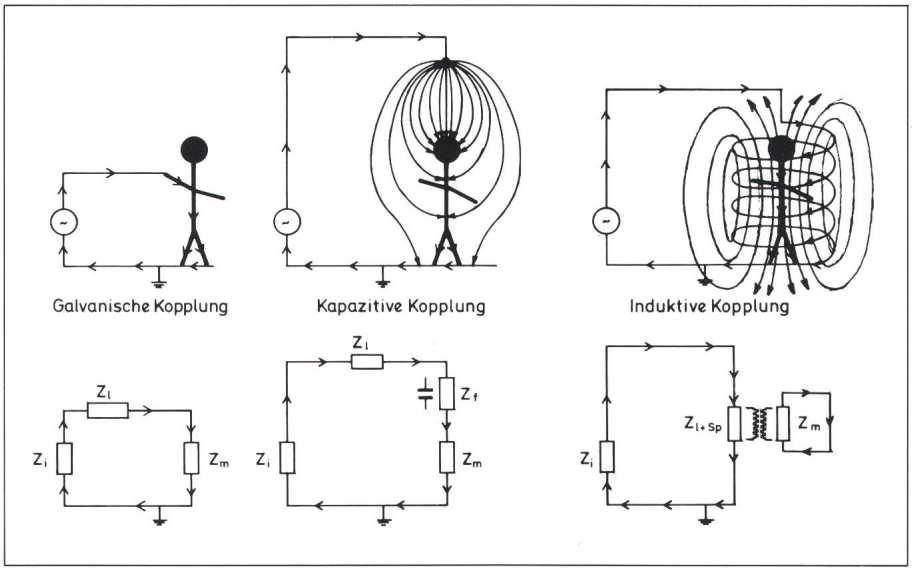



**Fig. 13 Mögliche Arten der Strombelastung**

gnetfeldern stand lange Jahre im Mittelpunkt des Interesses vieler Wissenschaftler [2; 6; 9; 14; 22]. Soweit es technische Frequenzen um 50 Hz betrifft, ist man sich inzwischen einig, dass magnetische Flussdichten bis 5 mT keine Effekte haben. Darüber hinaus sind nur die erwähnten «Phosphen»-Erscheinungen bekannt. Die unter Freileitungen zu erwartenden magnetischen Flussdichten liegen zwei bis drei Zehnerpotenzen darunter; sie sind also in keiner Weise gesundheitsgefährdend.

Zusammenfassend sei nochmals festgehalten, dass es nicht die Felder sondern die von ihnen verursachten Ströme sind, mit denen man sich auseinandersetzen muss. Figur 13 zeigt in vereinfachter Form, wie dies zu verstehen ist. Links ist die direkte galvanische Koppelung dargestellt. Der Mensch berührt eine Stromquelle und schliesst damit gemäss der darunter gezeigten Ersatzschaltung direkt den Stromkreis. In der Mitte ist dargestellt, wie das elektrische Feld überbrückend auf kapazitivem Wege – also mittels Verschiebestrom – wiederum den Stromkreis schliesst. Rechts schliesslich soll durch den in einer Spule stehenden Menschen zum Ausdruck kommen, dass durch die Wirkung des magnetischen Feldes auf induktivem Wege im Körper Wirbelströme gebildet werden.

### Herzschrittmacher in elektrischen und magnetischen Feldern

Immer mehr – vor allem ältere – Menschen erhalten mit Herzschrittmachern eine lebenserhaltende Hilfe; es stellt sich die Frage, wie diese Geräte auf elektrische und magnetische Felder reagieren.

Dem Verfasser ist keine Veröffentlichung bekannt, in der über die Schädigung des Trägers eines Herzschrittmachers berichtet wird. Dennoch kann im Prinzip nicht ausgeschlossen werden, dass elektrische und magnetische Felder von Freileitungen die Funktionsweise einiger Herzschrittmacher beeinträchtigen können.

Die ersten Herzschrittmacher stimulierten das Herz mit einer fest eingestellten Impulsrate (asynchroner Typ); sie wurden durch elektrische Einflüsse von aussen wenig gestört. Die neuen und weiter verbreiteten Herzschrittmacher sind synchrone Typen; sie sind normalerweise im sogenannten «Aus»-Zustand und geben an das Herz erst dann Impulse, wenn der Herzschlag sich verlangsamt oder ganz aussetzt. Ihre Funktion besteht darin, dass sie die elektrische Aktivität des Herzschlages überwachen.

Nun können in einigen Fällen Feldeinflüsse einen Ausfall der körpereigenen elektrischen Herzaktivität vortäuschen. In diesem Falle beginnt der Herzschrittmacher regelmässig zu arbeiten, obwohl das Herz normal schlägt. Man spricht dann von einem asynchronen Betrieb aus Gründen der Sicherheit. Nach Auffassung von Herzspezialisten ist damit kein Gesundheitsrisiko verbunden.

Die Empfindlichkeit eines Herzschrittmachers gegenüber Feldeinflüssen hängt nicht nur von seiner Bauart ab, sondern auch davon, wie er im Körper implantiert ist. In der Regel sitzt der Herzschrittmacher knapp unter der Haut; ein oder zwei Drähte werden in Venen eingeführt, die zum Herz führen. Damit können elektrische Ströme, die beispielsweise durch elektrische und magnetische Felder im Körper entstehen, oder die durch direkte Berührung von spannungsführenden Teilen fliessen und schliesslich auch Ströme, die durch Aufladungserscheinungen ausgelöst werden, in diesen Drähten Spannungen induzieren.

Soweit es sich um zwei Drähte handelt, die in der Regel eng nebeneinander liegen ist es unwahrscheinlich, dass dabei Spannungsdifferenzen entstehen, die den asynchronen Betrieb auslösen. Handelt es sich jedoch um Einzeldrähte, so kann dies nicht ganz ausgeschlossen werden. Allerdings ist es selbst unter ungünstigsten Bedingungen und unter Höchstspannungsleitungen (380 kV) sehr unwahrscheinlich.

In einer neueren Untersuchung in Grossbritannien wurden freiwillige Patienten, die einen monopolaren und mehrfach programmierbaren (also eindrähtigen) Schrittmacher trugen, einem elektrischen 50-Hz-Feld mit 20 kV/m ausgesetzt. Obwohl Körperströme bis zu 300 μA flossen, gingen die Schrittmacher nicht in den asynchronen Betrieb über; auch andere schädliche Wirkungen wurden nicht registriert. Trotz aller dieser bereits gesammelten positiven Erfahrungen sollte dennoch Trägern von Herzschrittmachern vorsorglich empfohlen werden, sich nicht unmittelbar in Höchstspannungsschaltanlagen aufzuhalten und ebenso auch die Nähe von technischen Anlagen (Induktionsöfen, Generatorabteilung in Kraftwerken) zu meiden, in deren Bereich mit stärkeren Magnetfeldern zu rechnen ist. Zumindest sollte in solchen Fällen vorab geklärt werden, ob die implantierten Schrittmachertypen gegen Feldeinwirkungen empfindlich reagieren.

Sieht man von diesen technischen Anlagen ab, die ausserdem auch nicht öffentlich zugänglich sind, so darf man aus allen bisher gesammelten Erfahrungen den Schluss ableiten, dass Träger von Herzschrittmachern durch allgemein zugängliche Einrichtungen der Stromversorgung oder durch elektrische Haushaltsgeräte nicht gefährdet sind.

## 4. Koronaeffekte an Drehstromleitungen

Steigert man die an einen dünnen Draht angelegte elektrische Spannung laufend, so beginnt es zunächst mehr und mehr hörbar zu prasseln. Schliesslich bildet sich rund um den Draht eine leuchtende Hülle mit blauvioletter Farbe, deren Dichte ebenfalls mit der angelegten Spannung wächst. Man nennt Erscheinungen dieser Art Koronaeffekte. Auch sie haben natürliche Vorbilder, die unter dem Namen Elmsfeuer bekannt sind.

Wie erklärt sich nun dieser Effekt?

Mit zunehmender Spannung – also vorwiegend im Höchstspannungsbereich – treten auf Seilen und Armaturenkanten mit kleinem Krümmungsradius extrem hohe Feldstärken auf; die Luft im unmittelbaren Seil- oder Kantenbereich wird elektrisch durchschlagen. Dies erzeugt die prasselnden Geräusche und auch die Lichterscheinungen, von denen die Rede war (Fig. 14). Freie Elektronen werden durch das starke elektrische Feld so beschleunigt, dass ihre Bewegungsenergie ausreicht, neutrale Moleküle zu zerschlagen; es kommt also zur Stossionisation bzw. Gasentladung.

Diese Koronaerscheinungen verursachen:

- zusätzliche Übertragungsverluste
- Funkstörungen im unteren Frequenzbereich
- akustische Geräusche
- Ozon- und $NO_x$-Bildung.

Welche Möglichkeiten gibt es, Koronaerscheinungen in zulässigen Grenzen zu halten?

Man muss in diesem Zusammenhang wissen, dass die Durchbruchsfeldstärke der Luft bei Schönwetter etwa 18 $kV_{eff}$/cm [16] beträgt. Bei Schlechtwetter mit Regen, Nebel und bei Rauhreif sinkt dieser Wert schnell auf 11 $kV_{eff}$/cm und darunter. Soll Korona unterbleiben, so muss durch die Wahl geeigneter Seilquerschnitte und Armaturen dafür gesorgt werden, dass die Randfeldstärke gewisse Werte nicht überschreitet. Technisch und wirtschaftlich sind Werte von weniger als 14 $kV_{eff}$/cm allerdings kaum noch realisierbar. Bei schlechten Witterungsbedingungen lässt sich deshalb ein gewisser Koronapegel nicht vermeiden.

Wählt man beispielsweise bei hohen Betriebsspannungen zu dünne Seil-

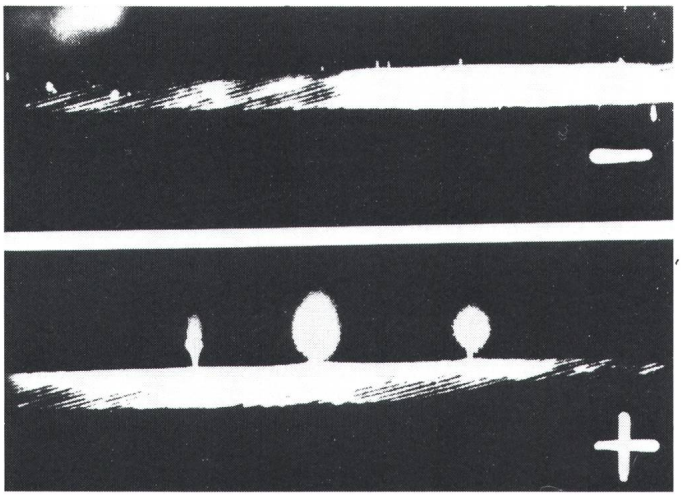



**Fig. 14**
**«Streamers» auf Freileitungen**

**Fig. 15**
**Korona auf einer Hochspannungsleitung mit zu kleinen Seilquerschnitten**

querschnitte, so breiten sich die Entladungen, wie Figur 15 zeigt, auf die gesamten Seillängen aus. Um derartige Erscheinungen zu vermeiden, gibt es mehrere Möglichkeiten (Fig. 16). Zunächst wurde versucht, bessere Ergebnisse durch Vergrösserung der Seilquerschnitte zu erzielen. Diese Möglichkeit ist wegen ihres Gewichtes allerdings begrenzt. Auch Hohlseile brachten nicht den gewünschten Erfolg; sie waren ausserdem seiltechnisch zu kompliziert. Sehr gute Ergebnisse lassen sich hingegen mit den in den 20er Jahren entwickelten Bündelleitern erzielen, die sich inzwischen auch weltweit durchgesetzt haben.

Heute werden alle Höchstspannungsleitungen (über 110 kV) mit Leiterbündeln ausgerüstet; man erreicht damit bezüglich Koronafestigkeit die Grenze des technisch Machbaren.

Bei Schlechtwetter kommt es zwangsläufig auf den Seilen zur Tropfenbildung. Diese Tropfen zerplatzen nun unter Einwirkung der Randfeldstärken und verstärken auf diese Weise das zischende und prasselnde Geräusch der konstruktiv bedingten Restkorona noch ganz beachtlich. Eine Eliminierung dieses Effektes ist nicht möglich. Die Stärke von Koronageräuschen kann sich dabei im Rahmen einer Zehnerpotenz bewegen. Koronaeffekte sind also abhängig:

- vom Aufbau der Seilbündel
- von der jeweiligen Witterung und
- von der Betriebsspannung der Leitung, wobei auch die lastbedingten täglichen Spannungsschwankungen mit eine Rollen spielen können.

Man kann deshalb für den Einsatz des Koronaeffektes auf Freileitungen keinen festen Wert angeben. Eine Beschreibung mit statistischen Grenzwerten wird notwendig, sei es in Form eines statistischen Kurvenverlaufes, oder durch Angabe des üblichsten und des untersten Wertes.

Beispielsweise liegen bei einer 380-kV-Leitung je System die mittleren jährlichen Koronaverluste um 2 kW/km. Dem entspricht ein mittlerer Schönwetterwert von 0,7 kW (80% des Jahres) und ein mittlerer Schlechtwetterwert von 10 kW/km (20% des Jahres) [17].

Je nach Bündelausbildung liegen die akustischen Geräuschpegel von 380-kV-Leitungen bei Feuchtigkeit zwischen 40 und 50 dB(A). Geht man davon aus, dass der Grundgeräuschpegel um 40 dB(A) liegt, dann erreicht der Summenpegel eines Zweifachbündels rund 51 dB(A), der eines Vierfachbündels rund 45 dB(A); jeweils gemessen in 40 m Entfernung seitlich der Trassenachse. Das sind bemerkenswerte Unterschiede, die es begründen können, dass trotz erheblicher Mehrkosten heute dem Vierfachbündel beim Bau von neuen Höchstspannungsleitungen des öfteren der Vorzug

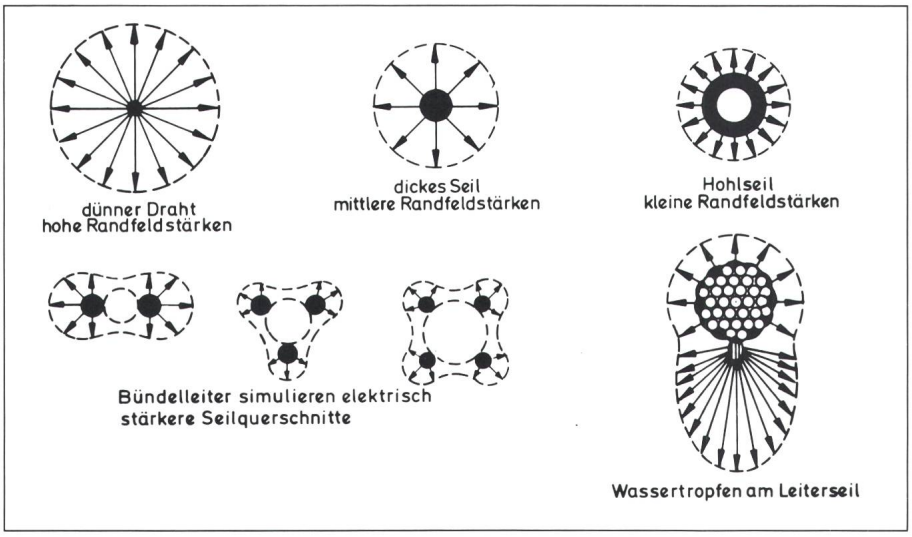



**Fig. 16 Korona auf Freileitungen und Lösungen zur Minimierung dieser Effekte**

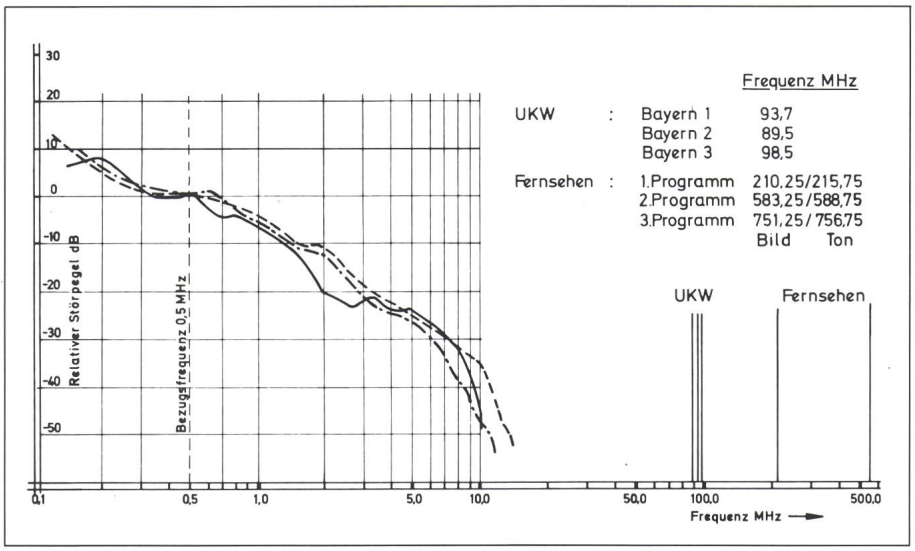



**Fig. 17 Frequenzbereiche von Korona, Rundfunk und Fernsehen**
Quelle: CIGRE [19]

gegeben wird. Natürlich ist es aber auch möglich, den Koronageräuschpegel durch stärkere Seilquerschnitte zu verbessern.

Koronageräusche von 110-kV-Leitungen bleiben allerdings unter dem zulässigen Geräuschpegel, der in den Nachtstunden im Bereich reiner Wohnsiedlungen 35 dB(A) nicht überschreiten darf.

Die Behauptung, dass Koronaerscheinungen Funk- und Fernsehstörungen verursachen würden, stimmt so pauschal nicht. Figur 17 zeigt, dass Korona nur im Frequenzband von 0,15 MHz bis etwa 4 MHz störend wirkt [19]. Dies führt zwar in Leitungsnähe zu Störungen im Lang-, Mittel- und Kurzwellenbereich; ungestört bleiben jedoch alle UKW- und Fernsehfrequenzen. Ihre Bandbreite von etwa 80 bis 700 MHz und darüber besitzt von den Störfrequenzen ausreichende Abstände.

Natürlich können von Freileitungen durchaus Funk- und Fernsehstörungen ausgehen. Dies ist etwa der Fall, wenn es durch Mängel (etwa lockere Erdverbindungen) zu Aufladungserscheinungen mit Funkenbildung kommt. Dies hat jedoch mit Korona nichts zu tun und lässt sich im Rahmen von Wartungsarbeiten beseitigen.

Seit etwa zwei Jahren wird von Freileitungsgegnern behauptet, Koronaerscheinungen seien für das Waldsterben verantwortlich; sie begründen dies mit dem Hinweis, dass durch diesen Effekt Ozon und Stickoxide entstehen. Im Prinzip trifft dies zwar zu, doch macht man sich dabei offensichtlich völlig falsche Vorstellungen über die dabei produzierten Mengen. Es soll deshalb auch hier wieder versucht werden, zunächst Grundlagen aufzuzeigen, um anschliessend dann mit Zahlen korrekte Relationen zu schaffen [10; 17; 20; 21].

### *4.1 Ozonbildung*

Ozon bildet sich in Prozessen aus atmosphärischem Sauerstoff und der Strahlungsenergie der Sonne unter Abgabe von Wärme. Vorwiegend spielt sich dieser Prozess in Höhen von 15–70 km ab; jährlich werden auf diese Weise etwa 140 000 000 t Ozon erzeugt. Würde man dieses Spurengas allerdings konzentrieren, so ergäbe sich eine nur etwa 3 mm dicke Schicht reinen Ozons rund um den Erdball.

Der Ozongürtel absorbiert die für uns tödliche UV-A-Strahlung völlig (Wellenlänge kürzer als 290 Nanometer), und schützt uns teilweise vor der UV-B-Strahlung (Wellenlänge 290–320 Nanometer), die beim Menschen z.B. Sonnenbrand verursacht. Ozon ist ein sehr aktives, aber auch sehr instabiles Gas. Es zerfällt also wieder relativ schnell, wobei seine Halbwertzeit etwa zwischen 20 Minuten und einer Stunde liegt; Feuchtigkeit – wie etwa Regen – beschleunigt dabei den Zerfallsprozess. Da der ständigen Ozonerzeugung auch ein ständiger Zerfall gegenübersteht, bildet sich ein Gleichgewichtszustand aus, der in der Stratosphäre zu den eingangs erwähnten Werten führt.

Wenn sich dieser Prozess auch vorwiegend in grossen Höhen abspielt, so entsteht doch ein weiterer Teil der Ozonkonzentration in bodennahen Bereichen auf gleiche Weise. Vor allem gilt dies für Reinluftgebiete, in denen die Ozonkonzentration im Mittel um 30 ppb (parts per billion = $10^{-9}$) liegt. Dieser Wert unterliegt allerdings Schwankungen, wobei im Sommer das Niveau höher liegt als im Winter. Wärme ist also ein wesentlicher, mitwirkender Faktor. In besiedelten Gebieten – insbesondere in Ballungsräumen – ensteht Ozon zusätzlich auch noch durch fotochemische Reaktionen. Wichtige Ausgangspunkte sind dabei Stickoxide und reaktive Kohlenwasserstoffe; sie entstehen bei der Verbrennung organischer Substanzen – also etwa durch Verkehr, Industrie und Hausbrand. Die damit verbundene Anhebung des Ozonpegels ist beachtlich, sie erreicht Werte bis über 100 ppb. Der Sommer- und Winterpegel wird dabei noch durch einen Tag- und Nachtpegel stark überlagert; in der Regel misst man die Höchstwerte in den Nachmittagsstunden, weil Wärme stark reaktionsfördernd wirkt.

### *4.2 Bildung von Stickstoffoxiden ($NO_x$)*

Stickstoffoxide entstehen – wie schon erwähnt – bei der Verbrennung organischer Substanzen, ebenfalls aber auch durch die Strahlungsenergie der Sonne und bei elektrischen Entladungen – also etwa bei Gewittern.

Da Stickstoffoxide an der bodennahen Ozonbildung beteiligt sind, wird durch Verbrennungsprozesse eine beachtliche Ozonproduktion ausgelöst. Deshalb auch liegt in Ballungsräumen die Ozonkonzentration über den Werten in Reinluftgebieten; Werte um 50 ppb sind nicht ungewöhnlich.

Ähnlich wie bei gewitterbedingten Blitzentladungen entsteht durch Elmsfeuer (im technischen Bereich Korona genannt) oder auch in Lichtbögen (im Bereich industrieller Anwendung) ein Gasgemisch, das sich etwa zu 90% aus Ozon und zu rund 10% aus Stickstoffoxiden zusammensetzt.

### 4.3 Zusammenfassung

*Theoretisch* müsste man mit einer Kilowattstunde 1200 g Ozon erzeugen können. *Praktisch* lassen sich selbst mit speziell konstruierten Ozongeneratoren je kWh nur 150 g Ozon erzeugen; der überwiegende Anteil setzt sich prozessbedingt in Wärme um. Noch wesentlich schlechter ist der «Wirkungsgrad» der Ozonerzeugung durch Freileitungskorona. Messbar ist sie über-

haupt nur dort, wo an einzelnen Störstellen (wie Staubablagerung, Verletzungen der Drahtoberfläche oder Regentropfen) die Durchbruchsfeldstärke erreicht bzw. überschritten wird. Auch beschränkt sich die messbare Ozonerzeugung auf positive «Streamer»-Entladungen (Fig. 14).

Zusammenfassend lässt sich aufgrund von Versuchen nachweisen, dass die Ozonerzeugung einer 380-kV-Leitung durchschnittlich nicht mehr als 1 g/kWh beträgt. Bei Regen und Feuchtigkeit liegen die Werte etwas höher; allerdings gleicht die durch feuchte Witterung bedingte Verkürzung der Halbwertszeit dies wieder aus.

Über das Jahr gesehen, betragen die mittleren Koronaverluste eines 380-kV-Systems je km 2 kW bzw. 2 kWh. Dem entsprechen 2 g Ozon/h und pro km Stromkreislänge. Wie unbedeutend dies ist, kommt auch dadurch zum Ausdruck, dass schon in 5 m Abstand von einem 380 kV-System nur noch eine Änderung der natürlichen Ozonkonzentration von 0,3 bis max. 1,0 ppb gemessen werden kann; in grösseren Entfernungen – etwa am Boden unter einer 380-kV-Leitung – ist eine Abweichung von den Umgebungswerten überhaupt nicht mehr nachweisbar.

Dieser Tatsache steht entgegen, dass in Ballungsräumen durch Verkehr, industrielle Prozesse und Hausbrand die natürlich Ozonkonzentration von 30 ppb auf Werte bis über 100 ppb angehoben wird.

Diese vergleichende Betrachtung ist notwendig, wenn Höchstspannungsleitungen in Diskussionen einbezogen werden, die sich mit dem Thema «Waldsterben» befassen. Schliesslich noch zwei weitere wichtige Argumente, die ebenfalls gegen eine vermutete Mitwirkung der Freileitungen an dem Waldsterben sprechen:

- Koronaerscheinungen an Freileitungen mit Betriebsspannungen unter 380 kV (also 20 kV und 110 kV) sind so minimal, dass Veränderungen der natürlichen Ozonkonzentration überhaupt nicht mehr messtechnisch nachweisbar sind.
- Das 380-kV-Freileitungsnetz könnte, wenn überhaupt, wegen der kurzen Halbwertszeit des Ozons ohnedies nur in eine Diskussion über Waldschäden mit einbezogen werden, soweit einzelne Leitungsabschnitte sich in unmittelbarer Waldnähe befinden; dies ist ein sehr geringer Prozentsatz der Gesamtlänge. Es kommen also keine breitflächig wirkenden Bereiche zustande, wie sie etwa bei Ballungsräumen gegeben sind.

Auch soweit es das Waldsterben betrifft, sind somit die Freileitungen völlig unbegründet in die Schusslinie der Diskussionen geraten. Man muss vielmehr, sollte Ozon wirklich einer der auslösenden Faktoren sein, den Hebel dort anzusetzen, wo er wirksam werden kann: beim Verkehr, bei industriellen Prozessen und beim Hausbrand.

Zieht man nunmehr Bilanz, so schneiden die Freileitungen in ihrer Bewertung als Umweltfaktor relativ gut ab. Alle Vermutungen über angebliche Gefährdungen der Umwelt und der menschlichen Gesundheit erweisen sich bei näherer objektiver Betrachtung als nicht stichhaltig.

## Gutachten der Eidgenössischen Kommission für elektrische Anlagen

Die Eidg. Kommission für elektrische Anlagen hat soeben ein Gutachten über die «Beeinflussung der Umwelt durch elektromagnetische Felder» ausgearbeitet, in dem sowohl niederfrequente Felder (z.B. von Anlagen der elektr. Energieversorgung) als auch hochfrequente Felder (z.B. durch Radiowellen) behandelt werden. Das Gutachten kommt zu dem Schluss, dass relevante schädliche Einwirkungen auf Tiere und Pflanzen in der freien Natur durch elektromagnetische Felder oder durch Sekundäreffekte bis heute nicht nachgewiesen werden konnten. Kritische Intensitäten treten nur in unmittelbarer Nähe hochspannungsführender Teile von Energieversorgungsanlagen sowie in Nahfeldern industrieller, medizinischer und militärischer Hochfrequenzgeräte und Antennen auf, d.h. in solchen Bereichen, die der Öffentlichkeit gar nicht zugänglich sind oder in denen sich ein extrem kleiner Kreis von vorwiegend Fachleuten höchstens so kurzfristig aufhält, dass mit an Sicherheit grenzender Wahrscheinlichkeit keine Schädigungen auftreten können.

Der über 90seitige Bericht mit zahlreichen Formeln und Abbildungen sowie über 40 Literaturhinweisen ist bei der Eidg. Drucksachen- und Materialzentrale, 3000 Bern, erhältlich. Red.

### Literatur


[1] *R. Hauf:* Untersuchungen zur Wirkung energietechnischer Felder auf den Menschen. Beitrag zur Ersten Hilfe und Behandlung von Unfällen durch elektrischen Strom. Sonderheft, H. 9, Forschungsstelle für Elektropathologie, Freiburg.

[2] *J. Silny:* Wirkung elektrischer Felder auf den Organismus. Medizinisch-Technischer Bericht, Institut zur Erforschung elektrischer Unfälle. Berufsgenossenschaft Feinmechanik und Elektrotechnik, Köln 1979.

[3] *K.H. Schneider, H. Studinger, H. Steinbigler, D. Utmischi, K.H. Weck* and *I. Wiesinger:* Displacement currents to the human body caused by the dielectric field under overhead lines. CIGRE Report Group 36, 1974.

[4] *V.P. Korobkova, A. Morozov, D. Stolarov* et *A. Yakub:* Influence du Champ électriqué dans les postes à 500 et 750 kV sur les équipes d'entretien et les moyens de leur protection. Rapport CIGRE 23-06 Session de 1972.

[5] *H. König:* Unsichtbare Umwelt, der Mensch im Spielfeld elektromagnetischer Kräfte, Eigenverlag München.

[6] *H. Schaefer:* Die Wirkungen elektrischer technischer Wechselfelder hoher Feldstärke auf den Menschen. 6. Internat. Kolloquium über die Verhütung von Arbeitsunfällen und Berufskrankheiten durch Elektrizität IVSS. Wien, Schlussbericht.

[7] *A. Bayer, J. Brinkmann,* und *G. Wittke:* Experimentelle Untersuchungen an Ratten zur Frage der Wirkung elektrischer Wechselfelder auf Lebewesen; Elektrizitätswirtschaft 76(1977), H. 4, S. 77...81, 6 B.

[8] World Health Organization: Regional Office for Europe, Copenhagen, Nonionizing-Radiation-Protection.

[9] *J.H. Bernhardt:* Gefährdung von Personen durch elektromagnetische Felder. StH-Bericht 2/1983.

[10] Electricité de France: Les lignes de transport et l'environnement.

[11] *R. Karl:* Methoden zur Bestimmung der Stromverteilung im menschlichen Körper; Tätigkeitsbericht als Mitarbeiter der Forschungsstelle für Elektropathologie Freiburg.

[12] *G. Newi* et alt.: Biologische Wirkungen elektrischer, magnetischer und elektromagnetischer Felder; expert-Verlag, Band 106.

[13] *U. Warnke:* Effects of electric charges on honneybees. Bee World 57, 50, 1976.

[14] *H.-J. Haubrich:* Das Magnetfeld im Nahbereich von Drehstromfreileitungen. Elektrizitätswirtschaft Jg. 73(1974), H. 18.

[15] *R. Sander:* Biologische Wirkungen magnetischer 50-Hz-Felder. Medizinisch-Technischer Bericht, Institut zur Erforschung elektrischer Unfälle. Berufsgenossenschaft Feinmechanik und Elektrotechnik, Köln 1983.

[16] *H. Langrehr:* Rechnungsgrössen für Hochspannungsanlagen.

[17] Forschungsgemeinschaft für Hochspannungs- und Hochstromtechnik e.V. (FGH): Fachbericht: Die Erzeugung von Oxidantien an Hochspannungsfreileitungen durch Koronaentladungen.

[18] *W. Renner:* Die Auswahl der Leiterseile beim Ausbau des österreichischen 380-kV-Netzes. E und M, Jahrgang 94, H. 11.

[19] Interferences Produced by Corono Effect of elektric Systems: Description of Phenomena, Practical Guide for Calculation. Sonderdruck des CIGRE. 112, bd. Haussmann. Paris 1974.

[20] *J. Lee, J. Brunke, G. Reiner* und *F. Shon:* Bonneville Power Administration, US Department of Energie 1982; Elektrische und biologische Effekte unter Freileitungen: ein Überblick.

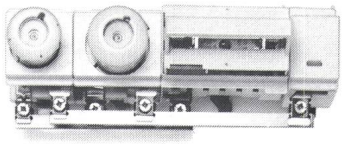
[21] *J. Luge:* Das Ozonproblem und der Versuch einer völkerrechtlichen Lösung. Natur + Recht 1985, H. 1.

[22] *J. Silny:* Beeinflussung des Organismus durch starke niederfrequente magnetische Felder. Medizinisch-Technischer Bericht, Institut zur Erforschung elektrischer Unfälle. Berufsgenossenschaft Feinmechanik und Elektrotechnik, Köln 1981.

# Lange Gesichter? Bei uns nicht.

Sie erinnern sich, vor Jahren irgendwo besonders günstig Teile gekauft zu haben. Aber: Erinnert man sich auch dort? Sind Ersatzteile jetzt noch lieferbar? Wenn nicht, kann guter Rat teuer werden. Und das Auswechseln des ganzen Systems bedeuten. Deshalb investieren wir bei Weber in unsere Produkte nicht nur typisch schweizerische Präzision zugunsten der Sicherheit. Sondern garantieren auch unbeschränkte Verfügbarkeit. Zugunsten von Ihnen.

**Uniline von Weber.**



Sicherungselemente, die das Verschienen erleichtern. Und dank universellem System die Lagerhaltung vereinfachen. Uniline ermöglicht das Ein- und Ausbauen auch bei montierter Sammelschiene. Neutralleitertrenner können angebaut, Frontabdekkungen separat geliefert werden. Uniline ist eine vollständige Linie von 25 – 160 A, alle mit integrierter hellblauer Neutralleiterbezeichnung.

**WEBER**

**Swiss-Made für die ganze Welt.**

Weber AG
Elektrotechnische Apparate
und Systeme
CH-6020 Emmenbrücke
Telefon 041 50 55 44

B&S

# Montagefreundlich

Das neue gummiartige Ceander-Kabel XKT-RADOX verbindet die Eigenschaften eines GKT mit den Vorteilen eines elektronenvernetzten RADOX (hohe Alterungsbeständigkeit, höhere Strombelastbarkeit).

Verglichen mit einem herkömmlichen TT-Kabel gleichen Querschnittes weist das XKT-RADOX einen rund 10% kleineren Aussendurchmesser auf – verbunden mit entsprechend höherer Biegsamkeit, auch bei tiefen Temperaturen.

Eine weichere Isolation gewährleistet die gute Verarbeitbarkeit, ohne dass Weiterreisswiderstand und Schlitzfestigkeit abnehmen. Die Verträglichkeit mit Vergussmassen sowie die Haftung von Schrumpfteilen ist vorzüglich. (Übrigens: HUBER+SUHNER bietet Ihnen ein vollständiges Sortiment von SUCOFIT-Schrumpfschläuchen, -muffen, -endkappen und -endverschlüssen an.)

Diese Vorteile verdanken Sie der langjährigen Erfahrung von HUBER+SUHNER im Bereich der elektronischen Vernetzung. Verlangen Sie unsere Dokumentation oder den Besuch unseres technischen Beraters.

**HUBER+SUHNER AG**
**Geschäftsbereich Kabel**

| | |
|---|---|
| CH-8330 Pfäffikon | CH-9100 Herisau |
| ☎ 01 950 40 20 | 071 53 15 15 |
| Tx 827 600 | 77 503 |
| FAX 01 950 02 42 | 071 52 13 35 |

# Das neue, gummiartige XKT-RADOX von HUBER+SUHNER